



Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Centro de Tecnologia

Departamento de Engenharia Química

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DA SECAGEM DO FEIJÃO VERDE (*Vigna unguiculata* L. Walp) – ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO COMBINADO LEITO FIXO/LEITO DE JORRO.

Uliana Karina Lopes de Medeiros

Orientadora: Profa. Dra. Maria de Fátima Dantas de Medeiros

Co-Orientadora: Profa. Dra. Margarida Maria dos Anjos Magalhães

Natal / RN
Maio / 2004

Catologação da publicação.
UFRN/Bibliotecas Setoriais do Centro de Tecnologia.
Bibliotecária: Cecília Isabel dos Santos – CRB-4/1077

Medeiros, Uliana Karina Lopes de

Estudo da secagem do feijão verde (*Vigna unguiculata* L. Walp)
– análise experimental do processo combinado leito fixo/leito de
jorro / Uliana Karina Lopes de Medeiros. ____ Natal: [s.n], 2004.
128p. : il.

Orientadora: Maria de Fátima Dantas de Medeiros

Co-Orientadora: Margarida Maria dos Anjos Magalhães

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande
do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química.

1. Secagem industrial – Tese. 2. Feijão verde – Tese. 3. Leito
de jorro - processo – Tese. 4. Planejamento experimental – Tese. I.
Medeiros, Maria de Fátima Dantas de. II. Título.

RN/UF/BSECT

CDU: 66.047 (043.3)

Um tempo para cada coisa

Para tudo há um tempo, para cada coisa há um momento debaixo dos céus;
tempo para nascer,
 e tempo para morrer;
tempo para plantar,
 e tempo para arrancar o que foi plantado;
tempo para matar,
 e tempo para sarar;
tempo para demolir,
 e tempo para construir;
tempo para chorar,
 e tempo para rir;
tempo para gemer,
 e tempo para dançar;
tempo para atirar pedras,
 e tempo para ajuntá-las;
tempo para dar abraços,
 e tempo para apartar-se.

DEDICATÓRIA

À Profª Drª Maria de Fátima Dantas de Medeiros,
um verdadeiro anjo na minha vida.

MEDEIROS, Uliana Karina Lopes de – Estudo da Secagem do Feijão Verde (*Vigna unguiculata L. Walp*)- Análise Experimental do Processo Combinado Leito Fixo/Leito de Jorro. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Área de Concentração: Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologia Regional, Natal/RN, Brasil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria de Fátima Dantas de Medeiros

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Margarida Maria dos Anjos Magalhães

RESUMO: O feijão verde é considerado um dos pratos mais tradicionais do Nordeste. Experimentos preliminares de secagem do feijão verde mostraram que o processo combinado, leito fixo/jorro favorecia a obtenção de grãos desidratados com umidade uniforme e que após reidratação o feijão recuperava suas propriedades. A partir destes ensaios definiu-se uma umidade inicial adequada ao processamento no leito de jorro. A pré-secagem em leito fixo até um nível de umidade de 40%, forneceu os melhores resultados. São apresentadas as curvas hidrodinâmicas características do leito para diferentes cargas de feijão, onde se evidencia as respectivas mudanças nas propriedades físicas dos grãos ao longo do ensaio fluidodinâmico, decorrentes do processo simultâneo de secagem. Foi feito um planejamento experimental fatorial 2^2 com três repetições no ponto central, considerando-se como variáveis de entradas: a velocidade e temperatura do ar de secagem. As variáveis respostas foram a quebra, a fração de água evaporada nos 20 e 50 minutos de secagem, e a razão de umidade. São apresentados ainda a modelagem da secagem do feijão verde em camada fina no secador de bandeja e a modelagem do encolhimento do feijão ao longo dos processos de secagem em leito fixo e leito de jorro

Palavras Chaves:- feijão verde; secagem; leito de jorro

BANCA EXAMINADORA:

Presidente: Prof^a. Dr^a. Maria de Fátima Dantas de Medeiros (UFRN)

Membros: Prof^a. Dr^a. Margarida Maria dos Anjos Magalhães (UFRN)

Prof^a. Dr^a. Odelsia Leonor Sanches de Alsina (UFPB)

Prof^a. Dr^a. Sandra Cristina dos Santos Rocha (FEQ/UNICAMP)

ABSTRACT

Green bean is considered as one of most traditional Brazilian Northeast dishes. Green beans drying preliminary experiments show that combine processes, fixed-bed/spouted bed, resulted in dehydrated beans with uniform humidity and the recovery of the beans properties after their rehydration. From this assays was defined an initial humidity suited for the spouted bed process. A fixed-bed pre-drying process until a level of 40% humidity gave the best results. The spouted bed characteristic hydrodynamic curves were presented for different beans loads, where changes in the respective beans physical properties were evidenced during the fluidynamic assay, due simultaneous drying process. One 2² factorial experimental design was carried out with three repetition in the central point, considering as entry variables: drying air velocity and temperature. The response variables were the beans brakeage, water fraction evaporated during 20 and 50 minutes of drying and the humidity ratio. They are presented still the modeling of the drying of the green beans in fine layer in the drier of tray and the modeling of the shrinking of the beans of the drying processes fixed-bed and spouted bed.

Keywords: green beans; drying; spouted bed

AGRADECIMENTOS

Aos meus adorados pais, Uete e Graça, que mesmos distantes, sempre me apoiaram e sacrificaram-se por mim.

Às minhas tias, Rita, Fátima, Lourdes e Cida, por todo o carinho, companheirismo e dedicação ao longo da minha vida acadêmica.

Aos meus irmãos, César e Simone, amigos e companheiros para sempre.

Aos bolsistas do laboratório de Alimentos, Wilton, Robson, Lhyanne, Eduardo, Dannielle e André que colaboraram de forma efetiva para a realização dos experimentos.

A Luiza Maria pela colaboração técnica.

À professora Margarida , pela co-orientação deste trabalho.

Às professoras Márcia Pedrini, Odelsia Leonor e Sandra Rocha pela disponibilidade em avaliar o meu trabalho.

Aos eternos amigos, Marina, Valeska e Raniere.

A minha gratidão à Profª Fátima, pela orientação, dedicação, paciência e competência na transmissão do saber que lhe é peculiar.

Sumário

<i>Folha de rosto</i>	i
<i>Abstract</i>	ii
<i>Agradecimentos</i>	iii
<i>Sumário</i>	iv
<i>Lista de figuras</i>	v
<i>Lista de tabelas</i>	vi
<i>Nomenclatura</i>	vii
1. Introdução	1
2. Objetivos	3
3. Aspectos teóricos e revisão bibliográfica	4
3.1 <i>O feijão</i>	4
3.1.1 <i>O feijão verde</i>	5
3.1.2 <i>Composição nutricional do feijão verde</i>	6
3.2 <i>Considerações gerais sobre o leito de jorro</i>	7
3.2.1 <i>Curvas características do leito de jorro</i>	9
3.2.2 <i>Efeitos das propriedade dos sólidos</i>	16
3.2.3 <i>Efeitos do fluxo do gás</i>	16
3.2.4 <i>Atrito no leito de jorro</i>	17
3.3 <i>Secagem de grãos</i>	17
3.3.1 <i>Secagem do feijão</i>	18
3.3.2 <i>Estado da arte</i>	19
3.4 <i>Modelos matemáticos</i>	25
3.4.1 <i>Teoria da difusão</i>	26
3.5 <i>Planejamento e otimização de experimentos</i>	30
4. Materiais e métodos experimentais	33
4.1 <i>Matéria prima</i>	33
4.2 <i>Caracterização física do feijão verde</i>	33
4.2.1 <i>Diâmetro do grão</i>	33
4.2.2 <i>Esfericidade do grão</i>	34

4.2.3	<i>Densidade do grão</i>	35
4.2.4	<i>Ângulo de repouso</i>	36
4.3	Caracterização físico-química	36
4.3.1	<i>pH</i>	37
4.3.2	<i>Acidez titulável</i>	37
4.3.3	Sólidos solúveis	37
4.3.4	<i>Umidade</i>	37
4.4	<i>Equipamentos</i>	38
4.4.1	<i>Secador de leito fixo</i>	38
4.4.2	<i>Leito de jorro</i>	39
4.4.3	Equipamentos periféricos e instrumentação dos secadores	40
4.4.4	<i>Equipamentos para a determinação das propriedades físicas, análise físico-química e microbiológica</i>	41
4.5	<i>Ensaio preliminares</i>	41
4.6	<i>Procedimento experimental</i>	43
4.6.1	<i>Branqueamento</i>	44
4.6.2	Pré-secagem em secador de bandeja	44
4.6.3	<i>Curvas hidrodinâmicas</i>	45
4.6.4	<i>Secagem em leito de jorro</i>	45
4.6.5	<i>Encolhimento do grão</i>	47
4.6.6	<i>Cinética de secagem</i>	48
4.6.7	<i>Análise Sensorial</i>	50
5.	Resultados e discussões	52
5.1	<i>Resultados dos ensaios preliminares</i>	52
5.1.1	<i>Determinações físico-químicas e caracterização física dos grãos</i>	52
5.1.2	<i>Ensaio de secagem em leito fixo</i>	54
5.1.3	<i>Ensaio combinados</i>	58
5.2	<i>Resultados referentes aos ensaios realizados de acordo com o planejamento experimental</i>	63
5.2.1	<i>Determinações físico-químicas e caracterização física dos grãos</i>	63
5.2.2	<i>Encolhimento do grão</i>	68
5.2.3	<i>Curvas hidrodinâmicas</i>	74

5.2.4	<i>Análise das taxas de evaporação</i>	80
5.3	<i>Cinética de secagem do feijão verde</i>	88
5.3.1	<i>Período de taxa decrescente</i>	90
5.4	<i>Resultados do planejamento fatorial 2² com repetição no ponto central</i>	93
5.4.1	<i>Análise dos efeitos</i>	93
5.4.2	<i>Análise da regressão dos modelos estatísticos</i>	96
5.4.3	<i>Análise das superfícies de respostas</i>	100
5.5	<i>Resultados da análise sensorial</i>	104
6.	Conclusões e sugestões	106
6.1	<i>Conclusões</i>	106
6.2	<i>Sugestões</i>	110
7.	Referências	111

Lista de figuras

Figura 3.1	Curva característica da queda de pressão. MADONNA et al. (1961)	10
Figura 4.1	Ilustração do método de determinação da esfericidade definida para grãos	34
Figura 4.2	Célula de medidas de ângulo de repouso	36
Figura 4.3	Esquema do secador de bandejas	39
Figura 4.4	Esquema do Leito de jorro	40
Figura 4.5	Fluxograma do procedimento experimental para a obtenção do feijão verde	43
Figura 5.1	Secagem do feijão verde em secador de bandeja - umidade em função do tempo (Tgi=59,3 °C, v=0,53m/s, m=2,1kg)	55
Figura 5.2	Secagem do feijão verde em secador de bandeja - taxa de secagem em função da umidade (Tgi=59,3°C, v=0,53m/s, m= 2,1kg)	55
Figura 5.3	Secagem do feijão verde em secador de bandeja - temperatura em função da umidade (Tgi=59,3°C, v=0,53 m/s, m=2,1 kg)	57
Figura 5.4	Secagem do feijão verde em secador de bandeja - massa de água evaporada em função do tempo (Tgi=59,3°C, v=0,53m/s, m= 2,1kg)	58
Figura 5.5	Secagem do feijão verde em secador de bandeja - umidade em função do tempo Ensaio 1 (Tgi=60,6°C, v=0,53m/s, m=2,5kg); Ensaio 2 (Tgi=60,7°C, v=0,53m/s, m=2,5kg); Ensaio 3 (Tgi= 60,7°C. v=0,53m/s, m=2,5kg)	59
Figura 5.6	Secagem do feijão verde em secador de bandeja - taxa de secagem em função da umidade Ensaio 1 (Tgi=60,6°C, v=0,53m/s, m=2,5kg); Ensaio 2 (Tgi=60,7°C, v=0,53m/s, m=2,5kg); Ensaio 3 (Tgi= 60,7°C. v=0,53m/s, m=2,5kg)	59
Figura 5.7	Secagem do feijão verde em secador leito de jorro - umidade absoluta do ar em função do tempo. Ensaio 1 (Tgi=57,4°C, v=0,76m/s, m=1,37kg); Ensaio 2 (Tgi=59,0°C, v=0,89m/s, m=1,15kg) e Ensaio 3 (Tgi=58,5°C, v=0,89m/s, m=1,20kg).	60
Figura 5.8	Secagem combinada do feijão verde em secador de bandeja e em leito de jorro - taxa de secagem em função do tempo para o ensaio 2. Secador de bandeja(Tgi=60,4°C, v=0,53m/s, m=2,5kg) Leito de Jorro (Tgi=59,0°C, v=0,89m/s, m=1,15kg)	62
Figura 5.9	Secagem combinada do feijão verde em secador de bandeja e em leito de jorro - massa de água evaporada em função do tempo para o ensaio 2. Secador de bandeja(Tgi=60,4°C, v=0,53m/s, m=2,5kg) Leito de Jorro (Tgi=59,0°C, v=0,89m/s, m=1,15kg)	62
Figura 5.10	Efeito da umidade (base úmida) sobre o diâmetro e densidade do grão	66
Figura 5.11	Efeito da umidade (base úmida) sobre o ângulo de repouso	67
Figura 5.12	Efeito da umidade (base úmida) sobre a esfericidade do grão de feijão	68

