



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA (PEQ-UFS)

LIDJA DAHIANE MENEZES SANTOS BOREL

APLICAÇÃO DE UM SECADOR DE LEITO FLUIDIZADO ASSISTIDO POR
AQUECIMENTO INFRAVERMELHO PARA O BENEFICIAMENTO DE PÓLEN
APÍCOLA

São Cristóvão (SE)

2014

LIDJA DAHIANE MENEZES SANTOS BOREL

**APLICAÇÃO DE UM SECADOR DE LEITO FLUIDIZADO ASSISTIDO POR
AQUECIMENTO INFRAVERMELHO PARA O BENEFICIAMENTO DE PÓLEN
APÍCOLA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Química como
requisito parcial à obtenção do título de Mestre
em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado

São Cristóvão (SE)

2014

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

B731a Borel, Lidja Dahiane Menezes Santos
Aplicação de um secador de leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho para o beneficiamento de pólen apícola / Lidja Dahiane Menezes Santos Borel ; orientador Manoel Marcelo do Prado. – São Cristóvão, 2014.
149 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Química)– Universidade Federal de Sergipe, 2014.

1. Fluidização. 2. Radiação infravermelha. 3. Pólen - Secagem. 4. Calor – Transferência. 5. Massa – Transferência. I. Prado, Manoel Marcelo do, orient. II. Título.

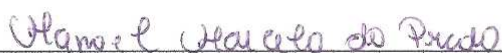
CDU 66.047:638.138

LIDJA DAHIANE MENEZES SANTOS BOREL

APLICAÇÃO DE UM SECADOR DE LEITO FLUIDIZADO ASSISTIDO POR
AQUECIMENTO INFRAVERMELHO PARA O BENEFICIAMENTO DE PÓLEN
APÍCOLA

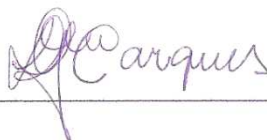
Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
da Universidade Federal de Sergipe em 11 de julho de 2014

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado

Orientador (PEQ/UFS)



Prof^a Dr^a Luanda Gimeno Marques

(PEQ/UFS)



Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo

(PPGEQ/UFU)

AGRADECIMENTOS

A Deus sempre, por Sua graça infinita que me concedeu todos os recursos necessários à conclusão de mais esta etapa. “Porque Dele e por Ele, e para Ele, são todas as coisas; glória, pois, a Ele eternamente (Romanos 11.36)”.

Ao Prof. Manoel, meu orientador, pelos ensinamentos, motivação, dedicação, amizade e confiança.

A todos os professores do PEQ/UFS, especialmente à professora Luanda, pela disposição para ajudar sempre e pela co-orientação. Por todas as sugestões que enriqueceram este trabalho.

Aos professores Antonio Martins, Jailton Marques e Marcos Barrozo pela disponibilidade, pelas correções e contribuições que agregaram ao trabalho.

Ao Sr. Aguinaldo Araújo pelo fornecimento de grande parte do pólen utilizado neste estudo.

Ao professor Narendra Narain, coordenador do Laboratório de Análises Cromatográficas e FLAVOR (LAF/UFS) pela colaboração com as análises de carotenóides totais e betacaroteno e a Aline Silveira e Gabriela Barbosa pela prestatividade.

Ao meu pai, Ivan, pelo exemplo de ser humano e de amor à ciência e pelo constante incentivo. Sua presteza e engenhosidade foram essenciais para me socorrer sempre. À minha mãe, Aglaé, pelo amor maior do mundo, pela compreensão e por suas constantes orações.

Ao meu amor e marido, André. Obrigada pelo companheirismo e pela compreensão. Sem dúvida, sem seu apoio traduzido em abraço, eu não teria conseguido. Obrigada pela visita ao apiário, pelos finais de semana em laboratório... enfim, obrigada por lutar comigo pela realização deste sonho.

A Telma e às minhas irmãs, Ellen e Elisa, pelo carinho e apoio. Aos meus sogros, Aداuton e Mary e também os meus cunhados, Tiago e Sandra, pelo incentivo.

Aos companheiros de laboratório Rodolfo, Thaís, Cybele e Marcelo pelo convívio, amizade e apoio. A Milena, pela amizade, dedicação e pela valiosa ajuda na realização dos experimentos. A Douglas, pela prestatividade e pelos momentos de descontração tão importantes nos dias difíceis.

Aos colegas de mestrado, especialmente a Patrícia Oliveira e Viviane Lima pelo tempo em que dividimos a jornada. Nossas conversas tornaram a escalada mais suave.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho,
muito obrigada!

RESUMO

Diante da crescente demanda por produtos naturais, o pólen apícola vem recebendo atenção especial em razão da alta disponibilidade de compostos bioativos em sua composição química, que o tornam um produto com alto valor agregado. Grãos de pólen apresentam alto teor de umidade, requerendo a aplicação de um processo de secagem que, usualmente, é feita de forma natural ou em estufas, técnicas com baixa capacidade de processamento e dificuldades para atingir padrões de qualidade aceitáveis. Dentro deste contexto, este trabalho teve como objetivo estudar a aplicação de um secador de leito fluidizado assistido por uma fonte alternativa de energia, a radiação infravermelho, para o beneficiamento do pólen apícola. Para tanto, estudos específicos envolvendo diferentes estratégias de secagem foram realizados, através de uma abordagem experimental dos aspectos relacionados à transferência de quantidade de movimento, calor e massa, eficiência energética do equipamento e qualidade do produto. Foram recebidos grãos de pólen apícola *in natura*, originários de coqueiro (*Cocos nucifera* L.), com umidade inicial variando de 0,21 a 0,30 b.u, e cuja caracterização física foi feita via peneiramento, análise de imagens e permeametria. O comportamento fluidodinâmico dos grãos foi analisado com diferentes cargas do leito (100 a 1800 g), com partículas de diferentes diâmetros e em diferentes teores de umidade (7, 13 e 21% b.u.). A secagem em leito fluidizado convencional foi conduzida com carga inicial de 500 g nas condições de mínima fluidização com temperaturas do ar de secagem a 35, 45 e 55°C. A fim de avaliar a faixa de intensidade e o efeito isolado da radiação infravermelho (IV) a ser aplicada durante a secagem híbrida, estudou-se o comportamento cinético da secagem IV dos grãos de pólen em monocamada sob intensidades de radiação (IR) de 100, 400 e 700 W/m². A secagem híbrida, combinando a fluidização das partículas e o aquecimento IV, foi então conduzida com IR de 100, 400 e 700 W/m², sem aquecimento ($T_{ar}= 25^{\circ}\text{C}$) e com aquecimento do ar ($T_{ar}= 45^{\circ}\text{C}$). Durante o processo, foram monitorados o consumo de energia e as coordenadas cromáticas (L^* , a^* e b^*) do material. A secagem dos grãos de pólen, em todas as técnicas empregadas, foi governada pela difusão interna de umidade. A solução transiente da segunda lei de Fick contendo dez termos da série foi empregada para descrever a cinética de secagem do material no período de taxa decrescente. A difusividade efetiva de umidade (D_{eff}) ao se aplicar intensidades de radiação de 100, 400 e 700 W/m² ao leito de partículas percolado por ar não aquecido ficaram na faixa de 3,1 a 3,98 x 10⁻¹¹ m²/s. A comparação entre os resultados da secagem híbrida e a secagem convencional, em situações nas quais o material atingiu a mesma temperatura, mostrou um aumento em D_{eff} em torno de 30%, denotando a intensificação na taxa de transferência de massa ao se aplicar a radiação IV na secagem em leito fluidizado, o que conduziu à redução do consumo energético em 51%. A análise dos parâmetros colorimétricos do material indicou a ocorrência de reações de escurecimento ao se aplicar de forma isolada a radiação IV para a secagem do pólen em camada fina. Por outro lado, a sinergia entre o aquecimento IV e o efeito de arrefecimento das partículas associado à vazão do ar de fluidização durante a secagem combinada contribuiu para a manutenção dos atributos de cor, bem como para a preservação do teor de carotenóides totais e betacaroteno no pólen apícola desidratado.

PALAVRAS-CHAVE: fluidização, aquecimento infravermelho, secagem híbrida, fluidodinâmica, transferência de calor e massa, qualidade do produto.

ABSTRACT

In view of the increasing demand for natural products, bee pollen has received special attention due to the high availability of bioactive compounds in their chemical composition, which make it a product with high added value. Pollen grains have high moisture content, thus requiring to be submitted to a drying process, which is usually made naturally or in ovens with low processing capacity and difficulties to achieve quality standards. Within this context, the objective of this work was to study the application of a fluidized bed dryer assisted by an alternative energy source, such as the infrared radiation, for the processing of bee pollen. For this purpose, specific studies on different strategies drying were performed, through an experimental approach of aspects related to momentum, heat and mass transfer, energy consumption of the equipment and product quality. Grains of pollen *in nature*, from coconut (*Cocos nucifera* L.), with initial moisture ranging from 0.21 to 0.30 wb, and whose physical characterization was made via sieving, image analysis and permeametry, were used. The fluid dynamics behavior of beds filled with pollen grains was analysed at different loads (100 to 1800 g), different particle diameters and different moisture contents (7, 13 and 21% wb). The conventional fluidized bed drying was conducted with an initial load of 500 g under conditions of minimum fluidization and drying air temperatures of 35, 45 and 55°C. In order to evaluate the band intensity and the isolated effect of the infrared radiation (IR) to be applied during the hybrid drying, the IR drying kinetics of pollen was studied exposing a monolayer of particles to radiation intensities (IR) of 100, 400 and 700 W/m². The hybrid drying, combining the fluidization of particles and the IR heating, was performed with IR 100, 400 and 700 W/m² without heating ($T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$) and heating the air ($T_{air} = 45^{\circ}\text{C}$). During the process, energy consumption and the chromatic coordinates (L^* , a^* , b^*) of the material were monitored. The drying of pollen grains, in all techniques investigated, was governed by the internal mass diffusion. The ten-terms solution of the second Fick's law of diffusion was used to describe the drying kinetics of the material in the period of decreasing rate. The effective diffusivities obtained by applying radiation intensities of 100, 400 and 700 W/m² to the bed of particles percolated by unheated air were in the range 3.1 to 3.98×10^{-11} m²/s. By comparing the results obtained for conventional and hybrid drying under conditions in which the material has reached the same temperature it was found an increase in D_{eff} of about 30%, indicating an enhancement in the rate of mass transfer due to the application of IR heating in fluidized bed drying, what led to the reduction of energy consumption by 51%. The analysis of the colorimetric parameters in dehydrated pollen indicated the occurrence of browning reactions when IR radiation is applied alone for drying the material in a thin layer. However, the synergy between the IR heating and the cooling effect associated to the fluidizing air flow during the combined drying has contributed to maintain the color attributes as well as to preserve total carotenoids and betacarotene in the dehydrated bee-pollen.

KEYWORDS: fluidization, infrared heating, hybrid drying, hydrodynamics, heat and mass transfer, product quality.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição físico-química do pólen desidratado.....	26
Tabela 2.2: Parâmetros de Qualidade do Pólen Apícola segundo a Legislação Brasileira (Instrução Normativa Nº 3, de 19 de Janeiro de 2001).....	49
Tabela 3.1: Correlações empregadas para a predição da velocidade mínima de fluidização para os grãos de pólen apícola.....	70
Tabela 3.2: Temperatura média da fonte de aquecimento infravermelho nas diferentes potências de radiação empregadas.....	73
Tabela 4.1: Resultados da análise de distribuição granulométrica via peneiramento dos grãos de pólen apícola.	80
Tabela 4.2: Dimensões e fatores de forma determinados para os grãos de pólen.	82
Tabela 4.3: Valores de propriedades físicas e estruturais obtidos por permeamtria do leito formado por partículas com $d_p = 2,03 \text{ mm}$ em diferentes teores de umidade dos grãos de pólen.	83
Tabela 4.4: Parâmetros fluidodinâmicos para o leito com carga inicial de 500 g formado por partículas de diferentes tamanhos com teor de umidade entre $15 \pm 5 \%$ b.u.....	88
Tabela 4.5: Valores experimentais e preditos de velocidade mínima de fluidização para os grãos de pólen apícola.	89
Tabela 4.6: Parâmetros fluidodinâmicos para uma carga inicial de 500g de partículas com $d_p = 2,03 \text{ mm}$ em diferentes teores de umidade.....	91
Tabela 4.7: Parâmetros fluidodinâmicos determinados experimentalmente em diferentes cargas do leito e razões L/D	93
Tabela 4.8: Valores estimados de D_{eff} para os grãos de pólen expostos à radiação IV na secagem em camda fina.	100
Tabela 4.9: Dados de equilíbrio dos grãos de pólen apícola.	102
Tabela 4.10: Valores estimados de D_{eff} para a secagem de grãos de pólen em leito fluidizado.	105
Tabela 4.11: Valores estimados de D_{eff} para a secagem híbrida de grãos de pólen.	108
Tabela 4.12: Consumo total de energia por unidade de massa de água removida durante a secagem infravermelho de pólen apícola em camada fina.	113
Tabela 4.13: Consumo total de energia por unidade de massa de água removida durante a secagem de pólen apícola em leito fluidizado convencional.....	113
Tabela 4.14: Consumo total de energia por unidade de massa de água removida durante a secagem de pólen apícola em leito fluidizado assistida por aquecimento infravermelho.	114
Tabela 4.15: Parâmetros colorimétricos do pólen apícola <i>in natura</i> e desidratado com 8% de umidade b.u.	119
Tabela 4.16: Resultados da análise de regressão não-linear da cinética de escurecimento do pólen apícola aplicando modelos de ordem zero e de primeira ordem	122

Tabela 4.17: Atividade de água em amostras de pólen apícola <i>in natura</i> e com 8% b.u. de umidade após o processo de secagem em leito fluidizado assistido por radiação infravermelho	126
Tabela 4.18: Teor de carotenóides totais e betacaroteno do pólen apícola <i>in natura</i> e com 8% b.u. de umidade após o processo de secagem em leito fluidizado com $T_{ar} = 25^{\circ}\text{C}$ assistido por radiação infravermelho	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Municípios sergipanos produtores de pólen.....	23
Figura 2.2: Diagrama ilustrativo das diferentes aberturas no grão de pólen.	27
Figura 2.3: Curva característica da taxa de secagem de um material, em função do tempo, sob condições constantes de secagem. Fonte: Law e Mujumdar (2006)	35
Figura 2.4: Regimes de fluidização em função da velocidade superficial do gás.	37
Figura 2.5: Classificação das partículas segundo Geldart	44
Figura 3.1: Amostra de pólen apícola obtida em apiário situado no Platô de Neópolis - SE...	62
Figura 3.2: Esquema do aparato experimental	63
Figura 3.3: Aparato para aquisição de imagens das partículas.....	66
Figura 3.4: Plano de estabilidade máxima do grão.....	66
Figura 3.5: Determinação da velocidade mínima de fluidização a partir dos valores de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para a carga inicial de 500 g de partículas com $d_p = 2,03$ mm.	69
Figura 3.6: Aparato experimental utilizado durante a secagem infravermelho em camada fina.	72
Figura 4.1: Distribuição de frequência obtida a partir da análise granulométrica via peneiramento da amostra de pólen apícola.....	81
Figura 4.2: Distribuição cumulativa dos grãos de pólen apícola.....	81
Figura 4.3: Classificação dos grãos de pólen apícola com $d_p = 2,03$ mm segundo Geldart (1973).	84
Figura 4.4: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para a carga inicial de 700 g de partículas com $d_p = 2,03$ mm.	85
Figura 4.5: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para a carga inicial de 1000 g de partículas com $d_p = 2,03$ mm e teor de umidade de $10,5 \pm 3,5$ % b.u..	86
Figura 4.6: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, para diferentes tamanhos de partícula com carga inicial de 500 g para um teor de umidade de $10,5 \pm 3,5$ % b.u.....	87
Figura 4.7: Valores experimentais e preditos da velocidade mínima de fluidização para os diferentes tamanhos de grãos de pólen.	90
Figura 4.8: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para diferentes teores de umidade iniciais do pólen com $d_p = 2,03$ mm e carga inicial de 500g.	91
Figura 4.9: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, para diferentes cargas iniciais de partículas com $d_p = 2,03$ mm com teor de umidade de $10,5 \pm 3,5$ % b.u..	92
Figura 4.10: Velocidade mínima de fluidização para diferentes cargas iniciais do leito particulado de partículas com $d_p = 2,03$ mm com teor de umidade de $10,5 \pm 3,5$ % b.u..	94
Figura 4.11: Formação de slugs durante a fluidização de grãos de pólen apícola com profundidade do leito $L/D = 2,5$ formado por partículas com $d_p = 2,03$ mm	95

Figura 4.12: Porosidade do leito em função da velocidade superficial do ar para diferentes cargas do leito de partículas com $d_p = 2,03$ mm e teor de umidade de $10,5 \pm 3,5$ % b.u.	95
Figura 4.13: Temperatura do sólido e taxa de secagem em função do tempo, para $IR = 100$ W/m^2	97
Figura 4.14: Adimensional de umidade em função do tempo de secagem infravermelho parametrizado nas diferentes potências de radiação empregadas.....	98
Figura 4.15: Temperatura da superfície dos grãos de pólen em função do tempo de secagem infravermelho, nas diferentes intensidades de radiação empregadas.	99
Figura 4.16: Taxa de remoção de umidade em função do tempo, para grãos de pólen submetidos à diferentes intensidades de radiação infravermelho.....	99
Figura 4.17: Temperatura da mistura gás-sólido em função do tempo, parametrizada em duas alturas do leito fluidizado durante a secagem com $T_{ar} = 35^\circ C$	101
Figura 4.18: Temperatura da superfície dos grãos ao longo do processo de secagem em leito fluidizado convencional, parametrizada nas diferentes condições de temperatura do ar de secagem.	101
Figura 4.19: Adimensional de umidade em função do tempo, parametrizado nas diferentes temperaturas do ar empregadas na secagem em leito fluidizado convencional de pólen apícola.....	103
Figura 4.20: Taxa de secagem em função do teor de umidade parametrizado nas diferentes temperaturas do ar empregadas na secagem em leito fluidizado convencional de pólen apícola.	104
Figura 4.21: Temperatura da superfície dos grãos de pólen em função do tempo, na secagem em leito fluidizado, combinando o aquecimento IV em diferentes intensidades de radiação e o escoamento de ar não aquecido ($T_{ar} = 25^\circ C$)	106
Figura 4.22: Adimensional de umidade em função do tempo, para a secagem em leito fluidizado, com ar a $25^\circ C$ assistido por aquecimento infravermelho em diferentes intensidades de radiação.....	106
Figura 4.23: Taxa de secagem em função do adimensional de umidade parametrizada nas diferentes intensidades de radiação empregadas na secagem híbrida de pólen apícola, $T_{ar} = 25^\circ C$	107
Figura 4.24: Temperatura da superfície dos grãos em função do tempo, na secagem em leito fluidizado, em duas condições de temperatura do ar de secagem, 25 e $45^\circ C$, assistido por aquecimento IV em duas diferentes potências de radiação empregadas, 100 e 700 W/m^2	109
Figura 4.25: Adimensional de umidade em função do tempo, na secagem em leito fluidizado, em duas condições de temperatura do ar de secagem, 25 e $45^\circ C$, assistido por aquecimento infravermelho com $IR = 700$ W/m^2	110
Figura 4.26: Temperatura da superfície dos grãos em função do tempo para a secagem em leito fluidizado convencional com $T_{ar} = 45^\circ C$ e em leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho com $IR = 700$ W/m^2 e $T_{ar} = 45^\circ C$	111
Figura 4.27: Adimensional de umidade em função do tempo para a secagem em leito fluidizado convencional com $T_{ar} = 45^\circ C$ e em leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho com $IR = 700$ W/m^2 e $T_{ar} = 45^\circ C$	111

Figura 4.28: Temperatura da superfície dos grãos em função do tempo para a secagem utilizando radiação IV de forma isolada ($IR = 700 \text{ W/m}^2$) e combinada com escoamento forçado de ar através do leito fluidizado, $T_{ar} = 25^\circ\text{C}$ e $T_{ar} = 45^\circ\text{C}$	112
Figura 4.29: Distribuição mássica do pólen apícola após a secagem (a) em leito fluidizado nas diferentes condições de temperatura do ar de secagem (b) em leito fluidizado assistido por radiação infravermelho nas diferentes potências de radiação empregadas.	116
Figura 4.30: Distribuição mássica do pólen apícola após a secagem (a) em leito fluidizado, com e sem radiação IV (b) em leito fluidizado assistido por radiação infravermelho, com e sem aquecimento.	118
Figura 4.31: Índice de escurecimento dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem via radiação infravermelho em camada fina, parametrizado nas diferentes potências da fonte de aquecimento empregadas.	121
Figura 4.32: Índice de escurecimento dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem em leito fluidizado, parametrizado nas diferentes condições de temperatura do ar de secagem.	122
Figura 4.33: Índice de escurecimento dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem em leito fluidizado, com $T_{ar} = 25^\circ\text{C}$, assistido por aquecimento infravermelho parametrizado nas diferentes potências de radiação empregadas.	123
Figura 4.34 Ângulo <i>hue</i> dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem através de diferentes técnicas.	123
Figura 4.35: Índice de saturação dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem infravermelho em camada fina, parametrizado nas diferentes intensidades de radiação empregadas.	124
Figura 4.36: Índice de saturação dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem em leito fluidizado convencional, parametrizado nas diferentes temperaturas do ar de secagem.	125
Figura 4.37: Índice de saturação dos grãos de pólen apícola durante secagem em leito fluidizado, com $T_{ar} = 25^\circ\text{C}$ e assistido por aquecimento IV, em diferentes fluxos de radiação empregados.	125

NOMENCLATURA

A	Área da seção transversal do secador cilíndrico	$[L^2]$
a_w	Atividade de água	$[-]$
a^*	Coordenada do sistema Hunter que indica a faixa de cor do verde ao vermelho e	$[-]$
b^*	Coordenada do sistema Hunter que indica a cor do material do azul ao amarelo	$[-]$
C^*	Coordenada croma	$[-]$
c_p	Calor específico	$[L^{-2}T^2\theta^{-1}]$
D	Diâmetro da coluna do secador	$[L]$
D_{eff}	Difusividade efetiva	$[L^2T^{-1}]$
d_1	Diâmetro linear máximo da partícula projetada	$[L]$
d_{n-1}	Abertura de malha da peneira n-1	$[L]$
d_n	Abertura de malha da peneira n	$[L]$
d_p	Diâmetro de médio de peneira	$[L]$
d_{proj}	Diâmetro do círculo de mesma área da partícula projetada	$[L]$
d_{sv}	Diâmetro da esfera de mesma relação volume/ área superficial da partícula	$[L]$
d_v	Diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula	$[L]$
e	Fator de forma que mensura o alongamento da partícula	$[-]$
f	Fator de forma que mensura o achatamento da partícula	$[-]$
g	Aceleração gravitacional	$[LT^{-2}]$
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$[MT^{-3}\theta^{-1}]$
ha	Coeficiente volumétrico de transferência de calor	$[ML^{-1}T^{-3}\theta^{-1}]$
HR	Razão Hausner	$[-]$
IE	Índice de escurecimento	$[-]$
IF	$= \frac{-\Delta P}{\left(\frac{gm_b}{A}\right)}$, índice da efetividade da fluidização	$[-]$
k	Condutividade térmica	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
L	Altura do leito	$[L]$
L_w	Calor latente de vaporização da água no produto	$[L^2T^{-2}]$
L^*	Coordenada do sistema Hunter que indica a luminosidade do material	$[-]$
m	Massa	$[M]$
m_i	Fração mássica de partículas retidas na peneira	$[-]$
M	Distribuição acumulada de partículas retidas na peneira	$[-]$
q	Velocidade superficial do fluido	$[LT^{-1}]$
$-\Delta P$	Queda de pressão	$[MT^{-2}L^{-1}]$
P_{proj}	Perímetro da partícula projetada	$[L]$
t	Tempo	$[T]$
T	Temperatura	$[\theta]$
UR	Umidade Relativa do ar	$[-]$
v	Velocidade intersticial do fluido	$[LT^{-1}]$
V	Volume	$[L^3]$
w_g	Fluxo mássico de ar seco	$[ML^{-2}T^{-1}]$

X	Umidade do sólido, massa de água por massa de sólido seco	
XR	$= \frac{X - X_e}{X_o - X_e}$, Umidade adimensional	[-]
Y_g	Umidade absoluta do ar, massa de vapor d'água por massa de ar seco	

NÚMEROS ADIMENSIONAIS

Ar	$Ar = \frac{(\phi d_p)^3 (\rho_s - \rho_f) g}{\mu^2}$, número de Arquimedes	[-]
Fr	$= \frac{v_{mf}^2}{g d_p}$, número de Froude	[-]
Nu	$= \frac{h d_v}{k_f}$, número de Nusselt	[-]
Pr	$= \frac{\mu_f c_{pf}}{k_f}$, número de Prandtl	[-]
Re	$= \frac{\rho_f v_f D}{\mu_f}$, número de Reynolds	[-]
Re_s	$= \frac{\rho_f v_f (\phi d_p)}{\mu}$, número de Reynolds da partícula	[-]

SÍMBOLOS GREGOS

ρ	Massa específica	[ML ⁻³]
ε	Porosidade	[-]
ζ	Emissividade	[-]
ϕ	Esfericidade	[-]
μ	Viscosidade	[ML ⁻¹ T ⁻¹]
κ	Permeabilidade do leito	[L ²]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[MT ⁻³ θ ⁻⁴]
$\mathcal{C}$	$= \frac{\pi d_{proj}}{P_{proj}}$, Circularidade da partícula projetada	[-]

SUBSCRITO

o	Condição inicial ou que indica a entrada do secador
p	Aparente da partícula
b	“bulk” ou do leito poroso
eq	Equilíbrio
g	Fase gasosa
f	Fluido
m	Monocamada molecular

<i>mf</i>	Mínima fluidização
<i>w</i>	Água no estado líquido
<i>s</i>	Partícula
<i>ss</i>	Sólido seco
<i>v</i>	Água na forma de vapor

ABREVIACÕES

b.s.	base seca
b.u.	base úmida
IV	infravermelho

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	16
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivo Geral	19
1.1.1. Objetivos Específicos	19
CAPÍTULO 2	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. O Pólen Apícola	21
2.1.1. Aspectos Gerais	21
2.1.2. Importância Econômica	23
2.1.3. Propriedades Físicas e Composição Química do Pólen	24
2.1.4. O Processo de Beneficiamento do Pólen	28
2.2. Processo de Secagem	29
2.2.1. Aspectos Tecnológicos	29
2.2.2. Secagem em Leito Fluidizado	31
2.2.3. Secagem via Radiação Infravermelho	33
2.2.4. Aspectos Fundamentais	34
2.2.5. Aspectos Fluidodinâmicos da Secagem em Leito Fluidizado	36
2.3. Transferência de Calor e de Massa em Leitos Fluidizados	45
2.4. Atributos de Qualidade do Produto	48
2.5. Caracterização Física do Material Sólido	54
2.5.1. Dimensões Características e Fatores de forma	54
2.5.2. Massa Específica	57
2.5.3. Porosidade	58
2.5.4. Permeabilidade	59
CAPÍTULO 3	62
3. MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1. Materiais	62
3.2. Aparato experimental	63
3.3. Metodologia Experimental	65

3.3.1.	Caracterização Física do Material	65
3.3.2.	Estudo da fluidodinâmica do leito	68
3.3.3.	Experimentos de Secagem.....	72
3.3.4.	Avaliação do consumo energético.....	75
3.3.5.	Avaliação dos Atributos de Qualidade dos Grãos de Pólen	76
CAPÍTULO 4.....	80	
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1.	Caracterização Física	80
4.2.	Comportamento Fluidodinâmico do Leito.....	84
4.3.	Secagem de Pólen Apícola	96
4.3.1.	Secagem via radiação infravermelho.....	96
4.3.2.	Secagem em Leito Fluidizado Convencional	100
4.3.3.	Secagem em Leito Fluidizado Assistido por Radiação Infravermelho	105
4.3.4.	Análise comparativa das técnicas de secagem empregadas	110
4.4.	Avaliação do Consumo Energético.....	112
4.5.	Atributos de Qualidade do Produto	115
CAPÍTULO 5.....	129	
CONCLUSÕES	129	
CAPÍTULO 6.....	134	
SUGESTÕES	134	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135	
APÊNDICE A	147	
APÊNDICE B.....	149	

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A apicultura está inserida no atual contexto socioeconômico como uma atividade econômica que atende ao tripé do desenvolvimento sustentável. Trata-se de uma atividade rural que viabiliza a inclusão social através da geração de renda, tanto para os agricultores, em sua maioria de pequeno porte, como para os demais profissionais responsáveis pela manutenção dos apiários, fabricação de equipamentos e manejo dos produtos, sem impactos ambientais (SANTOS e RIBEIRO, 2009; SILVA, 2010; FREITAS *et al.*, 2013).

A diversidade de floradas observada em Sergipe favorece a produção apícola. O estado possui extensas áreas de coqueirais irrigados, como em Brejo Grande e Pacatuba, e áreas de pomares de cítricos (laranja, limão, tangerina etc), em municípios como Lagarto e Boquim, a uma distância máxima de cem quilômetros da costa marítima. O último caso é apontado como o mais adequado para apicultura com abelhas africanizadas (BASTOS, 2004; CORREIA-OLIVEIRA, 2008; SANTOS e RIBEIRO, 2009). Dentre os produtos provenientes da apicultura, tem-se o pólen apícola. Segundo Leonel (2009), o pólen sergipano ganhou destaque no cenário nacional pela qualidade e sabor mais adocicado.

O pólen apícola é rico em compostos bioativos que o tornam um produto com alto valor agregado. A utilização de pólen é associada a benefícios à saúde por ser um complexo polivitamínico, com ação anti-inflamatória e revitalizante celular. Ribeiro e Silva (2007) relatam que, além de suplemento alimentar, o material pode ser utilizado em setores da farmacologia, como ingrediente em produtos apifito-aromáticos; da indústria cosmética; ou na própria atividade apícola, como alimento para as abelhas em período de estiagem; no monitoramento da poluição ambiental e outros.

Apesar do alto valor de mercado, a produtividade do pólen permanece aquém da demanda. Contribuem para isso a falta de domínio das técnicas de beneficiamento, o baixo nível de tecnologias empregadas no processamento, assistência técnica insuficiente e baixo índice de qualificação e profissionalização dos apicultores (COSTA E OLIVEIRA, 2005; SILVA, 2010),

No que diz respeito à tecnologia empregada na produção de pólen, a secagem constitui a etapa que restringe seu beneficiamento. De acordo com a legislação brasileira o material que é coletado *in natura* com teor de umidade entre 20 e 30% b.u. (CAMPOS *et al.*, 2008) deve ter esse teor reduzido a 4% através de um processo cuja temperatura imposta ao pólen não seja superior a 42°C (BRASIL, 2001). Estudos mostram que comumente o produto

processado não atende às especificações de qualidade, no que se refere ao teor de umidade (CORREIA-OLIVEIRA, 2008; RIBEIRO e SILVA, 2007).

O pólen é um material altamente higroscópico. Barajas *et al.* (2012) enfatizam que o armazenamento do pólen com teor de umidade inadequado reduz seu valor nutricional e favorece o desenvolvimento de fungos e bactérias. Portanto, uma adequada secagem é fundamental, a fim de conservar sua qualidade.

No Brasil, a secagem de pólen apícola ocorre, comumente, através de técnicas rudimentares, como a secagem natural ou em estufas. É interessante que sejam adotadas técnicas de secagem que conduzam a um produto seco com qualidade garantida e com maior eficiência em termos energéticos, visando à redução do tempo de processamento e uma maior produtividade. Produtividade esta, alcançada com o fornecimento de um produto dentro dos padrões de qualidade recomendados, não somente em termos do teor de umidade, mas também com a garantia de conservação de seus compostos bioativos.

A secagem em leito fluidizado é uma das técnicas existentes que pode ser aplicada visando uma secagem eficiente de grãos de pólen. Estudos revelam boas características de fluidização dos grãos de pólen, apesar de se enquadrarem no Grupo D de Geldart (VIZCARRA-MENDOZA *et al.*, 1998). Dentre as diversas vantagens tecnológicas e econômicas no uso do leito fluidizado, podem ser citadas: o aumento da área de transferência de calor e massa e, conseqüentemente, da taxa de secagem, bem como o aumento da capacidade de processamento. Além disso, no processo de produção do pólen a técnica de leito fluidizado oferece também a vantagem de poder ser utilizada na etapa de limpeza do material, através da remoção de partículas leves como fragmentos de abelhas, pernas, asas, dentre outros.

Apesar dos secadores de leito fluidizado, em pequena escala, apresentarem um custo de construção compatível com o poder aquisitivo do pequeno produtor rural, possuem um alto custo operacional, em virtude das grandes quantidades de energia requeridas para fluidizar as partículas, aquecer o ar de secagem e vaporizar a água contida no material (RAGHAVAN *et al.*, 2005). Logo, para viabilizar a sua utilização pelos arranjos produtivos locais (APL's) no beneficiamento do pólen apícola coletado, inovações tecnológicas que intensifiquem a taxa de secagem no leito particulado e reduzam o tempo do processo, que minimizem o consumo de energia e os custos com o processo de secagem, e que assegurem a preservação da qualidade do produto, devem merecer considerável atenção. Como inovações concernentes à técnica de secagem em leito fluidizado pode se ter o uso de fontes alternativas e limpas de energia, seja

para o aquecimento do ar de secagem, seja para o aquecimento direto do material particulado, que se encontra fluidizado.

Para o aquecimento do material particulado, sem a necessidade de aquecer o ar que fluidiza as partículas, as tecnologias empregando a radiação infravermelho (IV) são particularmente interessantes, à medida que permitem imediato e significativo fornecimento de energia ao produto a ser processado, intensificando as taxas de transferência de calor e massa e contribuindo para reduzir o consumo de energia do processo (SALAGNAC *et al.*, 2004). Para a secagem de grãos de pólen pode ser vantajoso combinar o aquecimento IV e a técnica de leito fluidizado, desde que a fluidização tende a proporcionar a exposição mais uniforme do material particulado à energia eletromagnética, submetendo todo o leito a condições de secagem rápida, minimizando a plasticização da superfície da partícula e a força das pontes líquidas entre o ponto de contato das partículas (ACHANTA e OKOS, 1996), evitando um dos grandes problemas da secagem em leito fluidizado, a aglomeração de partículas. Os agregados não somente inibem a formação de um produto uniforme em termos de umidade, como também podem provocar a defluidização do leito, levando o processo a um fim inesperado.

Além disso, as elevadas taxas de secagem obtidas suprimem a oxidação e previnem que compostos bioativos e termosensíveis do produto sejam degradados. O aquecimento infravermelho pode ainda atuar como tratamento térmico, contribuindo para a inativação de fatores tóxicos e enzimas degradativas (FASINA *et al.*, 2001), e para a redução da contagem microbiana (PAN *et al.*, 2008; STAAK *et al.*, 2008). Logo, no caso dos grãos de pólen, o uso da radiação eletromagnética na região do IV pode atuar na desinfecção, suprimindo significativamente a microflora original sobre o produto durante o processo de secagem.

As vantagens mencionadas acima, comparadas ao que os secadores convencionais podem oferecer, fazem o secador de leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho uma excelente alternativa a ser aplicada por arranjos produtivos locais de apicultura para produzir pólen desidratado de qualidade a baixos custos.

O pólen apícola parece ser muito atrativo para o uso da radiação IV, pois seus principais componentes (umidade, proteínas e lipídeos) têm suas principais bandas de absorção de energia eletromagnética na região do infravermelho. Ademais, devido ao pequeno tamanho dos grãos de pólen, os raios IV tendem a ter um bom alcance da sua estrutura interna, o que pode contribuir para um aquecimento uniforme da partícula, bem como para superar o fenômeno de harmomegalia, que é a capacidade das paredes celulares do grão de pólen se retrair e criar uma maior resistência à perda de umidade (KATIFORI *et al.*, 2010).

Embora existam na literatura diversos trabalhos sobre a aplicação contínua ou intermitente da radiação infravermelho, de forma isolada ou acoplada, com o aquecimento convectivo para a secagem de diversos materiais em camada fina (BARBOSA NETO *et al.*, 2014; NIAMNUY *et al.*, 2012; PUTRANTO *et al.*, 2010, DAS *et al.*, 2009; CELMA *et al.*, 2009), poucos relatam seu uso para processar grandes quantidades de material em secadores de leitos móveis (DONDEE *et al.*, 2011), tampouco aplicado à secagem de pólen em leito fluidizado.

No entanto, um longo período de exposição do material a elevadas intensidades de radiação IV, pode provocar seu superaquecimento e levar a perdas em sua qualidade nutricional, decorrente da degradação de vitaminas e aminoácidos, bem como afetar suas propriedades ópticas e texturais. Assim, as vantagens técnicas e econômicas da intensificação do processo de secagem pela aplicação da radiação IV devem ser acompanhadas pela preservação da qualidade do produto. É importante não somente controlar a intensidade de radiação IV, mas também monitorar a temperatura e alguns atributos de qualidade do produto durante a secagem.

Logo, para avanços na aplicação desta tecnologia híbrida, há a necessidade da realização de estudos fundamentais que contribuam para o entendimento dos fenômenos de transferência que a permeiam, bem como para o conhecimento da influência das condições operacionais do processo sobre o consumo de energia e a qualidade do produto.

1.1. Objetivo Geral

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar a secagem de pólen apícola em leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho, a partir de uma abordagem experimental dos fenômenos de transferência, da eficiência energética do processo e da qualidade do produto desidratado.

1.1.1. Objetivos Específicos

Tendo em vista atingir o objetivo geral descrito, foi necessário o cumprimento das seguintes etapas:

- caracterização física dos grãos de pólen;

- estudo do comportamento fluidodinâmico do material em regime de leito fluidizado;
- realização de testes de secagem em três diferentes modos envolvendo: a operação em leito fluidizado convencional, a secagem infravermelho em monocamada e a secagem em leito fluidizado assistido por aquecimento IV;
- avaliação da influência das condições operacionais de cada método de secagem investigado sobre os parâmetros de transferência de massa, o consumo de energia e atributos de qualidade do produto, tais como o teor de beta-caroteno e a cor do produto;
- avaliação e comparação dos desempenhos de diferentes estratégias de secagem (leito fluidizado convencional e leito fluidizado assistido por aquecimento IV), em termos de eficiência energética, transferência de calor e massa e qualidade do produto.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente, esta revisão da literatura aborda as principais características do pólen apícola que evidenciam a necessidade de um processo de secagem, bem como informações importantes que permitam compreender as peculiaridades do material que podem influenciar seu comportamento frente ao processo. São apresentados seu histórico, características físico-químicas e nutricionais, importância econômica e etapas do seu beneficiamento.

Posteriormente, o estado d'arte é direcionado para a secagem dos materiais particulados, destacando-se os aspectos tecnológicos e os princípios fundamentais relacionados aos fenômenos de transferência envolvidos no processo e a sua modelagem com base nas equações de conservação de quantidade de movimento, massa e energia. Agregam-se ainda informações necessárias à caracterização física dos leitos particulados.

2.1. O Pólen Apícola

2.1.1. Aspectos Gerais

Relatos sobre o surgimento das primeiras técnicas apícolas apontam para o Egito há mais de 2400 anos com o uso de potes de barro para o transporte das colmeias. No Brasil, segundo Correia-Oliveira (2008), a apicultura teve início com a instalação de colmeias portuguesas no Rio de Janeiro em 1839.

O segundo ponto de destaque na história da apicultura brasileira é a africanização das abelhas. Tal fato corresponde ao intercruzamento de abelhas rainhas africanas *A. mellifera scutellata*, importadas para o melhoramento genético da apicultura nacional, com as subespécies europeias existentes na região sudeste do Brasil em 1956 devido a uma fuga acidental do apiário (CORREIA-OLIVEIRA, 2008).

As abelhas africanas são consideradas mais produtivas e com comportamento higiênico. Segundo Silva (2010), a africanização das abelhas brasileiras conferiu ao Brasil um grande diferencial na atividade apícola que é a resistência dos enxames às pragas e doenças. Além disso, o autor destaca a grande extensão territorial, a flora diversificada, o clima favorável e a abundância de água como fatores favoráveis ao Brasil na produção apícola.

De acordo com Pasin *et al.* (2012), a produção brasileira de mel natural mais que dobrou na última década, sendo que a região nordestina foi a que mais contribuiu para este desempenho.

Em Sergipe, há divergências sobre o surgimento da apicultura. De acordo com Correia-Oliveira (2008), a apicultura sergipana surgiu na década de 90. Já Bastos (2004) afirma que a atividade apícola em Sergipe não é tão recente, uma vez que a Associação Sergipana de Apicultores foi fundada em abril de 1969. Em ambos os casos, concorda-se que a produção é ainda inexpressiva. Silva (2010), entretanto, destaca o crescimento que vem sendo apresentado pela apicultura sergipana ao longo dos últimos anos.

Juntamente com o mel, a cera, o própolis e a geleia real, o pólen apícola é um dos produtos provenientes da apicultura. O pólen é o gameta masculino de plantas floríferas, cuja reprodução envolve a etapa de polinização, que é a transferência do grão de pólen do órgão reprodutor masculino para o feminino, geralmente realizada por agentes como: o vento (anemófila), a água (hidrófila) e animais (zoófila). Quando a polinização zoófila é realizada por insetos tais como abelhas e moscas, é dita entomófila. A polinização efetuada por abelhas ocorre no momento em que elas entram nas flores à procura de néctar e são detidas no androceu.

O pólen também pode ser recolhido voluntariamente pelas abelhas através da corbícula, uma estrutura que fica junto às patas traseiras, pois constitui um importante componente da alimentação das larvas em crescimento, sendo por isso chamado de pão das abelhas (COSTA e OLIVEIRA, 2005; COUTO e COUTO, 2006).

O pólen é coletado das abelhas no apiário no momento do seu ingresso da colmeia. Dessa maneira, Barreto *et al.* (2005) explicam que o pólen apícola resulta da aglutinação do pólen com néctar e substâncias salivares das abelhas.

