

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

GUILHERME HENRIQUE ALVES PINTO

**ESTUDOS DO REAPROVEITAMENTO TÉRMICO DO BAGAÇO DE LARANJA:
SECAGEM EM LEITO DE JORRO MODIFICADO E PELETIZAÇÃO**

SÃO CARLOS

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

GUILHERME HENRIQUE ALVES PINTO

**ESTUDOS DO REAPROVEITAMENTO TÉRMICO DO BAGAÇO DE LARANJA:
SECAGEM EM LEITO DE JORRO MODIFICADO E PELETIZAÇÃO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

Coorientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

SÃO CARLOS

2024

*“Devemos acreditar que somos talentosos
para algumas coisas, e que essa coisa, a
qualquer custo, deve ser alcançada”*

Marie Curie

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, e acima de tudo, a Deus por encher minha vida de bênçãos, me dar saúde e sabedoria, ser luz nos momentos de dificuldades e ser minha segurança. Sem suas bênçãos eu não chegaria à conclusão desta etapa tão importante em minha vida.

A meus pais, Juscimária e Reginaldo, verdadeiros guerreiros, que não mediram esforços para minha formação desde a infância. Todo o carinho, conselhos e apoio serviram para me tornar a pessoa que sou. Espero sempre deixá-los orgulhosos.

A minhas irmãs, Thayná e Evelyn, por serem minhas parceiras ao longo de toda minha vida, sempre apoiando minhas escolhas. A minha avó, Vera, meus tios, primos e padrinhos, pelos momentos alegres, apoio e oração nos momentos em que eu mais precisava.

A Luana, por encher minha vida de alegrias e ser o meu porto seguro nos momentos difíceis. Sua presença torna meus dias mais leves e contigo tenho a força necessária para vencer qualquer dificuldade.

A meu orientador, Prof. Fábio, por sua parceria que vem desde a minha graduação, por todo o suporte durante a realização do projeto, por compartilhar sua experiência e por ser um verdadeiro exemplo de que toda adversidade pode ser superada. A meu coorientador, Prof. Freire, profissional capaz de impactar todos ao seu redor e exemplo de ser humano. Levarei a amizade de vocês para toda a vida.

À Profa. Maria do Carmo, Prof. Gustavo, Prof. Nivaldo e Prof. Wanderley, por prontamente aceitarem o convite para participar da defesa desta tese de doutorado e por todas suas contribuições.

Aos técnicos Edílson, Samuel e Luan, por todo o suporte. Sem suas contribuições não seria possível conduzir este projeto com a devida qualidade.

A meus companheiros do Centro de Secagem por todos os momentos alegres, por toda ajuda, pelas risadas, pelas confraternizações, pelos almoços e por serem o melhor grupo de pesquisa. A todos os amigos de São Carlos por estarem presentes nos momentos mais importantes de minha vida.

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

RESUMO

O uso de biomassas como fonte de energia renovável vem conquistando espaço e levando a inovações no setor produtivo, buscando atender um desenvolvimento sustentável e destinando subprodutos que antes seriam descartados. O Brasil é um dos protagonistas na produção de laranjas no mundo, o maior exportador de suco, sendo o bagaço de laranja um subproduto abundante com um potencial como biocombustível pouco explorado, sendo necessário o aprimoramento técnico para viabilizar sua utilização. Com base nessa realidade, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a secagem do bagaço de laranja em leito de jorro para a obtenção de biomassa seca direcionada a uma etapa de peletização. Para tanto, foi avaliada a influência da mistura de CaO aliada à prensagem como pré-tratamento, a fluidodinâmica no leito de jorro convencional (LJC) e a fluidodinâmica do leito de jorro com agitação mecânica (LJMM) com pás inclinadas variando a altura de leito estático. A secagem foi conduzida no LJMM variando a temperatura do ar de 40 a 80 °C e a vazão de ar de 1 a 5 vezes a velocidade de mínimo jorro, avaliando o seu efeito sobre o tempo de secagem e qualidade dos pellets. A biomassa seca foi peletizada utilizando três estratégias distintas para melhorar suas propriedades físicas e mecânicas: redução do tamanho de partícula, adição de ligantes e torrefação. Os pellets foram caracterizados quanto à durabilidade, resistência ao impacto, densidade e absorção de água, além de seu envelhecimento, como variação de cor, densidade e umidade. A adição de cal virgem com a prensagem removeu 31,7% da umidade inicial do bagaço, garantindo certa mobilidade no LJC, embora o processo não tenha sido estável devido à coesão da biomassa. A agitação mecânica viabilizou a operação, agitando todo o leito, aumentando a estabilidade, eliminando o arraste de finos, de até 11,65% pro LJC, e possibilitando o uso da altura de 27 cm, superior à altura máxima de 21,1 cm para o LJC. A análise da fluidodinâmica para o LJMM indicou um aumento na queda de pressão com o aumento da altura do leito, enquanto esta relação não foi observada para a mínima velocidade de operação, indicando que a agitação foi a principal responsável pelo movimento das partículas e o ar pela expansão do leito. A velocidade de operação para o LJMM foi $1,10 \pm 0,14$ m/s, 90% menor em comparação à velocidade de mínimo jorro para altura de 21,12 cm, 11,11 m/s. Durante a secagem da biomassa foi observada a saturação de umidade da corrente gasosa na saída do LJMM, indicando que a vazão de ar fornecida ao sistema não era excessiva, o que implica num bom aproveitamento energético. Não houve uma influência significativa da temperatura e vazão do ar de secagem sobre as propriedades dos pellets. Pellets produzidos a partir do bagaço seco não alcançaram propriedades físicas e mecânicas desejáveis, que seriam uma durabilidade superior a 0,975, resistência ao impacto superior a 0,9, absorção de água inferior a 0,2 e densidade superior a 1200 kg/m³. A redução da granulometria foi necessária para eliminar pontos de fragilidade, pré-definidos pela presença de partículas grosseiras. Adição de carboidratos sólidos e a mistura com borra de café alteraram as propriedades mecânicas dos pellets, embora não o suficiente para alcançar valores desejáveis. Torrefação proporcionou certa hidrofobicidade à biomassa, sendo o único método que reduziu significativamente a absorção de água, embora os pellets fossem frágeis. A adição de melaços à biomassa garantiu uma densidade e resistência adequada, embora os pellets tenham sofrido uma expansão durante um armazenamento de 30 dias. A adição de água pura ou amido gelatinizado proporcionou pellets resistentes, com alta durabilidade e resistência ao impacto, e preservou a estrutura dos pellets após o armazenamento, com a densidade superior a 1200 kg/m³ e pequena variação de cor. Os resultados indicaram a importância da umidade como agente aglutinador, sendo possível integrar a secagem e a peletização para garantir um processo economicamente e operacionalmente viável.

ABSTRACT

The use of biomass as an alternative source of renewable energy has been gaining ground and leading to innovations in the production sector, seeking to support sustainable development and dispose of waste that was previously discarded. Brazil stands out as one of the world's leading producers of oranges, being the largest exporter of juice. Orange pomace, an abundant by-product with largely untapped potential as a biofuel, requires technical improvements to render its use viable. The present work aimed to evaluate the drying of orange pomace in a spouted bed to obtain dry biomass for pelletization. This evaluation involved studying the influence of a CaO mixture combined with pressing as pre-treatment, assessing the fluid dynamics in both the conventional spouted bed (LJC) and the spouted bed with mechanical agitation (LJMM) equipped with inclined blades, with variations in the bed's static height. Drying experiments were conducted in the LJMM, altering air temperature from 40 to 80 °C and air flow from 1 to 5 times the minimum spout velocity. These variations were analyzed for their impact on drying time and the quality of the resulting pellets. The obtained dry biomass underwent pelletization using three distinct strategies to enhance its physical and mechanical properties: particle size reduction, inclusion of binders, and torrefaction. The pellets were subjected to characterization tests measuring durability, impact resistance, density, water absorption, as well as aging properties such as changes in color, density, and humidity over time. The addition of quicklime with pressing removed 31.7% of the initial moisture from the bagasse, facilitating some movement in the LJC. However, the process faced instability due to biomass cohesion. Mechanical agitation proved essential in enhancing operational stability by agitating the entire bed, increasing stability, and eliminating fines carryover, up to 11.65% for LJC, allowing for a bed height of 27 cm, higher than the maximum 21.1 cm for LJC. Fluid dynamics analysis for the LJMM indicated an increase in pressure drop with rising bed height, while this correlation was absent for the minimum operating speed. This suggested that agitation primarily facilitated particle motion and air movement expanded the bed. The LJMM's operating air velocity was measured at 1.10 ± 0.14 m/s, significantly lower (90%) compared to the minimum spout velocity required for a 21.12 cm height (11.11 m/s). During biomass drying, saturation of moisture in the gas stream at the LJMM exit highlighted efficient energy utilization, signifying an adequate airflow supplied to the system. Temperature and drying air flow showed no significant influence on pellet properties. Pellets produced from dried bagasse failed to attain desired physical and mechanical properties, necessitating particle size reduction to eliminate predetermined fragility points due to coarse particles. Strategies involving the addition of solid carbohydrates and mixing with coffee grounds altered pellet mechanical properties but fell short of achieving desirable values. Torrefaction imparted some hydrophobicity to the biomass, ensuring adequate water absorption, albeit resulting in fragile pellets. The addition of molasses enhanced pellet density and strength, but pellets expanded during a 30-day storage period. However, the addition of pure water or gelatinized starch produced resilient pellets, exhibiting high durability and impact resistance, maintaining structural integrity even after storage. These pellets also met the density threshold of 1200 kg/m^3 with minimal color variation. These outcomes underscored the significance of moisture as a binding agent, allowing for the integration of drying and pelletization, ensuring an economically and operationally viable process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representação do processo industrial de derivados da laranja: etapas, equipamentos, produtos e subprodutos.....	20
Figura 1.2. Curva característica para a taxa de secagem em função do tempo.	24
Figura 1.3. Curvas características de taxa de secagem para diferentes materiais, sendo, para cada imagem, o eixo vertical a taxa de secagem e o eixo horizontal de cada figura seu adimensional de umidade.	26
Figura 1.4. Curvas características para a queda de pressão em um leito de jorro preenchido com grãos de areia e diferentes alturas de leito estático.....	29
Figura 1.5. Transição de fases na operação de um leito de jorro e fenômenos associados à instabilidade.....	29
Figura 1.6. O leito de jorro convencional (A) e suas modificações estruturais, o leito de jorro cônico (B), o leito de jorro com tubo draft (C), o leito de jorro com confinador de fonte (D) e o leito de jorro mecânico com parafuso helicoidal (E).....	32
Figura 1.7. Bagaço de laranja triturado em liquidificador industrial.	39
Figura 1.8. Representação esquemática da prensagem do bagaço de laranja, sendo (1) a célula perfurada de aço, (2) o bagaço de laranja adicionado no interior da célula, (3) pistão de madeira e acrílico, (4) sentido de aplicação da força de compressão e (5) remoção de caldo.	40
Figura 1.9. Representação esquemática tridimensional da unidade experimental presente no Centro de Secagem e seus principais elementos: soprador (1), sistema de válvulas by pass (2), tubo de Venturi (3), caixa de resistências (4), câmara principal (5), sistema de aquisição de dados (6), transdutores de pressão (7), ciclone (8) e coletor de finos (9).....	43
Figura 1.10. Representação esquemática bidimensional da unidade experimental presente no Centro de Secagem e seus principais elementos: o soprado (1), o sistema de válvulas by pass (2), tubo de Venturi (3), caixa de resistências (4), câmara principal (5), computador (6), transdutores de pressão (7), ciclone (8) e coletor de finos (9).....	44
Figura 1.11. Representação esquemática do agitador de pás inclinadas, dimensões de cada conjunto de pás, espaçamento, seção transversal e vista superior do agitador.....	46
Figura 1.12. Distribuição granulométrica do bagaço de laranja triturado.	49
Figura 1.13. Queda de pressão para o equipamento vazio, "branco".	51
Figura 1.14. Curva característica para a queda de pressão em leito de jorro com bagaço completamente tratado e H=14,06 cm.	52
Figura 1.15. Curva para a queda de pressão total no sistema com bagaço completamente tratado e H=16,69 cm.	54
Figura 1.16. Curva para a queda de pressão total no sistema com bagaço completamente tratado e H=18,33 cm.	54
Figura 1.17. Curva característica para a queda de pressão em leito de jorro com bagaço completamente tratado e H=21,12 cm.	55
Figura 1.18. Queda de pressão em função da velocidade do ar para o equipamento com agitação mecânica vazio, "branco".	57
Figura 1.19. Formação de aglomerado de bagaço de laranja in natura na região cilíndrica do leito do jorro modificado.	58

Figura 1.20. Queda de pressão em função da velocidade do ar para o bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 14,1 cm e retas para determinação da velocidade mínimo jorro.	59
Figura 1.21. A queda de pressão de operação do leito modificado em função da altura de leito estático.	61
Figura 1.22. A velocidade de mínimo jorro do leito modificado em função da altura de leito estático.	61
Figura 1.23. Cinéticas de secagem observadas para $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u=3,30\text{ m/s}$, ponto central do planejamento composto central.	63
Figura 1.24. Cinética de secagem para a velocidade do ar de $3,30\text{ m/s}$ e temperatura do ar de $46, 60$ e $74\text{ }^{\circ}\text{C}$	64
Figura 1.25. Cinética de secagem para a temperatura do ar de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e velocidade do ar de $1,74, 3,30$ e $4,86\text{ m/s}$	64
Figura 1.26. Análise de Pareto para o ajuste dos efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre o tempo de secagem.	66
Figura 1.27. Valores das temperaturas de alimentação, meio do leito, bulbo seco e bulbo úmido ao longo da secagem para $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u=3,30\text{ m/s}$, em função do tempo.	68
Figura 1.28. Umidade relativa do ar na saída do leito de jorro modificado para $T = 60^{\circ}\text{C}$ e $u = 3,3\text{ m/s}$, em função do tempo.	68
Figura 2.1. Ilustração do dispositivo utilizado para produção de pellets de biomassa sendo: (A) unidades que compõe um molde individual; (B) molde individual montado; (C) estrutura completa para produção simultânea de três pellets.	80
Figura 2.2. Fração mássica retida para cada abertura de peneiras para as amostras de bagaço seco OJW1 e OJW2.	81
Figura 2.3. Fração mássica em função da temperatura (TGA) para o bagaço de laranja in natura e mistura com 1% de CaO.	87
Figura 2.4. O diferencial da massa da amostra (DTG) para bagaço de laranja in natura e misturado com 1% de CaO, em função da temperatura.	87
Figura 2.5. Análise de Pareto para o ajuste dos efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a durabilidade dos pellets.	90
Figura 2.6. Análise de Pareto para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a resistência ao impacto dos pellets.	93
Figura 2.7. Análise de Pareto para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre o índice de resistência ao impacto dos pellets.	93
Figura 2.8. (A) Pedacos de pellets de bagaço de laranja submetidos a ensaios de resistência ao impacto; (B) Destaque visual para partículas grosseiras presentes na superfície dos pedacos de pellets.	95
Figura 2.9. Pellet de bagaço de laranja após absorção de água.	96
Figura 2.10. Análise de Pareto para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a absorção de água dos pellets.	97
Figura 2.11. (A) Pellet de bagaço de laranja original; (B) Pellet de bagaço de laranja exposto ao ambiente por um período de 24 horas.	98
Figura 2.12. Análise de Pareto para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a absorção de água dos pellets.	99
Figura 2.13. Durabilidade dos pellets produzidos a partir do bagaço de laranja com diferentes granulometrias, adição de ligantes e torrefação e a durabilidade mínima desejada de 0,975.	100

Figura 2.14. Resistência ao impacto dos pellets produzidos a partir do bagaço de laranja com diferentes granulometrias, adição de ligantes e torrefação e a resistência ao impacto mínima desejada de 0,90.....	101
Figura 2.15. Capacidade de absorção de água dos pellets produzidos a partir do bagaço de laranja com diferentes granulometrias, adição de ligantes e torrefação e a absorção máxima e água desejada de 0,20.	102
Figura 2.16. Densidade dos pellets produzidos a partir do bagaço de laranja com diferentes granulometrias, adição de ligantes e torrefação e a densidade mínima desejada de 1200 kg/m ³	103
Figura 2.17. Conjuntos de pellets armazenados por 30 dias, sendo: (a) 90% OJW3 e 10% água; (b) 80% OJW3 e 20% amido; (c) 100% OJW3; (d) 50% OJW3 e 50% borra de café.	112
Apêndice A.1 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 16,7 cm.	126
Apêndice A.2 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 18,3 cm.	126
Apêndice A.3 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 21,1 cm.	127
Apêndice A.4 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 23,9 cm.	127
Apêndice A.5 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 25,4 cm.	128
Apêndice A.6 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 27,0 cm.	128
Apêndice B.1. Variação das temperaturas para alimentação com $T = 46\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 3,30\text{ m/s}$.	129
Apêndice B.2. Variação das temperaturas para alimentação com $T = 74\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 3,30\text{ m/s}$.	129
Apêndice B.3. Variação das temperaturas para alimentação com $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 1,74\text{ m/s}$.	130
Apêndice B.4. Variação das temperaturas para alimentação com $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 4,86\text{ m/s}$.	130
Apêndice C.1. Umidade relativa do ar na saída do secador para alimentação com $T = 46\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 3,30\text{ m/s}$	131
Apêndice C.2. Umidade relativa do ar na saída do secador para alimentação com $T = 74\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 3,30\text{ m/s}$	131
Apêndice C.3. Umidade relativa do ar na saída do secador para alimentação com $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 1,74\text{ m/s}$	132
Apêndice C.4. Umidade relativa do ar na saída do secador para alimentação com $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 4,86\text{ m/s}$	132

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELAS

Tabela 1.1. Descrição do planejamento composto central para avaliação da influência da temperatura e velocidade do ar sobre a secagem.....	47
Tabela 1.2. Propriedades físicas do bagaço de laranja submetidos a diferentes pré-tratamentos: bagaço in natura, bagaço de laranja prensado e bagaço de laranja misturado com 1% de CaO e prensado.....	48
Tabela 1.3. Fração mássica retida acima de cada peneira durante ensaios de granulometria.	50
Tabela 1.4. Densidade e escoabilidade do bagaço de laranja.	50
Tabela 1.5. Compilado de dados fluidodinâmicos em leito de jorro para as condições avaliadas: movimentação das partículas, queda de pressão máxima, velocidade de mínimo jorro e perda de massa por arraste.	56
Tabela 1.6. Queda de pressão de operação e velocidade de mínimo jorro do leito de jorro modificado para diferentes alturas de leito estático.....	60
Tabela 1.7. Tempo de secagem do bagaço de laranja para as condições avaliadas.	65
Tabela 1.8. Análise ANOVA para o ajuste dos efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre o tempo de secagem.	66
Tabela 2.1. Composição de lignina, celulose e hemicelulose de diversas biomassas, sendo o conteúdo expresso como o percentual da massa seca de cada biomassa.	76
Tabela 2.2. Caracterização química do bagaço de laranja seco (OJW3).....	85
Tabela 2.3. Durabilidade dos pellets produzidos após a secagem em leito de jorro mecânico, sendo alteradas a temperatura e a velocidade do ar de secagem.	89
Tabela 2.4. Análise ANOVA para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a durabilidade dos pellets.	90
Tabela 2.5. Resistência ao impacto e índice de resistência ao impacto (IRI) dos pellets produzidos após a secagem em leito de jorro mecânico, sendo alteradas a temperatura e a velocidade do ar de secagem.	91
Tabela 2.6. Análise ANOVA para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a resistência ao impacto dos pellets.....	92
Tabela 2.7. Análise ANOVA para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre o índice de resistência ao impacto dos pellets.....	92
Tabela 2.8. Absorção de água dos pellets produzidos após a secagem em leito de jorro mecânico, sendo alterada a temperatura e a velocidade do ar de secagem.	95
Tabela 2.9. Análise ANOVA para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a durabilidade dos pellets.	96
Tabela 2.10. Aumento relativo do comprimento dos pellets produzidos após a secagem em leito de jorro mecânico, sendo alterada a temperatura e a velocidade do ar de secagem.....	98
Tabela 2.11. Análise ANOVA para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a durabilidade dos pellets.	99
Tabela 2.12. Propriedades físicas e mecânicas dos pellets de bagaço de laranja após o armazenamento por 30 dias: umidade, densidade e respectivas variações.....	110
Tabela 2.13. Coordenadas da coloração CIELAB dos diferentes pellets de bagaço de laranja inicialmente e após armazenamento de 30 dias.....	111

Tabela D.1. Ajuste dos efeitos individuais lineares e quadrático e combinado da temperatura e da velocidade do ar sobre o tempo de secagem necessário para alcançar um adimensional de umidade de 10% .	133
Tabela D.2. Ajuste dos efeitos individuais lineares e quadráticos e combinado da temperatura e da velocidade do ar sobre a durabilidade dos pellets.	133
Tabela D.3. Ajuste dos efeitos individuais lineares e quadráticos e combinado da temperatura e da velocidade do ar sobre a resistência ao impacto dos pellets.	134
Tabela D.4. Ajuste dos efeitos individuais lineares e quadráticos e combinado da temperatura e da velocidade do ar sobre o índice de resistência ao impacto dos pellets.	134
Tabela D.5. Ajuste dos efeitos individuais lineares e quadráticos e combinado da temperatura e da velocidade do ar sobre a absorção de água dos pellets.	135

QUADROS

Quadro 1.10. Trabalhos sobre a operação em leito de jorro realizados por pesquisadores do Centro de Secagem de Pastas e Sementes do DEQ/UFSCar.	35
Quadro 1.11. Continuação do Quadro 1.10.	36
Quadro 1.12. Continuação do Quadro 1.10.	37
Quadro 1.13. Continuação do Quadro 1.10.	38
Quadro 2.1. Composição dos diferentes pellets quanto a biomassa e ligantes e adoção de pré-tratamentos.	82

NOMENCLATURA

a*	Parâmetro cromático vermelho-verde	-
b*	Parâmetro cromático amarelo-azul	-
D/d	Diâmetro	m
E*	Cor total	-
H	Altura do leito estático	m
HR	Índice de Hausner	-
L	Comprimento	m
L*	Luminosidade	-
m	Massa	kg
MR	Adimensional de umidade	-
N/n	Número	-
P	Pressão	kPa
RH	Umidade relativa	-
T	Temperatura	°C
u	Velocidade superficial do ar	m.s ⁻¹
V	Volume	m ³
x	Fração mássica	-
X	Umidade base seca	kg.kg ⁻¹
Y	Umidade absoluta do ar	g/m ³
W	Umidade base úmida	-

Letras gregas

Δ	Varição	-
ρ	Densidade	Kg/m ³

Subscrito e sobrescrito

0	Inicial
a	Bulk aerada
atm	Atmosférica
água	Água
b	Bulk

branco	Branco, equipamento vazio
b.s	Base seca
b.u	Base úmida
c	Cilindro / Bulk consolidada
eq	Equilíbrio
f	Final
i	Interno/i-ésimo/inferior/inicial
j	Jorro
leito	Leito
máx	Máximo
ms	Mínimo jorro
p	Partícula
S	Sauter
sat	Saturação
seca	Seco
sólidos	Sólidos
total	Total
u	Bulbo úmido
vazios	Vazios
w	Água/vapor

Abreviações

CIELAB	Espaço de cor da Commission Internationale de l'Eclairage
DTG	Termogravimetria diferencial
LJ	Leito de jorro
LJC	Leito de jorro convencional
LJMM	Leito de jorro modificado com agitação mecânica
OJW	Amostra de bagaço de laranja
TGA	Curva termogravimétrica

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS E QUADROS	viii
SUMÁRIO	xii
INTRODUÇÃO	16
CAPÍTULO 1 – FLUIDODINÂMICA E SECAGEM DO BAGAÇO DE LARANJA EM LEITO DE JORRO	19
1.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.1.1. BAGAÇO DE LARANJA	19
1.1.2. SECAGEM	21
1.1.2.1. FUNDAMENTOS DE SECAGEM	21
1.1.2.2. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SECAGEM	23
1.1.2.3. PSICROMETRIA.....	26
1.1.3. LEITO DE JORRO CONVENCIONAL	27
1.1.3.1. FLUIDODINÂMICA DO LEITO DE JORRO CONVENCIONAL	27
1.1.3.2. ESTABILIDADE DO LEITO DE JORRO	30
1.1.4. MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS DO LEITO DE JORRO	32
1.1.5. SECAGEM DE MATERIAIS ORGÂNICOS EM LEITO DE JORRO	34
1.1.6. EXPERIÊNCIA DO CENTRO DE SECAGEM	35
1.2. MATERIAIS E MÉTODOS	39
1.2.1. PREPARAÇÃO DO BAGAÇO DE LARANJA	39
1.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO DE LARANJA	40
1.2.2.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	40
1.2.2.2 UMIDADE DA BIOMASSA.....	41

1.2.2.3 DENSIDADE BULK E ÍNDICE DE HAUSNER	41
1.2.3. FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO CONVENCIONAL	42
1.2.3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL	42
1.2.3.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	43
1.2.4. FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO MODIFICADO	45
1.2.5. SECAGEM DO BAGAÇO DE LARANJA EM JORRO MODIFICADO	46
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
1.3.1. PROPRIEDADES DO BAGAÇO DE LARANJA	48
1.3.1.1. UMIDADE DO BAGAÇO PRÉ-TRATADO.....	48
1.3.1.2. GRANULOMETRIA.....	49
1.3.1.3. DENSIDADE BULK E ÍNDICE DE HAUSNER	49
1.3.2. FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO	51
1.3.2.1. LEITO DE JORRO CONVENCIONAL.....	51
1.3.2.2. LEITO DE JORRO MODIFICADO COM AGITAÇÃO MECÂNICA.....	56
1.3.3. SECAGEM DO BAGAÇO DE LARANJA EM JORRO MODIFICADO	62
1.3.3.1. CINÉTICA E TEMPO DE SECAGEM.....	62
1.3.3.2. VARIAÇÃO DAS TEMPERATURAS NA SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	67
1.4. CONCLUSÕES	69
CAPÍTULO 2 – PELETIZAÇÃO E COMBUSTÃO DO BAGAÇO DE LARANJA	70
2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	70
2.1.1. FUNDAMENTOS DA COMBUSTÃO.....	70
2.1.1.1 COMBUSTÍVEIS	70
2.1.1.2. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	72
2.1.2. PELLETS DE BIOMASSA	72
2.1.2.1. DESCRIÇÃO E PRÉ-TRATAMENTO DA BIOMASSA	72
2.1.2.2. PROPRIEDADES DA BIOMASSA NA PELETIZAÇÃO	74
2.1.2.3. CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DOS PELLETS.....	76

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS	78
2.2.1 TERMOGRAVIMETRIA	78
2.2.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE BAGAÇO SECO	78
2.2.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA BIOMASSA	79
2.2.4. PRODUÇÃO DOS PELLETS DE BAGAÇO DE LARANJA	79
2.2.5. AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA, LIGANTE E PRÉ-TRATAMENTO	80
2.2.6. CARACTERIZAÇÃO DOS PELLETS DE BIOMASSA	81
2.2.6.1. DURABILIDADE.....	82
2.2.6.2. ÍNDICE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	82
2.2.6.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA	83
2.2.6.4. DENSIDADE APARENTE DO PELLET	83
2.2.5. ARMAZENAMENTO DOS PELLETS	83
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
2.3.1. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO BAGAÇO DE LARANJA	85
2.3.2. TERMOGRAVIMETRIA	86
2.3.3. INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE AS PROPRIEDADES DOS PELLETS	88
2.3.3.1. DURABILIDADE.....	88
2.3.3.2. RESISTÊNCIA AO IMPACTO E ÍNDICE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO	90
2.3.3.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA	94
2.3.3.4. AUMENTO DO COMPRIMENTO.....	97
2.3.4. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS PELLETS COM DIFERENTES GRANULOMETRIAS E LIGANTES	100
2.3.5. EFEITOS DA GRANULOMETRIA	103
2.3.6. EFEITOS DA ADIÇÃO DE LIGANTES	105
2.3.6.1. CARBOIDRATOS COMO LIGANTES	105
2.3.6.2. MISTURA COM BORRA DE CAFÉ.....	107
2.3.6.3. ÁGUA COMO LIGANTE	107

2.3.7. EFEITOS DA TORREFAÇÃO	108
2.3.8. ARMAZENAMENTO DOS PELLETS	108
2.4. CONCLUSÕES	113
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
APÊNDICE A – Fluidodinâmica no leito de jorro modificado para diferentes alturas de leito estático	126
APÊNDICE B – Variação das temperaturas no leito de jorro modificado durante a secagem do bagaço de laranja.	129
APÊNDICE C – Umidade relativa da corrente de exaustão de ar.	131
APÊNDICE D – Análise complementar de ajuste dos efeitos	133

INTRODUÇÃO

É notável a mudança nas relações entre a humanidade e os resíduos gerados pelas atividades cotidianas. Enquanto no passado a destinação de resíduos era negligenciada, a ponto de haver o descarte de materiais altamente nocivos sem qualquer tratamento, atualmente existe uma consciência da importância de se reduzir a quantidade gerada de resíduos e de tratar apropriadamente o que seria descartado. A legislação vigente e sucessivas campanhas de conscientização buscam promover um crescimento econômico aliado à preservação ambiental.

Neste contexto se encontra a indústria brasileira da laranja, sendo o Brasil responsável pela produção de aproximadamente 50% de todo o suco consumido no mundo. A laranja possui uma cultura altamente difundida no território nacional, havendo plantações em todos os estados brasileiros (PRODUÇÃO DE LARANJAS: BRASIL É LÍDER NESSE NEGÓCIO, [s. d.]). O principal resíduo da indústria da laranja é o seu bagaço, obtido a partir de seus principais subprodutos, o suco e os óleos essenciais, sendo formado pelo epicarpo, mesocarpo, membranas e sementes.

O bagaço de laranja é uma biomassa lignocelulósica normalmente reaproveitada na alimentação de humanos e outros animais devido a seu elevado valor nutricional, sendo rico em fibras, proteínas e vitaminas (ACHARJEE *et al.*, 2021). O bagaço de laranja também pode ser utilizado na obtenção de compostos fenólicos (SHAHRAM; TAGHIAN DINANI, 2019) e na produção de bioetanol (UCUNCU *et al.*, 2013). Ademais, esta biomassa apresenta um potencial energético considerável, sendo possível a geração de energia por meio de combustão ou pirólise.

Entretanto, a combustão de biomassas com elevada umidade, como o próprio bagaço de laranja, apresenta uma série de desafios, uma vez que o poder calorífico se encontra diretamente relacionado à quantidade de água presente no material (CORDEIRO *et al.*, 2013). Deste modo, em diversos processos, faz-se necessária a remoção prévia de umidade para aumentar a eficiência da combustão. Ademais, a remoção de água da biomassa facilita sua ignição e previne a formação de compostos voláteis indesejáveis.

O método mais comum de reduzir a umidade de uma biomassa é a secagem, com a transferência simultânea de calor e de massa entre o material a ser seco e uma fase fluida, normalmente ar quente ou vapor superaquecido. A secagem também é utilizada no processamento do bagaço de laranja para reduzir os custos de transporte e armazenamento e para prolongar o seu tempo de prateleira, uma vez que o bagaço úmido é altamente suscetível à contaminação por microrganismos (AFRIN *et al.*, 2022). Dentre os equipamentos utilizados

em secagem, o secador de leito de jorro apresenta diversas características positivas, especialmente o alto grau de mistura das partículas sólidas, o contato entre as fases e elevadas taxas de transferência de calor e de massa. O leito de jorro apresenta três regiões bem definidas, região do jorro, região da fonte e o ânulo. O movimento cíclico das partículas sólidas entre estas regiões é bem característico: as partículas são arrastadas da região anular para dentro da corrente de ar e ascendem verticalmente na região do jorro até a fonte, onde alcançam uma altura máxima e retornam ao ânulo pela ação gravitacional. Entretanto, para as partículas sólidas serem arrastadas verticalmente e estabelecer o regime característico de um leito de jorro é necessário o fornecimento de uma elevada vazão de ar, representando o principal custo energético da operação (FREIRE *et al.*, 2012). Algumas modificações estruturais no secador de leito de jorro permitem a redução da demanda de ar da operação, como a adição de agitadores de pás ou de um parafuso helicoidal. A rotação destas estruturas auxilia o movimento ascendente das partículas, demandando uma menor vazão de ar em comparação ao leito de jorro convencional, além de intensificar a mistura do material (BARROS *et al.*, 2020). Ademais, tanto os agitadores de pás quanto o parafuso helicoidal facilitam a mistura das partículas, tornando o processo de secagem mais uniforme. Para materiais coesivos, como o próprio bagaço de laranja, uma mistura mais intensa se faz necessária, devido a uma resistência ao transporte uniforme pela formação de aglomerados associada a um acúmulo nas paredes do secador (FREIRE *et al.*, 2017).

Com base neste cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a secagem do bagaço de laranja em leito de jorro como uma etapa prévia à sua peletização, visando a obtenção de um combustível com propriedades adequadas. Para tanto, foram definidos os seguintes objetivos específicos: determinar um pré-tratamento para o bagaço de laranja que reduzisse significativamente sua umidade; avaliar a fluidodinâmica em leito de jorro convencional da biomassa submetida aos diferentes pré-tratamentos, observando a formação do regime do jorro, queda de pressão máxima, velocidade de mínimo jorro e arraste de sólidos na velocidade de mínimo jorro em diferentes alturas de leito estático; comparar o desempenho do leito de jorro modificado com agitação mecânica em relação ao leito de jorro convencional quanto a parâmetros fluidodinâmicos e arraste de partículas; realizar a secagem da biomassa variando a vazão e a temperatura do ar de secagem, avaliando a influência sobre o tempo de secagem e propriedades dos pellets; determinar o comportamento térmico da biomassa em atmosfera oxidante pela termogravimetria; avaliar diferentes estratégias para melhorar as propriedades dos pellets de bagaço seco, como a redução do tamanho de partícula, torrefação em atmosfera

oxidante e adição de ligantes, como carboidratos, outras biomassas e água; caracterizar os pellets quanto à durabilidade, resistência ao impacto, absorção de água e densidade, além da umidade, densidade e variação de cor após um armazenamento de 30 dias.

Embora a avaliação da secagem e peletização sejam etapas consecutivas do mesmo processo, estas etapas serão apresentadas no presente trabalho como capítulos individuais para facilitar a apresentação. Deste modo, o Capítulo 1 corresponde à fluidodinâmica do bagaço e secagem em leito de jorro e o Capítulo 2 corresponde à peletização e combustão.

CAPÍTULO 1 – FLUIDODINÂMICA E SECAGEM DO BAGAÇO DE LARANJA EM LEITO DE JORRO

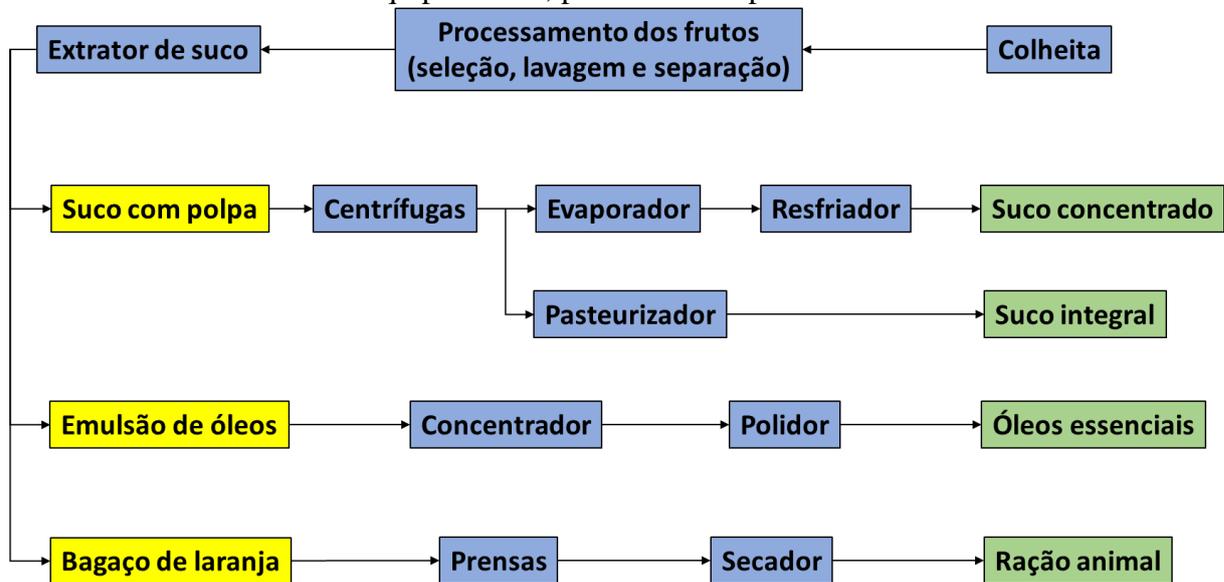
1.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1.1. BAGAÇO DE LARANJA

Os principais produtos da indústria da laranja são o suco concentrado e o suco integral e para a sua produção as frutas devem passar por um complexo processo industrial que gera diversos subprodutos. Inicialmente, as frutas são colhidas e transportadas para a unidade industrial onde são armazenadas e, então, são lavadas e separadas de acordo com o seu tamanho. Na etapa de extração as laranjas são submetidas à compressão mecânica para que o suco seja separado, nesta etapa são obtidos três produtos intermediários distintos, o suco da fruta com polpa, a emulsão de óleos essenciais e o bagaço da laranja, formado pela casca úmida, sementes e fiapos. O suco com polpa é destinado a um processo de clarificação, onde a polpa é separada e o suco é submetido a uma etapa de pasteurização. O clarificado possui duas rotas distintas, sendo submetido a um processo de evaporação caso o suco de laranja concentrado seja o produto de interesse ou sendo resfriado diretamente para o suco integral, que possui características mais próximas às do suco fresco. A emulsão de óleos é formada pelos óleos retirados dos frutos na etapa de extração, adicionados aos compostos voláteis recuperados após a evaporação do suco, sendo purificados por clarificação e centrifugação. Normalmente, o bagaço da laranja, que corresponde a aproximadamente 50% da massa inicial das frutas, é prensado e submetido a um processo de secagem para ser posteriormente comercializado como ração animal (TETRPAK, 2017). A Figura 1.1 é uma representação esquemática das principais etapas da produção de suco de laranja, apresentando também os subprodutos obtidos ao longo do processo.

Além da alimentação de animais, o bagaço de laranja também possui outras potenciais aplicações, como a produção de fibras digestivas solúveis (HUANG; MA, 2016), produção de bioetanol por hidrólise (UCUNCU *et al.*, 2013), substrato para a produção de enzimas (MADEIRA *et al.*, 2012), extração de compostos fenólicos (SHAHRAM; TAGHIAN DINANI, 2019), carbonização hidrotérmica para a produção de carvão e biogás (ERDOGAN *et al.*, 2015) e utilização para fins medicinais (GUZMAN *et al.*, 2021).

Figura 1.1. Representação do processo industrial de derivados da laranja: etapas, equipamentos, produtos e subprodutos.



Fonte: elaborado pelo autor.

O bagaço de laranja é uma biomassa lignocelulósica rica em componentes orgânicos que podem ser extraídos e comercializados, como a pectina, vitaminas (especialmente a vitamina C), óleos essenciais e ácidos orgânicos. Ademais, esta biomassa também apresenta em sua composição fibras, carboidratos e lignina (CYPRIANO *et al.*, 2017). Estima-se que a composição do bagaço de laranja seco seja de aproximadamente $2,9 \pm 0,2\%$ de cinzas, $38,5 \pm 1,5\%$ de celulose, $24,0 \pm 2,0\%$ de hemicelulose e $2,9 \pm 0,5\%$ de lignina (MORAES; CRESTANI, 2018), tendo grande presença de compostos orgânicos e uma pequena quantidade de cinzas. A composição de uma biomassa está diretamente relacionada à eficiência de sua combustão. Uma maior proporção de compostos orgânicos voláteis ou termicamente degradáveis associada a um menor teor de carbono fixo favorecem a combustão, facilitando a ignição e acelerando a queima e, por consequência, os tempos de residência e as dimensões do combustor são menores (BRITO; BARRICHELO, 1982). Ademais, o baixo teor de cinzas também é necessário para um processo estável de combustão, uma vez que estas diminuem o poder calorífico e possuem uma tendência de acúmulo, sendo necessária a manutenção frequente dos combustores (BOAS *et al.*, 2010). Deste modo, pode-se destacar um potencial uso do bagaço de laranja na geração de energia. Entretanto, o poder calorífico das biomassas está diretamente relacionado à presença de água, sendo muitas vezes necessário reduzir significativamente a sua umidade, através de um processo de secagem, para viabilizar a sua combustão (CORDEIRO *et al.*, 2013).

1.1.2. SECAGEM

A secagem é o processo de remoção de umidade de um material a níveis desejáveis e possui como finalidades, dentre outras, retardar a deterioração do produto obtido, preservando suas características por períodos prolongados (BRITO *et al.*, 2019). Segundo historiadores, os primeiros registros do uso da secagem para a preservação de carne datam de aproximadamente 20000 a.C e desde então as técnicas utilizadas evoluíram significativamente, alcançando um nível industrial a partir de 1856, quando foi registrada a primeira patente de um secador mecânico de tijolos para a concentração de leite (OTAKE *et al.*, 2020). Além da conservação prolongada dos materiais, a secagem possui um forte apelo pela diminuição significativa de sua massa que, por consequência, diminui os custos de manuseio e armazenamento (HAMAWAND *et al.*, 2015).

1.1.2.1. FUNDAMENTOS DE SECAGEM

A secagem é compreendida como a remoção de materiais voláteis, especialmente a água, de materiais sólidos, pastas ou emulsões através da transferência simultânea de calor e de massa. Neste processo, a transferência de calor se dá a partir das vizinhanças, usualmente ar de secagem, vapor superaquecido ou das paredes do secador, para o material que se deseja secar, evaporando as moléculas de água que se encontram na superfície. A transferência de massa acontece principalmente por duas etapas distintas, a migração das moléculas de água do interior do material para o seu exterior e a evaporação da água, com a posterior migração para a corrente gasosa, entretanto, outros secadores apresentam mecanismos diferentes para a transferência de massa, como os secadores de micro-ondas que evaporam as moléculas de água já no interior dos materiais. Ambos mecanismos de transferência de massa, difusão no interior do material e a convecção para a corrente gasosa, influenciam diretamente a taxa de secagem (MUJUMDAR, 1988).

Quando a secagem é controlada pelos mecanismos externos, as limitações do processo são devidas à difusão de vapor na superfície do material. Deste modo, embora as propriedades superficiais do sólido, como sua superfície e formato, apresentem alguma influência sobre a resistência ao transporte de massa, as propriedades da fase gasosa, como sua velocidade, temperatura e grau de saturação, são dominantes. Estes mecanismos são predominantes principalmente em materiais com saturação de água ou nos instantes iniciais da secagem, uma vez que os gradientes de umidade no interior do meio ainda não se estabeleceram. A pressão de vapor (P_w) controla a evaporação de água na superfície do sólido e está diretamente relacionada ao equilíbrio físico entre as fases líquido e vapor. Para que a transferência de água da fase

líquida para a fase gasosa aconteça, é necessário que a pressão de vapor na corrente gasosa seja inferior à pressão de saturação, ou pressão de vapor máxima, (P_{sat}) para a temperatura correspondente, condição de saturação para a fase gasosa. Deste modo, a umidade absoluta do ar (Y), definida como a razão entre a massa de água e a massa de ar, é de grande importância na descrição dos processos de secagem. Já a umidade relativa do ar (RH) definida pela razão entre a pressão de vapor P_w e a pressão de saturação na temperatura correspondente P_{sat} , descreve a fração da umidade de saturação presente no ar (MUJUMDAR, 1988). A umidade absoluta pode ser calculada através da Equação 1.1:

$$Y = 0,622 \frac{\psi P_{sat}}{P - \psi P_{sat}} \quad (1.1)$$

Entretanto, a secagem controlada pelos mecanismos internos de transferência de massa, requer uma maior atenção, uma vez que estes mecanismos são predominantes por um maior período de tempo e o transporte de massa pode ocorrer de diferentes maneiras, como a difusão de líquidos ou a difusão de vapor no interior do sólido (a depender da região em que ocorre a vaporização da água), difusão de Knudsen e gradientes de pressão hidrostática. A partir da umidade crítica, quando é removida a umidade em excesso na superfície dos materiais e se estabelecem gradientes em seu interior, os mecanismos internos são predominantes até a umidade de equilíbrio dinâmico, ao término da secagem. A difusão da umidade ocorre pela formação de gradientes no interior do sólido. A evaporação de água na superfície é responsável pela formação de gradientes de umidade, uma vez que a umidade na superfície é inferior em comparação ao interior do material, enquanto a transferência de energia da superfície do sólido para seu interior estabelece um gradiente de pressão de vapor que, conseqüentemente, proporciona o movimento difusivo de vapor. A difusão de vapor e líquido ocorrem simultaneamente no interior do material. Na secagem controlada pelos mecanismos internos, alguns parâmetros operacionais, como a velocidade do ar de secagem, não possuem uma influência significativa sobre as taxas de secagem, especialmente se comparado com as condições em que os mecanismos externos predominam. Outros parâmetros, no entanto, são de grande importância para que o processo alcance taxas de secagem satisfatórias, especialmente a temperatura do ar e o tempo de residência.