Figura 5.13	Encolhimento do grão em função da umidade em base. Estimativa do coeficiente de encolhimento. Secagem na estufa ($T=75^{\circ}$ e $v=0,2\text{m/s}$)	69
Figura 5.14	Encolhimento do grão em função da umidade em base seca. Estimativa do coeficiente de encolhimento. Secagem em leito fixo ($T=60^{\circ}\text{C}$ e $v=0,53\text{m/s}$)	70
Figura 5.15	Encolhimento do grão em função da umidade em base seca. Estimativa do coeficiente de encolhimento. Secagem em leito de jorro (Condições operacionais conforme o planejamento experimental)	70
Figura 5.16	Comparação entre os dados experimentais na estufa e os preditos pelo modelo – diâmetro do feijão em função da umidade	72
Figura 5.17	Comparação entre os dados experimentais no secador de bandeja e os preditos pelo modelo – diâmetro do feijão em função da umidade	72
Figura 5.18	Comparação entre os dados experimentais no leito de jorro e os preditos pelo modelo – diâmetro do feijão em função da umidade	73
Figura 5.19	Cinética da quebra do feijão. Ensaio: 1($v=0,77\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 2($v=0,77\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), 3 ($v=0,86\text{ m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 4($v=0,86\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$)	74
Figura 5.20	Curvas hidrodinâmicas do leito de jorro para diferentes cargas de feijão verde pré-desidratados a 40% de umidade	76
Figura 5.21	Umidade do ar em função do tempo – Ensaio 5, 6 e 7 ($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$)	80
Figura 5.22	Taxas de evaporação em função do tempo - Ensaio 5,6 e 7 ($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$)	81
Figura 5.23	Curvas acumulativas da massa de água evaporada com o tempo – Ensaio 5,6 e 7 ($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$)	82
Figura 5.24	Fração de água evaporada em função do tempo – Ensaio 5, 6 e 7 ($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$)	83
Figura 5.25	Umidade do ar em função do tempo – Ensaio 1($v=0,77\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 2($v=0,77\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), 3($v=0,86\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 4($v=0,86\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), e 6($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$).	84
Figura 5.26	Taxas de evaporação em função do tempo– Ensaio 1($v=0,77\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 2($v=0,77\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), 3($v=0,86\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 4($v=0,86\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), e 6($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$).	85
Figura 5.27	Curvas acumulativas da massa de água evaporada com o tempo – Ensaio 1($v=0,77\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 2($v=0,77\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), 3($v=0,86\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 4($v=0,86\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), e 6($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$).	86
Figura 5.28	Fração de água evaporada em função do tempo Ensaio 1($v=0,77\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 2($v=0,77\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), 3($v=0,86\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 4($v=0,86\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), e 6($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$).	87
Figura 5.29	Curva de umidade em função do tempo para o feijão verde desidratado no secador (camada fina) . Ensaio a e b, ($v=0,53$ e $0,73\text{m/s}$).	89
Figura 5.30	Curva da taxa específica de evaporação em função do tempo para o feijão verde desidratado no secador (camada fina). Ensaio a e b, ($v=0,53$ e $0,73\text{m/s}$).	89

Figura 5.31	Estimativa da umidade de equilíbrio para os ensaios a e b. ($v=0,53$ e $0,73\text{m/s}$).	90
Figura 5.32	Estimativa da difusividade a partir do modelo difusional para o ensaio de velocidade igual a $2,6\text{ m/s}$	91
Figura 5.33	Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável de resposta razão da umidade	94
Figura 5.34	Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável resposta φ_{20}	95
Figura 5.35	Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável resposta φ_{50}	95
Figura 5.36	Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável de resposta quebra	96
Figura 5.37	Valores observados versus valores preditos - $X_j/X_b(\%)$	98
Figura 5.38	Valores observados versus valores preditos - φ_{20}	99
Figura 5.39	Valores observados versus valores preditos - Q	100
Figura 5.40	Superfície de resposta para a fração de água evaporada em vinte minutos (φ_{20}).	101
Figura 5.41	Superfície de resposta para a fração de água evaporada em 50 minutos. (φ_{50})	102
Figura 5.42	Superfície de resposta para a quebra do feijão. (Q)	103

Lista de tabelas

Tabela 3.1	Composição Nutricional do Feijão Verde, Vagem e Ervilha Fresca	7
Tabela 3.2	Equações para a cinética de secagem	29
Tabela 4.1	Condições operacionais dos ensaios preliminares – leito de jorro	43
Tabela 4.2	Matriz Experimental	44
Tabela 5.1	Caracterização físico-química do feijão <i>in natura</i> e desidratado (ensaios preliminares)	53
Tabela 5.2	Caracterização física dos grãos de feijão <i>in natura</i> e desidratado (ensaios preliminares)	53
Tabela 5.3	Condições operacionais e resultados obtidos nos ensaios de secagem combinada leito fixo/leito de jorro	61
Tabela 5.4	Matriz experimental	63
Tabela 5.5	Caracterização físico-química do feijão verde <i>in natura</i> e desidratado no leito de jorro.	64
Tabela 5.6	Caracterização física dos grãos <i>in natura</i> , pré-seco e desidratado no leito de jorro- Diâmetro e densidade do grão.	65
Tabela 5.7	Caracterização física dos grãos <i>in-natura</i> , pré-seco e desidratado no leito de jorro - Ângulo de repouso do grão.	66
Tabela 5.8	Caracterização física dos grãos <i>in natura</i> , pré-seco e desidratado no leito de jorro – Esfericidade do grão.	68
Tabela 5.9	Equações e coeficientes de correlação para análise de encolhimento do feijão verde em estufa, secador de bandeja e leito de jorro	71
Tabela 5.10	Características do leito do feijão verde antes e após a obtenção das curvas hidrodinâmicas	75
Tabela 5.11	Características dos grãos do feijão verde antes e após a obtenção das curvas hidrodinâmicas	75
Tabela 5.12	Resultados experimentais da velocidade de jorro mínimo – Comparação com previsões da literatura para leito cônico-cilíndrico	77
Tabela 5.13	Resultados experimentais da velocidade de jorro mínimo – Comparação com previsões da literatura para leito cônico	78
Tabela 5.14	Resultados experimentais da queda de pressão de jorro mínimo – Comparação com previsões da literatura para leito cônico-cilíndrico	79
Tabela 5.15	Resultados experimentais da queda de pressão de jorro mínimo – Comparação com previsões da literatura para leito cônico	79
Tabela 5.16	Condições operacionais para os ensaios de secagem em camada fina.	88
Tabela 5.17	Difusividades efetivas calculadas a partir do ajuste do modelo difusional de Fick. Parâmetros das retas ($\ln(Y^*) = A_0 + B_0 t$), ajustadas ao período de taxa decrescente com respectivos coeficientes de correlação.	91
Tabela 5.18	Planejamento fatorial 2^2 – Matriz das variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta.	93
Tabela 5.19.	Estimativa dos efeitos para X_j/X_b , Q , φ_{20} e φ_{50}	94
Tabela 5.20	Resultados da Análise de regressão – X_j/X_b , Q , φ_{20} e φ_{50} .	97

Nomenclatura

A_o - coeficiente linear da reta
 A_p - área da partícula (m^2)
 B_o - coeficiente angular da reta
 D_p - diâmetro do grão (m)
 dp_o - diâmetro inicial do grão (m)
 dp_{iu} - diâmetro do grão isento de umidade (m)
 D_c - diâmetro da coluna no leito de jorro (parte cilíndrica) (m)
 D_i - diâmetro do orifício de entrada no leito de jorro (m)
 D_{ef} - coeficiente de difusão efetivo (m^2/s)
 g - aceleração da gravidade (m/s^2)
 H - altura do leito estático (m)
 H_{mf} - altura do leito expandido (m)
 H_{max} - altura máxima do leito capaz de jorrar (m)
 L - dimensão característica do material úmido (m)
 L_{iu} - dimensão característica do material isento de umidade (m)
 m - massa de feijão (kg)
 M_{ev} - massa de água evaporada (kg)
 Q - quebra (%)
 Re_{jm} - número de Reynolds (condições de jorro mínimo)
 R_p - raio médio do grão ao longo da secagem (m)
 t - tempo (s)
 T - temperatura ($^{\circ}C$)
 T_{gi} - temperatura do ar na entrada da coluna ($^{\circ}C$)
 T^* - temperatura (variável codificada)
 U - umidade do ar (kg/kg)
 U_{ge} - umidade do ar na saída do leito em base seca (kg/kg)
 U_{gi} - umidade do ar na entrada do leito em base seca (kg/kg)
 v - velocidade média superficial do ar na coluna (m/s)
 V_{jm} - velocidade superficial de jorro mínimo, baseado no diâmetro da coluna (m/s)
 V_{ijm} - velocidade de jorro mínimo obtido experimentalmente (m/s)
 V_p - volume da partícula (m^3)
 V^* - velocidade (variável codificada)
 X - umidade do grão em base úmida (%)
 X_b - umidade do grão no secador de bandejas, em base úmida (%)
 X_j - umidade do grão no leito de jorro, em base úmida (%)
 Y - umidade do grão em base seca (kg/kg)
 Y^* - razão de umidade
 Y_{eq} - umidade de equilíbrio do material (kg/kg)
 Y_o - umidade inicial do material (kg/kg)
 W - vazão mássica (kg/s)
 W_{giu} - vazão mássica de gás isento de umidade (kg/s)
 W_{ev} - taxa de evaporação (kg/s)
 ΔP_{max} - queda de pressão máxima no leito (Pa)
 ΔP_{jes} - queda de pressão nas condições de jorro estável (Pa)
 ΔP_{jm} - queda de pressão nas condições de jorro mínimo (Pa)

ΔP - queda de pressão no leito (Pa)

Símbolos Gregos

μ - viscosidade do ar (kg/m.s)

ρ - densidade (kg/m³)

φ - fração de água evaporada (%)

φ_{20} - fração de água evaporada aos 20 minutos de secagem (%)

φ_{50} - fração de água evaporada aos vinte minutos de secagem(%)

θ - ângulo de repouso

α - ângulo da base cônica

ϕ - esfericidade

ρ_p - densidade do partícula (kg/m³)

ρ_g - densidade do gás (kg/m³)

ρ_l - densidade do leito (kg/m³)

ρ_{ge} - densidade do gás na saída do secador (kg/m³)

ε - porosidade do leito

ε_{mf} - porosidade de mínima fluidização

λ - fator da forma da partícula

β - coeficiente de encolhimento

Subscritos

eq - equilíbrio

g - gás

e- saída

i - entrada

o - inicial

s - sólido

jm - jorro mínimo

jes - jorro estável

p - partícula

c - coluna

iu - isento de umidade

j - jorro

b - bandeja

mf - mínima fluidização

l - leito

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

A secagem de sólidos por ar quente é uma operação muito utilizada nas áreas agrícola, química e alimentícia. No que se relaciona a secagem de grãos, grande é o número de referências encontradas na literatura, variando desde a determinação de propriedades físico-químicas até a simulação dos mais diversos tipos de secadores, incluindo o estudo da cinética de secagem, fundamental para o projeto de tais equipamentos. Esta importância dada à secagem de grãos é um fenômeno facilmente compreendido quando se leva em consideração que os grãos são, a nível mundial, uma das mais importantes fontes de alimentação. Cuidados na colheita, no manuseio e condições de secagem e estocagem apropriadas são imprescindíveis para garantir a qualidade e aproveitamento da produção de grãos.