Segundo Correia-Oliveira (2008), a produção de pólen apícola iniciou-se no Brasil no final da década de 80 de forma modesta, porém, atualmente, a expansão do mercado de produtos naturais tem favorecido a produção.

O pólen apícola é um produto de ampla funcionalidade. Com elevados teores de proteínas, lipídios, caroteno e em vitaminas do complexo B, o pólen tem sido utilizado como suplemento alimentar ou como base de medicamentos que auxiliem combate a transtornos prostáticos, esgotamento físico e mental, e outros (GUIMARÃES, 1989; ALMEIDA-MURADIAN *et al.*, 2005).

2.1.2. Importância Econômica

Segundo Santos e Ribeiro (2009), a apicultura é uma atividade econômica que requer baixos investimentos e custos operacionais, podendo ser desenvolvida em paralelo a outra atividade agropecuária e favorecendo aumento da produtividade das colheitas através da polinização em massa.

Segundo a ABEMEL (Associação Brasileira de Exportadores de Mel), o Brasil é o 11º produtor mundial de mel e o 9º maior exportador. De acordo com a APACAME (Associação Paulista de Apicultores, Criadores de Abelhas Melíficas Européias), o Brasil enviou ao exterior 20,6 mil toneladas de mel no período de janeiro a novembro de 2011, alcançando uma receita de US\$ 65,2 milhões. O maior contribuinte para esse resultado foi São Paulo, seguido do Rio Grande do Sul e do Ceará. Os principais importados do mel brasileiro foram Estados Unidos, Alemanha e Reino Unido. A respeito do cenário internacional do mercado apícola, Silva (2010) afirma que, embora o Brasil apresente elevado potencial para produção, a produtividade brasileira ainda está abaixo da média internacional.

De modo geral, os demais produtos apícolas, a exemplo do pólen, embora com mercado promissor, ainda não possuem a mesma importância econômica, sobretudo pela falta de informações e investimento tecnológico que dinamizem a sua produção (SILVA, 2010). Entretanto, o aumento do consumo de produtos naturais com ação terapêutica tem estimulado a produção de pólen apícola. No mundo, são produzidas 1500 toneladas de pólen por ano (Estevinho *et al.*, 2012). A produção é liderada pela Espanha, seguida da China, da Austrália e da Argentina.

Na Figura 2.1, destacam-se os municípios sergipanos produtores de pólen.



Figura 2.1: Municípios sergipanos produtores de pólen.

Fonte: Correia-Oliveira *et al.*, (2008)

Neto (2013) afirma que houve um crescimento de sete vezes na produção apícola de Sergipe no período de 1999 a 2009. A produção de Sergipe é de 300 toneladas de mel e de 500kg de pólen, cujos pólos de produção estão em Tobias Barreto, Estância, Neópolis, Pacatuba e Brejo Grande. Estes dois últimos são os principais produtores (ALVES, 2013).

Uma pesquisa realizada por Correia-Oliveira (2008) ao longo do ano de 2007 entre 180 apicultores no estado de Sergipe apontou que a atividade apícola é considerada pelos apicultores sergipanos como uma forma complementar de renda, de modo que o tempo dedicado a tal atividade fica aquém do necessário.

Embora, destaque o elevado nível de escolaridade da maioria dos apicultores e a capacitação dos profissionais na área apícola, Correia-Oliveira (2008) reconhece que existem conflitos entre as técnicas e informações utilizadas no processamento de forma que a qualidade do produto final fica comprometida. A autora afirma ainda que com relação à venda dos produtos apícolas, a maioria vende o mel sem registro de inspeção municipal, estadual ou federal.

Segundo Barreto *et al.* (2005), o estabelecimento de preço adequado para o produto no Brasil, que apresenta grande variação, constitui uma das dificuldades na comercialização do pólen apícola.

Dantas *et al.* (2009) realizaram um trabalho de caracterização do mercado consumidor de produtos apícolas nos municípios sergipanos de Aracaju e São Cristóvão. Os autores detectaram a necessidade da execução de trabalhos informativos junto à população no sentido de conscientizar sobre as propriedades nutricionais e os benefícios da introdução dos produtos apícolas na alimentação. Tal medida requer o esclarecimento de questões relacionadas com as características dos produtos apícolas.

2.1.3. Propriedades Físicas e Composição Química do Pólen

A coloração, o tamanho, a composição química e a forma dos grãos de pólen podem variar muito de acordo com sua origem botânica, condições climáticas, idade e estado nutricional das plantas visitadas pelas abelhas e do manejo do apicultor (CORREIA-OLIVEIRA, 2008; MARCHINI *et al.*, 2006; NOGUEIRA *et al.*, 2012; FEÁS *et al.*, 2012).

A flora apícola sergipana é constituída principalmente por palmáceas (Jurema Preta e Colombi), flora típica da Caatinga, Restinga e Mata Atlântica Litorânea. A produção ocorre no período compreendido entre janeiro a maio e de agosto a dezembro (BARRETO *et al.*, 2005).

Em um estudo sobre a origem botânica de amostras de pólen provenientes de distintas regiões brasileiras, Freitas *et al.* (2013) classificaram todas as amostras sergipanas como heteroflorais constituídas de *Cocos nucifera* juntamente com outras espécies *Mimosa scabrella* (bracatinga), *Mimosa verrucosa* (jurema branca), *Mimosa caesalpiniaefolia* (sabiá), *Brassica* (couve) e *Myrcia* (guamirim branco).

A composição química do pólen seco proveniente da região sul do Brasil foi determinada por Almeida-Muradian *et al.* (2005). Dentre os resultados obtidos, verificou-se a presença de carotenoides totais, porém não foram encontrados compostos antioxidantes como a vitamina C e o betacaroteno. Tal ausência foi atribuída, pelos autores, ao processo térmico de desidratação do material devido à instabilidade dessas vitaminas a altas temperaturas.

A relação dos compostos fenólicos e sua capacidade antioxidante com o poder de ação terapêutica que estes conferem aos materiais nos quais estão presentes tem despertado o interesse de pesquisadores (CARPES *et al.*, 2007).

Leja *et al.* (2007) determinaram o teor de compostos fenólicos do pólen proveniente de 12 diferentes espécies florais. Houve alta variabilidade nos teores de fenóis totais encontrados, entre 1293 e 8243 mg 100 g⁻¹ para amostras provenientes de milho (*Zea mays*) e pêra (*Pyrus communis* L.), respectivamente.

Amostras provenientes da região sul do Brasil apresentaram quantidades significativas de compostos fenólicos totais (20,47±0,39 mg GAE (equivalente em ácido gálico) ·g⁻¹ de pólen seco) e flavonóides totais (7,46±0,67 mg de quercetina·g⁻¹) segundo Karling e Carpes (2012).

Neves *et al.* (2009) determinaram a composição fenólica e a atividade antioxidante de amostras de pólen apícola do Sudeste e Nordeste do Brasil. Segundo os autores, amostras provenientes de São Cristóvão, Sergipe, apresentaram atividade antioxidante de 62,09% e teor de compostos fenólicos 7,01 mgGAE·g⁻¹ de pólen, sendo que a concentração de flavonóides, 4,97 mg de quercetina·g⁻¹ de pólen, não foi significativa.

Liberato *et al.* (2011) determinaram o teor de compostos fenólicos em pólen apícola de amostras monoflorais de *Cocos nucifera* obtidas de um apiário no Ceará. Os autores encontraram o teor de compostos fenólicos de 18,00 ± 0,30 mgGAE·g⁻¹ de pólen e a concentração de flavonóides, no valor de 6,73±0,21 mg EQ·g⁻¹ de pólen.

Valores similares (18,66 ± 1,23 a 20,87 ± 1,25mg GAE/g de pólen) foram obtidos por Meira *et al.* (2012) para 7 amostras de pólen apícola desidratadas provenientes de Sergipe. As amostras eram compostas, predominantemente, por coco, jurema branca e sabiá. Os autores

também determinaram o teor de flavonoides no material. Os resultados oscilaram entre $2,48 \pm 0,23$ a $6,30 \pm 0,12$ mg de quercetina/g de pólen apícola.

O pólen apresenta elevado teor de proteínas e aminoácidos livres, principalmente prolina, visto que ele é a fonte destes compostos na dieta alimentar das abelhas. Destaca-se que metade dos aminoácidos presentes no pólen são essenciais, entre eles, o ácido aspártico, ácido glutâmico, alanina, arginina, asparagina, cistina, fenilalanina, lisina e outros (EVANGELISTA-RODRIGUES, 2006; PARAMÁS *et al.*, 2006).

Entretanto, o teor protéico do material varia de forma significativa de acordo com a origem floral do pólen, por exemplo, 7% para pinheiro e 35 % para palmas (HUMAN e NICOLSON, 2006).

Quanto ao teor de lipídios, Human e Nicolson (2006) afirmam que a quantidade também varia segundo a origem botânica do pólen, sendo que os ácidos graxos são fundamentais na reprodução, desenvolvimento e nutrição das abelhas, visto que os ácidos linoleico e linolênico apresentam propriedades antibactericidas e antifúngicas importantes para a colônia. Segundo Evangelista-Rodrigues (2006) o ácido palmítico constitui o principal componente dos lipídeos.

Na Tabela 2.1, são apresentados os parâmetros da caracterização físico-química do pólen sergipano desidratado segundo Correia-Oliveira (2008).

Tabela 2.1: Composição físico-química do pólen desidratado.

Parâmetro	% (m/m)
Cinzas	2,4-4,0
pH	4,19-5,36
Umidade	4,2-12,5
Atividade de água (a_w)	0,248-0,605
Lípidios	1,33-6,78
Proteínas	14,05-26,42
Fibras	3,49-17,20
Sujidades (fibras de tecidos, bolotas de própolis e partes de insetos)	<2%

Fonte: Correia-Oliveira (2008)

Quanto à estrutura física dos grãos de pólen, Couto e Couto (2006) afirmam que cada grão de pólen pode apresentar entre 10 e 140 μ m de diâmetro. Aglutinados esses grãos

constituem bolotas de pólen com diâmetro da ordem de milímetros e uma massa de aproximadamente 14 a 26 mg (RIBEIRO e SILVA, 2007).

Midilli *et al.* (2000) descreve a parede do grão de pólen como uma estrutura complexa de material compósito. Tal parede é constituída por duas camadas: a exina e a intina. A exina é constituída por uma pequena quantidade de polissacarídeos e por esporopolenina, um polímero rígido de betacaroteno, quimicamente resistente e impermeável à água. A camada interior, a intina, só é exposta nas aberturas, onde a exina é interrompida, e é constituída por celulose à semelhança da parede de outras células vegetais (DIAS, 2006; KATIFORI *et al.*, 2010).

Os grãos de pólen possuem aberturas, cuja função, segundo Camacho (2007), é promover alterações no volume do grão (harmomegatia) devido à hidratação e desidratação em função das condições atmosféricas, e permitir a germinação do tubo polínico. O mecanismo de harmomegatia permite ao grão de pólen manter a correta hidratação durante o percurso entre a antera de uma flor e o estigma de outra flor. Katifori *et al.* (2010) explicam que a estrutura da parede do grão de pólen permite que as aberturas se dobrem para dentro durante a harmomegatia reduzindo a taxa de perda de água quando necessário.

Na Figura 2.2, são ilustradas as diferentes aberturas que constituem cada grão pólen, podendo ser contempladas microscopicamente.

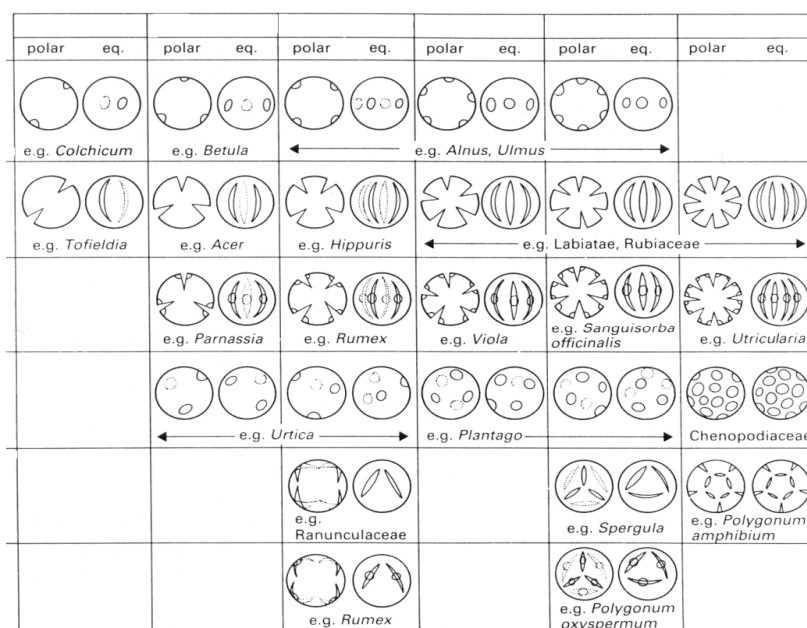


Figura 2.2: Diagrama ilustrativo das diferentes aberturas no grão de pólen.

Fonte: DIAS (2006)

Dias (2006) afirma que os grãos que formam a bolota de pólen apícola são classificados de acordo com o número, posição e características das suas aberturas. O número de aberturas é indicado por um dos prefixos: mono, di, tri, tetra, penta e hexa; antes dos termos: porado, colpado e colporado. O prefixo poli indica que existem mais de seis aberturas.

2.1.4. O Processo de Beneficiamento do Pólen

O processo de beneficiamento do pólen consiste de sete etapas: pré-limpeza, congelamento e posterior descongelamento, secagem, limpeza, envase e armazenamento.

Segundo Couto e Couto (2006), uma colmeia de tamanho médio fornece entre 40 e 60 kg de pólen por ano, sendo esta quantidade determinada pelas condições florais e produção de abelhas. De acordo com os autores, o uso dos extratores de pólen permite obter em média 30 gramas de pólen por colmeia, o qual deve ser coletado diariamente do extrator a fim de evitar perdas por deterioração. Em seguida, efetua-se uma limpeza com pinças.

Ribeiro e Silva (2007) afirmam que ao ser recolhido das gavetas o pólen deve ser transferido para bandejas, que são transportadas dos apiários até a sede de processamento. Em baldes, o material é acondicionado em freezers por pelo menos quarenta e oito horas, antes da secagem. Esta etapa promove a destruição, devido à baixa temperatura, de ácaros, ovos e larvas de traça que possam estar junto com o pólen e também o controle da proliferação de outros microrganismos.

O pólen é coletado com teor de umidade entre 20 a 30% b.u., entretanto deve ser comercializado com um teor máximo de 4% b.u., por isso o material é submetido a um processo de secagem, frequentemente em estufas com convecção forçada, por aproximadamente 24 h. Sendo que o aquecimento não pode ser superior a 42°C (BRASIL, 2001).

Barreto *et al.* (2005) relatam o emprego de estufas de ventilação improvisadas, com a exposição do pólen fresco sobre bandejas teladas, e a utilização de ventiladores ou secadores de cabelo e até mesmo a utilização improvisada de secadora de roupas no processo de secagem do pólen efetuado por pequenos apicultores.

Correia-Oliveira (2008) enfatiza que embora a legislação brasileira não regulamente a presença de partículas estranhas no pólen, tais elementos podem comprometer as características organolépticas do pólen bem como a saúde do consumidor.

Em Sergipe, na comercialização do pólen são utilizados sacos plásticos com capacidade de 500 g a 10 kg, estas embalagens em alguns casos são acondicionados em baldes plásticos.

Ribeiro e Silva (2007) compararam parâmetros de qualidade, tais como teor umidade, cinzas, lipídios e proteínas entre amostras de pólen fresco recém-processado e amostras armazenadas em freezer, sem processamento, coletados do apiário experimental da Embrapa em Teresina, Piauí, e pólen apícola desidratado de marca comercial a fim de avaliar a influência das boas práticas do processamento na qualidade do produto final.

Através dos resultados obtidos, Ribeiro e Silva (2007) concluíram que todas as amostras atendiam os padrões requeridos, exceto quanto ao teor de umidade. Amostras de pólen desidratado apresentaram médias acima dos 4% b.u..

2.2. Processo de Secagem

2.2.1. Aspectos Tecnológicos

A secagem é uma etapa do beneficiamento de grãos na qual ocorre a remoção de umidade visando à adequação do material às demais etapas do beneficiamento, armazenamento e comercialização. A redução da umidade diminui o potencial de desenvolvimento de microorganismos e a ocorrência de reações enzimáticas de deterioração do material, e ainda diminui o volume e o peso a ser transportado e armazenado (KEEY, 1992).

O processo de secagem pode ser natural ou artificial. Natural, quando ocorre à temperatura ambiente, exposto ao sol. Essa configuração, embora apresente baixo custo, é inconveniente do ponto de vista da elevada produtividade requerida atualmente e associada, sobretudo, à exposição dos grãos à ação de agentes biológicos e condições climáticas adversas. No entanto, é o método comumente empregado por pequenos produtores. Na secagem artificial, utilizam-se secadores de diversos tipos onde o calor de uma fonte externa é aplicado direta ou indiretamente à massa de grãos (USTRA, 2005; SANTOS, 2009).

No caso do processamento de pólen, observa-se que a técnica de secagem artificial mais empregada é a secagem em estufas com circulação de ar, com a exposição do material *in natura* sobre bandejas teladas. A secagem em estufa de convecção forçada envolve a passagem de uma corrente deste ar através da massa de grãos úmidos e permite o controle das

condições do ar de secagem, além de apresentar vantagens como: baixos custos de implantação e manutenção associados à facilidade de operação.

Barajas *et al.* (2012) avaliaram a influência da temperatura na secagem em estufa sem circulação de ar (35 e 45°C) sobre o pólen apícola provenientes de duas zonas na Colômbia (La Calera e Zipaquirá) com base na determinação da composição química, a atividade de água, índice de solubilidade, tamanho médio de partícula, teor de vitamina C e caroteno. Os autores concluíram que, embora um menor tempo de secagem seja obtido na temperatura de 45°C, nesta temperatura observam-se maiores perdas de caroteno e de vitamina C.

Midilli *et al.* (2000) estudaram a secagem dos grãos de pólen através de dois métodos: em um secador elétrico e em um secador solar. O material disposto em prateleiras teve a umidade reduzida de 26% b.u. para 6% b.u. a temperaturas entre 40 e 45°C. Segundo os autores, a secagem de pólen a temperaturas superiores a 45°C durante um longo período de tempo pode provocar a perda de algumas vitaminas e alterações físicas pelo material.

Portanto verifica-se que um dos fatores que contribuem para a baixa produtividade de pólen apícola decorre da dificuldade em alcançar a umidade desejada, ou requerida por legislação, e ao mesmo tempo manter a qualidade do material.

Mujumdar (2001) afirma que o consumo energético desta operação corresponde de 12 a 25% do gasto total da indústria de países desenvolvidos, sendo assim significativo o impacto do desenvolvimento de novas tecnologias nessa área.

Diante da extensa gama de secadores que podem ser escolhidos para execução do processo de secagem, Mujumdar (2006) ressalta que a escolha por um tipo de secador deve se basear no equilíbrio entre o custo total, o custo de operação, a qualidade do produto, as condições de segurança e a conveniência de instalação, além de aspectos relacionados à poluição ambiental e sonora.

Kudra e Mujumdar (2002) apresentam a técnica de secagem infravermelho como uma das técnicas de secagem de grãos que permitem maior eficiência energética com segurança e menor impacto ambiental, sem comprometimento da qualidade do produto. Os autores apresentam a combinação da convecção e da radiação infravermelho (IV) destacando o efeito de arrefecimento causado pela convecção que permite a utilização de maior potência IV para acelerar a secagem sem degradação térmica. A consequência disso é a redução do tempo de secagem e, portanto, do consumo de energia.

Por sua vez, a secagem de grãos em leito fluidizado é uma técnica de reconhecidas vantagens como a homogeneidade dos produtos secos, a eficiência, devido à elevada área de troca térmica e a facilidade de instrumentação e controle dos secadores. Além disso, a

operação de secagem em leito fluidizado pode contribuir para aumentar a capacidade de processamento dos produtores de pólen apícola, bem como abranger simultaneamente a etapa de limpeza do material, através da remoção de partículas leves.

2.2.2. Secagem em Leito Fluidizado

Secadores em leito fluidizado são amplamente empregados nas indústrias química, alimentícia, farmacêutica, cerâmica entre outras (MUJUMDAR E DEVAHASTIN, 2003). Cremasco (2012) cita as sínteses e reações catalíticas, regeneração catalítica, combustão e gaseificação de carvão, secagem, recobrimento e granulação de sólidos como aplicações comuns da configuração em leito fluidizado.

O secador de leito fluidizado convencional é formado por passagem vertical e ascendente de uma corrente de gás a partir do fundo de um leito de partículas sólidas. O leito de partículas repousa sobre uma placa distribuidora de gás. O gás é distribuído uniformemente por todo o leito. A uma determinada velocidade de gás, o fluxo de gás suporta totalmente o peso de todo o leito de partículas. Este estado é conhecido como de fluidização mínima e a velocidade do gás correspondente é chamado de velocidade de fluidização mínima. Um leito fluidizado é operado a velocidades de gás entre 2 e 4 vezes superiores à velocidade mínima de fluidização. Dessa maneira, as partículas ficam suspensas sem, contudo, serem arrastadas pelo gás (LAW e MUJUMDAR, 2006).

Chayjan *et al.* (2012) investigaram a cinética de secagem de sementes de melão em leito fixo e leito fluidizado a 45, 55, 65 e 75°C. A difusividade efetiva, a energia de ativação e o consumo específico de energia sob as diferentes condições de secagem também foram determinados. Segundo os autores, a condição do leito não afetou significativamente a taxa de secagem. Por exemplo, para a temperatura do ar de secagem de 45°C, a difusividade efetiva foi de $2,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ para o leito fixo e $2,50 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ no leito fluidizado. Sendo assim, o consumo específico de energia foi maior para a condição de leito fluidizado. Em ambos os processos, a difusividade efetiva aumentou com o aumento de temperatura.

Quanto às condições operacionais, a vazão do ar tem um efeito significativo na remoção de umidade da superfície das partículas. Aumentando-se a velocidade do ar, em geral, aumenta-se a taxa de secagem.

Law e Mujumdar (2006) explicam que materiais cuja secagem é limitada pela migração interna de umidade, a taxa de secagem diminui com o aumento da altura do leito.

Meziane (2011) estudou a cinética de secagem de bagaço de azeitona em um secador de leito fluidizado a 50, 60, 70 e 80 °C com a altura inicial do leito variando entre 41, 52, e 63 mm e a velocidade de ar constante de 1,0 m/s. O autor verificou que o processo de secagem ocorreu apenas no período a taxa decrescente e que o aumento da temperatura e da altura inicial do leito provocou aumento da difusividade efetiva de umidade no material. Além disso, foram ajustadas ainda várias equações empíricas para a descrição da cinética de secagem, sendo que o autor verificou que a equação de Midilli *et al.* foi a que apresentou maior capacidade de predição com base no índice de correlação (R^2) e no desvio relativo médio.

Silva *et al.* (2012) investigaram a influência da temperatura, da carga inicial e da velocidade do ar de secagem sobre a cinética de secagem em leito fluidizado do farelo de soja. Os autores concluíram que o fenômeno governante do processo é a difusão interna de umidade, sendo que a temperatura teve influência significativa sobre o processo, enquanto que a carga inicial e a velocidade do ar não tiveram influência significativa dentro da faixa investigada.

Perea-Flores *et al.* (2012) estudaram a cinética de secagem de sementes de mamona em leito fluidizado a uma velocidade de ar constante de 7 m/s e temperaturas de 80, 90, 100, 110°C. Foram ajustadas seis equações aos dados experimentais, das quais o modelo difusivo foi selecionado como o mais adequado à descrição da cinética de secagem. Os autores determinaram ainda a difusividade efetiva de umidade, obtendo um valor na faixa de $8,21 \cdot 10^{-10}$ a $2,61 \cdot 10^{-9}$ m²/s. A relação entre a temperatura e a difusividade efetiva de umidade foi descrita por uma relação do tipo Arrhenius com a energia de ativação no valor de 41,41 kJ/mol.

Kudra e Mujumdar (2002) destacam a demanda crescente por inovação na área de conhecimento de secagem de grãos em virtude do aumento populacional acompanhado da necessidade de obter eficiência energética com baixo custo e menor impacto ambiental.

Kaensup e Wongwises (2004) investigaram a secagem em leito fluidizado assistida por microondas para grãos de pimenta frescas e verificaram aumento da eficiência em relação à secagem em leito fluidizado convencional, pois o tempo de secagem requerido através da técnica inovadora para alcançar o mesmo teor de umidade que o sistema convencional foi reduzido em 80 a 90%. Além disso, os autores afirmam que, em termos de cor do produto, a utilização da associação não conduziu a reações de escurecimento como na secagem em leito fluidizado apenas.

2.2.3. Secagem via Radiação Infravermelho

A secagem infravermelho (IV) consiste na aplicação de radiação com comprimento de onda na região do infravermelho. De acordo com Jun *et al.* (2010), a radiação infravermelho compreende as ondas eletromagnéticas com comprimento de onda entre 0,75 e 1000 μm , sendo que a faixa de 0,75 a 1,4 μm corresponde ao infravermelho próximo, entre 1,4 e 3 μm ao infravermelho médio e entre 3 e 1000 μm ao infravermelho distante.

Khair *et al.* (2011) explicam que a energia eletromagnética na região do IV é transferida a partir da fonte de aquecimento para a superfície do produto sem aquecimento do ar circunvizinho, de modo que a temperatura do grão não é limitada pela temperatura de bulbo úmido do ar, ao contrário da secagem convectiva.

Dondee *et al.* (2011) destacam como vantagens do emprego da radiação infravermelho próximo: a redução do gradiente de umidade e do desenvolvimento tensões no interior do material conduzindo a alta qualidade do produto.

A radiação incide sobre a superfície do material e penetra-o sendo convertida em calor latente no interior do material. As tensões decorrentes da migração da água são menores em comparação a outras técnicas, pois o aquecimento ocorre de maneira uniforme. Após o aumento da temperatura do material, a energia recebida na forma de radiação IV interage com a estrutura interna da amostra e é utilizada na forma de calor latente, provocando a evaporação da água contida em seu interior.

Estudos comparativos (JATURONGLUMLERT, 2010; SELLAMI *et al.*, 2011) entre a secagem convectiva e a secagem infravermelho mostram que é possível reduzir o tempo de secagem de materiais biológicos, sem perda da qualidade.

Doymaz (2012) avaliou o efeito da intensidade de radiação infravermelho (104, 125, 146 e 167 W) sobre a cinética de secagem e reidratação de fatias de batata doce. Segundo o autor, o processo de secagem ocorreu no período a taxa decrescente sendo que o aumento da potência empregada provocou o aumento da taxa de secagem.

Ponkham *et al.* (2012) enfatiza o interesse atual por estudos sobre a secagem infravermelho e sobretudo, pela combinação da secagem infravermelho com técnicas de secagem convectiva, proporcionando inclusive melhoria da qualidade do produto em termos de cor, encolhimento, dureza e do teor de fenóis totais.

Niamnuy *et al.* (2012) investigaram a influência da temperatura do ar sobre a cinética de secagem, bem como a conversão e degradação de isoflavonas, durante a secagem convectiva de soja assistida por uma fonte de radiação infravermelho a 50, 70, 130 e 150 °C.

Segundo os autores, durante o processo ocorre, principalmente, a desesterificação das isoflavonas e embora a temperatura de 150 ° C forneça taxas de secagem mais elevadas, conduz a maiores taxas de degradação de todas as isoflavonas. Dessa maneira, os autores sugeriram que a secagem deve ser feita a de 130°C, de modo que a taxa de secagem é ainda elevada, mas ocorre menor degradação das isoflavonas.

Ponkham *et al.* (2012) estudaram a secagem convectiva associada à radiação IV aplicada a anéis de abacaxi. Os experimentos foram conduzidos sob radiação infravermelho distante com intensidade de 1 a 5 kW/m² a temperaturas do ar de 40-60 °C e velocidades do ar entre 0,5 e 1,5 m/s. Os autores afirmam que o coeficiente de difusão foi influenciado pela intensidade e temperatura do ar, mas não foi significativamente influenciada pela velocidade do ar.

A fim de minimizar os danos de quebra causados pela secagem em leito fluidizado, Dondee *et al.* (2011) utilizaram a secagem em leito fluidizado acoplada a uma fonte de radiação infravermelho no estudo da secagem de grãos de soja visando a redução do número de fissuras e ruptura do material. Os autores analisaram o teor de quebra, cor, solubilidade da proteína, atividade da urease do material paralelamente à microestrutura dos grãos. Foi investigada a influência da potência da radiação infravermelho utilizando potências de 4, 6 e 8 kW. Os autores verificaram que a técnica empregada mostrou-se promissora, permitindo a redução do teor de umidade e garantindo a manutenção dos parâmetros de qualidade do material para as potências de 4 e 6 kW. No entanto, a condição de 8 kW de potência provocou danos, ocasionando ruptura da parede celular dos grãos.

Outro aspecto relacionado ao processo de secagem é o alto gasto energético associado. A secagem é a etapa responsável por grande parte do gasto energético total dos sistemas de beneficiamento pós-colheita. Logo, a compreensão do mecanismo pelo qual ocorre o processo de secagem e a avaliação do impacto de diferentes variáveis neste processo deve nortear importantes estudos a fim de otimizar a operação e minimizar gastos energéticos (BOERI, 2007; SANTOS, 2009; BARATI E ESFAHANI, 2011).

2.2.4. Aspectos Fundamentais

Mujumdar (2006) descreve a secagem como um processo complexo que envolve a transferência simultânea de calor e de massa e que está intimamente associado à ocorrência de outras diversas transformações físicas ou químicas, que podem causar alterações na qualidade

do produto. Dentre as alterações físicas são citados o encolhimento, em virtude dos gradientes de pressão, e a cristalização.

Law e Mujumdar (2006) diferem dois mecanismos através dos quais pode ocorrer a remoção de umidade de um material higroscópico: evaporação e vaporização. Na secagem por evaporação, inicialmente a pressão de vapor da água na superfície do sólido é igual à pressão atmosférica. Dado o aquecimento do material até o ponto de ebulição da água, ocorre a evaporação da umidade contida no material. Na secagem por vaporização, a passagem de ar quente sobre a superfície do material frio ocasiona a transferência de água da superfície do material, com pressão de vapor inferior à pressão atmosférica, para o ar.

Na Figura 2.3, apresenta-se a curva típica da taxa de remoção de umidade de um material, em função do tempo.

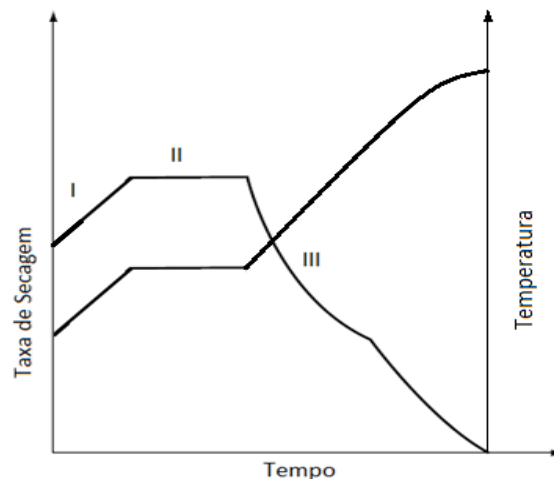


Figura 2.3: Curva característica da taxa de secagem de um material, em função do tempo, sob condições constantes de secagem. Fonte: Law e Mujumdar (2006)

O início do processo de secagem (I) é caracterizado pelo aquecimento do material. Dado o prosseguimento do processo, a energia fornecida atua, parte na forma de calor sensível ocasionando o aumento da temperatura do material e, parte na forma de calor latente, provocando elevação da pressão de vapor da água e evaporação da água na superfície do material de maneira que ocorre o aumento da taxa de secagem.

No período a taxa constante de secagem (II), a superfície do material está saturada de umidade e a pressão de vapor d'água na superfície é constante e igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do material, que é igual à temperatura de bulbo úmido. A migração interna de umidade é capaz de suprir a quantidade de água removida na superfície de maneira que a taxa de secagem é mantida constante, pois a água evapora-se como água livre. Há equilíbrio entre a transferência de calor do ar para a superfície do material e a energia

utilizada na evaporação da água. Segundo Kondjoyan e Daudin (1993), esse período é bem pronunciado para materiais porosos não-higroscópicos como areia, giz e gesso.

Quando o teor de umidade médio atinge o teor de umidade crítico (X_{cr}), a migração da água contida no interior do material é insuficiente para suprir a perda de água superficial, deste modo, a quantidade de água torna-se deficiente na superfície e a taxa de secagem diminui. Tem-se o período de taxa decrescente de secagem (III). Durante este período, a energia na forma de calor outrora atuando na forma de calor latente, provocando a evaporação da água, passa a agir na forma de calor sensível e provoca o aumento da temperatura do produto, que tende assintoticamente à temperatura do ar.

Nesta etapa de secagem, o fator limitante é a migração interna de água. O primeiro período a taxa decrescente abrange desde o momento em que a superfície fica insaturada de umidade até a película de líquido na superfície ser completamente evaporada. Em seguida, a diminuição da taxa é intensificada, pois é limitada pelo gradiente de concentração de umidade existente entre o interior do material e a superfície. Ao final deste período, a pressão de vapor da água no produto estará em equilíbrio com o ar, situação em que o teor de umidade no material é chamado teor de umidade de equilíbrio ($X = X_{eq}$), e a taxa de secagem torna-se nula de modo que a secagem é interrompida.

É necessário que a secagem seja conduzida de maneira adequada, respeitando-se os gradientes de temperatura e de umidade que o material em questão permite, para as condições em que se pretende armazenar para que se garanta a manutenção ou preservação da qualidade do produto (CARVALHO, 1988).

2.2.5. Aspectos Fluidodinâmicos da Secagem em Leito Fluidizado

O processo de fluidização das partículas no secador ocorre conforme a velocidade de um fluxo ascendente de ar que percola um leito é aumentada.

A condição de leito fixo corresponde ao estado de velocidade baixa do ar, que escoar entre os espaços vazios do leito particulado, sem promover movimentação do material. Neste caso, a perda de carga é função da permeabilidade do leito, rugosidade e da massa específica das partículas, da viscosidade e velocidade superficial do fluido.

Na Figura 2.4, é mostrada uma curva característica da perda de carga em função da velocidade em um leito fluidizado.

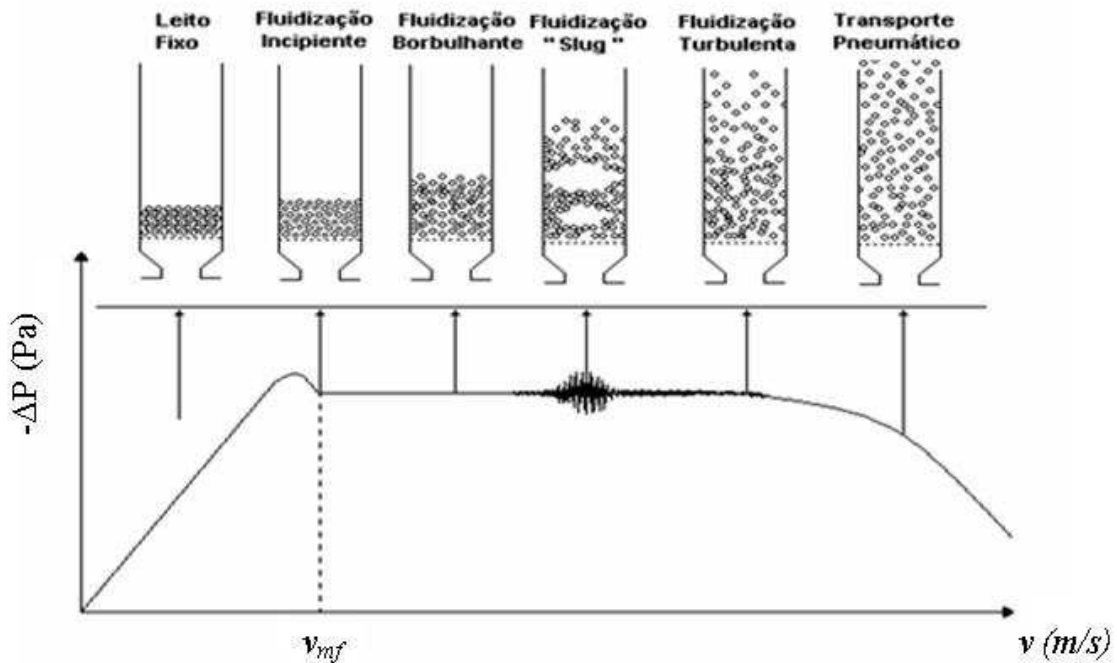


Figura 2.4: Regimes de fluidização em função da velocidade superficial do gás.

Fonte: Nitz e Guardani (2008)

O aumento da velocidade do ar provoca a expansão do leito, de forma que as partículas afastam-se, reordenando-se e oferecendo menor resistência ao fluxo gasoso. Um incremento maior de velocidade faz com que a soma das forças de arraste causadas pelo escoamento do ar no sentido ascendente compensem o peso das partículas. A componente vertical das forças de compressão entre as partículas desaparece, atingindo-se o leito fluidizado. A queda de pressão em qualquer seção do leito é igual ao peso do fluido e das partículas naquela seção. À velocidade do gás nessa condição dá-se o nome de velocidade mínima de fluidização, que é a velocidade correspondente ao regime de fluidização incipiente.

Em seguida, o movimento do material torna-se ainda mais vigoroso caracterizando a fluidização plena ou turbulenta. A velocidade terminal do sólido é excedida quando o arraste do ar sobre as partículas supera o seu peso e o material passa a ser arrastado, o que caracteriza um leito fluidizado disperso ou diluído, com transporte pneumático de sólidos (KUNII e LEVENSPIEL, 1991; NITZ e GUARDANI, 2008; USTRA, 2005).

Shao *et al.* (2013) descrevem a curva típica de queda de pressão associada à fluidização de um material como uma informação chave para o projeto e operação de um leito fluidizado, e ressaltam que muitos trabalhos versam sobre a queda de pressão no leito de

sistemas de mistura binária, entretanto, poucos abrangem sistemas de mistura ternária ou ainda multicomponentes.

A descrição físico-matemática da fluidodinâmica em sistemas particulados é estabelecida com a aplicação das Equações da Continuidade e do Movimento para cada fase.

Tomando-se a Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.1)$$

A porosidade do leito (ε) é a fração volumétrica ocupada pelo fluido:

$$\varepsilon = \frac{V_F}{V_T} \quad (2.2)$$

Sendo V_F o volume de fluido e V_T o volume total do leito.

Tem-se, dessa forma, a Equação da Continuidade explícita em propriedades do fluido ou das partículas:

Para o fluido:

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f \vec{v}_f) = 0 \quad (2.3)$$

Para as partículas:

$$\frac{\partial [(1-\varepsilon) \rho_s]}{\partial t} + \nabla \cdot ((1-\varepsilon) \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (2.4)$$

Sendo ρ_f e ρ_s as massa específicas do fluido e do sólido e v_f^1 e v_s a velocidade intersticial da fase fluido e sólida.

Da Equação do Movimento:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \cdot (\vec{v}) \right] = -\nabla P - [\nabla \cdot \vec{\tau}] + \rho \vec{g} \quad (2.5)$$

¹ A velocidade superficial é definida como a velocidade do fluido desconsiderando a presença da matriz porosa $q = \varepsilon v_f$ (MASSARANI, 2002)

A Equação do Movimento pode ser reescrita de modo explícito em propriedades do fluido ou das partículas. O termo do trabalho das forças viscosas leva em conta a interação sólido-fluido, sendo composto pela força resistiva ($\vec{m}$) que o fluido exerce sobre a fase sólida e pela força de empuxo que atua sobre as partículas ($(1-\varepsilon)\rho_f \vec{g}$).

Logo, para o fluido:

$$\varepsilon \rho_f \left[\frac{\partial \vec{v}_f}{\partial t} + \vec{v}_f \cdot \nabla \cdot (\vec{v}_f) \right] = -\nabla P - \vec{m} + \rho_f \vec{g} \quad (2.6)$$

E para as partículas:

$$(1-\varepsilon)\rho_s \left[\frac{\partial \vec{v}_s}{\partial t} + \vec{v}_s \cdot \nabla \cdot (\vec{v}_s) \right] = \nabla \cdot \tau_s + \vec{m} + (1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_f)\vec{g} \quad (2.7)$$

Sendo τ_s a tensão exercida sobre a fase sólida.

Nestas equações, a descrição da força resistiva tem sido investigada extensivamente ao longo dos anos por diversos pesquisadores (MASSARANI, 2002). Yang (2003) explica que a queda de pressão através do leito não se deve apenas à resistência de atrito na superfície da partícula, mas também à expansão e contração do fluxo através dos interstícios entre as partículas.

Em 1830, os resultados obtidos por Darcy, sobre o fluxo de água através de meios porosos constituídos de areia em várias espessuras, o conduziram a propor algumas simplificações à Equação do Movimento para a fase fluida. O termo de aceleração foi negligenciado frente ao termo resistivo. Darcy propôs ainda uma relação linear entre a força resistiva e a velocidade com a qual o gás percola o leito, resultando na Lei de Darcy expressa pela Equação (2.8), válida apenas para escoamentos lentos.

$$-\nabla \wp = \frac{\mu}{\kappa} \vec{q} \quad (2.8)$$

sendo κ a permeabilidade da matriz sólida, $\vec{q}$ a velocidade superficial do fluido e $\wp$ a pressão piezométrica do fluido.

Para altas vazões, a força resistiva ($\vec{m}$) é dada pela forma quadrática de Forchheimer, que se aplica tanto ao escoamento lento como ao escoamento a vazões mais elevadas, de modo que a queda de pressão resulta na Equação (2.9):

$$-\nabla \wp = \frac{\mu}{\kappa} q + \frac{c\rho_F}{\sqrt{\kappa}} q^2 \quad (2.9)$$

sendo o parâmetro c um fator adimensional que depende de propriedades estruturais da matriz sólida.