Durante a secagem, a água é removida de um sólido poroso até que a pressão de vapor na sua superfície se iguale à pressão de vapor da fase gasosa, nesta condição a umidade do sólido é denominada umidade de equilíbrio. Na condição de equilíbrio não é possível reduzir a umidade do material poroso pela exposição ao gás, sendo necessária a remoção de água da fase

gasosa e a conseqüente diminuição de sua umidade relativa. A umidade de um sólido pode ser expressa de duas maneiras distintas, a umidade em base seca (X), definida como a razão entre a massa total de água e a massa do material totalmente seco, e a umidade em base úmida (W), definida como a razão entre a massa total de água e a massa total do material, massa de água somada à sua massa seca. As duas formas de expressar a umidade se relacionam através da Equação 1.2:

$$X = \frac{W}{1 - W} \quad (1.2)$$

Os materiais podem ser classificados de acordo com sua estrutura física e com a sua interação superficial com a água:

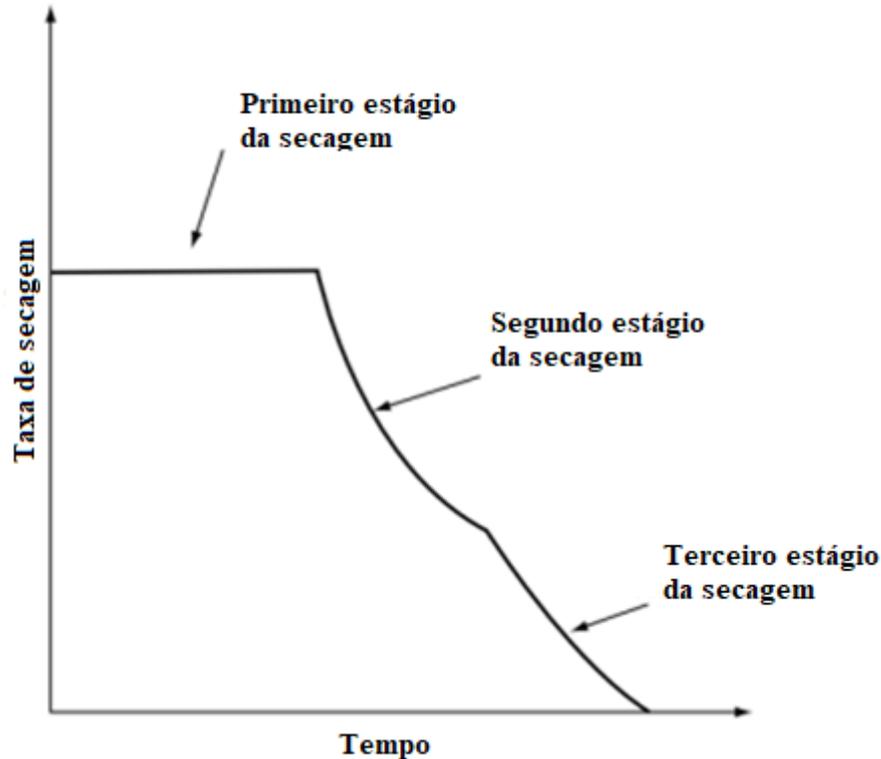
- Meios porosos não-higroscópicos: são materiais que apresentam uma estrutura porosa preenchida por líquido, entretanto toda a umidade se encontra livre, sem qualquer ligação física à superfície do material. Outra propriedade dos meios não-higroscópicos é que não ocorre seu encolhimento durante a secagem, preservando sua geometria. Exemplos: areia, alumina e algumas cerâmicas.
- Meios porosos higroscópicos: são materiais que, assim como os meios não-higroscópicos, apresentam poros que podem ser preenchidos por líquido, entretanto a secagem provoca o encolhimento destes materiais. Nestes materiais a água se encontra ligada à superfície do material pela retenção nos capilares, pela formação de solução no interior do material ou pela adsorção de água sobre a superfície. Existe também a possibilidade de a água presente no material exceder a sua capacidade de ligação. Exemplos: argila e biomassas.
- Meios coloidais não-porosos: estes materiais não apresentam uma estrutura porosa, no entanto a água se encontra ligada à sua superfície, não havendo gradientes de umidade em seu interior. Conseqüentemente toda transferência de massa ocorre em sua superfície. Exemplos: alguns polímeros (MUJUMDAR, 1988).

1.1.2.2. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SECAGEM

As curvas características de secagem permitem identificar a predominância dos mecanismos internos ou externos de transferência de massa, estas representam a variação da taxa de secagem em função do tempo. O comportamento característico da curva de secagem para um sólido poroso higroscópico é apresentado pela Figura 1.2, sendo possível identificar três períodos distintos, o primeiro período de secagem, em que a taxa de secagem permanece

constante, e o segundo e o terceiro período de secagem, em que a taxa de secagem diminui com o tempo.

Figura 1.2. Curva característica para a taxa de secagem em função do tempo.



Fonte: Adaptado de (MUJUMDAR, 1988).

Na superfície do sólido existem dois fenômenos distintos que promovem a transferência da água para a corrente gasosa, a vaporização, que é a convecção na interface sólido-gás e o posterior arraste pelo movimento da corrente gasosa, e a evaporação, que é um fenômeno lento que ocorre quando a pressão de vapor na interface sólido-gás é igual à pressão da fase gasosa. No primeiro período de secagem, em que a taxa de secagem permanece constante, a superfície do material se encontra completamente recoberta por água em excesso, que é removida do meio poroso pelo processo de vaporização, assim os mecanismos externos são considerados predominantes nesta etapa. À medida que a secagem continua e a água é removida do material, parte de sua superfície é exposta diretamente à corrente gasosa. Assim, parte do meio poroso mantém a sua superfície coberta por água em excesso, sendo sua remoção controlada pelos mecanismos externos, enquanto outra parte do material apresenta sua superfície seca, sendo que nestas regiões a secagem é controlada pelo gradiente de umidade no interior do sólido. Deste modo, na segunda etapa da secagem, ou no primeiro período a taxa decrescente, a taxa de secagem total diminui devido ao aumento da área superficial em contato direto com a fase gasosa e, conseqüentemente, pela diminuição da área superficial com excesso de água. Por fim,

na terceira etapa de secagem, ou o segundo período a taxa decrescente, toda a superfície do meio poroso se encontra diretamente exposta à fase fluida e a redução na taxa de secagem é mais acentuada devida à dependência dos gradientes internos. Moléculas de água ligadas ao meio poroso podem ser removidas na secagem a taxa decrescente enquanto no período de secagem a taxa constante ocorre somente a remoção de água não ligada (MUJUMDAR, 1988).

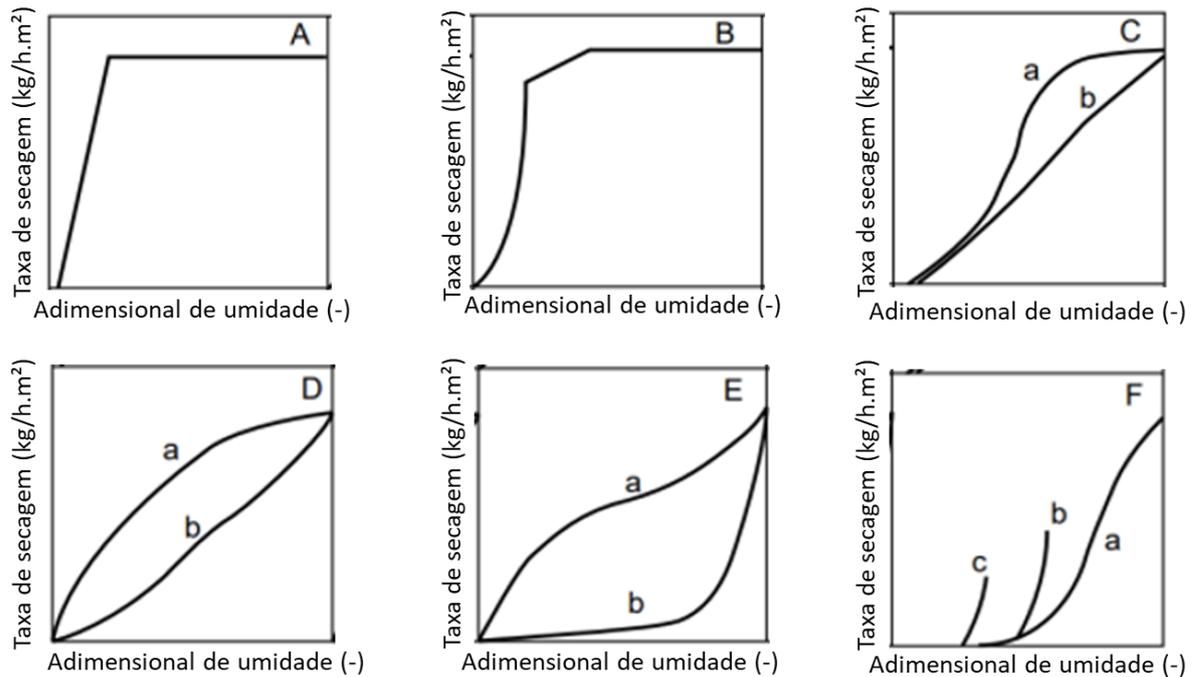
Vale destacar que, na prática, diversos materiais apresentam um comportamento de secagem distinto do apresentado pela Figura 2.2. Em alguns casos, o material não apresenta umidade em excesso sobre sua superfície, não sendo possível observar um período a taxa constante de secagem. Outro exemplo, são materiais que não apresentam uma estrutura porosa em seu interior, de modo que toda a umidade se encontra sobre a sua superfície, não sendo possível observar o segundo período de secagem a taxa decrescente. Os mecanismos envolvidos no processo de secagem são identificados através da variação da taxa de secagem e, para tanto, faz-se necessária uma normalização, observando a variação da taxa em relação à umidade adimensional do sólido (MR). A esta curva normalizada dá-se o nome de curva característica de secagem e a umidade adimensional pode ser calculada através da Equação 1.3, onde X_{eq} é a umidade de equilíbrio dinâmico e X_0 é a umidade inicial, usualmente em base seca:

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (1.3)$$

A Figura 1.3 apresenta as curvas características de secagem para diferentes materiais. Pode-se observar que a curva A apresenta dois períodos distintos, um período a taxa de secagem constante seguido de um único período a taxa de secagem decrescente, sendo indicativo de uma uniformidade na formação de superfícies secas expostas à fase fluida ou a ausência de uma estrutura porosa no interior do material. Este comportamento é característico da areia, argila, papel, entre outros. Já a curva B apresenta um comportamento semelhante ao descrito pela Figura 1.2, apresentando um período de secagem a taxa constante e dois períodos distintos a uma taxa decrescente, indicando uma não uniformidade na exposição da superfície juntamente com a porosidade no interior do material. Alguns exemplos de materiais que seguem este comportamento são as cerâmicas, couro, plástico, algumas misturas de argila, entre outros. As demais curvas apresentadas na Figura 1.3 são referentes a materiais que não apresentam excesso de água livre sobre sua superfície e, embora cada um destes materiais possua propriedades únicas que influenciam o comportamento da curva característica, todos têm a difusão interna como o fenômeno controlador da transferência de massa. São exemplos de materiais cujas curvas características seguem estes comportamentos a madeira de abeto (C a), madeira de

Cyprus (C b), papel (D a), batata (D b), levedura (E a) e manteiga (E b). As curvas F são características para os grãos de trigo, entretanto cada curva representa uma umidade inicial diferente, indicando a importância deste parâmetro. Informações mais detalhadas podem ser encontradas em Mujumdar (1988).

Figura 1.3. Curvas características de taxa de secagem para diferentes materiais, sendo, para cada imagem, o eixo vertical a taxa de secagem e o eixo horizontal de cada figura seu adimensional de umidade.



Fonte: adaptado de Mujumdar (1988).

1.1.2.3. PSICROMETRIA

A psicrometria é um ramo da ciência que relaciona as propriedades da mistura ar-vapor d'água, como temperatura, pressão e umidade, sendo adotada em processos de secagem, umidificação, resfriamento e aquecimento da corrente gasosa. Conhecendo ao menos duas propriedades do ar, como por exemplo a temperatura de bulbo seco e a temperatura de bulbo úmido ou umidade relativa, é possível determinar as demais propriedades, como pressão de vapor, umidade de saturação, volume específico e entalpia. Usualmente, as propriedades do ar úmido podem ser determinadas através da carta psicrométrica, no entanto é possível utilizar uma série de equações para determinar os demais parâmetros sequencialmente (ALLEN *et al.*, 1998).

Conhecendo as temperaturas de bulbo seco e úmido, as propriedades são calculadas através das seguintes equações. A pressão de saturação, P_{sat} , é calculada a partir da temperatura pela Equação 1.4, a pressão de vapor P_w é calculada pela equação 1.5 em que a_{inst} é um

coeficiente relacionado à geometria do psicrômetro e escoamento de ar, usualmente $0,000662 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $P_{sat}(T_u)$ corresponde à pressão de saturação considerando a temperatura de bulbo úmido e P_{atm} corresponde à pressão atmosférica, e a umidade relativa RH é calculada pela Equação 1.6.

$$P_{sat} = 0,61078e^{\left(\frac{17,269T}{237,3+T}\right)} \quad (1.4)$$

$$P_w = P_{sat}(T_u) - a_{inst}P_{atm}(T - T_u) \quad (1.5)$$

$$RH = \frac{P_w}{P_{sat}} \quad (1.6)$$

1.1.3. LEITO DE JORRO CONVENCIONAL

O leito de jorro é considerado um sucessor do leito fluidizado, sendo desenvolvido a partir de uma casualidade durante a operação deste último. Durante a secagem de grãos, foi observada a formação de um canal preferencial no centro do leito, que se estendia da alimentação de ar até o topo do leito, sendo a região deste canal denominada “jorro”. Na região do jorro, as partículas são arrastadas pela corrente gasosa até o topo do leito, numa região denominada “fonte”. Na região da fonte, as partículas sobem verticalmente até alcançar uma velocidade nula, retornando ao leito na região do “ânulo”. O ânulo, ou região anular, se encontra entre o jorro e as paredes do equipamento e nesta região o deslizamento das partículas é contrário ao movimento na região do jorro. Após retornarem ao centro do leito, as partículas são novamente arrastadas pelo movimento ascendente da fase fluida. Este movimento cíclico das partículas é bastante característico para o leito de jorro convencional e permite uma alta taxa de circulação de sólidos associada a altas taxas de transferência de calor e de massa. O leito de jorro foi patenteado em 1954 pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá, sendo aplicado na secagem de materiais termicamente sensíveis, como grãos e sementes (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

Embora tenha sido desenvolvido para operar como um secador de grãos, as características do leito de jorro convencional permitem a sua aplicação em processos distintos, a depender das suas características e dos parâmetros fluidodinâmicos. Entre as potenciais aplicações do leito de jorro estão a secagem de pastas utilizando partículas sólidas como suporte, reatores catalíticos, revestimento de partículas, granulação, combustão e pirólise e, também, o leito de jorro pode ser utilizado com alimentador de sólidos (FREIRE *et al.*, 2012).

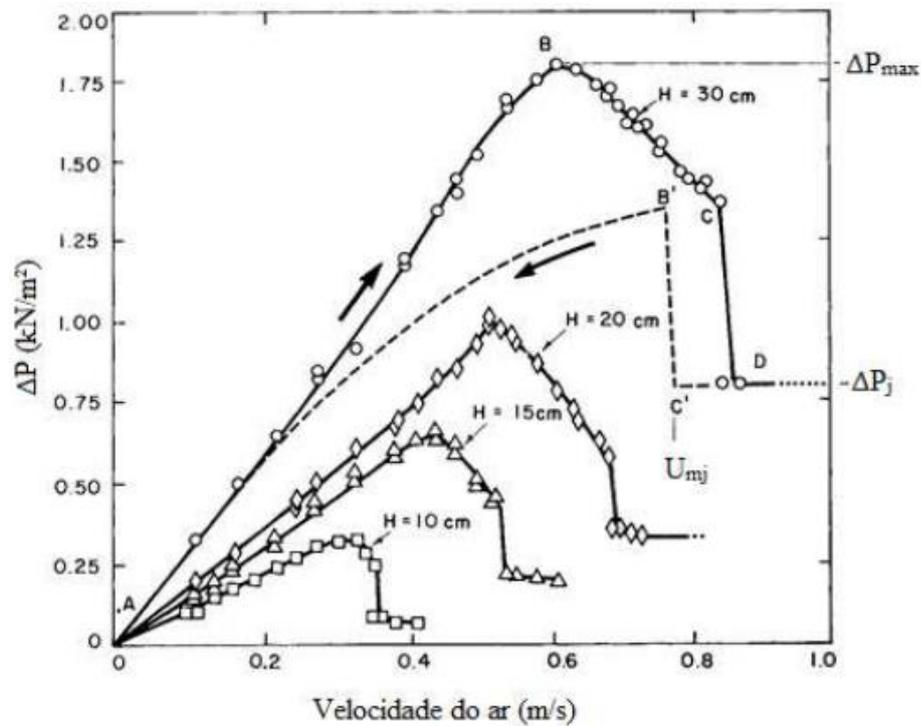
1.1.3.1. FLUIDODINÂMICA DO LEITO DE JORRO CONVENCIONAL

A estrutura básica de um leito de jorro convencional é composta por uma base cônica em que é alimentada uma corrente gasosa ascendente, usualmente ar aquecido, através de uma abertura reduzida. Sobre a base cônica se encontra acoplada uma coluna cilíndrica. Devido à

alta demanda de ar para o estabelecimento do regime de jorro, deve-se atentar a alguns parâmetros para evitar fenômenos indesejados durante a operação, como a instabilidade do leito, o arraste de partículas, e a conseqüente diminuição da massa de partículas, seguida pelo colapso do leito. A curva característica do leito de jorro, que é a queda de pressão no leito de partículas em função da velocidade superficial do ar, permite a identificação dos principais parâmetros operacionais, possibilitando o controle dos fenômenos indesejados descritos previamente. Entre os parâmetros operacionais identificáveis estão a velocidade de mínimo jorro (u_{ms}), a queda de pressão máxima ($\Delta P_{m\acute{a}x}$) e a queda de pressão mínima para o jorro estável (ΔP_s).

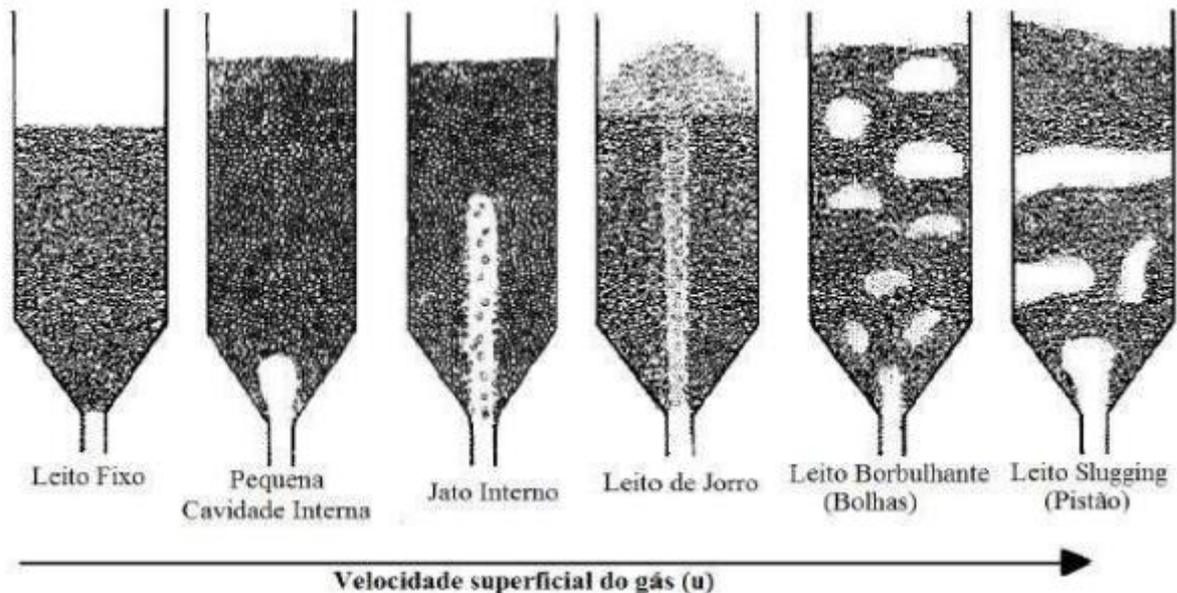
A Figura 1.4 apresenta curvas características para um leito de jorro cônico-cilíndrico para diferentes alturas de leito estático, sendo possível identificar os parâmetros operacionais e a influência da altura do leito sobre seu comportamento fluidodinâmico. A operação do leito de jorro tem início no ponto *A*, quando se inicia a alimentação do ar, e com o aumento da vazão de ar até o ponto *B* tem-se um aumento da queda de pressão no leito indicando que, nesta região, o leito de jorro se comporta como um leito fixo. A queda de pressão do leito no ponto *B* corresponde a $\Delta P_{m\acute{a}x}$. O aumento na queda de pressão no leito se dá pela resistência ao escoamento do fluido e pela formação do canal preferencial no centro do leito, que leva a uma maior compactação das partículas no topo. A partir do ponto *B* o aumento da vazão de ar no leito faz com que o canal preferencial se alongue, havendo a expansão do leito e a conseqüente diminuição da queda de pressão até o ponto *C*. Quando o jato interno se torna longo o suficiente, estendendo-se da abertura menor da base cônica até o topo do leito de partículas, há o seu rompimento e pode-se observar uma diminuição acentuada na queda de pressão até o ponto *D*, que corresponde à queda de pressão mínima para o jorro estável. No ponto *D*, o regime de jorro é estabelecido, sendo possível diferenciar suas três regiões e movimento cíclico das partículas. Com o aumento da vazão de ar, não há uma influência significativa sobre a queda de pressão no leito, entretanto algumas alterações podem ser observadas, como o aumento da altura da fonte e o arraste de partículas sólidas para fora do equipamento caso a vazão de ar seja superior à velocidade de arraste. A Figura 1.5 representa visualmente a transição do leito fixo ao estabelecimento completo do regime de jorro com o aumento da velocidade do ar. O comportamento descrito para os pontos de *A* a *D* se refere à curva ascendente, em que a velocidade do ar aumenta, entretanto é necessária a diminuição da vazão de ar a partir do ponto *D* para observar outros parâmetros operacionais.

Figura 1.4. Curvas características para a queda de pressão em um leito de jorro preenchido com grãos de areia e diferentes alturas de leito estático.



Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974).

Figura 1.5. Transição de fases na operação de um leito de jorro e fenômenos associados à instabilidade.



Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974).

Com o regime de jorro estabelecido no ponto *D*, a diminuição da velocidade do ar não influencia a queda de pressão no leito, que permanece constante até o ponto *C'* que se refere à velocidade de mínimo jorro (u_{ms}), vazão mínima necessária para que o regime de jorro se

mantenha estável. Com a diminuição da vazão de ar, tem-se o aumento da queda de pressão no leito até o ponto B' , uma vez que nesta faixa de operação ocorre a interrupção do jorro. As partículas retornam para o centro do leito, obstruindo o topo do canal preferencial e, posteriormente, a redução do jato interno e compactação das partículas. A queda de pressão no ponto B' é inferior à queda no ponto B uma vez que, com a redução da vazão de ar, não há a demanda de energia necessária para promover a expansão do leito e superar a resistência mecânica das partículas. A partir de B' a diminuição na vazão de ar leva a uma redução de ΔP até o ponto A . Através da Figura 1.4, também é possível observar a influência da altura do leito estático (H) sobre os parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro, havendo o aumento de u_{ms} , $\Delta P_{máx}$ e ΔP_s com o aumento de H (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

1.1.3.2. ESTABILIDADE DO LEITO DE JORRO

Em condições específicas podem acontecer fenômenos indesejados, como a formação de canais preferenciais na região anular, aumento da queda de pressão, coesão das partículas e formação de zonas vazias abaixo do leito (“slugging”), borbulhamento da corrente gasosa e o colapso do canal de jorro, estando estes fenômenos relacionados à instabilidade do leito. Os leitos com escoamento pistonado e borbulhante são representados na Figura 1.5. Entre os principais fatores que afetam a estabilidade do leito estão a sua geometria, vazão de ar e as características das fases sólida e fluida.

A geometria do leito se refere à altura do cone, relação entre os diâmetros da base, ângulo do cone e o diâmetro da alimentação de gás, como o diâmetro inferior da base cônica, D_i , o diâmetro superior da base cônica e do cilindro, D_c , o diâmetro das partículas, d_p , e a altura do leito estático, H . Para que a operação do leito de jorro seja estável, existe um limite na relação entre os diâmetros do leito, sendo estes limites de 0,3 para D_i/D_c e limite entre 40 e 50 para D_i/d_p . Estas razões entre os diâmetros característicos influenciam diretamente a altura máxima do leito estático, sendo observada a diminuição de H com o aumento do diâmetro do orifício de alimentação de gás, D_i . Também é observada uma maior estabilidade com a diminuição de D_i , implicando em uma razão D_i/D_c cada vez menor, no entanto, esta redução também é limitada, uma vez que orifícios pequenos provocam uma queda de pressão acentuada no leito. O ângulo da base cônica também influencia a estabilidade do leito, uma vez que a inclinação facilita o movimento descendente das partículas na região do ânulo, entretanto a faixa recomendada para o ângulo do cone é de 40° a 60° (ADEODATO, 2003; MATHUR; EPSTEIN, 1974).

Outros autores também identificaram relações entre fatores geométricos e a estabilidade do leito de jorro. Foi avaliada a operação de leitos de jorro semicirculares variando o ângulo do

cone, de 30, 45 e 60°, sendo observado o aumento na velocidade de mínimo jorro com o aumento do ângulo do cone. No entanto, os autores não observaram uma influência significativa do diâmetro da alimentação do gás sobre o mínimo jorro (WANG *et al.*, 2004). A altura do leito estático também influenciou a formação de aglomerados de partículas, sendo observada uma menor frequência de ocorrência e maior irregularidade na geometria dos blocos para maiores alturas (YUE *et al.*, 2021).

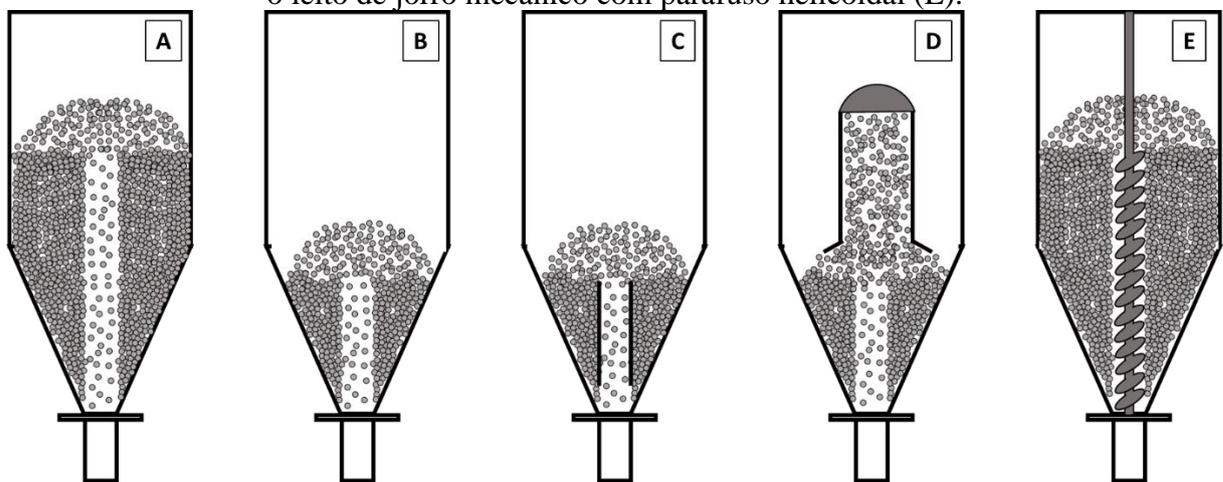
As características das partículas presentes no leito também influenciam a estabilidade do jorro. O diâmetro das partículas (d_p) e sua densidade (ρ_p) são limitadas e as características para o regime de jorro podem ser identificadas através do Diagrama de Geldart. Fora da faixa considerada ideal o leito de jorro pode apresentar instabilidades. Existe uma recomendação de que as partículas presentes no leito de jorro alimentado por ar devem apresentar um diâmetro mínimo de 1 mm, entretanto, partículas menores podem ser utilizadas desde que o equipamento seja modificado (PABLOS *et al.*, 2018). Leitos compostos por partículas finas apresentam uma expansão favorecida em comparação a partículas grosseiras (KUMAR; VINOD, 2018). Ademais, uma uniformidade na geometria das partículas também é necessária para que o leito opere de forma estável (ADEODATO, 2003). Irregularidades na geometria seriam responsáveis pela formação de elementos associados à instabilidade, como canal em formato de “S”, vórtices nas regiões superiores do leito e o movimento circular de partículas no canal do jorro (WANG *et al.*, 2021). Na avaliação da fluidodinâmica de leitos de jorro com misturas binárias de partículas foi observada uma relação entre a geometria e a operação, com uma menor queda de pressão observada para partículas com menor diâmetro (SANTOS *et al.*, 2015). A mistura de partículas leva ao fenômeno de segregação, em que partículas grosseiras se acumulam próximo ao canal de jorro enquanto as partículas finas se acumulam próximo à parede do equipamento, embora a adição de partículas grosseiras possa aumentar a estabilidade da operação (DU *et al.*, 2015; PIETSCH *et al.*, 2019).

A vazão de ar também é um parâmetro de grande importância na operação estável do leito de jorro, uma vez que este parâmetro pode ser ajustado com alguma facilidade durante a operação, diferente da geometria do leito. Caso a velocidade do ar seja inferior à u_{ms} ocorre o colapso do leito e o regime de jorro é interrompido. Ademais o ajuste na vazão de ar permite a operação com leitos que possuam uma maior altura de leito estático, entretanto este aumento não garante a estabilidade do processo, podendo ser observados fenômenos de instabilidade. Existem correlações empíricas que relacionam a velocidade de jorro com outras variáveis do processo, como a geometria do leito e propriedades da partícula (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

1.1.4. MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS DO LEITO DE JORRO

Embora o leito de jorro convencional seja um equipamento versátil, como apresentado anteriormente, existem limitações para sua operação, como grande demanda de ar, elevadas quedas de pressão no leito, geometria das partículas, arraste de partículas, entre outras. Para superar estas limitações na operação existem algumas modificações no projeto, dentre elas a própria geometria do leito, inserção de dispositivos internos ou a adição de agitadores mecânicos. A Figura 1.6 apresenta o leito de jorro convencional e suas principais modificações.

Figura 1.6. O leito de jorro convencional (A) e suas modificações estruturais, o leito de jorro cônico (B), o leito de jorro com tubo draft (C), o leito de jorro com confinador de fonte (D) e o leito de jorro mecânico com parafuso helicoidal (E).



Fonte: elaborado pelo autor

Vale destacar que, apesar das modificações estruturais nos equipamentos, o leito de jorro mantém em sua construção uma base cônica com a alimentação de ar em seu menor orifício, Figura 1.6 A, B, C e D. Deste modo, o movimento dos sólidos é facilitado e não ocorre a formação de zonas mortas próximo à alimentação do gás. A primeira modificação do leito de jorro é a sua geometria. No leito de jorro convencional, as partículas são adicionadas ao equipamento preenchendo completamente sua base cônica e parte do cilindro, sendo esta geometria denominada cônica-cilíndrica (LJ – cônico-cilíndrico). Ao adicionar uma menor quantidade de partículas, apenas a base cônica é completamente ou parcialmente preenchida, sendo esta nova geometria denominada cônica (LJ – cônico). O leito cônico funciona de forma estável em uma faixa maior de vazão de gás, sendo possível operar este equipamento em dois regimes diferentes, leito de jorro ou leito de jato, a depender da velocidade do gás utilizada (OLAZAR *et al.*, 1999).

Elementos também podem ser adicionados ao equipamento, como o tubo draft e o confinador de fonte. O tubo draft é um cilindro de diâmetro menor que é adicionado acima da

alimentação de ar no centro da base cônica e funciona como uma barreira física entre a região anular e o canal do jorro. Com a adição do tubo draft, as partículas migram da região anular para o jorro próximo à alimentação de ar enquanto no leito de jorro convencional as partículas migram ao longo de toda a extensão do canal de jorro. A adição do tubo draft melhora o desempenho do equipamento devido à diminuição da velocidade de mínimo jorro e menor queda de pressão no leito (ALTZIBAR *et al.*, 2013). O confinador de fonte é adicionado sobre o leito estático limitando fisicamente a região da fonte. Com a adição desta barreira física, o leito pode operar com estabilidade com partículas menores e faixas mais amplas de vazão de ar, uma vez que a presença do confinador impede o arraste das partículas finas, aumentando a razão de D_i/d_p para 1000 (TELLABIDE *et al.*, 2020).

A adição de agitadores ao leito de jorro (leito de jorro mecânico) tem como objetivo modificar os mecanismos responsáveis pelo movimento das partículas. Mesmo que as modificações estruturais descritas anteriormente favoreçam a operação, reduzindo a vazão de gás e melhorando a eficiência energética, a circulação de sólidos ainda depende exclusivamente do arraste pela vazão de gás. Deste modo, foi proposta a adição de um parafuso helicoidal ao longo do eixo vertical do equipamento, modificando o mecanismo que promove a mistura do leito enquanto mantém o contato entre as fases sólida e gasosa comparável ao leito de jorro convencional. Os movimentos rotacionais do parafuso juntamente com o fluxo ascendente de uma corrente gasosa são responsáveis pelo transporte ascendente das partículas em um fenômeno conhecido como “jato mecânico”. Ao alcançar a altura máxima, as partículas caem e retornam à região anular, onde se movimentam pela ação gravitacional e ao chegarem à base do cone são transportadas novamente pelo parafuso, estabelecendo um movimento cíclico (SOUSA *et al.*, 2019; SZENTMARJAY *et al.*, 2011).

Pelas características do leito de jorro mecânico, o movimento das partículas é promovido principalmente pela rotação do parafuso helicoidal, sendo independente da vazão de ar. Deste modo, sem a demanda de ar necessária para movimentar as partículas, o fornecimento de ar quente ao leito de jorro mecânico pode ser ajustado para valores ideais para a secagem (SZENTMARJAY *et al.*, 2011). Consequentemente, a agitação mecânica do leito proporciona uma maior eficiência energética, sem o “descarte” de grandes volumes de ar aquecido na exaustão do equipamento, além de outras vantagens, como a mitigação do colapso no leito e maior estabilidade na operação (BRITO *et al.*, 2018). O leito de jorro com parafuso helicoidal mostrou-se altamente versátil, sendo aplicado na secagem de suspensões de hidróxido de alumínio e concentrados de tomate, além de ser utilizado para concentrar albumina

bovina (PALLAI-VARSÁNYI *et al.*, 2007). A adição de parafuso helicoidal ao leito de jorro também foi capaz de reduzir em até 50% a demanda de ar na secagem de alumina e soluções de carbonato de cálcio em comparação ao leito convencional (SOUSA *et al.*, 2019). Dentre as desvantagens do leito de jorro com agitação mecânica tem-se a maior complexidade da operação, demanda energética para movimentar a haste e o aumento da superfície de contato, levando a uma maior adesão de partículas coesas.

Reyes e Vidal (2020) utilizaram agitadores mecânicos cujo movimento rotacional, diferentemente do parafuso helicoidal, promovia a agitação das partículas em toda a base cônica. Estes agitadores eram compostos por placas metálicas com geometria triangular e elementos menores fixados sobre as placas, próximos à superfície interna do equipamento. Nestas condições, a agitação mecânica tornava o leito uniforme, não havendo a formações de caminhos preferenciais e regiões distintas quanto à mobilidade das partículas, como as regiões características do leito de jorro convencional. Deste modo, o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro modificado com agitação mecânica seria comparável a um leito pseudo-fluidizado. Ademais, a vazão de ar demandada pelo leito seria significativamente menor se comparado a um leito de jorro sem agitação (REYES; VIDAL, 2000). A velocidade de agitação do leito de jorro com agitadores de pás viabiliza a sua operação, reduzindo as quedas de pressão máxima e operacional, além da velocidade de mínimo jorro (BARROS *et al.*, 2020). A inclinação das pás presentes no agitador mecânico também apresentou uma influência significativa sobre a eficiência do processo, tendo os agitadores inclinados apresentado um desempenho superior ao leito de jorro convencional e ao leito de jorro com agitadores de pás retas (BARROS *et al.*, 2022).

1.1.5. SECAGEM DE MATERIAIS ORGÂNICOS EM LEITO DE JORRO

O leito de jorro se mostrou um equipamento versátil na secagem de materiais das mais diversas naturezas, como partículas sólidas, sementes, pastas na presença de inertes e é aplicável também na secagem de biomassas. Dentre os exemplos de aplicação do leito de jorro no processamento de materiais orgânicos, tem-se a secagem de fermento de pão utilizando múltiplos estágios para a produção de células viáveis (GRABOWSKI *et al.*, 1997; SPREUTELS *et al.*, 2014). Embora o leito de jorro demande uma grande quantidade de ar para viabilizar a operação, em alguns casos ele pode ser utilizado na secagem de grandes volumes de partículas sólidas como observado no trabalho de Hung-Nguyen *et al* (2001), em que foi desenvolvido um leito de jorro triangular em escala piloto para a secagem em batelada de 500 kg de arroz, reduzindo a umidade de 25 a 15% utilizando dois estágios (HUNG-NGUYEN *et*

al., 2001). O leito de jorro também pode ser utilizado simultaneamente como secador e alimentador para outros equipamentos. Olazar *et al* (2012) utilizaram o leito de jorro para reduzir a umidade de serragem anteriormente à pirólise, analisando a influência da temperatura e velocidade do ar e granulometria da serragem. A secagem de partículas grosseiras foi favorecida em relação a partículas finas. A adição de tubo draft, no entanto, prejudicou a operação devido à diminuição do contato entre as fases (OLAZAR *et al.*, 2012). O leito de jorro também foi utilizado na secagem de banana verde com cascas (BEZERRA *et al.*, 2013), grãos de arroz e trigo (JITTANIT *et al.*, 2013), amendoim (ZHU *et al.*, 2021), inhame (LI *et al.*, 2022), entre outros.

1.1.6. EXPERIÊNCIA DO CENTRO DE SECAGEM

O Centro de Secagem de Pastas e Sementes, situado no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, onde o presente trabalho foi realizado, possui experiência no desenvolvimento e análise de leitos de jorro, incluindo o leito de jorro com agitadores de pás inclinadas. O quadro a seguir apresenta os principais trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa e suas respectivas conclusões.

Quadro 1.1. Trabalhos sobre a operação em leito de jorro realizados por pesquisadores do Centro de Secagem de Pastas e Sementes do DEQ/UFSCar.

Referência	Título	Conclusões
(FERNANDES, 2005)	Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leito de jorro	A eficiência energética, razão entre energia necessária para evaporar água e necessária para movimentar e aquecer o ar, aumentou com o aumento da vazão de passa e pela diminuição da potência de aquecimento e do soprador.
(BACELOS, 2006)	Análise do comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro com misturas de tamanho de partículas	O leito pôde operar de forma estável tanto para misturas de partículas quanto para geometria uniforme. A segregação foi atenuada com o aumento da altura do leito e menor razão entre os diâmetros de partículas.

Quadro 1.2. Continuação do Quadro 1.10.

(DA ROSA, 2010)	Estudo experimental e numérico da fluidodinâmica e das transferências de calor e massa em um leito de jorro contínuo: Uso da técnica CFD	Formulação Euler-Euler descreveu bem a fluidodinâmica de um leito com alimentação contínua de sólidos. O mesmo para a equação diferencial de energia descrevendo a transferência de calor e o acoplamento de fenômenos de transferência descrevendo a secagem.
(BITTI, 2012)	Avaliação das condições operacionais na taxa de evaporação de água em leito de jorro	Geometria do bocal de entrada do ar influenciou a fluidodinâmica do leito úmido e seco. Foi proposta uma relação entre a taxa de evaporação e velocidade e temperatura do ar, vazão de água e massa de inertes.
(NASCIMENTO, 2013)	Análise do efeito da composição química na secagem de pasta em leito de jorro	Foram analisadas diversas pastas, observando a influência sobre parâmetros operacionais, temperatura de saída, quedas de pressão, temperatura de bulbo seco e úmido e foi observado que a composição da pasta influenciou o processo, especialmente a concentração de açúcares e gordura.
(PERAZZINI, 2015)	Análise do efeito das condições operacionais e características geométricas do leito de jorro na secagem de pastas	Mantendo a massa de inertes, o aumento do ângulo de cone de 45 para 75° reduziu u_{ms} , $\Delta P_{máx}$ e ΔP_s . Entretanto, mantendo o ângulo do cone, o aumento da massa de inertes aumentou os parâmetros fluidodinâmicos.
(VIEIRA, 2015)	Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos pela secagem de pastas em leito de jorro	Foi proposta a utilização de um sensor virtual para estimar a umidade do leito integral seco em leito de jorro utilizando um modelo híbrido CST/neural. Os resultados do sensor apresentaram boa concordância nas condições avaliadas.

Quadro 1.3. Continuação do Quadro 1.10.

(SILVA, 2016)	Análise da dinâmica de secagem de pastas em leito de jorro	Foram realizados experimentos de secagem com perturbação e intermitência para estudar o período transiente da secagem. Um modelo formado por equações diferenciais ordinárias acopladas e uma equação empírica para a taxa de evaporação descreveram bem o processo.
(SOUSA, 2017)	Secagem de materiais pastosos e granulares no leito de jorro mecânico e convencional	Partículas com geometria irregular, como a dolomita, apresentaram maior atrição no leito de jorro. Composição da pasta influenciou a circulação das partículas, interferindo na queda de pressão e na umidade na saída do ar.
(BARROS, 2018)	Acúmulo, elutriação e recuperação do produto na secagem de pasta em leito de jorro	Foi avaliada a influência das condições operacionais sobre o acúmulo de material no leito, recuperação no ciclone e elutriação retida em filtros. O aumento da vazão de pasta e diminuição da temperatura favoreceu o acúmulo de material. Partículas maiores se acumularam, intermediárias recuperadas e menores elutriadas e filtradas.
(SOUZA, 2019)	Avaliação por CFD da fluidodinâmica e da transferência de calor em leitos de jorro para diferentes ângulos da base cônica	Menores ângulos de cone e maiores velocidades do ar favoreceram a movimentação das partículas no leito de jorro, tanto pela melhoria do tempo de ciclo quanto pela vazão de sólidos no canal do jorro. Foram avaliadas 7 geometrias variando de 30 a 150°.
(DE PAULA, 2019)	Sensor virtual para estimativa de umidade e temperatura na fase sólida durante processo de secagem em leito de jorro	Foi proposto o uso de um sensor virtual que relaciona parâmetros de fácil acesso à temperatura e umidade de materiais porosos. Foi observada boa concordância para a umidade, mas como não havia disponibilidade de dados experimentais para a temperatura não foi possível validá-la, embora a resposta foi próxima do comportamento esperado.

Quadro 1.4. Continuação do Quadro 1.10.

(BATISTA, 2019)	Fluidodinâmica e transferência de calor em leitos de jorro visando a secagem em grãos de sorgo: análise experimental e simulação numérica por CFD-DEM e TFM	O acoplamento CFD-DEM descreveu bem o comportamento do leito de jorro, facilitando a influência dos parâmetros operacionais. Com as simulações, foram avaliados seis ângulos diferentes para a base cônica, sendo observado que menores ângulos melhoraram a circulação dos sólidos.
(BORGES, 2020)	Determinação experimental de parâmetros de interação e aplicação na simulação CFD-DEM de leito de jorro	Foram avaliados os parâmetros de interação partícula-superfície para ABS e acrílico, utilizando os dados para simular a operação de leito de jorro em CFD. Foi observada boa concordância com os dados experimentais.
(SOUSA, 2020)	Estudo sobre o desempenho de válvulas não-mecânicas como alimentadores de biomassa residual de borra de café em reatores de leito pneumático circulante: experimentação e modelagem via CFD-DEM	O alimentador de tipo leito de jorro teve o desempenho comparado a uma válvula tipo <i>L</i> . Foi observado que o leito de jorro foi capaz de fornecer uma maior quantidade de sólidos ao sistema de forma mais estável. Foram propostas simulações para a alimentação via CFD-DEM.
(BRITO, 2021)	Intermittent drying and draft tube design for spouted beds	O autor propôs a combinação de modificações à operação do leito de jorro, a adição de um tubo draft, intermitência na alimentação de ar e reciclo de ar para reaproveitamento energético. Foi observada uma melhoria no desempenho energético do secador de leito de jorro.
(BARROS, 2022)	Análise de diferentes configurações do leito de jorro com agitador mecânico e do equipamento convencional	O uso de agitadores mecânicos (parafuso helicoidal, agitador de pás inclinadas e agitador de pás retas), reduziu a vazão de ar necessária para agitar o leito e melhorou sua estabilidade.