O feijão comum, *Phaseolus vulgaris L.*, é um grão de elevado valor nutritivo, compreendendo uma série de variedades, como feijão enxofre, feijão preto, feijão carioquinha, feijão jalo, entre outras. Sua produção mundial é baixa, quando comparada a produção de outros grãos e o seu consumo é restrito a poucos países. Devido às condições climáticas favoráveis, o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de feijão, sendo este um dos alimentos favorito e diariamente consumido pelos brasileiros.

Outro tipo de feijão, o verde (*Vigna unguiculata (L) Walp*) é considerado um dos pratos mais tradicionais da mesa nordestina, tanto no campo como nas grandes cidades. Todavia, por se tratar de um produto sazonal, fora do período de safra o seu preço elevado torna o consumo proibitivo para a grande maioria da população. Por outro lado, por se tratar de um produto de alta perecibilidade, sua produção desordenada na safra, é parcialmente desperdiçada. Desta forma, se faz necessário realizar estudos sobre técnicas de conservação do feijão verde, que permita o seu armazenamento e viabilize o aproveitamento e distribuição da produção durante todo o ano, independente da safra.

Resultados preliminares de ensaios de secagem do feijão verde em leito fixo mostraram que após sofrer reidratação em salmoura aquecida o mesmo apresenta as características físicas e organolépticas do feijão *in natura* cozido, comumente preparado e consumido na região Nordeste.

No estudo da secagem de grãos, o maior interesse se encontra nas características do secador e do produto final. Como os grãos em geral, apresentam-se frágeis ao atrito e às altas

temperaturas, necessário e rentável se fazem utilizar um secador que tenha a propriedade de boa homogeneização, como é o caso do leito de jorro.

Com base nestes resultados e considerando-se os benefícios sócio-econômicos que o aproveitamento do feijão verde, em escala industrial ou semi-industrial, pode trazer para o Nordeste, propõe-se neste trabalho, estudar a secagem do feijão verde em leito de jorro com pré-secagem em secador convectivo de bandejas. A secagem será avaliada, preliminarmente, sob o ponto de vista do processo, no que se refere a: cinética e taxas de secagem; danos sofridos pelos grãos, provocados pelo atrito entre as partículas; efeitos da vazão e temperatura do ar de secagem sobre o desempenho do processo; qualidade do produto reidratado com relação à preservação das características sensoriais do feijão verde. Os resultados obtidos neste trabalho serão importantes para o desenvolvimento de técnicas de secagem que possam viabilizar a produção do feijão desidratado a um baixo custo de produção, que mantenha um bom padrão de qualidade no produto final.

Capítulo 2

Objetivos

2. Objetivos

Geral

- Estudar o processo de secagem do feijão verde em leito fixo e leito de jorro.

Específicos

- Definir as condições de processamento para obtenção do grão com um teor de umidade adequado para ser armazenado;
- Avaliar as características do feijão desidratado comparativamente ao feijão *in natura*;
- Estudar a cinética de secagem do feijão verde, propondo modelos que se ajustem aos dados experimentais e que possam ser utilizados para simular o processo de secagem;
- Estudar o efeito das variáveis operacionais e de suas interações sobre a performance do processo tanto no que se refere às taxas de secagem, como em relação as perdas de material, devido a fragilidade e quebra dos grãos;
- Realizar análise sensorial do produto.

Capítulo 3

Aspectos teóricos e revisão
bibliográfica

3. Aspectos teóricos e revisão bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo a apresentação da revisão bibliográfica dos principais tópicos a serem abordados no estudo de secagem de feijão verde.

3.1 - O feijão

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris L*), a exemplo de outras importantes plantas alimentícias teve origem no novo mundo, tendo sido levado ao Velho Mundo após descobrimento da América, ZIMMERMANN (1996).

Esta leguminosa é bastante difundida em todo o território nacional. É plantado preferencialmente, como cultura de subsistência em pequenas propriedades, muito embora tenha havido nos últimos anos crescente interesse de grandes produtores, em cujo sistema de produção são adotadas tecnologias avançadas, incluindo a irrigação por aspersão. O sistema de comercialização é o mais variado possível, predominando um pequeno grupo de atacadistas, que concentra a distribuição da produção, gerando, muitas vezes, especulações quando ocorrem distorções na média de produção.

VIEIRA (1996) relata que no mundo existem cerca de 20 espécies de leguminosas de grãos que são utilizadas na alimentação, no entanto, as mais importantes são o guandu (*Cajanus cajan*), o feijão-macassar (*Vigna unguiculata*), a ervilha (*Psum sativam*), o grão-de-bico (*Cicer arietinum*), a fava (*Vicia faba*), o amendoim (*Arachis hypogaea*), a soja (*Glicine max*) e o feijão (*Phaseolus vulgaris*). No Brasil, para a alimentação humana, somente o feijão comum e o feijão-macassar são realmente importantes, as outras leguminosas tem expressão reduzida como alimento ou são utilizadas como oleaginosas, como é o caso da soja e do amendoim.

O feijão amadurece no “pé”, e a colheita se verifica com os grãos maduros. Após a colheita devido ao elevado teor de umidade, os grãos são submetidos a secagem, para que não deteriorem ou desenvolvam fungos e outros microorganismos durante o armazenamento. Esse procedimento é necessário tanto para a produção de grãos para consumo alimentício como para a produção de sementes para o plantio, segundo PAULO FILHO e ROCHA (2000).

3.1.1 O feijão verde

Algumas variedades de feijão são colhidas completamente verdes. Sua principal variedade tem classificação botânica definida como pertencente ao gênero *Vigna* e a espécie *Vigna unguiculata (L) Walp*, apresentando denominações variadas, de acordo com a região onde é produzido: feijão de corda, feijão macassar, feijão de vara, caupi, entre outras, segundo CIRCULAR TÉCNICO da EMBRAPA (1984). Esta prática de colheita do feijão verde é muito comum na região Nordeste, sendo verificada em baixas proporções nas outras regiões.

FURTUNATO et al. (1995) estudaram o processamento do feijão verde (*Vigna unguiculata L. Walp*) para o uso em saladas onde utilizou-se salmoura acidificada para permitir um processamento em condições brandas de temperaturas inferiores à 100° C. Após os ensaios preliminares, foram realizados 2 processamentos, nas mesmas condições, em períodos diferentes, e feito o estudo de vida de prateleira. Após 20-30 dias os grãos começaram a apresentar escurecimento. Depois de 150 dias, apesar do pH e a acidez não sofrerem alterações, praticamente todos os grãos escureceram. Concomitantemente observou-se mudanças no sabor e odor da salmoura, no entanto não se verificou mudanças.

Foi estudado por esses mesmos autores no mesmo ano a caracterização físico-química, microbiológica e bioquímica, visando uma melhor utilização do produto, para encontrar formas alternativas de conservação e estimular seu consumo em diferentes regiões. Os resultados obtidos não puderam ser comparados com dados da literatura, pois estes são referentes apenas a parte agrônômica do feijão verde, mas a obtenção desses dados é de grande importâncias para comparação de futuros trabalhos.

Visando definir tecnologias alternativas de processamento do feijão verde (*Vigna unguiculata (L) Walp*), FURTUNATO et al (2000) também estudaram o processo de congelamento do feijão verde. Este consistiu na recepção da matéria prima, seleção dos grãos de coloração e tamanho uniformes, seguida de lavagem em água corrente e branqueamento por imersão em água à 90°C. Os grãos foram acondicionados em sacos plásticos e congelados em freezer doméstico a -18°C, sendo armazenados a essa temperatura. Foi realizado o estudo de vida de prateleira desse produto por 180 dias, através de análises físico-químicas, microbiológicas e sensoriais, preservando-se em boas condições para o consumo. Foi realizado também o teste de aceitação do produto comparando-se com o feijão verde fresco. Embora o nível de aceitação não tenha sido muito alto (71,1%) quando

comparado com o feijão fresco (96,6%), este resultado poderia ser diferente em regiões que não têm o hábito de consumir esta leguminosa no estágio de maturação verde fresco.

3.1.2 Composição nutricional do feijão verde

Na Tabela 3.1 são apresentados dados de FRANCO (1997), relativos a composição do feijão verde no que se refere aos teores de vitaminas, valor energético e sais minerais. A mesma Tabela ilustra a composição da ervilha e da vagem fresca. Uma análise destes dados permite verificar o baixo teor calórico do feijão verde em contrapartida a elevada concentração de vitaminas, cálcio e principalmente potássio, cuja concentração é compatível com a encontrada em outros vegetais considerados ricos neste mineral.

Verifica-se ainda na Tabela 3.1. que de uma forma geral a composição nutricional do feijão verde é compatível a da vagem e da ervilha fresca. Trata-se de um produto de composição semelhante a de legumes e hortaliças, comumente consumidos na forma de saladas. Com a crescente valorização de dietas saudáveis com baixo teor de gorduras, ricas em saladas, o hábito do consumo de feijão verde tende a expandir-se por todo o Brasil, o que viabilizaria uma ampliação de sua produção no Nordeste, extensiva às demais regiões.

Tabela 3.1 -. Composição Nutricional do Feijão Verde, Vagem e Ervilha Fresca

	Feijão Verde (100g)	Ervilha Fresca (100g)	Vagem Fresca (100g)
Retinol(mcg)	13	4	125
Tiamina(mcg)	380	910	215
Riboflavina(mcg)	70	180	200
Niacina(mg)	1,50	5,60	0,54
Ácido Ascórbico(mg)	9,0	6,5	23,3
Calorias(g)	42	100	42
Glicídios(g)	7,4	16,9	7,7
Proteínas(g)	2,3	7,0	2,4
Lipídios(g)	0,30	0,50	0,20
Cálcio(mg)	68	28	55
Fósforo(mg)	72	127	50
Ferro(mg)	1,43	1,70	1,16
Sódio(mg)	84,0	164,0	34,3
Potássio(mg)	342,0	115,0	126,1

Fonte: Franco (1997)

3.2 – Considerações gerais sobre o leito de jorro

Entre as diversas operações unitárias que envolvem partículas sólidas e fluidos, destaca-se o leito de jorro. Tendo por finalidade promover íntimo contato entre um fluido e partículas relativamente grandes que apresentam fluidização de baixa qualidade, esta técnica é

aplicada com eficiência à secagem de materiais granulares, pastas e suspensões, à granulação e ao recobrimento de partículas.

Desenvolvido inicialmente por MATHUR e GISHLER em 1955, o leito de jorro mostrou-se de tal forma promissor que, já em 1963, foram implantadas no Canadá unidades industriais para secagem de ervilha, lentilha e fibras de linho. MATHUR e EPSTEIN (1974) citam ainda, unidades para resfriamento de sólidos, granulação, revestimento de partículas, cristalização, ativação de carvão e estudos em escala piloto para aplicação da técnica na redução de minério de ferro, carbonização e gaseificação do carvão, moagem e mistura de sólidos, pirólise de xisto e produção de línquer de cimento.

A primeira unidade para uso industrial do leito de jorro foi instalada no Canadá, em 1962, para secagem de ervilha, lentilha e semente de milho.

O leito de jorro na forma como foi concebido, conhecido hoje como leito de jorro convencional, consta basicamente de uma coluna cilíndrica de base tronco-cônica, onde um jato de fluido, usualmente o ar, é injetado por um orifício de entrada, localizado na sua extremidade inferior. O leito é formado pela penetração desta corrente de gás através das partículas sólidas, cuja circulação principia quando a vazão do gás é suficiente para provocar o movimento ascendente destas partículas a níveis acima do leito. Forma-se então uma região central de alta porosidade, denominada jorro, onde as partículas são arrastadas pneumáticamente, formando no topo uma fonte de sólidos que se espalham radialmente, e descem pelo espaço anular que envolve o jorro, em contra-corrente com o fluido. Esta região anular é caracterizada pela baixa porosidade e pelo movimento descendente dos sólidos, cujo comportamento assemelha-se ao de um leito deslizante. Embora as partículas possam voltar ao jorro ao longo da interface jorro-anel, a maior parte retorna pela região inferior da base tronco-cônica, onde inverte o sentido do movimento, deslocando-se ascendentemente, caracterizando assim o movimento cíclico dos sólidos.

É importante registrar as limitações na utilização do leito de jorro convencional citadas por MUJUMDAR (1989):

- Elevada perda de carga antes de atingir o jorro estável;
- Limites sobre as dimensões geométricas do leito de jorro para operar com eficiência;
- Fluxo de gás limitado mais pelas exigências de estabilidade do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa;

- Faixa de operação limitada;
- Capacidade limitada por unidade de espaço (devido aos limites sobre as dimensões do secador e a altura máxima de carga capaz de manter o jorro estável;
- Dificuldades na mudança de escala.