Para o caso em que ocorre a fluidização homogênea, tem-se a equação do movimento para a fase sólida:

$$(1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_f)g = \frac{\mu_f \varepsilon}{\kappa} v_f + \frac{c\rho_F \varepsilon^2}{\sqrt{\kappa}} v_f^2 \quad (2.10)$$

Gomide (1980) explica que o material particulado apresenta porosidade segundo a granulometria e forma das partículas que o compõem. De forma que, tomando-se um leito estático cuja porosidade é ε_e , à medida que tem início o processo de movimentação do material o valor da porosidade aumenta de ε_e até um valor denominado porosidade mínima de fluidização (ε_{mf}). Ao passo que o leito expande, a porosidade continua aumentando até que torna-se igual a um, no momento em que ocorre o arraste das partículas.

O principal parâmetro de um estudo fluidodinâmico é a velocidade mínima de fluidização (v_{mf}). O conhecimento da velocidade de fluidização mínima permite o uso racional do gás empregado em relação ao necessário para fluidização mínima, pois mensura a força de arrasto que deve ser imposta pelo fluido a fim de suspender o material particulado, e cujo valor serve de referência para identificação da intensidade de fluidização (COLTTERS e RIVAS, 2004; SHAO *et al.*, 2013).

A obtenção experimental da velocidade mínima de fluidização consiste em tomar a queda de pressão através do leito para valores decrescentes de velocidade do ar. Em seguida, pode-se estimar a velocidade mínima a partir da curva de queda de pressão em função da velocidade.

Kunii e Levenspiel (1991) apresentam a equação de Kozeny Carman para o cálculo da velocidade mínima de fluidização válida para partículas pequenas sob fluxo laminar:

$$v_{mf} = \frac{\varepsilon_{mf}^3}{150(1-\varepsilon_{mf})} \frac{(\phi d_p)^2 g (\rho_s - \rho_f)}{\mu} \quad (2.11)$$

Partículas maiores requerem a adição de um termo que inclua os efeitos inerciais. Pode-se utilizar a Equação de Ergun associada ao balanço de forças durante a fluidização, a fim de avaliar os efeitos da velocidade do ar e do diâmetro das partículas de forma isotrópica (PELL, 1990):

$$\frac{150 \mu v_{mf} (1 - \varepsilon_{mf})}{d_{sv}^2 \varepsilon_{mf}^3} + \frac{1,75 \rho v_{mf}^2}{d_{sv}^2 \varepsilon_{mf}^3} = g (\rho_s - \rho_f) = \frac{-\Delta P}{L} \quad (2.12)$$

Sendo ρ_f a massa específica do fluido, d_{sv} o diâmetro de Sauter, μ a viscosidade dinâmica do gás, ρ_s a massa específica da partícula e g a aceleração gravitacional.

Pell (1990) ainda mostra que conhecendo-se a porosidade de mínima fluidização e a esfericidade do material é possível rearranjar a Equação (2.12) e obter correlações derivadas da equação Ergun para a determinação velocidade de fluidização mínima:

$$K_1 Re_{mf}^2 + K_2 Re_{mf} = Ar \quad (2.13)$$

sendo Re o número de Reynolds e Ar o número de Arquimedes:

$$Re_{mf} = \frac{\rho_f v_{mf} (\phi d_p)}{\mu} \quad (2.14)$$

$$Ar = \frac{(\phi d_p)^3 (\rho_s - \rho_f) g}{\mu^2} \quad (2.15)$$

K_1 e K_2 são constantes na faixa de $0,001 < Re_{mf} < 4000$.

Gupta *et al.* (2009) empregaram setenta e nove diferentes correlações encontradas na literatura para prever a velocidade mínima de fluidização de materiais particulados formados por rejeitos de zinco, ferro, urânio e cinzas, e verificaram que os valores determinados a partir de muitas correlações são significativamente menores que o valor experimental da velocidade mínima de fluidização para os quatro diferentes materiais.

Jiliang *et al.* (2013) investigaram os efeitos da temperatura do leito e distribuição de tamanho de partículas sobre a velocidade mínima de fluidização. Areia de quartzo e cinzas, em quatro diferentes faixas granulométricas, foram fluidizadas a uma temperatura do leito de 30°C a 600°C à pressão atmosférica. Os autores verificaram que o valor da velocidade mínima de fluidização diminui com o aumento da temperatura do leito e aumenta com o

aumento do tamanho de partícula. Os autores atribuíram o efeito da temperatura ao aumento da viscosidade do ar que intensifica a força de arrasto sobre as partículas.

Comumente, verifica-se que a velocidade mínima de fluidização independe da altura inicial do leito. Escudero e Heindel (2011) estudaram o comportamento fluidodinâmico de um sistema usando um leito fluidizado com 10,2 cm de diâmetro cilíndrico e partículas da classe B de Geldart (esferas de vidro, farelos de casca de noz e farelo de milho), com massa específica de material de 2600, 1300 e 1000 kg/m³, respectivamente. Foram empregadas cinco diferentes alturas de leito para avaliar o efeito da altura do leito e da massa específica das partículas sobre a velocidade de fluidização mínima. Os autores verificaram que a velocidade mínima de fluidização não é afetada pela mudança de altura do leito, mas à medida que a massa específica do material aumenta, a velocidade de fluidização mínima é aumentada.

Entretanto, Rao *et al.* (2010) ao estudarem a influência do diâmetro da coluna e da altura do leito sobre a velocidade mínima de fluidização de partículas verificaram que esta aumentou à medida que a altura do leito aumentou ou que o diâmetro da coluna do secador foi reduzido, em virtude dos efeitos de parede. Os autores propuseram uma modificação na Equação de Ergun no sentido de incorporar o efeito do atrito entre partículas e do leito com da parede, introduzindo-o no balanço de forças durante a fluidização. O balanço aplicado num elemento de volume do leito resulta em uma equação diferencial na qual é considerada que as tensões desenvolvidas vertical e horizontalmente são explicitadas. A equação desenvolvida foi:

$$\left[1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} - 4 \tan \phi k_2 \left(\frac{\phi d_p}{D} \right) \left(\frac{L}{D} \right) \right] \text{Re}^2 + \left[150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} - 4 \tan \phi k_1 \left(\frac{\phi d_p}{D} \right) \left(\frac{L}{D} \right) \right] \text{Re} = [(1-\varepsilon)Ar] \quad (2.16)$$

Sendo k_1 e k_2 duas constantes determinadas experimentalmente; L a altura do leito; ϕ um parâmetro que indica o atrito entre as partículas e a parede do secador, d_p é o diâmetro de peneira da partícula e D o diâmetro da coluna do secador.

A equação apresentada pelos autores forneceu resultados satisfatórios para o ajuste dos dados experimentais na faixa granulométrica (105 a 354 μm), altura de leito ($1 < L/D < 6$) e diâmetro de coluna estudados ($D = 1, 6 \text{ cm}$), exceto para partículas finas.

Guardiola *et al.* (2013) explicam que a compreensão de como se comporta a altura do leito é importante porque influencia o projeto do leito e das variáveis operacionais, visto que a

sua oscilação temporal indica o estado do leito no que se refere à formação de bolhas e canais preferenciais, além de indicar a área interfacial por unidade de volume.

Law e Mujumdar (2006) afirmam que partículas com alto teor de umidade inicial exigem uma maior velocidade mínima de fluidização do que partículas secas em virtude da ação de forças coesivas exercidas pelas superfícies de contato com o fluido, pois apenas a camada de topo do leito de sólidos é fluidizada. As camadas do fundo podem permanecer estagnadas durante a fase inicial da secagem, quando o material particulado apresenta elevado teor de umidade.

Puspasari *et al.* (2013) determinaram a velocidade mínima de fluidização para folhas de palma esmagadas. Os autores verificaram que a mesma foi independente da carga inicial do leito, porém aumentava com o aumento do teor de umidade do material. Os autores verificaram ainda a queda de pressão do leito aumentou com o aumento da altura do leito.

A operação deve ser conduzida utilizando valores de velocidade do ar entre a velocidade mínima de fluidização e a velocidade terminal, a fim de reduzir o arraste de partículas. No cálculo da velocidade mínima de fluidização, usa-se o diâmetro médio da distribuição de tamanho de partículas presentes no leito, ao passo que para velocidade terminal utiliza-se o menor diâmetro de partícula presente no leito.

Alguns fatores que podem influenciar na eficiência da secagem em leito fluidizado são: o tamanho das partículas, a carga inicial do leito, a velocidade do gás e a temperatura do leito.

Law e Mujumdar (2006) afirmam que para a secagem em leito fluidizado, uma boa mistura das partículas é essencial. Assim, o conhecimento das características das partículas e das suas propriedades de fluidização é necessário para garantir um bom desempenho de um secador de leito fluidizado.

Pell *et al.* (2008) afirma que embora seja possível fluidizar partículas de outros tamanhos, é preferencial, que a fluidização seja feita com partículas entre 30 μm e 2 cm.

O tipo de fluidização pode ser determinado a partir do Número de Froude dado pela seguinte equação:

$$Fr = \frac{v_{mf}^2}{gd_p} \quad (2.17)$$

Em que v_{mf} é a velocidade mínima de fluidização, g é a aceleração gravitacional e d_p é o diâmetro de peneira da partícula. Se $Fr < 1$, tem-se a fluidização particulada, para a qual o

leito apresenta fluidez com formação de microbolhas. Caso contrário, a fluidização agregativa, caracterizada por uma fluidez irregular.

A qualidade da fluidização depende de alguns fatores como: o tamanho e a distribuição granulométrica das partículas, estado físico do fluido, características do sólido, a razão entre a massa específica do fluido e da partícula e velocidade do fluido. Puspasari *et al.* (2013) estudaram a fluidização de folhas de palma em um leito com diferentes velocidades do ar e diferentes cargas iniciais. Segundo os autores, observou-se a formação de uma fenda no leito em virtude da natureza fibrosa das partículas, cujo emaranhamento impedia a passagem do ar através do leito. O problema foi resolvido com auxílio de agitação mecânica.

Quanto ao tamanho das partículas, Geldart (1973) subdividiu as partículas em quatro classes: partículas fluidizáveis (A), partículas arenosas (B), partículas finas e ultrafinas (C) e partículas largas e densas (D). Na Figura 2.5, é mostrado o diagrama de Geldart.

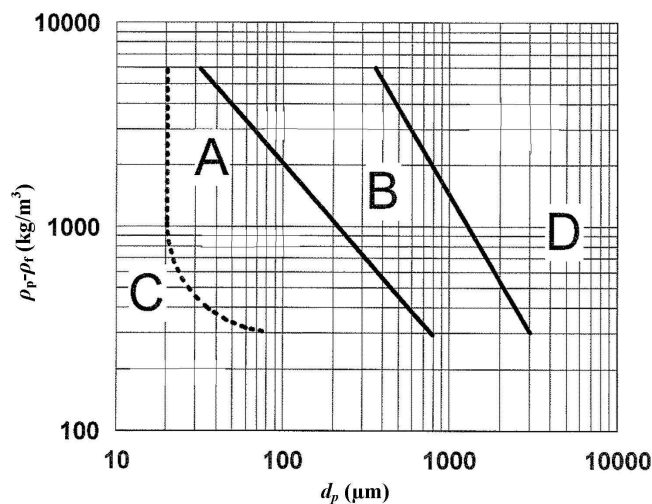


Figura 2.5: Classificação das partículas segundo Geldart

O leito com partículas da classe B de Geldart apresenta expansão curta e borbulhante. Segundo Gonçalves (2011), para essas partículas, o tempo de secagem requerido aumenta com o quadrado do diâmetro das partículas do material, sob demais condições constantes, sendo este efeito muito menor para o grupo A, as aeráveis, visto serem partículas mais finas e exibirem fluidização suave antes de entrar em regime de fluidização borbulhante. Partículas do grupo C, coesivas, são difíceis de fluidizar, devido à atuação de forças coesivas entre as partículas. Partículas do grupo D requerem velocidades mais altas para fluidizar e formam leitos de jorro estáveis (GELDART, 1973; MANDAL *et al.*, 2012; PELL, 1990).

2.3. Transferência de Calor e de Massa em Leitos Fluidizados

A descrição físico-matemática da secagem em leitos espessos constitui um campo de estudo vasto em virtude do grande número de variáveis envolvidas.

i) Modelo Difusivo

De acordo com o Modelo Difusivo, a secagem das partículas isoladamente de um leito fluidizado é totalmente limitada pela migração interna de umidade na partícula. Da equação de difusão para uma esférica e isotrópica, negligenciando o encolhimento e assumindo que o processo é isotérmico e que o ar de secagem é uma mistura ideal.

Tem-se a seguinte equação para a transferência de massa:

$$\frac{\partial X(r,t)}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 X(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \left(\frac{\partial X(r,t)}{\partial r} \right) \right] \quad (2.18)$$

Sendo X o teor de umidade livre e D_{eff} a difusividade efetiva (m^2/s).

$$CI : X(r,0) = X_0 \quad (2.19)$$

$$CC1: \frac{\partial X(r,t)}{\partial t} \Big|_{r=0} = 0$$

$$CC2 : X(R,t) = X_e$$

Daí, tem-se a solução do modelo difusivo dada por:

$$\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} = \sum_{j=1}^n \frac{6}{(j\pi)^2} \exp \left[- (j\pi)^2 \frac{De_{ff}}{R^2} t \right] \quad (2.20)$$

Chayjan *et al.* (2012) estudaram a transferência de massa durante a secagem de sementes de melão em condições de leito fixo, fluidização incipiente e fluidização borbulhante. Os autores avaliaram a influência da temperatura sobre a difusividade efetiva do processo, estimada através da linearização do modelo difusivo. Foi concluído que a elevação da temperatura do ar provocou aumento significativo no valor da difusividade para cada condição de leito, enquanto que, avaliado a cada temperatura a condição do leito não influenciou significativamente o valor da difusividade.

ii) *Modelo Cinético*

O Modelo Cinético baseia-se na hipótese de que todo o processo de secagem ocorre em um período a taxa constante e outro a taxa decrescente. Para o período a taxa constante, a taxa de secagem diminui linearmente com a diminuição da umidade. Para o período a taxa decrescente, a relação é exponencial. Assim:

A taxa constante:

$$X = X_o - at \quad (2.21)$$

A taxa decrescente:

$$X = X_{eq} + (X_{cr} - X_{eq}) \exp \left[\frac{a(t - t_{cr})}{(X_{cr} - X_{eq})} \right] \quad (2.22)$$

iii) *Modelo a uma fase*

O modelo a uma fase considera que o leito fluidizado é um sistema homogêneo, resultante das fases gás e sólida em equilíbrio em todas as propriedades. Logo, aplicando-se os balanços de energia e de massa, tem-se:

$$-m_{ss} \frac{dX}{dt} = w_g (Y_2 - Y_1) \quad (2.23)$$

Sendo m_{ss} a massa seca das partículas no leito (kg), X o teor de umidade (kg/kg), w_g a taxa mássica de ar seco (kg /s), e Y a umidade absoluta do ar (kgH₂O/ kg_{ar seco}), de modo que o subscrito “2” indica a saída do secador e o subscrito “1” indica a entrada..

Tem-se a Equação da Energia para o modelo a uma fase

$$m_{ss} c_{ps} \frac{dT}{dt} = w_g (c_{pg} + Y_1 c_{pv}) (T_1 - T_2) - w_g [(Y_2 - Y_1) \cdot L_w] \quad (2.24)$$

Sendo c_{ps} o calor específico do sólido a pressão constante (kJ /(kg K)) e L_w o calor latente de vaporização (kJ/kg).

iv) *Modelo a duas fases*

O modelo a duas fases considera uma fase sólida (sólido seco e água líquida) e uma fase fluida (ar seco e vapor). Considera-se desprezível o gradiente de temperatura no interior das partículas individuais e a condução de calor e difusão mássica entre as partículas. As fases sólida e fluida são consideradas misturas ideais e as perdas e radiação pelas paredes do sistema são negligenciadas. O escoamento é unidirecional.

Conservação de Massa:

$$\rho_g v_g \frac{\partial Y_g}{\partial z} + \rho_g \varepsilon \frac{\partial Y_g}{\partial t} = -\rho_s (1 - \varepsilon) \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2.25)$$

Tem-se a Equação de Conservação da Energia para a fase sólida:

$$\rho_s (1 - \varepsilon) (c_{ps} + X c_{pw}) \frac{dT_s}{dt} = ha(T_g - T_s) + \rho_s (1 - \varepsilon) [L_w + (c_{pv} - c_{pw}) \cdot T_s] \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2.26)$$

Tem-se a Equação de Conservação da Energia para a fase fluida:

$$\rho_g v_g (c_{pg} + Y_g c_{pv}) \frac{dT_g}{dz} + \rho_g \varepsilon (c_{pg} + Y_g c_{pv}) \frac{dT_g}{dt} = \left[ha - \rho_s (1 - \varepsilon) c_{pv} \frac{\partial X}{\partial t} \right] (T_s - T_g) \quad (2.27)$$

A equação da taxa de secagem em camada fina:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = f(X, v_f, Y_f, T_f) \quad (2.28)$$

As condições iniciais e de contorno são:

$$X(0, z) = X_o \quad (2.29)$$

$$T_s(0, z) = T_{so} \quad (2.30)$$

$$Y_s(0, z) = Y_s(t, 0) = Y_{so} \quad (2.31)$$

$$Y_f(0, z) = Y_f(t, 0) = Y_{fo} \quad (2.32)$$

A estimação de parâmetros, tais como os coeficientes de transferência de calor e de massa, é essencial durante a modelagem matemática do processo de secagem. Law e Mujumdar (2006) apresentam a seguinte relação para estimar o coeficiente de transferência de calor:

$$h = \frac{k_f}{d_v} Nu_s \quad (2.33)$$

sendo k_f a condutividade térmica do fluido (W/m·K), o número de Nusselt para a partícula (Nu_s), $Nu_s = 0,0282Re_s^{1,4}Pr_f^{0,33}$, se $0,1 \leq Re_s \leq 50$ ou $Nu_s = 1,01Re_s^{0,48}Pr_f^{0,33}$, se $50 \leq Re_s \leq 10.000$.

Para o coeficiente de transferência por radiação, tem-se a seguinte relação:

$$h_r = \left(\frac{\xi_b \xi_{viz}}{\xi_b + \xi_{viz} - \xi_b \xi_{viz}} \right) \frac{\sigma (T_b^4 - T_{viz}^4)}{(T_b - T_{viz})} \quad (2.34)$$

Sendo σ a constante de Stefan-Boltzmann; ξ_b a emissividade do leito e ξ_{viz} a emissividade da parede. Em geral, despreza-se a transferência de calor por radiação, a temperaturas inferiores a 700°C, porém quando se trabalha com a transferência via radiação IV, esta questão pode ser repensada.

2.4. Atributos de Qualidade do Produto

O pólen apícola é um material rico em açúcares e altamente higroscópico, logo constitui um rico substrato para o desenvolvimento de microorganismos. A presença de fungos e bactérias no intestino das abelhas e nos apiários onde o material é coletado, principalmente em ambientes tropicais úmidos, estão associados à qualidade microbiológica do pólen (FERREIRA, 2012). Dessa maneira, o consumo do pólen *in natura* não é recomendado, pois pode afetar a saúde do consumidor causando inchaço abdominal e diarreia.

A secagem adequada do pólen apícola coletado é indispensável para evitar a ocorrência de fermentações indesejáveis (NOGUEIRA *et al.*, 2012). Entretanto, Estevinho *et al.* (2012) destacam que é indesejável obter pólen com menos de 3% de umidade. Pode

ocorrer descoloração do material ou reações químicas, como a reação de Maillard e a oxidação lipídica, o que resulta em um produto deteriorado.

A Espanha foi um dos primeiros países a estabelecer especificações para o pólen apícola comercializado. Outros países como Argentina, Suíça, Bulgária (FEÁS *et al.*, 2012) também estabeleceram padrões oficiais de qualidade, já em Portugal, segundo Rocha (2013), não existem especificações para o pólen apícola.

No Brasil, existe uma legislação que padroniza a composição do pólen a ser comercializado. Os parâmetros requeridos pela legislação brasileira são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Parâmetros de Qualidade do Pólen Apícola segundo a Legislação Brasileira (Instrução Normativa Nº 3, de 19 de Janeiro de 2001)

Parâmetro	% m/m, b.s.
Umidade, Pólen Apícola	máximo 30%, b.u.
Pólen Apícola Desidratado	máximo 4%, b.u.
Açúcares Totais	14,5 a 55,0
Cinzas	máximo de 4
pH	4-6
Lípidios	mínimo de 1,8
Proteínas	mínimo 8
Fibras brutas	mínimo 2
Acidez livre	máximo 300 mEq/kg
Flavonóides	Presença

Fonte: BRASIL, 2001

i) *Aminoácidos essenciais*

O conhecimento do teor de proteínas e, principalmente, o de aminoácidos livres no pólen, pode indicar o frescor do produto e se o processo de secagem e armazenamento do pólen foi feito de forma adequada, pois o valor nutricional do pólen está relacionado à quantidade encontrada de aminoácidos essenciais no produto. Além disso, devido ao seu elevado teor de proteínas, o pólen pode sofrer reações de Maillard, reações resultantes da interação entre os aminoácidos e os açúcares contidos no material quando é aquecido, e perder o valor nutritivo rapidamente.

ii) Atividade de água

Todos os materiais biológicos mantêm uma relação de equilíbrio entre o seu teor de água e as condições do ambiente através da adsorção ou dessorção de umidade. Existem diferentes formas de a água integrar a constituição do material e Steele (2004) destaca a estreita relação entre o teor de umidade nos alimentos e o crescimento de microrganismos.

Existe a água inerente à composição do material, formando multicamadas. São duas camadas: a monomolecular, fortemente ligada a agrupamentos moleculares, e a polimolecular fixada à primeira por forças de Van der Waals. Tais camadas correspondem a baixos níveis de hidratação, biologicamente inertes e que não são removidos na secagem.

A um nível de hidratação mais elevado corresponde a água fracamente adsorvida. Esta é solvente nas reações químicas e enzimáticas internas e que é, em grande parte, removida na secagem.

Finalmente, entre os poros da matéria seca, encontra-se a água livre. Sua presença é inadmissível no armazenamento, pois favorece o crescimento microbiano (USTRA, 2005).

A composição química do produto influencia diretamente o processo de sorção de umidade. Segundo Brooker *et al.* (1992), grãos com elevado teor de óleo adsorvem menor quantidade de água do ambiente do que os grãos com alto teor de amido.

A atividade de água (a_w) é a relação entre a pressão de vapor da água em um material e a pressão de vapor de água pura à mesma temperatura. Os dados de teor de umidade de equilíbrio em função da atividade de água do material a uma dada temperatura fornecem uma curva chamada isoterma de sorção. O conhecimento das curvas de sorção também é indispensável para determinar o teor de água final necessário para estabilizar um produto, pois fornece o teor de umidade de equilíbrio, o qual determina o fim do processo de secagem. A diferença do teor de umidade inicial do material e do teor de umidade de equilíbrio representa a força motriz para a secagem.

Correia-Oliveira *et al.* (2008) avaliaram a atividade de água em amostras de méis e pólen apícola desidratado, produzidos no Estado de Sergipe ao longo do ano de 2007 nos municípios de Brejo Grande, Estância, Neópolis, Pacatuba e Tobias Barreto. De acordo com os autores, o pólen desidratado sergipano apresenta atividade de água variando entre 0,42 e 0,57 a_w e características nutricionais satisfatórias para o mercado nacional, entretanto há necessidade de maior controle da umidade do produto, pois as amostras provenientes de Brejo Grande, Estância e Pacatuba, não foram consideradas desidratadas, por apresentarem valores de atividade de água superiores ao recomendado.

iii) Cor

O pólen apícola é um material granular constituído por partículas de diferentes cores (amarelo, verde, laranja, castanho) em função da diversidade das espécies florais visitadas pelas abelhas. A presença de pigmentos, flavonóides ou carotenóides, determina a cor do grão de pólen (ROCHA, 2013), a qual é um importante parâmetro que evidencia a manutenção da qualidade físico-química dos grãos

Além de influenciar a percepção do consumidor, alterações da coloração dos grãos podem indicar degradação de compostos químicos de interesse no material que estão intimamente associadas ao sabor do produto beneficiado. No caso da secagem do pólen apícola, comumente o produto de cor mais escura indica que o material foi submetido a temperaturas superiores ao recomendado e por isso seu gosto é mais amargo.

Mudanças colorimétricas podem ser mensuradas através da leitura das coordenadas L^* , a^* e b^* do sistema Hunter que indicam a luminosidade do material, a faixa de cor do verde ao vermelho e a cor do material do azul ao amarelo, respectivamente (PONKHAM *et al.*, 2012).

De posse dos valores das coordenadas cromáticas podem ser determinados parâmetros de alteração de coloração. A diferença total dos parâmetros de cor (ΔE^*) do material seco é dada pela equação (PONKHAM *et al.*, 2012):

$$\Delta E^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (2.35)$$

Sendo:

$$\Delta L^* = L^* - L_o^* \quad (2.36)$$

$$\Delta a^* = a^* - a_o^* \quad (2.37)$$

$$\Delta b^* = b^* - b_o^* \quad (2.38)$$

Em que L^* é a luminosidade do material que varia entre 0 (preto) e 100 (branco), a^* é uma faixa de cor do verde ao vermelho e b^* indica a cor do azul ao amarelo do material. Os parâmetros a^* e b^* variam entre -60 a +60. O subscrito “o” indica o valor determinado da leitura da cor do material *in natura*.

Afonso Júnior e Correa (2003) monitoraram as coordenadas do sistema Hunter para avaliação da cor e da diferença da cor dos grãos de café e verificaram que grãos pré-processados por via seca tenderam uma maior perda de sua coloração durante o período de armazenagem, quando comparados ao material pré-processado por via úmida.

Saxena *et al.* (2012) estudaram a cinética de degradação da cor em fatias de jaca durante a secagem convectiva com temperaturas de 50, 60 e 70°C. Os autores verificaram que a degradação colorimétrica obedeceu uma cinética de primeira ordem e ressaltaram que o conhecimento da cinética de alterações na cor pode ser usado como uma ferramenta para monitoramento dos atributos de qualidade durante a secagem da jaca com ênfase no teor de carotenoides.

A partir dos valores das coordenadas retangulares do espaço de cor Lab, a^* e b^* , podem ser determinadas as coordenadas cilíndricas, croma (C^*) e *hue* (H^*) (PALOU *et al.*, 1999). A coordenada croma, também chamada índice de saturação, mensura a intensidade da cor, entre 0 (cores neutras) a 60 (cores vibrantes), e é calculada conforme a seguinte equação:

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2.39)$$

O ângulo *hue* (H^*) indica a tonalidade. O valor do ângulo H^* varia entre 0° e 360°, sendo que 0° ou 360° indica tonalidade vermelha, ao passo que valores de 90°, 180° e 270° indicam amarelo, verde e azul, respectivamente. O ângulo *hue* é determinado conforme a seguinte equação:

$$H^* = \text{tg}^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (2.40)$$

Argyropoulos *et al.* (2014) avaliaram as alterações colorimétricas sofridas pela erva-cidreira (*Melissa officinalis* L.) durante a secagem convectiva com temperaturas entre 30 e 90°C e selecionaram o ângulo *hue* como o parâmetro mais sensível das mudanças colorimétricas durante o processo, podendo ser utilizado como indicador da intensidade do escurecimento das folhas secas.

A partir da leitura das coordenadas cromáticas é possível também determinar o índice de escurecimento (*IE*) do material durante o processo de secagem de acordo com a seguinte equação (PALOU *et al.*, 1999):

$$IE = \frac{100(x - 0,031)}{0,17}; \text{ sendo } x = \frac{a^* + 1,75L^*}{5,645L^* + a^* - 3,012b^*} \quad (2.41)$$

O índice de escurecimento mede a magnitude da cor castanha no material e é um parâmetro que indica a ocorrência do escurecimento enzimático ou não enzimático, pois estes, conduzem à formação de pigmentos de cor marrom ou negra no material.

O escurecimento é enzimático quando ocorre a oxidação de compostos fenólicos em contato com o oxigênio na presença de uma enzima chamada polifenoloxidase. Esse tipo de escurecimento é característico do amadurecimento de frutas e hortaliças.

O escurecimento não enzimático envolve a caramelização de açúcares presentes no material ou as reações de Maillard, dentre outros (MANZOCCO *et al.*, 2000). As reações de Maillard ocorrem quando aminoácidos e açúcares redutores que integram a composição química do material reagem entre si produzindo melanoidinas.

A intensidade das reações de escurecimento não enzimático é função do teor e da natureza do carboidrato presente no material. Em alguns casos, a reação é desejável, pois torna o alimento mais atrativo através da intensificação do *flavor*, por exemplo, na produção do chocolate. Entretanto, segundo Laverde *et al.* (2011), associado ao desenvolvimento da cor castanha ocorre a perda do valor nutritivo relacionado às proteínas. Estes são os fatores de maior impacto na degradação dos alimentos associadas com o escurecimento.

A taxa de escurecimento não enzimático está intimamente relacionada à elevação da temperatura e ao tempo de aquecimento. Por isso, o impacto do aquecimento e armazenamento de alimentos sobre o escurecimento do produto tem sido amplamente estudado (ACEVEDO *et al.*, 2006; LAVERDE *et al.*, 2011).

A descrição cinética do escurecimento das partículas pode ser investigada ajustando-se equações cinéticas de ordem zero e de primeira ordem aos dados experimentais conforme as equações apresentadas a seguir (CHUTINTRASRI e NOOMHORM, 2007):

$$IE = C_o + \alpha_o \cdot t \quad (2.42)$$

$$\frac{IE}{IE_o} = \exp(\alpha_1 \cdot t) \quad (2.43)$$

em que IE é o valor do índice de escurecimento em determinado tempo, IE_o é o valor do índice de escurecimento do material *in natura* e C_o e α_o são as constantes da equação cinética de ordem zero e α_1 é a constante cinética de primeira ordem.

Jaiboon *et al.* (2009) avaliaram o efeito da temperatura do ar de secagem (90, 110, 130 ° C) e do tempo (30-120 min) na secagem em leito fluidizado sobre a qualidade do arroz

glutinoso. Os autores verificaram que o tempo de processamento não teve influência significativa na secagem a 90°C. O aumento da temperatura provocou intensificação do escurecimento.

Outro cuidado que deve ser tomado no processo de secagem refere-se à não homogeneidade do material desidratado. A bolota de pólen é formada por milhares de grãos aglutinados, tais grãos comumente são provenientes de diferentes origens botânicas, com características físico-químicas distintas. Além disso, no processamento do pólen, as faces da bolota nem sempre são expostas de maneira homogênea ao calor, ocorrendo secagem superficial da bolota, por isso Correia-Oliveira (2008) sugere o processamento do pólen na forma de pó.

2.5. Caracterização Física do Material Sólido

Yang (2003) ressalta que a caracterização de partículas constitui o primeiro passo em um processo envolvendo material particulado.

A importância do conhecimento das propriedades físicas do material no estudo da secagem consiste na influência dessas propriedades sobre o comportamento do material frente ao processo, e devem ser levadas em consideração para o adequado dimensionamento dos secadores e sistemas de armazenamento.

Além disso, visto que durante o processo de secagem de materiais biológicos frequentemente ocorre o fenômeno de encolhimento desses materiais, é interessante estabelecer a relação dessas propriedades com o teor de umidade do material.

2.5.1. Dimensões Características e Fatores de forma

Para análise do tamanho e forma das partículas, existem diversas técnicas, dentre elas, tem-se a análise granulométrica via peneiramento e a análise de imagens das partículas.

A análise granulométrica via peneiramento é o método mais comum e consiste em passar a amostra por uma série de peneiras em vibração a fim de obter a distribuição de tamanhos dos grãos. Allen (1997a) destaca fatores que podem afetar a precisão da análise por peneiramento: a presença de partículas de *mesh* muito próximo, a carga adicionada à peneira, propriedades físicas das partículas como coesão e alta umidade, o método de agitação das

peneiras, a forma das partículas. Além desses, o tempo de peneiramento tem efeito significativo na distribuição obtida.

Já a análise de imagens das partículas pode ser realizada através da fotografia da área projetada das partículas e permite obter diversos parâmetros referentes ao tamanho e forma dessas partículas. Allen (1997a) destaca o cuidado que deve ser tomado em relação à orientação da partícula no momento da captura da imagem. De acordo com o autor, as partículas em sua orientação mais estável exibem sua área máxima à imagem captada. Por isso, os valores das dimensões de uma partícula feitas com uso desta técnica são comumente maiores do que as realizadas por outros métodos.

Para partículas de forma irregular, o tamanho da partícula é definido com base em propriedades de referência. Keey (1992) explora a caracterização de materiais particulados e considera uma partícula como tendo três dimensões: o comprimento, L ; a largura, B e a espessura, T . Ele define algumas dimensões características:

O fator e que mensura o alongamento da partícula:

$$e = \frac{L}{B} \quad (2.44)$$

E o fator f que avalia o achatamento:

$$f = \frac{B}{T} \quad (2.45)$$

Keey (1992) define o diâmetro projetado, d_{proj} , como o diâmetro cujo círculo tem a mesma área da imagem projetada.

$$d_{proj} = \sqrt{\frac{4}{\pi} BL} \quad (2.46)$$

Segundo Allen (1997a), a separação por peneiramento é função de duas dimensões da partícula: a largura e a espessura, a menos que as partículas sejam excessivamente alongadas de forma que o comprimento influencie a passagem das partículas pela abertura da peneira.

O diâmetro de peneira (d_p) é definido por Yang (2003) como a largura da abertura do quadrado na peneira pelo qual a partícula passa. Keey (1992) destaca que, a relação entre o diâmetro projetado e o diâmetro de peneira é função do alongamento e do achatamento das partículas. Dessa forma, para partículas muito alongadas ou achatadas, a caracterização via

peneiramento subestima a magnitude do diâmetro projetado. Sendo assim, o diâmetro projetado é um pouco maior que a abertura da peneira (d_n) por onde as partículas passam.

A relação entre as duas grandezas é dada pela equação:

$$\frac{d_{proj}}{d_n} = \sqrt{\frac{8ef^2}{\pi(1+f^2)}} \quad (2.47)$$

O diâmetro volumétrico (d_v) é definido como o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula. Dado pela equação:

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}} \quad (2.48)$$

Em que V_p é o volume da partícula, que pode ser determinado pela técnica de picnometria.

Keey (1992) apresenta uma relação entre o diâmetro projetado e o diâmetro da esfera equivalente.

$$d_v = d_{proj} \sqrt[3]{\frac{6\alpha}{\pi}} \quad (2.49)$$

sendo α um coeficiente que só depende do material. Para partículas de quartzo, por exemplo, α é 0,27.

O diâmetro de Feret é definido por Yang (2003) como um diâmetro estatístico que representa o principal valor da distância entre pares de retas paralelas tangentes à linha projetada da partícula. É comum o emprego do diâmetro de Feret quando utiliza-se a análise de imagens.

Massarani (2002) define a esfericidade como o quociente entre a superfície da esfera, de mesmo volume que a partícula de superfície S_p :

$$\phi = \frac{S_e}{S_p} = \frac{\pi d_v^2}{S_p} \quad (2.50)$$

Sendo S_e a superfície da esfera de mesmo volume que a partícula.

Segundo Massarani (2002) a esfericidade é um fator de forma empírico que pode ser determinado pela técnica de permeamtria, através de um conjunto de medidas de vazão e queda de pressão efetuadas com a amostra no permeâmetro, de onde se obtém a permeabilidade (κ) do meio poroso. A esfericidade é dada então por:

$$\phi = \sqrt{\frac{36\beta\kappa(1-\varepsilon)^2}{\bar{d}_v^2\varepsilon^3}} \quad (2.51)$$

sendo β um fator adimensional conforme a seção transversal do duto.

Silva *et al.* (2005) empregaram a análise de imagens para determinação da esfericidade de partículas de areia britada. Para isso, os autores utilizaram a definição de esfericidade sendo a relação entre o diâmetro do círculo com uma área igual à projeção da partícula e o diâmetro do menor círculo circunscrito à partícula.

Já Sartori (1986) citado em Boeri (2007), utilizou picnometria para determinar a esfericidade de grãos de soja, milho e arroz, através da seguinte equação:

$$\phi = \frac{d_v}{d_l} \quad (2.52)$$

sendo d_l o diâmetro linear máximo da partícula, obtido via análise de imagens.

Yang (2003) apresenta outro fator de forma denominado circularidade ($\mathbb{C}$), que é a razão entre a circunferência do círculo que tem a mesma seção transversal da partícula e o perímetro da seção transversal. É um fator que também pode ser estimado através de análise de imagens e fornece a medida da axissimetria da partícula.

2.5.2. Massa Específica

De acordo com Keey (1992), a massa específica das partículas pode ser definida de três maneiras distintas.

A massa específica real é a razão entre a massa da partícula e o seu volume sólido real:

$$\rho_s = \frac{m_p}{V_s} \quad (2.53)$$

sendo ρ_s a massa específica real, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; m_p a massa da partícula, kg e V_s o volume real, excluindo todos os poros internos, m^3 .

A massa específica aparente relaciona a massa da partícula e o seu volume global (V_p), que abrange poros abertos e fechados:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (2.54)$$

sendo ρ_p a massa específica aparente $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e V_p o volume total, com os espaços vazios, m^3 .

A massa específica do leito é a relação entre a massa total do leito e o volume do leito empacotado (V_b):

$$\rho_b = \frac{m_T}{V_b} \quad (2.55)$$

sendo ρ_b a massa específica do leito, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; m_T a massa de material sólido, kg e V_b o volume de partículas no leito, m^3 .

Segundo Abdullah e Geldart (1999), a alta fricção entre as partículas resulta em uma baixa densidade de empacotamento, de modo que este valor pode sofrer significativas variações a depender da forma como o leito foi empacotado. Por isso, os autores descrevem duas maneiras de determinação da densidade de empacotamento.

No primeiro caso, as partículas são separadas por um filme de ar. Em seguida, o leito é posto em colapso através da interrupção da passagem de ar e a relação massa/volume do material acomodado é medida fornecendo a densidade de empacotamento aerado.

No segundo método, o rearranjo das partículas é obtido através de batidas no recipiente que contém o material poroso, obtendo-se a densidade de empacotamento compacto. A razão entre as densidades de empacotamento dos leitos aerado e compacto é chamada razão Hausner (HR), uma medida da coesão entre as partículas.

2.5.3. Porosidade

A porosidade da partícula relaciona o volume de vazios e o volume total da partícula (ALLEN, 1997b). A partir dos valores de massa específica real, massa específica aparente e massa específica do leito, pode-se obter a porosidade da partícula, a porosidade aparente e a porosidade total do leito.

A porosidade aparente da partícula relaciona o volume de poros abertos e o volume total da partícula e é expressa da seguinte forma:

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_s} \quad (2.56)$$

sendo ρ_p a massa específica aparente da partícula $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e ρ_s a massa específica real da partícula $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

A porosidade aparente do leito refere-se à razão entre os volumes vazios entre as partículas e o volume total do leito:

$$\varepsilon_b = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (2.57)$$

sendo ρ_b a massa específica do leito $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e ρ_p a massa específica aparente da partícula, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

A porosidade total do leito relaciona os volumes de poros abertos das partículas mais o volume de vazios entre as partículas e o volume total do leito e é expressa da seguinte forma:

$$\varepsilon_T = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (2.58)$$

sendo ρ_b a massa específica do leito $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e ρ_s a massa específica real $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.5.4. Permeabilidade

A permeabilidade é uma propriedade do leito que mensura a resistência que esse leito oferece à passagem do fluido. Esse valor é influenciado por propriedades físicas do material particulado, como a sua distribuição granulométrica, forma, densidade de empacotamento e teor de umidade.

O valor da permeabilidade de um leito pode ser determinada através da permeamtria.

De acordo com a forma quadrática de Forcheimmer:

$$-\Delta P = \frac{\mu}{\kappa} \tilde{q} + \frac{c\rho_F}{\sqrt{\kappa}} q^2 \quad (2.59)$$

sendo q a velocidade superficial média do fluido, κ a permeabilidade do leito e $-\Delta P$ a queda de pressão correspondente. Assumindo o escoamento unidimensional:

$$\frac{1}{q} \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) = \frac{\mu}{\kappa} + \frac{c\rho_F}{\sqrt{\kappa}} q \quad (2.60)$$

sendo L a espessura do leito.

Tomando-se valores de queda de pressão em função da vazão de fluido que escoar é possível a construção da curva $\frac{1}{q} \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)$ em função de q permite a determinação da permeabilidade do leito.

Massarani (2002) apresenta a Equação de Kozeny-Carman, que relaciona a permeabilidade do meio poroso a propriedades físicas do material, como o diâmetro das partículas, em um leito de seção transversal circular.

$$\kappa = \frac{(\phi d_v)^2 \varepsilon}{72(1 - \varepsilon)^2} \quad (2.61)$$

O pólen apícola é um material rico em muitos compostos de interesse. Com base no levantamento dos estudos existentes sobre o pólen, pode-se afirmar que muitas informações já existem sobre a composição química do material (MARCHINI *et al.*, 2006), principalmente a atividade antioxidante e antibactericida.

Uma grande preocupação dos estudos em geral consiste em avaliar a influência da origem botânica do pólen sobre essas propriedades (CARPES *et al.*, 2007; ESTEVINHO *et al.*, 2012; HUMAN e NICOLSON, 2006; LEJA *et al.*, 2007; NEVES *et al.*, 2009).

Muitas informações também podem ser encontradas sobre o processo de beneficiamento do material e a dificuldade enfrentada em atender os níveis de umidade requeridos para o adequado armazenamento do pólen e, sobretudo, exigidos pela legislação brasileira. Tal dificuldade tem motivado a determinação da atividade de água no pólen apícola e o estudo da influência das condições de armazenamento sobre a qualidade microbiológica do material (BARRETO *et al.*, 2005; OLIVEIRA, 2006; RIBEIRO e SILVA, 2007; CORREIA-OLIVEIRA, 2008).

Por isso, a necessidade de estudar o processo de secagem do pólen já é reconhecida e há estudos que avaliam a influência da temperatura sobre o material em termos da sua composição química (BARAJAS *et al.*, 2012) ou mesmo o emprego de técnicas inovadoras de secagem como a secagem elétrica assistida com energia solar (MIDILLI *et al.*, 2000).