1.2. MATERIAIS E MÉTODOS

1.2.1. PREPARAÇÃO DO BAGAÇO DE LARANJA

O bagaço de laranja utilizado no presente trabalho foi obtido a partir do fruto da laranja Pêra, *Citrus sinensis*. O suco de laranja foi extraído com o auxílio de um extrator de frutas industrial Mondial TURBO 250W, restando a sua casca (epicarpo e mesocarpo), membranas e sementes. O bagaço foi mantido em recipiente inerte a uma refrigeração constante a 3 °C.

Inicialmente, o bagaço de laranja foi triturado em um liquidificador industrial modelo Metalurgica 7000 Light. O processo de trituração foi dividido em duas etapas: na primeira etapa, 250 g do bagaço de laranja “original” eram adicionados ao liquidificador e processados por aproximadamente 1 min; na segunda etapa, 400 g do bagaço de laranja triturado na primeira etapa eram novamente adicionados ao liquidificador por 1 min para reduzir o tamanho das partículas obtidas. O bagaço de laranja triturado era dividido em três partes, uma parte era alimentada diretamente no leito de jorro, enquanto as outras partes eram submetidas a etapas adicionais de pré-tratamento. O bagaço de laranja triturado é mostrado na Figura 1.7.

Figura 1.7. Bagaço de laranja triturado em liquidificador industrial.

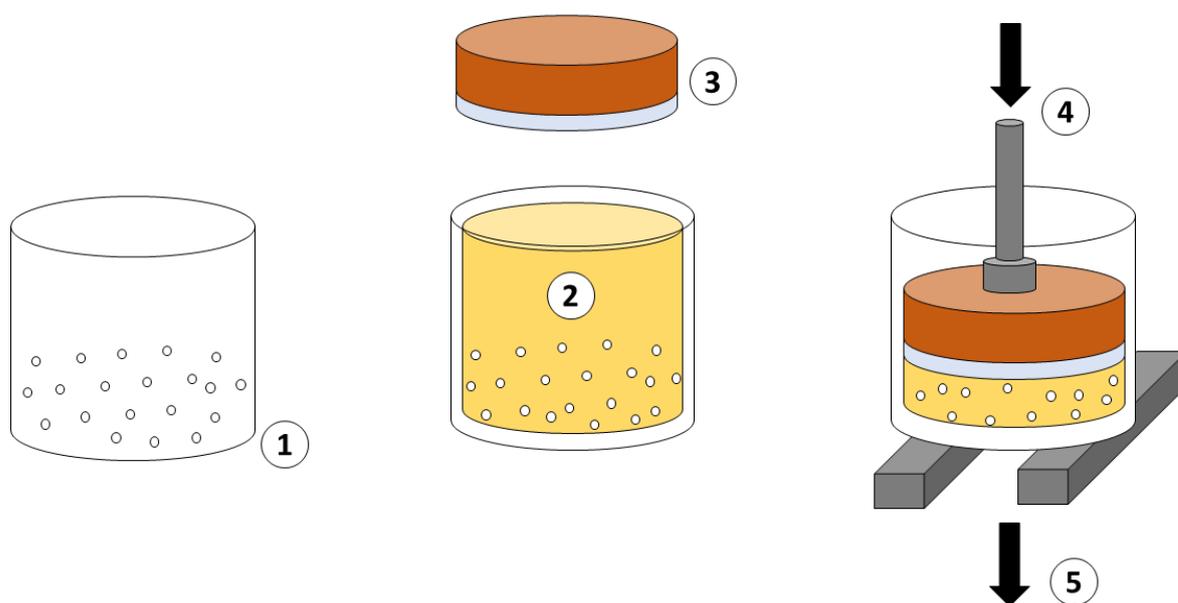


Fonte: Elaborado pelo autor.

A prensagem do bagaço de laranja foi utilizada como pré-tratamento após a trituração e anteriormente à alimentação no leito de jorro. Aproximadamente 1 kg de bagaço triturado era confinado em um tecido de algodão que funcionava como meio filtrante e impedia a perda de material durante a prensagem, sendo então adicionado à célula de prensagem. A célula de prensagem foi construída por um cilindro de aço galvanizado com diâmetro de 17,6 cm e 14

cm de altura, soldado a uma peneira de aço inoxidável. Diversos orifícios com 0,3 cm de diâmetro foram feitos no cilindro de aço para permitir a passagem de água durante a prensagem e hastes de aço foram soldadas na base da célula para evitar o acúmulo de líquido e seu retorno ao término da operação. Sobre o bagaço de laranja, era adicionado um pistão de madeira com base de acrílico com 1 cm de espessura. Com a célula completamente montada, todo o sistema era submetido a uma força de compressão de 3,8 tonf, pressão de aproximadamente 1530 Pa, em uma prensa hidráulica por 1 min, removendo mecanicamente parte da umidade presente no bagaço de laranja. A água removida durante a prensagem foi reservada e posteriormente pesada. O bagaço de laranja a ser prensado era misturado com cal virgem, a uma proporção de 1% em massa, para romper a parede celular da biomassa e facilitar a remoção de umidade. A concentração de sólidos solúveis presentes no caldo da prensa foi determinada com o auxílio de um refratômetro Digital Brix/RI-Check Reichert previamente calibrado com água destilada. A Figura 1.8 ilustra o processo de prensagem do bagaço de laranja.

Figura 1.8. Representação esquemática da prensagem do bagaço de laranja, sendo (1) a célula perfurada de aço, (2) o bagaço de laranja adicionado no interior da célula, (3) pistão de madeira e acrílico, (4) sentido de aplicação da força de compressão e (5) remoção de caldo.



Fonte: elaborado pelo autor.

1.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO DE LARANJA

1.2.2.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Para avaliar a distribuição de tamanhos do bagaço de laranja foi utilizado o peneiramento com a auxílio de um agitador mecânico e foram selecionadas peneiras com

aberturas de 3.5, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 14, 16, 20, 25 e 30 mesh, além do fundo. O bagaço de laranja foi previamente seco em estufa a 105 °C para evitar a adesão de partículas úmidas durante os ensaios. 200 g de bagaço seco foram submetidos ao peneiramento por 5 min, sendo os ensaios realizados em triplicatas. A massa de material retida em cada peneira foi pesada, sendo a fração mássica para a *i*-ésima peneira, x_i , calculada pela razão entre a massa retida e a massa total. Finalmente, foi calculado o diâmetro médio de Sauter através da Equação 1.7, onde $d_{p,i}$ é a abertura da peneira (GOMIDE, 1983):

$$\bar{d}_s = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{p,i}}} \quad (1.7)$$

1.2.2.2 UMIDADE DA BIOMASSA

A umidade do bagaço de laranja foi determinada através do método de estufa, submetendo o material a uma secagem a 105 °C por 24 h. A umidade em base úmida, X_{bu} , e a umidade em base seca, X_{bs} , foram determinadas através das Equações 1.8 e 1.9, respectivamente, onde $m_{\text{água}}$ seria a massa de água removida pela secagem, m_{seca} a massa de bagaço seco e m_{total} a massa de bagaço úmido antes da secagem:

$$X_{bu} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{total}}} \quad (1.8)$$

$$X_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{seca}}} \quad (1.9)$$

1.2.2.3 DENSIDADE BULK E ÍNDICE DE HAUSNER

A densidade bulk corresponde ao arranjo das partículas de acordo com o seu formato e grau de empacotamento, sendo calculada através da Equação 1.10 (GOMIDE, 1983):

$$\rho_b = \frac{m_{\text{sólidos}} + m_{\text{vazios}}}{V_{\text{sólidos}} + V_{\text{vazios}}} \quad (1.10)$$

onde $m_{\text{sólidos}}$ é a massa das partículas, $V_{\text{sólidos}}$ é o volume ocupado pelas partículas, m_{vazios} é a massa da fase que percola o arranjo das partículas, normalmente ar, e V_{vazios} é o volume dos vazios. A densidade bulk aerada, ρ_a , corresponde ao mínimo empacotamento das partículas, condição em que estas são dispostas no leito sem serem submetidas à compressão ou compactação, enquanto a densidade bulk consolidada, ρ_c , é a densidade das partículas submetidas a sucessivas batidas para promover o rearranjo, preenchimento dos espaços vazios e a consequente redução do volume total do leito.

O índice de Hausner, HR, é um número relacionado à escoabilidade do material. Deste modo, partículas com HR superior a 1,4 tendem a ser coesivas (baixa escoabilidade), aquelas com HR variando de 1,25 a 1,4 têm uma escoabilidade moderada, partículas com HR entre 1,1

e 1,25 possuem uma boa escoabilidade e aquelas com HR inferior a 1,1 seriam essencialmente não-coesivas e, conseqüentemente, apresentam uma excelente escoabilidade. O índice de Hausner é calculado pela Equação 1.11.

$$HR = \frac{\rho_a}{\rho_c} \quad (1.11)$$

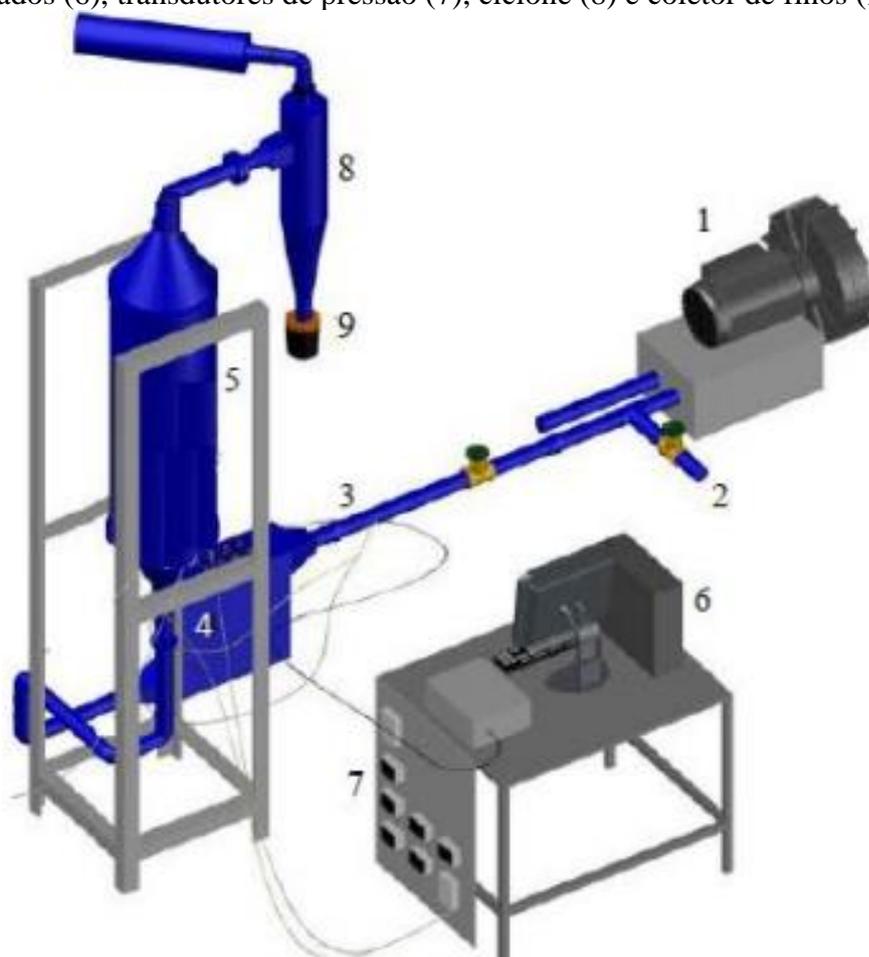
1.2.3. FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO CONVENCIONAL

1.2.3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL

Para os ensaios de fluidodinâmica do bagaço de laranja em leito de jorro foi utilizada uma unidade experimental disponível no Centro de Secagem de Pastas e Sementes do Departamento de Engenharia Química/UFSCar, sendo esta unidade e seus principais elementos representados nas Figuras 1.9 e 1.10.

Um soprador da marca IBRAM com uma potência nominal de 7,5 HP e vazão máxima de 4 m³/min foi utilizado para fornecer ar ao sistema. Após a saída do soprador encontra-se um sistema de válvulas *by-pass*, em que a corrente gasosa era dividida em dois segmentos de tubulação, um segmento direcionava o ar para a entrada do leito e outro segmento descarregava o excesso de ar para o ambiente. Cada segmento possuía uma válvula do tipo gaveta de duas polegadas e o ajuste da vazão de ar alimentada no leito de jorro era feito manualmente através da abertura e fechamento destas válvulas. Um tubo de Venturi foi inserido no segmento de tubulação que direcionava o ar para o leito de jorro com o objetivo de quantificar a velocidade do ar. O ar era previamente aquecido através de um sistema de resistências e a temperatura era controlada por um aquecedor modelo Flyever FE50RPN com o auxílio de um termopar posicionado antes da alimentação no leito. Transdutores de pressão da marca Auto Tran 860 com faixa de operação de 0-5 psi foram utilizados para medir a diferença de pressão no tubo de Venturi e entre a alimentação e saída da câmara principal. Os sinais elétricos dos transdutores foram enviados juntamente com os sinais dos termopares posicionados ao longo do sistema para um condicionador de sinais marca Lynx modelo MCS 1000 V.3 e posteriormente enviados para um computador, sendo fornecidos ao usuário através do programa LabView versão 6.1. Na exaustão do equipamento foi posicionado um ciclone para separar as partículas arrastadas da corrente gasosa, sendo as partículas coletadas em um recipiente posicionado abaixo do ciclone.

Figura 1.9. Representação esquemática tridimensional da unidade experimental presente no Centro de Secagem e seus principais elementos: soprador (1), sistema de válvulas by pass (2), tubo de Venturi (3), caixa de resistências (4), câmara principal (5), sistema de aquisição de dados (6), transdutores de pressão (7), ciclone (8) e coletor de finos (9).



Fonte: Sousa et al (2018).

O leito de jorro foi construído com chapas de aço inoxidável com 1,5 mm de espessura. A coluna cilíndrica do leito possuía uma altura de 87,0 cm e um diâmetro de 30,0 cm sendo posicionada entre dois cones com 45° graus de inclinação, diâmetro superior de 30,0 cm, diâmetro inferior de 2 polegadas (5,43 cm), correspondente ao bocal de alimentação, e altura de 27,0 cm. A coluna cilíndrica apresentava dois visores circulares de acrílico com 7,5 cm de diâmetro que permitia ao experimentador visualizar o movimento das partículas na região da fonte ao se estabelecer o regime de jorro.

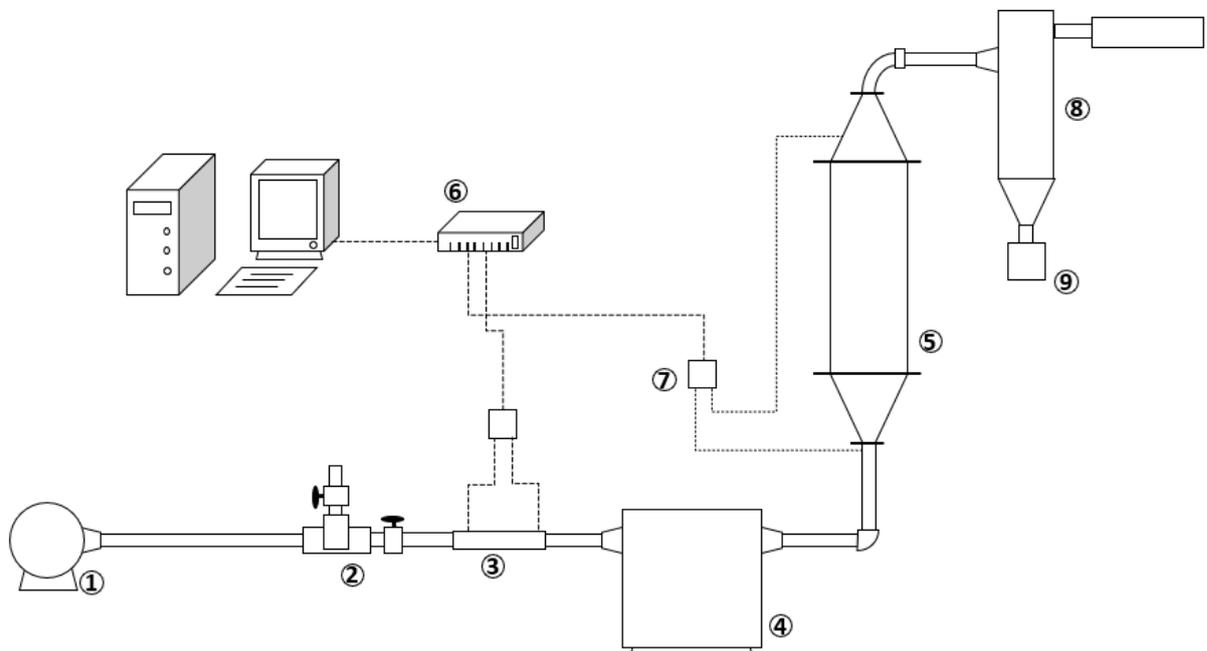
1.2.3.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Inicialmente, foi realizado um ensaio para avaliar a queda de pressão no leito sem a presença de partículas. Para tanto, após o acionamento do soprador a vazão de ar no leito era aumentada aos poucos, ao movimentar as válvulas no *by-pass*, de uma vazão igual a 0 até a vazão máxima do soprador. A curva que relaciona a queda de pressão no leito vazio em função

da velocidade do ar foi denominada “branco”. A queda de pressão no branco foi expressa pela Equação 1.12, onde u é a velocidade de ar e os coeficientes a e b foram determinados experimentalmente.

$$\Delta P_{branco} = au^b \quad (1.12)$$

Figura 1.10. Representação esquemática bidimensional da unidade experimental presente no Centro de Secagem e seus principais elementos: o soprado (1), o sistema de válvulas by pass (2), tubo de Venturi (3), caixa de resistências (4), câmara principal (5), computador (6), transdutores de pressão (7), ciclone (8) e coletor de finos (9).



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\Delta P_{branco} = au^b$$

O procedimento experimental para a obtenção da curva característica foi dividido em duas etapas, uma obtida à velocidade crescente do ar e outra obtida à velocidade decrescente. Na etapa a velocidade crescente, a vazão de ar era aumentada aos poucos até ser observado, através do visor presente na coluna cilíndrica, o rompimento da resistência do leito ao escoamento do ar e o consequente estabelecimento do regime de jorro. A velocidade em que ocorria o rompimento da resistência do leito era mantida por 5 minutos para coletar e pesar as partículas que eram arrastadas até o ciclone. Finalmente, a velocidade do ar era gradativamente reduzida a zero. A variação da queda de pressão total no equipamento (branco e leito) com a variação da velocidade do ar foi mensurada com o auxílio de um dos transdutores de pressão, sendo a queda de pressão no leito calculada pela Equação 1.13:

$$\Delta P_{leito} = \Delta P_{total} - \Delta P_{branco} \quad (1.13)$$

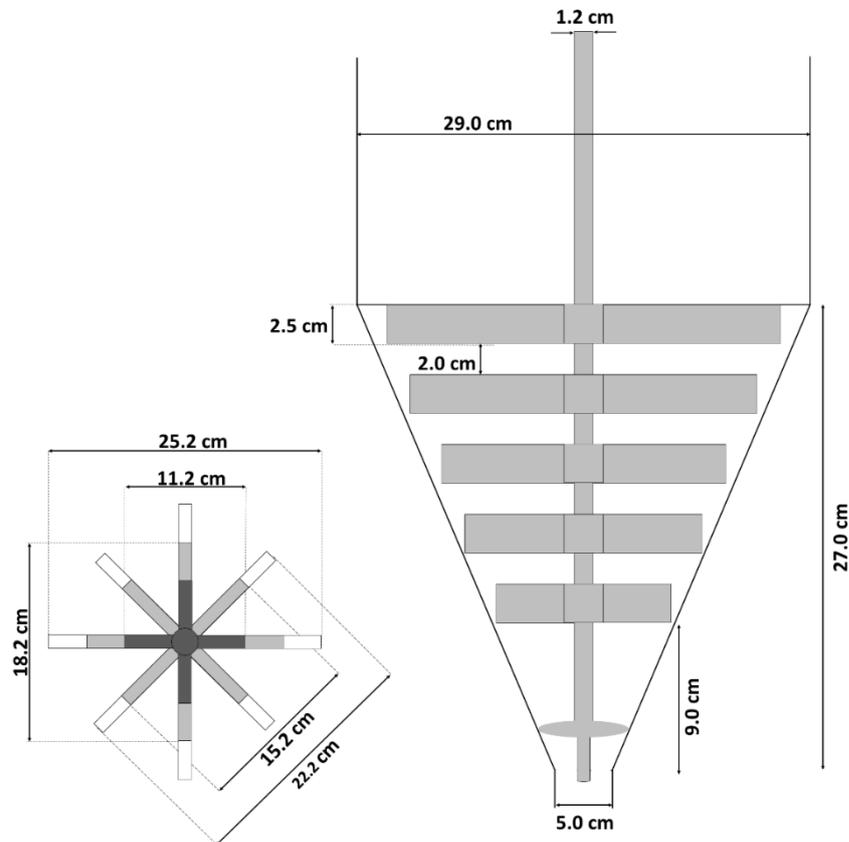
Para os ensaios de fluidodinâmica em leito de jorro foram utilizadas amostras de bagaço de laranja em três condições distintas, o bagaço *in natura*, bagaço prensado e bagaço misturado com 1% de CaO e prensado. Inicialmente, o bagaço foi adicionado ao sistema até preencher a base cônica até uma altura de 14,1 cm, um pouco acima de metade de sua altura total, sendo avaliado através das curvas características o estabelecimento ou não de um regime de jorro e os seus principais parâmetros fluidodinâmicos, a velocidade de mínimo jorro (u_{ms}) e a queda de pressão máxima ($\Delta P_{máx}$). Sendo observado o estabelecimento do regime de jorro, aumentava-se mais a quantidade do bagaço no leito, aumentando assim a altura de leito estático e os procedimentos eram realizados para essas novas condições. Os ensaios de fluidodinâmica foram repetidos para avaliar a sua repetibilidade.

1.2.4. FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO MODIFICADO

Para os ensaios de fluidodinâmica em leito de jorro modificado com agitação mecânica foi utilizado o mesmo aparato descrito na Seção 1.2.3.1 e representado pela Figura 1.9, tendo o leito modificado as mesmas dimensões, alimentação de ar e sistema de aquisição de dados para temperatura e pressão. No entanto, na configuração modificada foi utilizado um motor WEG NBR.7094 com potência nominal de 0,75 CV e velocidade de rotação máxima de 1715 rpm, posicionado acima da seção cônica superior do leito, que promovia um torque rotacional ao leito de partículas. Uma haste de aço com diâmetro de 1,2 cm e comprimento de 169,0 cm foi fixada no eixo do motor e posicionada sobre o distribuidor de ar na base do leito. Na região cônica inferior do leito, cinco conjuntos de quatro lâminas com inclinação de 45° foram fixados sobre a haste conforme representado pela Figura 1.11.

A obtenção da curva fluidodinâmica do leito de jorro modificado com agitação mecânica seguiu a metodologia adotada por Mathur e Epstein (1974), semelhante à utilizada para o leito de jorro convencional e descrita na seção 1.2.3.2, sendo a queda de pressão no leito a diferença entre a queda de pressão total no sistema carregado de partículas e a queda de pressão para o sistema vazio. Pela curva característica para o leito modificado, foi possível determinar a velocidade mínima de jorro, u_{ms} , e a queda de pressão de operação, ΔP_s . Foram avaliadas sete diferentes alturas de leito estático (H), 14,1, 16,7, 18,3, 21,1, 23,9, 25,4 e 27,0 cm.

Figura 1.11. Representação esquemática do agitador de pás inclinadas, dimensões de cada conjunto de pás, espaçamento, seção transversal e vista superior do agitador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.2.5. SECAGEM DO BAGAÇO DE LARANJA EM JORRO MODIFICADO

Com base em resultados obtidos previamente, em etapas preliminares de avaliação da fluidodinâmica do bagaço em leito de jorro convencional e modificado, foram determinadas condições necessárias para se realizar a secagem do bagaço de laranja. O pré-tratamento completo da biomassa, com a adição de cal virgem e prensagem, e a modificação do leito de jorro adicionando agitadores mecânicos, que permitiram a operação com a altura máxima da base cônica, foram essenciais para uma secagem controlada do bagaço de laranja, com menor ocorrência de instabilidades.

Deste modo, considerando as melhorias no processo, será avaliada a seguir somente a secagem do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com agitação mecânica, pois as demais condições não apresentaram um processo uniforme. Para avaliar a influência da velocidade do ar e da temperatura do ar de secagem sobre a cinética de secagem foi proposto o planejamento fatorial composto central descrito pela Tabela 1.1.

Tabela 1.1. Descrição do planejamento composto central para avaliação da influência da temperatura e velocidade do ar sobre a secagem.

Experimento	Fatores		Variáveis independentes	
	X1	X2	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)
1	-1	-1	50	2,20
2	1	-1	70	2,20
3	-1	1	50	4,40
4	1	1	70	4,40
5	-1,414	0	46	3,30
6	0	1,414	60	4,86
7	1,414	0	74	3,30
8	0	-1,414	60	1,74
9 (Central)	0	0	60	3,30
10 (Central)	0	0	60	3,30
11 (Central)	0	0	60	3,30

Fonte: Elaborado pelo autor.

O fator codificado X1 corresponde à temperatura do ar, enquanto o fator codificado X2 corresponde à velocidade do ar. Os valores avaliados para ambos parâmetros levaram em consideração os limites do processo de secagem. O limite inferior da temperatura foi 40 °C, uma vez que a temperatura mínima alcançada pelo sistema, sem o aquecimento pelas resistências elétricas, seria 37,5 °C e o limite superior da temperatura foi 80 °C. O limite inferior para a velocidade do ar foi 1,10 m/s, considerada a velocidade mínima de operação, u_{ms} , enquanto o limite superior foi 5,50 m/s, ou $5u_{ms}$.

A secagem foi conduzida até a estabilização da temperatura no centro do leito, sendo este um indicativo de que a secagem alcançou o seu equilíbrio dinâmico, não havendo a transferência de calor entre a biomassa e ar aquecido para a remoção de umidade. Este critério foi adotado por ser facilmente mensurado ao longo de todo o processo, uma vez que o software Labview fornece dados de temperatura e queda de pressão em tempo real. Em intervalos previamente definidos, foram coletadas amostras de biomassa, sendo levadas a uma estufa a 105 °C por 24 horas para a determinação de sua umidade sendo possível, assim, obter as curvas de cinética de secagem para cada condição avaliada. O tempo de secagem adotado como resposta no planejamento experimental foi adotado como o necessário para atingir 10% de umidade. A umidade relativa da corrente gasosa de exaustão foi determinada a partir das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido através das Equação 1.4 a 1.6.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1. PROPRIEDADES DO BAGAÇO DE LARANJA

1.3.1.1. UMIDADE DO BAGAÇO PRÉ-TRATADO

A Tabela 1.2 apresenta os dados de umidade para o bagaço de laranja em três condições distintas, o bagaço *in natura*, o bagaço prensado e o bagaço com 1% CaO prensado:

Tabela 1.2. Propriedades físicas do bagaço de laranja submetidos a diferentes pré-tratamentos: bagaço *in natura*, bagaço de laranja prensado e bagaço de laranja misturado com 1% de CaO e prensado.

Propriedade	Bagaço <i>in natura</i>	Bagaço prensado	Bagaço – 1% CaO prensado
Umidade b.s (kg água/kg seco)	3,71±0,10	3,49±0,03	2,53±0,08
Umidade b.u (kg água/kg total)	0,79±0,01	0,78±0,01	0,72±0,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pôde-se observar através dos resultados da Tabela 1.2 a influência do pré-tratamento utilizado para reduzir a umidade do bagaço de laranja. Nas condições avaliadas, a umidade foi o componente mais abundante da biomassa, aproximadamente 78,8% da massa total para o bagaço *in natura*, que foi somente triturado durante o pré-tratamento, e aproximadamente 71,7% da massa total para o bagaço que foi misturado com cal virgem e submetido à prensagem. Entretanto, apesar de a umidade continuar abundante, a prensagem reduziu a umidade total, especialmente quando o bagaço foi misturado a CaO. Isoladamente, a prensagem reduziu em 5,9% a umidade total, de 3,710 kg/kg para 3,489 kg/kg, enquanto a prensagem juntamente com a mistura com cal virgem reduziu a umidade total em 31,7%, de 3,710 kg/kg para 2,533 kg/kg. O pré-tratamento adotado atendeu seu objetivo, de reduzir a umidade através de um método de pouco custo.

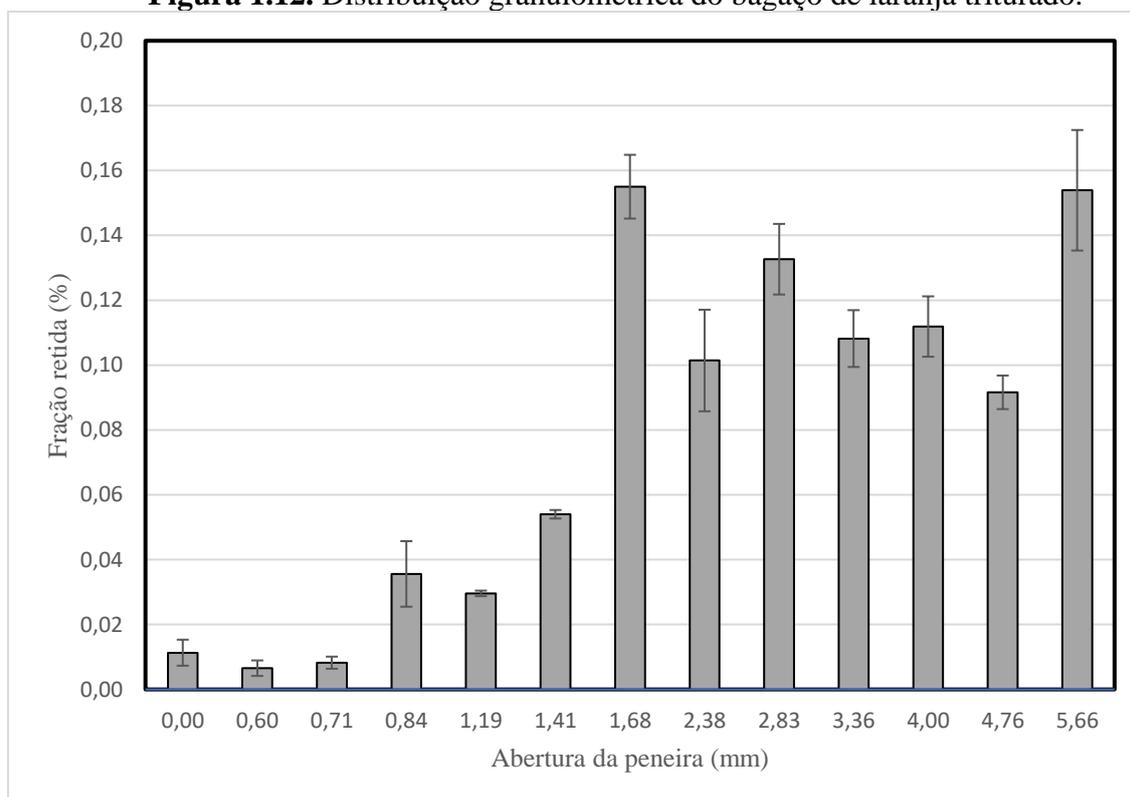
Segundo Barbosa et al (2020), ao se adicionar cal virgem ou hidratada ao bagaço de laranja haveria a liberação de cátions Ca^{2+} que interagem com grupos carboxila presentes nas moléculas de pectina. Naturalmente, a pectina seria responsável pela retenção de água ligada e açúcares solúveis pela formação de um gel, porém ao reagir com a cal, parte das moléculas de água são desprendidas. Durante a secagem em leito vibrofluidizado, não foi observada uma diferença significativa entre o bagaço tratado com cal e o bagaço *in natura*, indicando que as

alterações físicas na biomassa são referentes somente às interações com moléculas de água (BARBOSA *et al.*, 2020).

1.3.1.2. GRANULOMETRIA

A Figura 1.12 apresenta a distribuição granulométrica do bagaço de laranja obtida pelo método do peneiramento. O bagaço de laranja triturado no liquidificador industrial não apresentou uma uniformidade em sua geometria, apresentando desde partículas grosseiras que foram retidas na peneira com abertura de 5,66 mm até partículas finas que atravessaram a peneira com abertura de 0,595 mm. A maior fração das partículas do bagaço de laranja triturado apresentou dimensões grosseiras, uma vez que aproximadamente 83,37% do material tinha um diâmetro característico superior a 2,03 mm e um diâmetro médio de Sauter de 2,641 mm. A Tabela 1.3 apresenta as frações mássicas da biomassa para cada diâmetro.

Figura 1.12. Distribuição granulométrica do bagaço de laranja triturado.



Fonte: elaborado pelo autor.

1.3.1.3. DENSIDADE BULK E ÍNDICE DE HAUSNER

A Tabela 1.4 apresenta os dados para a densidade bulk aerada e consolidada, índice de Hausner e escoabilidade para o bagaço de laranja submetido aos três pré-tratamentos distintos, bagaço *in natura*, parcialmente e completamente tratado.

Tabela 1.3. Fração mássica retida acima de cada peneira durante ensaios de granulometria.

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

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 1.4. Densidade e escoabilidade do bagaço de laranja.

Propriedade	Bagaço <i>in natura</i>	Bagaço prensado	Bagaço – 1% CaO prensado
Densidade bulk aerada (kg/l)	0,468±0,002	0,476±0,003	0,421±0,007
Densidade bulk consolidada (kg/l)	0,704±0,004	0,719±0,005	0,624±0,017
Índice de Hausner (-)	1,504±0,009	1,511±0,004	1,482±0,015
Escoabilidade	Coesivo	Coesivo	Coesivo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Isoladamente, a prensagem do bagaço de laranja aumentou as densidades *bulk* aerada e consolidada apesar da diminuição da umidade da biomassa, conforme indicado pela Tabela 1.4. Estes resultados indicariam um maior empacotamento da biomassa devido à compressão das partículas durante o pré-tratamento. Com a adição de cal durante o processamento do bagaço de laranja, houve a diminuição das densidades *bulk* aerada e consolidada devido à remoção de aproximadamente 33% da umidade total, mesmo submetendo a biomassa às mesmas forças de

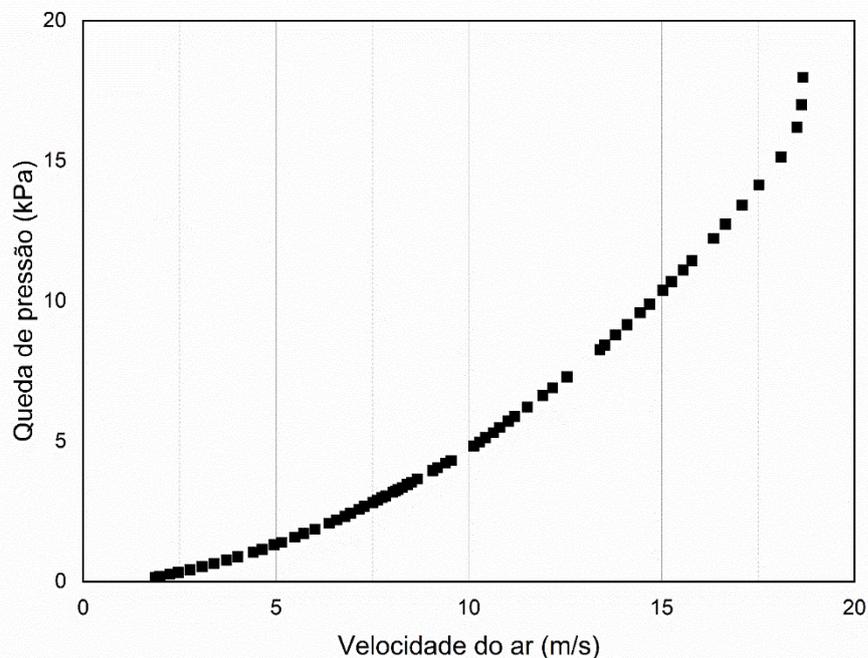
compressão. No entanto, o pré-tratamento não alterou significativamente o índice de Hausner, indicando que o bagaço tratado mantém características coesivas e sua difícil escoabilidade.

1.3.2. FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO

1.3.2.1. LEITO DE JORRO CONVENCIONAL

A Figura 1.13 apresenta a variação da diferença de pressão no sistema vazio em função da velocidade do ar, o “branco”. A queda de pressão foi expressa através da Equação 1.14, onde os coeficientes foram determinados numericamente para ajustar os dados experimentais.

Figura 1.13. Queda de pressão para o equipamento vazio, "branco".



Fonte: Elaborado pelo autor.

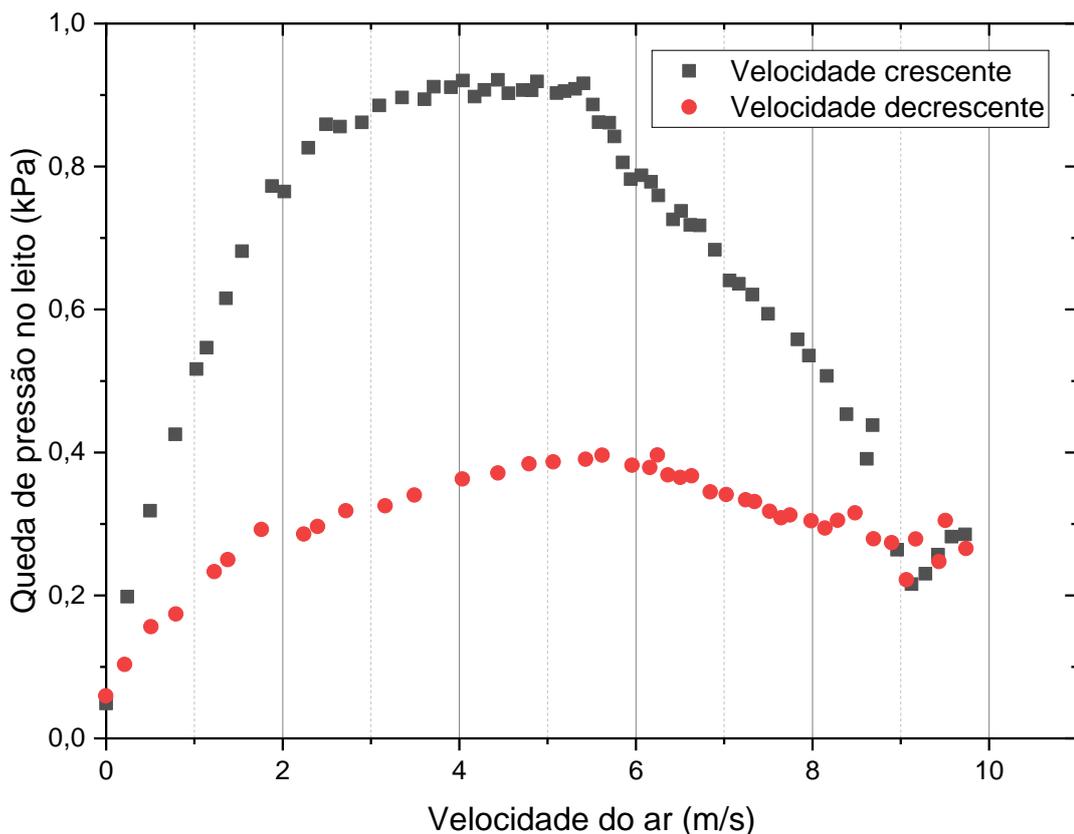
$$\Delta P_{branco} = 0,0566u^{1,929} \quad (1.14)$$

Inicialmente, foram realizados ensaios de fluidodinâmica do bagaço de laranja *in natura* e também no prensado sem mistura com CaO adicionando ao sistema 1,8 litros de material, que correspondia a uma altura de leito estático de 14,1 cm. Em ambas as condições, não foi possível o estabelecimento de um regime de jorro, mesmo com a vazão máxima do soprador sendo direcionada para o equipamento. Ao desmontar o equipamento para remover o bagaço após os experimentos, foi observado que houve a formação de uma região “vazia” logo abaixo do material, indicando que a biomassa úmida formou um aglomerado coeso que se movimentou como um pistão. Estes resultados estão de acordo com Freire *et al* (2017) que evidenciaram a necessidade de modificar o bagaço de laranja para realizar a sua movimentação em leito de jorro convencional, o que não foi possível para a biomassa pura. O procedimento realizado

pelos autores foi misturar ao bagaço de laranja úmido uma quantidade de bagaço seco para facilitar a expansão do leito e o rompimento da resistência mecânica (FREIRE *et al.*, 2017).

A rota sugerida neste trabalho, foi a mistura com cal virgem aliada à prensagem da biomassa, com isso foi possível movimentar as partículas no leito com a altura de leito estático igual a 14,06 cm. O aumento da vazão de ar foi responsável pela expansão do leito e, posteriormente, pelo rompimento da resistência mecânica do aglomerado e formação do canal de jorro no centro do leito. Entretanto, na velocidade em que ocorre o rompimento da resistência, parte das partículas, especialmente as que possuíam dimensões reduzidas, foram arrastadas pela corrente gasosa e coletadas no ciclone. Nestas condições, a perda de massa em relação à massa inicial foi estimada em 2,05%. A Figura 1.14 apresenta a curva característica para um leito com $H=14,06$ cm, através dela foram identificados os principais parâmetros fluidodinâmicos, $u_{ms}=8,69$ m/s, $\Delta P_{m\acute{a}x}=0,916$ kPa e $\Delta P_s=0,274$ kPa.

Figura 1.14. Curva característica para a queda de pressão em leito de jorro com bagaço completamente tratado e $H=14,06$ cm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

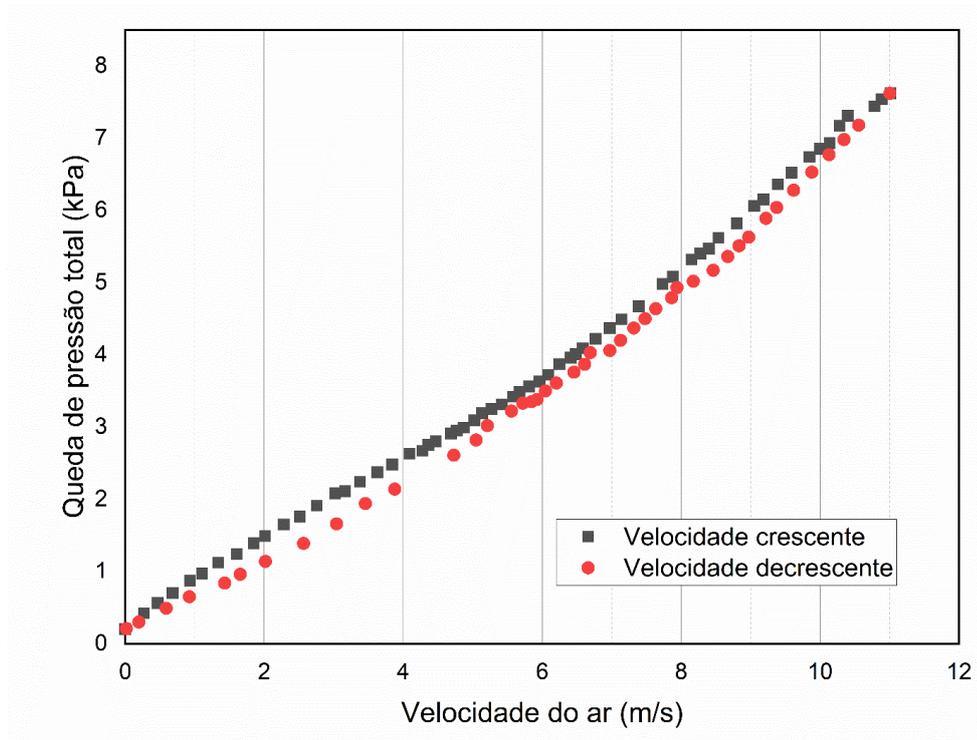
Com o estabelecimento do movimento das partículas com $H=14,06$ cm, houve o incremento na altura do leito estático até o limite da operação. Foram analisadas quatro alturas distintas, 16,69 cm, 18,33 cm, 21,12 cm e 23,91 cm, sendo a última a condição limite, uma vez

que nesta condição o soprador selecionado não foi capaz de promover o movimento das partículas.