Podendo operar de forma contínua, intermitente ou em batelada, o leito pode ser constituído por partículas ativas, cuja troca de calor e massa com o fluido é simultânea, e por partículas inertes no caso da secagem de pastas e suspensões.

3.2.1 - Curvas características do leito de jorro

O mecanismo de transição do leito fixo para o jorro pode ser mostrado na curva característica da queda de pressão em função da vazão do ar, ilustradas na Figura 3.1. Inicialmente, para pequenas vazões, o gás apenas circula, sem perturbar as partículas e o sistema comporta-se como um leito fixo. Com o aumento da vazão, as partículas próximas ao orifício de entrada do gás se deslocam, surgindo então uma cavidade circundada por uma camada sólida compacta, ainda mais resistente à passagem do gás, que acarretará uma maior queda de pressão no leito. À medida que a vazão cresce, a cavidade vai se alongando, havendo formação de um jorro interno. A queda de pressão continua a aumentar até atingir o valor máximo (ΔP_{\max}), no ponto B. A partir deste ponto, o efeito do jorro interno é maior que o da camada sólida que limita a cavidade, e a queda de pressão, conseqüentemente, passa a diminuir. No ponto C, a quantidade de partículas deslocadas do núcleo central já é suficiente para provocar uma expansão do leito. Esta expansão pode ser acompanhada por expansões e contrações alternadas do jorro interno, resultando em instabilidade e flutuações na queda de pressão, formação de bolhas e, no caso de cargas mais profundas, fluidização de partículas na região adjacente ao jorro interno. Um pequeno incremento na vazão do gás além do ponto C, correspondente ao jorro incipiente, faz com que a queda de pressão caia até o ponto D, no qual o jorro aflora à superfície. Neste ponto, a queda de pressão (ΔP_{jes}) torna-se constante a um aumento na vazão do gás provoca somente a elevação da fonte. Ocorre, entretanto, que, devido à instabilidade gerada pela ação da ruptura do jato através do leito, os pontos C e D, que correspondem respectivamente às vazões de jorro incipiente e de início de jorro estável, não são exatamente reprodutíveis, sendo preferível se trabalhar com o processo inverso,

diminuindo-se lentamente o fluxo de gás até o ponto E, onde se tem a menor velocidade (V_{jm}) com a qual se pode obter o jorro estável. Prosseguindo a redução na vazão, a queda de pressão aumenta, atingindo o máximo em F, localizado bem abaixo do ponto B, já que no processo inverso a perda de carga acontece devido apenas à interação gás-sólido. A partir de F, a queda de pressão decresce com a vazão.

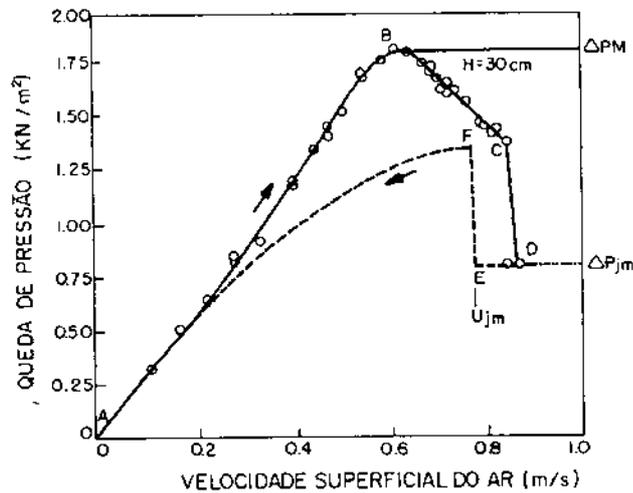


Figura 3.1 - Curva característica da queda de pressão. MADONNA et al. (1961) Trigo.

$$dp=0,36\text{cm}, Dc=0,152\text{ m}, Di=1,27 \times 10^{-2}\text{ m}, \alpha=60^\circ$$

A obtenção do jorro estável está relacionada com a altura máxima do leito (H_{max}), onde ainda é possível se obter um sistema estável, sem que ocorra fluidização heterogênea ou movimento empistonado. Desta forma, pode-se observar que o sistema é limitado pela altura da carga de sólidos, sofrendo ainda a influência dos parâmetros geométricos da coluna (ângulo do cone e relação entre os diâmetros da parte cilíndrica e do orifício de entrada do gás) e das propriedades e dimensões das partículas envolvidas.

Embora os estudos hidrodinâmicos do leito de jorro partam da obtenção experimental das curvas características de queda de pressão, e subsequente determinação da queda de pressão máxima (ΔP_{max}), queda de pressão no jorro estável (ΔP_{jes}), velocidade do jorro mínimo (V_{jm}), além da altura máxima (H_{max}), uma previsão destas variáveis é de fundamental importância quando se projeta o equipamento, principalmente no que concerne ao

dimensionamento do soprador. A literatura propõe diversas correlações, na sua maioria empíricas, que, embora muitas vezes possam apresentar resultados contraditórios e estejam limitadas à faixas de condições operacionais bastante restritas, fornecem, principalmente para o jorro convencional, uma previsão das variáveis hidrodinâmicas já citadas, possibilitando assim uma estimativa razoável dos parâmetros do projeto.

Queda de pressão (ΔP)

Os valores da queda de pressão que interessam no projeto e operação de um leito de jorro são os correspondentes ao pico da queda de pressão (ΔP_{\max}) e a queda de pressão do jorro estável (ΔP_{jm}).

A correlação proposta por BECKER (1961) e mais recentemente por PALLAI e NÉMETH (1969), para estimativa da queda máxima de pressão é dada por:

$$-\Delta P_{\max} = H(\rho_p - \rho_g)(1 - \varepsilon)g \quad (1)$$

Através de resultados experimentais, MANURUNG (1964) formulou a seguinte correlação empírica para a queda de pressão máxima:

$$\frac{\Delta P_{\max}}{H \cdot \rho_l \cdot g} = \left[\frac{6,8}{\text{tg } \theta} \left(\frac{D_i}{D_c} \right) + 0,80 \right] - 34,4 \frac{d_p}{H} \quad (2)$$

MANURUNG trabalhou em seus experimentos com colunas de 15 cm de diâmetro e bases cônicas com ângulo interno de 60° e utilizou uma série de materiais sólidos com diâmetro $1\text{mm} < D_p < 4\text{mm}$.

GELPERIN et al. (1960) obtiveram dados experimentais para ΔP_{\max} , e desenvolveram a correlação empírica (3). Esta correlação foi obtida a partir de dados da colunas ($\theta = 10-60^\circ$, $H = 10-25$ cm) e para um material muito fino de quartzo ($D_p = 0,16-0,28$ mm).

$$\frac{\Delta P_{\max}}{H \cdot \rho_l \cdot g} = 1 + 0,062 \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{2,54} \left[\left(\frac{D_c}{D_i} \right) - 1 \right] \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{-0,18} \quad (3)$$

MUKHELENOV e GORSHTEIN (1965), trabalhando com vasos cônicos, também propuseram uma correlação empírica a partir de dados experimentais. Os dados da coluna e da partículas são: ($\theta = 12-60^\circ$, $D_i = 1,03-1,29\text{cm}$, $H = 3-3,15\text{ cm}$, $D_p = 0,5-2,5\text{ mm}$).

$$\frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_{jm}} = 1 + 6,65 \left(\frac{H}{D_i} \right)^{1,2} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{0,5} (Ar)^{0,2} \quad (4)$$

onde Ar é o número de ARCHIMEDES, dado por:

$$Ar = \frac{g \cdot d_p^3 (\rho_p - \rho_g) \rho_g}{\mu^2} \quad (5)$$

Nas condições de jorro estável, a queda de pressão ocorre devido à duas resistências paralelas, uma devido ao jorro (fase diluída) e outra devido à região anular.

Para vasos cônicos, MUKHLENOV e GORSHTEIN (1965) propuseram correlação empírica (6), derivada da equação (4). Para obtenção dessa correlação utilizaram os seguintes dados de coluna e partícula: ($\theta = 12-60^\circ$, $D_i = 1,03-1,29\text{ cm}$, $H = 3-3,15\text{ cm}$, $D_p = 0,5 - 2,5\text{ mm}$).

$$\frac{\Delta P_{jm}}{H \cdot \rho_l \cdot g} = \frac{7,68 \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{0,2}}{\operatorname{Re}_i^{0,2} \left(\frac{H}{D_i} \right)^{0,33}} \quad (6)$$

Nessa equação Re_i é o número de Reynolds baseado na velocidade do gás e no diâmetro do orifício de entrada.

MUJUMDAR (1981) obteve a seguinte equação empírica para materiais granulares.

$$\frac{\Delta P_{jm}}{\rho_p (Vi_{jm})^2} = 2,35 (Ar) \left(\frac{H}{d_p} \right) Re i_{jm}^{-2,285} \quad (7)$$

MANURUNG (1964) correlacionou seus dados experimentais para poliestireno, carvão ativo ($d_p=1-4$ mm e $\rho_p=1,09-1,43$ Mg/m³) e propôs a expressão empírica (8) para vasos cônicos cilíndricos com as seguintes especificações ($D_c = 15$ cm, $\theta = 60^\circ$).

$$\Delta P_{jm} = \frac{H \cdot \rho_l \cdot g}{1 + \left[0,81 (tg \theta)^{1,5} / \psi^2 \left(\frac{D_c \cdot D_p}{D_i^2} \right)^{0,78} \left(\frac{D_c}{H} \right) \right]} \quad (8)$$

MALEK et al (1965) estudaram correlações de ΔP_{jm} para o trigo ($D_p = 3,7$ mm) em coluna com a seguinte especificação ($D_c = 10-30$ cm, $\theta = 60^\circ$), e propôs a seguinte correlação:

$$\Delta P_{jm} = \left(\frac{2mg}{3A_c} \right) \quad (9)$$

NASCIMENTO et al.(1976), trabalhando com milho, sorgo e misturas de sorgo e soja numa coluna com as seguintes características ($D_c = 32$ cm, $D_i = 5,08$ cm, $\alpha = 35^\circ$), e chegaram a seguinte correlação:

$$\Delta P_{jm} = 0,67(1 - \varepsilon_{mf}) H_{mf} \cdot \rho_p \cdot g \quad (10)$$

Velocidade de jorro mínimo (V_{jm})

A mínima velocidade (V_{jm}) do gás necessária para manter condições de jorro estável, depende das propriedades do sólido e do fluido e das características geométricas do leito, principalmente do seu diâmetro (D_c). A velocidade de jorro mínimo assume seu valor máximo quando a altura do leito é máxima.

MATHUR e GISHLER (1955) desenvolveram uma correlação empírica para V_{jm} baseada na análise diferencial. Os resultados foram obtidos considerando uma faixa restrita de

tamanhos de partículas, em diferentes leitos, cujos diâmetros variaram numa faixa de 7,6 até 30,5 cm, utilizando o ar como fluido. A correlação encontrada pelos autores é dada pela expressão e é válida para vasos cônico cilíndricos:

$$V_{jm} = \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left[2gH \frac{(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

A correlação de ABDELRAZEK (1969) para vasos cilíndricos com a base cônica utilizando esferas de vidro e aço com tamanhos uniformes ($D_p=0,5-08\text{mm}$, $\rho_p=2,46\text{Mg/m}^3$ e $7,07\text{Mg/m}^3$) é expressa pela seguinte equação:

$$V_{jm} = \frac{1}{1,74} \left[\left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{2gH(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{2}} - 0,25 \right] \quad (12)$$

TSVIK et al (1967) obtiveram a seguinte correlação para fertilizantes ($D_p=1,5-4,0$ mm e $\rho_p=1,65 -1,70\text{MG/m}^3$), válida para vasos cônicos.

$$(\text{Re}i)_{jm} = 0,4(\text{Ar})^{0,14} \left(\frac{H}{D_i} \right)^{1,24} \left(\tan\left(\frac{\theta}{2} \right) \right)^{0,42} \quad (13)$$

GOLTSIKER (1967) encontrou a seguinte correlação para fertilizantes e sílica gel ($D_p=1,0-3,0$ mm).

$$(\text{Re}i)_{jm} = 73(\text{Ar})^{0,14} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0,47} \left(\frac{H}{D_i} \right)^{0,9} \quad (14)$$

NIKOLAEV E GOLUBEV (1964), propôs a seguinte correlação também válida para vasos cônicos ($D_i = 2-5\text{cm}$, $H= 9-15$ cm, $D_p = 1,75-5,6\text{mm}$).

$$(\text{Re}i)_{jm} = 0,051(\text{Ar})^{0,59} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0,10} \left(\frac{H}{D_c} \right)^{0,25} \quad (15)$$

Altura máxima do leito de jorro (H_{\max})

Diversos são os mecanismos que podem causar instabilidade no regime de jorro estável, entretanto; no desenvolvimento de equações para determinação da altura máxima (H_{\max}), as correlações propostas baseiam-se principalmente na fluidização de sólidos na região anular, ou simplesmente são empíricas.