Em vista das vantagens apresentadas pela secagem em leito fluidizado, há diversos estudos que empregam a técnica para secagem de diferentes materiais, biológicos ou não, e investigam a influência das condições operacionais sobre o processo (SILVA *et al.*, 2012; KAENSUP e WONGWISES, 2004).

A associação da secagem em leito fluidizado com a radiação infravermelho tem apresentado bons resultados, permitindo minimizar os danos de quebra causados pelo atrito na operação e garantindo a manutenção dos parâmetros de qualidade do material (DONDEE *et al.*, 2011). No entanto, a aplicação da técnica de secagem em leito fluidizado para grãos de pólen apícola ainda não foi investigada, e tampouco, o processo assistido por radiação infravermelho.

Dessa forma, visto que o material apresenta muitas peculiaridades, tanto relativas à composição química quanto à estrutura física (DIAS, 2006, CORREIA-OLIVEIRA, 2008; NOGUEIRA *et al.*, 2012; ESTEVINHO *et al.*, 2012; KATIFORI *et al.*, 2010), sua secagem é um desafio. A aplicação de um secador de leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho pode contribuir para o beneficiamento do pólen apícola, por meio do desenvolvimento de um processo com menor custo energético, que agregue valor e qualidade ao produto. Ademais, são escassas na literatura informações sobre os fenômenos de transferência envolvidos em processos inovadores combinando diferentes tecnologias de secagem, cujo conhecimento é de grande interesse técnico-científico.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados, o equipamento e as metodologias empregadas para a caracterização física dos grãos de pólen e para os estudos da fluidodinâmica e da secagem em leito fluidizado assistida por aquecimento infravermelho. Também são apresentados os procedimentos para a avaliação do consumo energético do processo e dos atributos de qualidade da matéria-prima e do produto desidratado.

3.1. Materiais

Os grãos de pólen apícola utilizados neste trabalho foram coletados de apiários situados na Associação dos Concessionários do Distrito de Irrigação do Platô de Neópolis (entre 10° 17' e 10° 24' S; entre 36° 36' e 35° 45' W) e cedidos pelo apicultor Aguinaldo Pereira de Araújo. Trata-se de um pólen cuja origem botânica é, predominantemente, de coqueiro (*Cocos nucifera* L.). A umidade inicial do pólen apícola recebido *in natura* ficou na faixa de 0,21 a 0,30 b.u.. Para assegurar a disponibilidade do material para os experimentos, após a classificação granulométrica, o material foi acondicionado em recipientes retangulares em alumínio, para cada fração granulométrica, em freezer doméstico a 5°C. A amostra do material adquirido é mostrada na Figura 3.1.



Figura 3.1: Amostra de pólen apícola obtida em apiário situado no Platô de Neópolis - SE.

3.2. Aparato experimental

Para investigar a secagem do pólen apícola uma típica unidade experimental de leito fluidizado foi projetada e construída, conforme esquematizado na Figura 3.2. O diferencial do secador construído está na incorporação de uma fonte de radiação infravermelho para o aquecimento das partículas no leito, em detrimento do aquecimento do ar através de sua passagem por um aquecedor elétrico.

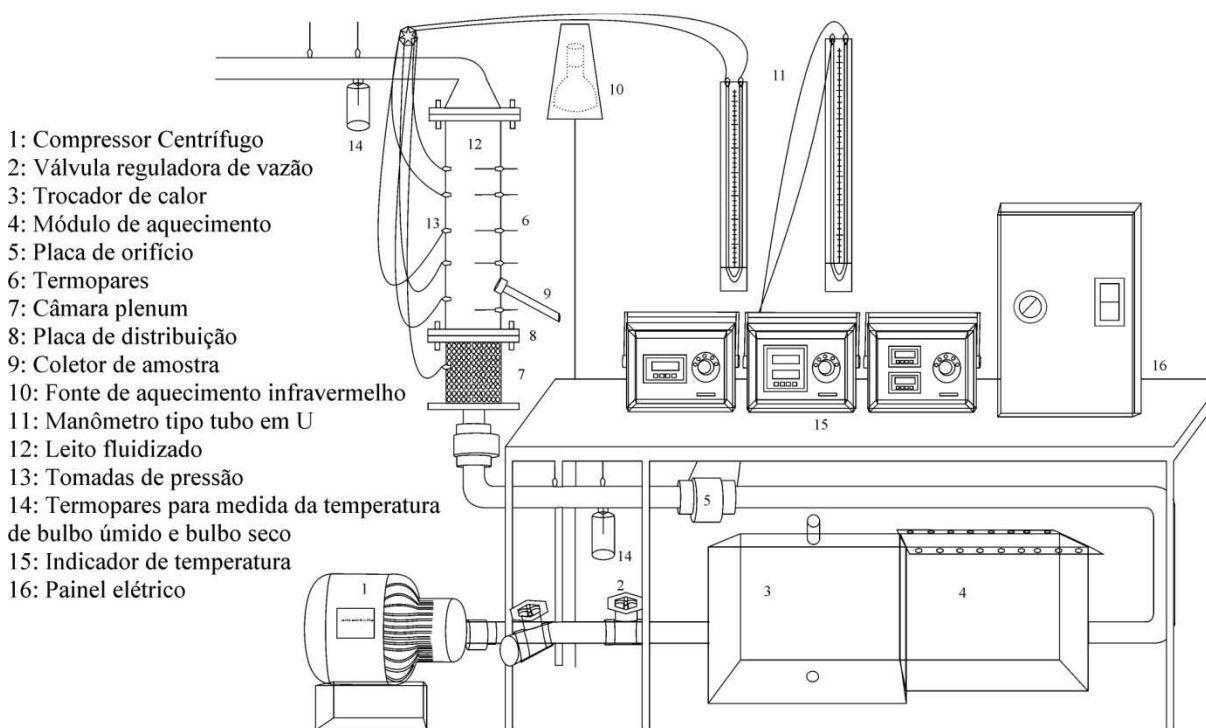


Figura 3.2: Esquema do aparato experimental

Na unidade apresentada na Figura 3.2, o fluxo de ar é fornecido através de uma tubulação de 2 in por um compressor centrífugo (marca Eberle, modelo B 100, 4 cv, 3470 rpm). A medida de vazão do ar é realizada através da leitura da diferença de pressão em um manômetro em U com água como fluido manométrico, acoplado a um medidor de vazão do tipo placa de orifício previamente calibrado. O ar de secagem, que pode ser aquecido por meio de um aquecedor elétrico de 4500 W, passa por uma câmara *plenum* e pela placa distribuidora, percolando o leito de partículas, com exaustão para a atmosfera. Para a coleta de partículas elutriadas do leito fluidizado foi instalado na saída do leito um filtro manga.

O leito consiste de uma coluna com 11 cm de diâmetro interno e 50 cm de altura, construída em acrílico transparente, para permitir a visualização do regime fluidodinâmico. O

plenum com 15 cm de comprimento e recheado com partículas esféricas foi acoplado ao leito por meio de flanges.

No flange que separa o *plenum* do leito foi instalado um distribuidor do tipo placa perfurada, com arranjo triangular, para assegurar um escoamento uniforme do ar. Essa placa perfurada foi recoberta com uma tela de aço inoxidável com abertura de 10 mesh para assegurar uma melhor distribuição de ar, bem como evitar a passagem de partículas muito finas, que podem ser geradas do choque mecânico entre os grãos.

O sistema possui cinco pontos para tomadas de pressão, sendo quatro pontos instalados ao longo do leito, acima do distribuidor de ar, e um ponto instalado no *plenum*, 30 mm abaixo do distribuidor de ar.

Para medidas de temperatura, seis termopares tipo PT-100 foram dispostos ao longo do sistema. O primeiro termopar foi inserido no *plenum* a 25 mm do da placa distribuidora para medir a temperatura do ar de entrada. Os demais termopares foram inseridos no interior da coluna a 2, 12, 24, 36 e 48 cm do distribuidor de ar, respectivamente, com o propósito de se obter a distribuição de temperaturas da mistura sólido-gás. As medidas de umidade do ar foram realizadas por meio de um psicrômetro instalado próximo à região de entrada do ar, a partir de medidas de temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco. Todas as medidas foram monitoradas num indicador de temperatura.

Uma sonda de amostragem, localizada a 3 cm da base do leito, foi utilizada para a retirada de grãos de pólen durante os experimentos, a fim de se medir o seu teor de umidade, pelo método da estufa a 60°C até massa constante. Para a pesagem das partículas foi utilizada uma balança analítica Sartorius, com precisão de 10^{-7} kg.

O sistema de aquecimento direto das partículas no leito foi desenvolvido incorporando no topo da coluna uma fonte de radiação infravermelho, constituída por uma lâmpada incandescente de 250 W (marca Ourolux, E27), emitindo raios IV em contracorrente à direção de escoamento do ar no leito. A potência de radiação IV foi regulada por meio de um regulador de voltagem.

O sistema de aquecimento IV montado apresenta flexibilidade de operação, permitindo regular a distância entre a fonte e a superfície do leito de partículas, bem como a potência com que a energia elétrica é fornecida para a lâmpada, de modo que diferentes intensidades de radiação podem ser empregadas.

3.3. Metodologia Experimental

3.3.1. Caracterização Física do Material

i) *Distribuição Granulométrica*

A distribuição do tamanho de partículas das amostras foi determinada pela técnica de peneiramento, utilizando as peneiras Tyler 6, 8, 10, 12, 14 e 32, correspondentes às aberturas de 3,32, 2,36, 1,70, 1,18 e 0,5 mm. De 100 a 200 g de uma amostra de 5 kg de pólen apícola foram adicionados por vez ao sistema de peneiras, dispostas em ordem decrescente de abertura, e submetidas à agitação mecânica para ser efetuada a separação do material em várias faixas granulométricas. Após 10 minutos de agitação, mediu-se a massa em cada uma das bandejas que formavam o conjunto.

A partir da distribuição granulométrica, o tamanho médio das partículas (diâmetro de Sauter) foi determinado pela equação:

$$d_{sv} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_p}} \quad (3.1)$$

$$\text{sendo } d_p = \frac{d_{n-1} + d_n}{2}$$

Com base na análise de peneiras, a distribuição foi subdividida em seis diferentes tamanhos de partículas. Para cada uma dessas frações, a densidade aparente e a densidade de empacotamento das partículas foram determinadas.

ii) *Tamanho e forma das partículas projetadas*

O tamanho e a forma dos grãos de pólen foram determinados via análise de imagens. O aparato utilizado para a aquisição de imagens é apresentado na Figura 3.3.

1. Câmera Fotográfica Digital
2. Suporte para a câmera fotográfica
3. Tripé
4. Régua de precisão
5. Superfície de exposição da amostra
6. Caixa com iluminação
7. Fonte de iluminação

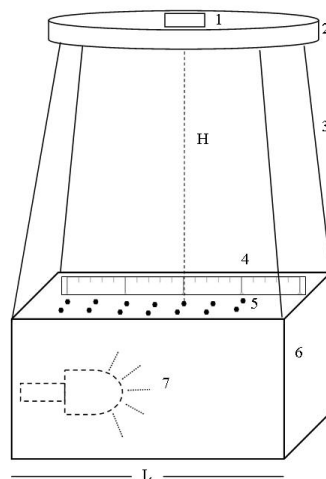


Figura 3.3: Aparato para aquisição de imagens das partículas.

Cinquenta partículas, de cada fração da distribuição granulométrica, foram distribuídas na superfície de exposição, tomando-se o cuidado de posicioná-las em sua configuração mais estável, que corresponde ao modo no qual a partícula é mantida sobre sua maior área, conforme mostra a figura abaixo.



Figura 3.4: Plano de estabilidade máxima do grão.

Fonte: ALLEN, 1997a.

Em seguida, a fonte de iluminação do sistema foi ligada e as imagens das partículas foram capturadas utilizando uma câmera digital. A distância entre a amostra de grãos e a câmera fotográfica foi de 60 cm.

A captura das imagens foi realizada em triplicata. As imagens obtidas foram analisadas com auxílio do software Image-Pro Plus ® versão 6.0, sendo determinados os diâmetros máximo, mínimo e médio, bem como o diâmetro de *Feret* e a circularidade das partículas ($\mathcal{C}$).

A partir dos valores obtidos, o achatamento das partículas (f) foi avaliado através da equação (2.47) e a esfericidade das partículas (ϕ) foi determinada como:

$$\phi = \frac{d_{proj}}{d_l} \quad (3.2)$$

em que d_{proj} é o diâmetro do círculo de mesma área da partícula projetada e d_l o diâmetro linear máximo da partícula, obtido via análise de imagens.

iii) *Propriedades físicas das partículas e do leito por permeamtria*

Para a fração predominante de partículas, foram determinadas as densidades do leito sob duas condições de empacotamento: frouxo e denso (GELDART, 1990). A partir da razão entre as densidades de empacotamento denso (ρ_{bT}) e frouxo (ρ_{bA}) foi calculada a razão Hausner, a qual é uma medida útil de coesão das partículas (ABDULLAH & GELDART, 1999).

A densidade aparente da partícula (ρ_p), o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula (d_v) e o diâmetro da esfera de mesma área específica que a partícula (d_{sv}), a esfericidade da partícula (ϕ) e porosidade do leito (ε) foram então determinados a partir de experimentos de permeamtria, ao se relacionar as quedas de pressão em leito fixo obtidas sob as duas condições de empacotamento empregadas.

De acordo com a metodologia proposta por Geldart (1990), os valores de queda de pressão em leito fixo em função da velocidade do ar devem ser ajustados através de uma relação linear, a qual passa pela origem do eixo. Os coeficientes angulares das curvas referentes ao leito denso (S_T) e ao leito frouxo (S_A) são empregados no cálculo da densidade aparente da partícula utilizando a seguinte equação:

$$\rho_p = \frac{\rho_{bT} - Y^{1/3} \rho_{bA}}{1 - Y^{1/3}} \quad (3.3)$$

$$\text{em que: } Y = \frac{S_A \rho_{bT}}{S_T \rho_{bA}}$$

A porosidade do leito pode ser calculada utilizando-se a Equação (2.57) e o diâmetro volumétrico (d_v) a partir da seguinte equação:

$$d_v = \left(\frac{6m_b}{\pi \rho_p} \right)^{1/3} \quad (3.4)$$

em que m_b é a massa do leito de grãos de pólen apícola. O diâmetro de Sauter (d_{sv}) foi determinado utilizando os dados de queda de pressão na Equação (2.12) e então a esfericidade foi determinada através da equação a seguir:

$$\phi = \frac{d_{sv}}{d_v} \quad (3.5)$$

Em seguida, os valores do diâmetro volumétrico das partículas foi empregado a fim de classificá-las de acordo com os critérios estabelecidos por Geldart (1972):

$$(\rho_p - \rho_f)d_v \leq 225 \text{ para partículas do grupo A;} \quad (3.6)$$

$$(\rho_p - \rho_f)d_v \geq 225 \text{ para partículas do grupo C;}$$

$$(\rho_p - \rho_f)d_v^2 \leq 10^6 \text{ para partículas do grupo B;} \quad (3.7)$$

$$(\rho_p - \rho_f)d_v^2 \geq 10^6 \text{ para partículas do grupo D.}$$

A densidade de empacotamento do leito foi determinada a partir da razão entre as medidas de diferentes cargas de grãos e o correspondente volume ocupado pelas partículas na coluna de secagem, na situação de leito fixo.

iv) *Ângulo de repouso*

O ângulo máximo do talude formado pelos grãos com o plano horizontal, o ângulo de repouso, foi determinado pelo modo estático e sem base fixa. 500 g de grãos de pólen foram descarregados através de um funil a uma altura de 0,15 m, formando um amontoado suficiente para determinar experimentalmente o ângulo de repouso em relação ao plano horizontal, por meio de relações trigonométricas. As análises foram realizadas em triplicata.

3.3.2. Estudo da fluidodinâmica do leito

O estudo da fluidodinâmica do leito constituído por grãos de pólen foi realizado com diferentes cargas de material, variando 0,1 a 1,8 kg através da fluidização com ar a temperatura média de $25,7 \pm 0,7$ °C e umidade relativa do ar de $UR = 49,5 \pm 1,8$ %. O comportamento fluidodinâmico do leito foi avaliado com base na determinação dos seguintes parâmetros: velocidade e queda de pressão na condição de mínima fluidização, altura e porosidade de mínima fluidização, e índice de fluidização.

i) *Determinação da velocidade mínima de fluidização*

A velocidade mínima de fluidização (v_{mf}) foi determinada a partir de medidas da queda de pressão no leito poroso em função da velocidade superficial do ar no leito segundo a metodologia proposta por Richardson (1971).

Dos valores de queda de pressão registrados no manômetro conectado ao leito foram subtraídos os valores correspondentes de queda de pressão através do conjunto, câmara *plenum* e placa de distribuição do ar. Para isso, a perda de carga provocada pelo conjunto foi quantificada com a coluna do leito vazia e fez-se o ajuste relacionando os valores de

velocidade do ar e da queda de pressão no sistema distribuidor utilizando-se o *software* Statistica 8 (APÊNDICE A).

A determinação foi realizada para cada faixa granulométrica de partículas conforme a classificação descrita no item 3.3.1.

Então, foram construídas as curvas de queda de pressão em função da velocidade do ar conforme ilustrado na Figura 3.5.

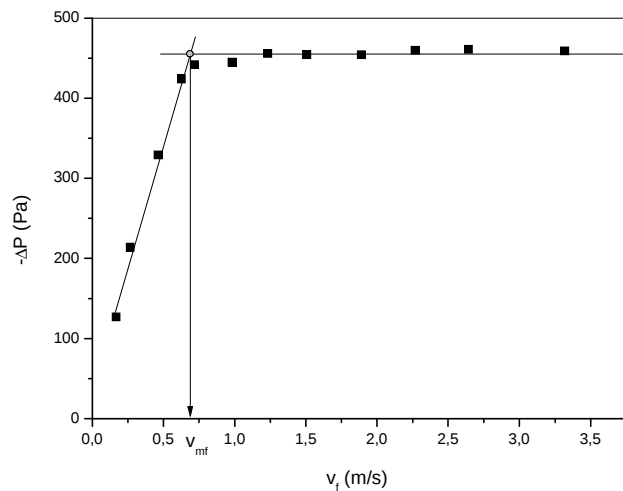


Figura 3.5: Determinação da velocidade mínima de fluidização a partir dos valores de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para a carga inicial de 500 g de partículas com $d_p = 2,03$ mm.

Segundo proposto por Richardson (1971), a partir dos valores de queda de pressão em função da velocidade do ar na desfluidização, em cada condição experimental foi determinado o ponto de interseção da curva de queda de pressão para o leito fixo e a linha horizontal que corresponde à operação em leito completamente fluidizado.

Antes de iniciar o ensaio fluidodinâmico, com material particulado, previamente pesado, e transferido para a coluna do leito com auxílio de um funil, procedeu-se a uma movimentação inicial das partículas através do aumento da velocidade do ar, até a condição de fluidização incipiente, quando a vazão de ar era interrompida para o repouso das partículas. Tal procedimento teve como propósito minimizar os efeitos de empacotamento das partículas sobre as curvas características dos leitos formados, a partir da adoção de um empacotamento frouxo das partículas (ESCUDERO e HEINDEL, 2011).

A altura inicial do leito (L_0) foi medida numa escala graduada fixada na coluna. Em seguida, o soprador foi ligado, anotaram-se os valores de temperaturas registrados pelos termopares localizados após a placa de orifício e na câmara *plenum*.

Dado início ao experimento, foram registradas os valores de queda de pressão bem como a altura do leito e as temperaturas registradas pelos termopares em função da vazão de ar. A queda de pressão correspondente à passagem do ar através do leito de partículas foi medida com auxílio de um manômetro em U com água como fluido manométrico e a correspondente vazão do ar foi medida através de um manômetro acoplado a um medidor de vazão do tipo placa de orifício previamente calibrado (APÊNDICE A).

Foram empregadas ainda diversas correlações empíricas apresentadas por Gupta *et al.* (2009) para a estimativa da velocidade mínima de fluidização conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Correlações empregadas para a predição da velocidade mínima de fluidização para os grãos de pólen apícola

Autor	Correlação
Noda <i>et al.</i> (1986)	$Re_{mf} = (0,114^2 + 0,0605 Ar)^{1/2} - 0,114$
Wen e Yu (1966)	$Re_{mf} = (33,7^2 + 0,0408 Ar)^{1/2} - 33,7$
Richardson (1971)	$Re_{mf} = (25,7^2 + 0,0365 Ar)^{1/2} - 25,7$
Saxena e Vogel (1977)	$Re_{mf} = (25,28^2 + 0,0571 Ar)^{1/2} - 25,28$
Babu <i>et al.</i> (1978)	$Re_{mf} = (25,25^2 + 0,06511 Ar)^{1/2} - 25,25$
Grace (1982)	$Re_{mf} = (27,2^2 + 0,0408 Ar)^{1/2} - 27,2$
Chitester <i>et al.</i> (1984)	$Re_{mf} = (28,7^2 + 0,0494 Ar)^{1/2} - 28,7$
Davies e Richardson (1966)	$Re_{mf} = 0,00078Ar$
Havsky e Bena (1967)	$Re_{mf} = \frac{0,00138Ar}{(19 + Ar)^{0,11}}$
Bourgeois e Grenier (1968)	$Re_{mf} = (24,46^2 + 0,03824 Ar)^{1/2} - 24,46$

Tannous <i>et al.</i> (1994)	$Re_{mf} = (25,83^2 + 0,043 Ar)^{1/2} - 25,83$
Barbosa <i>et al.</i> (1995)	$Re_{mf} = 0,0019Ar^{0,87}$

Em ambos os casos, mediram-se também a temperatura e umidade relativa ambientes, no início e no final do processo, a fim de avaliar as propriedades físicas do ar. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

ii) Determinação da porosidade

Durante os ensaios fluidodinâmicos foram também registrados os valores de altura do leito, em função da velocidade do ar. De posse destes valores, a porosidade foi determinada utilizando-se a equação a seguir (TANNOUS *et al.*, 1994):

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_b}{LA\rho_p} \quad (3.8)$$

sendo m_b a carga de sólidos alimentada ao leito, ρ_p a massa específica da partícula, A a área da seção transversal do leito e L a altura do leito.

iii) Qualidade da fluidização

Para avaliar a qualidade da fluidização dos grãos de pólen, os seguintes parâmetros foram calculados:

- Número de Froude (Fr)

O número de Froude (Fr) foi empregado como critério na classificação do tipo de fluidização. O número de Froude foi determinado a partir da seguinte expressão:

$$Fr = \frac{v_{mf}^2}{gd_p} \quad (3.9)$$

sendo g a aceleração da gravidade e d_p o diâmetro de peneira da partícula.

Para $Fr > 1$, ocorre fluidização do tipo agregativa e $Fr < 1$ indica a ocorrência da fluidização particulada.

- Índice de efetividade da fluidização (IF)

O Índice de efetividade da fluidização (IF) foi utilizado para mensurar o percentual do material particulado efetivamente fluidizado e foi calculado a partir da equação a seguir:

$$IF = \frac{-\Delta P}{\left(g \cdot m_b / A\right)} \quad (3.10)$$

sendo A área da seção transversal do leito; v_{mf} a velocidade mínima de fluidização; $-\Delta P$ a queda de pressão registrada no leito e m_b a massa de material particulado no leito.

3.3.3. Experimentos de Secagem

Após o estudo fluidodinâmico, foram realizados os experimentos de secagem infravermelho em camada fina, secagem em leito fluidizado convencional e em leito fluidizado assistido por radiação IV.

i) Secagem via radiação infravermelho em camada fina

Empregando-se a fonte de aquecimento do aparato experimental ilustrado na Figura 3.2, acoplou-se à fonte um suporte constituído em madeira, revestido internamente de material isolante a fim de executar-se a secagem via radiação infravermelho isoladamente. O aparato experimental resultante é apresentado na Figura 3.6.

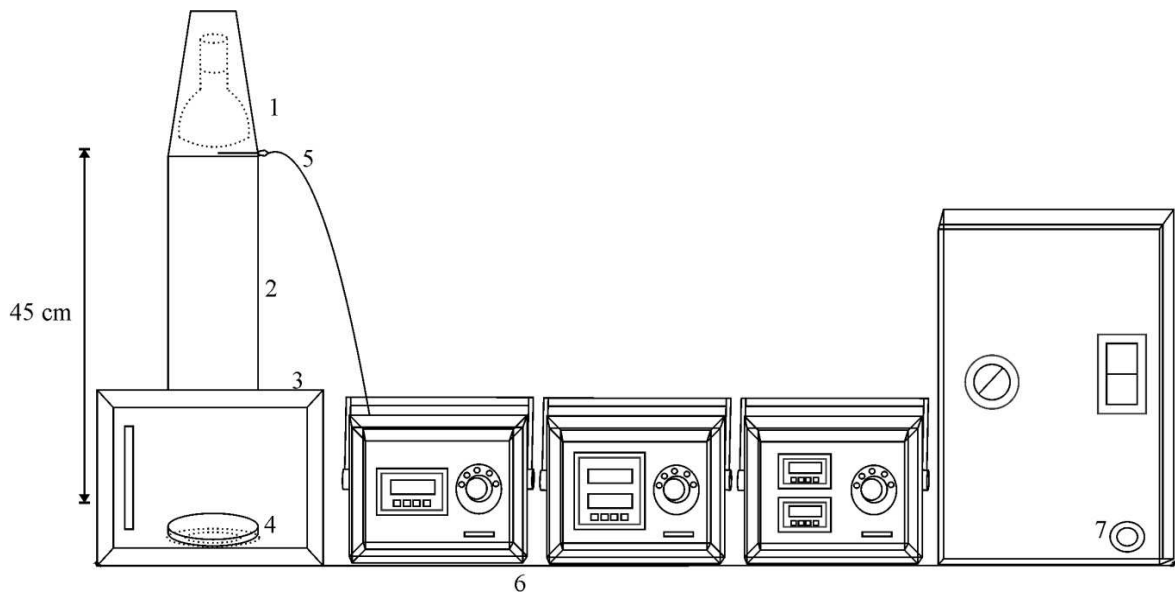


Figura 3.6: Aparato experimental utilizado durante a secagem infravermelho em camada fina.

(1) Fonte de aquecimento infravermelho (2) Suporte constituído de material isolante e refletivo (3) Suporte constituído de madeira (4) Suporte para a amostra constituído em alumínio (5) Termopar (6) Indicador de temperatura (7) Regulador de voltagem da lâmpada infravermelho.

A distância entre a fonte de aquecimento infravermelho e a superfície da amostra disposta em monocamada foi fixada em 45 centímetros, de modo a reproduzir a distância entre a lâmpada e a superfície do leito na condição de leito fluidizado.

A fonte de aquecimento consiste de uma lâmpada incandescente de 250 W com emissão de raios infravermelhos. A potência da lâmpada foi regulada por meio de um variac de modo a aplicar a intensidades de radiação (IR) de 100, 400 e 700 W/m².

Inicialmente, a fonte de aquecimento IV foi ligada, a intensidade regulada e esperou-se a estabilização do sistema de aquecimento. Após a estabilização da temperatura, uma bandeja de alumínio, contendo a amostra de 15 g de pólen apícola disposta em monocamada, foi colocada na câmara de secagem e exposta à radiação IV.

A temperatura da fonte de aquecimento infravermelho foi monitorada ao longo dos experimentos por meio de um termopar. Os valores médios de temperatura da fonte em função da intensidade de fluxo de energia radiante são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Temperatura média da fonte de aquecimento infravermelho nas diferentes potências de radiação empregadas.

$IR (W/m^2)$	$T_f (°C)$
100	102,4
400	141,6
700	180,6

Para a determinação da cinética de secagem do material, foram feitas pesagens da amostra de grãos em intervalos de tempo pré-determinados, obtendo-se a massa de água evaporada por diferença das pesagens efetuadas. A temperatura da superfície dos grãos foi também medida ao longo do processo com o auxílio de um pirômetro óptico digital (Impac, modelo IP850, precisão 0,1 °C). Ao final de cada experimento, a massa de sólido seco foi determinada pelo método direto da estufa, com temperatura de $(60 \pm 3,0)°C$ até massa constante.

ii) *Secagem em Leito Fluidizado Convencional*

Inicialmente, regulou-se a velocidade do ar, de modo a obter a condição de mínima fluidização, e a temperatura do ar na entrada do leito até a condição desejada (35, 45 e 55°C). Em seguida, 500 g de pólen apícola *in natura* foram transferidos, com auxílio de um funil, para a coluna do secador. Esta carga foi escolhida ponderando-se a carga mínima necessária

para proporcionar bons parâmetros de estabilidade do leito e a carga máxima a ser utilizada considerando as limitações de disponibilidade de matéria-prima para realização de todos os testes experimentais. Após a alimentação das partículas no leito, a vazão de ar era novamente regulada para que se garantisse a condição de mínima fluidização.

Ao longo do experimento, amostras foram coletadas do secador a fim de que a umidade do material pudesse ser medida em estufa a 60°C até massa constante.

As temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar de secagem na saída do secador foram medidas com auxílio de um psicrômetro. A temperatura do ar na entrada da coluna e da mistura gás-sólido foram medidas com termopares instalados ao longo do leito. Mediu-se ainda a temperatura da superfície das partículas utilizando-se um pirômetro infravermelho.

Após a realização do experimento, a distribuição do tamanho de partículas das amostras foi determinada pela técnica de peneiramento, utilizando as peneiras Tyler 6, 8, 10, 12,14 e 32, correspondentes às aberturas de 3,32, 2,36, 1,70, 1,18 e 0,5 mm, a fim de quantificar a formação de finos durante o processo de secagem.

iii) *Secagem em Leito Fluidizado Assistido por Radiação Infravermelho*

Os experimentos de secagem em leito fluidizado assistido pela radiação infravermelho foram conduzidos nas condições de mínima fluidização das partículas, expostas à intensidade de radiação de 100, 400 e 700 W/m². Foram realizados experimentos sem aquecimento do ar ($T_{ar}= 25^{\circ}\text{C}$) e com aquecimento do ar ($T_{ar}= 45^{\circ}\text{C}$).

Inicialmente, foram reguladas a velocidade do ar, de modo a obter a condição de mínima fluidização, e a temperatura do ar na entrada do leito até a condição desejada. Então, 500 g de pólen apícola *in natura* foram transferidos para a coluna do secador com auxílio de um funil. Após a alimentação das partículas no leito, a vazão de ar era novamente regulada para que se garantisse a condição de mínima fluidização. Em seguida, a fonte de aquecimento infravermelho, previamente acionada, era acoplada ao leito, dando-se início ao processo de secagem.

Ao longo do experimento, amostras foram coletadas a fim de que a umidade do material pudesse ser medida. Foram coletados ainda dados de cor do material com auxílio de um colorímetro portátil.

A temperatura do ar na entrada da coluna, da fonte de aquecimento IV e da mistura gás-sólido foram medidas com termopares. Mediu-se ainda a temperatura da superfície das partículas utilizando-se um pirômetro infravermelho.

Para quantificar a magnitude da pulverização das partículas durante o processo de secagem, a distribuição do tamanho de partículas das amostras foi determinada pela técnica de peneiramento, utilizando as peneiras Tyler 6, 8, 10, 12,14 e 32, correspondentes às aberturas de 3,32, 2,36, 1,70, 1,18 e 0,5 mm após a realização do experimento.

iv) *Tratamento e Análise dos dados cinéticos de secagem*

Os dados cinéticos de secagem foram inicialmente expressos em termos da temperatura e teor de umidade da partícula em função do tempo. A partir dos dados de teor de umidade em função do tempo, os valores de taxa de secagem ($-dX/dt$) foram obtidos por derivação numérica utilizando-se o software Origin[®]. Os dados do teor de umidade foram também convertidos em valores do adimensional de umidade (XR), definido como a razão entre a quantidade de água livre a ser removida num dado tempo e da água livre total disponível inicialmente:

$$XR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3.11)$$

em que X é o teor de umidade em base seca num dado tempo, X_0 é o teor de umidade inicial e X_e é o teor de umidade de equilíbrio. Os valores de XR foram então calculados ao longo de cada experimento e plotados em função do tempo.

A transferência de massa na secagem de pólen apícola empregando diferentes técnicas foi analisada e comparada em termos da difusividade efetiva, a qual foi determinada em cada condição operacional ao se aplicar a solução do Modelo Difusivo (Eq. 2.20) para descrever a cinética de secagem do material no período de taxa decrescente

A estimativa da difusividade efetiva (D_{eff}) foi feita via regressão não-linear pelo método dos mínimos quadrados utilizando o software Statistica 8[®]. Dez termos da série foram necessários para a estimativa.

A dependência de D_{eff} em relação a cada condição de secagem foi investigada ao plotar os valores obtidos em função da intensidade de radiação ou temperatura do ar de secagem e ajustar uma equação do tipo Arrhenius aos dados.

3.3.4. Avaliação do consumo energético

O consumo de energia de cada elemento que compõe o sistema de secagem (compressor, aquecedor elétrico, fonte de aquecimento IV) foi mensurado durante o processo

de secagem em leito fluidizado convencional e no processo assistido por radiação infravermelho.

A medida foi efetuada com auxílio de um multímetro digital (marca Minipa, modelo ET-3200A) através do qual foi determinada a quantidade de energia específica.

Durante o experimento de secagem, o multímetro digital foi conectado na fase da energia. Os picos de correntes foram registrados no início e no final do processo de secagem e os valores médios utilizados para análise.

De posse da corrente média consumida, do valor da tensão da rede elétrica e do tempo de secagem, foi determinado o consumo total de energia específica por unidade de massa de água removida, definido como:

$$e = \frac{P \cdot t}{m_w} \quad (3.12)$$

sendo e a energia específica em J kg^{-1} ; P a potência consumida no processo em W; o tempo de secagem, em s e m_w a massa de água removida, em kg.

3.3.5. Avaliação dos Atributos de Qualidade dos Grãos de Pólen

A análise da qualidade dos grãos de pólen frescos e secos foi feita a partir da determinação dos seguintes atributos: cor, atividade de água, carotenóides totais e teor de betacaroteno.

i) Cor

A cor dos grãos de pólen foi mensurada com auxílio de um colorímetro portátil (MiniScan Ez, marca Hunterlab) com fonte de luz D_{65} , ângulo de observação de 10° e abertura da célula de medida de 30 mm, com a escala L^* , a^* , b^* do sistema CIELab, efetuando-se as medidas das coordenadas cromáticas nos grãos do material *in natura* e ao longo de cada processo de secagem.

A calibração do colorímetro foi realizada com as placas, branca e preta, padrão, seguindo as instruções do fabricante.

De posse dos valores das coordenadas cromáticas foram determinados parâmetros de alteração de coloração. A diferença total dos parâmetros de cor (ΔE^*) do material seco foi determinada de acordo com a Equação (2.35).

A partir das coordenadas retangulares do espaço de cor Lab, foram determinadas as coordenadas cilíndricas, croma (C^*) e *hue* (H^*) de acordo com as Equações (2.39) e (2.40), respectivamente.

O índice de escurecimento (*IE*) dos grãos ao longo do processo de secagem foi determinado de acordo com a Equação (2.41) e a descrição cinética do escurecimento das partículas foi investigada ajustando-se equações cinéticas de ordem zero e de primeira ordem aos dados experimentais conforme as Equações (2.42) e (2.43), respectivamente.

A dependência da constante cinética de escurecimento de 1ª ordem em relação à temperatura foi investigada considerando uma função do tipo Arrhenius:

$$\alpha_1 = \alpha \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3.20)$$

sendo α um fator pré-exponencial (min^{-1}), E_a a energia de ativação (kJ mol^{-1}), R a constante universal dos gases ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e T a temperatura absoluta da superfície do grão.

ii) *Atividade de água*

As análises de quantificação da atividade de água nas amostras de pólen apícola foram realizadas no Laboratório de Análises Cromatográficas e Flavor (LAF), na Universidade Federal de Sergipe em um medidor de atividade de água AquaLab 4TEV à temperatura de 25°C.

iii) *Carotenóides Totais*

As análises de quantificação do teor de carotenóides totais nas amostras de pólen apícola foram realizadas no Laboratório de Análises Cromatográficas e FLAVOR (LAF), na Universidade Federal de Sergipe.

O teor de carotenóides foi determinado segundo a metodologia proposta por Lichtenthaler (1987). Foram pesados 2 g de pólen apícola, previamente macerados, foram adicionados 0,2 g de carbonato de cálcio e 7 mL de acetona a 80%. Homogeneizou-se a amostra. A mistura homogeneizada permaneceu acondicionada em geladeira por 24 h, protegida da luz. Depois o extrato foi filtrado diretamente no balão volumétrico de 25 mL envolto em papel alumínio. O resíduo do papel filtro foi lavado duas vezes com acetona a 80%. Completou-se o balão com acetona a 80%. A leitura foi realizada em espectrofotômetro da marca Shimadzu modelo UV-Mini 1240 em comprimentos de onda de 470, 646,8 e 663,2 nm.

O cálculo da concentração do teor de carotenóides (C_{car}) foi estimado a partir das seguinte equação:

$$C_{car} = \frac{1000A_{470} - (1,82C_a - 104,96C_b)}{198} \quad (3.21)$$

$$C_a = 12,25A_{663,2} - 2,79A_{646,8} \quad (3.22)$$

$$C_b = 21,50A_{646,8} - 5,10A_{663,2} \quad (3.23)$$

Sendo A_{470} , $A_{646,8}$ e $A_{663,2}$ os valores referentes a absorbância lida a 470, 646,8 e 663,2 nm, respectivamente.

iii) Teor de Beta-caroteno

As análises de quantificação do teor de betacaroteno nas amostras de pólen apícola foram realizadas no Laboratório de Análises Cromatográficas e FLAVOR (LAF), na Universidade Federal de Sergipe.

O processo de extração foi realizado conforme a metodologia proposta por Rodriguez *et al.* (1976), com algumas modificações feitas por Cardoso *et al.* (2009). Aproximadamente, 120 mL de acetona resfriada foram adicionados a 5 g de pólen apícola previamente macerado. Filtrou-se o material com acetona em um funil simples, utilizando-se papel de filtro, até o que o resíduo do filtro fosse incolor. Posteriormente, o filtrado foi transferido para funil de separação e foram adicionados 45 mL de éter de petróleo resfriado. Efetuou-se a lavagem da solução com 20 mL de água destilada por 3 vezes a fim de retirar toda a acetona. Em seguida, foi descartada a fase inferior, recolhendo a parte superior que foi concentrada com o auxílio de um rotaevaporador na temperatura de 33°C. Os pigmentos foram, então, ressuspensos com 2 mL de acetona e a suspensão formada foi filtrada em filtro de nylon 0,45 µm, e armazenada em frascos de vidro âmbar em congelador (aproximadamente, -5° C) até a análise.

As análises cromatográficas foram realizadas em um cromatógrafo líquido de Alta Eficiência da marca Shimadzu (Inc.,Japan) equipado com uma bomba quaternária (modelo 20-AT), um degaseificador (modelo DGU-20A₅), um detector de arranjo diodo (modelo SPD-M20A), um injetor automático (modelo SIL-20A) e um módulo de controle (modelo CBM-20A). A leitura foi feita em um comprimento de onda de 450 nm, com auxílio do software LC Solution versão 7.0 (Microsoft, Tulsa-Oklahoma, EUA). A fase móvel utilizada foi

acetonitrila:metanol:acetato de etila (80:10:10) a uma vazão de 1,0 mL/min, durante 35 min, com coluna C18 Shim-pack VP-ODS (150 mm × 4,60 mm I.D.; 5 µm de diâmetro), a 40°C, com volume de injeção das amostras de 20 µL.

Para a curva de calibração do betacaroteno foi feita uma solução estoque obtida pela diluição padrão de betacaroteno (Sigma-Aldrich C9750) com concentração 0,05 mg/mL. A partir da diluição dessa solução em concentrações iguais a: 0,025; 0,0125; 0,00625; 0,003125 e 0,0015625 mg/mL. O índice de correlação obtido foi de 0,9989 (APÊNDICE B).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos a partir da metodologia utilizada no trabalho.

Inicialmente, é apresentada a caracterização física dos grãos de pólen *in natura*. Em seguida, enfoca-se a fluidodinâmica do leito de partículas, bem como a cinética do processo de secagem IV, em leito fluidizado convencional e assistido por aquecimento infravermelho.

Finalmente, são feitas a apresentação e avaliação do consumo de energia de cada método de secagem, bem como de atributos de qualidade do material.

4.1. Caracterização Física

Os resultados típicos da distribuição granulométrica do pólen apícola *in natura* são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resultados da análise de distribuição granulométrica via peneiramento dos grãos de pólen apícola.

Peneiras (mesh)	d_{n-1} (mm)	d_n (mm)	d_p (mm)	w_i (%)	W (%)	$1-W$ (%)
-6+8	3,32	2,36	2,84	16,61	16,61	83,39
-8+10	2,36	1,70	2,03	55,70	72,31	27,69
-10+12	1,70	1,40	1,55	15,64	87,96	12,04
-12+14	1,40	1,18	1,29	5,79	93,75	6,25
-14+32	1,18	0,5	0,84	5,42	99,17	0,83
fundo	fundo	fundo	fundo	0,83	100,00	0,00

A partir dos dados dispostos na Tabela 4.1, foram construídas as curvas de distribuição de frequência e frequência cumulativa apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente.

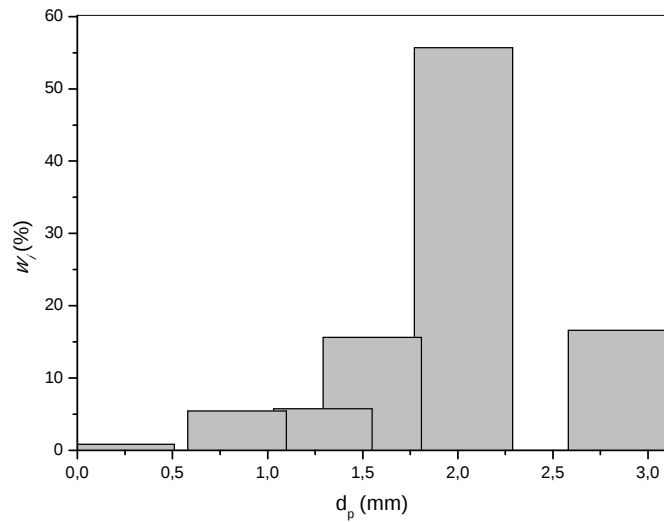


Figura 4.1: Distribuição de frequência obtida a partir da análise granulométrica via peneiramento da amostra de pólen apícola.