Nestas condições foram observados, através dos visores de acrílico, fenômenos relacionados à instabilidade do leito, especialmente para 16,7 e 18,3 cm de leito estático, como o acúmulo de material próximo às paredes da base cônica e a formação do canal preferencial, no entanto, sem o arraste de partículas que se encontravam ao longo da fronteira entre o canal preferencial e o ânulo. Estes fenômenos modificaram significativamente o escoamento do ar, fazendo com que o canal preferencial não desempenhasse uma função de jorro, mas funcionasse como um prolongamento do tubo de alimentação de ar. Com isso, ocorreu uma diminuição muito acentuada na queda de pressão no leito, o que fez com que a queda de pressão total no sistema (diferença entre as pressões na entrada da base cônica e no cone de exaustão) com o prolongamento da alimentação pelo acúmulo de partículas fosse inferior à queda de pressão no leito vazio (branco). Conseqüentemente, as análises da u_{ms} para o bagaço de laranja com alturas de leito estático de 16,7 e 18,3 foram realizadas a partir da variação da queda de pressão total na câmara principal, incluindo o “branco”. A instabilidade do leito estaria relacionada a duas causas distintas: a não-uniformidade da geometria das partículas, como apresentado pela Tabela 1.3, seria responsável pela segregação das partículas, levando ao acúmulo de finos próximo à parede e partículas grosseiras próximo ao ânulo (DU *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2015); a aderência de biomassas úmidas a superfícies metálicas que provocam o acúmulo nas paredes dos equipamentos (STROEM *et al.*, 2009).

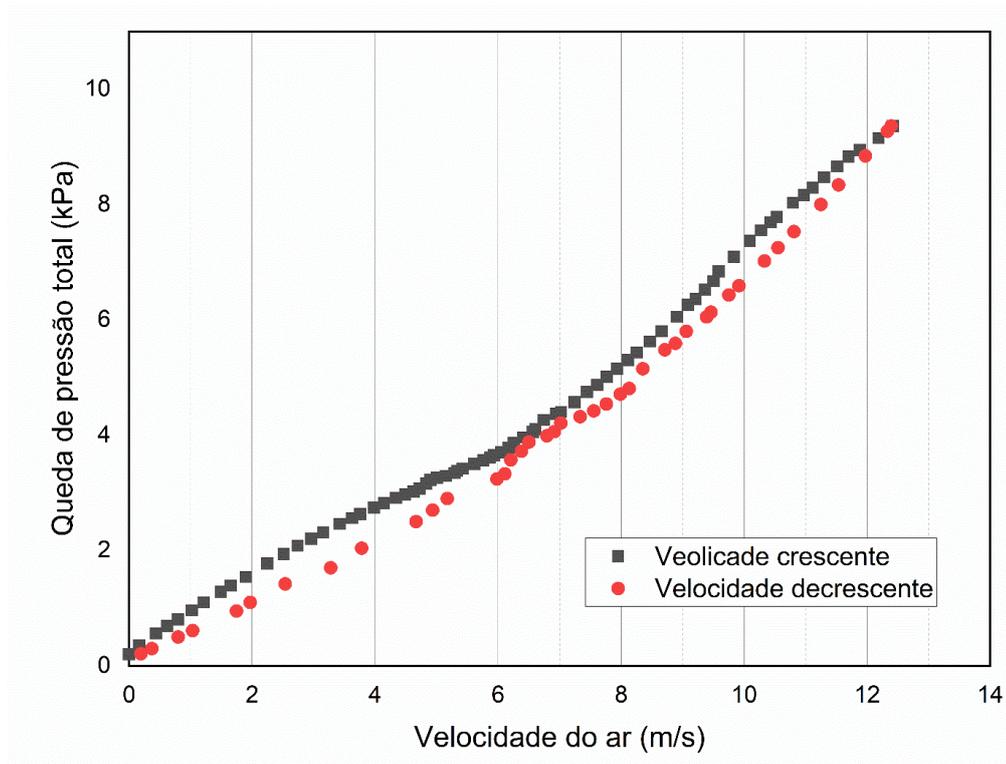
A Figura 1.15 e a Figura 1.16 apresentam a queda de pressão total para o leito preenchido com bagaço misturado com CaO com $H=16,69$ cm e $H=18,33$ cm, respectivamente. Para $H=16,69$ cm, foi observada uma $u_{ms}=8,84$ m/s e $\Delta P_{m\acute{a}x}=0,822$ kPa, além da perda de 9,3% da massa total do leito pelo arraste das partículas pela corrente gasosa. Já para $H=18,33$ cm, foi observada uma $u_{ms}=9,46$ m/s e $\Delta P_{m\acute{a}x}=1,088$ kPa, além da perda de 11,76% da massa do leito.

Figura 1.15. Curva para a queda de pressão total no sistema com bagaço completamente tratado e $H=16,69$ cm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

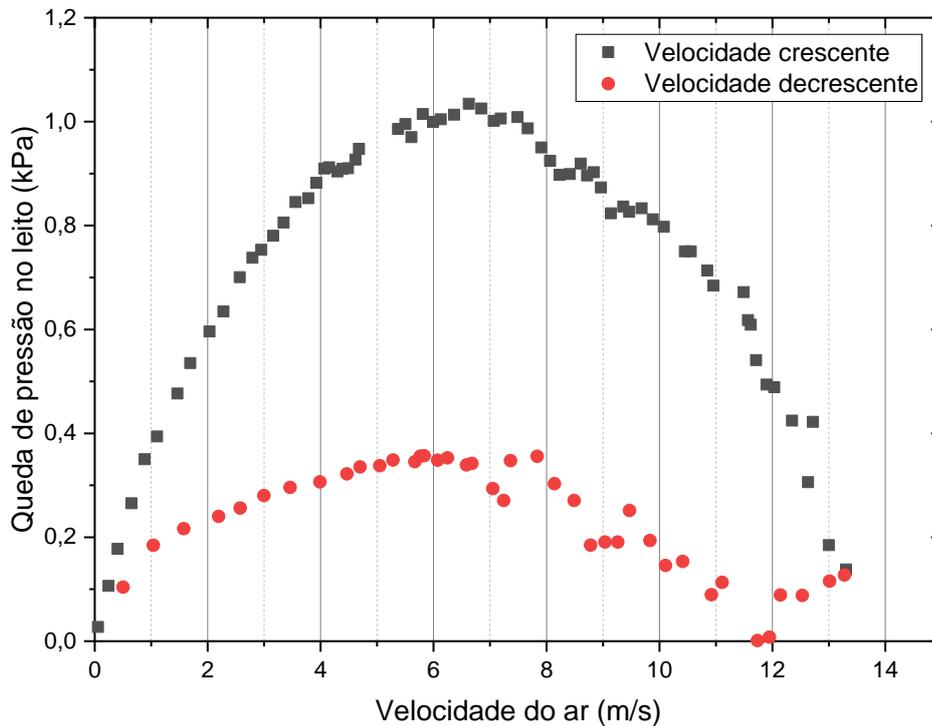
Figura 1.16. Curva para a queda de pressão total no sistema com bagaço completamente tratado e $H=18,33$ cm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o aumento da altura do leito estático para 21,12 cm os fenômenos indesejáveis foram atenuados, uma vez que mesmo sendo observado o acúmulo de material próximo às paredes, houve o arraste das partículas para a região da fonte após o estabelecimento do regime de jorro. A Figura 1.17 apresenta a curva característica do leito de jorro com $H=21,12$ cm, pôde-se observar que a velocidade de mínimo jorro foi 11,11 m/s e a queda de pressão máxima no leito foi 1,095 kPa. A perda de massa do leito pelo arraste da corrente gasosa foi de 11,65%.

Figura 1.17. Curva característica para a queda de pressão em leito de jorro com bagaço completamente tratado e $H=21,12$ cm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 1.5 reúne as informações obtidas durante os ensaios de fluidodinâmica, como o estabelecimento ou não de um regime de jorro e os principais parâmetros fluidodinâmicos, a velocidade de mínimo jorro e a queda de pressão máxima. Com o aumento da altura de leito estático houve um aumento da vazão de mínimo jorro devido à maior resistência exercida pelas partículas ao escoamento do ar. Estes resultados estão de acordo com outros autores que avaliaram a influência da altura de leito estático sobre os parâmetros fluidodinâmicos (QIN *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2015). A maior demanda de ar para movimentar as partículas a maiores alturas do leito foi responsável por um efeito negativo adicional na operação, a perda de massa pelo arraste do ar que aumentou de 2,05% para 11,65%.

Tabela 1.5. Compilado de dados fluidodinâmicos em leito de jorro para as condições avaliadas: movimentação das partículas, queda de pressão máxima, velocidade de mínimo jorro e perda de massa por arraste.

Condição	H	m_0	Movimento das partículas	$\Delta P_{\text{máx}}$ (kPa)	u_{ms} (m/s)	Perda de massa
<i>In natura</i>	14,1	1,20	Não	N/A	N/A	N/A
Prensado	14,1	1,21	Não	N/A	N/A	N/A
Prensado+CaO	14,1	1,07	Sim	0,916	8,692	2,05%
Prensado+CaO	16,7	1,42	Sim	0,822	8,835	9,30%
Prensado+CaO	18,3	1,66	Sim	1,088	9,462	11,76%
Prensado+CaO	21,1	2,37	Sim	1,095	11,11	11,65%
Prensado+CaO	23,9	3,18	Não	N/A	N/A	N/A

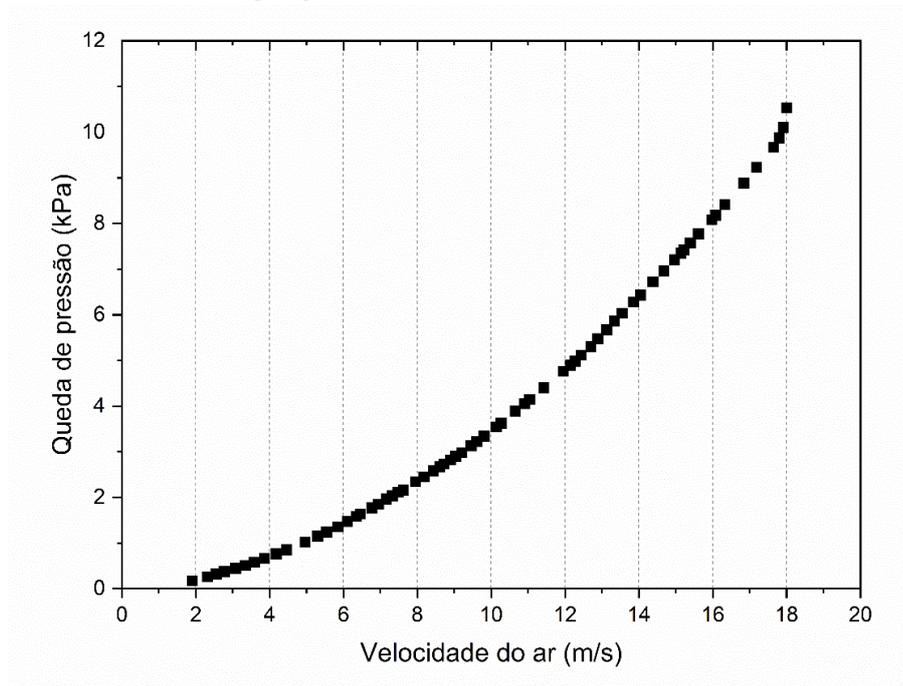
Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora o pré-tratamento proposto tenha proporcionado a movimentação do bagaço de laranja em leito de jorro convencional, os resultados observados indicaram que este regime ainda não pôde ser considerado estável. O acúmulo de material próximo às paredes da base cônica, a segregação entre partículas finas e grosseiras e o arraste de partículas tão logo o regime de jorro é estabelecido seriam responsáveis por uma não-conformidade na operação. Para reduzir os efeitos adversos destes fenômenos foram adicionados ao leito agitadores mecânicos, para reduzir a demanda de ar no sistema e melhorar a mistura do bagaço.

1.3.2.2. LEITO DE JORRO MODIFICADO COM AGITAÇÃO MECÂNICA

A Figura 1.18 apresenta a diferença de pressão no sistema vazio com uma velocidade de rotação de 90 rpm em função da velocidade do ar, o “branco”. A queda de pressão foi expressa através da Equação 1.15, onde os coeficientes foram determinados numericamente para ajustar os dados experimentais.

Figura 1.18. Queda de pressão em função da velocidade do ar para o equipamento com agitação mecânica vazio, "branco".



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\Delta P_{branco} = 0,0587u^{1,7763} \quad (1.15)$$

Inicialmente, para avaliar o efeito do pré-tratamento sobre a fluidodinâmica do bagaço de laranja no leito de jorro modificado, foi adicionado ao equipamento bagaço de laranja *in natura* e parcialmente tratado a uma altura de leito estático de aproximadamente 14 cm. A inclinação das lâminas do agitador mecânico visava auxiliar o movimento ascendente das partículas, arrastando partículas da base cônica inferior em direção à região cilíndrica do leito de jorro (BARROS *et al.*, 2020). No entanto, a biomassa que se encontrava na região cilíndrica do leito não era submetida ao efeito constante da agitação mecânica das lâminas e, juntamente com a natureza coesiva do bagaço de laranja parcialmente tratado, provocava a formação de um aglomerado coeso acima da base cônica, como ilustrado na Figura 1.19. Ademais, nestas condições era observado o acúmulo de material sobre as lâminas.

Figura 1.19. Formação de aglomerado de bagaço de laranja in natura na região cilíndrica do leito do jorro modificado.

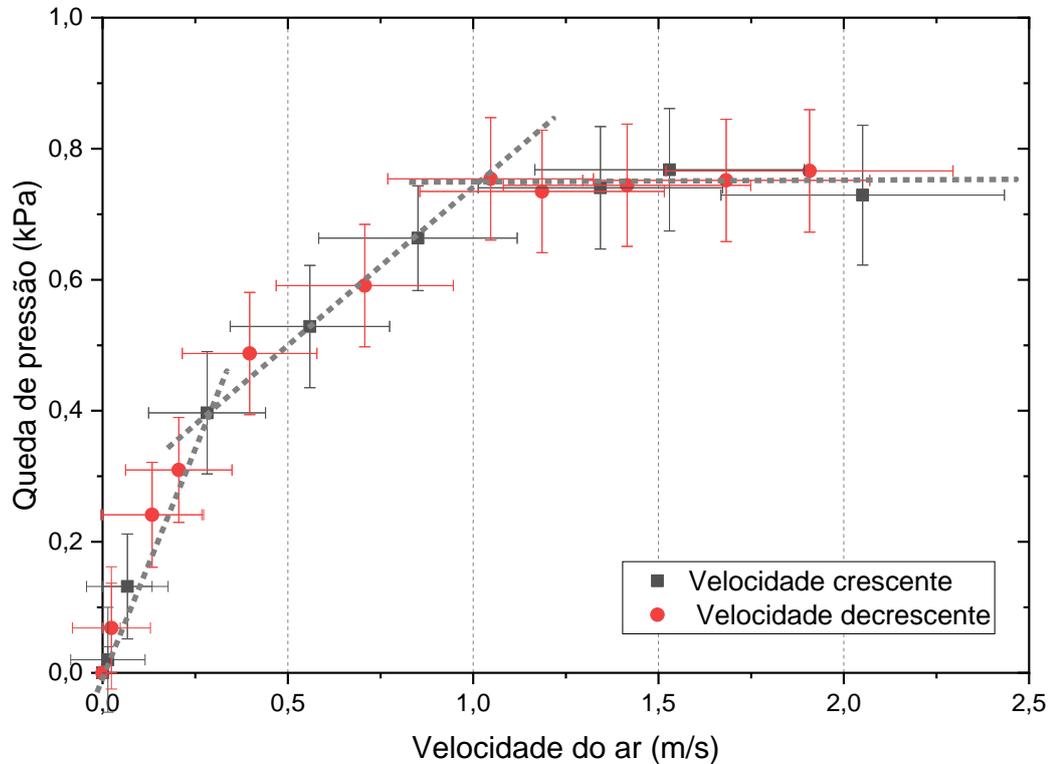


Fonte: elaborado pelo autor.

Vale destacar que, quando alimentado com o bagaço de laranja completamente tratado com altura de leito estático de aproximadamente 14 cm foi observado que as partículas de biomassa se movimentavam juntamente com o movimento rotacional do agitador, não havendo a formação de aglomerados sobre as lâminas ou na região cilíndrica da unidade experimental. Deste modo, o pré-tratamento completo do bagaço de laranja, com a adição de cal virgem seguida por uma etapa de prensagem, aumentou consideravelmente a mobilidade das partículas no leito de jorro modificado.

A Figura 1.20 apresenta a fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado no leito de jorro modificado com agitação mecânica com leito estático igual a 14,1 cm, metade da altura total da base cônica.

Figura 1.20. Queda de pressão em função da velocidade do ar para o bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 14,1 cm e retas para determinação da velocidade mínimo jorro.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se que houveram claras diferenças entre as curvas fluidodinâmicas do leito de jorro convencional e leito de jorro modificado com agitação mecânica. Enquanto para o leito convencional era observada uma histerese entre a variação da queda de pressão para velocidade crescente e decrescente do ar, devido à mudança na fricção entre o fluido e partículas de biomassa, para o leito de jorro modificado era observada uma sobreposição da curva da queda de pressão com o aumento ou diminuição da vazão de ar. A agitação mecânica possuía como finalidade promover a movimentação das partículas na região equivalente ao ânulo do leito de jorro convencional, reduzindo o acúmulo de material sobre a superfície interna da base cônica e fenômenos de instabilidade observados para a biomassa completamente tratada, especialmente para alturas de leito estático superiores a 16,69 cm. O movimento contínuo de rotação do agitador mecânico melhorou a mistura dos sólidos, tornando a distribuição das partículas mais uniforme, não havendo diferenças visíveis entre o canal de jorro e a região anular e prevenindo a formação de zonas mortas. Devido a este comportamento hidrodinâmico, o leito de jorro modificado com agitação mecânica se assemelha a um leito pseudo-fluidizado (REYES *et al.*, 2001; REYES; VIDAL, 2000). Ademais, a agitação mecânica permitiu a

utilização de maiores alturas de leito estático, 23,1, 25,4 e 27,0 cm, altura máxima da base cônica.

A fluidodinâmica apresentada pela Figura 1.20 pôde ser aproximada por três retas com diferentes inclinações. A seção com a reta mais inclinada, com o aumento acentuado da queda de pressão, varia de $u=0$ a aproximadamente $u=0,3$ m/s, isso ocorreu devido à maior compactação de leito a menores vazões de ar. Com a expansão do leito, pela corrente de ar ascendente, foi observada uma alteração na inclinação da curva até ser alcançada a queda de pressão máxima. Finalmente, a partir da queda máxima de pressão, o aumento na vazão de ar não alterou significativamente a queda de pressão uma vez que o leito teria alcançado sua completa expansão. A velocidade de mínimo jorro (u_{ms}) e a queda de pressão de operação (ΔP_s) são dadas pela intersecção das últimas duas linhas (BARROS *et al.*, 2022; REYES; VIDAL, 2000). Este comportamento foi observado para as demais alturas de leito estático, como pode ser observado nos gráficos apresentados Apêndice A.

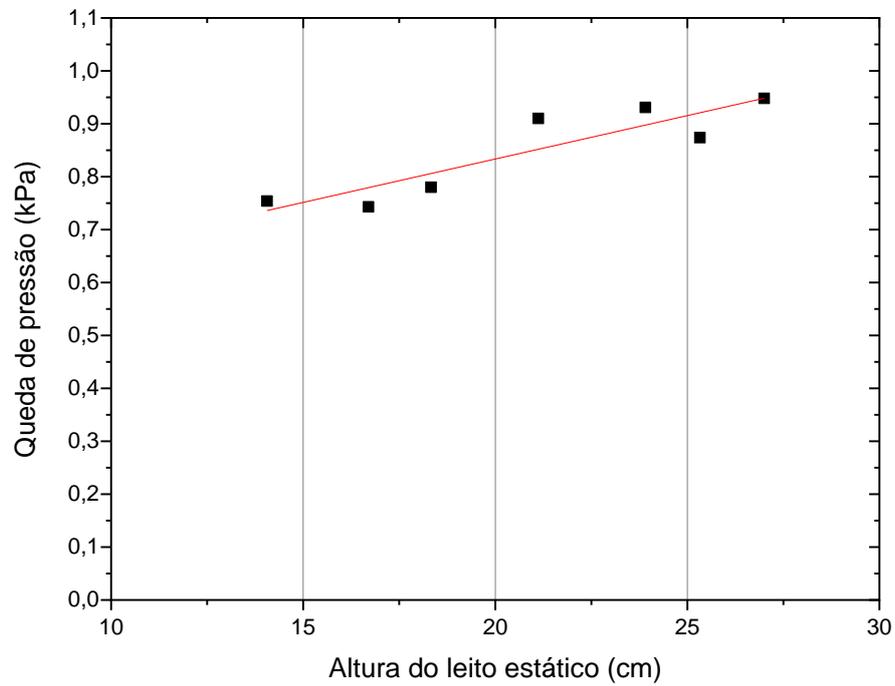
A Tabela 1.6 e as Figuras 1.21 e 1.22, apresentam os valores dos principais parâmetros fluidodinâmicos para o leito de jorro modificado com agitação mecânica, a velocidade de mínimo jorro (u_{ms}) e a queda de pressão de operação (ΔP_s), para as diferentes alturas de leito estático avaliadas, 14,1, 16,7, 18,3, 21,1, 23,9, 25,4 e 27,0 cm.

Tabela 1.6. Queda de pressão de operação e velocidade de mínimo jorro do leito de jorro modificado para diferentes alturas de leito estático.

H (cm)	ΔP_s (kPa)	u_{ms} (m/s)
14,1	0,75	1,05
16,7	0,74	1,17
18,3	0,78	1,19
21,1	0,91	1,21
23,9	0,93	0,82
25,3	0,87	1,12
27,0	0,95	0,91

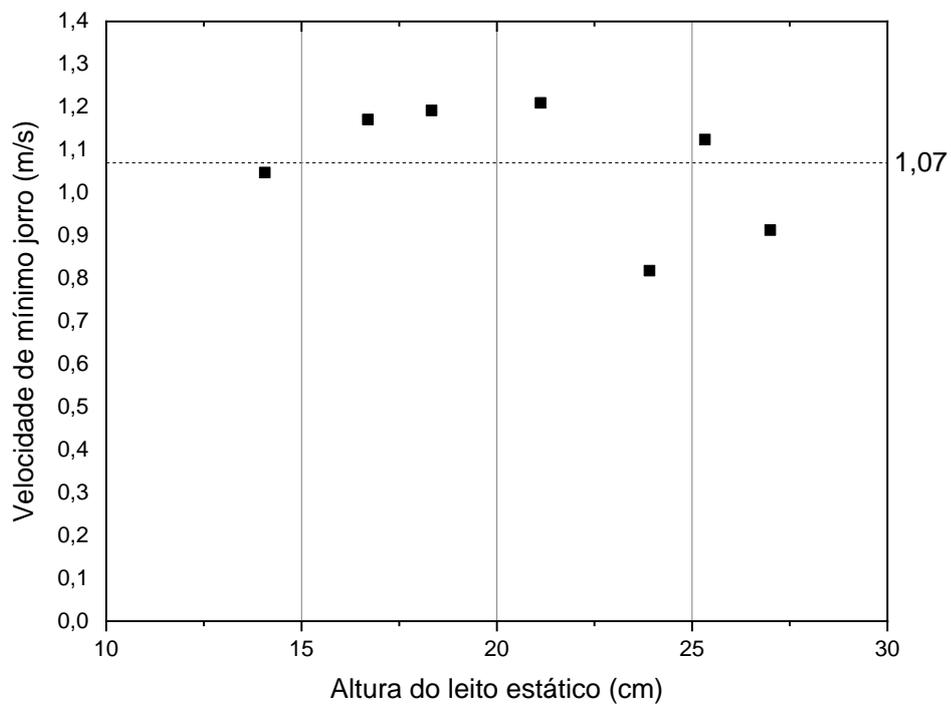
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 1.21. A queda de pressão de operação do leito modificado em função da altura de leito estático.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 1.22. A velocidade de mínimo jorro do leito modificado em função da altura de leito estático.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se um aumento na queda de pressão de operação (ΔP_s) com o aumento da altura do leito estático H. Com o aumento de H de 14,1 para 27 cm, altura máxima da base cônica, houve um aumento de 26,7% de ΔP_s , de 0,75 para 0,95 kPa. Este aumento da queda de pressão também foi observado por outros pesquisadores (BARROS *et al.*, 2022; REYES; VIDAL, 2000). Sendo atribuído ao aumento da resistência ao escoamento, quando se altera H de 14.1 para 27 cm. Apesar do evidente incremento na queda de pressão, houveram oscilações no comportamento observado pela Figura 1.20 que estariam relacionadas às imprecisões inerentes ao próprio método para determinação dos parâmetros fluidodinâmicos, em que a curva característica é aproximada por conjuntos de retas com diferentes inclinações, e à não-uniformidade da biomassa. A variação da queda de pressão em função da altura do leito foi ajustada pela Equação 1.16, com um R^2 de 0,896.

$$\Delta P_s = 0,50531 + 0,01641H \quad (1.16)$$

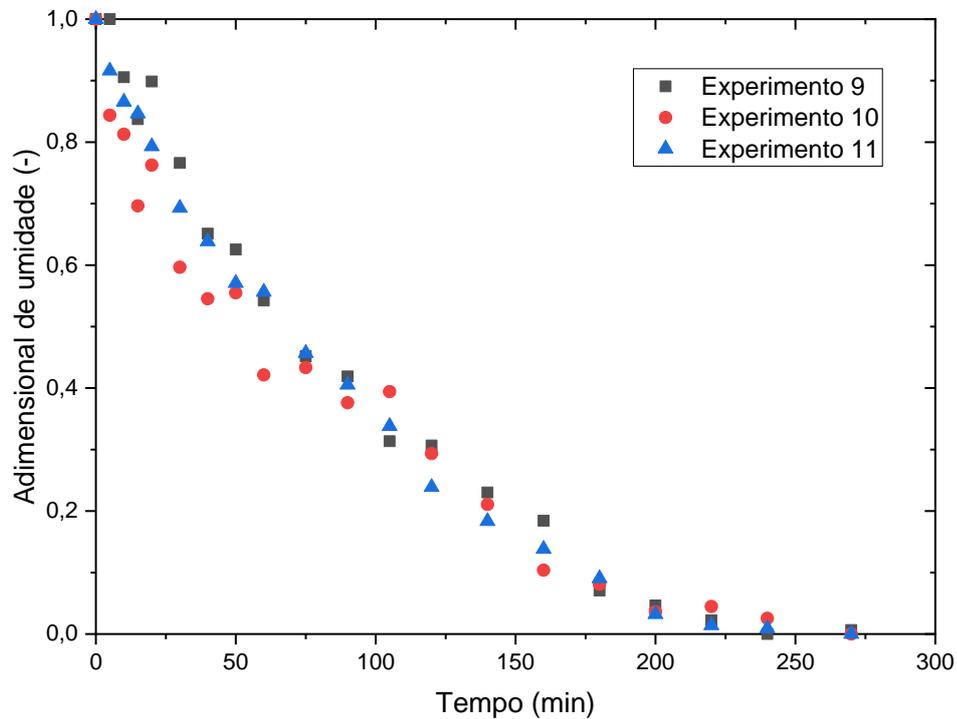
Quanto à velocidade de mínimo jorro (u_{ms}), não foi observado um acréscimo com o aumento da altura do leito, mas sim uma oscilação nos valores observados em torno de uma média. Pelos resultados observados no presente trabalho, o movimento rotacional do agitador mecânico melhorou significativamente a operação, sendo o principal responsável pelo movimento da biomassa enquanto a vazão de ar provocaria a expansão do leito. A velocidade de mínimo jorro, $1,07 \pm 0,14$ m/s, seria até 90% menor que as velocidades observadas para o leito de jorro convencional. Ademais, a agitação mecânica também eliminou o arraste de partículas durante os testes fluidodinâmicos, enquanto na configuração convencional era observada a perda de até 11,7% da massa inicial do leito após a formação do canal de jorro.

1.3.3. SECAGEM DO BAGAÇO DE LARANJA EM JORRO MODIFICADO

1.3.3.1. CINÉTICA E TEMPO DE SECAGEM

A Figura 1.23 apresenta a cinética de secagem obtida para a temperatura do ar de 60 °C e velocidade do ar de 3,30 m/s, ponto central do planejamento fatorial adotado. Observa-se a sobreposição das curvas para o ponto central, indicando uma boa reprodutibilidade dos experimentos. Os valores apresentaram diferenças quando se compara os experimentos 9, 10 e 11, porém pode-se considerar esse desvio aceitável devido à grande heterogeneidade do bagaço, isso faz com que a amostragem em si já seja difícil de se reproduzir.

Figura 1.23. Cinéticas de secagem observadas para $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u=3,30\text{ m/s}$, ponto central do planejamento composto central.



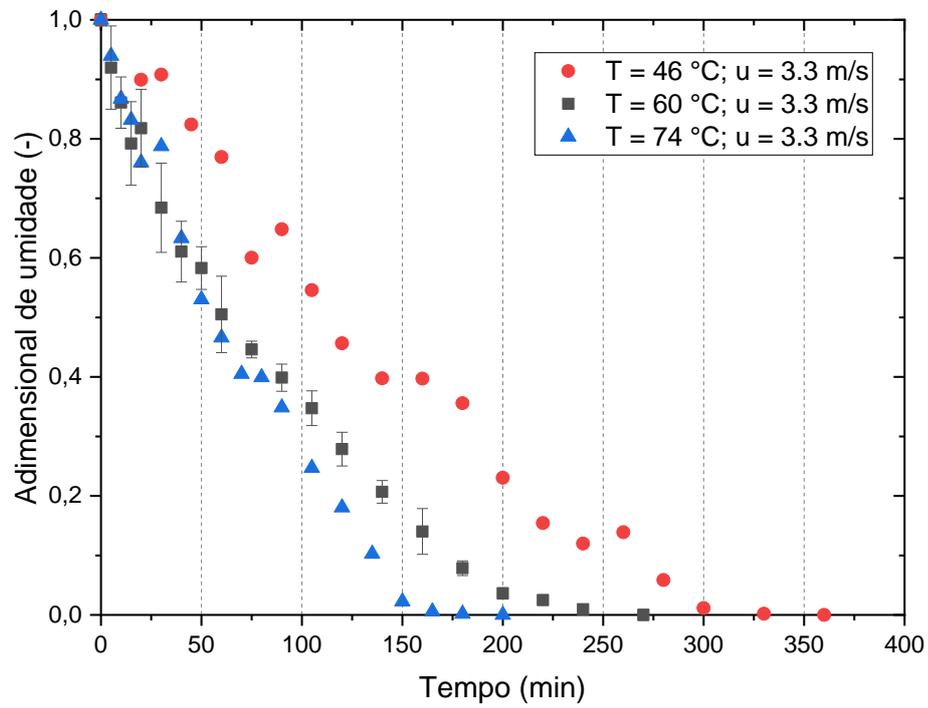
Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 1.24 apresenta os dados da cinética de secagem para uma velocidade do ar fixada em $3,30\text{ m/s}$, sendo apresentadas a média para a temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, considerando os experimentos 9, 10 e 11, para a temperatura de $74\text{ }^{\circ}\text{C}$, experimento 7, e para a temperatura de $46\text{ }^{\circ}\text{C}$, experimento 5.

A Figura 1.25 apresenta os dados da cinética de secagem para uma temperatura do ar fixada em $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo apresentadas a média para a velocidade do ar de $3,30\text{ m/s}$, considerando os experimentos 9, 10 e 11, para a velocidade do ar de $1,74\text{ m/s}$, experimento 8, e para a velocidade do ar de $4,86\text{ m/s}$, experimento 6.

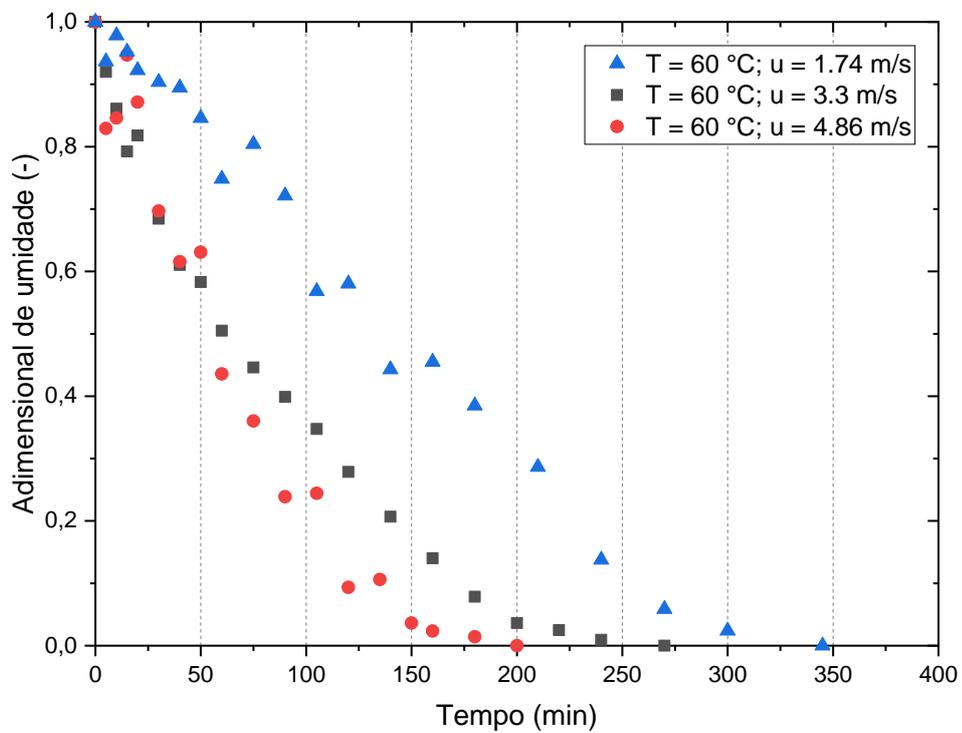
O aumento da temperatura do ar e da velocidade do ar de secagem favoreceram a secagem do bagaço de laranja, reduzindo o tempo necessário para se alcançar o equilíbrio dinâmico. No entanto, para demonstrar a influência de cada uma destas variáveis independentes utilizaremos o tempo necessário para que o adimensional de umidade alcance o valor de 10% como resposta do planejamento fatorial adotado na Tabela 1.7.

Figura 1.24. Cinética de secagem para a velocidade do ar de 3,30 m/s e temperatura do ar de 46, 60 e 74 °C.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 1.25. Cinética de secagem para a temperatura do ar de 60 °C e velocidade do ar de 1,74, 3,30 e 4,86 m/s.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 1.7. Tempo de secagem do bagaço de laranja para as condições avaliadas.

Experimento	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Tempo de secagem (min)
1	50	2,20	348
2	70	2,20	216
3	50	4,40	194
4	70	4,40	112
5	46	3,30	271
6	60	4,86	133
7	74	3,30	147
8	60	1,74	284
9 (Central)	60	3,30	188
10 (Central)	60	3,30	211
11 (Central)	60	3,30	187

Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se que o aumento da temperatura do ar de 60 para 74°C, mantendo a velocidade em 3,30 m/s, reduziu o tempo de secagem de 195±11 minutos para 147 minutos, enquanto a diminuição da temperatura a 46 °C aumentou o tempo de secagem para 271 min. Quanto à velocidade do ar de secagem, o aumento de 3,30 para 4,86 m/s, mantendo a temperatura em 60 °C, reduziu o tempo de secagem 195±11 minutos para 133 minutos, enquanto a redução da velocidade do ar a 1,74 m/s aumentou o tempo de secagem a 284 minutos.

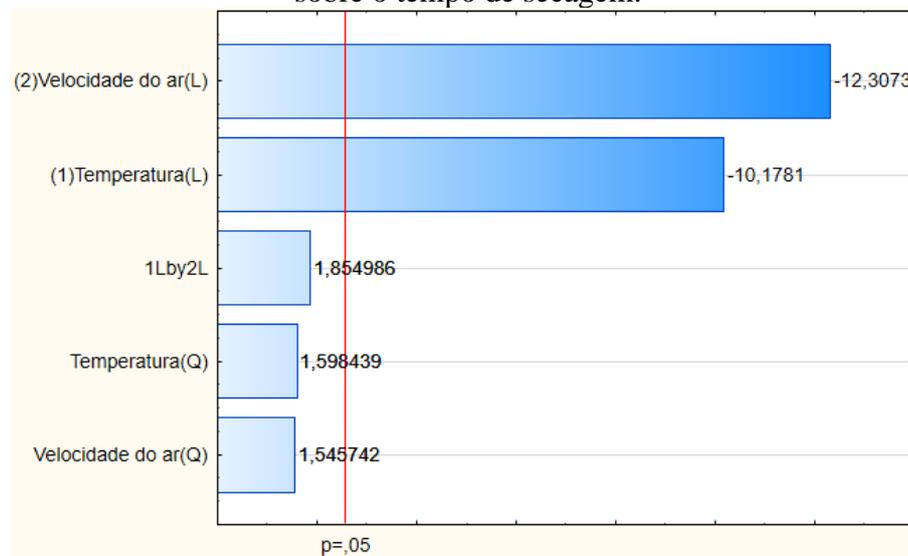
A Tabela 1.9 apresenta os dados da análise ANOVA para o tempo de secagem em função da temperatura e da velocidade do ar. Por sua vez, a Figura 1.26 apresenta a análise de Pareto para os efeitos sobre o tempo de secagem. A análise combinada da tabela de ANOVA e Pareto permite compreender como a temperatura e a velocidade do ar influenciam a secagem do bagaço de laranja. Dentre os efeitos analisados, de acordo com o valor-p, somente os efeitos lineares da velocidade e da temperatura do ar apresentaram uma influência significativa sobre o tempo de secagem ao nível de confiança de 0,05, enquanto os efeitos quadráticos e combinados não seriam significativos. Observa-se pelo diagrama de Pareto que, nas condições avaliadas, o efeito mais significativo foi o linear da velocidade do ar (BRUNS, 2001).

Tabela 1.8. Análise ANOVA para o ajuste dos efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre o tempo de secagem.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
(1) Temperatura (linear)	18959,61	1	18959,61	103,5944	0,000157
Temperatura (quadrático)	467,61	1	467,41	2,5550	0,170839
(2) Velocidade do ar (linear)	27721,86	1	27721,86	151,4708	0,000063
Velocidade do ar (quadrático)	437,29	1	437,29	2,3893	0,182831
1linear * 2linear	629,76	1	629,76	3,4410	0,122759
Erro	915,09	5	183,02		
Total	48925,72	10			

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 1.26. Análise de Pareto para o ajuste dos efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre o tempo de secagem.



Fonte: elaborado pelo autor.

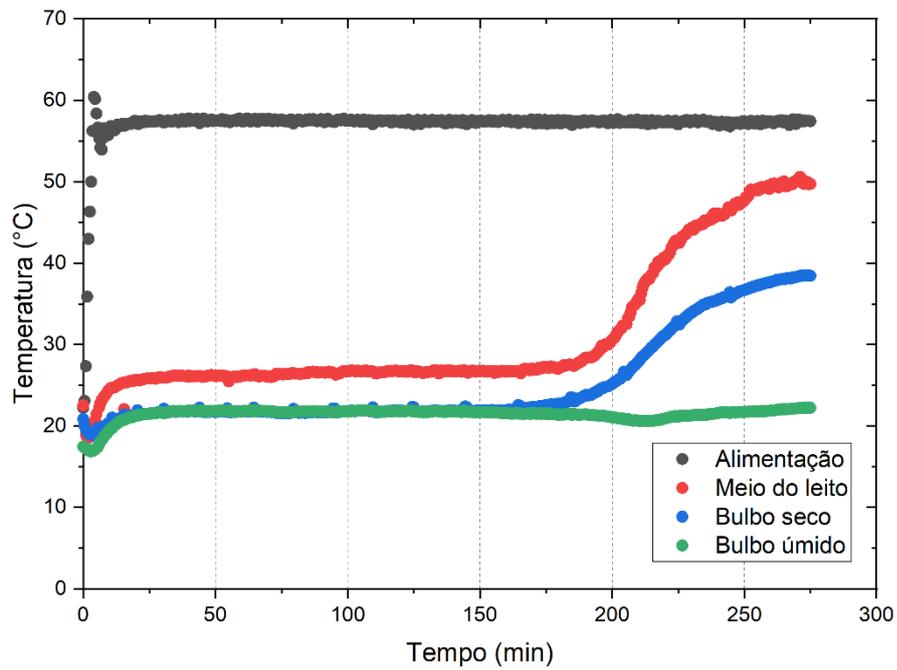
1.3.3.2. VARIAÇÃO DAS TEMPERATURAS NA SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO

A Figura 1.27 apresenta o perfil de temperaturas no secador ao longo da secagem, especificamente a variação da temperatura de alimentação de ar na base do leito de jorro, temperatura no meio do leito, no centro da região cilíndrica e das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na exaustão. Pôde-se observar que por um período significativo da operação, aproximadamente dos 20 aos 170 minutos, as curvas para as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido se encontraram sobrepostas. Estes resultados indicaram que a depressão de bulbo úmido, a diferença entre as temperaturas do psicrômetro, era nula durante este período. Como a depressão de bulbo está diretamente relacionada à umidade relativa do ar, sendo a umidade relativa menor quanto maior for a diferença entre as temperaturas de bulbo seco e úmido, evidenciou-se assim que a corrente gasosa de exaustão se encontra saturada por um período significativo da secagem. Também foi observado que neste período a temperatura do ar acima do leito de biomassa permaneceu constante, indicando que a energia fornecida pela corrente gasosa seria utilizada principalmente para a remoção da umidade, na forma de calor latente (KEEY, 1972).

Após o período a temperatura constante, pôde-se observar que o houve um aquecimento da corrente gasosa na região cilíndrica da unidade experimental, indicando que a corrente gasosa transferia cada vez menos energia para a biomassa. Além disso, o aumento da diferença entre as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido indicou que houve a diminuição gradual da umidade do ar até o término da secagem.

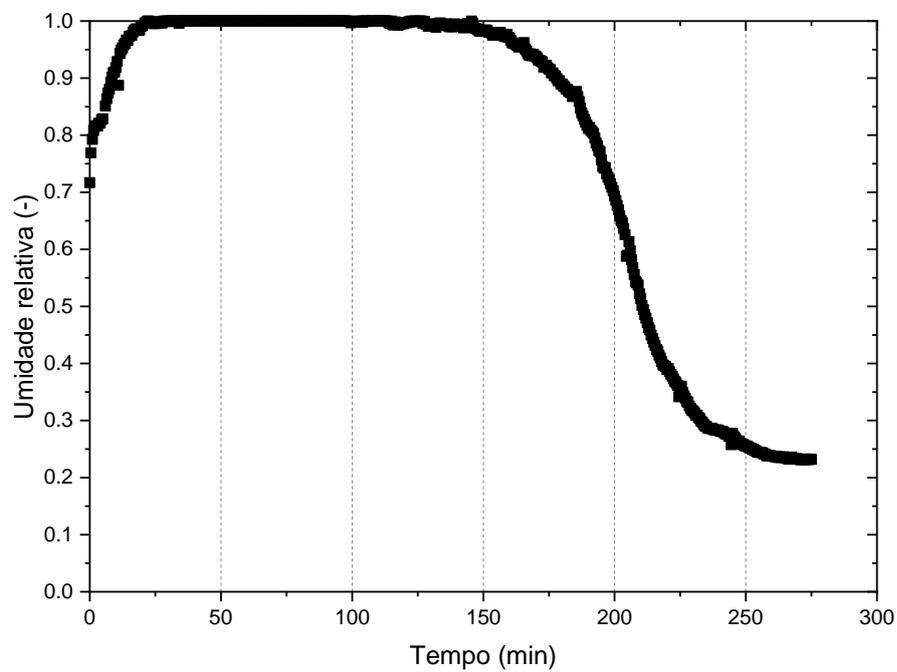
A Figura 1.28 apresenta a umidade relativa do ar na exaustão do secador ao longo da secagem do bagaço de laranja, sendo possível identificar os períodos em que a corrente gasosa se encontrava saturada, com uma umidade relativa de 100%, e o período em que houve a diminuição da umidade até a sua estabilização no término da operação, em concordância com a discussão apresentada para o perfil de temperaturas. Estes resultados evidenciarão o potencial do leito de jorro modificado com agitação mecânica na secagem de biomassas, uma vez que a saturação na exaustão indica que não há uma alimentação excessiva de ar.