MALEK e LU (1965) propuseram uma equação para predição da altura máxima do leito que ainda propicia condições de jorro estável, baseada numa série de variáveis na forma da equação 16 : As características da coluna e da partícula eram: ($D_c = 10,16$ cm, $15,24$ cm e $22,86$ cm; $\theta = 60^\circ$; $0,74$ mm $< D_p < 3,68$ mm).

$$\frac{H_{MAX}}{D_c} = 0,105 \cdot \left(\frac{D_c}{d_p} \right)^{0,75} \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{0,4} \left(\frac{\lambda^2}{\rho_S^{1,2}} \right) \quad (16)$$

Nessa equação , λ é o fator da forma da partícula, definido como : $\lambda = A_p / V_p$

Efeitos da geometria da coluna

Para uma determinada coluna a altura máxima do leito (H_{\max}) para obtenção do jorro em condições estáveis tende a decrescer com o aumento do diâmetro do orifício de entrada do fluido (D_i). Com base em dados para diversos materiais em coluna cilíndrica, BECKER (1961) sugeriu um valor crítico para obtenção de jorro estável como $D_i / D_c = 0,35$.

A seção cônica inferior da coluna facilita o fluxo de sólidos da região anular para dentro da região de injeção do gás. O limite do ângulo do cone depende da fricção interna característica dos sólidos, sendo que para a maioria dos materiais a inclinação mínima, para uma circulação de sólidos, satisfatória é de 40° .

MANURUNG (1964) demonstrou que uma máxima estabilidade é obtida com um projeto de entrada do ar que não permita que o jorro seja desviado do caminho vertical antes que este penetre no leito de partículas.

3.2.2 - Efeitos das propriedades dos sólidos

Embora o tamanho mínimo de uma partícula em um leito de jorro seja geralmente estabelecido em 1 mm de diâmetro, GHOSH (1965) sugeriu que um leito de jorro pode ser obtido com materiais finos desde que o diâmetro da entrada de gás não exceda 30 vezes o diâmetro da partícula. A uniformidade do tamanho das partículas favorece a estabilidade do jorro, enquanto que a presença de pequenas porções de partículas finas podem prejudicar a estabilidade.

Sólidos em uma ampla faixa de densidades têm sido usados em leitos de jorro sem qualquer indicação de que exista limite de densidade de partículas, além do qual a ação do jorro não seria realizada (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

O formato e as características superficiais das partículas tem influência na estabilidade do jorro. Uma equação empírica de MALEK e LU (1965), para a altura máxima de jorro estável, sugere que pode-se jorrar partículas não esféricas em leitos mais profundos do que as esféricas (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

3.2.3 - Efeitos do fluxo do gás

Em leitos rasos, um aumento no fluxo de gás muito superior ao requerido para o jorro mínimo causa a perda de sua forma definida acima da superfície do leito. O movimento de sólidos na região superior do leito torna-se caótico, enquanto o movimento de sólidos na região anular permanece intacto (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Em leitos profundos, os sólidos movimentam-se no leito, que é rompido a altas taxas de vazão de gás. Esse rompimento, no caso de partículas grossas, leva à formação do fracionamento de leito.

3.2.4 Atrito no Leito de Jorro

A fase sólida em um leito de jorro pode sofrer desgaste ocorrendo quebras de partículas, devido ao atrito provocado pela alta velocidade na região de jorro. O movimento ascendente das partículas provoca colisões de umas contra as outras no interior do jorro, na região anular e na parede do leito. Materiais como grãos, plásticos granulares e outros, têm algum grau de elasticidade e são, portanto, capazes de resistir às condições de atrito relativas ao processamento, sem haver rupturas, o que não acontece com sólidos mais frágeis.

Mesmo para materiais mais frágeis, a extensão de danos provocados pelo atrito também depende das condições do jorro, ou seja, é possível exercer algum controle do atrito para cada material, pela escolha dos parâmetros do projeto. Uma investigação sobre esse aspecto do leito de jorro e algumas indicações do comportamento do atrito foram comprovadas em experimentos realizados, com fertilizantes como leito de uréia, na Universidade de British Columbia, segundo PAULO FILHO (1999). Foram utilizados diferentes tamanhos de orifício de entrada do gás, ângulos do cone, profundidade do leito e velocidades do ar, para análise de amostras extraídas de um leito de jorro em intervalos de 10 min. A quantidade finamente polvilhada era coletada em um ciclone. Após 2h de processamento no jorro, foram avaliadas amostras que variaram de 0 –9 g por kg de peso do leito em toda a faixa de condições estudadas. Concluíram que a variável que mais influenciou no atrito entre as partículas foi o diâmetro da entrada de ar e conseqüentemente a velocidade do ar na entrada do leito (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

3.3 – Secagem de grãos

No Brasil a secagem natural, na qual os grãos ficam espalhados em uma camada fina, exposto ao calor do sol, é amplamente difundida e predominante em relação à secagem artificial, também chamada de mecânica, realizada por meio de secadores. A última é uma operação relativamente cara, pois demanda uma grande quantidade de energia para o aquecimento e transporte do ar, porém segundo BROOKER, BAKKER-ARKEMA E HALL (1974), apresenta algumas vantagens:

- Colheita antecipada, reduzindo assim perdas devido as chuvas e trincamento natural;
- Planejamento da colheita otimizando as condições de utilização de máquinas e de mão-de-obra;
- Maior tempo de estocagem sem deterioração dos grãos;
- Preços mais elevados do produto em determinadas épocas;
- Aumento das possibilidades de utilização do grão, pois o grau de germinação não é prejudicado;
- Comercialização do produto com melhor qualidade.

A utilização de ar aquecido na secagem de grãos, segundo PUZZI (1977), aumenta a pressão do vapor de água existente nos grãos, pelo aquecimento dos mesmos, favorecendo assim a saída da umidade, enquanto a diminuição da umidade relativa do ar, aumenta sua capacidade de absorver umidade. Parte do calor do ar proporciona um aumento da temperatura do produto (calor sensível) e parte fornece o calor necessário para a vaporização da água (calor latente).

Uma grande variedade de secadores para grãos se encontra no mercado, sendo em sua maioria secadores convectivos. Entre os secadares convectivos, os mais utilizados são os secadores de leito fixo, de leito deslizante, de fluxos cruzados. A escolha de um determinado secador, em geral, é função das características do produto e de sua posterior utilização. São considerados os custos e as facilidades operacionais em função da qualidade final do produto, sendo interessante a escolha de um secador que possua uma versatilidade para os mais variados tipos de grãos.

3.3.1 – Secagem do Feijão

Dentre os grãos, o feijão ocupa um importante papel na alimentação brasileira. Presente diariamente nas refeições, é utilizado como alimento básico por conter proteínas em larga escala, sendo uma alternativa para o consumo de carne e de outros produtos protéicos.

O Brasil é o maior produtor mundial de feijão, com sua produção voltada praticamente para o consumo interno. Porém, ainda é muito pequeno o número de trabalhos que tratam da

secagem de feijão. A maior parte dos trabalhos está relacionada ao armazenamento do grão, nos quais controla-se a temperatura e a umidade relativa e analisa-se as características finais do grão, tais como propriedades físico-químicas e organolépticas (ANTUNES, 1979).

Como exemplo de pesquisa relacionada à secagem de feijão, pode-se citar o trabalho de SHAN-HUA (1989), que realizou experimentos de secagem em camada delgada com feijão carioquinha, em ambiente condicionado, controlando-se as seguintes variáveis: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem. Caracterizou assim as curvas de secagem de feijão, através de modelagem empírica e teórica. Segundo o autor, condições drásticas como alta vazão, alta temperatura e mínima umidade relativa são desnecessárias para secagem de feijão, recomendando valores moderados de operação: temperatura do ar de 50° C, umidade relativa do ar de 55% e velocidade do ar igual a 0,3m/s.

De acordo com XAVIER (1994), grande parte do feijão comercializado em uma cooperativa em Campinas é seco em leito fixo. O secador consiste de um silo, no qual o ar quente é fornecido pela parte inferior e com venezianas ao longo da estrutura, visando a ventilação. Porém a operação é dispendiosa, pois há necessidade de remoção dos grãos do secador, isto é, a transferência de um leito para outro durante a operação após determinado período de secagem, com a finalidade de homogeneizar os grãos quanto ao teor de umidade.

3.3.2 – Estado da Arte

Leito de jorro

Desde seu surgimento, o leito de jorro tem sido objeto de pesquisa em um grande número de países. Suas aplicações envolvem diversas áreas e como exemplo de aplicações industriais do leito de jorro pode-se citar a secagem de materiais granulares (produtos agrícolas e materiais poliméricos), a secagem de suspensões e soluções, o recobrimento, entre outros (MATHUR e EPSTEIN, 1974)

PETERSON (1962) instalou a primeira unidade comercial contínua para secagem em leito de jorro. Formada por duas colunas em série com 61 e 92 cm de diâmetro, esta unidade foi utilizada para secagem de ervilhas, lentilhas e sementes oleaginosas. A primeira coluna, de 61 cm de diâmetro, constituía o secador propriamente dito, enquanto a segunda era utilizada

para o resfriamento. Trabalhou com temperaturas de ar entre 124 – 448°C, e partículas com temperaturas na faixa de 45 – 78°C, para os três tipos de grãos. Sua produção chegou a atingir 2000 kg/h de ervilhas, com uma redução de 8,8% da umidade do grão alimentado.

A partir dos resultados obtidos, PETERSON chegou às seguintes expressões para a temperatura do grão e para a taxa de evaporação, respectivamente:

$$T_p = K_3 \frac{T_{gi}^{0,63} d_p^{0,57} D_c^{0,38}}{W_{si}^{0,24} Y_i^{0,29}} + K_4 \quad (17)$$

$$W_{ev} = K_5 (T_{gi} Y_i W_{si})^{0,865} \quad (18)$$

onde

T_p = temperatura do grão na descarga do secador, (°C)

T_{gi} = temperatura de alimentação do gás de secagem, (°C)

W_{si} = vazão mássica de sólidos na alimentação, (kg/h)

Y_i = umidade do sólido na alimentação, base seca, (kg/kg)

W_{ev} = vazão mássica de água evaporada no secador, (kg/h)

d_p = diâmetro da partícula, (cm)

D_c = diâmetro da parte cilíndrica, (cm)

Ondee

$$K_3 = 111 \frac{({}^\circ F (lb/h))^{0,24}}{({}^\circ F)^{0,63} (in)^{0,57} (ft)^{0,38}} \quad (19)$$

$$K_4 = -2^\circ F \quad (20)$$

$$K_5 = 3,5 \times 10^{-5} \frac{lb/h}{((^\circ F)lb/h)^{0,865}} \quad (21)$$

Segundo PETERSON, estas expressões exprimem o comportamento do leito de jorro quanto à secagem. A partir do estabelecimento de uma temperatura limite para o grão, a expressão para T_p restringe as condições operacionais a uma certa faixa, garantindo assim a qualidade e o poder de germinação do produto. O conhecimento de W_{ev} assegura o valor de umidade final do grão, permitindo assim um projeto adequado para o secador.

A grande vantagem da utilização de secadores em leito de jorro em relação a secadores convencionais é a obtenção de uma elevada diferença de temperatura entre o ar e o leito. Além disto, devido ao baixo tempo de residência da partícula no jorro, elevadas temperaturas do ar não provocam maiores danos aos grãos.

Desde sua utilização para secagem de trigo, várias pesquisas vêm sendo realizadas utilizando o leito de jorro como secador dos mais variados grãos. BRUNELLO, PECK E DELLA NINA (1974) estudaram a secagem de malte de cevada em um secador tipo jorro cônico-cilíndrico operando em batelada, utilizando três diferentes temperaturas de ar de secagem (60,80 e 90°C) e três cargas de sólidos, com umidade inicial de 80% b.s. Os autores demonstraram que a secagem pode ser conduzida em temperaturas mais elevadas que nos equipamentos clássicos e propuseram um modelo semi-empírico, baseado na hipótese de que o transporte de massa se faz através de membranas semi-permeáveis, presentes nas células do material que compõe os grãos.