Conforme mostrado na Figura 4.1, a fração predominante (aproximadamente 56%) na amostra apresenta diâmetro médio de peneira de 2,03 mm. Observa-se que a diferença entre a fração predominante e as demais frações é acentuada.

Diante desse resultado, visando a minimização do efeito da variabilidade de tamanho das partículas sobre a fluidodinâmica, bem como sobre a transferência de calor e de massa durante a secagem em leito fluidizado, foram utilizadas nos experimentos de secagem apenas partículas com diâmetro médio de peneira de 2,03 mm.

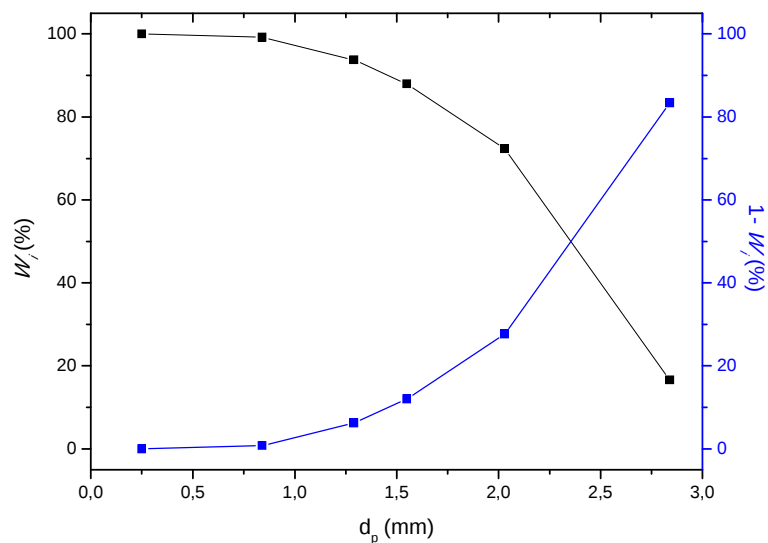


Figura 4.2: Distribuição cumulativa dos grãos de pólen apícola.

A partir da Figura 4.2, verifica-se que 72,31% da massa total da amostra corresponde a partículas maiores que 10 *mesh*, enquanto 27,69 % atravessaram essa peneira, sendo essa fração da massa de grãos de pólen formada por partículas menores que 1,70 mm de diâmetro. Somente 0,83% da massa total da amostra atravessam a peneira de 32 *mesh* e se depositam no fundo do equipamento.

Cremasco (2012) explica que o diâmetro médio de Sauter é comumente utilizado em associação a fenômenos interfaciais por mensurar a razão volume/área superficial das partículas de uma amostra. Para a amostra em estudo, o diâmetro de Sauter (d_{sv}) foi igual a 1,84 mm.

A análise de imagens permitiu obter os valores de diâmetro projetado médio (d_{proj}) e da circularidade ($\mathcal{C}$). Calcularam-se, então, o achatamento (f) e a esfericidade das partículas empregando-se as equações 2.47 e 3.2, respectivamente. Todos parâmetros supracitados encontram-se reunidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dimensões e fatores de forma determinados para os grãos de pólen.

d_p (mm)	d_{proj} (mm)	ϕ	$\mathcal{C}$	f
2,84	2,84	0,83	1,01	1,15
2,03	2,29	0,83	1,01	1,57
1,55	1,81	0,79	1,01	1,38
1,29	1,40	0,79	1,01	1,11
0,84	0,96	0,80	1,01	—

Os valores do diâmetro projetado apresentados na Tabela 4.2 são ligeiramente maiores que os valores correspondentes de diâmetro de peneira, isso reflete uma característica destacada por Keey (1992): para partículas achatadas, a caracterização via peneiramento subestima a magnitude do diâmetro projetado.

Os valores de f , calculados a partir da Equação 2.39, indicam o grau de achatamento das partículas. Tais valores ficaram na faixa de $1,30 \pm 0,21$ e mensuram a razão entre a largura das partículas e a espessura das mesmas, logo mostram que a largura dos grãos de pólen analisados é, em média, 30% superior à espessura.

Os valores de esfericidade obtidos via análise de imagem ficaram na faixa de $0,81 \pm 0,02$.

A qualidade da fluidização está diretamente relacionada com algumas propriedades intrínsecas das partículas como, densidade aparente, diâmetro médio, faixa de distribuição de tamanho e também com características da superfície dessas partículas.

Empregando-se a metodologia proposta por Geldart (1990) realizou-se a caracterização física das partículas pertencentes à fração predominante da distribuição granulométrica, ou seja, partículas com $d_p = 2,03$ mm. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores de propriedades físicas e estruturais obtidos por permeamtria do leito formado por partículas com $d_p = 2,03$ mm em diferentes teores de umidade dos grãos de pólen.

X (b.u.)	ρ_p (kg/m³)	ρ_{ba} (kg/m³)	ρ_{bt} (kg/m³)	ε_A	ε_T	d_v (mm)	ϕ	HR
21	1093,2	572,8	708,1	0,48	0,35	2,02	0,806	1,24
13	1073,7	581,7	675,6	0,46	0,37	2,04	0,844	1,16
7	1566,7	571,2	717,8	0,63	0,54	1,82	0,867	1,08

Os resultados obtidos são próximos daqueles determinados por Vizcarra-Mendoza *et al.* (1998). Para a faixa granulométrica em estudo, o valor de densidade de empacotamento determinada pelos autores foi de 771 kg/m^3 .

A razão Hausner (HR) relaciona a densidade aparente do leito denso, situação em que as forças interparticulares são minimizadas, em relação à do leito frouxo, que depende destas forças. Logo, trata-se de uma medida indireta da interação entre as partículas no leito e é um indicador da facilidade de escoamento do material particulado, sendo que quanto maior a razão HR mais coesivo é o material (ABDULLAH e GELDART, 1999; WONG, 2002).

Se HR é maior que 1,4, o pó é considerado muito coesivo. Os valores determinados são inferiores a 1,4 e indicam que o pólen apícola apresenta boa escoabilidade.

Os resultados concordam com a medida do ângulo de repouso feita para as partículas. O valor determinado foi de 26 a 28°. Abdullah e Geldart (1999), afirmam que ângulos de repouso inferiores a 30° indicam uma boa escoabilidade, materiais com ângulo entre 30 e 45° apresentam baixa coesão e alta coesão com valores superiores a 55°.

Utilizaram-se os critérios, que estão descritos pelas Equações 3.6 e 3.7, propostos por Geldart (1973) para classificar as partículas constituintes da amostra que foram submetidas à

secagem. Os valores de massa específica e diâmetro volumétrico obtidos via permeamtria foram usados para classificar as partículas segundo o diagrama de Geldart conforme apresentado na Figura 4.3.

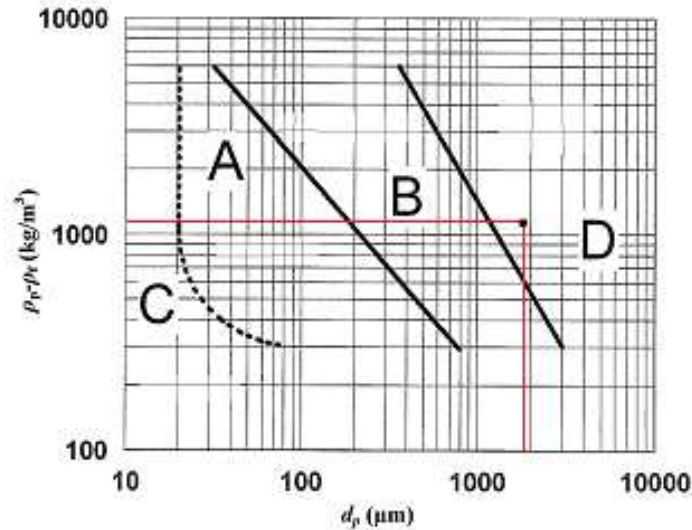


Figura 4.3: Classificação dos grãos de pólen apícola com $d_p=2,03$ mm segundo Geldart (1973).

Verificou-se que as partículas pertencem à classe D, as quais se caracterizam pelo grande tamanho ou elevada densidade, tendendo a apresentar a fluidização do tipo agregativa com surgimento de “sluggings”, produzindo jatos em vez de bolhas durante a fluidização.

4.2. Comportamento Fluidodinâmico do Leito

A partir dos dados coletados na realização dos ensaios fluidodinâmicos foram construídas as chamadas curvas características. Na Figura 4.4 são mostrados os valores típicos de queda de pressão em função da velocidade do ar para uma carga de partículas de 0,7 kg, obtidos a partir de experimentos realizados em triplicata.

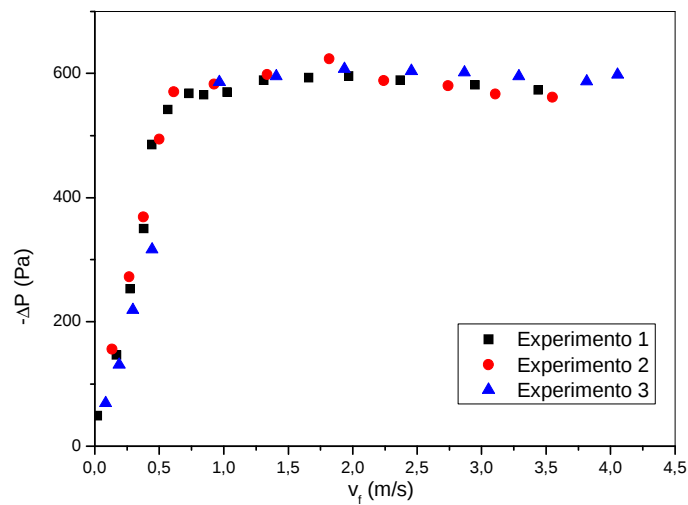


Figura 4.4: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para a carga inicial de 700 g de partículas com $d_p = 2,03$ mm.

A partir da Figura 4.4 é possível constatar a proximidade entre as réplicas, com diferenças entre os valores de $-\Delta P$ inferiores aos erros de medida. Isto indica que os resultados obtidos referentes ao comportamento fluidodinâmico são reproduzíveis e que, portanto, a metodologia experimental empregada, principalmente no que tange ao empacotamento do leito, mostrou-se adequada para realizar o estudo fluidodinâmico.

Pode ser observado ainda através da Figura 4.4, um comportamento típico de leito fluidizado, conforme descrito por Kunii e Levenspiel (1991). Há a presença de uma região de leito fixo, com a queda de pressão aumentando linearmente com a velocidade do ar. Quando a força de arrasto exercida sobre o material particulado é suficiente para suspender o leito, têm-se as condições de mínima fluidização. Com o aumento da velocidade do ar, a perda de carga permanece praticamente constante e igual ao peso aparente do material particulado por unidade de área do leito caracterizando a região de leito fluidizado.

Nota-se que não foi observada a existência de um pico de queda de pressão decorrente do efeito das forças atrativas interparticulares. Isso significa que no leito em estudo não foi necessária energia adicional do fluido para superar a força coesiva entre as partículas e causar a expansão do leito. De acordo com Rhodes (1998), a presença desse pico é marcante em leitos compactados. A não ocorrência do pico pode ser atribuído, portanto, à técnica de empacotamento frouxo adotada.

Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas de queda de pressão em função da velocidade do ar durante a fluidização e a desfluidização do leito de grãos de pólen, em ensaios realizados com a carga de 1,0 kg.

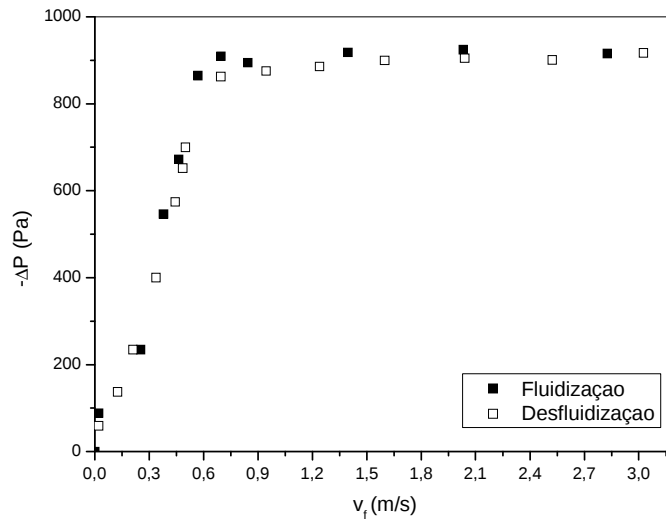


Figura 4.5: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para a carga inicial de 1000 g de partículas com $d_p = 2,03$ mm e teor de umidade de $10,5 \pm 3,5$ % b.u..

Como esperado, os valores de queda de pressão para as velocidades decrescentes do ar, na região de leito fixo, foram inferiores aos valores registrados com velocidades crescentes, o que se deve ao fato de, na desfluidização, não haver influência da compactação do leito. Entretanto, destaca-se que a histerese observada não foi significativa.

Para essa condição de carga inicial igual a 1000 g, verificou-se ainda uma mudança no coeficiente angular da reta de leito fixo nos primeiros três pontos. Gomide (1980) explica que essa mudança corresponde à transição do escoamento laminar através do material estático para o regime turbulento.

A análise da influência do tamanho das partículas foi feita construindo-se as curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial decrescente do ar apresentadas nas Figuras 4.6.

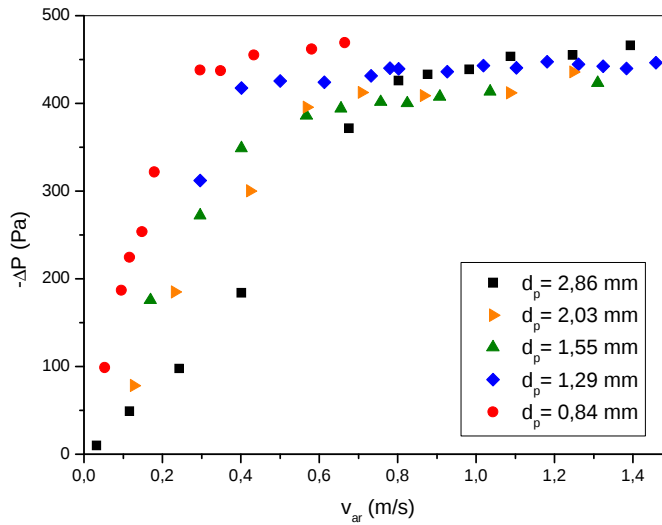


Figura 4.6: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, para diferentes tamanhos de partícula com carga inicial de 500 g para um teor de umidade de $10,5 \pm 3,5$ % b.u..

Observou-se o comportamento típico da queda de pressão em relação à velocidade do ar para todas as partículas. Com base na Figura 4.6, também pôde ser observado que o aumento do diâmetro das partículas conduziu a uma menor inclinação da reta dos pontos de leito fixo. Para uma velocidade do ar de 0,2 m/s, a queda de pressão no leito formado com partículas de $d_p = 2,84$ mm é de 76,7 Pa, já no leito formado com partículas de $d_p = 0,84$ mm, a queda de pressão é 3,6 vezes maior (351,2 Pa). Isso ocorreu porque o aumento do tamanho das partículas implica no aumento da permeabilidade do leito (conforme Equação 2.61), ou seja, há uma menor resistência à passagem do ar no leito, de modo que a queda de pressão é menor.

Na região de leito fluidizado, os valores de queda de pressão alcançaram o mesmo patamar, cujo valor médio foi de: $-\Delta P = 448,82$ Pa. Como os experimentos foram realizados com a mesma carga, a queda de pressão na fluidização é praticamente a mesma, independente do tamanho de partícula.

Os parâmetros de mínima fluidização e os índices de qualidade de fluidização para os experimentos realizados no estudo da influência do tamanho dos grãos de pólen estão listados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros fluidodinâmicos para o leito com carga inicial de 500 g formado por partículas de diferentes tamanhos com teor de umidade entre 15 ± 5 % b.u..

Peneira (mesh)	d_p (mm)	$-\Delta P_{mf}$ (Pa)	v_{mf} (m/s)	Fr	IF (%)
8	2,84	$435,4 \pm 12,7$	$0,864 \pm 0,073$	26,79	$83,6 \pm 2,5$
10	2,03	$406,1 \pm 28,9$	$0,655 \pm 0,051$	21,57	$78,9 \pm 6,0$
12	1,55	$404,1 \pm 26,9$	$0,506 \pm 0,036$	16,92	$77,6 \pm 5,2$
14	1,29	$404,0 \pm 11,3$	$0,460 \pm 0,014$	16,70	$77,5 \pm 2,2$
32	0,84	$434,8 \pm 63,8$	$0,267 \pm 0,025$	5,63	$83,5 \pm 9,6$

Verificou-se o aumento da velocidade mínima de fluidização com o aumento do tamanho da partícula. Isto ocorre, pois as forças inerciais associadas a partículas de maior diâmetro são maiores, sendo assim é necessário um incremento na energia cinética para provocar o deslocamento dessas partículas. Resultados similares foram obtidos por Freire *et al.* (2008) e Gauthier *et al.* (1999).

Vizcarra-Mendoza *et al.* (1998) realizaram o estudo do comportamento fluidodinâmico dos grãos de pólen apícola em leito fluidizado. Para partículas entre 8 e 10 mesh, os autores relataram que a velocidade mínima de fluidização foi de 0,85 m/s. O valor determinado neste estudo foi inferior (0,655 m/s), mas é necessário considerar o teor de umidade que não foi informado por Vizcarra-Mendoza *et al.* (1998).

O índice de efetividade da fluidização (IF) mensura a razão entre a queda de pressão e o peso por unidade de área. Delebarre *et al.* (2004) explica que um valor de IF próximo da unidade corresponde à situação em que o peso total do leito está fluidizado, sem zonas mortas ou efeito de canalização. Os índices determinados ficaram na faixa de $80,2 \pm 3,1$, evidenciando boa fluidização em todos os casos.

Através do cálculo do número de Froude (Fr) foi possível, para cada condição, identificar o tipo de fluidização. Os valores obtidos indicaram que, em todos os casos, a fluidização foi agregativa, pois $Fr > 1$. A fluidização agregativa caracteriza-se pela formação de bolhas e “slugging”, o que significa que a energia cinética das partículas supera a energia inercial. Além disso, verificou-se que com o aumento do diâmetro das partículas, o número de Froude aumenta significativamente evidenciando que mais agregativa se torna a fluidização. Neste ponto, destaca-se que trata-se de um material indicado para aplicação do escoamento em jorro.

Os valores da velocidade mínima de fluidização preditos pelas correlações empíricas apresentadas na Tabela 3.1 e dos desvios em relação aos dados experimentalmente obtidos estão dispostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Valores experimentais e preditos de velocidade mínima de fluidização para os grãos de pólen apícola.

d_p (mm)	1,29		1,55		2,03	
$v_{mf,exp}$ (m/s)	$0,460 \pm 0,014$		$0,506 \pm 0,036$		$0,644 \pm 0,034$	
Correlação	$v_{mf,pred}$ (m/s)	DVM (%)	$v_{mf,pred}$ (m/s)	DVM (%)	$v_{mf,pred}$ (m/s)	DVM (%)
Noda <i>et al.</i> (1986)	0,438	4,9	0,563	11,3	0,759	17,8
Wen e Yu (1966)	0,185	59,8	0,272	46,2	0,417	35,2
Richardson (1971)	0,197	57,2	0,283	44,0	0,425	33,9
Saxena e Vogel (1977)	0,274	40,3	0,387	23,4	0,570	11,6
Babu <i>et al.</i> (1978)	0,301	34,6	0,423	16,4	0,618	4,0
Grace (1982)	0,208	54,8	0,300	40,8	0,450	30,2
Chitester <i>et al.</i> (1984)	0,233	49,2	0,335	33,7	0,501	22,2
Davies e Richardson (1966)	0,324	29,5	0,536	5,9	0,973	51,1
Havsky e Bena (1967)	0,173	62,4	0,270	46,6	0,460	28,6
Bourgeois e Grenier (1968)	0,209	54,7	0,299	41,0	0,445	30,9
Tannous <i>et al.</i> (1994)	0,222	51,8	0,317	37,3	0,473	26,6
Barbosa <i>et al.</i> (1995)	0,191	58,4	0,296	41,4	0,498	22,7

Assim como Gupta *et al.* (2009), observou-se que, de uma maneira geral, os valores da velocidade mínima de fluidização determinados a partir das correlações são menores que os valores obtidos experimentalmente.

Para partículas com $d_p = 1,29$ mm, a correlação que forneceu os valores mais próximos foi a de Noda *et al.* (1986), com desvio médio de 4,9%, e cuja capacidade de predição diminuiu com o aumento do tamanho dos grãos de pólen. Os autores desenvolveram a correlação em estudo com misturas binárias de partículas de diferentes formas. Foram usadas partículas grossas tais como pedaços de madeira, borracha, esferas de vidro, esferas de ferro, sementes de soja e feijão e finas como de vidro.

Para partículas com $d_p = 2,03$ mm, a correlação mais adequada foi a de Babu *et al.* (1978) com 4,0 % de desvio médio dos valores preditos. Os autores estudaram a fluidização em gaseificadores de carvão de partículas com diâmetro entre 50 e 2870 μm . O desvio associado a essa correlação aumenta com a redução do diâmetro da partícula.

Destaca-se, no entanto, que estas foram as duas correlações mais adequadas para os dados experimentais, seguidas da correlação de Saxena e Vogel (1977) com erros de 11,3; 18,3 e 25,1%, respectivamente.

A comparação dos valores estimados via correlação e dos dados experimentais é apresentada na Figura 4.7.

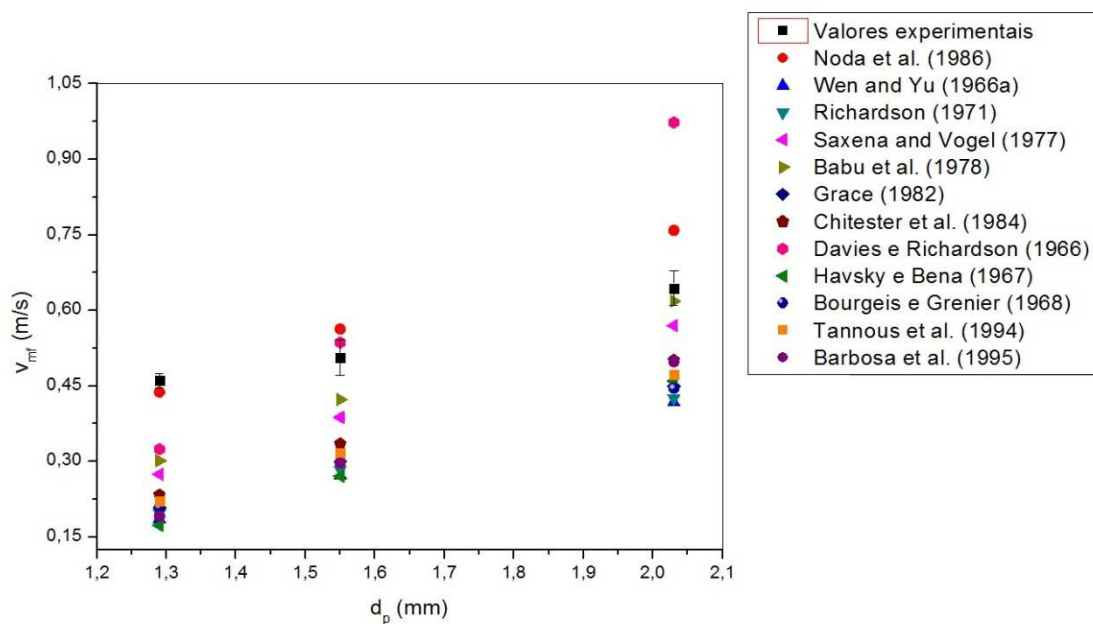


Figura 4.7: Valores experimentais e preditos da velocidade mínima de fluidização para os diferentes tamanhos de grãos de pólen.

O teor de umidade pode influenciar a coesão entre os grãos de pólen, além disso, a redução do teor de umidade durante o processo de secagem pode provocar alterações do

comportamento fluidodinâmico do material. Em razão disso, buscou-se investigar a influência do teor de umidade nos parâmetros fluidodinâmicos do pólen.

As curvas de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar para partículas em diferentes teores de umidade são apresentadas na Figura 4.8, enquanto os parâmetros de mínima fluidização e os índices de qualidade de fluidização para os experimentos realizados no estudo da influência do teor de umidade dos grãos de pólen estão listados na Tabela 4.6.

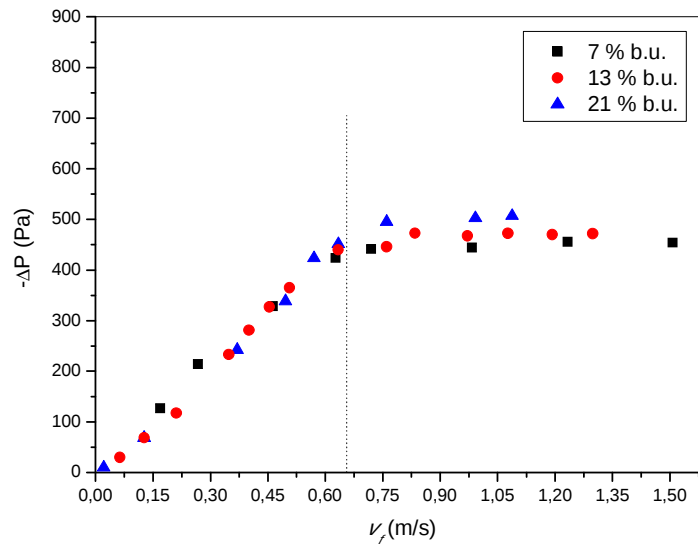


Figura 4.8: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para diferentes teores de umidade iniciais do pólen com $d_p = 2,03$ mm e carga inicial de 500g.

Tabela 4.6: Parâmetros fluidodinâmicos para uma carga inicial de 500g de partículas com $d_p = 2,03$ mm em diferentes teores de umidade.

Teor de Umidade (% b.u.)	ρ_{bA} (kg/m ³)	$-\Delta P_{mf}$ (Pa)	v_{mf} (m/s)	IF (%)
7	717,8	418 ± 20	0,634 ± 0,050	81,6 ± 4,5
13	581,7	465 ± 10	0,609 ± 0,031	83,3 ± 0,4
21	572,8	505 ± 34	0,691 ± 0,002	82,1 ± 0,8

Kashaninejad *et al.* (2010) estudaram o comportamento fluidodinâmico de pistache em cinco níveis de teor de umidade. Os autores mantiveram fixa a razão L/D e relataram o aumento na queda de pressão com o aumento do teor de umidade devido à redução na porosidade do leito e, consequentemente, a redução da permeabilidade. Para o caso dos grãos

de pólen, com base na Figura 4.8, verificou-se que não houve diferença significativa no comportamento fluidodinâmico das partículas no leito para a faixa de teor de umidade investigada (7 a 21% b.u.).

Para essa mesma faixa de teor de umidade, resultados similares foram obtidos por Wormsbecker e Pugsley (2008) em seu estudo sobre o efeito da umidade no comportamento fluidodinâmico de partículas de placebo com teor de umidade de 5 a 30% b.u.. Os autores relataram o aumento, tanto da velocidade e da porosidade mínima de fluidização em função do teor de umidade somente em teores superiores a 20% b.u.

Dessa maneira os parâmetros de mínima fluidização do material, conforme apresentado na Tabela 4.6, também não sofreram influência do teor de umidade, de modo que a velocidade mínima de fluidização apresentou valor médio de $0,645 \pm 0,042$ m/s.

As curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para diferentes massas iniciais de material particulado alimentadas no leito são apresentadas na Figura 4.9 e na Tabela 4.7, são apresentados os parâmetros de fluidização, para cada carga inicial.

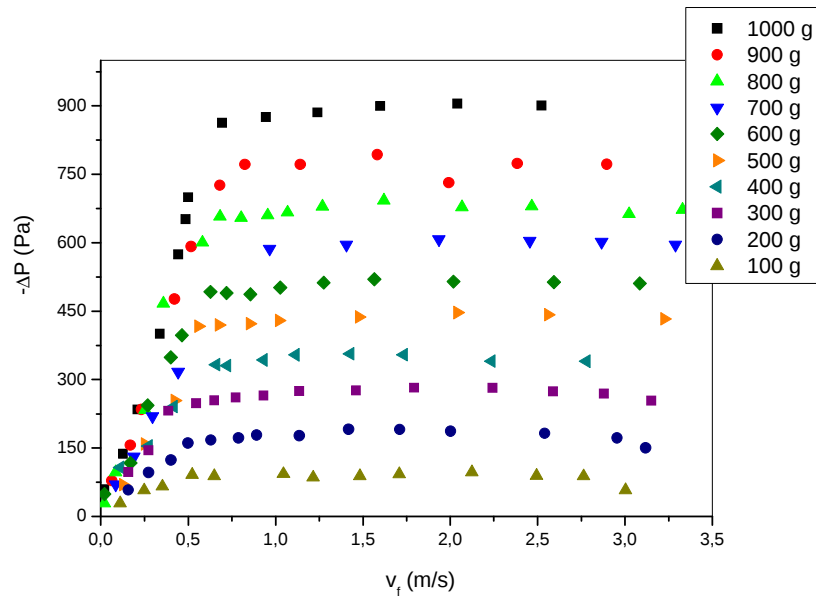


Figura 4.9: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, para diferentes cargas iniciais de partículas com $d_p = 2,03$ mm com teor de umidade de $10,5 \pm 3,5\%$ b.u..

Tabela 4.7: Parâmetros fluidodinâmicos determinados experimentalmente em diferentes cargas do leito e razões L/D .

Carga Inicial (g)	L/D	W/A_t (Pa)	$-\Delta P_{mf}$ (Pa)	v_{mf} (m/s)	IF (%)
100	0,1	104	86 ± 10	$0,494 \pm 0,015$	$83,0 \pm 9,5$
200	0,3	208	159 ± 19	$0,493 \pm 0,072$	$76,7 \pm 9,3$
300	0,4	313	245 ± 32	$0,477 \pm 0,033$	$79,0 \pm 10,3$
400	0,5	417	326 ± 6	$0,653 \pm 0,043$	$79,2 \pm 2,8$
500	0,7	521	406 ± 29	$0,655 \pm 0,051$	$78,9 \pm 6,0$
600	0,9	625	473 ± 19	$0,621 \pm 0,085$	$77,1 \pm 3,8$
700	1,0	729	513 ± 54	$0,600 \pm 0,015$	$72,3 \pm 7,1$
800	1,2	834	615 ± 22	$0,617 \pm 0,069$	$77,1 \pm 2,2$
900	1,2	938	724 ± 76	$0,690 \pm 0,061$	$79,2 \pm 5,9$
1000	1,4	1042	785 ± 78	$0,677 \pm 0,112$	$77,7 \pm 5,5$
1422	2,0	1482	1377 ± 61	$0,743 \pm 0,013$	$93,9 \pm 1,3$
1771	2,5	1846	1564 ± 172	$0,782 \pm 0,016$	$84,7 \pm 6,8$

Com base na Figura 4.9, como esperado, verificou-se que a queda de pressão registrada no leito aumentou com o aumento da massa de material particulado alimentada ao leito, de modo que quando a carga é aumentada de 100 g para 1000 g a perda de carga é oito vezes superior. Tal fato condiz com a explicação dada por Pell (1990) de que no estado de leito fluidizado a linha horizontal da curva de queda de pressão corresponde à grandeza peso de material particulado por unidade de área da seção transversal do leito (W/A_t). Entretanto como nem todo o material torna-se fluidizado, a queda de pressão registrada no leito é, normalmente, inferior ao peso do leito.

De semelhante modo à influência da carga sobre a queda de pressão, destaca-se neste ponto o efeito da profundidade sobre a queda de pressão na região de leito fixo. Para uma velocidade de ar de 0,2 m/s, a queda de pressão através do leito com $L/D = 0,3$ é 73,9 Pa e a queda de pressão no leito com profundidade $L/D = 0,9$ é de 156,1 Pa. Duplicando-se a velocidade do ar, a queda de pressão através do leito com $L/D = 0,3$ aumenta 67% (123,5 Pa), enquanto a perda de carga registrada no leito com $L/D = 0,9$ aumenta para 349,1 Pa, o que corresponde a um aumento de 124%. Assim, através da inclinação da reta de leito fixo, verificou-se que o aumento da profundidade do leito provoca o aumento da resistência à

passagem do ar de modo que a queda de pressão aumenta de maneira mais pronunciada com o aumento da velocidade do ar. Tal comportamento foi também verificado por Kashaninejad *et al.* (2010).

Na Figura 4.10, é mostrada a variação da velocidade mínima de fluidização em função da massa de pólen alimentada ao leito, a partir da qual podem ser verificados três patamares de valores de velocidade mínima de fluidização.

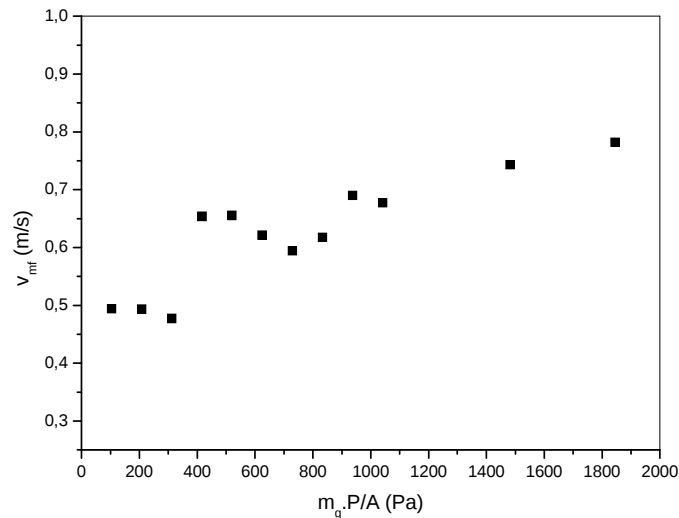


Figura 4.10: Velocidade mínima de fluidização para diferentes cargas iniciais do leito particulado de partículas com $d_p = 2,03$ mm com teor de umidade de $10,5 \pm 3,5$ % b.u..

Com base na Tabela 4.7 e na Figura 4.10, para cargas entre 400 e 1000 g, não há influência da carga inicial sobre a velocidade mínima de fluidização, cujo valor médio foi de $0,637 \pm 0,031$. Tal comportamento está de acordo com os resultados obtidos por Escudero e Heindel (2011), Shaul *et al.* (2012), Puspasari *et al.* (2013) e Shao *et al.* (2013).

Considerando as cargas iniciais inferiores a 400 g, verificou-se que a velocidade mínima de fluidização é, em média, 23% menor. E para cargas superiores, resultando em leitos com profundidade de $L/D > 2$, a velocidade mínima de fluidização é $0,762 \pm 0,028$.

A dependência da velocidade mínima em relação à carga inicial alimentada ao leito é alvo de vários estudos e as conclusões obtidas são divergentes. Ramos Caicedo *et al.* (2002) estudaram a velocidade mínima de fluidização para leitos em fluidização gás-sólido em duas dimensões e verificaram o aumento da velocidade mínima de fluidização à medida que houve aumento da altura do leito estático. O aumento da velocidade mínima de fluidização com o aumento da massa inicial do leito segundo Delebarre *et al.* (2004) ocorre devido a um fenômeno de expansão do gás que atrasa a fluidização do fundo do leito enquanto que a parte superior já é fluidizada.

Durante os experimentos, pôde-se observar a formação dos bolsões de ar, principalmente durante a operação em leitos de maior profundidade. Tal fenômeno acarreta ainda a instabilidade do leito causada pelo colapso das bolhas que se reflete na altura do leito e na queda de pressão registrada no leito. Na Figura 4.11, é possível observar a formação dos bolsões com o aumento da velocidade superficial do ar durante a fluidização com leito de profundidade $L/D=2,5$.

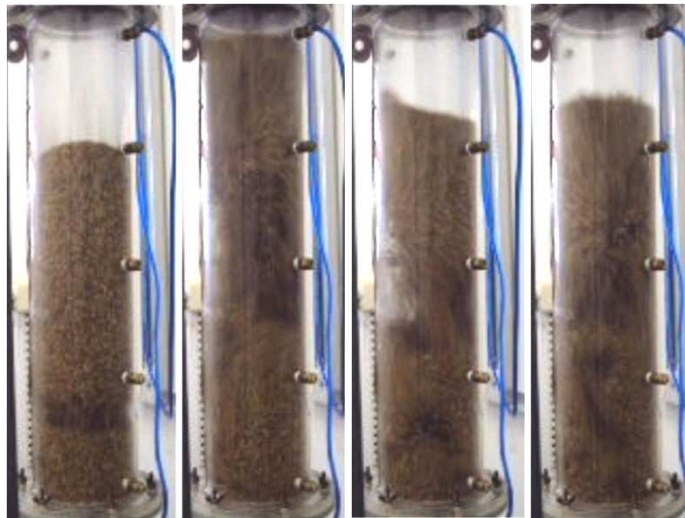


Figura 4.11: Formação de slugs durante a fluidização de grãos de pólen apícola com profundidade do leito $L/D = 2,5$ formado por partículas com $d_p = 2,03$ mm .

Os valores de porosidade do leito em função da velocidade superficial do ar são apresentados na Figura 4.12.

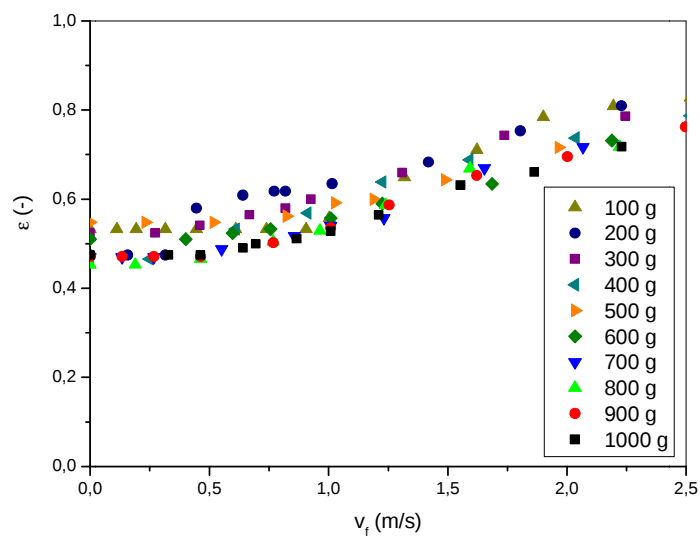


Figura 4.12: Porosidade do leito em função da velocidade superficial do ar para diferentes cargas do leito de partículas com $d_p = 2,03$ mm e teor de umidade de $10,5 \pm 3,5$ % b.u.

A porosidade do leito é um parâmetro importante no projeto de secadores em leito fluidizado, pois afeta a resistência do leito à passagem do ar e, conseqüentemente, as taxas de transferência de calor e de massa durante a operação de secagem. Inicialmente, a altura do leito permanece constante, pois o ar percola o material particulado sem promover sua movimentação. Conforme a velocidade do escoamento de ar foi aumentada teve início a movimentação do material e a expansão do leito, que ocorre de modo suave.

De posse dos valores de altura, foram calculados os valores da porosidade do leito de acordo com a Equação 3.8. Não foi observada influência da carga inicial sobre a porosidade, de modo que a porosidade do leito fixo foi de $0,492 \pm 0,033$ em condição de empacotamento frouxo. Tal comportamento era esperado, pois a porosidade do leito se relaciona com propriedades das partículas: tamanho, forma, densidade, sendo que a altura do leito não afeta tal parâmetro (KUNII E LEVENSPIEL, 1991; TANNOUS *et al.*, 1994). A expansão foi suave, de maneira que a porosidade mínima de fluidização foi de $0,545 \pm 0,040$, em média, um valor 11% maior que a porosidade do leito fixo.

4.3. Secagem de Pólen Apícola

A seguir são apresentados os resultados concernentes à cinética de secagem de pólen apícola, utilizando radiação infravermelha de forma isolada e combinada com a técnica de leito fluidizado. Para propósito de comparação, os resultados obtidos na secagem em leito fluidizado convencional são também apresentados.

4.3.1. Secagem via radiação infravermelho

Conforme citado no Capítulo 3, antes de conduzir os experimentos de secagem no secador de leito fluidizado assistido por aquecimento IV, foi realizado um estudo no qual os grãos de pólen, dispostos em monocamada, foram secos através da sua exposição à radiação IV somente. Tal estudo teve como propósito investigar e definir as intensidades de radiação IV que seriam aplicadas na secagem híbrida, bem como servir de comparação para a avaliação dos parâmetros de transferência de massa, de consumo de energia e de qualidade do produto.

A Figura 4.13 mostra o comportamento típico da cinética de secagem IV do pólen apícola, em termos da evolução da taxa de remoção de umidade e da temperatura do material ao longo do tempo, para $IR = 100 \text{ W/m}^2$.

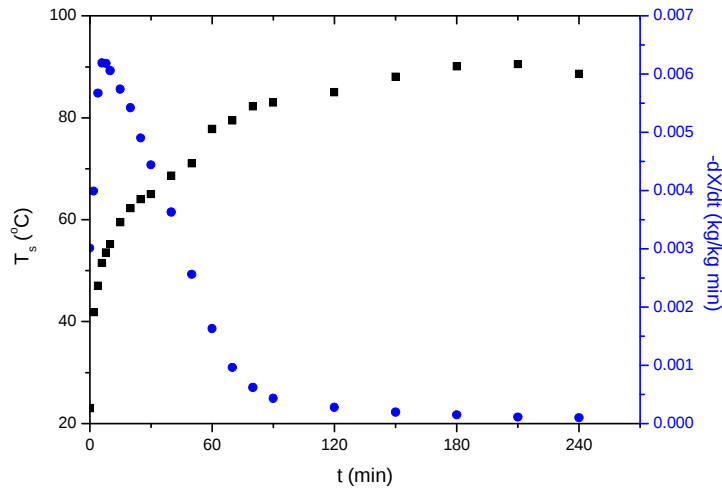


Figura 4.13: Temperatura do sólido e taxa de secagem em função do tempo, para $IR = 100 \text{ W/m}^2$.