Figura 1.27. Valores das temperaturas de alimentação, meio do leito, bulbo seco e bulbo úmido ao longo da secagem para $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u=3,30\text{ m/s}$, em função do tempo.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 1.28. Umidade relativa do ar na saída do leito de jorro modificado para $T = 60^{\circ}\text{C}$ e $u = 3,3\text{ m/s}$, em função do tempo.



Fonte: elaborado pelo autor.

1.4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no presente capítulo evidenciaram os efeitos positivos do pré-tratamento do bagaço de laranja sobre a sua secagem. A adição de cal para romper a pectina e permitir a remoção de açúcar durante a prensagem foi necessária para aumentar a mobilidade da biomassa no leito de jorro convencional. Houve a diminuição de 31,7% de umidade utilizando energia mecânica, que é consideravelmente mais barata em comparação ao ar quente demandado, embora a biomassa ainda preservasse sua natureza coesa. Ademais, o estabelecimento de um canal de jorro foi observado somente para o bagaço completamente tratado, enquanto para o bagaço *in natura* ou parcialmente tratado foi observada somente uma movimentação irregular da biomassa.

A agitação mecânica aumentou o movimento das partículas próximas à parede do equipamento, tornando o leito uniforme e operando em regime pseudo-fluidizado, e melhorou a estabilidade do processo. Com o aumento da vazão de ar pôde-se observar o aumento da queda de pressão no leito de partículas, embora para a velocidade de mínimo jorro não se pôde observar uma relação direta. Estes resultados indicam que a agitação mecânica seria o principal mecanismo para a movimentação das partículas, enquanto a vazão de ar seria demandada para expandir o leito e promover a secagem. Deste modo, foi observada a redução de até 90% da vazão de ar no leito de jorro modificado em comparação ao leito convencional.

Na secagem do bagaço de laranja foram observados os efeitos da temperatura e da vazão de ar. Os efeitos lineares da temperatura e da vazão de ar foram significativos sobre o tempo de secagem, sendo a vazão de ar o efeito mais significativo. Foi observado que durante a secagem houve um período significativo em que a saída do ar se encontrava saturada, evidenciando assim as vantagens deste sistema em comparação ao leito convencional, uma vez que não havia a alimentação excessiva de ar, sendo um potencial variável de controle. Ainda se faz necessária a modelagem da secagem do bagaço de laranja para descrever fisicamente a operação.

Os resultados observados no presente capítulo indicaram a potencial aplicação de etapas complementares à secagem para o processamento de materiais coesivos em leitos móveis. A adição de cal virgem associada à prensagem do bagaço de laranja aumentou consideravelmente a mobilidade da biomassa nos dois equipamentos avaliados, no leito de jorro modificado e no leito de jorro convencional. No entanto, outras estratégias podem ser avaliadas para atender esta finalidade, como realizar uma secagem preliminar em equipamentos de baixo custo operacional como a secagem solar.

CAPÍTULO 2 – PELETIZAÇÃO E COMBUSTÃO DO BAGAÇO DE LARANJA

2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1. FUNDAMENTOS DA COMBUSTÃO

A combustão é definida como a reação exotérmica envolvendo um combustível e oxigênio, havendo a liberação de energia na forma de calor. Os mecanismos físicos e químicos da combustão ocorrem em nível molecular, pelo rearranjo de átomos, moléculas e radicais. Esta seção aborda os principais fundamentos da combustão.

2.1.1.1 COMBUSTÍVEIS

Segundo El-Mahallawy e Habik (2002), principal referência adotada na presente seção, combustíveis são considerados materiais que apresentam energia interna armazenada em suas ligações moleculares, sendo esta energia convertida em calor através de reações complexas. As características básicas de um bom combustível são uma alta densidade energética, elevado calor de combustão, boa estabilidade térmica para evitar sua decomposição durante o armazenamento, baixa volatilidade e pouco impacto ambiental. Combustíveis podem se encontrar nas fases sólida (biomassas e carvão), líquida (gasolina e etanol) e gasosa (gás natural e biogás). No processo de combustão, os reagentes devem seguir um “caminho” pré-estabelecido para que sejam convertidos e formados os produtos, especialmente para combustíveis líquidos e sólidos que apresentam dificuldades ao se misturar com o oxigênio gasoso por conta das diferentes fases. As etapas do processo de combustão são: armazenamento do combustível (compressão de combustíveis sólidos ou liquefação), transporte, preparação e alimentação ao sistema, a partir daí tem-se a ignição, conversão térmica e consequente liberação de energia, transporte de energia e exaustão dos resíduos (EL-MAHALLAWY; HABIK, 2002).

A maioria dos combustíveis são compostos principalmente por moléculas orgânicas, que apresentam carbono em sua estrutura. Entre as moléculas orgânicas que são utilizadas como combustível tem-se os hidrocarbonetos, que são formados exclusivamente por átomos de carbono ligados entre si e a átomos de hidrogênio. São exemplos de hidrocarbonetos os alcanos, formados por ligações simples e fórmula molecular C_nH_{2n+2} , os alquenos, que são insaturados e apresentam ligação dupla em sua estrutura e fórmula C_nH_{2n} , os alquinos, que apresentam ligação tripla e fórmula C_nH_{2n-2} e os compostos aromáticos, que apresentam uma estrutura cíclica e possuem como fórmula característica C_nH_{2n-6} . Os compostos aromáticos apresentam uma densidade maior e um potencial energético menor se comparado aos demais hidrocarbonetos líquidos. Entre os hidrocarbonetos temos, por exemplo, os derivados de petróleo, que são hidrocarbonetos de cadeia longa. Quando as moléculas orgânicas apresentam

outros átomos em sua estrutura, como oxigênio, estas diferem dos hidrocarbonetos e recebem uma nomenclatura própria. Álcoois e ésteres são compostos orgânicos que apresentam um ou mais grupos hidroxila (-OH) ligados a um radical em sua estrutura. A principal diferença entre o éster e o álcool se encontra no radical ligado, para o álcool o radical é uma cadeia linear de carbonos semelhante a um hidrocarboneto e para o éster o radical é uma estrutura cíclica de carbonos. Éteres são compostos que apresentam átomos de oxigênio ligado a dois átomos de carbono, dois radicais orgânicos distintos. Aldeídos e cetonas apresentam átomos de oxigênio ligados unicamente a um único átomo de carbono (-C=O), entretanto, para aldeídos o átomo de oxigênio se encontra na extremidade da cadeia enquanto para cetonas a ligação se encontra no seu centro (EL-MAHALLAWY; HABIK, 2002)..

O gás natural é o combustível gasoso mais abundante e mais utilizado no mundo. Ele é constituído basicamente por metano, CH₄, cuja concentração varia de 75 a 99%, e outros componentes em menor concentração, como hidrocarbonetos de baixo peso molecular, como o propano (C₃H₈), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hélio (He), nitrogênio (N₂) e água (H₂O). O gás liquefeito de petróleo (GLP) também é um combustível gasoso comum em processos de combustão. O GLP é constituído por hidrocarbonetos condensáveis, como propano e butano comerciais, que são recuperados durante a expansão de reservas gasosas e posteriormente comprimidos até condensação, sendo transportados e armazenados na fase líquida à temperatura ambiente. Quando novamente expandido, o GLP retorna à fase gasosa (EL-MAHALLAWY; HABIK, 2002)..

Os combustíveis sólidos disponíveis naturalmente, como o carvão, biomassas e madeira, são pouco competitivos em comparação aos combustíveis líquidos e gasosos, uma vez que combustores alimentados com combustíveis sólidos apresentam dimensões consideravelmente maiores, entretanto são abundantes na natureza e, conseqüentemente, bastante utilizados. Combustíveis sólidos possuem uma composição mais complexa em relação aos combustíveis líquidos e gasosos, que são compostos principalmente por hidrocarbonetos, uma vez que grande quantidade de oxigênio (que pode chegar a até 45% da massa total), nitrogênio, água e cinzas se encontram presentes nestes materiais. As cinzas, que são os resíduos inorgânicos presentes após a combustão completa, não são muito presentes em biomassas mas requerem um cuidado especial no projeto de combustores, uma vez que se encontram associadas a problemas operacionais, como erosão, corrosão e impregnação, além de possíveis impactos ambientais provocados pelo seu descarte (EL-MAHALLAWY; HABIK, 2002).

2.1.1.2. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A termogravimetria, ou análise termogravimétrica, avalia a redução da massa dos materiais ao serem submetidos a temperaturas crescentes. A decomposição térmica dos materiais ocorre por meio de reações de combustão, em que as moléculas que constituem o material são consumidas para formar diferentes produtos juntamente com a liberação de energia na forma de calor. Usualmente, os produtos se encontram na fase gasosa, o que provoca a diminuição da massa de materiais sólidos ou líquidos. Quando a decomposição térmica ocorre na presença de oxigênio ocorrem reações de combustão e os produtos são CO₂, CO, vapor de água e, dependendo da composição dos reagentes, NO_x e SO_x. Cada reação de combustão ocorre a uma temperatura específica devido à energia de ativação necessária (EL-MAHALLAWY; HABIK, 2002).

Na decomposição térmica são fornecidas duas curvas distintas, a curva termogravimétrica (TGA), que corresponde à variação da massa instantânea da amostra em relação a sua massa inicial, e a termogravimetria diferencial (DTG), que é a derivada da curva TGA e corresponde à variação no diferencial de massa com o aumento da temperatura. As análises permitem a identificação de efeitos térmicos relacionados às mudanças físicas ou químicas das amostras (MAGDZIARZ; WILK, 2013). A análise simultânea das curvas de TGA e DTG permitem a identificação das temperaturas em que ocorrem as reações de combustão e, pela especificidade da temperatura, pode-se identificar com certa confiança as espécies presentes no combustível. Ademais, a avaliação permite quantificar a cada espécie e a fração de cinzas presente no material, embora outras técnicas sejam consideradas mais eficientes nesta caracterização (SALDARRIAGA *et al.*, 2015).

2.1.2. PELLETS DE BIOMASSA

2.1.2.1. DESCRIÇÃO E PRÉ-TRATAMENTO DA BIOMASSA

Existem duas rotas para o reaproveitamento de biomassas e outros resíduos biológicos, tanto para a geração de produtos de maior valor agregado quanto para a geração de energia, a rota bioquímica e a rota termoquímica. Na primeira, a biomassa é convertida em biocombustíveis pela ação de enzimas, bactérias e outros microrganismos, enquanto na segunda ela é convertida em energia, usualmente energia térmica, por processos de combustão, pirólise e gaseificação, apresentando vantagens significativas se comparado à rota bioquímica, como a maior flexibilidade de biomassas e maiores taxas de conversão (SINGH *et al.*, 2016). Segundo a avaliação de Martínez-Guido *et al* (2019), que realizaram um estudo de caso sobre a matriz energética do México e à potencial utilização de biomassas como fonte de energia, o

reaproveitamento energético de biomassas seria capaz de suprir até 50% de toda a energia consumida no país aliado à diminuição de 25% da emissão de dióxido de carbono (MARTÍNEZ-GUIDO *et al.*, 2019)

Pellets de biomassa se encontram normalmente em formato cilíndrico com um diâmetro inferior a 40 mm, com potencial utilização em equipamentos com dimensões menores, como fornos residenciais, por exemplo. No processo de peletização ocorre o adensamento da biomassa e um aumento significativo de sua densidade, que reduz seus custos de manuseio, transporte e armazenamento (PRADHAN *et al.*, 2018). Outra vantagem das biomassas peletizadas em comparação à biomassa livre é a emissão de menores quantidades de material particulado durante a queima (GHAFGHAZI *et al.*, 2011).

A biomassa a ser peletizada pode ser submetida a diversos pré-tratamentos para melhorar a qualidade do produto final, como a redução das dimensões, torrefação, explosão de vapor, carbonização hidrotérmica e tratamento biológico. A redução das dimensões da biomassa é feita mecanicamente, por impacto, abrasão, compressão e cisalhamento, e tem como objetivo aumentar a densidade *bulk* e escoabilidade, além de aumentar a área superficial e o contato para ligação entre partículas durante a peletização (IGATHINATHANE *et al.*, 2009; MANI *et al.*, 2004). Na torrefação, a biomassa é submetida a temperaturas de 200 a 300 °C, ocorrendo a remoção de água e compostos voláteis, especialmente pela decomposição da hemicelulose. No entanto, embora na torrefação ocorra o aumento da densidade energética da biomassa, a peletização de biomassas torrificadas é mais complexa em comparação ao processo convencional devido à necessidade de uma maior força de compressão (PENG *et al.*, 2012, 2013). Na torrefação, o aumento do poder calorífico superior também acontece pela desmetilização, descarbonilação, redução do teor de oxigênio e voláteis. Os pellets torrados tornam-se altamente hidrofóbicos, não absorvendo grandes volumes de água mesmo quando submersos (ZHANG *et al.*, 2022). Na explosão de vapor, a biomassa é submetida a vapor superaquecido, 200 a 260 °C, por 5 a 10 minutos seguido de uma rápida descompressão. Nestas condições, as fibras da biomassa são expostas e, conseqüentemente, os pellets apresentam uma maior resistência mecânica devido à maior ligação entre as partículas (BALAT *et al.*, 2008; LAM *et al.*, 2013). A carbonização hidrotérmica consiste na conversão da biomassa em hidrocarbonetos sob alta pressão e temperaturas moderadas, tendo os hidrocarbonetos um alto valor energético, estabilidade química e térmica, potencial de adsorção e maior homogeneidade (MUMME *et al.*, 2011; ZHAI *et al.*, 2018).

2.1.2.2. PROPRIEDADES DA BIOMASSA NA PELETIZAÇÃO

A produção dos pellets e suas características estão diretamente relacionados aos parâmetros da peletização, a umidade da biomassa, tamanho das partículas, adição de ligantes e especificações do equipamento, como diâmetro dos moldes e a pressão aplicada pelo sistema durante o adensamento.

A umidade possui um papel significativo durante a produção dos pellets, embora possua efeitos negativos no processo quando se encontra a valores acima do desejado, como a perda de massa seca durante o armazenamento e a aceleração da degradação mecânica do pellet a maiores umidades relativas do ar (GRAHAM *et al.*, 2017). No entanto, durante a fabricação dos pellets, a umidade do material pode influenciar positivamente a qualidade do produto final. A umidade favorece a ligação ao intensificar as forças de van der Waals, promover a formação de pontes líquidas e reduzir da temperatura de transição vítrea (TUMULURU *et al.*, 2011). Além disso, a umidade torna os pellets menos quebradiços devido à menor adsorção de água do ambiente, além de facilitar os mecanismos de agregação dos pellets na presença de amido (facilitando sua gelatinização), lignina e hemicelulose (aumentando sua mobilidade), fibras (promovendo sua solubilização) e proteínas (auxiliando sua desnaturação) (CARONE *et al.*, 2011; LI; LIU, 2000).

As dimensões das partículas também influenciam as propriedades dos pellets. Partículas finas apresentam uma maior área superficial em comparação a partículas maiores, tendo o pellet produzido a partir de finos um melhor condicionamento devido à maior afinidade com umidade. Ademais, uma mistura de partículas com dimensões distintas produziria pellets com qualidade otimizada, devido à diminuição dos vazios entre as partículas e consequente uma maior ligação superficial. Ao contrário das partículas finas, partículas grosseiras definem pontos de fragilidade dos pellets e material muito fino pode emperrar a prensa (HARUN; AFZAL, 2016; KALIYAN; VANCE MOREY, 2009).

Os materiais que constituem a biomassa também influenciam a qualidade do pellet. A lignina possui propriedades termoplásticas, funcionando como uma resina a temperaturas superiores a 140 °C, penetrando os poros entre as partículas e auxiliando a formação de pontes sólidas (STELTE *et al.*, 2011). A presença de extrativos, por sua vez, diminuiria a densidade dos pellets e a taxa de combustão (LIU *et al.*, 2020). Deste modo, existe a possibilidade de se misturar biomassas de diferentes composições, aproveitando-se do teor de lignina, proteínas, e outros elementos que atuam como ligantes e melhoram as propriedades do produto. Existem diversos exemplos de misturas de biomassas, como a adição de alfafa para aumentar a

durabilidade de biomassas pobres em lignina (TUMULURU *et al.*, 2011), madeira de pinheiro e palha de cevada (SERRANO *et al.*, 2011), bambu e madeira de pinheiro (LIU *et al.*, 2016) e serragem e torta de colza (STÅHL; BERGHEL, 2011). A mistura de biomassas também pode ser utilizada para permitir a operação de combustores sem a necessidade de adaptações, como no trabalho de Trnka *et al* (2021) que utilizaram uma combustão de pellets de madeira para a produção de energia a partir de biomassas alternativas, sendo observada uma maior eficiência ao adicionar madeira na composição dos combustíveis alternativos (TRNKA *et al.*, 2021) A Tabela 2.1 apresenta a composição de diversas biomassas quanto ao seu teor de lignina, celulose e hemicelulose.

Uma estratégia comum para a melhoria das propriedades dos pellets é a adição de ligantes para aumentar a coesão entre os componentes da biomassa. Entre os principais aditivos estão os lignosulfonatos, bentonita, amido, proteínas e carboidratos, uma vez que atendem padrões internacionais e são economicamente viáveis (PRADHAN *et al.*, 2018). Carboidratos de cadeia simples, como o melão e frutose, não liberam cinzas, enxofre e nitrogenados durante a etapa de combustão, auxiliam a peletização por reduzir o consumo energético durante a produção dos pellets e garantindo a estes uma maior qualidade (MIŠLJENOVIC *et al.*, 2016; SOLEIMANI *et al.*, 2017). O amido, que é um polissacarídeo de cadeia complexa, também auxilia a peletização, funcionando como uma cola entre as partículas da biomassa (KUOKKANEN *et al.*, 2011). A adição de amido à biomassa durante a peletização seria capaz de aumentar a densidade e o poder calorífico dos pellets, além de simultaneamente reduzir o teor de cinzas (GAGEANU *et al.*, 2017). A adição de lodo, resíduo urbano altamente rico em proteínas, promove uma sinergia com as biomassas altamente ricas em lignina, devido à desnaturação da proteína e o amolecimento da lignina, tendo o pellet produzido a partir da mistura uma maior densidade sem a necessidade de se aplicar maiores forças de compressão (JIANG *et al.*, 2014). Rajput *et al* (2020) analisaram outros ligantes, como o álcool polivinílico recuperado e óleo de cozinha usado, sendo observado o aumento da resistência mecânica e diminuição do poder calorífico para o álcool polivinílico e o aumento do poder calorífico sem alterações significativas na resistência para o óleo de cozinha (RAJPUT *et al.*, 2020). Butler *et al* (2023) realizaram uma revisão bibliográfica acerca de ligantes para a produção de pellets torreficados tendo como critérios a durabilidade, hidrofobicidade, poder calorífico, toxicidade, disponibilidade, presença de cinzas ou contaminantes e custos. Os cinco ligantes mais promissores dentre os avaliados foram lignina, alcatrão de biomassa, óleos de elevada massa

molecular, cal hidratada (único inorgânico dentre os cinco) e amido gelatinizado (BUTLER *et al.*, 2023).

Tabela 2.1. Composição de lignina, celulose e hemicelulose de diversas biomassas, sendo o conteúdo expresso como o percentual da massa seca de cada biomassa.

Biomassa	Lignina	Celulose	Hemicelulose	Referência
Bagaço de laranja	2,9±0,5	38,5±1,5	24,0±2,0	(MORAES; CRESTANI, 2018)
Bagaço de malte	27,78	16,78	28,45	(CORDEIRO <i>et al.</i> , 2013)
Palha de cevada	13,8	33,8	21,9	(MUSSATTO; TEIXEIRA, 2010)
Espiga de milho	6,1	33,7	31,9	(MUSSATTO; TEIXEIRA, 2010)
Talos de milho	7,0	35,0	16,8	(MUSSATTO; TEIXEIRA, 2010)
Talos de algodão	21,5	58,5	14,4	(MUSSATTO; TEIXEIRA, 2010)
Palha de aveia	17,5	39,4	27,1	(MUSSATTO; TEIXEIRA, 2010)
Palha de arroz	9,9	36,2	19,0	(MUSSATTO; TEIXEIRA, 2010)
Bagaço de cana	10,0	40,0	27,0	(MUSSATTO; TEIXEIRA, 2010)
Talos de girassol	13,4	42,1	29,7	(MUSSATTO; TEIXEIRA, 2010)
Madeira de lei	23,0±3,0	45,5±3,5	17-35	(ROWELL <i>et al.</i> , 2012)
Madeira conífera	28,8±2,6	43,7±2,6	22-33	(ROWELL <i>et al.</i> , 2012)

Fonte: elaborado pelo autor.

2.1.2.3. CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DOS PELLETS

Para que os pellets sejam destinados para as suas mais diversas aplicações, estes devem atender certos padrões de qualidade para que o processo de combustão seja seguro e eficiente quanto à geração de energia e diminuição das emissões, tendo alguns países uma regulamentação própria para definir os padrões mínimos para a comercialização de biomassas peletizadas (PRADHAN *et al.*, 2018).

A umidade do pellet deve apresentar valores inferiores a 10% para garantir o armazenamento seguro e uma combustão eficiente, sendo determinada pelo método gravimétrico em estufa, mantendo a amostra a 105 °C por um intervalo de 24 horas. As dimensões do pellet também são um parâmetro a ser avaliado, uma vez que a uniformidade de dimensões do pellet auxilia a sua escoabilidade e influencia sua taxa de combustão. A densidade unitária do pellet influencia o processo de combustão, uma vez que a presença de vazios no interior do pellet aumenta sua permeabilidade ao oxigênio e reduz o tempo para que o combustível seja completamente consumido, sendo a densidade determinada pela razão entre a massa de um único pellet e seu volume. Pellets comerciais também devem apresentar uma resistência à compressão de aproximadamente 22 kgf, sendo esta resistência relacionada ao empilhamento de pellets durante o seu armazenamento. A durabilidade, ou resistência à abrasão, está relacionada à perda de massa durante o manuseio, sendo determinada por um método rotativo em que os pellets são submetidos a choques constantes em um equipamento rotativo a 50 rpm por 10 min e calculada como o percentual de massa remanescente dos pellets, sendo desejável uma durabilidade superior a 97,5%. Pellets de qualidade também devem apresentar uma resistência a impactos superior a 90%, característica relacionada ao despejamento dos pellets em chutes de transferência, que são equipamentos intermediários para o manuseio de sólidos a granel, e descarregamento de caminhões, e uma adsorção de umidade de 14 a 20%, uma vez que durante o transporte e armazenamento os pellets podem absorver umidade presente na atmosfera. Por fim, durante o processo de combustão, os pellets devem apresentar um poder calorífico superior a 16,7 MJ/kg e um teor de cinzas inferior a 5%, pois uma maior presença de cinzas reduz o poder calorífico e provoca a formação de fuligem (PRADHAN *et al.*, 2018).

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 TERMOGRAVIMETRIA

O bagaço de laranja foi previamente seco em uma estufa com circulação de ar a 105 °C, para evitar a oxidação do equipamento na presença de umidade, e triturado em moinho de facas, para reduzir suas dimensões e aumentar a superfície de contato. Os experimentos foram realizados em uma termobalança TA Instruments modelo SDT Q600 V20.9. As amostras tinham uma massa inicial de aproximadamente 9,0 mg e foram submetidas a um acréscimo de temperatura de 10 °C/min da temperatura ambiente, de 27 °C, até 800 °C. Os ensaios foram conduzidos em atmosfera oxidante, sendo alimentado ao equipamento uma vazão de ar sintético de aproximadamente 30 mL/min. Foram obtidos os perfis para a massa da amostra em função da temperatura (TGA) e a derivada da massa em função da temperatura (DTG). Os ensaios foram conduzidos para o bagaço de laranja *in natura* e para a mistura com 1% de cal virgem.

2.2.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE BAGAÇO SECO

O bagaço de laranja obtido nos experimentos de secagem descrito pela Tabela 1.1 foi utilizado na fabricação dos pellets com dois objetivos diferentes: (1) avaliar a influência das condições experimentais da secagem sobre as propriedades dos pellets; (2) avaliar a influência da granulometria, adição de ligantes e pré-tratamentos sobre as propriedades dos pellets. Para atender ao primeiro objetivo, a biomassa produzida em cada experimento de secagem foi imediatamente peletizada. Para atender ao segundo objetivo, a biomassa produzida na secagem a uma temperatura de 60 °C e velocidade do ar a 3,30 m/s foi utilizada para a produção de três amostras distintas.

As amostras diferenciavam entre si quanto à sua granulometria. A primeira amostra de bagaço de laranja, chamada OJW1, correspondia ao produto da secagem no leito de jorro modificado sem etapas adicionais de processamento. A segunda amostra, chamada OJW2, correspondia à fração de partículas finas da biomassa seca. Para tanto, o produto da secagem foi submetido ao peneiramento utilizando uma peneira com abertura de 6 mesh, sendo as partidas retidas descartadas, enquanto as partículas passantes constituíam a amostra OJW2. A distribuição granulométrica das amostras OJW1 e OJW2, bem como os respectivos diâmetros médios de Sauter, foram determinados segundo a metodologia descrita na Seção 1.2.2.1. Por fim, a terceira amostra, chamada OJW3, correspondia ao produto da secagem cominuído. Para tanto, a biomassa seca era novamente processada no liquidificador industrial Metalurgica 7000 Light até que as partículas apresentassem dimensões inferiores a 1,0 mm, utilizando a peneira de abertura 18 mesh como referência.

2.2.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA BIOMASSA

Os teores de cinzas, extrativos, pectina, celulose, hemicelulose e lignina presentes no bagaço de laranja foram determinados utilizando uma metodologia baseada no protocolo Klason (HATFIELD *et al.*, 1994). As análises foram conduzidas com o bagaço de laranja cominuído, OJW3, seco em estufa a 105 °C por um período de 24 horas.

O teor de extrativos foi determinado utilizando acetona como solvente pela diferença de massa da amostra após a extração. Posteriormente, a amostra foi submetida à digestão utilizando ácido sulfúrico a 30 °C por um período de 1 h e posteriormente diluída em água antes da solubilização de outros componentes, mantendo a solução a 120 °C por um período de uma hora. O teor de lignina, que não apresenta afinidade com o ácido sulfúrico, correspondia à massa de material retido após a filtração, descontando a quantidade de cinzas. O teor de cinzas, por sua vez, correspondia à quantidade de material restante ao submeter o bagaço à 900 °C por um período de duas horas utilizando uma mufla. A massa inicial da amostra descontando a quantidade de lignina, cinzas e extrativos correspondiam à quantidade de pectina e holocelulose.

Para diferenciar o conteúdo de celulose e hemicelulose referentes à holocelulose, o bagaço de laranja foi submetido a um segundo tratamento ácido. Nesta etapa, a biomassa seca era adicionada a uma solução de ácido clorídrico 2,5 M a 100 °C com refluxo por um período de duas horas. O teor de celulose, que não apresenta afinidade com o ácido clorídrico, foi determinada pela diferença de massa após a filtração descontando a quantidade de cinzas e lignina. Finalmente, o teor de pectina foi determinado através de sua solubilização em água. Para tanto, aproximadamente 5 gramas de bagaço foi adicionado a 400 mL de água, sendo então aquecido a 100 °C por um período de uma hora, sendo a água evaporada repostada periodicamente. A amostra foi então filtrada, sendo a massa de pectina dada pela diferença de massa.

2.2.4. PRODUÇÃO DOS PELLETS DE BAGAÇO DE LARANJA

A unidade de produção de pellets era constituída por um conjunto de três moldes individuais de mesmas dimensões posicionados entre dois pistões com altura de 2,7 cm e um diâmetro de 10 cm. Cada molde individual era composto por 4 partes: uma base com espessura de 1,5 cm e diâmetro de 3,7 cm com um encaixe sobressalente concêntrico de 0,7 cm de altura e diâmetro de 1,5 cm; um topo com uma altura de 2,3 cm e diâmetro de 3,7 cm com um encaixe de diâmetro de 1,5 cm e profundidade de 0,7 cm; uma casca cilíndrica central com diâmetro externo de 3,7 cm, diâmetro interno de 1,5 cm e altura de 8 cm; um pistão cilíndrico com comprimento de 7 cm e diâmetro de 1,5 cm. Todo o molde para a fabricação dos pellets foi

construído com aço inoxidável. Na produção de pellets, 5,0 gramas de biomassa eram adicionados em cada molde individual, confinado dentro da casca cilíndrica e deixando o pistão encaixado no topo. O sistema era comprimido a uma força de 12 tonf, o que corresponde a uma pressão de compressão de aproximadamente 220 MPa. A Figura 2.1 apresenta a estrutura utilizada para a produção dos pellets.

Figura 2.1. Ilustração do dispositivo utilizado para produção de pellets de biomassa sendo: (A) unidades que compõe um molde individual; (B) molde individual montado; (C) estrutura completa para produção simultânea de três pellets.

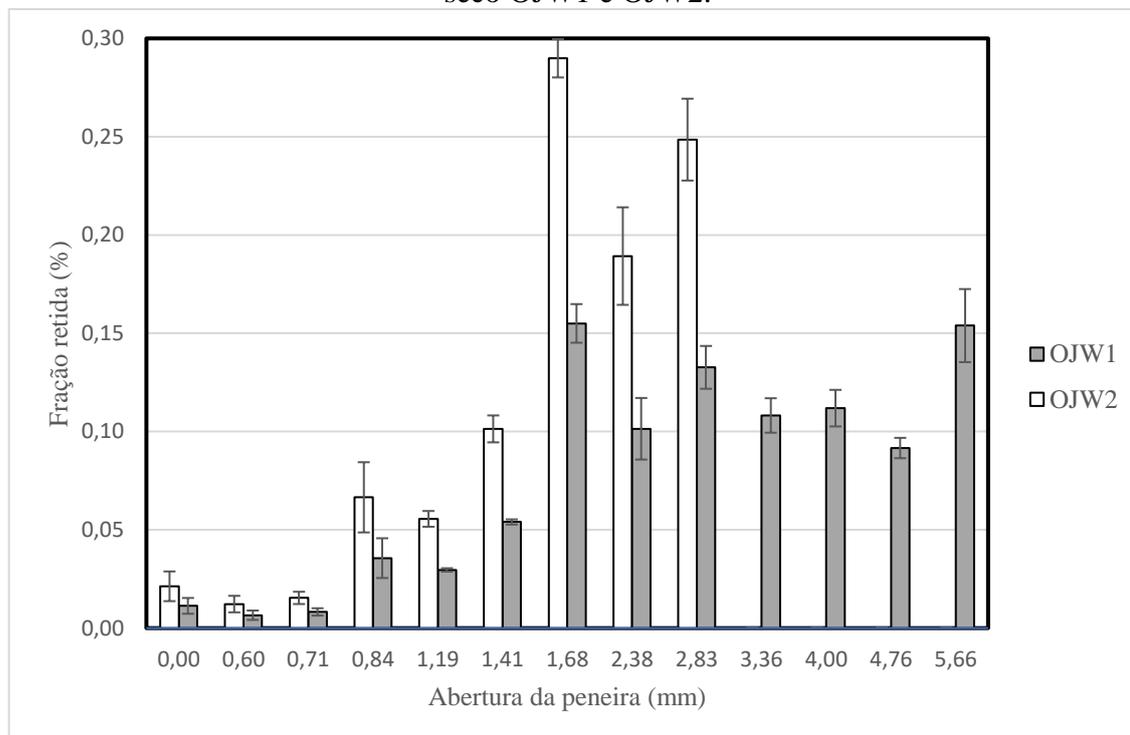


Fonte: elaborado pelo autor.

2.2.5. AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA, LIGANTE E PRÉ-TRATAMENTO

Para avaliar a influência da granulometria do bagaço de laranja sobre as propriedades físicas e mecânicas dos pellets foram utilizadas as amostras de bagaço OJW1, OJW2 e OJW3. A distribuição granulométrica das amostras OJW1 e OJW2 são apresentadas na Figura 2.2, enquanto a amostra OJW3 apresenta partículas com dimensões de 0 a 1,0 mm. O diâmetro médio de Sauter de cada amostra foi 2,64 mm, 1,72 mm e 0,83 mm para as amostras OJW1, OJW2 e OJW3, respectivamente.

Figura 2.2. Fração mássica retida para cada abertura de peneiras para as amostras de bagaço seco OJW1 e OJW2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliar a influência dos diferentes ligantes sobre as propriedades físicas e mecânicas dos pellets foram utilizados amido de milho (carboidrato de cadeia longa), glicose (carboidrato de cadeia simples), borra de café (biomassa com maior teor de lignina e açúcares em comparação ao bagaço de laranja), água e caldo de bagaço de laranja obtido durante a sua compressão, sendo o último utilizado em sua forma original e concentrada. O caldo concentrado foi obtido ao deixar o caldo em uma estufa a 105 °C até a diminuição do volume da solução a 10% do original. Alguns dos pellets foram torrados por um período de uma hora em uma mufla a 180 °C, uma temperatura próxima ao ponto de derretimento da glicose, frutose e sacarose (ROOS *et al.*, 2013). Foram produzidos 13 pellets diferentes segundo o Quadro 2.1, que apresenta a amostra de bagaço utilizada, fração de bagaço, ligante utilizado, fração de ligante e adoção da torrefação.

2.2.6. CARACTERIZAÇÃO DOS PELLETS DE BIOMASSA

Um pellet deve apresentar algumas propriedades físicas e mecânicas para ser considerado viável na combustão, como uma absorção de água inferior a 20%, teor de cinzas inferior a 5%, durabilidade superior a 97,5%, resistência a impacto superior a 90%, umidade inferior a 10% e uma densidade superior a 1200 kg/m³. No presente trabalho, foram efetuados experimentos para determinar a durabilidade, resistência ao impacto e índice de resistência ao

impacto, absorção de água e aumento do comprimento do pellet com o tempo, sendo as metodologias descritas a seguir.

Quadro 2.1. Composição dos diferentes pellets quanto a biomassa e ligantes e adoção de pré-tratamentos.

Pellet	Bagaço	Fração bagaço	Ligante	Fração ligante	Torrefação
1	OJW1	100%	-	-	-
2	OJW2	100%	-	-	-
3	OJW3	100%	-	-	-
4	OJW3	95%	Amido de milho	5%	-
5	OJW3	80%	Amido de milho	20%	-
6	OJW3	80%	Amido de milho Água	12,5% 7,5%	-
7	OJW3	90%	Caldo natural	10%	-
8	OJW3	90%	Caldo concentrado	10%	-
9	OJW3	90%	Borra de café	10%	-
10	OJW3	50%	Borra de café	50%	-
11	OJW3	90%	Água	10%	-
12	OJW3	90%	Caldo concentrado	10%	Sim
13	OJW3	90%	Glicose	10%	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.6.1. DURABILIDADE

Para o ensaio de durabilidade, um único pellet foi colocado dentro de uma drageadeira padrão com volume útil de 10 litros e uma velocidade rotacional de 33,9 rpm por 10 minutos, ocorrendo o atrito constante entre o pellet e as paredes do equipamento, havendo a remoção de uma parte do pellet como consequência do atrito. A durabilidade do pellet foi calculada a partir da Equação 2.1 (PRADHAN *et al.*, 2018), onde m_i corresponde à massa inicial do pellet e m_f corresponde à massa do remanescente do pellet, desconsiderando o material elutriado.

$$Durabilidade = \frac{m_f}{m_i} \quad (2.1)$$

2.2.6.2. ÍNDICE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

O índice de resistência ao impacto e a resistência ao impacto eram determinados pelo mesmo procedimento experimental. Nestes ensaios, os pellets eram soltos sucessivamente a uma altura de 1,85 m até que fosse observado o rompimento do pellet em pedaços menores ou

até uma quantidade máxima de 5 quedas. O índice de resistência ao impacto foi calculado pela Equação 2.2, onde n é o número de pedaços restantes após o rompimento do pellet desconsiderando o elutriado fino e N corresponde ao número de quedas até o rompimento do pellet. A resistência ao impacto, por sua vez, foi calculada pela Equação 2.3, onde m_i corresponde à massa inicial do pellet e m_f corresponde à massa dos pedaços, desconsiderando o material elutriado (PRADHAN *et al.*, 2018).

$$IRI = 100 * \frac{N}{n} \quad (2.2)$$

$$Resist. \text{ ao impacto} = \frac{m_f}{m_i} \quad (2.3)$$

2.2.6.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA

Nos ensaios de resistência à absorção de água os pellets foram submersos em água por um intervalo de 10 segundos, sendo a absorção calculada pela Equação 2.4, onde m_i corresponde à massa inicial e m_f corresponde à massa final do pellet com água absorvida (PRADHAN *et al.*, 2018).

$$Absorção = \frac{m_f - m_i}{m_f} \quad (2.4)$$

2.2.6.4. DENSIDADE APARENTE DO PELLET

Para a determinação da densidade dos pellets foram medidos o seu diâmetro e comprimento com o auxílio de um paquímetro e a sua massa com o auxílio de uma balança digital, sendo a densidade calculada pela equação:

$$Densidade = \frac{m_i}{\frac{\pi D^2 L}{4}} \quad (2.5)$$

2.2.5. ARMAZENAMENTO DOS PELLETS

Para avaliar os efeitos do envelhecimento sobre as características dos pellets durante o armazenamento, eles foram submetidos a uma atmosfera não-controlada por um período de 30 dias. Cor, umidade e densidade foram medidas antes e após este período. Durante os experimentos a temperatura do ar variou entre a máxima de 35 °C e a mínima de 16 °C enquanto a umidade relativa variou entre 41 e 65%. A variação da cor dos pellets foi mensurada com o auxílio de um espectrofotômetro Konika Minolta CM-5, enquanto a umidade foi determinada pelo método convencional de estufa 105 °C por 24 horas. A análise da coloração das amostras foi feita de acordo com o espaço de cor CIELAB, que consiste em três coordenadas diferentes, a coordenada L^* referente ao grau de luminosidade dos pellets, a coordenada a^* referente aos tons de vermelho (positivo) e verde (negativo) e a coordenada b^* referente aos tons de amarelo

(positivo) e azul (negativo). A variação total da cor é determinada através da equação (BRAINARD, 2003):

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.6)$$

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO BAGAÇO DE LARANJA

A Tabela 2.2 apresenta os resultados da caracterização química do bagaço de laranja. Os resultados indicaram que o teor de lignina observado, de $6,0 \pm 1,3\%$ da massa seca, foi significativamente inferior em comparação a outras biomassas lignocelulósicas como o bagaço de malte (27,78%), madeira de lei (23,0%), talos de algodão (21,5%), palha de centeio (19,0%) e bagaço de cana (10,0%) (CORDEIRO *et al.*, 2013; MUSSATTO; TEIXEIRA, 2010; ROWELL *et al.*, 2012). A lignina é diretamente relacionada à estrutura da biomassa e, conseqüentemente, às propriedades mecânicas dos pellets produzidos a partir desta. Ademais, a lignina desempenha um papel chave na densificação das biomassas, aumentando a densidade bulk e a durabilidade mecânica e, simultaneamente, reduzindo a emissão de partículas finas durante o manuseio (BARBOSA *et al.*, 2023). Também pôde-se observar que o conteúdo de celulose, hemicelulose e cinzas apresentou valores próximos aos esperados para este tipo de biomassa.

Tabela 2.2. Caracterização química do bagaço de laranja seco (OJW3).

Componente	Conteúdo/Teor (g/g de biomassa seca)
Cinzas	$5,8 \pm 0,1$
Extrativos	$7,5 \pm 1,2$
Lignina	$6,0 \pm 1,3$
Celulose	$23,1 \pm 7,1$
Pectina	$35,4 \pm 1,0$
Hemicelulose	$22,1 \pm 7,4$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da Tabela 2.2 também indicam que o bagaço de laranja apresenta um elevado teor de pectina, uma molécula que funciona como aglutinador, que poderia melhorar a estrutura do pellet como uma compensação pela baixa quantidade de lignina. No entanto, as moléculas de pectina retêm água em sua estrutura, formando um gel que exerce uma resistência à secagem. A adição de cal virgem ao bagaço de laranja seria responsável pelo rompimento da estrutura da pectina, liberando as moléculas de água adsorvidas e melhorando a remoção de água em excesso tanto pela compressão mecânica, quanto pela secagem (BARBOSA *et al.*, 2020). Deste modo, a adição de ligantes ou a mistura com outras biomassas seria uma alternativa justificável para promover o adensamento do bagaço caso os pellets puros não apresentem propriedades aceitáveis. Adicionalmente, a compressão mecânica da biomassa foi

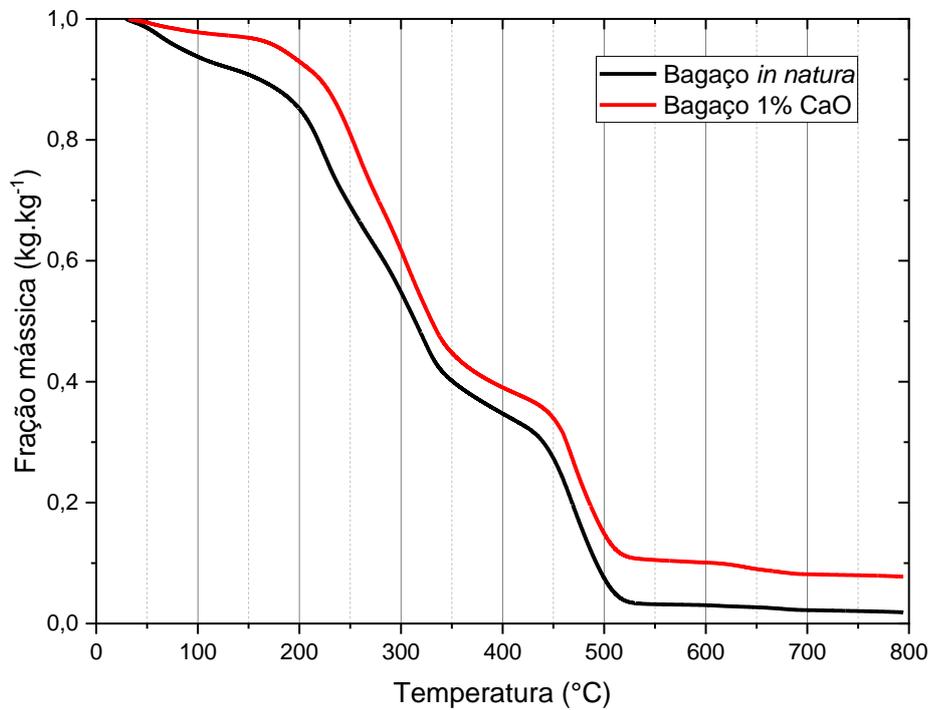
capaz de remover sólidos solúveis, como a sacarose e glicose, que melhorariam as propriedades dos pellets. A concentração de sólidos solúveis no caldo extraído no bagaço de laranja foi 13,2 °Brix.

2.3.2. TERMOGRAVIMETRIA

A Figura 2.3 apresenta a diminuição da massa em relação à massa inicial das amostras de bagaço de laranja com o aumento da temperatura, curva TGA. Pode-se observar que houve uma redução mais acentuada na massa da biomassa *in natura* em relação às amostras misturadas com cal virgem durante o pré-tratamento, especialmente a temperaturas inferiores a 100 °C. Ao término da decomposição térmica do bagaço, foi observado que o teor de cinzas (massa residual) do bagaço com 1% de CaO foi superior ao bagaço de laranja puro, 7,8 e 1,9% da massa inicial, respectivamente. O excesso de cinzas afeta negativamente o desempenho de combustores uma vez que é responsável pela impregnação nas paredes, corrosão, entupimento, e erosão (EL-MAHALLAWY; HABIK, 2002). Entretanto, a diminuição no conteúdo de umidade alcançado de modo satisfatório graças ao pré-tratamento auxiliaria a etapa de combustão uma vez que o poder calorífico de uma biomassa é inversamente proporcional a sua umidade (CORDEIRO *et al.*, 2013). Os efeitos positivos e negativos devem ser avaliados para determinar a viabilidade da metodologia proposta. A Figura 2.4 apresenta a análise de DTG, a derivada da variação de massa com a temperatura, para as duas amostras de bagaço de laranja. Através da curva de DTG, é possível identificar as faixas de temperatura e a quantidade de etapas em que ocorre a degradação termo oxidativa da biomassa. As curvas TGA e DTG devem ser analisadas juntamente, auxiliando o entendimento das reações de combustão. Pode-se identificar que a decomposição do bagaço de laranja ocorre em cinco etapas distintas, tanto para o bagaço puro quanto para o bagaço misturado com CaO.