CANESIN e MASSARANI (1984) estudaram a secagem de arroz em leito de jorro. Eles projetaram uma unidade industrial contínua para a secagem de 1.600kg/h de arroz com uma redução de 8% de umidade, e os dados obtidos foram comparados com os dados de PETERSON na secagem de ervilha, lentilha, trigo, cevada e semente de linho. Os resultados da secagem de arroz ilustrados em gráficos de temperatura do grão versus taxa de evaporação de água foram compatíveis aqueles reunidos por PETERSON, indicando que as correlações empíricas do mesmo também são satisfatórias para o arroz.

VISWANATHAN, LYALL E RAYCHAUDHURI (1986) realizaram experimentos de secagem de milho, arroz, ervilha e trigo em leito de jorro cônico-cilíndrico. Utilizaram leitos com diâmetro da coluna (D_c) de 0,10 m, 0,25 m e 0,31 m, todos com ângulo da base de 60°. Nos dois leitos maiores os experimentos foram realizados com um tubo interno modificado, o qual continha fendas ao longo de seu comprimento e na base, com a finalidade de obter uma melhor circulação de sólidos. A massa de sólidos utilizada nos experimentos foi bastante variada, desde 0,067 kg até 9,88 kg e as operações foram realizadas de forma contínua e em batelada. A partir dos dados obtidos desenvolveram uma correlação empírica para a taxa de secagem, com validade para temperatura do ar de até 130°, com o objetivo de ser utilizada em projetos de secadores de leito de jorro.

CREMASCO, ROCHA E MASSARANI (1987) obtiveram dados dinâmicos e as curvas de secagem para milho em leito de jorro cônico com tubo interno. Os dados foram obtidos em uma unidade piloto com tubo central, ângulo de 60°, $D_c = 0,626$ m e $D_i = 0,053$ m., temperatura do ar entre 80 e 110°C, e cargas superiores a 18 kg. O equipamento mostrou-se adequado à redução da umidade do milho, sem prejudicar a qualidade do grão. Segundo os autores “ o leito de jorro pode ser uma opção para o pequeno produtor, desde que em sua propriedade haja uma rotatividade de plantio (soja, milho, arroz, feijão), de modo que o secador possa sempre estar ativo durante o período da entressafra”.

ALVES FILHO E MASSARANI (1987) realizaram a secagem de café cereja em leito de jorro cônico, com ângulo de 60°, altura de 0,9 m e diâmetro da base e do topo de 0,13 e 0,10 m respectivamente. Afirmaram ser difícil a secagem do produto em secadores mecânicos devido a problemas de não uniformidade do produto e impurezas e concluíram que o leito de jorro é uma boa alternativa. Neste trabalho, a umidade final do produto foi fortemente influenciada pela temperatura do ar, e em menor escala, pela umidade inicial do produto.

KALWAR E RAGHAVAN (1993) realizaram experimentos de secagem de milho em leito de jorro bidimensional. O leito bidimensional é uma modificação dos tradicionais leitos cônico-cilíndricos e tem como principal objetivo minimizar o problema de “scale-up” do secador de leito de jorro convencional. Utilizaram dois leitos geometricamente similares: o primeiro em escala de laboratório, com ângulo da base de 60° e 0,50m de largura, 0,04m de profundidade, 1,50m de altura e um o segundo, em escala piloto, com mesmo ângulo da base e dimensões de 0,75 m, 0,06 m e 2,0 m respectivamente. Concluíram que a taxa de secagem foi influenciada pelos seguintes fatores: temperatura do ar na entrada do secador, temperatura

inicial do grão, massa de grãos no leito, teor de umidade inicial dos grãos, tempo médio do ciclo das partículas, umidade relativa do ar na entrada e geometria do leito. Segundo os autores a secagem em escala piloto foi muito mais rápida do que a realizada em escala de laboratório, proporcionalmente à massa utilizada em cada secador. A cinética de secagem foi do tipo camada delgada e a equação de Page descreveu bem o processo, sendo que nos parâmetros do modelo, determinados empiricamente, foram consideradas a geometria do leito e as características de operação.

FREITAS E PASSOS (1995) modelaram a secagem de grãos em leito de jorro cônico operando em batelada. As variáveis fluidodinâmica do leito foram determinadas em função das dimensões do secador, do tipo e da quantidade de grãos a ser processada e obtiveram como parâmetros do projeto o tempo, a vazão do ar e a temperatura de secagem. Os resultados da modelagem foram comparados satisfatoriamente com dados experimentais da secagem de arroz e urucum, em leitos cônicos, com tempos de secagem não superiores a 30 minutos. Segundo as autoras esta modelagem destina-se ao projeto de secadores simples, para atender a demanda do pequeno produtor agrícola.

LIMA (1995) analisou a secagem de feijão carioca em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado. O secador utilizado, em escala de laboratório, foi do tipo cone-cilíndrico e operava em batelada. As cargas utilizadas, 1,5 kg e 3,0 kg, tinham 20 e 30% de teor de umidade inicial e as temperaturas do ar de secagem na faixa de 73 a 83°C. Os resultados deste trabalho mostraram que os três secadores, operando nas mesmas condições, apresentaram comportamento muito semelhante com uma ligeira vantagem para o leito fixo. Embora operando com temperatura mais altas que o recomendado, a análise sensorial comprovou que não houve alteração no nível de aceitação do produto, porém, é provável que no caso das sementes, o potencial germinativo seja fortemente prejudicado.

JUMAH et al. (1996) apresentaram um modelo com predições e dados experimentais para o efeito de intermitência, na evolução do teor de umidade médio da partícula com o tempo. O comportamento geral do processo de aquecimento intermitente do jorro é caracterizado pelo desenvolvimento alternado e redução dos gradientes de umidade dentro da partícula. O material assim processado fica mais protegido das tensões induzidas, do encolhimento e quebras.

PAULO FILHO (1999) analisaram experimentalmente os danos mecânicos em sementes de feijão variedade “carioca” submetidos ao regime de leito de jorro cone-cilíndrico, com a temperatura do ar mantida a 30°C. A análise dos resultados mostrou que exercem influência significativa na fissura das sementes submetidas ao leito de jorro, o tempo de exposição, a vazão de ar e principalmente o seu conteúdo de umidade inicial.

DIAS, MARQUES, BORGES e MANCINI (2000) estudaram a secagem do feijão preto (*Phaseolus vulgaris L.*) em leito de jorro bidimensional em escala piloto (100 cm de altura, 10 cm de largura e 40 cm de comprimento) com uma temperatura de operação de 50° C. Foi feito um estudo sobre a influência do tempo de secagem (3, 4, 5 e 6h), da vazão de ar injetado no sistema (25,64; 29,14 m/s) e da carga de grãos (3; 3,5; 4,0) em cada batelada sobre o tempo de cozimento, a capacidade de absorção, a densidade e o diâmetro da partícula. A taxa de secagem também foi estudada. Observou-se que em 6h a redução de umidade do grão foi cerca de 60% e as condições operacionais estudadas não afetaram significativamente as propriedades físicas e tecnológicas do feijão.

OLIVEIRA et al. (1999) estudaram o processo de secagem do feijão em leito de jorro, em escala laboratorial, com condições operacionais intermitentes quanto ao aquecimento e ao regime fluidodinâmico, alternando-se entre jorro/fixo e jorro/desanso. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados da secagem do mesmo material, em condições contínuas do ar, ou seja em leito de jorro durante todo o período de secagem. A comparação demonstrou que o produto obtido com secagem intermitente atende ao nível exigido de qualidade quanto à umidade final e temperatura do grão, para a faixa operacional dos parâmetros de processo investigada. A análise energética do processo indica resultados promissores de melhora na eficiência de secagem para as condições intermitentes, principalmente trabalhando-se com leito de jorro/descanso, ou seja, intermitência com interrupção no suprimento de ar ao leito.

Leito fixo

A secagem de grãos em leito fixo é classificada como secagem em camada espessa, sendo este termo utilizado para um leito de grãos (estacionário ou móvel) no qual ocorrem gradientes de temperatura e umidade entre os grãos e no ar de secagem. Por outro lado a expressão secagem em camada delgada ou camada fina é aplicada segundo JAYAS et al (1991), a:

- um único grão livremente suspenso no ar ou a uma monocamada de grãos;
- uma multicamada de grãos, caso a temperatura e a umidade do ar de secagem possam ser consideradas no mesmo estado termodinâmico para qualquer tempo de secagem.

Os autores salientam que a espessura da camada, para se considerar como camada delgada, pode aumentar se a velocidade do ar aumentar e se o estado termodinâmico do ar de secagem se aproximar do estado de equilíbrio, em relação às transferências de calor e massa envolvidas na secagem do grão nesta camada.

Diversos trabalhos relativos à secagem de grãos em leito fixo, tais como os de BRUSEWITZ (1974), WADSWORTH, et al. (1982) e CHAU e KUNZE (1982), BRUSEWITZ (1987) e RUMSEY (1987) que estudaram respectivamente, a secagem da vagem do amendoim, grãos de arroz, de milho e nozes, registram a grande variação tanto na umidade inicial como na umidade final do grão atingida após a secagem. Revisões de trabalhos de secagem em leito fixo e modelos de secadores de fluxo contínuo para colheitas foram feitas por PARRY (1985) e MOREY et al. (1978). Ambos classificaram os modelos de leito fixo em três tipos: logarítmico, de balanço de calor e massa, e modelos de equação diferencial parcial.

JUNIOR e CORREA (2000) avaliaram os efeitos imediato e latente, de diferentes combinações de temperatura do ar de secagem e grau de umidade na colheita, sobre a germinação, o vigor e a suscetibilidade a quebra de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) desidratados em secador de bandejas. Concluíram que a qualidade fisiológica e a suscetibilidade a quebra das sementes estão inversamente relacionadas com a temperatura do ar de secagem e com o grau de umidade do produto na colheita. Estes efeitos foram observados tanto imediatamente após a secagem como após 6 meses de armazenamento em condições de ambiente não controlado.

3.4 – Modelos matemáticos para descrever a cinética de secagem

Segundo LUIKOV (1966) os mecanismos propostos para o movimento de umidade em sólidos são: difusão de líquido devido ao gradiente de concentração, difusão de vapor devido ao gradiente de pressão, movimento de água devido as forças capilares, fluxo de

líquido e vapor devido ao gradiente de pressão total, difusão superficial e fluxos provocados por evaporação e condensações sucessivas.

Diferentes teorias tentam explicar a cinética de secagem de materiais porosos. O principal objetivo é descrever como a umidade é transferida do interior do sólido para evaporar na sua superfície e qual mecanismo de transferência controla o processo de secagem. Os modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para representar a cinética de secagem são dois: os modelos puramente convectivos e os modelos difusivos. A formulação desses modelos, desenvolvida a partir do comportamento de secagem de uma única partícula, geralmente considera todos os parâmetros de transporte constantes, possibilitando uma descrição similar da taxa de secagem (MAYTA *et al.*, 1996).

3.4.1 - Teoria da Difusão

SHERWOOD (1929a, b) desenvolveu muitas pesquisas sobre a operação de secagem de sólidos, propondo que o movimento da umidade num sólido ocorre pelo mecanismo de difusão em fase líquida, e que a Lei de Fick pode ser aplicada para prever a velocidade do movimento da umidade, expressa como:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial \psi^2} + \frac{q}{\psi} \frac{\partial Y}{\partial \psi} \right) \quad (22)$$

A Equação 22 apresenta várias soluções para geometrias diferenciadas e fluxo unidimensional:

Placa plana de espessura $2l$ - $q = 0$, $\psi = x$ e x (0,1)

Cilindro de raio R - $q = 1$, $\psi = r$ e x (0,R)

Esfera de raio R - $q = 2$, $\psi = r$ e x (0,R)

Sujeita as seguintes condições iniciais e de contorno

Condição Inicial

$$CI \quad Y(\psi, 0) = Y_0 \quad (23)$$

Condição de Simetria

$$CCI \quad \left. \frac{\partial Y}{\partial \psi} \right|_{\psi=0} = 0 \quad (24)$$

Condição da superfície

$$CC2 \quad Y(\psi, t) = Y_{eq} \quad (25)$$

Placa plana de espessura $2l$, $\psi = 1$

Cilindros e esferas, $\psi = R$

Crank (1975) apresentou as soluções analíticas para as três geometrias citadas. Quando integradas no espaço, se obtém as seguintes equações para a umidade média:

Placa plana

$$\frac{\bar{Y} - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{ef} t}{4l^2}\right) \quad (26)$$

Cilindro infinito

$$\frac{\bar{Y} - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \exp\left(- \frac{\mu_n^2 D_{ef} t}{R_p^2}\right) \quad (27)$$

Esfera

$$\frac{\bar{Y} - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t}{R_p^2}\right) \quad (28)$$

Quando a secagem é controlada pela difusão, é importante a determinação dos coeficientes de difusão, para o estudo quantitativo das características de secagem em relação à variáveis experimentais controladas tais como fluxo de ar e temperatura.