No início do processo, pode ser observado um rápido aumento da taxa de secagem, que está associado a um súbito aumento da temperatura da superfície das partículas. O aumento da taxa de remoção de umidade durante o aquecimento ocorre devido a uma maior quantidade de energia radiante interagir com a estrutura das partículas sendo absorvida pela água localizada inicialmente na superfície do material. Dado o prosseguimento do processo, a umidade na superfície do material se torna escassa de modo que a penetração de calor através da camada seca diminui, reduzindo consequentemente a taxa de secagem.

Após esse rápido período de aquecimento, não há nenhum patamar correspondente à temperatura de bulbo úmido que denote a presença de um período de taxa constante. Este comportamento evidencia que a superfície das partículas expostas à radiação IV seca muito rapidamente, de modo que a migração interna de umidade não supre a evaporação na superfície. Com a formação de regiões secas na superfície do material, logo no início da secagem, parte da energia eletromagnética fornecida continua a ser utilizada na forma de calor sensível e a temperatura na superfície tende a aumentar assintoticamente até uma temperatura de equilíbrio, próxima à temperatura da fonte. Nesse período há o decréscimo da taxa de secagem e a difusão de umidade no interior do sólido é o principal mecanismo físico governando a transferência de massa na secagem. Comportamentos similares foram apresentados pelo pólen em toda a faixa operacional investigada.

O período a taxa decrescente de secagem comumente caracteriza a secagem de materiais biológicos como o pólen (WU *et al.*, 2014; STURM *et al.*, 2014). Nestes materiais, a umidade integra a estrutura do sólido, de maneira que o processo de secagem tende a ser controlado pela difusão do vapor d'água.

A fim de investigar o efeito da intensidade de radiação infravermelho sobre o comportamento de secagem dos grãos de pólen apícola foram construídas as curvas do adimensional de umidade, de temperatura e de taxa de secagem do material em função do tempo, para as diferentes condições de potência empregadas, conforme mostrado nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, respectivamente.

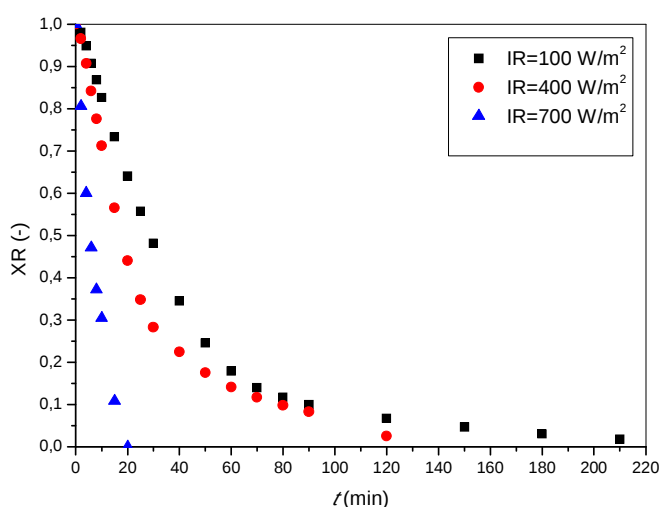


Figura 4.14: Adimensional de umidade em função do tempo de secagem infravermelho parametrizado nas diferentes potências de radiação empregadas.

Como esperado, o aumento da intensidade de radiação provocou uma maior remoção de umidade, num menor tempo de processo. Com base nos dados apresentados na Figura 4.14, verifica-se uma redução de 90% da umidade contida na amostra com um tempo 76% menor, ao se aumentar a potência da fonte de 100 W para 700 W. O tempo de secagem para reduzir o teor de umidade dos grãos para o valor alvo de 4% b.u., recomendado pela legislação brasileira, foi de (60 ± 5) min, (18 ± 2) min e (9 ± 1) min, para as intensidades de radiação IV de 100, 400 e 700 W/m², respectivamente.

Uma redução no tempo de secagem com o aumento na potência IV também foi reportada por Dondee *et al.* (2011) e Pawar *et al.* (2008). No entanto, no trabalho de Santos *et al.* (2010), a aplicação de elevadas intensidades de energia eletromagnética na região do IV provocou a impermeabilização da superfície de sementes de *Moringa oleifera* L, que atuou

como resistência extra à transferência de massa e aumentou consideravelmente o tempo de secagem.

O aumento da intensidade de radiação IV levou a uma maior absorção dessa energia eletromagnética pelos componentes do material, causando uma maior vibração molecular e uma maior taxa de aquecimento (Figura 4.15). O significativo aumento da temperatura das partículas e, conseqüentemente, da pressão de vapor dentro delas, resultou em maiores taxas de secagem do pólen (Figura 4.16). Para as intensidades de radiação de 100 e 400 W, observa-se um período de aquecimento inicial em torno de nove e cinco minutos, ao passo que para 700 W/m², esse período ocorre em dois ou três minutos.

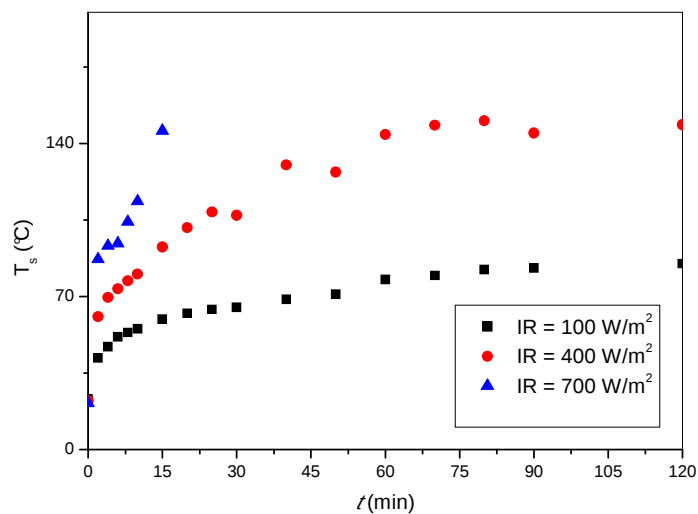


Figura 4.15: Temperatura da superfície dos grãos de pólen em função do tempo de secagem infravermelho, nas diferentes intensidades de radiação empregadas.

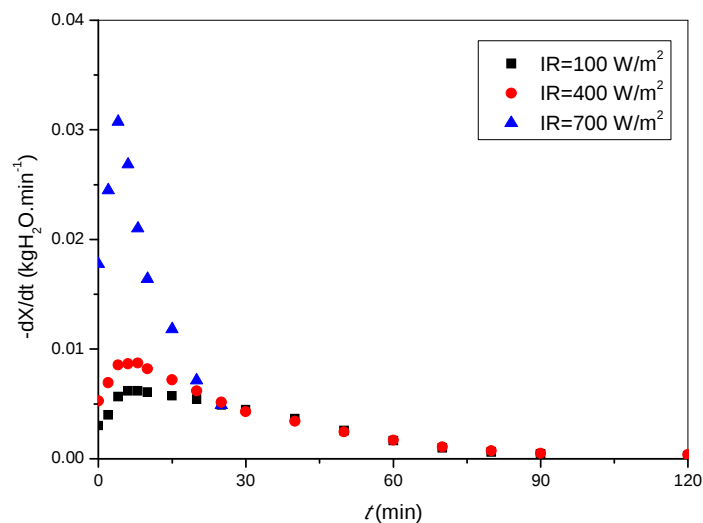


Figura 4.16: Taxa de remoção de umidade em função do tempo, para grãos de pólen submetidos à diferentes intensidades de radiação infravermelho.

A solução do modelo difusivo (Equação 2.20) foi então aplicada para estimar o coeficiente de difusão efetiva durante a secagem do pólen no período de taxa decrescente. A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos da difusividade mássica efetiva para as condições operacionais empregadas.

Tabela 4.8: Valores estimados de D_{eff} para os grãos de pólen expostos à radiação IV na secagem em camada fina.

IR (W/m ²)	$D_{eff} \times 10^{11}$ (m ² /s)	R ²
100	4,98±0,21	0,996
250	6,32±0,07	0,989
400	17,22±0,43	0,995
700	40,67±0,75	0,994

Os valores obtidos para a difusividade estão dentro da faixa de 10^{-11} a 10^{-9} m²/s reportada para alimentos e produtos agrícolas (WU *et al.*, 2014; BARBOSA NETO *et al.*, 2014). A dependência da difusividade efetiva com a intensidade radiação IV foi descrita por uma relação do tipo Arrhenius ($R^2 = 0,969$):

$$D_{eff} = (1,21 \pm 0,33) \cdot 10^{-9} \exp \left[\frac{-(764,8 \pm 160,3)}{IR} \right] \quad (4.1)$$

4.3.2. Secagem em Leito Fluidizado Convencional

A partir dos dados experimentais obtidos no estudo da secagem de pólen em leito fluidizado, buscou-se investigar a influência da temperatura do ar de secagem sobre a cinética do processo.

Antes, porém, na Figura 4.17 são apresentados os resultados típicos de temperatura da mistura sólido-fluido em função do tempo, em duas posições localizadas próximas à base e ao topo do leito poroso, a fim de avaliar a validade da hipótese de isothermicidade do leito fluidizado.

Com base nos baixos desvios observados entre os valores de temperatura medidos na base e no topo do leito verifica-se uniformidade de temperatura do secador de leito fluidizado, o que evidencia a boa mistura dos sólidos no seu interior.

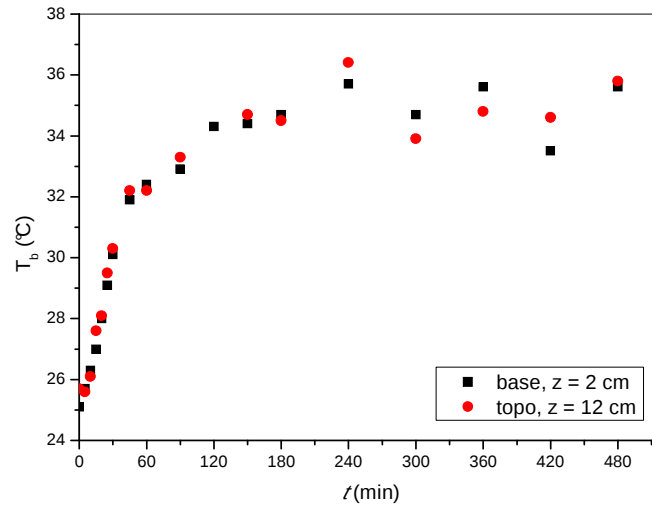


Figura 4.17: Temperatura da mistura gás-sólido em função do tempo, parametrizada em duas alturas do leito fluidizado durante a secagem com $T_{ar} = 35^{\circ}\text{C}$.

Na Figura 4.18, são apresentados os resultados da evolução de temperatura da superfície dos grãos ao longo da secagem em leito fluidizado nas diferentes condições de temperatura do ar empregadas.

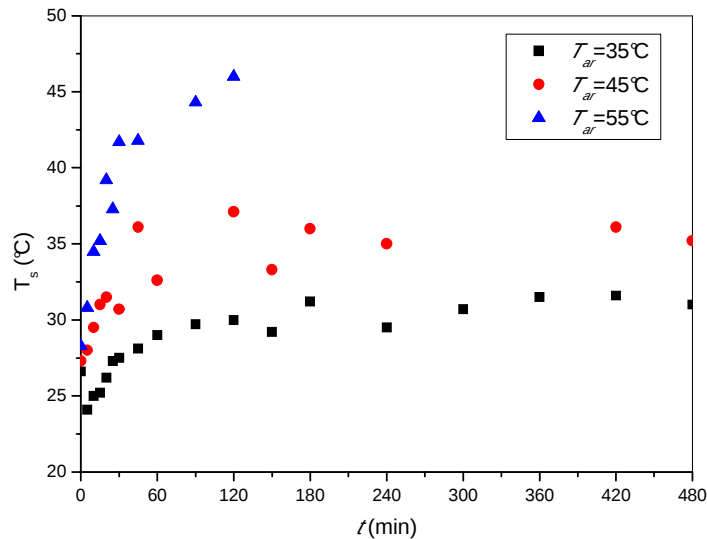


Figura 4.18: Temperatura da superfície dos grãos ao longo do processo de secagem em leito fluidizado convencional, parametrizada nas diferentes condições de temperatura do ar de secagem.

A Figura 4.18 mostra que na secagem em leito fluidizado de grãos de pólen ocorrem, com respeito à transferência de calor, dois períodos de aquecimento. O primeiro é

caracterizado por uma alta taxa de aquecimento no início do processo. diretamente seguido por um período cujo aquecimento é mais gradual, com a temperatura do sólido aumentando assintoticamente até um valor abaixo da temperatura do ar, em razão das perdas de calor para a vizinhança. Não foi observado, portanto, nenhum platô de temperatura constante, correspondente à de bulbo úmido.

O aumento da temperatura do ar que percola o leito contribui para elevar o coeficiente convectivo de transferência de calor entre as fases sólida e fluida, resultando numa maior temperatura da superfície dos grãos de pólen.

A partir dos dados cinéticos de secagem a umidade de equilíbrio dinâmico (X_{eq}) foi também determinada. O teor de umidade de equilíbrio foi considerado atingido quando a taxa de secagem se igualava a zero.

Tratando-se de secagem, o conhecimento de X_{eq} é essencial à medida que este parâmetro fornece informações acerca do teor mínimo que o material pode atingir sob determinadas condições de temperatura e umidade relativa, definindo o fim do processo.

Os valores de X_{eq} obtidos na faixa experimental investigada são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Dados de equilíbrio dos grãos de pólen apícola.

T_{ar} (°C)	UR (%)	X_{eq} (b.s)
35	37,23	0,085
45	29,83	0,046
55	22,23	0,035

Os valores calculados para o adimensional de umidade (XR) foram então plotados em função do tempo de secagem, nas diferentes condições de temperatura do ar de secagem empregadas, e são apresentados na Figura 4.19.

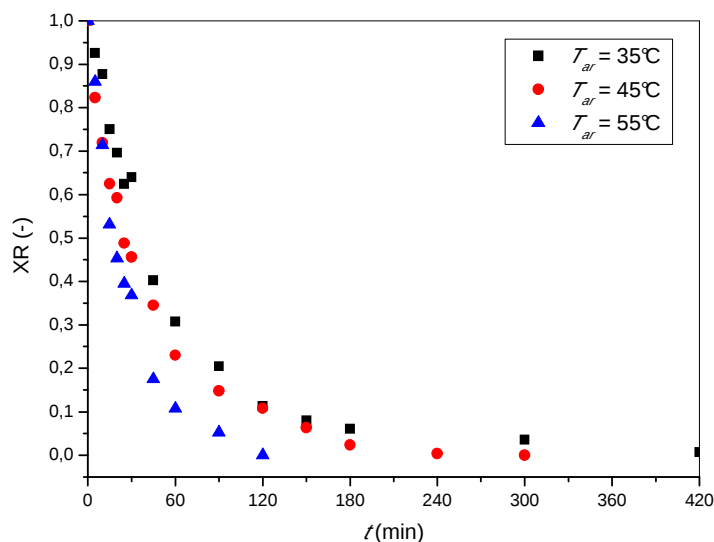


Figura 4.19: Adimensional de umidade em função do tempo, parametrizado nas diferentes temperaturas do ar empregadas na secagem em leito fluidizado convencional de pólen apícola..

Como esperado, o aumento da temperatura do ar de secagem provocou aumento na remoção de umidade. Tal resultado tem sido relatado por diversos autores, como Srinivasakannan e Balasubramaniam (2009), que investigaram a secagem de milho em leito fluidizado com temperatura do ar de secagem de 40 a 65° C.

Para uma condição fixa de velocidade do ar fixa e carga alimentada ao leito, o teor de umidade diminui rapidamente com o aumento da temperatura. Isso ocorre porque, conforme explicado anteriormente, o aumento da temperatura do ar na entrada do leito provoca aumento no coeficiente de transferência de calor por convecção, deste modo a temperatura da superfície dos grãos é aumentada o que intensifica a evaporação da água contida no interior das partículas.

A fim de investigar o efeito do aumento da temperatura do ar de secagem sobre a transferência de massa durante a secagem dos grãos de pólen em leito fluidizado, construíram-se as curvas de taxa de secagem em função do teor de umidade nas diferentes condições de temperatura do ar de secagem conforme apresentado na Figura 4.20.

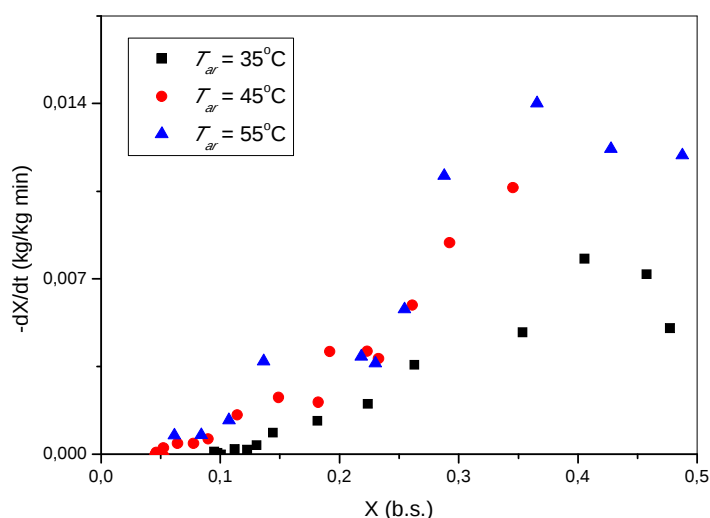


Figura 4.20: Taxa de secagem em função do teor de umidade parametrizado nas diferentes temperaturas do ar empregadas na secagem em leito fluidizado convencional de pólen apícola.

Com base na Figura 4.20, verifica-se que a secagem dos grãos de pólen apícola apresenta um período curto de aquecimento, mas ocorre predominantemente a taxa decrescente. Resultados similares foram também observados por Balasubramanian e Srinivasakannan (2007) na secagem de resina em leito fluidizado a 60 e 80°C. Tal comportamento era esperado, principalmente por tratar-se de um material biológico.

As maiores taxas nos estágios iniciais de secagem podem ser atribuídas à maior difusividade de umidade para a superfície do material, devido aos maiores teores de umidade.

O aumento na taxa de secagem com o aumento na temperatura do ar pode ser explicada a partir dos conceitos básicos de transferência de massa. O aumento da temperatura do ar leva a uma diminuição da umidade relativa, de modo que a diferença entre a umidade contida no interior da partícula e no ar que circunda o material aumenta, aumentando assim a força motriz para a secagem. Além disso, com o aumento da temperatura do ar e, conseqüentemente, da temperatura do sólido há o aumento da pressão de vapor da água contida no material, favorecendo a transferência de massa.

Os valores de difusividade efetiva determinados para as diferentes condições de secagem de pólen em leito fluidizado convencional são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Valores estimados de D_{eff} para a secagem de grãos de pólen em leito fluidizado.

T_{ar} (°C)	T_s (°C)	$D_{eff} \times 10^{11}$ (m ² /s)	R^2
35	30	3,04±0,89	0,997
45	35	4,39±0,56	0,991
55	45	6,25±0,75	0,997

Verifica-se que a difusividade efetiva aumenta com a temperatura do ar, que leva a um aumento efetivo da temperatura das partículas no leito. Os valores de D_{eff} na secagem em leito fluidizado convencional variaram de 3,04 a 6,25 x 10⁻¹¹ m²/s. Ao se comparar com as difusividades efetivas de outros materiais secos em leito fluidizado, a difusividade efetiva para o pólen foi de três a quatro vezes maior que a de milho (SRINIVASAKANNAN & BALASUBRAMANIAM, 2009) obtida numa faixa de temperatura, de 40 a 65°C. Essa diferença pode ser atribuída às características físicas dos materiais, tais como a estrutura interna porosa, tamanho de poro, tortuosidade, as quais influenciam significativamente a difusividade de umidade.

A energia de ativação para o pólen processado no leito fluidizado convencional foi de 27,4 kJ/mol que está contida no domínio de 12,7 a 110 kJ/mol reportado para a secagem de vários materiais agrícolas em leitos móveis.

4.3.3. Secagem em Leito Fluidizado Assistido por Radiação Infravermelho

Tendo em vista desenvolver e aplicar um processo de secagem em leito fluidizado com menor custo energético, investigou-se a aplicação de radiação IV para o aquecimento direto das partículas no leito, em substituição ao aquecimento convencional via convecção de ar quente. Assim, o aquecimento IV em diferentes intensidades de radiação foi inicialmente combinado com a convecção forçada de ar a temperatura ambiente e com velocidade correspondente à condição de mínima fluidização.

Os resultados típicos de evolução da temperatura e do adimensional de umidade dos grãos de pólen apícola durante a secagem combinada, realizada utilizando ar a 25°C e diferentes intensidades de radiação IV, são apresentados nas Figuras 4.21 e 4.22, respectivamente.

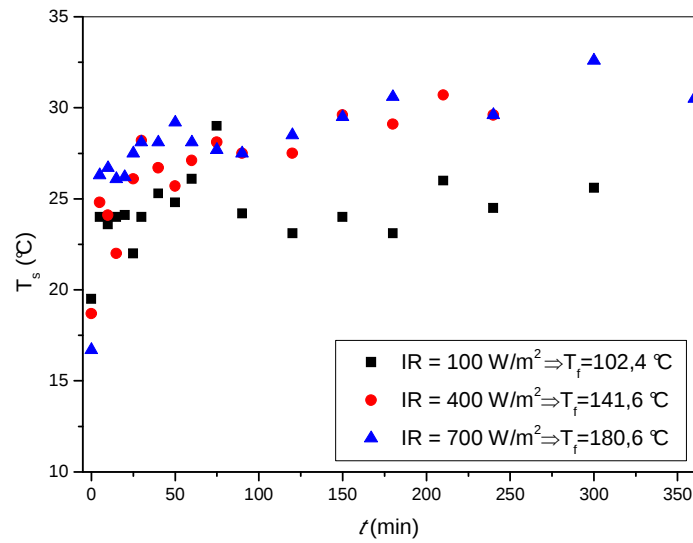


Figura 4.21: Temperatura da superfície dos grãos de pólen em função do tempo, na secagem em leito fluidizado, combinando o aquecimento IV em diferentes intensidades de radiação e o escoamento de ar não aquecido ($T_{ar}=25^{\circ}\text{C}$).

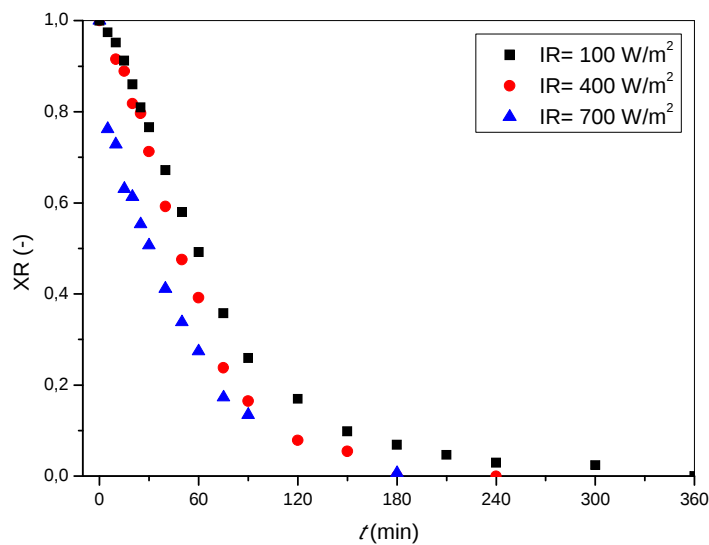


Figura 4.22: Adimensional de umidade em função do tempo, para a secagem em leito fluidizado, com ar a 25°C assistido por aquecimento infravermelho em diferentes intensidades de radiação.

A partir da Figura 4.21 pode ser verificada uma rápida elevação da temperatura do material no leito no estágio inicial do processo de secagem, aproximadamente 15 minutos. Em seguida, a temperatura do material continua aumentando de modo suave em decorrência do efeito de resfriamento causado pela passagem do ar. Tais resultados estão de acordo com aqueles reportados por Dondee *et al.* (2011). A temperatura da superfície das partículas tende assintoticamente a 25°C , 28°C e 30°C , quando o material é exposto às intensidades de 100, 400 e 700 W/m^2 , respectivamente. Ou seja, na técnica híbrida aplicada os grãos de pólen são

submetidos a condições amenas de secagem, o que pode favorecer a preservação de compostos termosensíveis presentes no material.

A influência do aumento da intensidade de radiação IV sobre a remoção de umidade dos grãos de pólen durante a secagem pode observada com base nos dados apresentados na Figura 4.22. Como esperado, há um aumento da remoção de umidade com o aumento da intensidade de radiação aplicada no leito. O aumento da intensidade de radiação de 400 W/m^2 para 700 W/m^2 permitiu a redução do tempo de secagem de 240 para 180 minutos, uma redução de 25%.

O pólen apícola teve seu teor de umidade inicial reduzido para um valor final de $(0,082 \pm 0,02)$ b.u. em toda a faixa de intensidade de radiação IV aplicada no leito. Verifica-se, portanto, que o teor de umidade de 4% b.u. recomendado pela legislação brasileira (BRASIL, 2001) não foi atingido. Cabe ressaltar, no entanto, que o produto obtido atende o teor de umidade alvo fixado por outros país da América e da Europa, cujos órgãos reguladores permitem valores entre 8 e 10% b.u., com base nas recomendações da FAO (Morgano *et al.*, 2011).

A influência da intensidade de radiação sobre a transferência de massa durante a secagem híbrida dos grãos de pólen pode ser avaliada a partir das curvas de taxa de secagem construídas em função do adimensional de umidade nas diferentes condições de intensidade de radiação IV conforme apresentado na Figura 4.23.

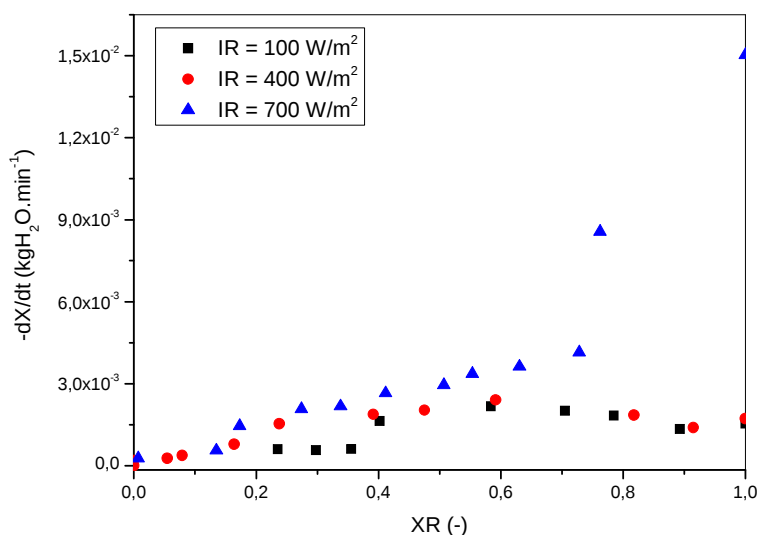


Figura 4.23: Taxa de secagem em função do adimensional de umidade parametrizada nas diferentes intensidades de radiação empregadas na secagem híbrida de pólen apícola, $T_{ar} = 25^\circ\text{C}$.

Com base na Figura 4.23, verificou-se que o aumento da intensidade de radiação provocou aumento na taxa de secagem. Isso ocorre devido à maior disponibilidade de energia para interagir com a estrutura interna dos grãos.

Na Tabela 4.11 são apresentados os valores estimados para a difusividade de umidade do pólen apícola na secagem em leito fluidizado assistido por aquecimento IV e com ar escoando a 25°C.

Tabela 4.11: Valores estimados de D_{eff} para a secagem híbrida de grãos de pólen.

IR (W/m²)	T_s (°C)	D_{eff} x10¹¹ (m²/s)	R²
100	25	3,07±0,17	0,992
400	28	3,77±0,23	0,971
700	30	3,98±0,42	0,976

As difusividades efetivas obtidas ao se aplicar intensidades de radiação de 100, 400 e 700 W/m² ao leito de partículas percolado por ar não aquecido ficaram na faixa de 3,1 a 3,98·10⁻¹¹ m²/s. Ao se comparar os resultados da secagem híbrida utilizando aquecimento IV a 700 W/m² com aqueles da secagem convencional com ar aquecido a 35°C, situações nas quais o material atinge a mesma temperatura de 30°C, verifica-se um aumento em D_{eff} em torno de 30%, denotando a intensificação na taxa de transferência de massa ao se aplicar a radiação IV na secagem em leito fluidizado.

A dependência da difusividade efetiva com a intensidade radiação IV foi descrita por uma relação do tipo Arrhenius ($R^2 = 0,996$):

$$D_{eff} = (4,11 \pm 0,062) \cdot 10^{-11} \exp \left[\frac{-(29,38 \pm 2,89)}{IR} \right] \quad (4.2)$$

Apesar da combinação da técnica de leito fluidizado assistido por aquecimento via radiação infravermelho ter se mostrado eficiente para a secagem do material, o escoamento de ar com temperatura e umidade relativa ambiente limita o teor de umidade mínimo que pode ser alcançado pelo pólen sob condições híbridas de secagem. Por isso, procurou-se investigar o efeito sinérgico do uso combinado do aquecimento infravermelho com o aquecimento convectivo, empregando ar a 45°C.

O comportamento da temperatura da superfície dos grãos expostos a intensidades de radiação IV de 100 e 700 W/m² e escoamento do ar com temperaturas de 25 e 45°C é mostrado na Figura 4.24.

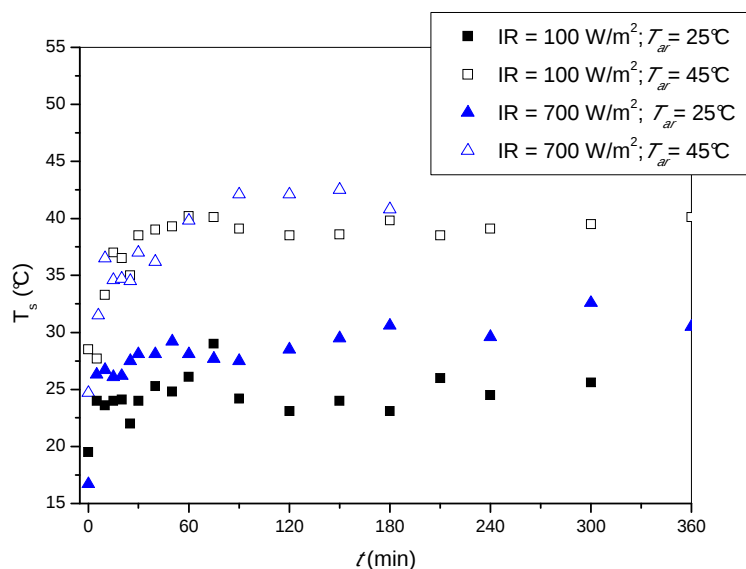


Figura 4.24: Temperatura da superfície dos grãos em função do tempo, na secagem em leito fluidizado, em duas condições de temperatura do ar de secagem, 25 e 45°C, assistido por aquecimento IV em duas diferentes potências de radiação empregadas, 100 e 700 W/m².

Ao aumentar a temperatura do ar de 25 a 45°C, a temperatura final atingida pelo pólen exposto a uma radiação IV de 100 W/m² aumentou de 25°C para 40°C, e a 700 W/m² aumentou de 30°C para 43°C. A combinação dos aquecimentos IV e convectivo parece interessante à medida que ao provocar uma maior temperatura do material, contribui para aumentar a pressão de vapor da umidade contida nele e ativar os mecanismos de secagem. Ao aumentar a temperatura, a umidade relativa do ar que escoar pelo leito também é menor, o que favorece a força motriz para a transferência de massa.

Na Figura 4.25 são apresentados os resultados típicos do adimensional de umidade em função do tempo, permitem avaliar a influência da temperatura do ar sobre a remoção de umidade na secagem combinada.

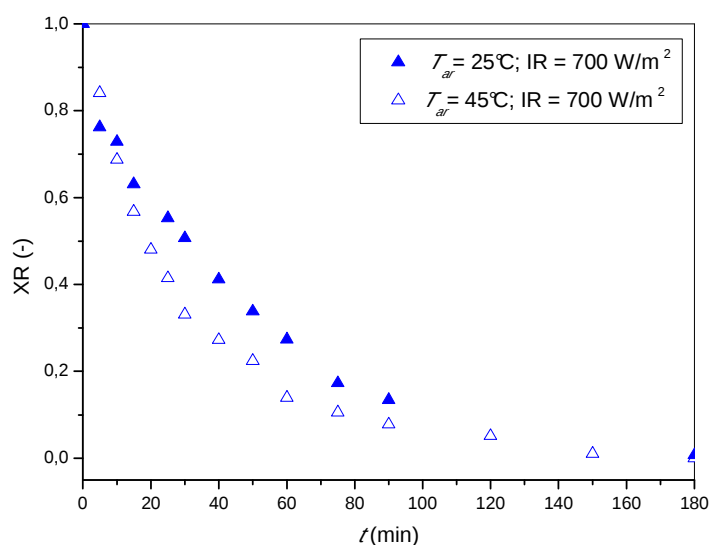


Figura 4.25: Adimensional de umidade em função do tempo, na secagem em leito fluidizado, em duas condições de temperatura do ar de secagem , 25 e 45°C, assistido por aquecimento infravermelho com $IR = 700 \text{ W/m}^2$.

À medida que a temperatura do ar é aumentada de 25 para 45°C e a intensidade de radiação aplicada no leito permanece constante verifica-se uma maior declividade da curva de secagem, indicando uma maior taxa de secagem, pelas razões explicadas nos parágrafos anteriores.

4.3.4. Análise comparativa das técnicas de secagem empregadas

Neste item, os resultados típicos obtidos com a secagem híbrida (leito fluidizado + aquecimento IV) são comparados com aqueles advindos ao se aplicar a radiação IV na secagem em camada fina, bem como com aqueles da secagem em leito fluidizado convencional.

Nas Figuras 4.26 e 4.27 são apresentados, respectivamente, os resultados de evolução de temperatura e de adimensional de umidade do pólen submetido à secagem em leito fluidizado convencional com temperatura do ar de 45°C e assistido por aquecimento IV a 700 W/m^2 .

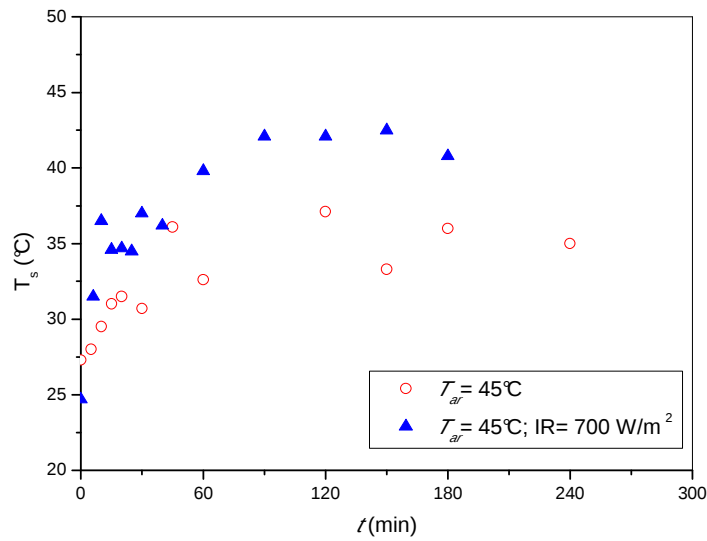


Figura 4.26: Temperatura da superfície dos grãos em função do tempo para a secagem em leito fluidizado convencional com $T_{ar} = 45^\circ\text{C}$ e em leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho com $\text{IR} = 700 \text{ W/m}^2$ e $T_{ar} = 45^\circ\text{C}$.

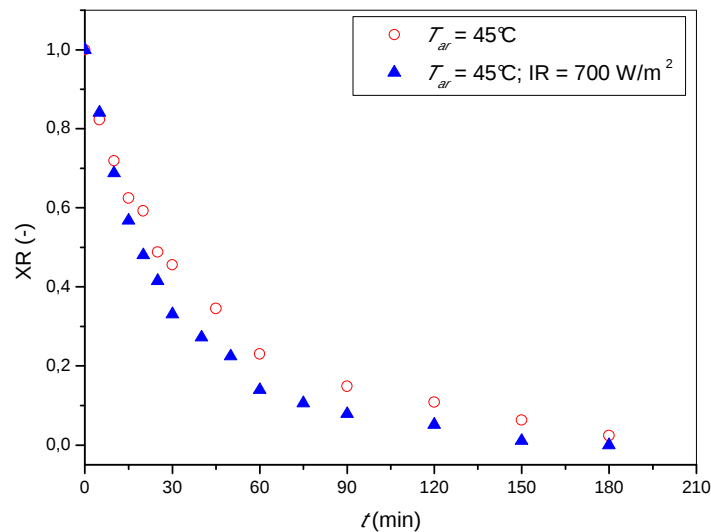


Figura 4.27: Adimensional de umidade em função do tempo para a secagem em leito fluidizado convencional com $T_{ar} = 45^\circ\text{C}$ e em leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho com $\text{IR} = 700 \text{ W/m}^2$ e $T_{ar} = 45^\circ\text{C}$.

A aplicação de energia eletromagnética ao leito resultou num significativo aumento da temperatura dos grãos de pólen no estágio inicial de secagem, de até 8°C quando comparado com aquecimento convectivo (Figura 4.26), resultando numa maior pressão de vapor dentro das partículas e contribuindo assim para uma maior taxa de remoção de umidade (Figura 4.27). O maior valor de difusividade efetiva de umidade na secagem híbrida ($5,56 \times 10^{-11}$

m^2/s) comparado ao da secagem convencional ($4,39 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) corrobora a influência do rápido aquecimento IV. Similar comportamento foi observado para a intensidade de radiação de 100 W/m^2 , mas com uma menor magnitude,

Na Figura 4.28 são mostrados os resultados comparativos de temperatura em função do tempo, na secagem utilizando o aquecimento IV de forma isolada na secagem em camada fina e de forma combinada com a convecção forçada de ar a 25°C e 45°C na secagem em leito fluidizado.

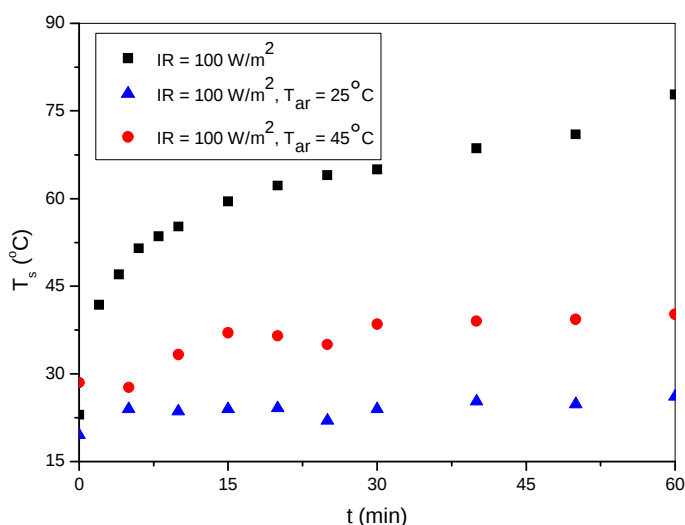


Figura 4.28: Temperatura da superfície dos grãos em função do tempo para a secagem utilizando radiação IV de forma isolada ($\text{IR} = 700 \text{ W/m}^2$) e combinada com escoamento forçado de ar através do leito fluidizado, $T_{ar} = 25^\circ\text{C}$ e $T_{ar} = 45^\circ\text{C}$.

A convecção forçada de ar através do leito de partículas expostas à radiação IV teve um efeito de resfriamento, reduzindo a temperatura da superfície dos grãos e, consequentemente, a pressão de vapor d'água em seu interior e a força motriz para a remoção de umidade. No entanto, verifica-se que combinar o aquecimento infravermelho com a convecção forçada é interessante para evitar o superaquecimento do material pela aplicação isolada da radiação IV que pode levar à degradação térmica de importantes compostos bioativos do material.

Além da intensificação ou não das taxas de transferência e da preservação da qualidade do produto, é de fundamental importância avaliar o consumo de energia de cada processo, que afeta diretamente o custo de produção do pólen desidratado.

4.4. Avaliação do Consumo Energético

Embora esteja regulamentado pela legislação brasileira (Instrução Normativa n. 3 de 19 de janeiro de 2001) que o pólen apícola é considerado desidratado quando seu teor de umidade for reduzido a 4%, outros países possuem especificações segundo as quais o teor de umidade após a secagem pode variar entre 6 e 12% (MELO e ALMEIDA-MURADIAN, 2011; VIZCARRA-MENDOZA *et al.*, 1998). Diante disso, foi escolhido o teor de umidade 8% b.u. para que o consumo energético associado a cada técnica pudesse ser comparado.

Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados típicos do consumo de energia total e específica, expressa em MJ por kg de água removida, para todas as condições de aquecimento IV empregadas.

Tabela 4.12: Consumo total de energia por unidade de massa de água removida durante a secagem infravermelho de pólen apícola em camada fina.

IR (W/m ²)	<i>t</i> (min)	<i>T_s</i> (°C)	<i>e</i> (MJ/kg)
100	62,5 ± 21,8	70,2 ± 3,5	92,4 ± 33,1
400	53,3 ± 2,9	117,5 ± 22,5	80,0 ± 18,8
700	12,5 ± 0,0	135,1 ± 19,5	34,5 ± 9,3

Verificou-se que o aumento da intensidade de radiação de 100 para 700 W/m² o tempo de secagem foi reduzido em 80% implicando em um decréscimo de 63% do consumo energético.

Os resultados do consumo específico de energia durante a secagem em leito fluidizado convencional estão dispostos na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Consumo total de energia por unidade de massa de água removida durante a secagem de pólen apícola em leito fluidizado convencional.