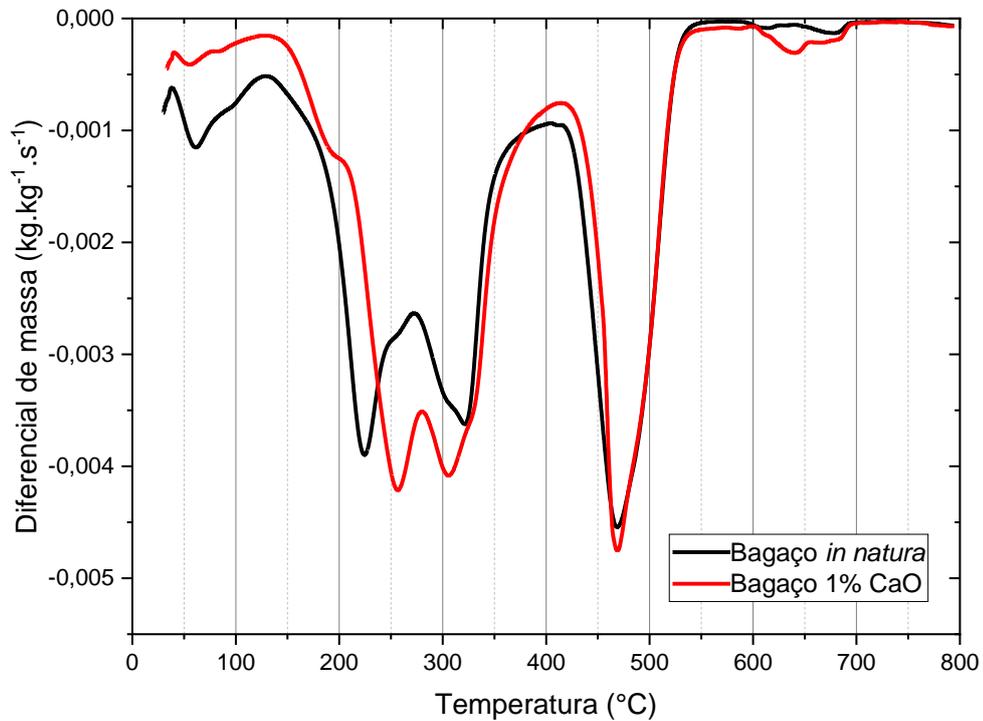
Para o bagaço de laranja *in natura*, foi observado um pico mais acentuado a temperaturas inferiores a 100 °C em comparação ao bagaço misturado com cal, indicando que mesmo após o pré-tratamento juntamente com a secagem em estufa haveriam moléculas de água retidas no material, que só foram removidas com uma diminuição da granulometria no moinho de facas e posterior aquecimento.

Figura 2.3. Fração mássica em função da temperatura (TGA) para o bagaço de laranja in natura e mistura com 1% de CaO.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2.4. O diferencial da massa da amostra (DTG) para bagaço de laranja in natura e misturado com 1% de CaO, em função da temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na faixa de temperaturas entre 120 e 550 °C ocorre a degradação da maior fração do bagaço de laranja, 89,4% do bagaço puro e 87,0% do bagaço misturado com cal, evidenciando que a biomassa é constituída principalmente por compostos com ignição a baixas temperaturas, não sendo necessária a construção de combustores que operem a altas temperaturas. Nesta faixa de operação, foram observados três picos distintos, indicando que nesta etapa da combustão ocorrem as três principais reações de oxidação. À temperatura de 137 °C inicia-se a degradação dos primeiros componentes. Observando-se a Figura 2.4, nota-se que as principais diferenças entre os comportamentos da combustão do bagaço de laranja *in natura* e bagaço de laranja com a mistura de cal foram observadas nesta etapa. O CaO teria apresentado, assim, uma afinidade com componentes que antes seriam degradados a aproximadamente 224 °C. Este pico corresponderia à combustão de dois dos principais componentes das biomassas, a celulose e a hemicelulose, que apresentam grupos hidroxila ativos em sua composição e, conseqüentemente, teriam afinidade com os cátions Ca^{2+} (SALDARRIAGA *et al.*, 2015). Já o segundo e terceiro pico nesta faixa foram consideravelmente próximos, a 320 e 470 °C respectivamente, indicando que não houve mudança significativa nos compostos que são degradados a estas temperaturas. O segundo pico corresponde à combustão da lignina enquanto o terceiro pico corresponde à combustão de carvão, formado após o consumo completo da celulose, hemicelulose e lignina (AMUTIO *et al.*, 2012; SALDARRIAGA *et al.*, 2015). Entretanto, a sobreposição das reações de combustão da celulose, hemicelulose e lignina não permitiram quantificar a fração mássica de cada um destes componentes avaliando somente as curvas de TGA e DTG. A quinta e última etapa da decomposição termo oxidativa do bagaço de laranja ocorreu entre 590 e 700 °C, entretanto os picos foram pouco acentuados em comparação aos demais.

2.3.3. INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE AS PROPRIEDADES DOS PELLETS

2.3.3.1. DURABILIDADE

A Tabela 2.3 apresenta os dados obtidos para a durabilidade dos pellets nas condições utilizadas para a secagem do bagaço de laranja no leito de jorro mecanicamente modificado.

Pôde-se observar que, nas condições avaliadas, os pellets produzidos a partir da biomassa seca não apresentaram uma durabilidade satisfatória, uma vez que o valor desejado seria superior a 0,975 enquanto o maior valor observado foi 0,819 para o experimento 11, uma das repetições para o ponto central. Vale destacar, também, para o experimento 10, outra repetição para o ponto central, foi obtido o pellet com a menor durabilidade. Este seria um forte indício de que os pellets obtidos a partir da compressão direta da biomassa seca no leito de jorro

modificado não apresentaram uma padronização suficiente para que se evidenciasse uma influência significativa das condições do ar da secagem sobre as características do pellet. As análises de efeitos lineares, combinados e quadráticos e a análise de ANOVA e diagrama de Pareto foram utilizados para determinar quais efeitos teriam influência estatisticamente significativa sobre a durabilidade. A Tabela 2.4 apresenta os dados da análise ANOVA para a durabilidade dos pellets em função da temperatura e da velocidade do ar. Por sua vez, a Figura 2.5 apresenta a análise de Pareto para os efeitos sobre a durabilidade.

Tabela 2.3. Durabilidade dos pellets produzidos após a secagem em leito de jorro mecânico, sendo alteradas a temperatura e a velocidade do ar de secagem.

Experimento	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Durabilidade (-)
1	50	2,20	0,686
2	70	2,20	0,767
3	50	4,40	0,771
4	70	4,40	0,578
5	46	3,30	0,747
6	60	4,86	0,758
7	74	3,30	0,650
8	60	1,74	0,663
9 (Central)	60	3,30	0,604
10 (Central)	60	3,30	0,457
11 (Central)	60	3,30	0,819

Fonte: elaborado pelo autor.

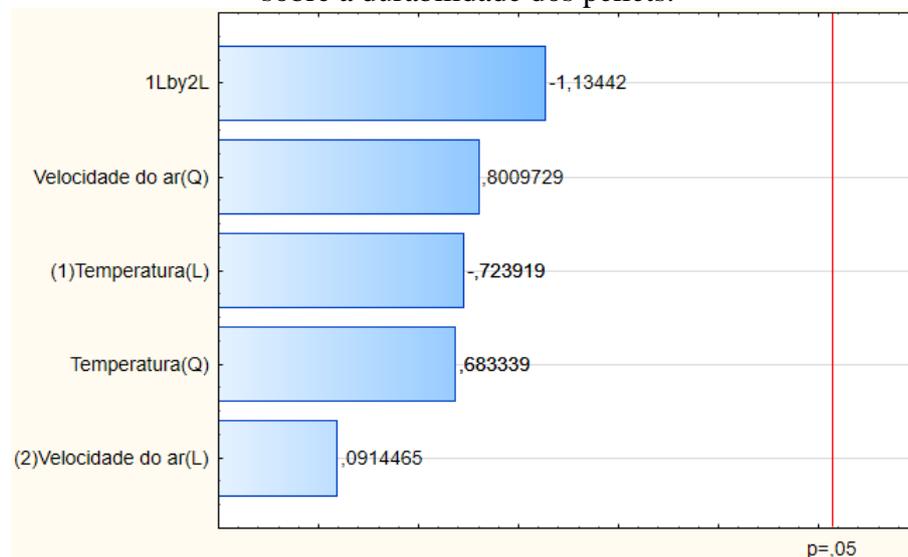
Através da análise de Pareto observa-se que nenhum dos efeitos sobre a durabilidade do pellet foi significativo ao nível 0,05. Ademais, considerando simultaneamente os efeitos quadráticos e lineares, foi observado um R^2 de 0,349, indicando que o ajuste apresentou uma baixa concordância com os dados experimentais. Os resultados observados para as demais propriedades físicas e mecânicas auxiliariam o entendimento sobre a fragilidade e não-uniformidade dos pellets de bagaço de laranja seco.

Tabela 2.4. Análise ANOVA para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a durabilidade dos pellets.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
(1) Temperatura (linear)	0,007699	1	0,007699	0,524058	0,501557
Temperatura (quadrático)	0,006860	1	0,006860	0,466952	0,524765
(2) Velocidade do ar (linear)	0,000123	1	0,000123	0,008362	0,930689
Velocidade do ar (quadrático)	0,009425	1	0,009425	0,641558	0,459500
1linear * 2linear	0,018906	1	0,018906	1,286904	0,308060
Erro	0,073456	5	0,014691		
Total	0,112834	10			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2.5. Análise de Pareto para o ajuste dos efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a durabilidade dos pellets.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.3.3.2. RESISTÊNCIA AO IMPACTO E ÍNDICE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

A Tabela 2.5 apresenta os dados obtidos para a resistência ao impacto e índice de resistência ao impacto dos pellets nas condições utilizadas para a secagem do bagaço de laranja no leito de jorro mecanicamente modificado.

Tabela 2.5. Resistência ao impacto e índice de resistência ao impacto (IRI) dos pellets produzidos após a secagem em leito de jorro mecânico, sendo alteradas a temperatura e a velocidade do ar de secagem.

Experimento	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Resistência (-)	IRI (-)
1	50	2,20	0,67	21,74
2	70	2,20	0,72	33,33
3	50	4,40	0,85	37,45
4	70	4,40	0,71	30,03
5	46	3,30	0,81	33,33
6	60	4,86	0,78	30,03
7	74	3,30	0,34	18,87
8	60	1,74	0,76	37,04
9 (Central)	60	3,30	0,78	34,62
10 (Central)	60	3,30	0,67	36,06
11 (Central)	60	3,30	0,80	37,50

Fonte: elaborado pelo autor.

Durante os ensaios de resistência ao impacto foi observado a desagregação do pellet após uma única queda, sendo este quebrado em pedaços maiores, de dois a seis pedaços, que preservavam a estrutura do pellet e um elutriado fino, sendo o índice de resistência ao impacto um indicativo utilizado para quantificar os pedaços maiores e a resistência a impactos sucessivos. Por sua vez, ao considerar a razão entre a massa total dos pedaços de pellet em relação à sua massa inicial, a resistência ao impacto seria um indicativo da fração da amostra que se mantinha coeso após o choque mecânico, tendo os pellets obtidos a partir do ensaio 3 preservado melhor sua estrutura. Os resultados indicaram uma baixa resistência ao impacto dos pellets de bagaço de laranja produzidos diretamente a partir da secagem do bagaço, uma vez que um pellet de alta qualidade deveria se manter coeso após quatro a dez quedas seguidas sem o rompimento em pedaços maiores, perdendo somente uma pequena parcela de sua massa na forma de elutriado fino. No entanto, para os pellets produzidos diretamente após a secagem, uma fração significativa da massa inicial era perdida na forma de particulado fino enquanto o material restante era quebrado em diversos pedaços menores. A análise dos efeitos, ANOVA e Pareto permitem avaliar a influência da temperatura e velocidade do ar sobre a resistência ao impacto dos pellets, como apresentado pelas Tabelas 2.6 e 2.7 e pelas Figuras 2.6 e 2.7.

Tabela 2.6. Análise ANOVA para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a resistência ao impacto dos pellets.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
(1) Temperatura (linear)	0,069833	1	0,069833	5,449570	0,066842
Temperatura (quadrático)	0,028001	1	0,028001	2,185120	0,199403
(2) Velocidade do ar (linear)	0,004269	1	0,004269	0,333128	0,588836
Velocidade do ar (quadrático)	0,003769	1	0,003769	0,294093	0,610895
1linear * 2linear	0,008556	1	0,008556	0,667707	0,451017
Erro	0,064072	5	0,012814		
Total	0,188123	10			

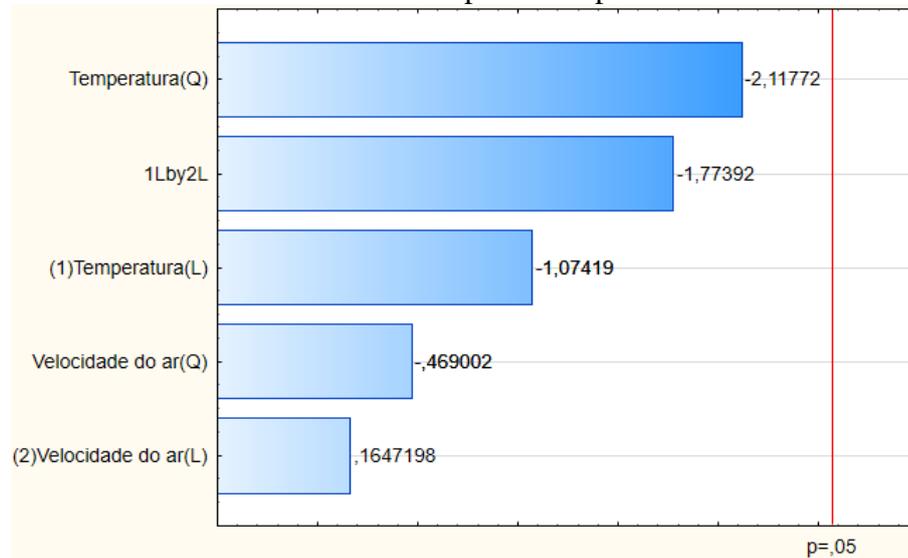
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 2.7. Análise ANOVA para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre o índice de resistência ao impacto dos pellets.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
(1) Temperatura (linear)	33,127879	1	33,1278794	1,15387752	0,331820876
Temperatura (quadrático)	128,75647	1	128,756471	4,48471799	0,087759313
(2) Velocidade do ar (linear)	0,77897848	1	0,77897848	0,027132607	0,875616771
Velocidade do ar (quadrático)	6,3151411	1	6,31514118	0,219962749	0,658806291
1linear * 2linear	90,345025	1	90,345025	3,14680852	0,136257013
Erro	143,55024	5	28,710048		
Total	397,30256	10			

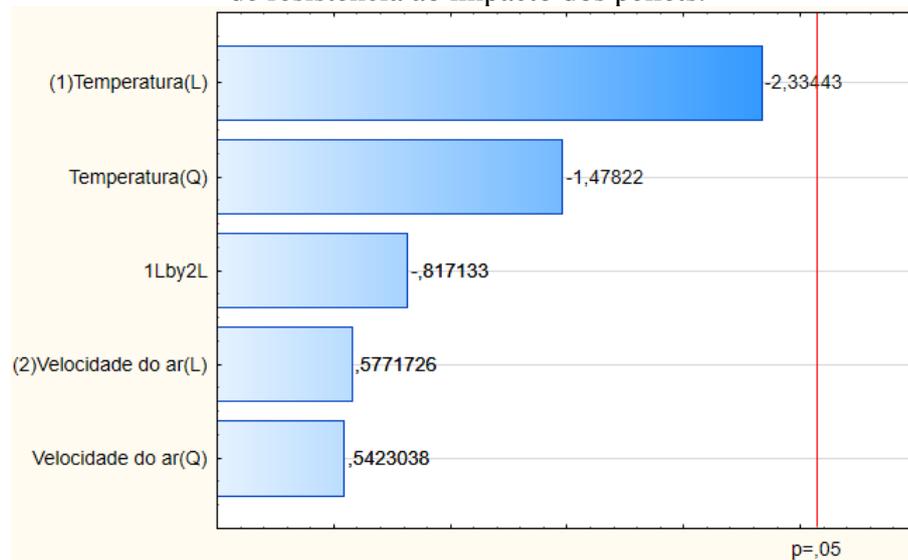
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 2.6. Análise de Pareto para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a resistência ao impacto dos pellets.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 2.7. Análise de Pareto para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre o índice de resistência ao impacto dos pellets.



Fonte: elaborado pelo autor.

Pôde-se observar que, segundo a análise do diagrama de Pareto, os efeitos lineares, quadráticos e combinado da temperatura e velocidade do ar não apresentaram uma influência significativa sobre a resistência ao impacto e índice de resistência ao impacto ao nível 0,05. No entanto, o efeito mais expressivo para o índice de resistência ao impacto foi o linear para a temperatura enquanto para a resistência ao impacto foi o efeito quadrático da temperatura, tendo os efeitos da velocidade do ar apresentado a menor influência sobre estas propriedades mecânicas. Considerando simultaneamente os cinco efeitos, foi realizado um ajuste com R^2 observado de 0,659 para a resistência ao impacto e 0,687 para o índice de resistência ao impacto,

sendo indicativo de baixa qualidade de ajuste para os dados experimentais e para os efeitos das variáveis envolvidas na secagem, não sendo possível atribuir significados físicos a tais efeitos. No entanto, seriam necessárias novas informações para identificar as causas para a não-uniformidade nas propriedades mecânicas dos pellets.

A Figura 2.8 apresenta os pedaços de pellets após os ensaios de resistência ao impacto, sendo desconsiderado o elutriado fino. Pôde-se observar que na superfície dos pedaços, especificamente na interface entre eles, foram encontradas partículas de dimensões grosseiras em comparação ao fino e também em comparação ao diâmetro do pellet, conforme destacado na própria Figura 2.8. A biomassa seca possui uma distribuição granulométrica não-uniforme, conforme apresentado pela Tabela 1.3, apresentando uma quantidade significativa de partículas grosseiras, algumas com dimensões superiores ao próprio diâmetro do pellet. Ademais, não era possível promover uma uniformidade na distribuição destas partículas ao longo dos pellets, tendo cada pellet produzido apresentado diferenças entre si quanto à quantidade, distribuição radial e longitudinal e dimensões de partículas grosseiras. Estas partículas de dimensões maiores funcionam como um ponto pré-definido de fragilidade, onde os pellets apresentam rachaduras e se rompem mais facilmente (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009). No entanto, o desprendimento de uma quantidade significativa seria um indicativo de uma ligação fraca entre as partículas que compõem o pellet.

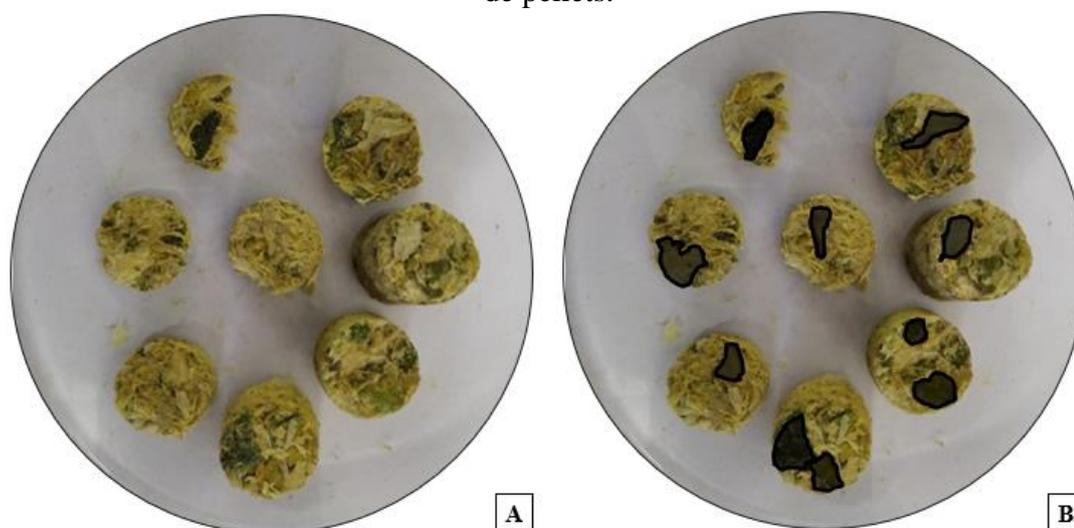
2.3.3.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA

A Tabela 2.8 apresenta os dados obtidos para a absorção de água dos pellets nas condições utilizadas para a secagem do bagaço de laranja no leito de jorro mecanicamente modificado.

Pôde-se observar que os pellets produzidos a partir do bagaço de laranja seco apresentaram elevados níveis de absorção de água. A menor absorção de água foi observada para o experimento 5, com temperatura de 46 °C, em que a água absorvida correspondia a 47% da massa do pellet ao fim do ensaio, tendo o pellet sua massa dobrada em relação a sua condição inicial, condição indesejável para pellets de biomassa. Durante os ensaios, foi observado o rompimento imediato da estrutura do pellet e gradualmente as partículas úmidas eram desprendidas e depositadas no fundo do béquer, em alguns casos o pellet era completamente destruído. Conforme evidenciado pelos resultados para a durabilidade e resistência ao impacto dos pellets de laranja, as ligações entre as partículas não foram suficientes para manter o pellet coeso e, conseqüentemente, à medida que a água permeava os poros houve o rompimento das ligações e desagregação das partículas. Estes resultados indicam que, além das propriedades

mecânicas, as propriedades físicas do pellet também não atenderam os critérios de qualidade pré-definidos. A absorção de água não ocorre somente quando o pellet é exposto à água líquida, como também ocorre a absorção de umidade presente na atmosfera durante o armazenamento (PRADHAN *et al.*, 2018). A Figura 2.9 apresenta o pellet de bagaço de laranja após o ensaio de absorção de água, sendo possível observar o desprendimento quase completo das partículas pela ação da água.

Figura 2.8. (A) Pedacos de pellets de bagaço de laranja submetidos a ensaios de resistência ao impacto; (B) Destaque visual para partículas grosseiras presentes na superfície dos pedacos de pellets.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 2.8. Absorção de água dos pellets produzidos após a secagem em leito de jorro mecânico, sendo alterada a temperatura e a velocidade do ar de secagem.

Experimento	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Absorção de água (-)
1	50	2,20	0,50
2	70	2,20	0,67
3	50	4,40	0,60
4	70	4,40	0,51
5	46	3,30	0,47
6	60	4,86	0,63
7	74	3,30	0,66
8	60	1,74	0,66
9 (Central)	60	3,30	0,79
10 (Central)	60	3,30	0,70
11 (Central)	60	3,30	0,61

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 2.9. Pellet de bagaço de laranja após absorção de água.

Fonte: Elaborado pelo autor.

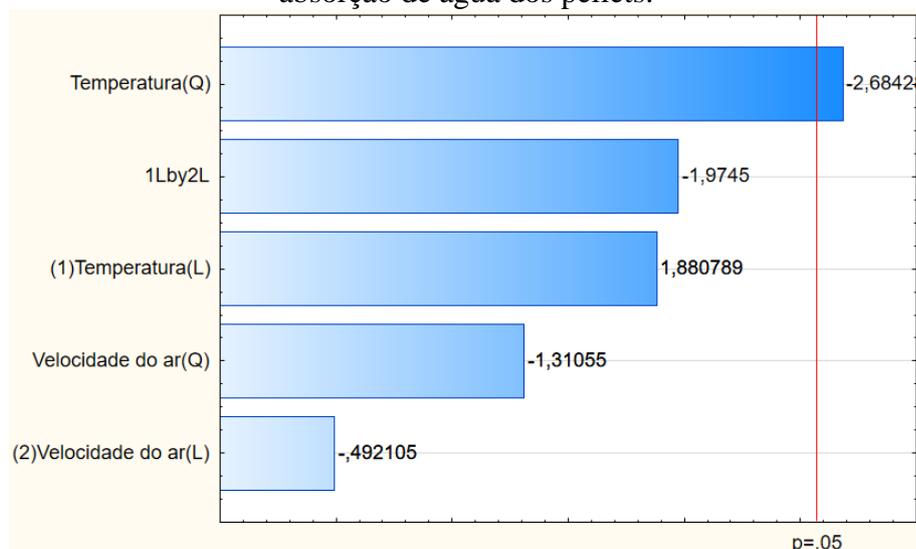
A análise dos efeitos, ANOVA e Pareto também foram utilizadas para identificar uma possível influência da temperatura e da velocidade do ar sobre a absorção de água dos pellets, como apresentado pelas Tabelas 2.9 e pela Figura 2.10.

Tabela 2.9. Análise ANOVA para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a durabilidade dos pellets.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
(1) Temperatura (linear)	0,015690	1	0,015690	3,537366	0,118756
Temperatura (quadrático)	0,031959	1	0,031959	7,205364	0,043596
(2) Velocidade do ar (linear)	0,001074	1	0,001074	0,242168	0,643488
Velocidade do ar (quadrático)	0,007618	1	0,007618	1,717535	0,246978
1linear * 2linear	0,017292	1	0,017292	3,898635	0,105317
Erro	0,022177	5	0,004435		
Total	0,089511	10			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2.10. Análise de Pareto para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a absorção de água dos pellets.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da análise de Pareto foi possível observar que o efeito quadrático negativo da temperatura foi o único a apresentar uma influência significativa sobre a capacidade de absorção de água, tendo um valor-p correspondente inferior a 0,05, enquanto os efeitos lineares da temperatura e velocidade, efeito quadrático da velocidade e combinados apresentaram valores-p superiores a 0,05.

2.3.3.4. AUMENTO DO COMPRIMENTO

A Tabela 2.10 apresenta os dados obtidos para o aumento do comprimento dos pellets expostos à atmosfera, variando as condições utilizadas para a secagem do bagaço de laranja no leito de jorro mecanicamente modificado.

Pôde-se observar que, estando exposto às condições climáticas por um período de 24 horas, com a temperatura variando de 16 a 28 °C e umidade relativa do ar variando de 40 a 60% ao longo do dia, houve o aumento do comprimento dos pellets, enquanto ainda preservava as suas dimensões radiais. No entanto, os pellets não absorveram umidade presente na atmosfera, pelo contrário perderam $2,95 \pm 0,71\%$. Este seria um indicativo de que as ligações entre as partículas não são enfraquecidas e rompidas somente pela absorção de água ou impactos com o ambiente, mas se enfraquecem também pela ação do tempo. Conforme evidenciado pela Tabela 2.1, o bagaço de laranja é uma biomassa com baixo teor de lignina, justamente a substância que atua como ligante durante a prensagem, especialmente quando submetido à compressão mecânica e ao aquecimento. Ademais, durante o pré-tratamento foi observada a perda de uma grande quantidade de lignina que permaneciam ligadas à pectina, havendo assim a remoção de um componente presente na biomassa que auxiliaria a coesão entre as partículas

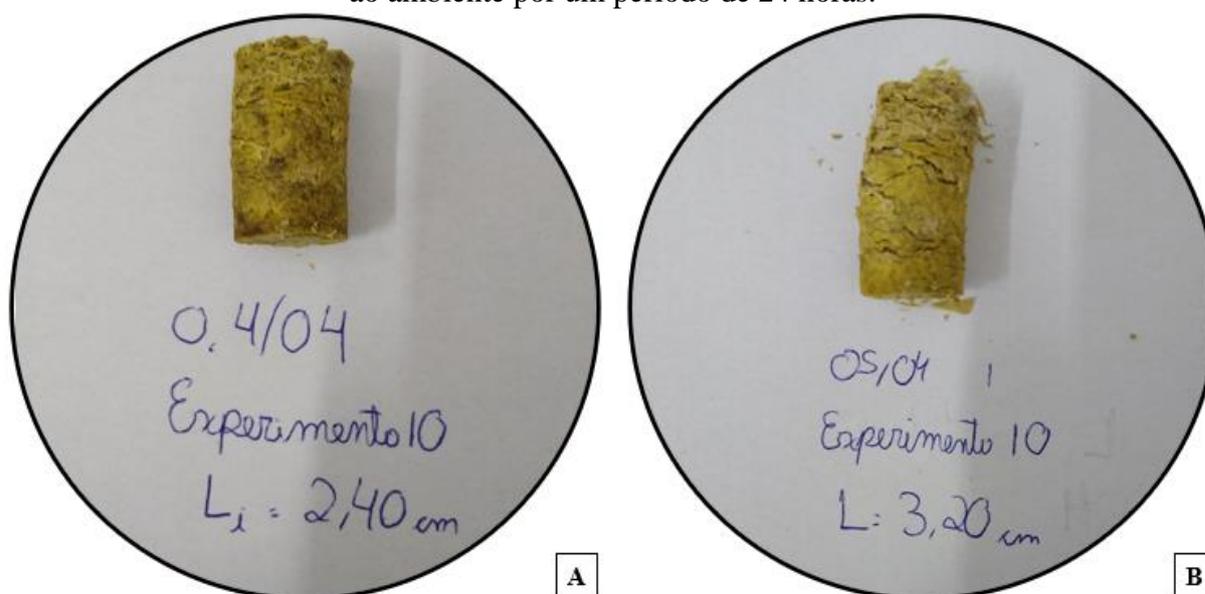
durante a peletização (BARBOSA *et al.*, 2020; PRADHAN *et al.*, 2018). Este fenômeno pode ser observado na Figura 2.11.

Tabela 2.10. Aumento relativo do comprimento dos pellets produzidos após a secagem em leito de jorro mecânico, sendo alterada a temperatura e a velocidade do ar de secagem.

Experimento	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Aumento relativo (%)
1	50	2,20	26
2	70	2,20	22
3	50	4,40	23
4	70	4,40	23
5	46	3,30	30
6	60	4,86	35
7	74	3,30	33
8	60	1,74	39
9 (Central)	60	3,30	35
10 (Central)	60	3,30	36
11 (Central)	60	3,30	38

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2.11. (A) Pellet de bagaço de laranja original; (B) Pellet de bagaço de laranja exposto ao ambiente por um período de 24 horas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos efeitos, ANOVA e Pareto também foram utilizadas para identificar uma possível influência da temperatura e velocidade do ar sobre a absorção de água dos pellets, como apresentado pelas Tabelas 2.11 e pela Figura 2.12.

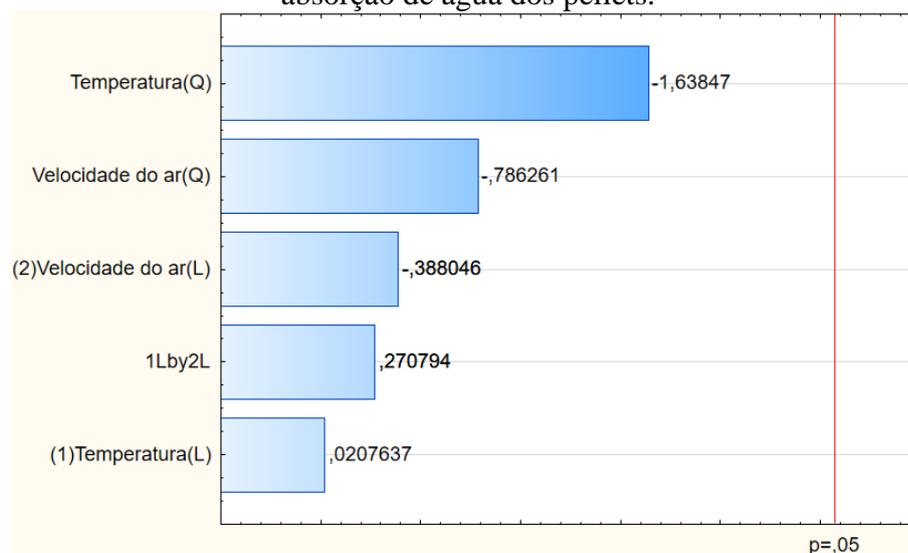
Assim como fora observado para o índice de resistência ao impacto, durabilidade e resistência ao impacto, os efeitos lineares, quadráticos e combinados da temperatura e velocidade do ar de secagem não apresentaram uma influência significativa sobre o aumento do comprimento dos pellets, tendo valores-p superiores a 0,05.

Tabela 2.11. Análise ANOVA para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a durabilidade dos pellets.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
(1) Temperatura (linear)	0,000002	1	0,000002	0,000431	0,984237
Temperatura (quadrático)	0,012530	1	0,012530	2,684576	0,162250
(2) Velocidade do ar (linear)	0,000703	1	0,000703	0,150580	0,713953
Velocidade do ar (quadrático)	0,002885	1	0,002885	0,618207	0,467324
1linear * 2linear	0,000342	1	0,000342	0,073329	0,797373
Erro	0,023336	5	0,004667		
Total	0,037387	10			

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 2.12. Análise de Pareto para os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre a absorção de água dos pellets.

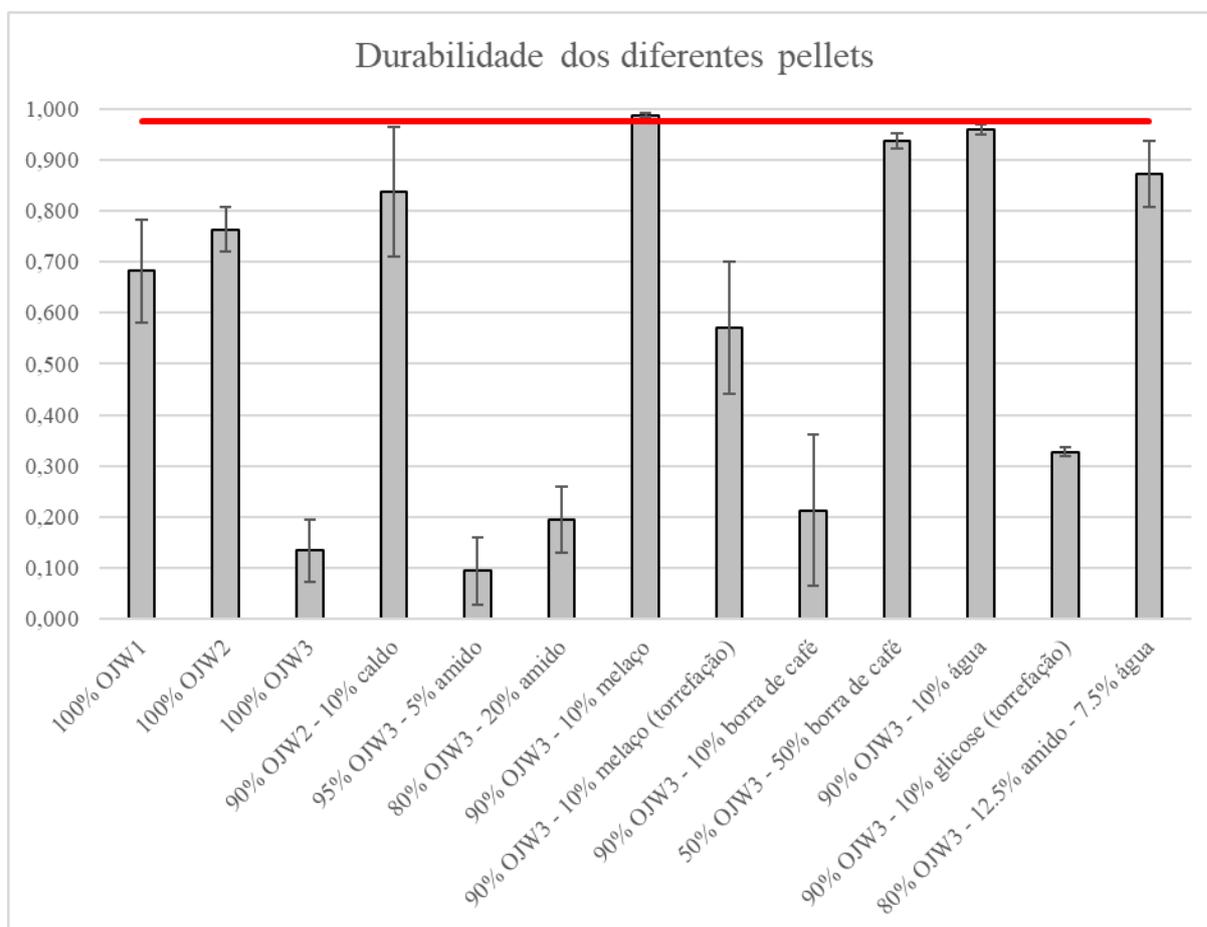


Fonte: elaborado pelo autor.

2.3.4. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS PELLETS COM DIFERENTES GRANULOMETRIAS E LIGANTES

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais, enquanto na seção seguinte será discutido o efeito da granulometria, de cada tipo de ligante e da torrefação sobre as propriedades físicas e mecânicas. A Figura 2.13 apresenta os resultados experimentais da durabilidade dos pellets. A linha no gráfico representa o valor mínimo desejável de 0,975. Pôde-se observar que as estratégias adotadas foram capazes de alterar significativamente o parâmetro durabilidade dos pellets em relação aos pellets produzidos a partir do bagaço OJW1 puro, que corresponde à compressão da biomassa imediatamente após a secagem, sem qualquer processamento adicional. Algumas das estratégias aumentaram significativamente os valores de durabilidade dos pellets, especialmente se empregando ligantes líquidos, como água e melação, que apresentaram valores próximos ao desejado.

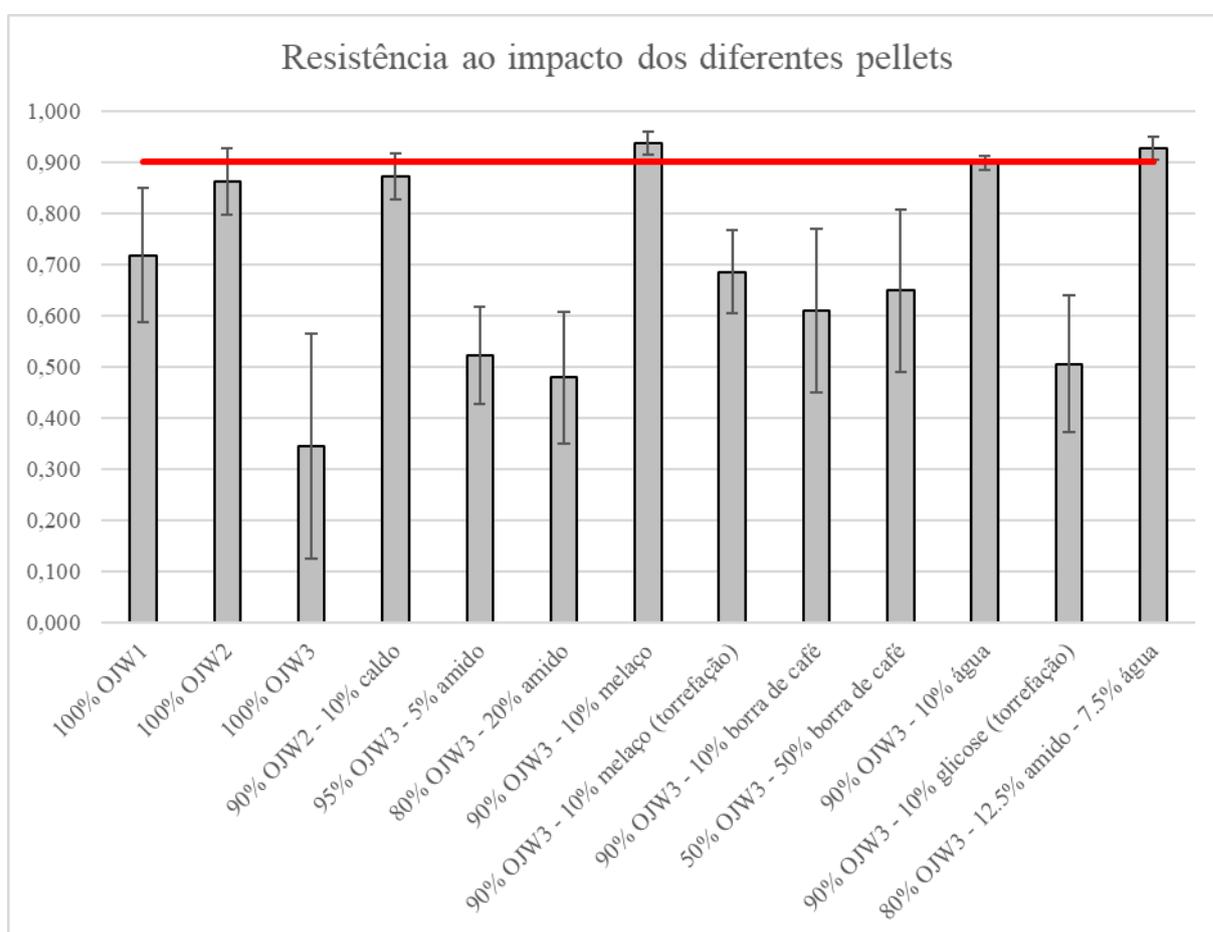
Figura 2.13. Durabilidade dos pellets produzidos a partir do bagaço de laranja com diferentes granulometrias, adição de ligantes e torrefação e a durabilidade mínima desejada de 0,975.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 2.14 apresenta a resistência ao impacto dos diferentes pellets juntamente com o patamar mínimo desejado de 0,90, representado pela reta horizontal em destaque. Assim como para a durabilidade, os valores observados para a resistência ao impacto dos pellets apresentaram diferenças significativas em comparação aos pellets produzidos com a amostra OJW1. Os pellets que foram produzidos com a adição de ligantes líquidos, como a água e o melado, apresentaram o melhor desempenho com resistência superior à desejada.

Figura 2.14. Resistência ao impacto dos pellets produzidos a partir do bagaço de laranja com diferentes granulometrias, adição de ligantes e torrefação e a resistência ao impacto mínima desejada de 0,90.

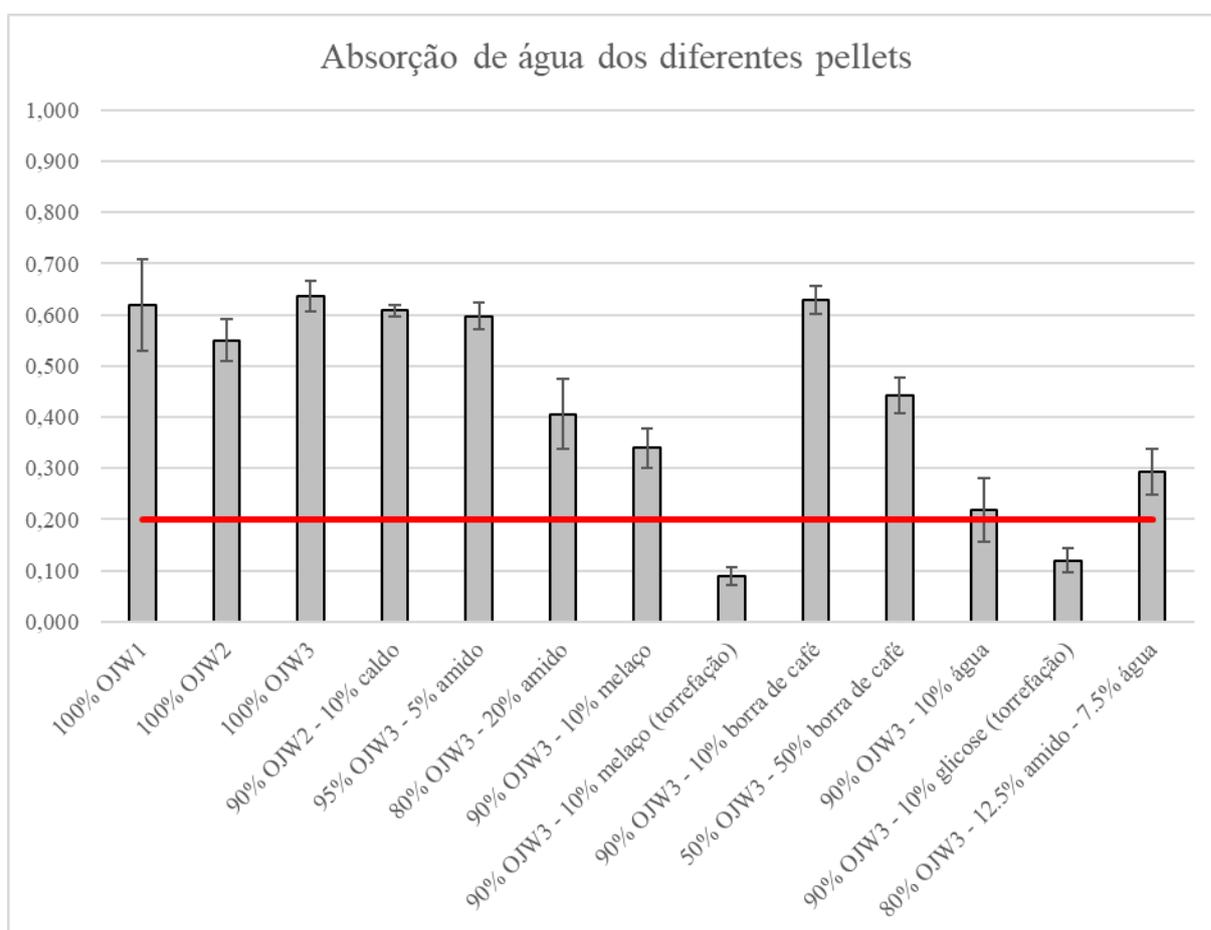


Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 2.15 apresenta os valores da absorção de água dos diferentes pellets juntamente com o patamar máximo desejado de 0,20, representado pela reta horizontal em destaque. Os resultados indicaram que os pellets que foram submetidos à torrefação imediatamente após a compressão mecânica foram os únicos pellets a apresentar uma capacidade de absorção de água inferior ao desejado. De fato, muitos dos demais pellets não apresentaram uma diferença perceptível em comparação com a amostra OJW1, indicando que os tratamentos que

melhoraram as propriedades mecânicas dos pellets não tiveram o mesmo impacto sobre a absorção de água.