Vários estudos de secagem não consideram na razão $\frac{\bar{Y} - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}}$, para avaliação da cinética, a umidade de equilíbrio, apenas a razão $\frac{\bar{Y}}{Y_0}$ (HAWLADER *et al.*, 1991, OLIVEIRA, 1999; ROMERO-PEÑA, 1999).

BROOKER, BAKKER-ARKEMA E HALL (1974), na análise da secagem de grão, realizaram uma simplificação da equação de difusão em coordenadas esféricas para predizer a secagem de vários materiais, empregando somente o primeiro termo da equação para calcular a taxa de secagem dos produtos. Ainda segundo esses autores as equações de secagem baseadas na teoria da difusão não representam com precisão o comportamento da secagem de grãos devido à escolha inadequada das condições de contorno nas soluções das equações e à incorreta consideração de que a difusividade mássica e a constante de secagem são independentes do teor de umidade.

Para a solução da equação 22 são consideradas várias simplificações que podem não condizer com a realidade, pois o sólido tem uma estrutura celular heterogênea, a transferência não é unidirecional, a difusão pode ocorrer sob vários mecanismos (na fase gasosa, e/ou na líquida, em poros de vários tamanhos), a temperatura do material aumenta durante o processo e ocorre o encolhimento com a evaporação da água.

DINCER e DOST (1995) propuseram modelos que consideram o fenômeno do encolhimento observando as taxas de secagem de diferentes materiais.

De acordo com a literatura, uma das formas mais utilizadas para obtenção das informações sobre a taxa de secagem é através de experimentos de secagem em camada fina; nestes experimentos o ar, em condições constantes de umidade, temperatura e velocidade, escoava através de uma camada delgada de material úmido. Esses estudos isoladamente não descrevem de maneira adequada o processo de transferência de calor e massa em camadas espessas, entretanto, podem representar um elemento de volume desses leitos (BARROZO *et al.*, 1998).

Os pesquisadores BARROZO *et al.*, (1998) também ressaltam a importância do conhecimento das equações de secagem para o sucesso de projetos de secadores. A tabela 3.2 apresenta algumas destas equações empíricas e/ou semi-empíricas disponíveis na literatura para descrição da cinética de secagem de materiais sólidos.

BARROZO *et al.* (1994) concluíram que as equações de PAGE (1949) e OVERHULTZ (1973) foram as que melhor se ajustaram aos dados de secagem de soja em camada fina.

Tabela 3.2 – Equações para a cinética de secagem

Equações	Referências
$Y^* = e^{-Kt} \quad K = a \cdot e^{\frac{-b}{T}}$	LEWIS (1921)
$Y^* = A \cdot e^{-Kt} \quad K = a \cdot e^{\frac{-b}{T}}$	BROOKER <i>et al.</i> (1974)
$Y^* = A \cdot (e^{-Kt} + 19 \cdot e^{-9 \cdot Kt})$ $K = a \cdot e^{\frac{-b}{T}}$	HENDERSON e HENDERSON (1968)
$Y^* = e^{-Kt^n} \quad K = a \cdot e^{\frac{-b}{T}}$	PAGE (1949)
$Y^* = e^{(-Kt)^n} \quad K = a \cdot e^{\frac{-b}{T}}$	OVERHULTZ <i>et al.</i> (1973)

Fonte : BARROZO *et al.* (1998)

Onde $Y^* = \frac{\bar{Y} - Y_{eq}}{Y_o - Y_{eq}}$

Pela análise da literatura específica, verifica-se que as equações de secagem puramente empíricas são boas opções para a predição do processo de secagem, dentro das condições operacionais para as quais foram estabelecidas. O maior problema está na correta determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa e das propriedades físicas dos produtos a secar (FARIA, 1998).

3.5 – Planejamento e otimização de experimentos

Um experimento é uma série de ensaios nos quais são realizadas variações nos parâmetros ou variáveis de entrada do processo ou de uma operação industrial, objetivando verificar e identificar as variações nas respostas ou variáveis de saída (COSTA, 1999).

O emprego de métodos estatísticos objetiva alcançar soluções otimizadas dos problemas experimentais, e vem se tornando cada vez mais freqüente em trabalhos envolvendo todos os tipos de materiais, principalmente os naturais (FARIA, 1998; COSTA, 1999, MEDEIROS, 2001).

Segundo BOX, HUNTER e HUNTER (1978), os métodos estatísticos suavizam as dificuldades na determinação do erro experimental e a complexidade dos efeitos estudados.

De acordo com CARPINETTI (1996) a análise experimental com base no planejamento estatístico, pode fornecer informações do tipo:

- quais as variáveis, ou fatores, do processo são mais influentes no(s) parâmetro(s) de resposta de interesse, o qual se constitui na variável dependente ou item de controle;
- os níveis de ajuste das variáveis do processo influentes na resposta, de modo que a variabilidade do parâmetro de resposta seja mínimo;
- os níveis de ajuste das variáveis influentes do processo, de modo que o valor do resultado seja próximo do valor nominal;
- os níveis de ajuste das variáveis influentes na resposta, de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja reduzido.

As técnicas usuais de planejamento de experimentos e otimização de processos, amplamente utilizados em ciências e engenharia são encontradas de forma detalhada nos textos de BOX, HUNTER e HUNTER (1978); BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS (1995). Os planejamentos fatoriais e os fatoriais fracionários são as técnicas mais usuais no planejamento experimental, usando o quadro de análise de variância (ANOVA) para análise de dados.

O planejamento fatorial 2^k é um tipo especial de planejamento experimental, adequado ao estudo eficiente e econômico do efeito conjunto de vários fatores ou variáveis de entrada, sobre uma variável de resposta de interesse, onde cada fator está presente em apenas dois níveis. Portanto, se o número de níveis for igual a 2, uma série experimental completa se transforma em: $2_1 \times 2_2 \times \dots \times 2_k$ com 2^k experimentos, onde k é o número de variáveis de entrada (independentes). Observa-se que, trabalhando-se apenas com dois níveis de cada variável, a série experimental é reduzida substancialmente.

No projeto fatorial completo em dois níveis, pode-se trabalhar com variáveis independentes descontínuas (qualitativas) ou contínuas. Os níveis de cada variável podem ser codificados em nível baixo (-) e nível alto (+).

No método clássico de experimentos, as variáveis independentes de um determinado processo são avaliadas uma de cada vez, mantendo-se as demais constantes, sendo a resposta (variável dependente) estimada por um método de medida adequada. A abordagem dessa técnica experimental apresenta como desvantagem o fato de requerer um número grande de ensaios experimentais quando se trata de experimentos multivariados, além de apresentar limitações nas conclusões, em consequência de possíveis interações entre variáveis estudadas (TAQUEDA, COSTA e FARIA, 1998).

Desta forma, o planejamento estatístico de experimentos e a análise de variância proporcionam um vantajoso método para a avaliação dos efeitos e interações das variáveis operacionais mais importantes do processo em análise. Assim, para alcançar o resultado esperado (máximo ou mínimo), as variáveis operacionais devem ser cuidadosamente controladas e suas influências na variável de resposta quantificadas, sendo recomendada a utilização de experimentos estatisticamente planejados e técnicas de otimização, que são ferramentas indispensáveis de auxílio à pesquisa, pois fornecem resultados a partir de um reduzido número de experimentos com sensível aumento na precisão das informações obtidas (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978). Uma das técnicas mais utilizadas na otimização estatística de experimentos é a metodologia de superfícies de resposta, que implica na

representação de superfícies em três dimensões, demonstrando de forma clara, uma tendência na variável de resposta que deve ser analisada criteriosamente. Após a determinação da região de interesse, busca-se um detalhamento dessa área visando obter-se as condições nas quais a resposta será otimizada. Esta técnica é comumente empregada na análise de dados experimentais de secagem e assuntos correlatos, não somente minimizando o número de experimentos, em sua maioria trabalhosos e dispendiosos, como também permitindo a otimização do processo e melhorando a qualidade dos produtos finais.

Capítulo 4

Materiais e métodos experimentais

4. Materiais e métodos experimentais

4.1 – Matéria prima

Os experimentos foram realizados utilizando-se feijão verde, *Vigna unguiculata (L) Walp*, obtido de um mesmo fornecedor de Natal, RN. Os feijões foram selecionados, removendo-se todas as partículas estranhas e os grãos maduros. Após a seleção, com a finalidade de se manter as características do feijão inalteradas durante o período de armazenamento, era feito o branqueamento em vapor de água de acordo com a metodologia descrita no item 4.6.1. Após resfriamento à temperatura ambiente, o feijão branqueado era embalado em sacos de polietileno e armazenado em freezer doméstico vertical, à temperatura média de - 18 ° C.

O período de realização dos experimentos foi de maio de 2003 a janeiro de 2004, envolvendo, portanto, a safra e a entressafra do feijão verde na região de Natal, o que dificultou as condições de se trabalhar com um feijão mais uniforme em relação às suas propriedades.

4.2 – Caracterização física do feijão verde

4.2.1 – Diâmetro do grão

Mediu-se o diâmetro a partir do volume de líquido deslocado, quando amostras de grãos eram imersas em fluidos (álcool etílico) de densidade inferior à do feijão. O diâmetro equivalente é calculado a partir do volume total deslocado, dividido pelo número de grãos da amostra, empregando-se a expressão para o cálculo do volume da esfera:

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}} \quad (29)$$

onde V_p = volume de líquido deslocado por um grão de feijão, m³

d_p = diâmetro do grão (diâmetro da esfera de igual volume), m

4.2.2 – Esfericidade do grão

Esta medida foi feita através da projeção em retroprojedor de amostras de feijão, com quantidade média de 6 grãos, em papel milimetrado. A esfericidade era calculada pela razão entre o diâmetro do círculo inscrito e o diâmetro do círculo circunscrito, expressa pela Equação (30) segundo MOHSENIN (1978), ilustrada na Figura 4.1

$$\phi = \frac{d_i}{d_c} * 100 \quad (30)$$

Onde d_i = diâmetro do círculo inscrito na projeção do objeto em repouso, m

d_c = diâmetro do círculo circunscrito na projeção do objeto em repouso, m

ϕ = esfericidade do grão

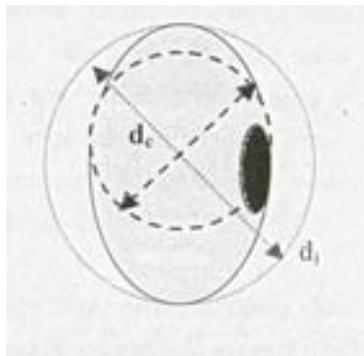


Figura 4.1. Ilustração do método de determinação da esfericidade definida para grãos - MOHSENIN (1978)

4.2.3 – Densidade do grão

As densidades foram medidas pelo método de picnometria líquida, utilizando-se picnômetros padrões de 50 ml previamente calibrados (medidas efetuadas em triplicatas). A metodologia utilizada foi a seguinte:

- 1 - Lavava-se os picnômetros, previamente marcados, com enxágüe em água destilada, tarando-os pelo método convencional, após secagem em estufa à 105⁰C por um período de 4 horas;
- 2 - Após esfriamento em dessecador efetuava-se a pesagem dos picnômetros, anotando-se o peso;
- 3 - Adicionava-se álcool etílico até completar o volume de cada picnômetro, procedendo-se a pesagem dos mesmos, com adição de álcool etílico e anotando-se o peso total;
- 4 - Os picnômetros eram esvaziados, adicionando-se amostras de cerca de 10 g de feijão; registrava-se o peso das amostras e completava-se o volume dos picnômetros com álcool etílico, efetuando-se a pesagem de cada conjunto (picnômetro + amostra + álcool) e anotando-se este valor;

A densidade foi calculada através da Equação (31). Todas as determinações foram realizadas em triplicata.

$$\rho_p = \frac{m \cdot \rho_{alcohol}}{(m_{(pic+alcohol)} + m_{alcohol}) - m_{(pic+alcohol+feijão)}} \quad (31)$$

onde:

m – massa do feijão, g

m_{álcool} – massa do álcool etílico, g

m_(pic + álcool) – massa do picnômetro mais o álcool, g

m_(pic + álcool+feijão) – massa do picnômetro mais o álcool mais o feijão, g

ρ_{álcool} – densidade do álcool, g/cm³

ρ_p – densidade do feijão. g/cm³

4.2.4 – Ângulo de repouso

O ângulo de repouso foi determinado pela inclinação de uma plataforma horizontal, ilustrada na figura 4.2. Amostras representativas do material (feijão), eram espalhadas em camadas sobrepostas (mantendo-se uma camada completa de mesma espessura em todos os ensaios) sobre a plataforma horizontal. Em seguida, variava-se lentamente o ângulo de inclinação da superfície até observar-se o início do deslocamento do material. A inclinação da superfície no momento em que o material começava a se mover, medida na escala acoplada à estrutura, é designada como o ângulo de repouso.