<i>T_{ar}</i> (°C)	<i>t</i> (min)	<i>T_s</i> (°C)	<i>e</i> (MJ/kg)
35	360	31,6	250,9
45	90	34,8	113,5
55	75	44,3	69,1

De modo similar ao que ocorreu durante a secagem infravermelho, o aumento da temperatura do ar de secagem de 35 a 55°C proporcionou uma redução do consumo energético de até 76%, devido principalmente ao menor tempo de secagem requerido.

A associação entre as técnicas de secagem em leito fluidizado e a secagem infravermelho visa a substituição do aquecimento do ar de secagem pela interação energética da radiação IV diretamente com as partículas no leito. Os resultados de consumo energético, para as diferentes condições empregadas, são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Consumo total de energia por unidade de massa de água removida durante a secagem de pólen apícola em leito fluidizado assistida por aquecimento infravermelho.

IR (W/m ²)	T _{ar} =25°C		
	t (min)	T _s (°C)	e (MJ/kg)
100	240	25,6	155,4
400	150	28,7	145,3
700	150	30,5	119,1

O consumo de energia específica variou entre 119,1 e 155,4 MJ/kg na secagem híbrida, sem aquecimento do ar. Como esperado, o aumento da intensidade de radiação acelerou o processo de secagem de modo que o consumo energético foi reduzido em 23% elevando-se o fluxo de radiação de 100 para 700 W/m².

Quanto à eficiência energética do secador híbrido em relação ao secador convencional, pode ser verificado a partir dos valores dispostos nas Tabelas 4.13 e 4.14 que o consumo durante a secagem em leito fluidizado convencional na menor condição de temperatura empregada (T_{ar}=35°C) foi de 250,9 MJ/kg. Na secagem assistida por aquecimento IV a condição mais baixa de potência da fonte de aquecimento ocasionou o consumo de 155,4 MJ/kg, uma redução de 38%. Para a intensidade de radiação de 700 W/m², que leva o sólido atingir a mesma temperatura da secagem convencional a 35°C, essa redução chega a 52% (119,1 MJ/kg).

Para temperaturas mais elevadas, de 45 e 55°C, verificou-se uma maior eficiência energética associada à secagem convencional. Durante a secagem com T_{ar}=55°C foram gastos 69,1 MJ/kg, valor 42% menor que o gasto associado à secagem com a intensidade de radiação infravermelho de 700 W/m². Neste ponto, destaca-se a importância de considerar também a qualidade do produto como fator de viabilidade da técnica empregada na secagem de produtos agroindustriais.

Na secagem combinando ar aquecido a 45°C com o aquecimento IV a 700 W/m² verificou-se que embora o aumento da temperatura do ar tenha intensificado a remoção de umidade e conduzido a um menor tempo de secagem (83 min) e menor consumo de energia

(132,2 MJ/kg) quando comparado à secagem híbrida com ar a 25°C, o consumo de energia foi aproximadamente 14% maior que o da secagem convencional com ar aquecido a 45°C, devido à quantidade de energia necessária tanto para o aquecimento do ar como para o aquecimento IV.

Uma avaliação apenas do consumo de energia aponta a secagem IV em camada fina como a mais eficiente. No entanto, os riscos de superaquecimento e degradação térmica do pólen, bem como o processamento de camadas finas de material para a penetração efetiva dos raios IV podem limitar a sua aplicação.

Logo, as vantagens técnicas e econômicas de cada técnica de secagem devem ser acompanhadas pela qualidade do produto. A seguir os atributos de qualidade do pólen desidratado pelas diferentes técnicas investigadas nesse estudo são apresentados e uma avaliação da influência das condições operacionais empregadas em cada processo é realizada.

4.5. Atributos de Qualidade do Produto

Em conjunto com a avaliação da cinética do processo e do consumo energético associado à técnica de secagem, a avaliação da qualidade do produto seco é essencial para atestar a viabilidade da aplicação de um secador e restringir condições operacionais, ponderando aspectos relativos ao processo e ao produto obtido para uma operação com maior eficiência. Buscou-se, por isso, avaliar os atributos de qualidade do produto seco obtido. Os resultados são apresentados a seguir.

i) Pulverização e aglomeração de partículas

Uma das limitações da aplicação da técnica de secagem em leito fluidizado é a pulverização das partículas devido ao forte atrito durante a operação. Por isso, quantificou-se após a secagem o teor de quebra no material através da avaliação da distribuição granulométrica das partículas via peneiramento.

Os resultados da distribuição granulométrica do pólen apícola seco em leito fluidizado convencional e assistido por radiação infravermelho são apresentados na Figura 4.29.

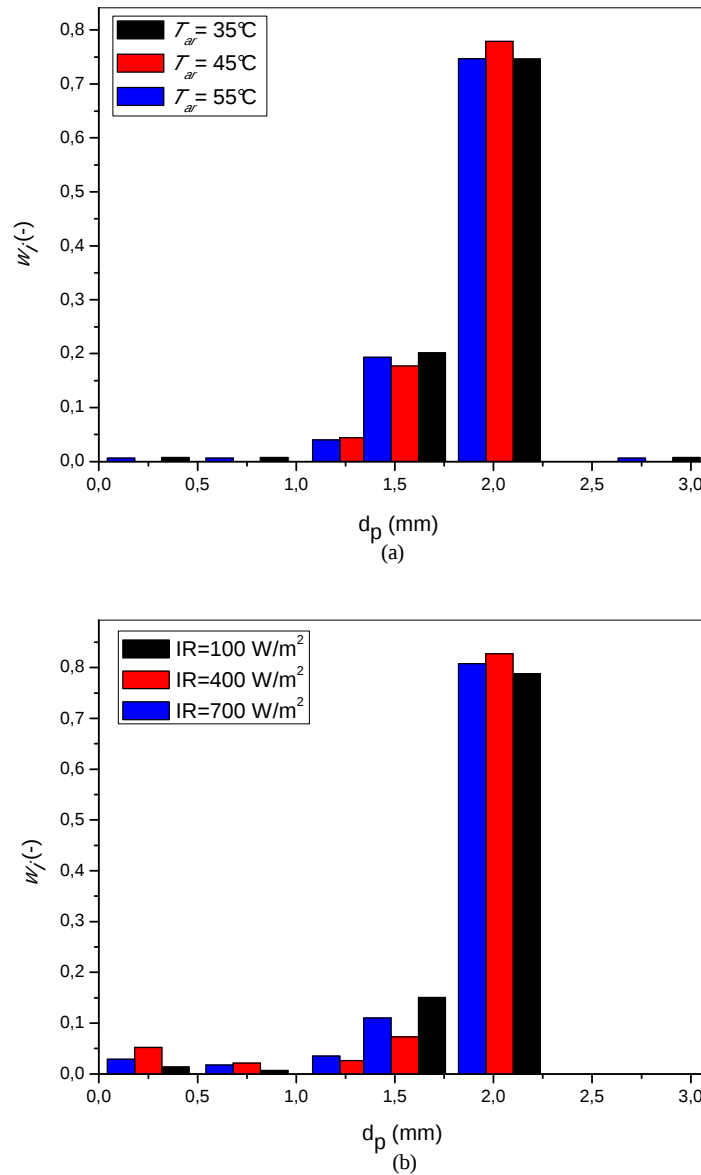


Figura 4.29: Distribuição mássica do pólen apícola após a secagem (a) em leito fluidizado nas diferentes condições de temperatura do ar de secagem (b) em leito fluidizado assistido por radiação infravermelho nas diferentes potências de radiação empregadas.

Em um nível de confiança de 95%, não foi verificado efeito significativo da temperatura do ar de secagem sobre a quebra das partículas durante a secagem em leito fluidizado convencional. Com base na Figura 4.29 (a), verificou-se que $75,7 \pm 1,9 \%$ da amostra permaneceu na faixa granulométrica do material *in natura*. A parcela de partículas que sofreu aglomeração foi negligenciável ($< 0,75 \%$). Em termos da fração mássica acumulada, $23,8 \pm 1,5 \%$ da massa de grãos secos atravessaram a peneira de 10 *mesh*, ou seja, são partículas menores que 1,70 mm.

Com base na Figura 4.29 (b), assim como na secagem convencional, durante a secagem combinada dos grãos de pólen, com 95% de confiança, não houve influência significativa da intensidade de radiação infravermelho sobre a quebra das partículas no leito, de modo que verificou-se a conservação das partículas em seu tamanho original, $80,8 \pm 2,0$ % da massa de grãos, em média.

Dondee *et al.* (2011) empregaram a secagem em leito fluidizado assistida por aquecimento infravermelho a fim de reduzir o teor de quebra de grãos de soja durante o processo de secagem. Assim como os autores, na secagem em leito fluidizado com IV, a quebra das partículas ocorreu em menor proporção que na secagem convencional (19,3%), conforme apresentado na Figura 4.29 (b).

A redução na quebra das partículas durante a secagem combinada pode ser atribuída à interação da energia de radiação infravermelho com a umidade no interior dos grãos simultânea ao efeito de convecção causado pelo ar a 25°C. Dessa maneira, ocorre a difusão mássica no interior e a remoção da umidade na superfície da partícula havendo redução do gradiente de umidade e estresse térmico na superfície dos grãos.

Por outro lado, Dondee *et al.* (2011) verificaram influência da intensidade de radiação empregada sobre a quebra das partículas durante a secagem híbrida, fato que não foi verificado neste estudo pois, com um nível de confiança de 95%, não houve efeito significativo da intensidade de radiação sobre a quebra das partículas.

Embora o aumento da temperatura do ar de secagem tenha permitido a diminuição da umidade relativa do ar conduzindo a um teor de umidade final do produto inferior a 4% b.u., verificou-se a aglomeração de partículas durante o emprego da fonte de aquecimento infravermelho associada ao aquecimento do ar.

Além disso, o uso da fonte de aquecimento infravermelho permite taxas mais elevadas de difusão de umidade no interior da partícula. Por sua vez, o ar que fluidiza as partículas remove a umidade superficial dos grãos. Entretanto, os resultados indicam que o escoamento de ar aquecido favoreceu a plasticização superficial da partícula e a força das pontes líquidas formada pela água superficial entre as partículas superou a força de quebra, resultante da colisão e do atrito das partículas no leito conduzindo à formação de aglomerados. Tal fenômeno não só afeta a uniformidade do produto seco como pode interromper o processo de secagem devido à desfluidização do leito.

Os resultados da distribuição granulométrica do pólen apícola seco em leito fluidizado assistido por radiação infravermelho em diferentes temperaturas do ar de secagem são apresentados na Figura 4.30.

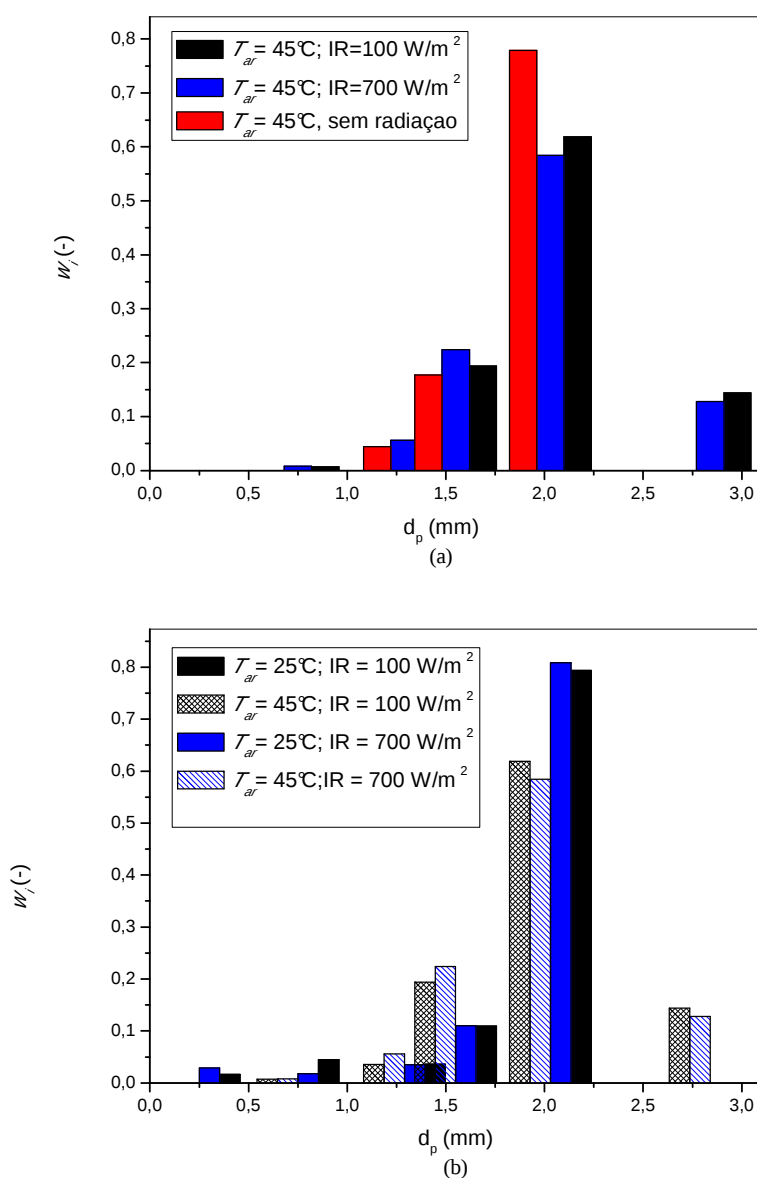


Figura 4.30: Distribuição mássica do pólen apícola após a secagem (a) em leito fluidizado, com e sem radiação IV (b) em leito fluidizado assistido por radiação infravermelho, com e sem aquecimento.

A partir da Figura 4.30, verificou-se que na secagem com ar aquecido a 45°C e empregando-se aquecimento infravermelho com intensidade de 100 W/m^2 , 14,4% da massa total de grãos secos correspondeu a partículas maiores que $2,36 \text{ mm}$ de diâmetro, resultado de aglomeração de grãos de pólen. Na condição de intensidade de radiação de 700 W/m^2 combinada ao ar aquecido, a fração mássica retida na peneira de 8 *mesh* foi de 12,8 %.

ii) Cor

O pólen apícola é rico em carotenóides e flavonóides, pigmentos que conferem cor aos materiais biológicos em geral (amarelo, laranja, vermelho). A cor é um atributo de qualidade física de importância econômica, visto que influencia a atratividade do produto ao consumidor e constitui um parâmetro que pode indicar a degradação química do material processado.

As alterações colorimétricas sofridas pelo pólen durante o processo de secagem foram mensuradas através da leitura das coordenadas L^* , a^* e b^* do sistema Hunter, a partir dos quais foi possível calcular o índice colorimétrico diferença de cor (ΔE^*) que indica a variação da cor do produto com 8% b.u. de umidade em relação ao material *in natura*.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Parâmetros colorimétricos do pólen apícola *in natura* e desidratado com 8% de umidade b.u.

Técnica	Condição operacional	Leitura	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
Secagem Infravermelho	IR = 100 W/m ²	Inicial	61,90	5,18	28,19	1,39
		Final	61,06	5,80	29,11	
	IR = 400 W/m ²	Inicial	62,94	5,48	28,64	7,26
		Final	55,96	6,52	30,35	
	IR = 700 W/m ²	Inicial	61,21	6,27	29,24	23,18
		Final	38,55	10,54	26,83	
Secagem Convencional	T_{ar} = 35°C	Inicial	46,53	9,06	34,47	8,78
		Final	55,01	7,82	36,39	
	T_{ar} = 45°C	Inicial	48,07	9,80	33,84	5,24
		Final	52,90	8,51	35,41	
	T_{ar} = 55°C	Inicial	50,59	8,73	33,72	2,95
		Final	53,50	8,34	33,98	
Secagem Combinada com T_{ar} = 25°C	IR = 100 W/m ²	Inicial	53,91	7,63	31,24	8,37
		Final	61,97	5,38	31,39	
	IR = 400 W/m ²	Inicial	58,47	5,87	27,85	5,59
		Final	63,90	4,59	28,27	
	IR = 700 W/m ²	Inicial	55,05	6,98	31,10	6,82
		Final	61,51	5,13	29,95	

Dentre as técnicas empregadas, a secagem infravermelho conduziu a maiores alterações colorimétricas nos grãos de pólen desidratado. Verificou-se ainda que tais mudanças foram intensificadas pelo aumento da intensidade de radiação.

Avaliando-se cada coordenada cromatográfica isoladamente durante a secagem IV em camada fina, o valor da luminosidade (L^*) do pólen submetido à intensidade de radiação IV de 100 W/m^2 não foi significativamente diferente daquele do pólen *in natura*. Por sua vez, amostras expostas a maiores intensidades de radiação IV, 400 e 700 W/m^2 , tiveram valores de L^* significativamente menores quando comparado com o pólen *in natura*, o que evidencia o escurecimento do material durante o processo de secagem. Os grãos submetidos à intensidade de radiação IV de 700 W/m^2 , por exemplo, tiveram o brilho reduzido em 37%.

A perda de brilho de diversos materiais tem sido comumente reportada na secagem convectiva (ARGYROPOULOS e MULLER, 2014). Para a secagem de fatias de cenoura, Wu *et al.* (2014) verificaram que aplicação da radiação IV induziu uma maior luminosidade da superfície das amostras, melhorando sua refletividade, o que não foi observado no presente trabalho.

A coordenada a^* apresentou tendência de aumento no sentido da coloração vermelha em todas as condições empregadas. Já o parâmetro b^* sofreu decréscimo na condição de IR = 700 W/m^2 embora tenha apresentado tendência de aumento na direção do amarelo para as outras condições de IR. Estes resultados indicam uma tendência de aumento da tonalidade castanha dos grãos de pólen secos.

Por outro lado, durante a secagem em leito fluidizado convencional e assistido por radiação infravermelho, a luminosidade dos grãos aumentou ligeiramente e houve redução do parâmetro a^* . O aumento entre a luminosidade do material *in natura* e do produto seco foi de 18,2; 10,0 e 5,8% para as condições de temperatura do ar de secagem de 35, 45 e 55°C , respectivamente. Na secagem híbrida ocorreu um aumento médio de $12 \pm 3 \%$ no valor de L^* e uma redução de aproximadamente $35 \pm 7\%$, em média, do valor do parâmetro a^* . O parâmetro b^* em ambos os casos manteve-se aproximadamente constante.

A alteração nos parâmetros colorimétricos durante a secagem, bem como o desenvolvimento de *off-flavors*, frequentemente indica a ocorrência de reações de escurecimento, enzimático ou não enzimático, no material.

Para avaliar o escurecimento do pólen apícola submetido à secagem, utilizaram-se os valores das coordenadas colorimétricas no cálculo do índice de escurecimento. O índice de escurecimento mede a pureza da cor castanha na amostra e por isso é um parâmetro que

indica a formação dos pigmentos amarronzados decorrente das reações de escurecimento durante o processo de secagem.

As curvas de evolução do índice de escurecimento durante a secagem infravermelho dos grãos de pólen apícola para as diferentes condições de potência empregadas são apresentadas na Figura 4.31.

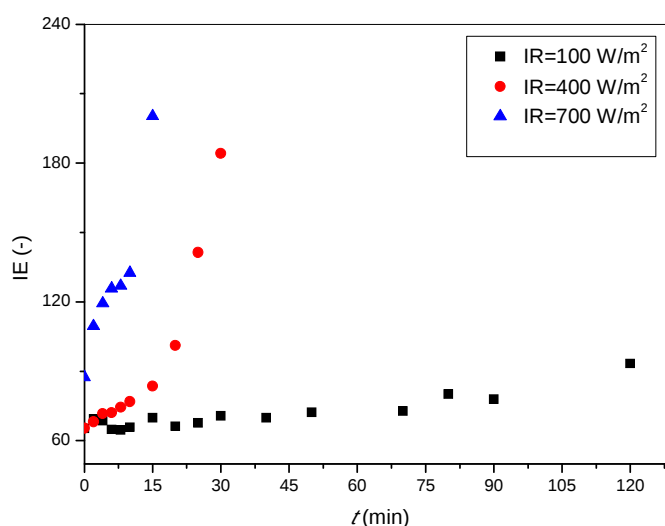


Figura 4.31: Índice de escurecimento dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem via radiação infravermelha em camada fina, parametrizado nas diferentes potências da fonte de aquecimento empregadas.

Conforme pode ser observado através da Figura 4.31, o escurecimento dos grãos foi intensificado pelo aumento da potência de radiação. Tal resultado pode indicar a ocorrência de reações de escurecimento, enzimático ou não enzimático, no material. Dentre as reações de escurecimento não-enzimático, as reações de Maillard envolvem aminoácidos e açúcares redutores na produção melanoidinas, que são pigmentos de cor marrom. Visto que o pólen apícola possui, em sua composição, elevados teores de açúcar e aminoácidos, é possível que as temperaturas atingidas pela amostra durante a secagem via radiação IV tenham favorecido a ocorrência de reações de Maillard.

Equações cinéticas de ordem zero e de primeira ordem foram ajustadas aos dados experimentais. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Resultados da análise de regressão não-linear da cinética de escurecimento do pólen apícola aplicando modelos de ordem zero e de primeira ordem

IR (W/m ²)	<i>t</i> (min)	<i>T_s</i> (°C)	Ordem zero			Primeira ordem	
			<i>C</i> ₀	<i>α</i> ₀ (min ⁻¹)	<i>R</i> ²	<i>α</i> ₁ (min ⁻¹)	<i>R</i> ²
100	93	77,1	60,9	0,31	0,9550	2,0·10 ⁻³	0,3244
400	76	127,9	51,5	3,54	0,9223	3,1·10 ⁻²	0,9449
700	16	153,0	87,7	6,41	0,9361	5,3·10 ⁻²	0,9542

Para a condição de 100 W/m², a cinética de escurecimento foi melhor descrita por uma equação de ordem zero, enquanto para as outras condições a equação de 1ª ordem apresentou melhor capacidade de predição, com base no índice de correlação em cada caso.

Após o ajuste dos dados experimentais, com auxílio da Equação 3.20, obtiveram-se o parâmetro pré-exponencial $\alpha = 1,29 \cdot 10^5$ (min⁻¹) e a energia de ativação $E_a = 52,19$ kJ mol⁻¹ com um valor de $R^2 = 0,9991$.

Os valores determinados pertencem à mesma faixa encontrada por Maskan (2001) e evidenciam que a intensidade de radiação aumenta a taxa de escurecimento.

Nas Figuras 4.32 e 4.33 são apresentadas as curvas do índice de escurecimento dos grãos de pólen submetidos à secagem em leito fluidizado convencional e provido com aquecimento IV, respectivamente.

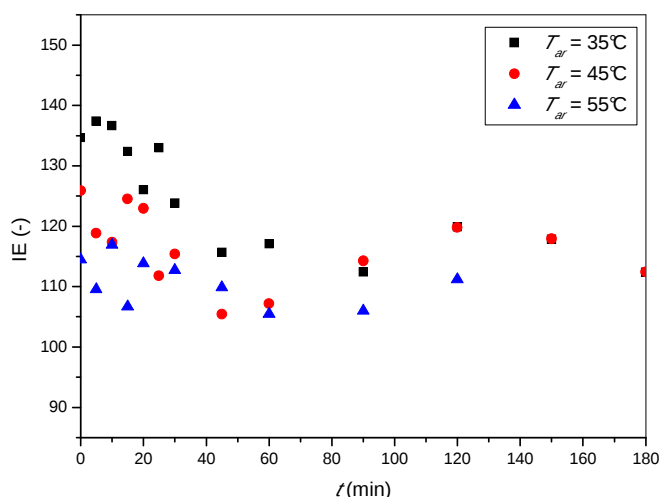


Figura 4.32: Índice de escurecimento dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem em leito fluidizado, parametrizado nas diferentes condições de temperatura do ar de secagem.

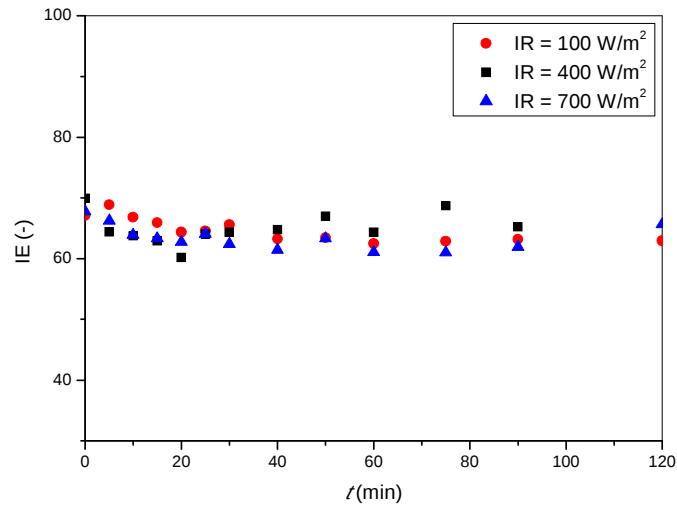


Figura 4.33: Índice de escurecimento dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem em leito fluidizado, com $T_{ar}=25^{\circ}\text{C}$, assistido por aquecimento infravermelho parametrizado nas diferentes potências de radiação empregadas.

Com base nas Figuras 4.32 e 4.33, verificou-se que em ambos os processos não foi observada a ocorrência do escurecimento, como pode ser verificado pelo não aumento da cor castanha no material. Durante a secagem combinada houve manutenção da cor castanha nos grãos, entretanto durante a secagem convencional foi observado uma ligeira diminuição do parâmetro no início do processo.

As curvas da evolução da coordenada *hue* (H^*) durante o processo de secagem dos grãos de pólen, através de diferentes técnicas, são apresentadas na Figura 4.34.

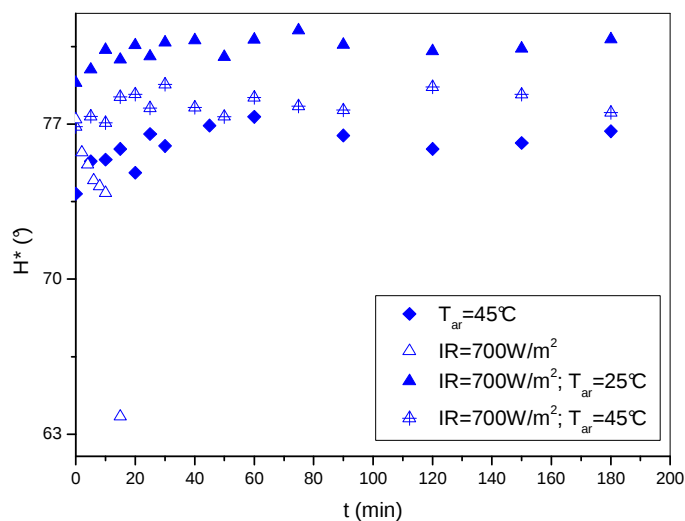


Figura 4.34 Ângulo *hue* dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem através de diferentes técnicas.

O valor de *hue* entre 70 e 80° indica a cor alaranjada dos grãos de pólen. Durante a secagem infravermelho em camada fina houve uma redução acentuada do valor de H^* indicando a mudança da tonalidade da cor dos grãos no sentido de intensificação da tonalidade vermelha.

Durante a secagem em leito fluidizado convencional e sob radiação IV, não houve variação da tonalidade dos grãos, de modo que o valor de H^* permanece aproximadamente constante durante todo o processo, conforme apresentado na Figura 4.34.

Em conjunto com o ângulo *hue*, a coordenada croma (C^*) indica a cromaticidade do material. A coordenada croma, ou índice de saturação mensura a intensidade da cor. As curvas da evolução da coordenada croma durante o processo de secagem dos grãos de pólen, através de diferentes técnicas, são apresentadas na Figura 4.35 a 4.37.

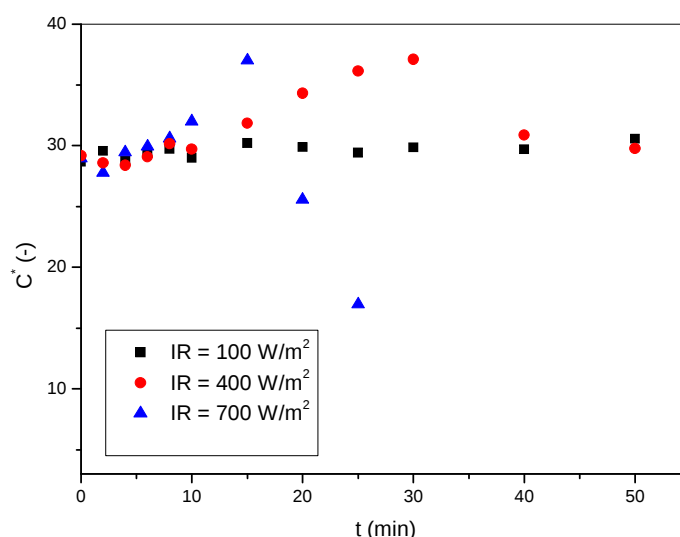


Figura 4.35: Índice de saturação dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem infravermelho em camada fina, parametrizado nas diferentes intensidades de radiação empregadas.

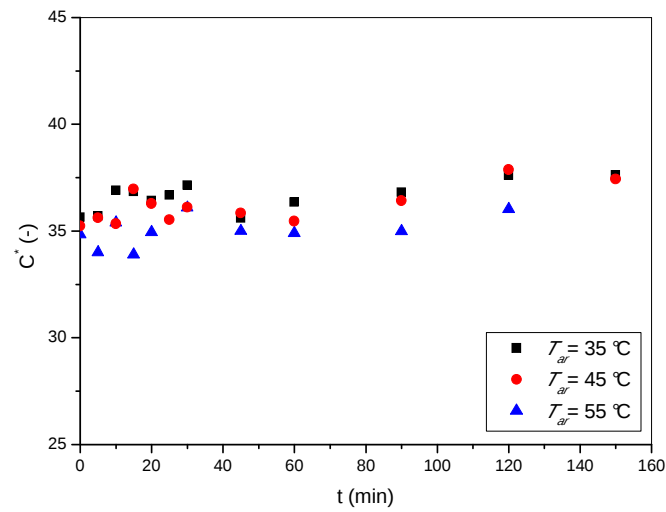


Figura 4.36: Índice de saturação dos grãos de pólen apícola ao longo do processo de secagem em leito fluidizado convencional, parametrizado nas diferentes temperaturas do ar de secagem.

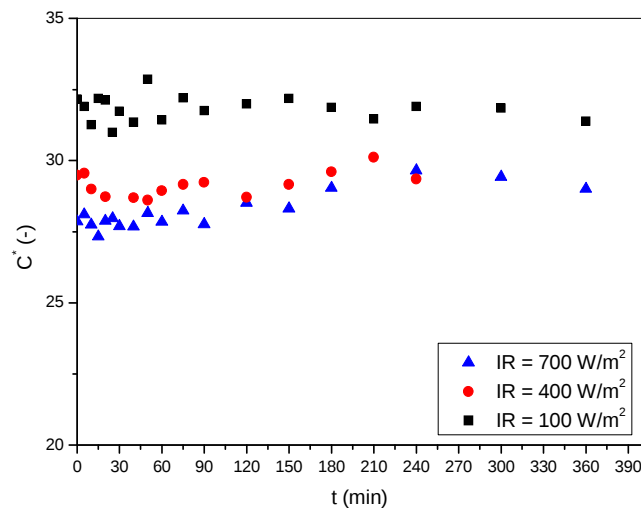


Figura 4.37: Índice de saturação dos grãos de pólen apícola durante secagem em leito fluidizado, com $T_{ar}=25\text{ °C}$ e assistido por aquecimento IV, em diferentes fluxos de radiação empregados.

A partir das Figuras 4.35, 4.36 e 4.37, verificou-se que, inicialmente os grãos de pólen apresentam um valor de C^* igual $31,3 \pm 3,2$. Durante a secagem infravermelho em camada fina, verificou-se um aumento da intensidade da cor seguido de uma redução brusca do valor de C^* para as condições mais intensas de fluxo de radiação (400 e 700 W/m²). Este fato evidencia o escurecimento do material como foi relatado anteriormente em relação ao índice de escurecimento (Figura 4.31). Para a condição de intensidade de radiação de 100 W/m², o índice de saturação permanece praticamente inalterado ao longo de todo o processo e igual a $31,2 \pm 2,6$.

De modo semelhante, para amostras secas em leito fluidizado convencional e sob radiação IV também não foi verificada variação significativa da intensidade da cor dos grãos conforme apresentados nas Figuras 4.36 e 4.37. Dessa maneira, ficou evidente a manutenção dos parâmetros colorimétricos do produto beneficiado através da técnica combinada.

iii) Atividade de água

A atividade de água em um produto indica a estabilidade microbiológica do mesmo e, conseqüentemente, seu tempo de prateleira. Por isso, avaliou-se a atividade de água dos grãos de pólen apícola *in natura* e submetido à secagem em leito fluidizado assistida por radiação infravermelho a fim de verificar a estabilidade microbiológica dos grãos secos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Atividade de água em amostras de pólen apícola *in natura* e com 8% b.u. de umidade após o processo de secagem em leito fluidizado assistido por radiação infravermelho

IR (W/m ²)	a_w
<i>In natura</i>	$0,7999 \pm 0,0200$
100	$0,4076 \pm 0,0004$
400	$0,4169 \pm 0,0001$
700	$0,4137 \pm 0,0055$

Um alimento é considerado estável microbiologicamente e pode ser chamado desidratado quando a atividade de água é inferior a 0,65, portanto os resultados obtidos indicam a estabilidade microbiológica dos grãos secos. Tais resultados também estão na faixa determinada por Correia-Oliveira *et al.*, (2008) de atividade de água do pólen apícola desidratado em Sergipe. Segundo os autores, a média de atividade do pólen apícola sergipano desidratado é de 0,446 a_w .

iv) Carotenóides totais e teor de betacaroteno

O aumento no consumo de pólen apícola está associado à busca por produtos naturais com efeito terapêutico por parte do mercado consumidor. O pólen é rico em vitaminas e minerais e sua coloração está intimamente associada à presença de carotenóides, em especial, o betacaroteno. Entretanto, alguns trabalhos relatam a ausência de betacaroteno no pólen

como resultado da degradação deste carotenóide durante o seu processamento (ALMEIDA-MURADIAN *et al.*, 2005).

Investigou-se, portanto, o teor de carotenóides totais e betacaroteno, antes e após o processo de secagem em leito fluidizado assistido por radiação infravermelho a fim de avaliar a ocorrência ou não da degradação de tais compostos. Os resultados obtidos estão reunidos na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Teor de carotenóides totais e betacaroteno do pólen apícola *in natura* e com 8% b.u. de umidade após o processo de secagem em leito fluidizado com $T_{ar} = 25^{\circ}\text{C}$ assistido por radiação infravermelho

IR (W/m^2)	Carotenóides Totais ($\mu\text{g/g}$ de pólen seco)		Betacaroteno ($\mu\text{g/g}$ de pólen seco)	
	<i>In natura</i>	desidratado	<i>In natura</i>	Desidratado
100	$1,09 \pm 0,05$	$0,84 \pm 0,10$	$0,96 \pm 0,07$	$0,99 \pm 0,12$
400	$1,24 \pm 0,63$	$1,49 \pm 0,44$	$1,36 \pm 0,12$	$1,30 \pm 0,05$
700	$8,67 \pm 0,38$	$6,35 \pm 0,59$	$3,96 \pm 0,75$	$2,18 \pm 0,02$

Ao nível de confiança de 95%, verificou-se que há diferença significativa no teor de carotenóides das amostras secas a 100 e 700 W/m^2 , não sendo observada essa variação para a condição de 400 W/m^2 . Uma possível explicação é a combinação favorável da intensidade e do tempo de processamento.

Carotenóides são, em geral, sensíveis à presença de oxigênio, luz, umidade, pH e altas temperaturas. A condição mais amena de intensidade de radiação (100 W/m^2) durante a secagem requer maior tempo de operação, dessa forma o material fica mais tempo exposto à presença de oxigênio, um dos agentes que causa a degradação de carotenóides em alimentos. Por outro lado, a condição mais intensa (700 W/m^2), embora acelere o tempo de processo, ocasiona degradação em virtude da maior temperatura atingida pelo grão além do efeito da irradiação.

Com base os valores apresentados na Tabela 4.18, verifica-se que para a condição de $\text{IR} = 700 \text{ W/m}^2$, houve uma redução de 26,7% no teor de carotenóides totais e de 44,9% no teor de betacaroteno. Tais valores são próximos aos 27,6 e 46,4% obtidos via desidratação a frio e inferiores àqueles obtidos com o processo de secagem em estufa convencional (40,4 e 56,5%) relatados por Oliveira (2006).

Quanto ao teor de betacaroteno do pólen desidratado com intensidades de radiação de 100 e 400 W/m², em um intervalo de confiança de 95%, não houve variação significativa em relação ao pólen *in natura*, sendo um indicativo de que não houve degradação desses compostos.

Logo, pode-se afirmar que a secagem em leito fluidizado assistido por aquecimento IV, aplicado em intensidades adequadas, mostra-se como uma alternativa promissora para a preservação da qualidade do pólen, em termos da retenção de carotenóides totais e de betacaroteno.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos e nos resultados obtidos no presente trabalho sobre a aplicação de um secador de leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho para o beneficiamento de pólen apícola foi possível obter, para as condições estudadas, as conclusões descritas abaixo.

A unidade experimental projetada e construída apresentou um bom sistema de escoamento e homogeneização do ar, bem como um sistema de aquecimento uniforme das partículas no leito, permitindo a realização dos estudos fluidodinâmicos e de secagem.

A maior parte dos grãos de pólen apícola recebidos do município de Neópolis, Sergipe, apresenta diâmetro médio de peneira de 2,03 mm com densidade aparente de 1.244,5 kg/m³. O material particulado pertence à classe D de Geldart e apresenta boa escoabilidade (HR <1,4 e ângulos de repouso abaixo de 30°).

O aumento do diâmetro das partículas conduziu a uma menor queda de pressão na região de leito fixo. Tal fato foi atribuído ao aumento da permeabilidade do leito que resultou em uma menor resistência à passagem do ar no leito.

O aumento das forças inerciais associadas a partículas de maior diâmetro demandou um incremento na energia cinética necessária para provocar o deslocamento dessas partículas, por isso foi observado o aumento da velocidade mínima de fluidização de 0,267 a 0,864 m/s com o aumento do tamanho da partícula, na faixa 0,84 a 2,84 mm.

Dentre as correlações empíricas utilizadas para o cálculo da velocidade mínima de fluidização para os diferentes diâmetros de partícula, as equações de Noda *et al.* (1986), Babu *et al.* (1978) e Saxena e Vogel (1977), com erros médios de 11,3; 18,3 e 25,1%, respectivamente foram selecionadas como as correlações mais adequadas para prever a velocidade mínima de fluidização nas condições estudadas.

Quanto à dependência da velocidade mínima em relação à carga inicial alimentada ao leito, para cargas entre 400 e 1000 g, a velocidade mínima de fluidização manteve-se num patamar de 0,637 m/s. Para cargas inferiores, verificou-se que a velocidade mínima de fluidização é, em média, 23% menor. E para cargas superiores, a velocidade mínima de fluidização foi de 0,762 m/s. O aumento da velocidade mínima de fluidização com o aumento da massa inicial foi atribuído a um fenômeno de expansão do gás que atrasa a fluidização do fundo do leito enquanto que a parte superior já é fluidizada.

Quanto à influência do teor de umidade sobre o comportamento fluidodinâmico dos grãos, não foi observado efeito significativo para o material com teor de umidade entre 7 e 21%, de modo que a velocidade mínima de fluidização manteve-se, em média, $0,645 \pm 0,042$ m/s.

A secagem dos grãos de pólen, em todas as técnicas empregadas, ocorreu predominantemente à taxa decrescente, indicando que o processo foi governado pela difusão interna de umidade.

Na secagem IV em camada fina o aumento da intensidade de radiação provocou, como esperado, uma maior remoção de umidade, num menor tempo de processo. O tempo de secagem para reduzir o teor de umidade dos grãos para o valor alvo de 4% b.u., recomendado pela legislação brasileira, foi de (60 ± 5) min, (18 ± 2) min e (9 ± 1) min, para as intensidades de radiação IV de 100, 400 e 700 W/m², respectivamente.

Os valores obtidos para a difusividade efetiva do processo envolvendo a aplicação isolada de raios IV na secagem de pólen apícola em leito fixo e camada fina variaram entre $4,98 \times 10^{-11}$ e $4,07 \times 10^{-10}$ m²/s. A dependência da difusividade efetiva com a intensidade radiação IV foi descrita por uma relação do tipo Arrhenius ($R^2 = 0,969$) cujo fator pré-exponencial foi igual a $1,21 \times 10^{-9}$ m²/s e a energia de ativação foi de 746,8 W/m².

Para as diferentes condições de secagem de pólen em leito fluidizado convencional, os valores da difusividade efetiva variaram de 3,0 a $6,2 \times 10^{-11}$ m²/s. A energia de ativação para o pólen processado no leito fluidizado convencional foi de 27,4 kJ/mol. A partir dos dados cinéticos de secagem a umidade de equilíbrio dinâmico (X_{eq}) foi determinada 0,085; 0,046 e 0,035 b.s. para as temperaturas de 35, 45 e 55 °C, respectivamente.

O aumento da temperatura do ar contribuiu para elevar o coeficiente convectivo de transferência de calor entre as fases sólida e fluida, resultando numa maior temperatura da superfície dos grãos de pólen. Isso intensificou a evaporação da água contida no interior das partículas, conduzindo ao aumento na remoção de umidade. Além disso, o aumento da temperatura do ar levou a uma diminuição da umidade relativa, de modo que a diferença entre a umidade contida no interior da partícula e no ar que circunda o material aumentou, refletindo no aumento assim da força motriz para a secagem. A técnica híbrida aplicada os grãos de pólen propiciou condições amenas de secagem em decorrência do efeito de resfriamento causado pela passagem do ar de fluidização. Após um período de rápida elevação da temperatura do material no leito no estágio inicial do processo de secagem (15 min), a temperatura da superfície das partículas tendeu assintoticamente a 25 °C, 28 °C e 30 °C,

quando o material foi exposto às intensidades de radiação IV 100, 400 e 700 W/m², respectivamente.