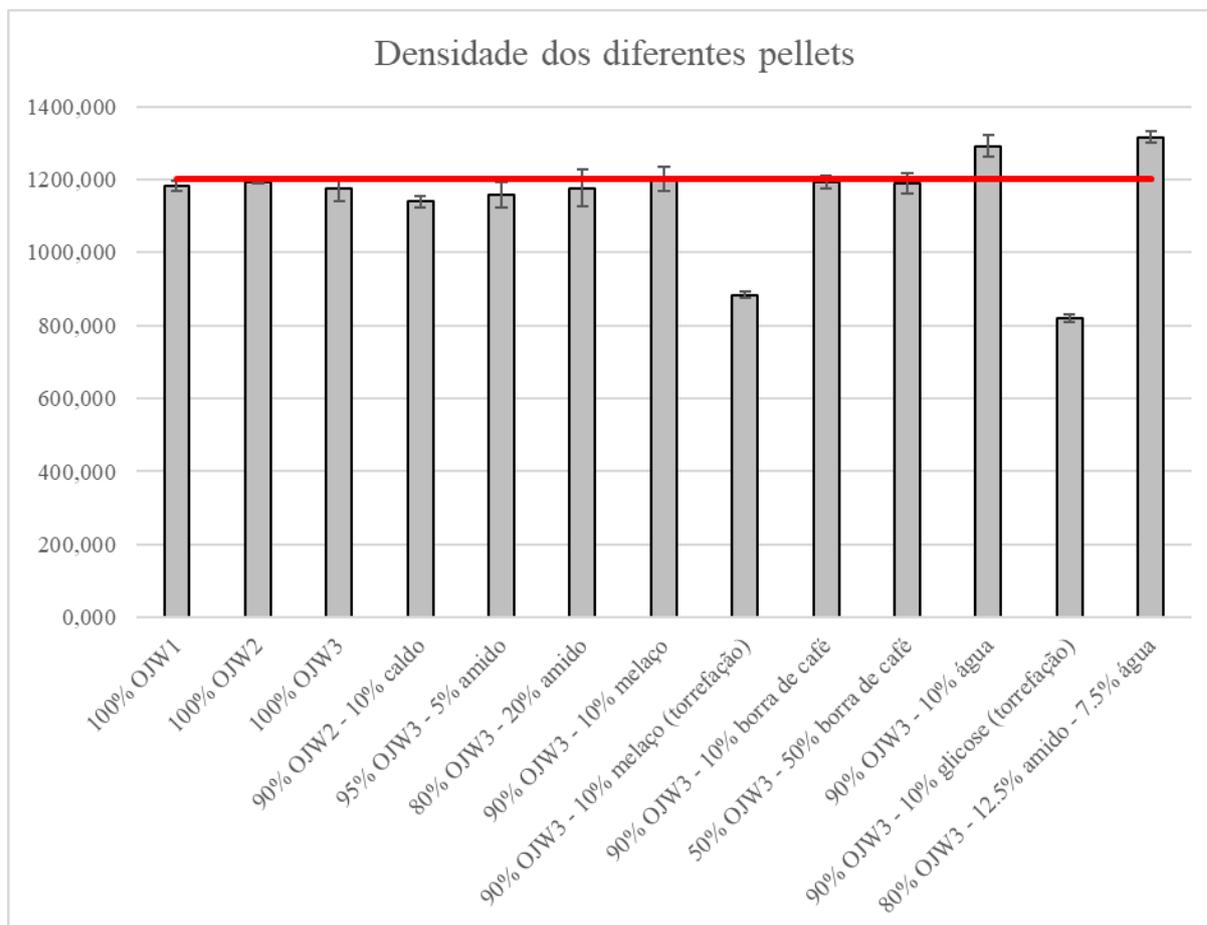
Figura 2.15. Capacidade de absorção de água dos pellets produzidos a partir do bagaço de laranja com diferentes granulometrias, adição de ligantes e torrefação e a absorção máxima e água desejada de 0,20.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 2.16 apresenta a densidade dos diferentes pellets, juntamente com o patamar mínimo desejado de 1200 kg/m³ representado pela reta horizontal em destaque. Pôde-se observar que a maior parcela dos pellets, incluindo o produzido com a amostra OJW1, apresentou densidades próximas ao valor desejado, enquanto os pellets produzidos com a adição de água como ligante apresentaram valores superiores. No entanto, os pellets que foram submetidos à torrefação apresentaram uma densidade significativamente inferior, uma vez que seria esperada a degradação de uma parte da biomassa na temperatura utilizada, como evidenciado pela análise termogravimétrica (SALDARRIAGA *et al.*, 2015).

Figura 2.16. Densidade dos pellets produzidos a partir do bagaço de laranja com diferentes granulometrias, adição de ligantes e torrefação e a densidade mínima desejada de 1200 kg/m³.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.3.5. EFEITOS DA GRANULOMETRIA

Pellets produzidos com amostras puras de bagaço de laranja, OJW1, OJW2 e OJW3, que se diferem entre si pela granulometria, apresentaram propriedades físicas e mecânicas inadequadas, com densidade inferior a 1200 kg/m³, durabilidade inferior a 0,975, resistência inferior a 0,9 e absorção de água superior a 0,20. Estes resultados eram esperados devido à caracterização química do bagaço, que indicou que o teor de lignina presente no bagaço de laranja, $5,95 \pm 1,33\%$, era significativamente inferior a outras biomassas lignocelulósicas, conforme apresentado pela Tabela 2.1. Ademais, durante a prensagem da biomassa após a mistura de cal virgem houve a desestruturação da pectina juntamente com a remoção de açúcares solúveis no caldo da prensa, moléculas que apresentam propriedades aglutinantes (BARBOSA *et al.*, 2020). Entretanto, devem-se realizar análises mais detalhadas para determinar o efeito da pectina sobre o adensamento dos pellets. A adição de ligantes ou outras

biomassas seria necessária para melhorar a qualidade dos pellets nas condições avaliadas (RAJPUT *et al.*, 2020).

Pellets produzidos com o bagaço OJW1 tiveram uma resistência ao impacto de $0,718 \pm 0,131$, uma durabilidade de $0,682 \pm 0,101$, uma absorção de água de $0,619 \pm 0,090$ e uma densidade de $1182,45 \pm 15,12 \text{ kg/m}^3$. Assim como observado nos ensaios para a influência das condições de secagem sobre a durabilidade, foi novamente observado que a coesão da biomassa não foi adequada para a peletização com a presença de pontos de fragilidade. Kaliyan e Vance Morey (2009) mostraram que partículas grosseiras formam zonas mais suscetíveis ao rompimento nos pellets de biomassa. Pellets produzidos com a biomassa OJW2, sem a presença de partículas grosseiras, que foram retiradas pelo peneiramento, apresentaram propriedades físicas e mecânicas melhores em comparação ao OJW1, como uma resistência ao impacto de $0,862 \pm 0,065$, uma durabilidade de $0,763 \pm 0,043$, absorção de água de $0,550 \pm 0,040$ e densidade de $1192,93 \pm 4,58 \text{ kg/m}^3$. Deste modo, esta redução na média do tamanho de partículas melhorou a resistência mecânica dos pellets devido ao aumento da área exposta durante a compactação, que tende a aumentar as forças de coesão (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009). Embora houvesse uma melhoria significativa nas propriedades dos pellets devido à distribuição de tamanhos da biomassa, estas ainda estão aquém dos valores necessários para sua aplicação, isto é, a simples separação das partículas grosseiras, que representa uma fração mássica de $0,466 \pm 0,022\%$ da amostra inicial, não seria suficiente para viabilizar a peletização.

Os resultados dos experimentos mostraram que haveria um tamanho de partícula considerado ótimo para o bagaço de laranja, uma vez que a cominuição completa da biomassa, OJW3, tornou os pellets mais frágeis que os pellets de OJW1, com uma durabilidade de $0,134 \pm 0,062$, resistência ao impacto de $0,345 \pm 0,219$, absorção de água de $0,637 \pm 0,029$ e densidade de $1174,25 \pm 32,47 \text{ kg/m}^3$, apresentado a menor resistência mecânica dentre os pellets avaliados. Estes resultados indicam que as partículas com dimensões inferiores a 1 mm seriam mais suscetíveis ao enfraquecimento das interações superficiais, efeitos de parede das partículas maiores sobre as menores, efeitos de cunho em que as partículas maiores permanecem espaçadas e aglomeração de partículas menores (LIU *et al.*, 2019; MANI *et al.*, 2004).

Além dos efeitos diretos do tamanho nos parâmetros de qualidade dos pellets, há também a forma geométrica das partículas. Partículas menores em formato de grão melhoram a compactação mecânica da biomassa. Isto não se aplica mais quando as partículas ficam do tamanho de poeira. Por fim, vale ressaltar as quatro propriedades avaliadas efetiva e simultaneamente apresentaram alterações nos pellets, ou seja, o aumento da resistência ao

impacto foi observado juntamente com o aumento da durabilidade e da densidade e a diminuição da absorção de umidade do bagaço puro. Este comportamento não se alterou após a adição de ligantes.

2.3.6. EFEITOS DA ADIÇÃO DE LIGANTES

Para avaliar a influência do tipo de ligante sobre as propriedades dos pellets, a amostra OJW3 foi escolhida como referência devido a sua baixa resistência mecânica, fazendo as alterações mais perceptíveis. Ademais, devido ao menor tamanho de partícula, a adição do ligante produziria um pellet mais uniforme, sem a presença de pontos predefinidos de fragilidade. Os resultados indicaram que pellets produzidos a partir da adição de ligantes sólidos, como a glicose, amido de milho e borra de café, apresentaram menor resistência mecânica e maior absorção de água. A adição de água pura, por sua vez, tornou a resistência mecânica próximo ou superior ao padrão desejável, enquanto os melhores resultados foram observados para pellets produzidos com água e amido ou com o melaço de laranja, produzido ao concentrar o caldo da prensa.

2.3.6.1. CARBOIDRATOS COMO LIGANTES

Experimentos foram conduzidos utilizando amido de milho, glicose e caldo da prensa, em sua forma natural e concentrada, como ligantes para a produção dos pellets de bagaço de laranja. O amido é um polissacarídeo com vários monômeros de glicose em série através de ligações glicosídicas, podendo ser amilose (amido de cadeia reta correspondente a 20% a 25% do amido total) ou amilopectina (amido de cadeia longa com ramificações, correspondente a 75% a 80% do amido total) (KUOKKANEN *et al.*, 2011). Na peletização, ele poderia ser um bom ligante para compensar a desestruturação da pectina. A mistura de amido de milho e bagaço de laranja nas proporções 1:19 e 1:4 melhoraram as propriedades mecânicas dos pellets em comparação aos pellets OJW3, embora não foram superiores às propriedades de OJW1 e OJW2. Pellets produzidos com 5% de amido de milho apresentaram uma resistência ao impacto de $0,522 \pm 0,095$, durabilidade de $0,094 \pm 0,065$, absorção de água de $0,598 \pm 0,026$ e densidade de $1156,87 \pm 35,08$ kg/m³, enquanto os pellets produzidos com 20% de amido de milho apresentaram uma resistência ao impacto de $0,479 \pm 0,130$, durabilidade de $0,195 \pm 0,065$, absorção de água de $0,406 \pm 0,069$ e densidade de $1176,61 \pm 51,08$ kg/m³. Os valores observados indicaram que, apesar da melhoria em relação ao bagaço cominuído, a simples adição de amido não foi capaz de aumentar as propriedades mecânicas a valores suficientes para viabilizar sua utilização. Alcançar a melhoria simultânea em todas propriedades se mostrou um desafio. Pellets com amido de milho, por exemplo, apresentaram uma maior resistência ao impacto, mas

uma menor resistência à fricção e, conseqüentemente, eram menos duráveis. Para o bagaço de laranja puro, por sua vez, a variação da resistência ao impacto era acompanhada por uma variação semelhante na durabilidade. Esta diferença de comportamento pode ser relacionada às propriedades dilatantes de fluido não-Newtoniano do amido quando em contato com a umidade, cuja relação entre as tensões e cisalhamento é não-linear (SCHNEIDER; GÄRTNER, 2013; TERNIK *et al.*, 2006). Deste modo, eles seriam mais resistentes aos impactos intensos da queda vertical e menos resistentes à constante tensão cisalhante com as paredes internas da drageadeira. Outro aspecto a ser destacado é que a adição de amido não alterou significativamente a densidade dos pellets, indicando que o amido não influenciou a compactação das partículas entre si durante a compressão mecânica. Também foi observado que a maior proporção de amido nos pellets não foi suficiente para alterar as propriedades dos pellets além do desvio padrão das medidas, indicando que, nos casos observados, a adição de uma pequena quantidade de amido seria suficiente. Pellets produzidos com 80% de biomassa, 7,5% de água e 12,5% de amido apresentaram uma melhoria significativa na resistência ao impacto, durabilidade, resistência à absorção de água e densidade, tendo apresentado os melhores resultados dentre os pellets produzidos no presente trabalho. Este fenômeno se deve ao fato da água intensificar o espessamento, aglutinação e endurecimento do amido (PRADHAN *et al.*, 2018).

A peletização da biomassa com melaços de laranja, caldo da prensagem concentrado ou não-concentrado, também foi realizada. Os resultados indicaram que a mistura de caldo não concentrado com a amostra de bagaço OJW2 a uma proporção 1:9 não apresentou parâmetros de qualidade significativamente superior aos observado para os pellets de OJW2 puro. Deste modo, a mistura de caldo concentrado e bagaço OJW3 a uma proporção 1:9 foi feita para alterar a granulometria da biomassa e a concentração de açúcares na solução. O produto apresentou uma elevada resistência ao impacto, $0,937 \pm 0,022$, e também uma elevada durabilidade, $0,987 \pm 0,003$, uma absorção de água de $0,340 \pm 0,038$ e densidade de $1202,78 \pm 33,17 \text{ kg/m}^3$. De modo geral, pellets produzidos com melaços apresentam uma qualidade elevada devido à presença de sacarose, monossacarídeos, proteínas e minerais. Estes componentes combinados apresentam um potencial de aglutinação de partículas superior comparado a açúcares isolados, como a frutose, maltodextrina, glicose e sacarose (SOLEIMANI *et al.*, 2017). O melhor desempenho do melaço em relação aos açúcares se deve à maior facilidade de permear a estrutura porosa da biomassa densificada (ZHAI *et al.*, 2018). Ademais, o contato intersticial entre os carboidratos e as partículas dos pellets depende da estrutura química do carboidrato,

uma vez que açúcares de mesmo peso molecular não necessariamente aglutinam de maneira semelhante. Por exemplo, mesmo a frutose e a glicose sendo isômeros, com o mesmo peso molecular, apresentam potenciais coesivos distintos (SOLEIMANI *et al.*, 2017).

2.3.6.2. MISTURA COM BORRA DE CAFÉ

A mistura entre biomassas é feita para melhorar as propriedades finais dos pellets, aproveitando as características positivas de cada componente. A borra de café seria uma alternativa interessante para ser misturado com o bagaço de laranja, devido à sua disponibilidade e abundância, com a geração de aproximadamente 2 kg de resíduos sólidos para cada kg de café instantânea consumido, e devido ao elevado teor de lignina, aproximadamente 33,6% em base seca (CAETANO *et al.*, 2014; LISOWSKI *et al.*, 2019).

De modo geral, a borra de café melhorou as propriedades mecânicas dos pellets em comparação ao bagaço OJW3. A lignina presente no café melhorou a estrutura dos pellets, por assim dizer, embora não fosse o suficiente para que as propriedades do produto alcançassem os padrões desejáveis. Entretanto, o aumento na proporção de borra de café de 10% para 50% provocou um aumento expressivo na durabilidade, de 0,213 para 0,937. A borra de café também foi capaz de melhorar a resistência à absorção de água dos pellets, sem alterar significativamente a densidade e a resistência ao impacto.

2.3.6.3. ÁGUA COMO LIGANTE

Os pellets produzidos com a biomassa OJW3 e água apresentaram melhores propriedades físicas e mecânicas, tanto para os pellets com 10% de água e 90% de bagaço quanto para os pellets com 7,5% de água, 12,5% de amido de milho e 80% de bagaço. Estes pellets apresentaram densidade e resistência ao impacto acima dos parâmetros desejáveis, e uma durabilidade próxima à desejada. Ademais, estes pellets apresentaram a maior resistência à absorção de água, desconsiderando os que foram submetidos à torrefação.

Estes resultados mostraram que o conteúdo de umidade do bagaço de laranja altera significativamente as propriedades dos pellets. Este fenômeno ocorreria devido à diminuição da temperatura de transição vítrea da lignina, do amido e do glúten durante o adensamento da biomassa, levando a um aumento do número de pontes sólidas e da área de contato entre as partículas pela intensificação das forças de van der Waals. A água também provoca a gelatinização do amido, a solubilização de fibras e o rompimento das ligações de proteínas (CARONE *et al.*, 2011; TUMULURU *et al.*, 2011).

Embora, de modo geral, a presença de água melhora significativamente as propriedades dos pellets, existe uma limitação quanto ao excesso de água. Quanto maior a quantidade de

umidade em excesso presente no pellet, menor a sua densidade e maior a sua expansão volumétrica, além de provocar uma decomposição acelerada do pellet com a perda de parte da massa seca (GRAHAM *et al.*, 2017; MANI *et al.*, 2006; SHAW *et al.*, 2009). Para algumas biomassas, como festuca, miscanto, alfafa, sorgo e salgueiro, a umidade adequada para peletização seria em torno de 10% (PUIG-ARNAVAT *et al.*, 2016). Biomassas com um teor de umidade acima do valor nominal possuem dificuldades de compactação e, conseqüentemente, os pellets apresentam uma maciez indesejada (SERRANO *et al.*, 2011).

2.3.7. EFEITOS DA TORREFAÇÃO

Através dos resultados observados pela Figura 2.15, pôde-se observar que os pellets que foram submetidos à torrefação foram os únicos a apresentar uma absorção de água dentro dos padrões desejáveis, inferior a 0,2, sendo $0,088 \pm 0,017$ para a biomassa com caldo da prensagem concentrado e $0,120 \pm 0,020$ para a biomassa com glicose. Entretanto, a torrefação reduziu significativamente a densidade dos pellets, com uma perda de massa de até $26,6 \pm 1,7\%$ em relação à massa inicial dos pellets com melaço. As densidades dos pellets torrados foram inferiores a 900 kg/m^3 , muito abaixo dos 1200 kg/m^3 desejados. Outro ponto negativo para os pellets torrados foi a presença de diversas rachaduras, a baixa resistência ao impacto e baixa durabilidade. A baixa resistência mecânica observada ocorreu pela remoção de toda a umidade, um dos principais ligantes, e desvolatilização da lignina, responsável pela estruturação dos pellets (TUMULURU *et al.*, 2011; VAMVUKA; SFAKIOTAKIS, 2011). Conseqüentemente, nas condições experimentais utilizadas no presente trabalho, isto é, temperatura, tempo de exposição e atmosfera oxidante, a torrefação não melhorou as propriedades dos pellets. Embora houvesse uma melhoria na absorção de água, a utilização de energia no tratamento térmico não foi justificável.

Outros trabalhos utilizando atmosfera inerte indicaram os possíveis benefícios da torrefação, uma vez que o processo não remove somente a água, mas também remove outros compostos voláteis, aumenta a hidrofobicidade e também o poder calorífico superior. Neste caso, com temperaturas de 200 a 300 °C, também ocorrem a descarboxilação e decomposição térmica da hemicelulose e, embora houvesse a perda de massa, muito da energia inicial seria mantida (CHEN *et al.*, 2015; PENG *et al.*, 2013; VAN DER STELT *et al.*, 2011).

2.3.8. ARMAZENAMENTO DOS PELLETS

As Tabelas 2.12 e 2.13 apresentam os dados referentes ao envelhecimento dos pellets que, na prática, se relacionam ao tempo de prateleira. A Tabela 2.12 apresenta a umidade e a densidade, além de suas respectivas mudanças após os 30 dias, enquanto a Tabela 2.13

apresenta a cor dos pellets imediatamente após a peletização segundo a escala CIELAB, bem como a variação total de cor após trinta dias. Os resultados indicaram que a variação na umidade dos pellets produzidos com bagaço puro, em termos absolutos, foi inferior a 1%, indicando que o bagaço de laranja não possui uma tendência a absorver umidade da atmosfera. Pellets produzidos com borra de café e amido de milho, por sua vez, apresentaram uma variação inferior a 5%, indicando que estes ligantes, em específico, não também apresentaram uma tendência a absorver ou perder umidade durante o armazenamento. Pellets produzidos com 90% OJW2 – 10% caldo não-concentrado, 90% OJW3 – 10% água e 80% OJW3 – 12,5% amido de milho – 7,5% água perderam água para o ambiente durante o armazenamento, com uma perda de massa de até 13,90%. Após a torrefação, houve a absorção de água de aproximada 10%, indicando que o caráter hidrofóbico dos pellets torrados não se manteve durante os 30 dias. Entretanto, os pellets torrados mantiveram suas densidades praticamente constantes durante o armazenamento.

Resultados indicaram uma redução na densidade dos pellets produzidos a partir de bagaço de laranja puro, OJW1, OJW2 e OJW3 superior a 20%, provocada principalmente pela expansão volumétrica dos pellets, representada pela Figura 2.17. Enquanto, visualmente, os pellets com a presença de água mantiveram sua integridade física, os demais apresentaram diversas rachaduras em sua extensão. Dentre os pellets produzidos com bagaço de laranja puro, o OJW3 apresentou a menor variação de densidade e cor durante o armazenamento, indicando que haveria um enfraquecimento nas interações entre partículas grosseiras, com uma maior variação na densidade para OJW1 e maior variação de cor para OJW2.

Pôde-se observar que os pellets produzidos com a mistura de amido e água apresentaram uma pequena variação de densidade em comparação com os pellets sem água, mantendo a sua densidade acima de 1200 kg/m³ após o armazenamento de 30 dias. Estes resultados indicaram novamente que o amido gelificado apresentaria um desempenho superior em relação ao amido puro, não somente pelas propriedades físicas e mecânicas superiores, mas também pelo maior tempo de prateleira. Pellets produzidos com o caldo da prensagem, concentrado ou não, apresentaram uma expressiva redução na densidade durante o armazenamento, indicando que os açúcares não preservaram a estrutura inicial dos pellets.

Tabela 2.12. Propriedades físicas e mecânicas dos pellets de bagaço de laranja após o armazenamento por 30 dias: umidade, densidade e respectivas variações.

Composição dos pellets	Umidade b.u (%)			Densidade	
	inicial	final	variação	final(kg/m ³)	variação(%)
100% OJW1	12,91±0,15	13,08±0,15	0,17±0,15	897,89±7,15	-24,87±0,79
100% OJW2	13,92±0,17	13,19±0,08	-0,73±0,16	901,94±8,06	-24,39±0,92
100% OJW3	12,58±0,11	13,07±0,14	0,49±0,25	917,24±13,12	-21,82±2,64
95% OJW3 - 5% amido	11,80±0,05	14,66±0,01	2,86±0,06	942,09±23,41	-18,43±4,49
80% OJW3 - 20% amido	11,46±0,11	15,00±0,09	3,54±0,06	1013,25±32,02	-13,83±1,87
80% OJW3 - 12.5% amido - 7.5% água	17,03±0,07	14,58±0,38	-2,45±0,32	1231,59±11,79	-6,37±1.86
90% OJW2 - 10% caldo	27,45±5,95	13,55±0,03	-13,90±5,92	939,98±29,60	-17,40±3.74
90% OJW3 - 10% melão	15,63±0,15	16,21±0,15	0,59±0,21	957,72±48,05	-20,41±2.24
90% OJW3 - 10% borra	13,51±8,61	14,52±0,18	1,01±8,77	947,52±26,99	-20,49± 3.48
50% OJW3 - 50% borra	15,79±8,94	11,40±0,13	-4,39±8,92	961,22±4,39	-19,10±2.18
90% OJW3 - 10% água	18,73±0,78	15,40±0,21	-3,33±0,95	1211,08±2,56	-6,17±2.05
90% OJW3 - 10% melão (torrefacção)	-	10,03±0,02	10,03±0,02	878,48±15,74	-0,64±2.65
90% OJW3 - 10% glicose (torrefacção)	-	10,33±0,05	10,33±0,05	786,66±11,51	-4,17±0.21

Fonte: Elaborado pelo autor.

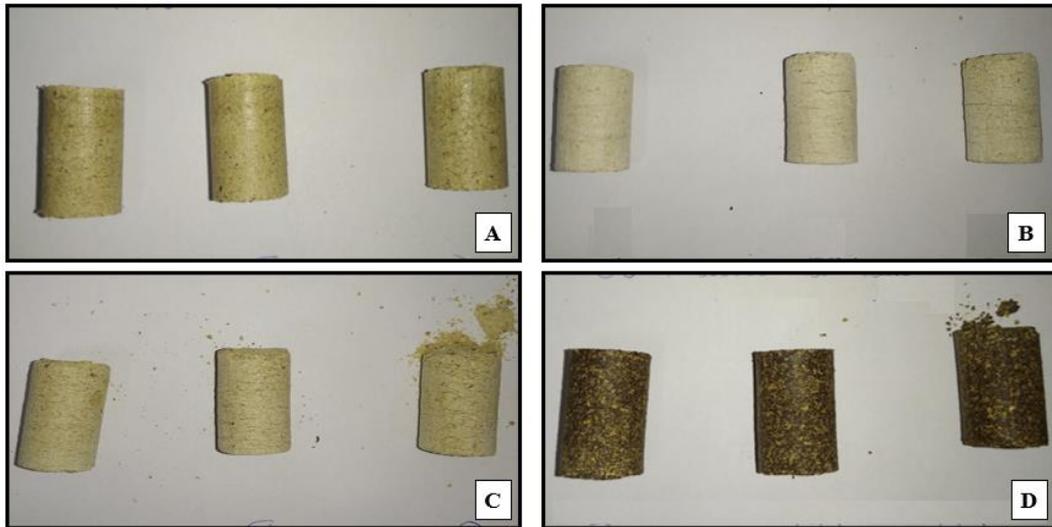
Por fim, todos os pellets apresentaram variações em seus parâmetros cromáticos, embora estas variações sejam pouco expressivas, especialmente para a luminosidade da amostra, indicando que as diferenças visuais dos pellets seriam perceptíveis a olho nu somente após uma observação mais atenta. Estes resultados indicaram que os pré-tratamentos e as misturas de ligantes para a produção pellets garantiam um aspecto visual parcialmente uniforme durante o período de armazenamento adotado, embora sejam necessárias informações adicionais quanto ao armazenamento em condições climáticas extremas, como a exposição à saturação de ar.

Tabela 2.13. Coordenadas da coloração CIELAB dos diferentes pellets de bagaço de laranja inicialmente e após armazenamento de 30 dias.

Composição dos pellets	L* inicial	L* final	a* inicial	a* final	b* inicial	b* final
100% OJW1	60,3±1,2	59,9±2,0	4,5±1,2	4,2±0,9	30,3±1,2	29,2±0,9
100% OJW2	58,0±0,4	58,1±3,4	5,3±1,1	4,8±1,2	33,0±1,4	24,9±0,7
100% OJW3	71,3±3,8	70,9±1,8	2,1±1,0	1,9±0,3	28,4±0,4	27,2±1,5
95% OJW3 - 5% amido	73,6±3,8	73,0±0,4	1,2±0,2	1,8±0,2	28,4±0,4	25,1±0,6
80% OJW3 - 20% amido	76,3±1,4	77,0±1,4	1,3±0,7	1,1±0,4	24,5±2,2	19,3±0,7
80% OJW3 - 12.5% amido - 7.5% água	72,8±0,9	73,4±2,3	1,3±0,1	1,5±0,3	25,6±0,1	20,8±0,4
90% OJW2 - 10% caldo	53,0±1,6	58,1±3,4	5,6±0,9	5,4±0,7	30,5±1,3	26,6±2,5
90% OJW3 - 10% melão	62,4±3,9	66,7±2,9	4,9±1,2	3,3±1,1	30,8±1,1	26,1±0,2
90% OJW3 - 10% borra	68,3±1,1	66,4±1,7	2,0±0,3	2,4±0,2	29,3±0,2	25,8±0,7
50% OJW3 - 50% borra	43,9±1,2	47,2±1,3	2,8±0,6	3,1±0,6	17,8±0,2	19,0±1,4
90% OJW3 - 10% água	69,8±0,5	68,1±1,7	2,2±0,2	2,9±0,4	31,2±0,1	25,4±0,3
90% OJW3 - 10% melão (torrefação)	33,2±5,6	36,6±3,9	8,9±0,9	9,9±0,9	15,2±4,1	18,0±3,2
90% OJW3 - 10% glicose (torrefação)	34,1±2,9	31,5±2,7	9,1±0,8	9,1±0,8	16,8±2,4	15,7±2,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2.17. Conjuntos de pellets armazenados por 30 dias, sendo: (a) 90% OJW3 e 10% água; (b) 80% OJW3 e 20% amido; (c) 100% OJW3; (d) 50% OJW3 e 50% borra de café.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4. CONCLUSÕES

O bagaço de laranja apresentou diversas características positivas quanto à sua decomposição térmica, como o baixo teor de cinzas, inferior a 8%, e uma temperatura relativamente baixa para sua completa combustão, 700 °C. No entanto, seria necessária uma maior atenção quanto à operação devido à não-homogeneidade na granulometria da biomassa. Uma forma de manusear o bagaço de laranja sem perdas indesejáveis de massa seria a sua peletização para a obtenção de um produto uniforme, com maior densidade energética e que preserva suas características por períodos prolongados de tempo.

Entretanto, a peletização do bagaço de laranja imediatamente após a secagem em leito de jorro não forneceu um produto com propriedades físicas e mecânicas satisfatórias para a sua utilização, apresentando uma resistência mecânica baixa e resistência à absorção de água acima do ideal, independentemente da vazão e temperatura do ar durante a secagem. A baixa fração mássica de lignina, um dos principais agregadores de biomassas, juntamente com a remoção de uma quantidade significativa de açúcares durante a prensagem (anterior à secagem), tornaram a coesão durante a peletização não-satisfatória. Deste modo, seria necessária a adoção de estratégias adicionais para viabilizar a peletização, como a diminuição do tamanho das partículas, adição de ligantes e a torrefação.

Duas estratégias foram adotadas para reduzir a granulometria do bagaço, a cominuição do bagaço e separação do particulado grosseiro. Embora a cominuição não tenha proporcionado pellets com qualidade aceitável, foi um processamento necessário para diminuir os pontos de fragilidade identificados. Adição de carboidratos e borra de café alterou as propriedades mecânicas dos pellets, especialmente a durabilidade, no entanto, não o suficiente para alcançar propriedades aceitáveis. A torrefação aumentou expressivamente a resistência à absorção de água, uma vez que o processo garante propriedades hidrofóbicas à biomassa, embora os pellets fossem mecanicamente frágeis. Pellets produzidos com a adição de água ou amido e água apresentaram o melhor desempenho, com uma elevada durabilidade, indicando a importância da umidade para manter a coesão da biomassa.

Embora o presente capítulo tenha exemplificado o impacto de diferentes estratégias para a produção dos pellets de laranja, estas não se mostraram viáveis para a obtenção de produtos com todas as características desejáveis para a comercialização e utilização como combustíveis de alta eficiência. A fraca aderência entre as partículas se mostrou um limitador do processo, sendo necessários estudos adicionais para viabilizar a peletização do bagaço do laranja.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar modelos matemáticos para descrever a secagem do bagaço no leito de jorro modificado com agitação mecânica;
- Utilizar o leito de jorro modificado para a secagem de outras biomassas, estendendo os resultados observados no presente trabalho a outras aplicações;
- Avaliar a operação do leito de jorro com agitadores de pás inclinadas para maiores alturas de leito estático, compreendendo também a região cilíndrica;
- Definir um sistema de controle do leito de jorro mecanicamente agitado, visando a otimização do processo;
- Avaliar o poder calorífico superior do bagaço de laranja;
- Realizar a combustão e a pirólise do bagaço de laranja em equipamentos de escala laboratorial, avaliando a emissão de gases e a liberação de energia durante o processo;
- Avaliar a viabilidade econômica da secagem do bagaço como etapa preliminar da combustão;
- Comparar o desempenho da combustão da biomassa na forma granular e peletizada quanto à liberação de energia, gases e particulado;
- Avaliar estratégias adicionais para a peletização, como a torrefação em atmosfera inerte e a mistura com outras biomassas, como a serragem, e os efeitos sobre as propriedades dos pellets.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARJEE, A.; AFRIN, S. M.; SIT, N. Physicochemical, textural, and rheological properties of yoghurt enriched with orange pomace powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 45, n. 2, p. 1–10, 2021.
- ADEODATO, M. G. Análise da fluidodinâmica de leite de jorro durante o recobrimento de partículas. Universidade de Campinas, 2003.
- AFRIN, S. M.; ACHARJEE, A.; SIT, N. Convective drying of orange pomace at different temperatures and characterization of the obtained powders. *Journal of Food Science and Technology*, v. 59, n. 3, p. 1040–1052, 2022.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage. *Crop Evapotranspiration*, January, 1998.
- ALMEIDA, A. R. F. De. Análise da secagem de pastas em leite de jorro. 202 f. Universidade Federal de São Carlos, 2009.
- ALTZIBAR, H.; LOPEZ, G.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Effect of draft tube geometry on pressure drop in draft tube conical spouted beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 91, n. 11, p. 1865–1870, 2013.
- AMUTIO, M.; LOPEZ, G.; AGUADO, R.; ARTETXE, M.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Kinetic study of lignocellulosic biomass oxidative pyrolysis. *Fuel*, v. 95, p. 305–311, 2012.
- BACELOS, M. S. Análise do comportamento da fluidodinâmica do leite de jorro com misturas de tamanho de partículas. 2006. 140 f. Universidade Federal de São Carlos, 2006.
- BALAT, M.; BALAT, H.; ÖZ, C. Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, n. 5, p. 551–573, 2008.
- BARBOSA, A. M.; ROCHA, T. A. F.; SALDARRIAGA, J. F.; ESTIATI, I.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Alternative drying of orange bagasse in vibrofluidized bed for use in combustion. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 152, 2020.
- BARBOSA, B. M.; VAZ, S.; COLODETTE, J. L.; DE SIQUEIRA, H. F.; DA SILVA, C. M. S.; CÂNDIDO, W. L. Effects of Kraft Lignin and Corn Residue on the Production of Eucalyptus Pellets. *Bioenergy Research*, v. 16, n. 1, p. 484–493, 2023.
- BARROS, J. P. A. de A. Acúmulo, elutrição e recuperação do produto na secagem de pasta em leite de jorro. 2018. 98 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2018.
- BARROS, J. P. A. de A. Análise de diferentes configurações do leite de jorro com agitador mecânico e do equipamento convencional. 2022. 147 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2022.

- BARROS, J. P. A. de A.; DE BRITO, R. C.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Fluid Dynamic Analysis of a Modified Mechanical Stirring Spouted Bed: Effect of Particle Properties and Stirring Rotation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 59, n. 37, p. 16396–16406, 2020.
- BARROS, J. P. A. de A.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Fluid dynamics, velocity profile and average cycle time in different configurations of the modified mechanically stirred spouted bed. *Korean Journal of Chemical Engineering*, v. 39, n. 11, p. 2896–2906, 2022.
- BATISTA, J. N. M. Fluidodinâmica e transferência de calor em leitos de jorro visando a secagem em grãos de sorgo: análise experimental e simulação numérica por CFD-DEM e TFM. 2019. 141 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2019.
- BEZERRA, C. V.; RODRIGUES, A. M. da C.; AMANTE, E. R.; DA SILVA, L. H. M. Nutritional potential of green banana flour obtained by drying in spouted bed. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 35, n. 4, p. 1140–1146, 2013.
- BITTI, M. T. Avaliação das condições operacionais na taxa de evaporação de água em leito de jorro. 2012. 76 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2012.
- BOAS, M. A. V.; DE CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; MARTINS, M. A. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, n. 87, p. 481–490, 2010.
- BORGES, L. P. Determinação experimental de parâmetros de interação e aplicação na simulação CFD-DEM de leito de jorro. 2020. - Universidade Federal de São Carlos, 2020.
- BRAINARD, D. H. Color Appearance and Color Difference Specification. Second Edied. Optical Society of America, 2003.
- BRITO, R. C. de. Intermittent drying and draft tube design for spouted beds. 2021. 268 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2021.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Carvão vegetal de madeira de desbaste de Pinus. IPEF: Circular Técnica, n. 146, p. 1–12, 1982.
- BRITO, R. C.; BÉTTEGA, R.; FREIRE, J. T. Energy analysis of intermittent drying in the spouted bed. *Drying Technology*, v. 37, n. 12, p. 1498–1510, 2019.
- BRITO, R. C.; SOUSA, R. C.; BÉTTEGA, R.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Analysis of the energy performance of a modified mechanically spouted bed applied in the drying of alumina and skimmed milk. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 130, n. p. 1–10, 2018.
- BRUNS, R. E. Como Fazer Experimentos. 2 nd ed. 2001.

- BUTLER, J. W.; SKRIVAN, W.; LOTFI, S. Identification of Optimal Binders for Torrefied Biomass Pellets. *Energies*, v. 16, n. 8, p. 1–23, 2023.
- CAETANO, N. S.; SILVA, V. F. M.; MELO, A. C.; MARTINS, A. A.; MATA, T. M. Spent coffee grounds for biodiesel production and other applications. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 16, n. 7, p. 1423–1430, 2014.
- CARONE, M. T.; PANTALEO, A.; PELLERANO, A. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 1, p. 402–410, 2011.
- CHEN, W. H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 847–866, 2015.
- CORDEIRO, L. G.; EL-AOUAR, Â. A.; DE ARAÚJO, C. V. B. Energetic characterization of malt bagasse by calorimetry and thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 112, n. 2, p. 713–717, 2013.
- CYPRIANO, D. Z.; DA SILVA, L. L.; MARIÑO, M. A.; TASIC, L. Orange biomass by-products. *Revista Virtual de Química*, v. 9, n. 1, p. 176–191, 2017.
- DA ROSA, C. A. Estudo experimental e numérico da fluidodinâmica e das transferências de calor e massa em um leito de jorro contínuo : Uso da técnica CFD. 2010. 97 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2010.
- DE PAULA, E. R. Sensor virtual para estimativa de umidade e temperatura na fase sólida durante processo de secagem em leito de jorro. 2019. 76 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2019.
- DU, W.; ZHANG, L.; ZHANG, B.; BAO, S.; XU, J.; WEI, W. Pressure drop and pressure fluctuations in spouted beds with binary mixtures of particles. *Powder Technology*, v. 276, p. 134–143, 2015.
- EL-MAHALLAWY, F.; HABIK, S. E.-D. *Fundamentals and Technology of Combustion*. 1st Edition. Elsevier, 2002.
- ERDOGAN, E.; ATILA, B.; MUMME, J.; REZA, M. T.; TOPTAS, A.; ELIBOL, M.; YANIK, J. Characterization of products from hydrothermal carbonization of orange pomace including anaerobic digestibility of process liquor. *Bioresource Technology*, v. 196, p. 35–42, 2015.
- FERNANDES, C. F. Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leito de jorro. 2005. 80 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2005.
- FREIRE, Fábio B.; ATXUTEGI, A.; FREIRE, Flavio B.; FREIRE, J. T.; AGUADO, R.;

- OLAZAR, M. An adaptive lumped parameter cascade model for orange juice solid waste drying in spouted bed. *Drying Technology*, v. 35, n. 5, p. 577–584, 2017.
- FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B.; NASCIMENTO, B. S. A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium. *Drying Technology*, v. 30, n. 4, p. 330–341, 2012.
- GAGEANU, I.; VOICU, G.; VLADUT, V.; VOICEA, I. Experimental research on influence of recipes used on quality of biomass pellets. *Engineering for Rural Development*, v. 16, p. 785–791, 2017.
- GHAFGHAZI, S.; SOWLATI, T.; SOKHANSANJ, S.; BI, X.; MELIN, S. Particulate matter emissions from combustion of wood in district heating applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 6, p. 3019–3028, 2011.
- GOMIDE, R. *Operações Unitárias*. Câmara Brasileira do Livro, 1983.
- GRABOWSKI, S.; MUJUMDAR, A. S.; RAMASWAMY, H. S.; STRUMILLO, C. Evaluation of fluidized versus spouted bed drying of baker's yeast. *Drying Technology*, v. 15, n. 2, p. 625–634, 1997.
- GRAHAM, S.; EASTWICK, C.; SNAPE, C.; QUICK, W. Mechanical degradation of biomass wood pellets during long term stockpile storage. *Fuel Processing Technology*, v. 160, p. 143–151, 2017.
- GUZMAN, G.; XIAO, D.; LISKA, D. A.; MAH, E.; SANOSHY, K.; MANTILLA, L.; REPLOGLE, R.; BOILEAU, T. W.; BURTON-FREEMAN, B. M.; EDIRISINGHE, I. Addition of Orange Pomace Attenuates the Acute Glycemic Response to Orange Juice in Healthy Adults. *Journal of Nutrition*, v. 151, n. 6, p. 1436–1442, 2021.
- HAMAWAND, I.; DA SILVA, W. P.; EBERHARD, F.; ANTILLE, D. L. Issues related to waste sewage sludge drying under superheated steam. *Polish Journal of Chemical Technology*, v. 17, n. 4, p. 5–14, 2015.
- HARUN, N. Y.; AFZAL, M. T. Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass Blends. *Procedia Engineering*, v. 148, p. 93–99, 2016.
- HATFIELD, R. D.; JUNG, H. G.; RALPH, J.; BUXTON, D. R.; WEIMER, P. J. A comparison of the insoluble residues produced by the Klason lignin and acid detergent lignin procedures. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 65, n. 1, p. 51–58, 1994.
- HUANG, Y. L.; MA, Y. S. The effect of extrusion processing on the physiochemical properties of extruded orange pomace. *Food Chemistry*, v. 192, p. 363–369, 2016.
- HUNG-NGUYEN, L.; DRISCOLL, R. H.; SRZEDNICKI, G. Drying of high moisture content

- paddy in a pilot scale triangular spouted bed dryer. *Drying Technology*, v. 19, n. 2, p. 375–387, 2001.
- IGATHINATHANE, C.; WOMAC, A. R.; SOKHANSANJ, S.; NARAYAN, S. Size reduction of high- and low-moisture corn stalks by linear knife grid system. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 4, p. 547–557, 2009.
- JIANG, L.; LIANG, J.; YUAN, X.; LI, H.; LI, C.; XIAO, Z.; HUANG, H.; WANG, H.; ZENG, G. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The density and hardness of pellet. *Bioresource Technology*, v. 166, n. 2014, p. 435–443, 2014.
- JITTANIT, W.; SRZEDNICKI, G.; DRISCOLL, R. H. Comparison Between Fluidized Bed and Spouted Bed Drying for Seeds. *Drying Technology*, v. 31, n. 1, p. 52–56, 2013.
- KALIYAN, N.; VANCE MOREY, R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 3, p. 337–359, 2009.
- KEEY, R. B. *Drying: Principles and practice*. First Edited. Pergamon Press Ltd, 1972.
- KUMAR, B. S.; VINOD, A. V. Bed expansion ratio of mono-sized and binary mixtures in fluidized, spouted, and spout-fluid beds. *Particulate Science and Technology*, v. 36, n. 8, p. 1006–1016, 2018.
- KUOKKANEN, M.; VILPPO, T.; KUOKKANEN, T.; STOOR, T.; NIINIMÄKI, J. Additives in wood pellet production - A pilot-scale study of binding agent usage. *BioResources*, v. 6, n. 4, p. 4331–4355, 2011.
- LAM, P. S.; LAM, P. Y.; SOKHANSANJ, S.; BI, X. T.; LIM, C. J. Mechanical and compositional characteristics of steam-treated Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.) during pelletization. *Biomass and Bioenergy*, v. 56, p. 116–126, 2013.
- LI, Y.; LIU, H. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, v. 19, n. 3, p. 177–186, 2000.
- LI, L.; PAN, H.; CHEN, J.; CAO, W.; LIU, W.; DUAN, X.; REN, G. Infrared-assisted spouted bed drying of Chinese yam cubes: effect of constant and variable temperature drying processes on drying behavior, uniformity, and quality attributes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, n. October, 2022.
- LISOWSKI, A.; OLENDZKI, D.; ŚWIĘTOCHOWSKI, A.; DĄBROWSKA, M.; MIESZKALSKI, L.; OSTROWSKA-LIGEŻA, E.; STASIAK, M.; KLONOWSKI, J.; PIĄTEK, M. Spent coffee grounds compaction process: Its effects on the strength properties of biofuel pellets. *Renewable Energy*, v. 142, p. 173–183, 2019.
- LIU, J.; CHENG, W.; JIANG, X.; KHAN, M. U.; ZHANG, Q.; CAI, H. Effect of extractives

- on the physicochemical properties of biomass pellets: Comparison of pellets from extracted and non-extracted sycamore leaves. *BioResources*, v. 15, n. 1, p. 544–556, 2020.
- LIU, Z.; MI, B.; JIANG, Z.; FEI, B.; CAI, Z.; LIU, X. Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. *Renewable Energy*, v. 86, p. 1–7, 2016.
- LIU, Z.-R.; YE, W.-M.; ZHANG, Z.; WANG, Q.; CHEN, Y.-G.; CUI, Y.-J. Particle size ratio and distribution effects on packing behaviour of crushed GMZ bentonite pellets. *Powder Technology*, v. 351, p. 92–101, 2019.
- MADEIRA, J. V.; MACEDO, J. A.; MACEDO, G. A. A new process for simultaneous production of tannase and phytase by *Paecilomyces variotii* in solid-state fermentation of orange pomace. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 35, n. 3, p. 477–482, 2012.
- MAGDZIARZ, A.; WILK, M. Thermogravimetric study of biomass, sewage sludge and coal combustion. *Energy Conversion and Management*, v. 75, n. 2013, p. 425–430, 2013.
- MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, v. 30, n. 7, p. 648–654, 2006.
- MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, v. 27, n. 4, p. 339–352, 2004.
- MARTÍNEZ-GUIDO, S. I.; RÍOS-BADRÁN, I. M.; GUTIÉRREZ-ANTONIO, C.; PONCE-ORTEGA, J. M. Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants. *Renewable Energy*, v. 130, p. 622–632, 2019.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. *Spouted Beds*. 1974.
- MIŠLJENović, N.; ČOLOVIĆ, R.; VUKMIROVIĆ, D.; BRLEK, T.; BRINGAS, C. S. The effects of sugar beet molasses on wheat straw pelleting and pellet quality. A comparative study of pelleting by using a single pellet press and a pilot-scale pellet press. *Fuel Processing Technology*, v. 144, p. 220–229, 2016.
- MORAES, J. C.; CRESTANI, C. E. Caracterização Química do Bagaço de Laranja. *In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA*, p. 257–260, 2018.
- MUJUMDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying*. Third Edited.: Taylor & Francis, 1988.
- MUMME, J.; ECKERVOGT, L.; PIELERT, J.; DIAKITÉ, M.; RUPP, F.; KERN, J. Hydrothermal carbonization of anaerobically digested maize silage. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 19, p. 9255–9260, 2011.
- MUSSATTO, S.; TEIXEIRA, J. Lignocellulose as raw material in fermentation processes.