Como o aumento da intensidade de radiação aplicada no leito, verificou-se o aumento da remoção de umidade. As difusividades efetivas obtidas ao se aplicar intensidades de radiação de 100, 400 e 700 W/m² ao leito de partículas percolado por ar não aquecido ficaram na faixa de 3,1 a $3,98 \cdot 10^{-11}$ m²/s. Verificou-se um aumento em D_{eff} em torno de 30% em relação à secagem em leito fluidizado convencional, em condições análogas, denotando a intensificação na taxa de transferência de massa ao se combinar a radiação IV e a fluidização de grãos de pólen.

A dependência da difusividade de umidade efetiva com a intensidade radiação IV no secador híbrido foi descrita por uma relação do tipo Arrhenius ($R^2 = 0,996$) cujo fator pré-exponencial foi igual a $4,11 \cdot 10^{-11}$ m²/s e a energia de ativação foi de 29,38 W/m².

O emprego da técnica híbrida sem aquecimento do ar em toda a faixa de intensidade de radiação IV aplicada no leito permitiu a redução do teor de umidade do pólen apícola até um valor de (0,082±0,02) b.u.. Logo, o teor de umidade de 4% b.u. recomendado pela legislação brasileira não foi atingido. No entanto, o produto obtido atende o teor de umidade alvo fixado por outros país da América e da Europa, cujos órgãos reguladores permitem valores entre 8 e 10% b.u.

A combinação dos aquecimentos IV e convectivo permitiu alcançar o valor recomendado pela legislação brasileira em um tempo de processo menor que o realizado atualmente pelos produtores. O maior valor de difusividade efetiva de umidade na secagem híbrida ($5,56 \cdot 10^{-11}$ m²/s) comparado ao da secagem convencional ($4,39 \cdot 10^{-11}$ m²/s) corrobora a sinergia entre os modos de aquecimento.

O consumo de energia específica variou entre 119 e 155 MJ/kg na secagem híbrida, sem aquecimento do ar. O aumento da intensidade de radiação acelerou o processo de secagem de modo que o consumo energético foi reduzido em 23%.

Quanto à eficiência energética do secador híbrido em relação ao secador convencional, para a intensidade de radiação de 700 W/m², que leva o sólido atingir a mesma temperatura da secagem convencional a 35°C, a redução do consumo energético chegou a 52%.

A interação da energia eletromagnética na região do IV com a umidade no interior dos grãos associada ao efeito de resfriamento causado pelo escoamento de ar a 25°C proporcionou redução na quebra das partículas durante a secagem combinada em relação à secagem convencional.

O emprego do aquecimento do ar combinado ao aquecimento IV, embora tenha permitido a diminuição da umidade relativa do ar conduzindo a um teor de umidade final do produto inferior a 4% b.u., favoreceu o fenômeno de aglomeração de partículas.

Dentre as técnicas empregadas, a secagem infravermelho em camada fina resultou num produto com maiores alterações colorimétricas quando comparado aos grãos de pólen *in natura*. Verificou-se a perda de brilho e o aumento da coordenada a^* .

O escurecimento dos grãos foi intensificado pelo aumento da potência de radiação indicando que as altas temperaturas atingidas pela amostra durante a secagem via radiação IV podem ter favorecido a ocorrência de reações de Maillard, visto que o pólen apícola é rico em açúcares e aminoácidos.

Para a condição de 100 W/m^2 , a cinética de escurecimento foi melhor descrita por uma equação de ordem zero, enquanto para as outras condições a equação de 1ª ordem apresentou melhor capacidade de predição.

Já durante a secagem em leito fluidizado convencional e híbrida não foi observada a ocorrência do escurecimento, enzimático ou não enzimático. De modo que houve manutenção da tonalidade e intensidade da cor nessas amostras.

Embora tenha sido verificada uma redução de 26,7% no teor de carotenóides totais e de 44,9% no teor de betacaroteno durante a secagem híbrida dos grãos de pólen com $\text{IR} = 700 \text{ W/m}^2$, tais valores são inferiores aos valores obtidos nos processos de secagem atualmente mais empregados no beneficiamento de grãos de pólen (desidratação a frio: 27,6 e 46,4%; estufa convencional: 40,4 e 56,5%).

Além disso, para a condição de $\text{IR} = 400 \text{ W/m}^2$ não foi observada variação significativa no teor de carotenóides durante a secagem combinada. E quanto ao teor de betacaroteno do pólen desidratado com intensidades de radiação de 100 e 400 W/m^2 não houve variação significativa em relação ao pólen *in natura*, sendo um indicativo de que não houve degradação desses compostos.

As amostras secas foram consideradas estabilizadas microbiologicamente visto que apresentaram atividade de água de 0,4105 ($a_w < 0,65$).

O processo de secagem em leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho, aplicado em intensidades adequadas, mostra-se, portanto, como uma alternativa promissora para o beneficiamento de pólen apícola. Além de reduzir o teor de umidade a níveis que asseguram estabilidade microbiológica, em um tempo e consumo energético menores, quando comparados com os métodos de secagem usualmente empregados nos Arranjos Produtivos Locais (APL's) de apicultura, a secagem híbrida investigada neste trabalho contribuiu para a

preservação da qualidade do pólen apícola, em termos dos seus atributos de cor e dos teores de carotenóides totais e de betacaroteno.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se:

- Determinação das isothermas de equilíbrio higroscópico do material;
- Estudo da influência da velocidade do ar e da carga inicial sobre a cinética de secagem em leito fluidizado assistido por radiação infravermelho;
- Análise qualitativa e quantitativa dos aminoácidos e açúcares presentes no material a fim de comprovar a ocorrência das reações de Maillard durante a secagem infravermelho;
- O estudo do comportamento fluidodinâmico dos grãos de pólen apícola em leito de jorro;
- O estudo da secagem do pólen em leito de jorro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH,E.C.; GELDART, D..The use of bulk density measurements as flowability indicators. **Powder Technology**. vol 102. 1999. p. 151–165.
- ACEVEDO, N.; SCHEBOR,C.; BUERA,M.P.. Water–solids interactions, matrix structural properties and the rate of non-enzymatic browning. **Journal of Food Engineering**. v. 77, Issue 4, 2006, p. 1108-1115.
- ACHANTA, S.; OKOS, M. R. **Quality changes during drying of food polymers**. Chapter No 5 of Drying Technology in Agriculture and Food Sciences /ed. A. S. Mujumdar/, Science Publishers, Inc., Enfield (NH), USA, p. 133-147, 2000.
- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORREA, P. C.. Influência do tempo de armazenagem na cor dos grãos de café pré-processados por "via seca" e "via úmida". **Ciência e Agrotecnologia**. 2003, vol.27, n.6, pp. 1268-1276. ISSN 1413-7054.
- ALLEN, T.. **Particle Size Measurement**. vol.1. Powder sampling and particle size measurement methods, Chapman & Hall, London 1997a.
- ALLEN, T.. **Particle Size Measurement**.. vol 2. Surface area and pore size determination. 5^a ed. (particle Technology Series) – Chapman & Hall. London. 1997b.
- ALMEIDA-MURADIAN, L.B.; PAMPLONA, L. C.; COIMBRA, S.; BART, O. M.. Chemical composition and botanical evaluation of dried bee pollen pellets. **Journal of Food Composition and Analysis**, V. 18, 2005, p. 105-111.
- ALVES, R. F. **Análise palinológica do pólen apícola produzido no estado de Sergipe, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciências - Botânica). Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, Bahia, 2013.
- ARGYROPOULOS, D.; MÜLLER, J.. Kinetics of change in colour and rosmarinic acid equivalents during convective drying of lemon balm (*Melissa officinalis* L.), **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**. v. 1. 2014. p. e15-e22.
- BALASUBRAMANIAN,N.; SRINIVASAKANNAN, C.. Drying of granular materials in circulating fluidized beds. **Advanced Powder Technology**, v 18, Issue 2, 2007, p. 135-142
- BARAJAS, J.; CORTES-RODRIGUEZ, M.; RODRÍGUEZ-SANDOVAL, E. Effect of Temperature on the Drying Process of Bee Pollen from Two Zones of Colombia. **Journal of Food Process Engineering**. 35.2012. p.134–148.

- BARATI, E.; ESFAHANI, J.A.. A new solution approach for simultaneous heat and mass transfer during convective drying of mango. **Journal of Food Engineering**. vol 102. p. 302–309. 2011.
- BARBOSA NETO, A. M. ; MARQUES, L. G. ; PRADO, M. M. ; SARTORI, D. J. M. . Mass Transfer in Infrared Drying of Gel-Coated Seeds. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v. 04, p. 39-48, 2014.
- BARRETO, L. M. R. C.; FUNARI, R. C.; ORSI, R.O.. Pólen Apícola: Perfil da Produção do Brasil. In: CONGRESSO DE APICULTURA DEL MERCOSUR, 1., 2005, Punta Del Este. **Anais do Congresso de Apicultura del MERCOSUR**. Punta Del Este: 2005. 20p.
- BASTOS, M. N. P.. **Configuração do setor da apicultura em Sergipe**. 2004. 40 f. Monografia (Especialização em Desenvolvimento Econômico Local) - Núcleo de Pós-Graduação e Pesquisa em Economia, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe.
- BOERI, C. N. **Modelagem Matemática da Secagem de Grãos de Soja em Camada Fina**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.
- BRASIL, 2001. **Instrução Normativa n. 3 de 2001**. Regulamentos Técnicos de Identidade e Qualidade, de Apitoxina, de Cera de Abelha, de Geléia Real, de Geléia Real Liofilizada, de Pólen Apícola, de Própolis, de Extrato de Própolis)
- BROOKER, Donald B; BAKKER-ARKEMA, Fred W; HALL, Carl W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Avi Book, 1992. ix, 450 p.
- CAMACHO, I. G. C.. **Estudo Aerobiológico da Cidade do Funchal Detecção Bioquímica dos Principais Aeroalergénios Polínicos**. 256 f. Tese (Doutorado). Universidade da Madeira, 2007.
- CAMPOS, M. G. R.; BOGDANOV, S; ALMEIDA-MURADIAN, L. B.; SZCZESNA, T.; MANCEBO, Y.; FRIGERIO, C.; FERREIRA, F.. Pollen composition and standardisation of analytical methods. **Journal of Apicultural Research and Bee World**, v. 47, n. 2, p. 156-163, 2008.
- CARDOSO, PC ; STRINGHETA, P. C. ; CHAVES, J. B. P. ; DELLA LUCIA, C. M. ; PINHEIRO-SANT'ANA, H. M. . Carotenos provitamínicos A em hortaliças preparadas em Unidades Produtoras de Refeições comerciais. **Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos (Impresso)**, v. 27, p. 71-82, 2009.

- CARPES, S. T.; BEGNINI, R.; ALENCAR, S. M. DE; MASSON, M. L.. Study Of Preparations Of Bee Pollen Extracts, Antioxidant and Antibacterial activity. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1818-1825, nov./dez., 2007.
- CARVALHO, N. M. de. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 3. ed. Campinas, SP: Fundacao Cargill, 1988. 423 p.
- CELMA, A. RUIZ; CUADROS, F.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F. Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process, **Food and Bioproducts Processing**. v. 87. 2009. p. 282-291.
- CHAYJAN, R. A.; BARIKLOO, H.; SOLEYMANI, B.. Modeling Moisture Diffusivity and Energy Consumption of Cantaloupe Seeds in Fixed and Fluidized Bed Conditions. *Acta Scientiarum Polonorum : Technologia Alimentaria*, vol.11. ed 4, 2012, p.327.
- CHUTINTRASRI, B.; NOOMHORM, A.. Color degradation kinetics of pineapple puree during thermal processing. **LWT - Food Science and Technology**, v. 40. 2007. p. 300-306.
- COLTTERS, R.; RIVAS, A.L.. Minimum fluidization velocity correlations in particulate systems. **Powder Technology**, vol. 147, 2004, p.34-48
- CORREIA-OLIVEIRA, M. E.; FERREIRA, A. F.; PODEROSO, J. C. M.; LESSA, A. C. V.; ARAÚJO, E. D.; CARNELOSSI, M. A. G.; RIBEIRO, G. T.. Atividade de Água (A_w) em amostras de Pólen Apícola Desidratado e Mel do Estado de Sergipe. **Revista da Fapese**, v.4, n. 2, p. 27-36, jul./dez. 2008.
- CORREIA-OLIVEIRA, M. E.. **Aspectos dos agroecossistemas de produção apícola sergipana**. São Cristóvão, SE, 2008. 126 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Núcleo de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe, 2008
- COSTA, P. S. C.; OLIVEIRA, J. S.. **Manual prático de Criação de abelhas**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2005. 424 p
- COUTO, R. H. N.; COUTO, L. A.. **Apicultura: manejo e produtos**. 3. ed. rev. e atual. Jaboticabal, SP: FUNEP, 2006. 193 p.
- CREMASCO, M. A.. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Blucher, 2012.
- DANTAS, P. C.; CORREIA-OLIVEIRA, M. E.; PODEROSO, J. C. M.; GONÇALVES, F. B.; FERREIRA, A. F.; RIBEIRO, G. T.; ARAÚJO, E. D. Preferências da população da Região Metropolitana da Grande Aracaju (SE), sobre o consumo de produtos apícolas. **Scientia Plena**. vol. 5, nº 12. 2009.

- DAS, I.; DAS, S.K.; BAL, S.. Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying, **Journal of Food Engineering**, v. 95. 2009. p. 166-171.
- DELEBARRE, A.; MORALES, J.; RAMOS, L.. Influence of the bed mass on its fluidization characteristics. **Chemical Engineering Journal**, v 98, Issues 1–2. 2004. p. 81-88
- DIAS, L.M.J.. **Aspectos Gerais de Palinologia**. 2006.
- DONDEE, S.; MEESO, N.; SOPONRONNARIT, S.; SIRIAMORNPNUN, S.. Reducing cracking and breakage of soybean grains under combined near-infrared radiation and fluidized-bed drying. **Journal of Food Engineering**. n.104. p. 6–13. 2011.
- DOYMAZ, İ.. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices. **Journal of Food Science and Technology**. vol.49. ed 6. 2012. p.760-766.
- ESCUADERO, D.; HEINDEL, T. J.. Bed height and material density effects on fluidized bed hydrodynamics. **Chemical Engineering Science**. vol.66. ed 16. 2011. p.3648-3655.
- ESTEVINHO, L. M.; RODRIGUES, S.; PEREIRA, A. P.; FEÁS, X. .Portuguese bee pollen: palynological study, nutritional and microbiological evaluation. **International Journal of Food Science and Technology**, 47, p. 429–435. 2012.
- EVANGELISTA-RODRIGUES, A.. Produtos apícolas: Avanços na produção e comercialização. In: XVI Congresso Brasileiro de Zootecnia, VIII Congresso Internacional de Zootecnia - ZOOTECH, 2006, Recife. **Anais do ZOOTECH 2006**, 2006.
- FASINA, O. O.; TYLER, B.; PICKARD, M.; ZHENG, G.; WANG, N. Effect of Infrared Heating on the Properties of Legume Seeds. **International Journal of Food Engineering**. v. 36, p. 79-90, 2001.
- FEÁS, X., VÁZQUEZ-TATO, M.P., ESTEVINHO, L., SEIJAS, J.A., IGLESIAS, A.. Organic bee pollen: Bioactive compounds, antioxidant activity and microbiological quality. **Molecules**, v17, 2012. p. 8359-8377
- FERREIRA, R. C. **Avaliação das características físico-químicas e microbiológica do pólen da *Melipona scutellaris* Latreille submetido a diferentes processos de desidratação**. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos), Universidade Federal da Bahia, UFBA. 2012.
- FREITAS, A. S.; ARRUDA, V. A. S. ; ALMEIDA-MURADIAN, L. B. ; BARTH, O. M. . The botanical profiles of dried bee pollen loads collected by *Apis mellifera* (Linnaeus) in Brazil. **Sociobiology**, v. 60, p. 56-64, 2013.
- GELDART, D. Types of gas fluidization, **Powder Technology**, Volume 7, Issue 5, 1973, p. 285-292.

- GELDART, D. Estimation of basic particle properties for use in fluid-particle process calculations. **Powder Technology**, 60. 1990. p. 1-13.
- GOMIDE, R. **Operações Unitárias**. — São Paulo: R. Gomide, 1980.
- GONÇALVES, J. S. T.. **Dimensionamento de um secador em leito fluidizado para secagem de cereais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2011.
- GUARDIOLA, J.; RAMOS, G.; ELVIRA, R.. Measuring the height of a fluidized bed by computer vision. **Chemical engineering science**. vol:95. 2013. pg:33 -42
- GUIMARÃES, N. P.. **Apicultura: a ciência da longa vida**. Belo Horizonte, MG: Itatiaia, 1989. 155 p. (Coleção vis mea in labore; 13).
- GUPTA, S.K.; AGARWAL, V.K.; SINGH, S.N.; SESHADRI,V.; MILLS, D.; SINGH, J.; PRAKASH, C.. Prediction of minimum fluidization velocity for fine tailings materials, **Powder Technology**, Volume 196. 2009. p. 263-271.
- HUMAN, H.; NICOLSON, S. W.. Nutritional content of fresh, bee-collected and stored pollen of *Aloe greatheadii* var. *davyana* (Asphodelaceae). **Phytochemistry**. 67. p. 1486–1492. 2006.
- JAIBOON, P.; PRACHAYAWARAKORN, S.; DEVAHASTIN, S.; SOPONRONNARIT, S.. Effects of fluidized bed drying temperature and tempering time on quality of waxy rice. **Journal of Food Engineering**. v. 95, Issue 3. 2009. p. 517-524.
- JATURONGLUMLERT, S.; KIATSIRIROAT, T.. "Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather". **Journal of Food Engineering**. v. 100. 2010. p. 254–260.
- JILIANG, M.; XIAOPING, C.; DAOYIN, L.. Minimum fluidization velocity of particles with wide size distribution at high temperatures. **Powder Technology**. vol.235, 2013. p.271-278
- JUN, S.; KRISHNAMURTHY, K.; IRUDAYARAJ, J. DEMIRCI, A.. Fundamentals and Theory of Infrared Radiation. In: ATUNGULU, G. G.; PAN, Z.. **Infrared Heating for Food and Agricultural Processing**. Chapter 1. (Contemporary Food Engineering). 2010. 300p.
- KAENSUP W.; WONGWISES, S.. Combined Microwave/Fluidized Bed Drying of Fresh Peppercorns. **Drying Technology**. vol. 22, n. 4, pp. 779–794, 2004
- KARLING, M.; CARPES, S. T.. Determinação de Compostos Fenólicos e Flavonóides Totais em Extratos Etanólicos de Pólen Apícola. In: **35ª Reunião Anual da Sociedade**

- Brasileira de Química**, 2012, Águas de Lindóia. 35^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. São Paulo - SP: SBQ, 2012. v. único.
- KASHANINEJAD, M.; MAGHSOUDLOU, Y.; KHOMEIRI, M.; TABIL, L.G. Resistance to airflow through bulk pistachio nuts (Kalleghochi variety) as affected by moisture content, airflow rate, bed depth and fill method. **Powder Technology**. v 203. 2010. p. 359-364.
- KATIFORI, E.; ALBEN, S.; CERDA, E.; NELSON, D. R.; DUMAIS, J.. Foldable structures and the natural design of pollen grains. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 2010, Vol.107(17), pp.7635-9.
- KEEY, R. B. **Drying of loose and particulate materials**. New York: Hemisphere Publishing, 1992.
- KHIR, R.; PAN, Z.; SALIM, A.; HARTSOUGH, B. R.; MOHAMED, S.. “Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying”. **LWT - Food Science and Technology**. v. 44. p. 1126-1132. 2011.
- KONDJOYAN, A.; DAUDIN, J. D.. Determination of transfer coefficients by psychrometry. **J. Int. Heat Mass Transfer**. Vol. 36. No. 7. 1993. p. 1807-1818.
- KUDRA, T.. MUJUMDAR, A. S. **Advanced drying technologies**. 2^a ed. Boca Raton, Estados Unidos: CRC Press, 2009. xvi, 462 p.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2^a ed. Butterworth-Heinemann. USA. 1991. 491p.
- LAVERDE, L. M.; ACEVEDO, A. N. C.; SCHEBOR, C.; BUERA, M. D. P.. Integrated approach for interpreting browning rate dependence with relative humidity in dehydrated fruits, **LWT - Food Science and Technology**, v 44, Issue 4, 2011, p. 963-968
- LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S.. Fluidized Bed Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3^aed., chap 8, New York: Marcel Dekker, 2006. 1312p.
- LEJA, M.; MARECZEKA, A.; WYZGOLIK, G.; KLEPACZ-BANIAK, J.; CZEKONSKA, K. Antioxidative properties of bee pollen in selected plant species. **Food Chemistry**. vol. 100. p 237–240. 2007.
- LEONEL, B. **Sergipe torna-se referência nacional na produção de polen e de mandioca**. 2009. Disponível em :<
<http://www.agenciasebrae.com.br/noticia.kmf?canal=199&cod=8817220&indice=730>
 > Acessado em 04 jul 2012.

- LIBERATO, M. C. T. C.; MORAIS, S. M. ; ALVES, P. F. . Compostos Fenólicos e Atividade Antioxidante de Pólen Apícola de Diferentes Origens Geográficas. In: **34ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química**, 2011, Florianópolis - Sc. 34ª Reunião Anual Da Sbq - Ano Internacional da Química - 2011, 2011.
- LICHTENTHALER, H. K.. Chlorophylls and carotenoids pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, San Diego, v.148. 1987. p. 350-382.
- MANDAL, D. SHARMA, V.K. PANT, H.J. SATHIYAMOORTHY, D. VINJAMUR, M.. Quality of fluidization in gas-solid unary and packed fluidized beds: An experimental study using gamma ray transmission technique. **Powder Technology**. 226. 2012. p. 91–98.
- MANZOCCO, L.; CALLIGARIS, S.; MASTROCOLA, D.; NICOLI, M. C.; LERICI, C. R.. Review of non-enzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 11, Issues 9–10. 2000. p. 340-346.
- MARCHINI, L. C.; REIS, V. D. A. DOS; MORETI, A. C. DE C. C.. Composição físico-química de amostras de pólen coletado por abelhas Africanizadas *Apis mellifera* (Hymenoptera:Apidae) em Piracicaba, Estado de São Paulo. **Ciência Rural**. 2006, vol.36, n.3, pp. 949-953.
- MASKAN, M.: Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**. 48(2), p. 169–175. 2001.
- MASSARANI, G.. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2002. 152 p.
- MEIRA, D. F. S.; ARRUDA, V. A. S.; ALMEIDA-MURADIAN, L. B.. **Propriedades bioativas do pólen apícola coletado no estado de Sergipe, Brasil**. In: 20º SIICUSP, 2012, Pirassununga. 20º Simpósio de Iniciação Científica da USP. Pirassununga: USP, 2012.
- MELO, I. L. P; ALMEIDA-MURADIAN, L. B.. Comparison of methodologies for moisture determination on dried bee pollen samples. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. 2011, vol.31, n.1, pp. 194-197.
- MEZIANE, S.. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**. vol.52. ed 3. 2011. p.1644-1649.
- MIDILLI, A. O. H.; RZAYEV, P.; AYHAN, T.. Drying and conservation conditions of pollen. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2000, Vol.80(13), pp.1973-1980.

- MORGANO, M. A.; MILANI, R. F.; MARTINS, M. C.T.; RODRIGUEZ-AMAYA, D. B.. Determination of water content in Brazilian honeybee-collected pollen by Karl Fischer titration. **Food Control**, Volume 22, Issue 10, October 2011, p. 1604-1608
- MOURA, C. R. F.; MACHADO, C. A.; LÉDO, A. DA S.; RAMOS, S. R. R.; RIBEIRO, F. E.. **Viabilidade e Conservação de Grãos de Pólen de Coqueiro Gigante sob Diferentes Condições de Armazenamento.**
- MUJUMDAR, A. S. Recen developments in the drying technologies for the production of particulate materials. In: LEVY, A.; KALMAN, H. **Handbook of conveying and handling of particulate solids.** Amsterdam: Elsevier (Handbook of power technology. 2001. 860 p.
- MUJUMDAR, A. S; DEVAHASTIN, S.. Particle Applications for Fluidized Bed Drying. In: YANG, W.. **Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems.** chap 18, New York: Marcel Dekker, 2003. 850p.
- MUJUMDAR, A. S.. Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying.** 3ªed., chap 1, New York: Marcel Dekker, 2006. 1312p.
- NETO, J. X. L. **Prejuízos Causados Pela Seca de 2012 à Apicultura Nordestina.** Palestra proferida. União Nordestina de Apicultura e Meliponicultura. 2013.
- NEVES, L. C.; ALENCAR, S. M.; CARPES, S. T.. Determinação da atividade antioxidante e do teor de compostos fenólicos e flavonoides totais em amostras de pólen apícola de *Apis mellifera*. **Brazilian Journal Food Technology**, VII BMCFB, junho 2009.
- NIAMNUY,C.; NACHAISIN,M.; POOMSA-AD, N.; DEVAHASTIN, S.. Kinetic modelling of drying and conversion/degradation of isoflavones during infrared drying of soybean. **Food chemistry.** vol:133. ed:3. 2012. p. 946 -952.
- NITZ, M ; GUARDANI, R. . Fluidização gás-sólido: fundamentos e avanços. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, p. 20 - 24, 01 dez. 2008.
- NOGUEIRA, C.; IGLESIAS, A.; FEÁS, X.; ESTEVINHO, L. M.. Commercial Bee Pollen with Different Geographical Origins: A Comprehensive Approach. **International Journal of Molecular Sciences**, 13. 2012.
- OLIVEIRA, K. C. L. S. **Caracterização do pólen apícola e utilização de vitaminas antioxidantes como indicadoras do processo de desidratação.** 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos)-Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

- PALOU, E.; LÓPEZ-MALO, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; WELTI-CHANES, J.; SWANSON, B.G. Polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree. **Journal of Food Science**, v. 64. 1999. p. 42–45.
- PAN, Z.; SHIH, C.; MCHUGH, T. H.; HIRSCHBERG, E.. Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying, **LWT - Food Science and Technology**. v. 41. 2008. p. 1944-1951.
- PARAMÁS, A. M. G.; BÁREZ, J. A. G.; MARCOS, C. C.; GARCÍA-VILLANOVA, R. J.; SÁNCHEZ, J. S. HPLC-fluorimetric method for analysis of amino acids in products of the hive (honey and bee-pollen). **Food Chemistry**. vol 95. p. 148–156. 2006.
- PASIN, L. E. V. ; TERESO, M. J. A. ; BARRETO, L. M. R. C. . Análise da produção e comercialização de Mel Natural no Brasil no período de 1999 a 2010. **Agroalimentaria** (Caracas), v. 18, p. 29-42, 2012.
- PAWAR, S., KUMAR, P., MUJUMDAR, A. S.; THORAT, B. Infrared Convective Drying of Organic Pigments. **Drying Technology**, 26: p. 315–322. 2008.
- PELL, M.. **Gas Fluidization**. Handbook of Powder Technology, Volume 8. Elsevier. Holanda, 1990.
- PELL, M.; DUNSON, J.B.; KNOWLTON, T.M.. In: PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 8^a ed., seção 17, McGraw-Hill, 2008. p.67.
- PEREA-FLORES, M.J.; GARIBAY-FEBLES, V.; CHANONA-PÉREZ, J.J.; CALDERÓN-DOMÍNGUEZ, G.; MÉNDEZ-MÉNDEZ, J.V.; PALACIOS-GONZÁLEZ, E.; GUTIÉRREZ-LÓPEZ, G.F. Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. **Industrial Crops and Products**. vol. 38. 2012. p. 64-71.
- PONKHAM, K.; MEESO, N.; SOPONRONNARIT, S.; SIRIAMORNPNUN, S.. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. **Food and Bioproducts Processing**, vol.90. ed 2, 2012, p.155-164
- PUSPASARI, I.; TALIB, M. Z. M. W.; DAUD, R. W.; TASIRIN, S. M. .Fluidization characteristics of oil palm frond particles in agitated bed. **Chemical Engineering Research and Design**. vol 91. 2013. p. 497–507.
- PUTRANTO, A.; CHEN, X. D.; WEBLEY, P. A. Infrared and convective drying of thin layer of polyvinyl alcohol (PVA)/glycerol/water mixture—The reaction engineering approach (REA). **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. v. 49. 2010. p. 348-357.

- RAGHAVAN G.S.V.; RENNIE, T.J.; SUNJKA, P.S.; ORSAT, V.; PHAPHUANGWITTAYAKUL, W.; TERDTON P.. Overview of new techniques for drying biological materials with emphasis on energy aspects, **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.ol. 22. 2005. p. 195-201
- RAMOS CAICEDO, G. RUIZ, M. G. MARQUÉS, J. J P.; SOLER, J. G.. Minimum fluidization velocities for gas–solid 2D beds. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 41, Issue 9. 2002. p. 761-764
- RAO, A.; CURTIS, J. S.; HANCOCK, B. C.; WASSGREN, C.. The effect of column diameter and bed height on minimum fluidization velocity. **AIChE Journal**. vol.56, 2010. p.2304-2311.
- RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S.. Infrared Drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3^aed., chap 18, New York: Marcel Dekker, 2006. 1312p.
- RIBEIRO, J.G.; SILVA, R.A.. Estudo Comparativo da Qualidade de Pólen Apícola Fresco, Recém Processado, Não Processado d Armazenado em Freezer e Pólen De Marca Comercial Através de Análises Fisico-Químicas. **Tecnologia & Desenvolvimento Sustentável**, Ano 1, Março/2007.
- RHODES, M. J.. **Introduction to particle technology**, John Wiley & Sons Chichester, England, 320p.
- RICHARDSON, J. F. **Incipient fluidization and particulate systems**. Fluidization-Ed. Davidson J. F. e Harrison, D., Academic Press, Londres, 1971.
- ROCHA, J. F. M. **Avaliação do efeito do armazenamento na qualidade do pólen apícola**. Dissertação (Mestrado em Qualidade e Segurança Alimentar). Escola Superior Agrária de Bragança. Bragança, 2013.
- RODRIGUEZ, D.B.; RAYMUNDO, L.C.; LEE, T.; SIMPSON, K.L.; CHICHESTER, C. O. Carotenoid pigment changes inripening Momordica charantia fruits. **Annals of Botanic**, v.40, p.615-624, 1976.
- SALAGNAC, P.; GLOUANNEC, P. and LECHARPENTIER, D. Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwave heating. **International Journal of heat and mass transfer**, 47, p. 4479-4489, 2004.
- SANTOS, C. S. dos; RIBEIRO, A. de S.. Apicultura uma Alternativa na Busca do Desenvolvimento Sustentável. **Revista Verde**. v.4, n.3, p. 01- 06. jul/set. Mossoró – RN – Brasil. 2009.

- SANTOS, C. S. dos; BARRETO, K. F. B. RIBEIRO, A. de S.. A Flora Apícola de Três Domínios de Vegetação do Estado de Sergipe: Restinga, Ecótono e Caatinga. **Anais do III Congresso Latino Americano de Ecologia**. São Lourenço – MG. 2009.
- SANTOS, L. D. M. ; PRADO, M. M. . **Estudo da Secagem de Moringa oleifera**. In: XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2010, Foz do Iguaçu. Anais do XVIII COBEQ, 2010. v. 1.
- SAXENA, A; MAITY, T; RAJU, P.S; BAWA, A.S. Degradation Kinetics of Colour and Total Carotenoids in Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) Bulb Slices During Hot Air Drying. **Food And Bioprocess Technology**, 2012, Vol.5(2), pp.672-679
- SELLAMI, I. H.; WANNES, W. A.; BETTAIEB, I.; BERRIMA, S.; CHAHED, T.; MARZOUK, B & LIMAM, F.. “Qualitative and quantitative changes in the essential oil of *Laurus nobilis* L. leaves as affected by different drying methods”. **Food Chemistry**, v. 126. p. 691–697. 2011.
- SHAUL, S.; RABINOVICH, E.; KALMAN, H..Generalized flow regime diagram of fluidized beds based on the height to bed diameter ratio. **Powder Technology**, v. 228. 2012. p. 264-271.
- SHAO, Y; JIN, B., ZHONG, W..Experimental investigation of irregular particles mixing behavior in fluidized bed. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2013,v 34(4): p. 672-675
- SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C.. Argamassas com Areia Britada: Influência dos Finos e da Forma das Partículas. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas I International Symposium on Mortars Technology. Florianópolis, 2005.
- SILVA, E. A.. **Apicultura sustentável: produção e comercialização de mel no sertão sergipano**. São Cristóvão, SE, 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Núcleo de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Programa Regional Desenvolvimento e Meio Ambiente, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe, 2010.
- SILVA, F. R. G. B.; SOUZA, M.; COSTA, A. M. .S.; JORGE, L. M. M.; PARAÍSO, P. R. Experimental and numerical analysis of soybean meal drying in fluidized bed. **Powder Technology**. n. 229. p.61–70. 2012.
- SRINIVASAKANNAN, C.; BALASUBRAMANIAN,N.. An investigation on drying of millet in fluidized beds. **Advanced Powder Technology**, Volume 20, Issue 4, July 2009, p. 298-302

- STAACK, N.; AHRNÉ, L.; BORCH, E.; KNORR, D. Effect of infrared heating on quality and microbial decontamination in paprika powder. **Journal of Food Engineering**. v 86. 2008. p. 17–24.
- STEELE, R. Understanding and measuring the shelf-life of food. **Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition**. n. 100. 2004. 448 p.
- STURM, B.; VEGA, A. N.; HOFACKER, W. C. Influence of process control strategies on drying kinetics, colour and shrinkage of air dried apples. **Applied Thermal Engineering**. v. 62. 2014. p 455-460.
- TANNOUS, K.; HEMATI M.; LAGUERIE C., Caractéristiques au Minimum de Fluidisation et Expansion des Couches Fluidisées de Particules de la Catégorie D de Geldart. **Powder Technology**, 80, p. 55-72. 1994.
- USTRA, L. A. R.. **Secagem de grãos de arroz em leito fluidizado**. Dissertação(Mestrado) –Programa de Pós- Graduação em Ciência e Tecnologia Agroindustrial. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas. 95f. Pelotas, 2005.
- VIZCARRA-MENDOZA, M.G.; RUIZ-MARTINEZA, R.S.; MARTINEZ-VERAA, C. IRUEGAS-EVARISTO, A.; CARRILLO-GUERRENO, J.M.. Treatment of Pollen by Fluidization. **Drying Technology: An International Journal**. Volume 16, Issue 9-10, 1998.
- YANG, W.. Particle Characterization and Dynamics. In: YANG, W.. **Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems**. chap 1, New York: Marcel Dekker, 2003. 850p.
- WONG, A. C. Use of angle of repose and bulk densities for powder characterization and the prediction of minimum fluidization and minimum bubbling velocities. **Chemical Engineering Science**. v. 57. 2002. p. 2635 – 2640.
- WORMSBECKER, M.; PUGSLEY, T.. The influence of moisture on the fluidization behaviour of porous pharmaceutical granule. **Chemical Engineering Science**, 63, 2008. p. 4063–4069.
- WU, B.; PAN, Z.; QU, W.; WANG, B.; WANG, J.; MA, H. Effect of simultaneous infrared dry-blanching and dehydration on quality characteristics of carrot slices, **LWT - Food Science and Technology**. v. 57. 2014. p. 90-98.

APÊNDICE A

A calibração da placa de orifício utilizada para medir a vazão de ar através do leito de partículas foi realizada com auxílio de um anemômetro. Após ligar o soprador, mediu-se a velocidade do ar que passava pela coluna de acrílico e em seguida, media-se a correspondente diferença de pressão através da leitura de diferença de altura registrada no manômetro tipo tubo em U acoplado à placa de orifício. Através dos dados experimentais obtidos, foi construída a curva que relaciona a velocidade do ar no leito à perda de carga provocada na placa de orifício. Realizando-se o ajuste de uma equação linear aos dados, determinaram-se os parâmetros de calibração da placa de orifício que foram utilizados para o tratamento dos dados dos ensaios fluidodinâmicos, conforme apresentado na Figura A.1 e na Tabela A.1.

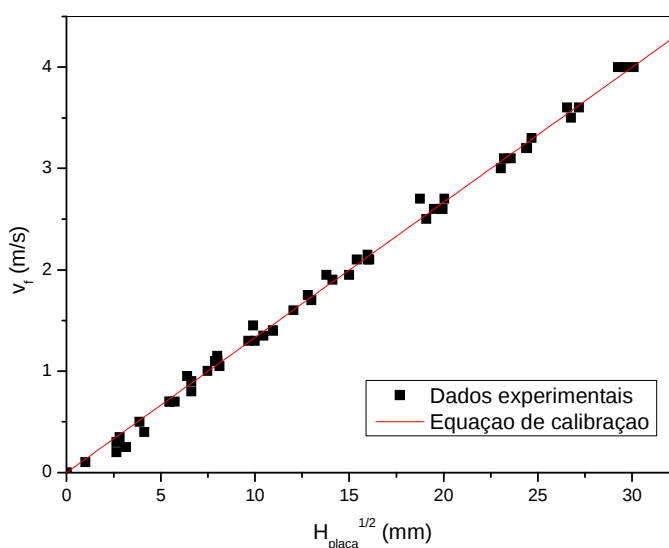


Figura A.1: Curva de calibração da placa de orifício do sistema de secagem em leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho.

Tabela A.1: Parâmetros de calibração da placa de orifício.

Ajuste da curva da placa	
Equação	$v_f = a \cdot H_{placa}^{1/2}$
R^2	0,9983
$a \text{ (m}^{1/2} \text{s}^{-1}\text{)}$	$4,2455 \pm 0,0006$

Para realizar-se a calibração do conjunto de distribuição e homogeneização do ar, a perda de carga provocada pelo conjunto foi quantificada com a coluna do leito vazia. A curva construída a partir dos dados experimentais obtidos é apresentada na Figura A.2.

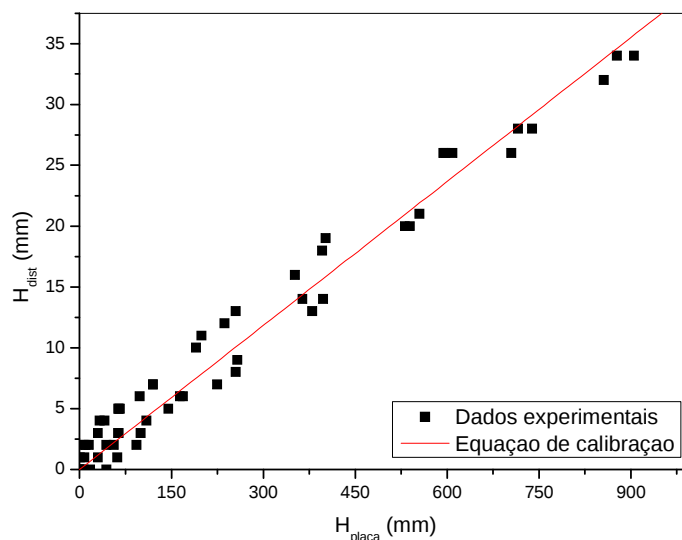


Figura A.2: Curva de calibração do sistema de distribuição de ar do leito fluidizado.

Realizando-se o ajuste linear relacionando os valores obtidos de velocidade do ar e da queda de pressão no sistema distribuidor, determinaram-se os parâmetros de calibração do conjunto para o tratamento dos dados dos ensaios fluidodinâmicos, conforme apresentado na Tabela A.2.

Tabela A.2: Parâmetros da perda de carga referente ao distribuidor.

Ajuste da curva do distribuidor	
Equação	$H_{dist}=b \cdot H_{placa}$
R^2	0,9850
b (-)	$0,0395 \pm 0,0006$

APÊNDICE B

A curva de calibração do betacaroteno foi feita uma solução estoque obtida pela diluição padrão de betacaroteno conforme apresentado na Figura B.1.

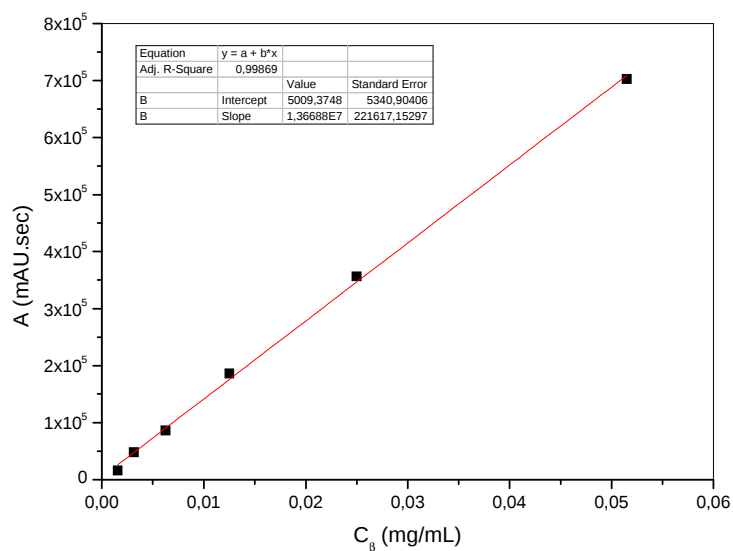


Figura B.1: Curva de calibração para as análises quantitativas de betacaroteno.

A leitura foi feita a um comprimento de onda de 450 nm segundo a análise o espectro obtido previamente, conforme apresentado na Figura B.2.

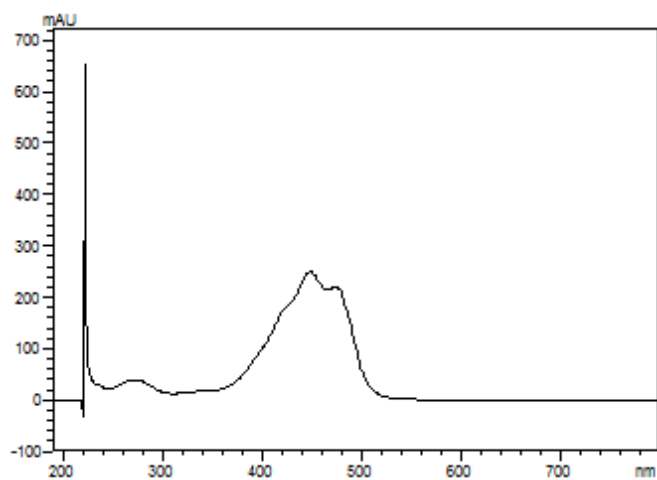


Figura B.2: Espectro do padrão de Betacaroteno.