- applied Microbiology and Microbial Biotechnology, v. 2, p. 897–907, 2010.
- NASCIMENTO, B. S. Análise do efeito da composição química na secagem de pasta em leito de jorro. 2013. 112 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2013.
- OLAZAR, M.; LOPEZ, G.; ALTZIBAR, H.; AMUTIO, M.; BILBAO, J. Drying of Biomass in a Conical Spouted Bed with Different Types of Internal Devices. *Drying Technology*, v. 30, n. 2, p. 207–216, 2012.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; AGUADO, R.; GAISÁN, B.; BILBAO, J. Bed voidage in conical sawdust beds in the transition regime between spouting and jet spouting. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 38, n. 10, p. 4120–4122, 1999.
- OTAKE, S.; IZUTSU, K.; LECHURA-BALLESTEROS, D. *Drying Technologies for Biotechnology and Pharmaceutical Applications*. 1st. ed.: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2020.
- PABLOS, A.; AGUADO, R.; TELLABIDE, M.; ALTZIBAR, H.; FREIRE, F. B.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. A new fountain confinement device for fluidizing fine and ultrafine sands in conical spouted beds. *Powder Technology*, v. 328, p. 38–46, 2018.
- PALLAI-VARSÁNYI, E.; TÓTH, J.; GYENIS, J. Drying of suspensions and solutions on inert particle surface in mechanically spouted bed dryer. *China Particuology*, v. 5, n. 5, p. 337–344, 2007.
- PENG, J. H.; BI, H. T.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Study on density, hardness, and moisture uptake of torrefied wood pellets. *Energy and Fuels*, v. 27, n. 2, p. 967–974, 2013.
- PENG, J. H.; BI, H. T.; SOKHANSANJ, S.; LIM, J. C. A study of particle size effect on biomass torrefaction and densification. *Energy and Fuels*, v. 26, n. 6, p. 3826–3839, 2012.
- PERAZZINI, M. T. B. Análise do efeito das condições operacionais e características geométricas do leito de jorro na secagem de pastas. 2015. 113 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2015.
- PIETSCH, S.; KIECKHEFEN, P.; MÜLLER, M.; SCHÖNHERR, M.; KLEINE JÄGER, F.; HEINRICH, S. Influence of binary and ternary particle systems on the spouting stability in a three-dimensional prismatic spouted bed. *Powder Technology*, v. 357, p. 305–312, 2019.
- PRADHAN, P.; MAHAJANI, S. M.; ARORA, A. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, v. 181, n. October, p. 215–232, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>.
- PRODUÇÃO DE LARANJAS: BRASIL É LÍDER NESSE NEGÓCIO. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/noticias/producao-de-laranjas-brasil-e-lider-nesse-negocio/>. Acesso

em: 2 maio 2022.

PUIG-ARNAVAT, M.; SHANG, L.; SÁROSSY, Z.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. From a single pellet press to a bench scale pellet mill - Pelletizing six different biomass feedstocks. *Fuel Processing Technology*, v. 142, p. 27–33, 2016.

QIN, H.; YANG, K.; SUN, B.; WANG, Q.; XU, C.; QI, Y. Experimental Study on Spouted Bed Hydrodynamics for Oil Shale Semi-Coke. *Energy Procedia*, v. 17, p. 1740–1746, 2012.

RAJPUT, S. P.; JADHAV, S. V.; THORAT, B. N. Methods to improve properties of fuel pellets obtained from different biomass sources: Effect of biomass blends and binders. *Fuel Processing Technology*, v. 199, n. July 2019, 2020.

REYES, A.; DIAZ, G.; MARQUARDT, F. H. Analysis of mechanically agitated fluid-particle contact dryers. *Drying Technology*, v. 19, n. 9, p. 2235–2259, 2001.

REYES, A.; VIDAL, I. Experimental analysis of a mechanically stirred spouted bed dryer. *Drying Technology*, v. 18, n. 1–2, p. 341–359, 2000.

ROOS, Y. H.; KAREL, M.; LABUZA, T. P.; LEVINE, H.; MATHLOUTHI, M.; REID, D.; SHALAEV, E.; SLADE, L. Melting and crystallization of sugars in high-solids systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 61, n. 13, p. 3167–3178, 2013.

ROWELL, R.; PETTERSEN, R.; TSHABALALA, M. *Cell Wall Chemistry*. 2012.

SALDARRIAGA, J. F.; AGUADO, R.; PABLOS, A.; AMUTIO, M.; OLAZAR, M.; BILBAO, J. Fast characterization of biomass fuels by thermogravimetric analysis (TGA). *Fuel*, v. 140, p. 744–751, 2015.

SANTOS, K. G.; FRANCISQUETTI, M. C. C.; MALAGONI, R. A.; BARROZO, M. A. S. Fluid Dynamic Behavior in a Spouted Bed with Binary Mixtures Differing in Size. *Drying Technology*, v. 33, n. 14, p. 1746–1757, 2015.

SCHNEIDER, L.; GÄRTNER, H. The advantage of using a starch based non-Newtonian fluid to prepare micro sections. *Dendrochronologia*, v. 31, n. 3, p. 175–178, 2013.

SERRANO, C.; MONEDERO, E.; LAPUERTA, M.; PORTERO, H. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*, v. 92, n. 3, p. 699–706, 2011.

SHAHRAM, H.; TAGHIAN DINANI, S. Influences of electrohydrodynamic time and voltage on extraction of phenolic compounds from orange pomace. *Lwt*, v. 111, p. 23–30, 2019.

SHAW, M. D.; KARUNAKARAN, C.; TABIL, L. G. Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds. *Biosystems Engineering*, v. 103, n. 2, p. 198–207, 2009.

- SILVA, C. A. M. Análise da dinâmica de secagem de pastas em leito de jorro. 2016. 126 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2016.
- SINGH, R.; KRISHNA, B. B.; MISHRA, G.; KUMAR, J.; BHASKAR, T. Strategies for selection of thermo-chemical processes for the valorisation of biomass. *Renewable Energy*, v. 98, p. 226–237, 2016.
- SOLEIMANI, M.; TABIL, X. L.; GREWAL, R.; TABIL, L. G. Carbohydrates as binders in biomass densification for biochemical and thermochemical processes. *Fuel*, v. 193, p. 134–141, 2017.
- SOUSA, L. M. Estudo sobre o desempenho de válvulas não-mecânicas como alimentadores de biomassa residual de borra de café em reatores de leito pneumático circulante: experimentação e modelagem via CFD-DEM. 2020. 208 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2020.
- SOUSA, R. C. De. Secagem de materiais pastosos e granulares no leito de jorro mecânico e convencional. 2017. - Universidade Federal de São Carlos, 2017.
- SOUSA, R. C.; FERREIRA, M. C.; ALTZIBAR, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Drying of pasty and granular materials in mechanically and conventional spouted beds. *Particuology*, v. 42, p. 176–183, 2019.
- SOUZA, A. S. e. Avaliação por CFD da fluidodinâmica e da transferência de calor em leitos de jorro para diferentes ângulos da base cônica. 2019.
- SPREUTELS, L.; HAUT, B.; CHAOUKI, J.; BERTRAND, F.; LEGROS, R. Conical spouted bed drying of Baker's yeast: Experimentation and multi-modeling. *Food Research International*, v. 62, p. 137–150, 2014.
- STÅHL, M.; BERGHEL, J. Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from a raw material mix including sawdust and rapeseed cake. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 12, p. 4849–4854, 2011.
- STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, v. 90, n. 11, p. 3285–3290, 2011.
- STROEM, L. K.; DESAI, D. K.; HOADLEY, A. F. A. Superheated steam drying of Brewer's spent grain in a rotary drum. *Advanced Powder Technology*, v. 20, n. 3, p. 240–244, 2009.
- SZENTMARJAY, T.; PALLAI, E.; TÓTH, J. Mechanical spouting. *In: SPOUTED AND SPOUT-FLUID BEDS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*. 2011. p. 297–304.
- TELLABIDE, M.; ESTIATI, I.; PABLOS, A.; ALTZIBAR, H.; AGUADO, R.; OLAZAR, M. New operation regimes in fountain confined conical spouted beds. *Chemical Engineering*

Science, v. 211, p. 115255, 2020.

TERNIK, P.; MARN, J.; ŽUNIČ, Z. Non-Newtonian fluid flow through a planar symmetric expansion: Shear-thickening fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 135, n. 2–3, p. 136–148, 2006.

TETRPAK. Fruit processing. *In: THE ORANGE BOOK*. p. 198, 2017

TRNKA, J.; HOLUBČÍK, M.; KANTOVÁ, N. Č.; JANDAČKA, J. Energy Performance of a Rotary Burner Using Pellets Prepared from Various Alternative Biomass Residues. *BioResources*, v. 16, n. 4, p. 6737–6749, 2021.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T. .; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 8, n. 6, p. 683–707, 2011.

UCUNCU, C.; TARI, C.; DEMIR, H.; BUYUKKILECI, A. O.; OZEN, B. Dilute-acid hydrolysis of apple, orange, apricot and peach pomaces as potential candidates for bioethanol production. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, v. 7, n. 3, p. 376–389, 2013.

VAMVUKA, D.; SFAKIOTAKIS, S. Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite. *Thermochimica Acta*, v. 526, n. 1–2, p. 192–199, 2011.

VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J. H. A.; PTASINSKI, K. J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 9, p. 3748–3762, 2011.

VIEIRA, G. N. A. Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos pela secagem de pastas em leito de jorro. 2015. 113 f. - Universidade Federal de São Carlos, 2015.

WANG, Z.; BI, H. T.; LIM, C. J.; SU, P. Determination of Minimum Spouting Velocities in Conical Spouted Beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 82, n. February, p. 11–19, 2004.

WANG, T.; GAO, Q.; DENG, A.; TANG, T.; HE, Y. Numerical and experimental investigations of instability in a spouted bed with non-spherical particles. *Powder Technology*, v. 379, p. 231–240, 2021.

YUE, Y.; WANG, S.; BAHL, P.; DE SILVA, C.; SHEN, Y. Experimental investigation of spout incoherence in a spouted bed. *Chemical Engineering Journal*, v. 418, n. March, p. 129320, 2021.

ZHAI, Y.; WANG, T.; ZHU, Y.; PENG, C.; WANG, B.; LI, X.; LI, C.; ZENG, G. Production of fuel pellets via hydrothermal carbonization of food waste using molasses as a binder. *Waste*

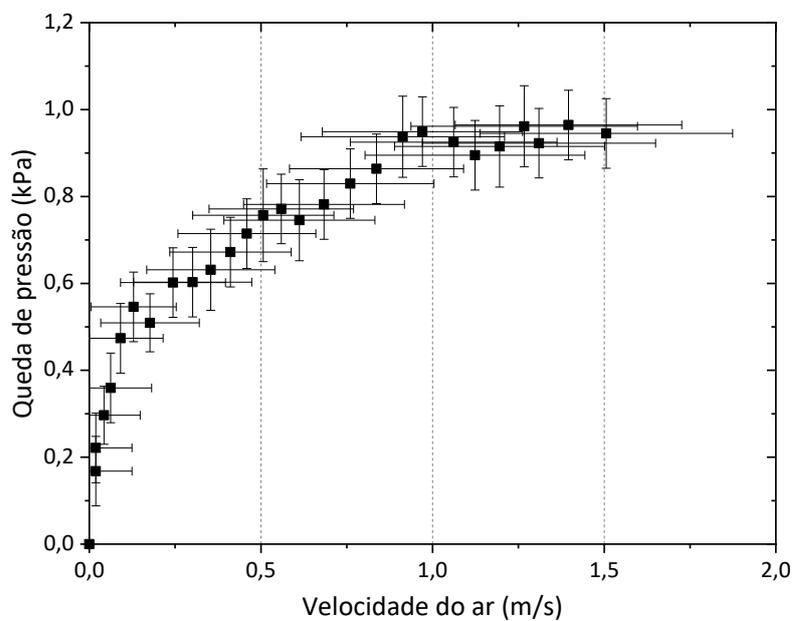
Management, v. 77, p. 185–194, 2018.

ZHANG, Y.; CHEN, F.; CHEN, D.; CEN, K.; ZHANG, J.; CAO, X. Upgrading of biomass pellets by torrefaction and its influence on the hydrophobicity, mechanical property, and fuel quality. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 12, n. 6, p. 2061–2070, 2022.

ZHU, K.; LI, L.; REN, G.; DUAN, X.; CAO, W.; QIU, C. Efficient production of dried whole peanut fruits based on infrared assisted spouted bed drying. *Foods*, v. 10, n. 10, 2021.

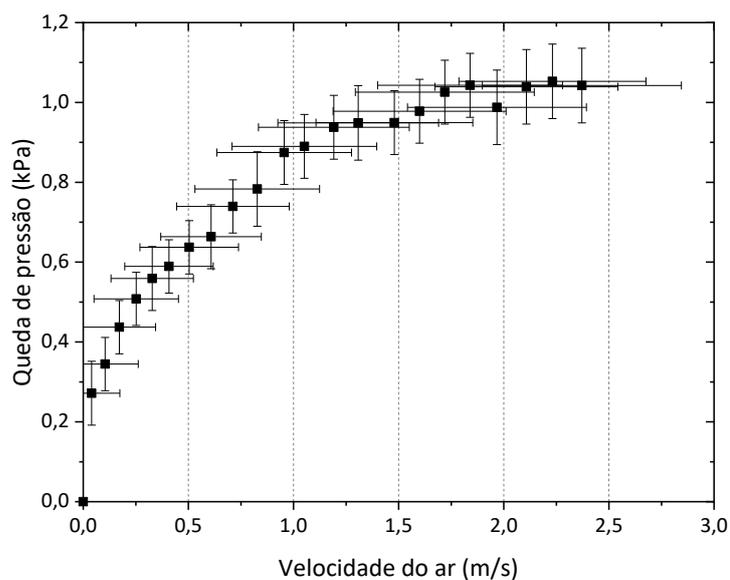
APÊNDICE A – Fluidodinâmica no leito de jorro modificado para diferentes alturas de leito estático

Apêndice A.1 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 16,7 cm.



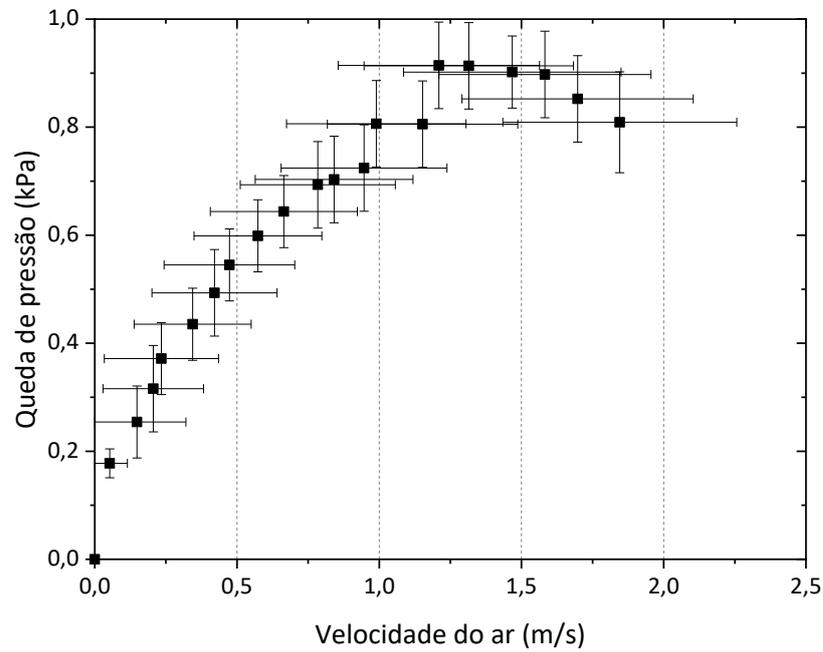
Fonte: elaborado pelo autor.

Apêndice A.2 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 18,3 cm.



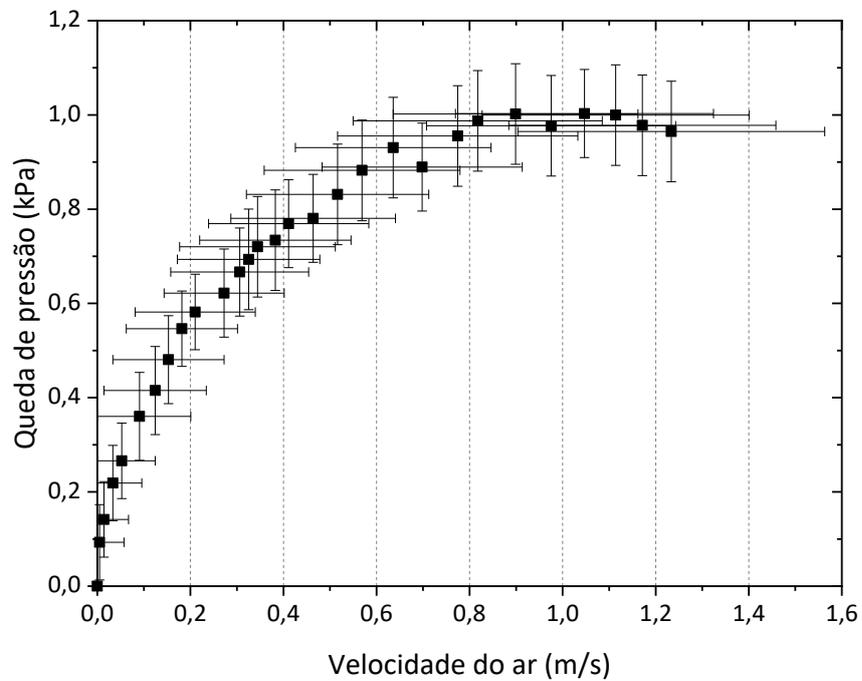
Fonte: elaborado pelo autor.

Apêndice A.3 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 21,1 cm.



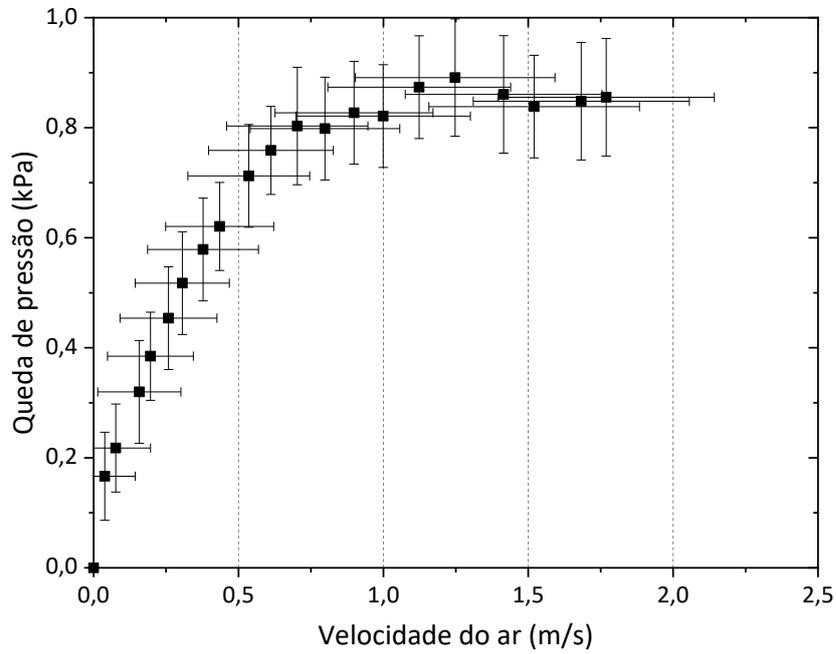
Fonte: elaborado pelo autor.

Apêndice A.4 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 23,9 cm.



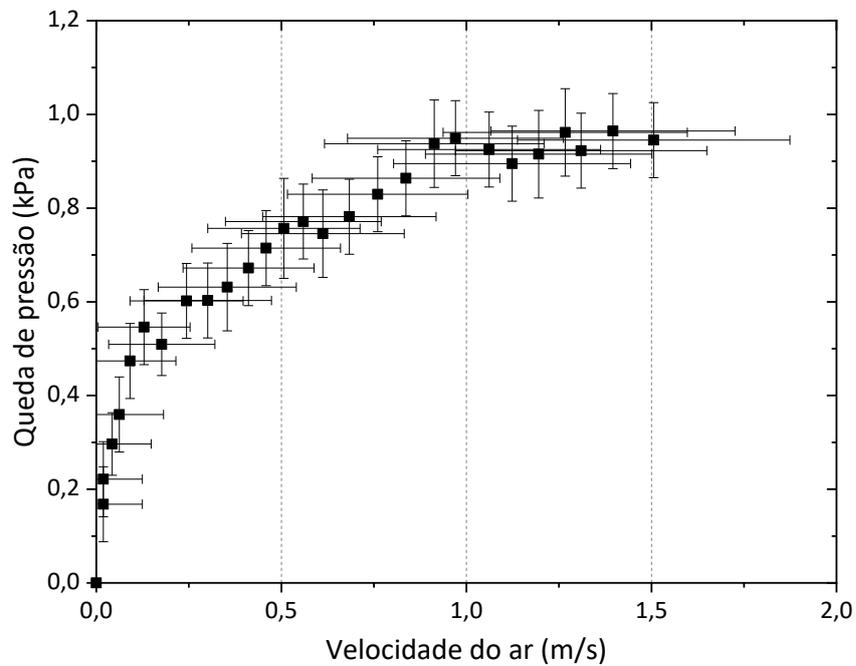
Fonte: elaborado pelo autor.

Apêndice A.5 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 25,4 cm.



Fonte: elaborado pelo autor.

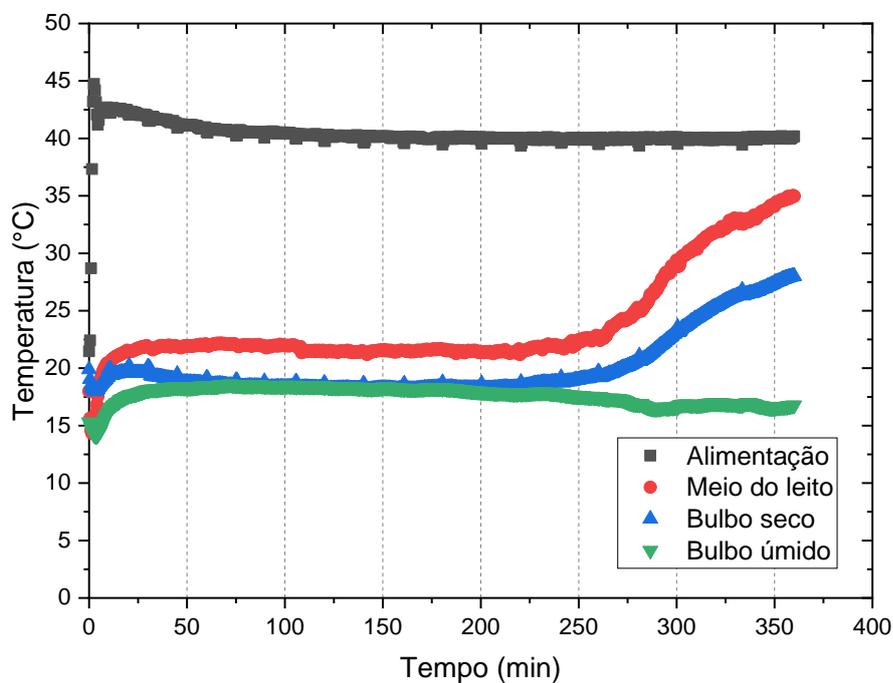
Apêndice A.6 Fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro modificado com altura de leito estático de 27,0 cm.



Fonte: elaborado pelo autor.

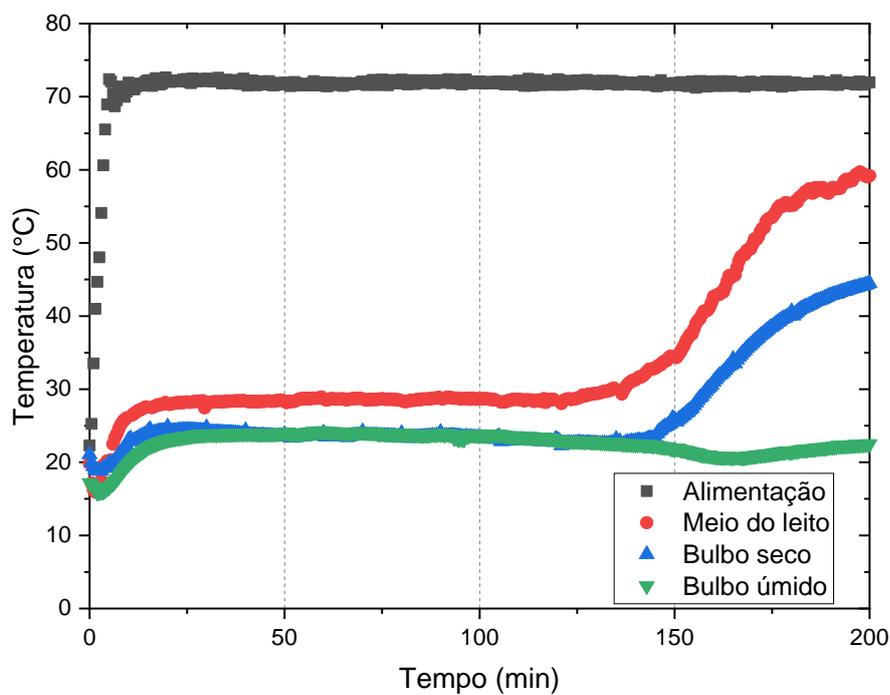
APÊNDICE B – Variação das temperaturas no leito de jorro modificado durante a secagem do bagaço de laranja.

Apêndice B.1. Variação das temperaturas para alimentação com $T = 46\text{ °C}$ e $u = 3,30\text{ m/s}$.



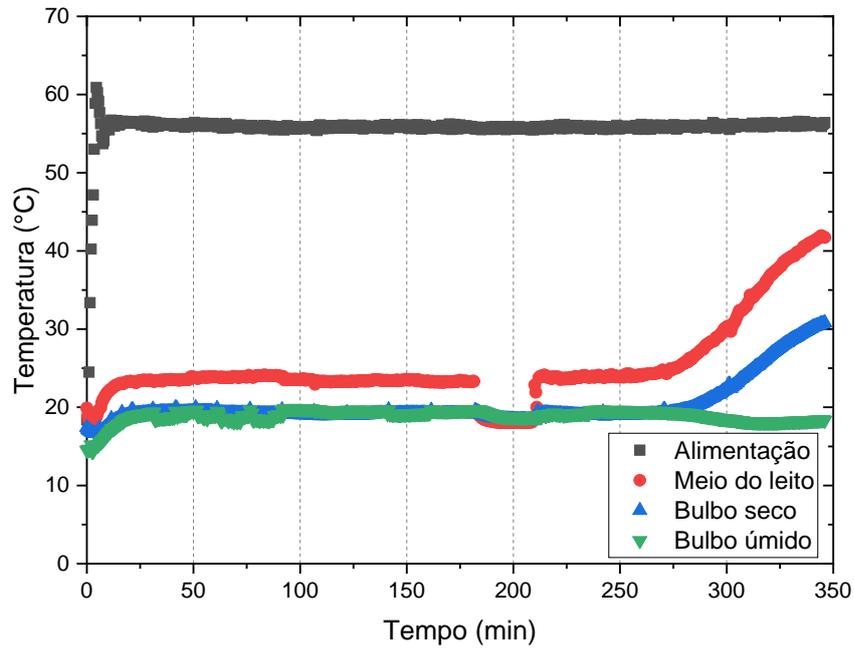
Fonte: elaborado pelo autor.

Apêndice B.2. Variação das temperaturas para alimentação com $T = 74\text{ °C}$ e $u = 3,30\text{ m/s}$.



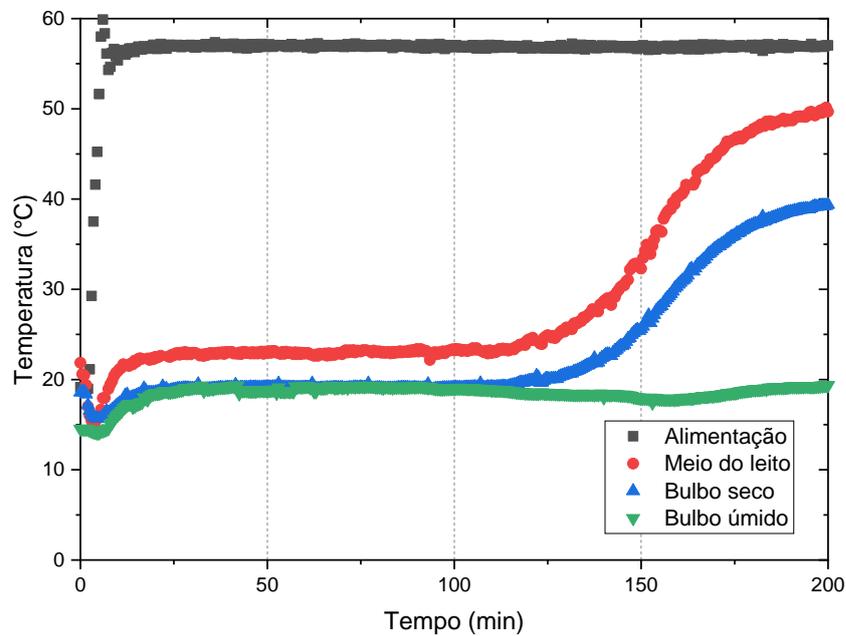
Fonte: elaborado pelo autor.

Apêndice B.3. Variação das temperaturas para alimentação com $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 1,74\text{ m/s}$.



Fonte: elaborado pelo autor.

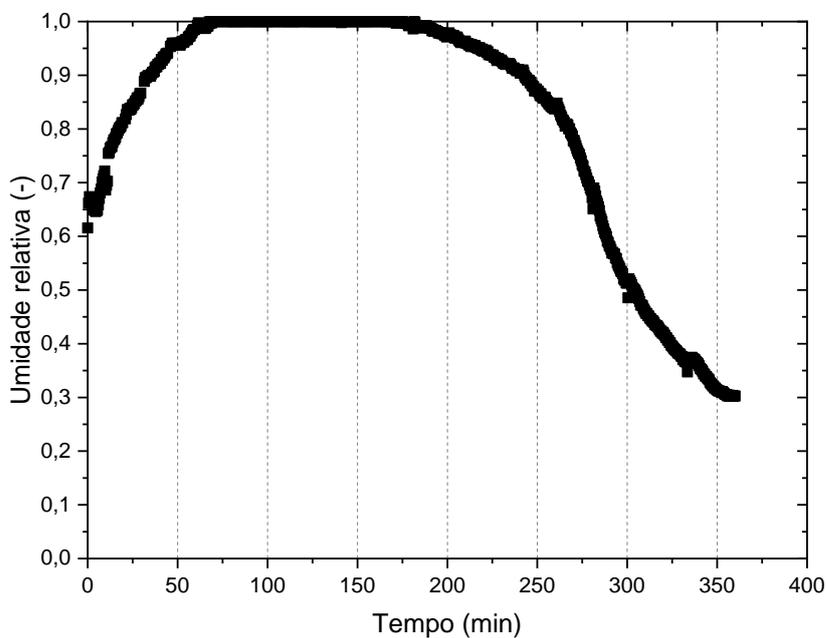
Apêndice B.4. Variação das temperaturas para alimentação com $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 4,86\text{ m/s}$.



Fonte: elaborado pelo autor.

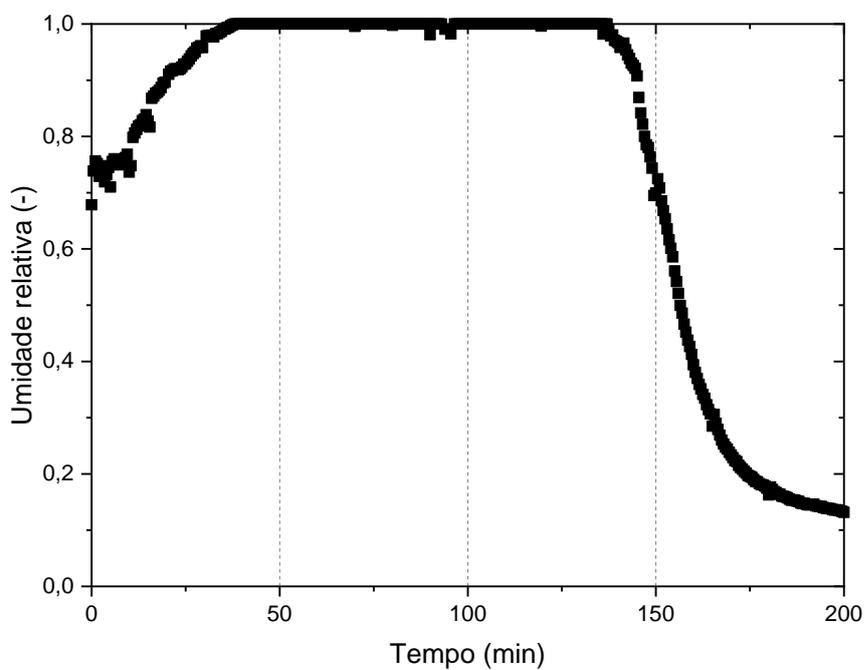
APÊNDICE C – Umidade relativa da corrente de exaustão de ar.

Apêndice C.1. Umidade relativa do ar na saída do secador para alimentação com $T = 46\text{ °C}$ e $u = 3,30\text{ m/s}$.



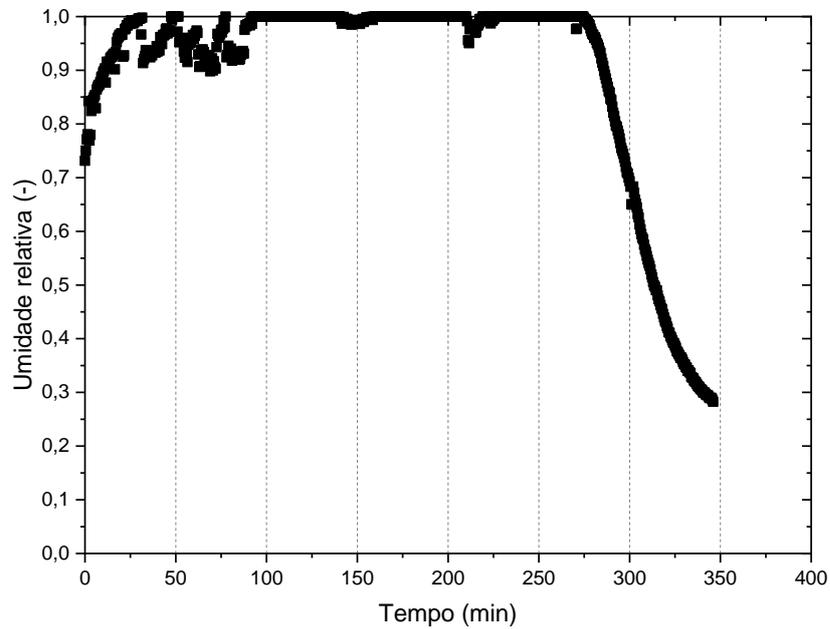
Fonte: elaborado pelo autor.

Apêndice C.2. Umidade relativa do ar na saída do secador para alimentação com $T = 74\text{ °C}$ e $u = 3,30\text{ m/s}$.



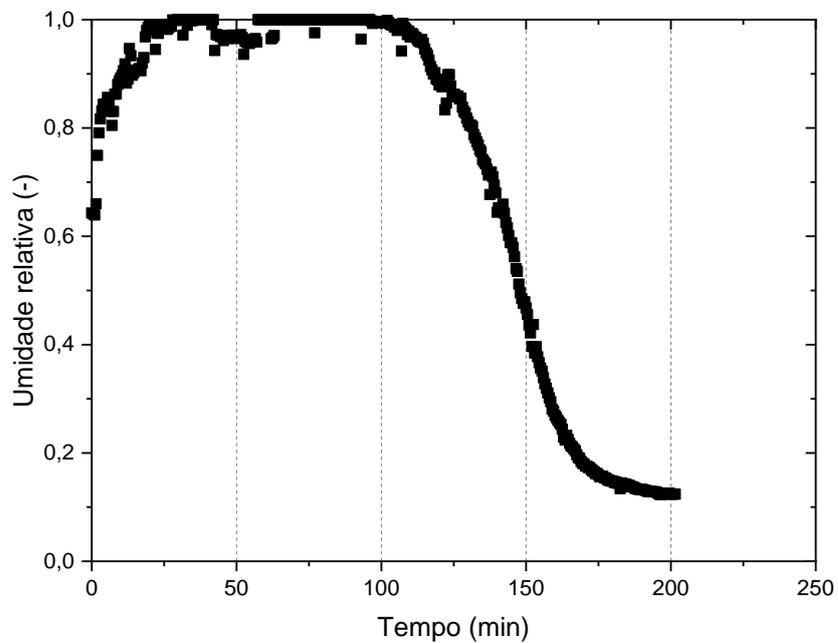
Fonte: elaborado pelo autor.

Apêndice C.3. Umidade relativa do ar na saída do secador para alimentação com $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 1,74\text{ m/s}$.



Fonte: elaborado pelo autor.

Apêndice C.4. Umidade relativa do ar na saída do secador para alimentação com $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $u = 4,86\text{ m/s}$.



Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE D – Análise complementar de ajuste dos efeitos

Tabela D.1. Ajuste dos efeitos individuais lineares e quadrático e combinado da temperatura e da velocidade do ar sobre o tempo de secagem necessário para alcançar um adimensional de umidade de 10%.

	Efeito	Desv. Padrão	T (5)	Valor-p	Limite (-95%)	Limite (+95%)
Médio	195,187	7,81063	24,989	0,000002	175,109	215,264
(1) Temperatura (linear)	-97,364	9,56603	-10,1781	0,000157	-121,955	-72,7740
Temperatura (quadrático)	18,200	11,3858	1,5984	0,170839	-11,069	47,4678
(2) Velocidade do ar (linear)	-117,732	9,566	-12,3073	0,000063	-142,323	-93,1422
Velocidade do ar (quadrático)	17,6	11,3858	1,5457	0,182831	-11,669	46,8678
1linear * 2linear	25,095	13,5284	1,8550	0,122759	-9,681	59,8709

Tabela D.2. Ajuste dos efeitos individuais lineares e quadráticos e combinado da temperatura e da velocidade do ar sobre a durabilidade dos pellets.

	Efeito	Desv. padrão	T (5)	Valor-p	Limite (- 95%)	Limite (+95%)
Médio	0,626667	0,069979	8,95504	0,000289	0,446779	0,806554
(1) Temperatura (linear)	-0,062045	0,085707	-0,72392	0,501557	-0,282361	0,158271
Temperatura (quadrático)	0,069708	0,102011	0,68334	0,524765	-0,192520	0,331937
(2) Velocidade do ar (linear)	0,007838	0,085707	0,09145	0,930689	-0,212478	0,228154
Velocidade do ar (quadrático)	0,081708	0,102011	0,80097	0,459500	-0,180520	0,343937
1linear * 2linear	-0,137500	0,121208	-1,13442	0,308060	-0,449074	0,174074

Tabela D.3. Ajuste dos efeitos individuais lineares e quadráticos e combinado da temperatura e da velocidade do ar sobre a resistência ao impacto dos pellets.

	Efeito	Desv. padrão	T (5)	Valor-p	Limite (-95%)	Limite (+95%)
Médio	-0,186859	0,080045	-2,33443	0,066842	-0,392622	0,018903
(1) Temperatura (linear)	-0,140833	0,095273	-1,47822	0,199403	-0,385739	0,104073
Temperatura (quadrático)	0,046200	0,080045	0,57717	0,588836	-0,159562	0,251962
(2) Velocidade do ar (linear)	0,051667	0,095273	0,54230	0,610895	-0,193239	0,296573
Velocidade do ar (quadrático)	-0,092500	0,113201	-0,81713	0,451017	-0,383492	0,198492
1linear * 2linear	-0,186859	0,080045	-2,33443	0,066842	-0,392622	0,018903

Tabela D.4. Ajuste dos efeitos individuais lineares e quadráticos e combinado da temperatura e da velocidade do ar sobre o índice de resistência ao impacto dos pellets.

	Efeito	Desv. padrão	T (5)	Valor-p	Limite (-95%)	Limite (+95%)
Médio	-4,06988	3,788802	-1,07419	0,331821	-13,8093	5,66954
(1) Temperatura (linear)	-9,55000	4,509577	-2,11772	0,087759	-21,1422	2,04224
Temperatura (quadrático)	0,62409	3,788802	0,16472	0,875617	-9,1153	10,36352
(2) Velocidade do ar (linear)	-2,11500	4,509577	-0,46900	0,658806	-13,7072	9,47724
Velocidade do ar (quadrático)	-9,50500	5,358176	-1,77392	0,136257	-23,2786	4,26863
1linear * 2linear	-4,06988	3,788802	-1,07419	0,331821	-13,8093	5,66954

Tabela D.5. Ajuste dos efeitos individuais lineares e quadráticos e combinado da temperatura e da velocidade do ar sobre a absorção de água dos pellets.

	Efeito	Desv. padrão	T (5)	Valor-p	Limite (- 95%)	Limite (+95%)
Médio	0,700333	0,038451	18,21361	0,000009	0,601492	0,799175
(1) Temperatura (linear)	0,088572	0,047093	1,88079	0,118756	-0,032484	0,209627
Temperatura (quadrático)	-0,150458	0,056052	-2,68428	0,043596	-0,294544	-0,006373
(2) Velocidade do ar (linear)	-0,023175	0,047093	-0,49211	0,643488	-0,144231	0,097881
Velocidade do ar (quadrático)	-0,073458	0,056052	-1,31055	0,246978	-0,217544	0,070627
1linear * 2linear	-0,131500	0,066599	-1,97450	0,105317	-0,302699	0,039699