Foram realizadas medidas dos ângulos de repouso dos grãos de feijão “*in natura*”, pré-seco e seco. Todas as medidas foram efetuadas, no mínimo em quadruplicata.

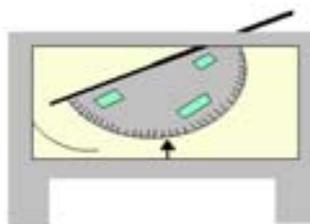


Figura 4.2. Célula de medidas de ângulo de repouso

4.3 - Caracterização físico-química

A caracterização físico-química do feijão verde produzido na região circunvizinha de Natal foi realizada em projeto de pesquisa anterior, e os resultados podem ser encontrados em FURTUNATO e MAGALHÃES (1995). Para controle do feijão verde, as análises físico-químicas se limitaram às determinações dos teores de umidade, de sólidos solúveis e sólidos totais, medidas de pH e de acidez total titulável. As análises eram realizadas de acordo com as Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (1976) para o feijão “*in natura*” e desidratado.

4.3.1 - pH

O pH foi medido diretamente no potenciômetro DIGIMED – DMPH –2, previamente calibrado, método nº 4.7.2 (Instituto Adolf Lutz, 1985).

4.3.2 - Acidez titulável

A acidez titulável foi determinada pelo Método nº 13.6.2 (Instituto Adolf Lutz, 1985). De acordo com o procedimento descrito, amostras em triplicata do feijão verde foram trituradas, diluídas e tituladas com solução de NaOH 0,01N, usando como indicador solução de fenolftaleína a 1% de ácido cítrico.

4.3.3 - Sólidos solúveis (°Brix)

Através da leitura direta no refratômetro RL-2 NR-2720, mediu-se o Brix do feijão verde in-natura e seco. Foi empregado o método nº 13.6.1 (Instituto Adolf Lutz, 1985), tomando os devidos cuidados de se triturar os grãos de feijão no processador e efetuar as devidas diluições antes de proceder às medidas.

4.3.4 - Umidade

Determinada por evaporação até peso constante em estufa com circulação de ar a 105°C. Para um melhor controle da umidade do ar circulante, uma bandeja contendo leito de sílica gel foi colocada na estufa. As amostras do feijão (5 g em média) eram pesadas em pesa-filtros de vidro com tampa esmerilhada previamente tarados. Durante o acompanhamento da perda de umidade as amostras eram retiradas da estufa e colocadas em dessecadores, aguardando seu resfriamento até temperatura ambiente, quando então procedia-se a pesagem.

As operações de aquecimento, resfriamento e pesagem são repetidos até peso constante. As determinações de umidade foram feitas em triplicatas.

4.4 – Equipamentos

4.4.1 – Secador de leito fixo

O sistema utilizado na pré-secagem do feijão verde é mostrado na Figura 4.3, o mesmo é composto de um soprador de 4 cv que impulsiona a corrente de ar através do trocador de calor, constituído de uma caixa com quatro resistências. O ar quente, é introduzido no secador convectivo pela base, percola o leito de feijão distribuído em três bandejas, sendo descartado para a atmosfera pela parte superior do secador. A temperatura foi controlada diretamente pelo controlador de temperatura, ligado a uma resistência de 500W. O controlador também determina a variação de temperatura admitida no sistema. A velocidade do gás foi regulada através de uma válvula de escape e uma válvula de admissão do ar disposta ao longo do sistema, conforme ilustra a Figura 4.3.

Para verificar a possível variação de temperatura ao longo do secador foram utilizadas tomadas de temperatura em cinco pontos distintos através de termopares digitais. Também foram medidas a umidade e temperatura ambiente, bem como a umidade e temperatura na saída do ar através de um termohigrômetro. Utilizando-se uma balança com precisão de duas casas decimais e variação de $\pm 0,04$ determinava-se a perda de massa no decorrer do experimento. A velocidade do ar de secagem era medida na saída do secador, com um anemômetro digital de fio quente, marca TSI, modelo 8330. O valor da velocidade corresponde ao valor médio obtido a partir das medidas do perfil de velocidade na tubulação de saída do secador.

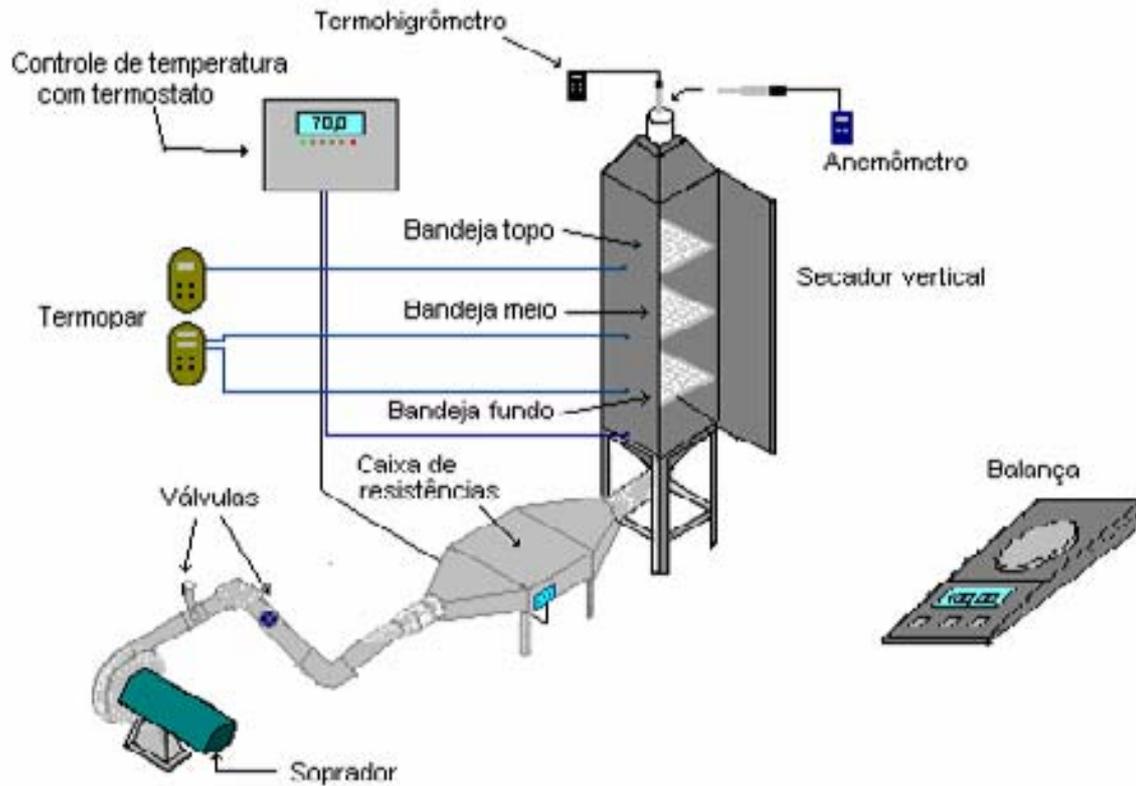


Figura 4.3. Esquema do Secador de Bandejas

4.4.2 – Leito de jorro

O secador consiste de um leito de jorro cônico-cilíndrico, construído em aço inoxidável com visores em acrílico, cujo diagrama esquemático é mostrado na Figura 4.4. O leito consiste de uma base cônica, com ângulo incluído de 60° , altura de 0,13 m e diâmetro de entrada de 0,03 m. A coluna cilíndrica tem 0,18 m de diâmetro e altura de 0,72 m. O ciclone, do tipo Lapple com 0,10 m de diâmetro de coluna promovia a separação e recolhimento de material proveniente da quebra dos grãos.

- A – Ciclone
- B – Trocador de calor
- C – Soprador de ar
- D – Válvula de passagem
- E – Visores em acrílico
- F – Coluna de aço inox
- G – Sensor de temperatura
- H – Painel de controle
- I – Partículas inertes
- J – Válvula de escape

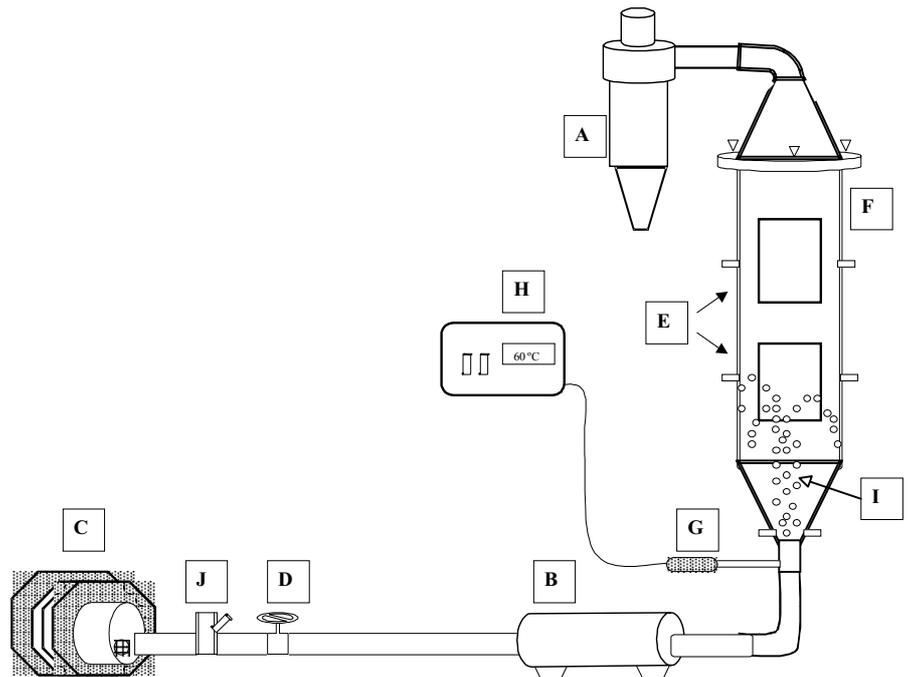


Figura 4.4. Esquema do Leito de Jorro

4.4.3 - Equipamentos periféricos e instrumentação dos secadores

- Soprador marca IBRAM-Weq modelo CR-6 com 4 cv de potência;
- Controlador de temperatura marca OMBRON, modelo E5AW com precisão 0,1 °C e controle na faixa de $\pm 1^\circ\text{C}$;
- Termopares do tipo K (chromel-alumel) ligados a um indicador digital de temperatura, marca Lutron, TM-906 A, com precisão de 0,1°C;
- Termohigrômetro digital para medida da umidade relativa e temperatura do ar na saída do ciclone, marca Cole-Parner, nº 37950-10, com precisão de 0,1% e 0,1°C, respectivamente;
- Aquecedor elétrico composto de um conjunto de duas resistências, com potência total de 2.000 W.
- Anemômetro digital para medida de velocidade do ar na saída do ciclone, marca Lutron, AM-4201, com precisão de 0,1 m/s;

- Manômetro diferencial de vidro tipo tubo em U, para medidas de queda de pressão do leite.

4.4.4 - Equipamentos para Determinação das Propriedades Físicas, Análises Físico-Químicas e Microbiológicas:

- Célula de medida de ângulo de repouso;
- Refratômetro;
- Espectrofotômetros;
- Balanças analíticas e semi-analíticas;
- Estufas de secagem e esterilização;
- Agitadores magnéticos;
- Placa aquecedor;
- Vidrarias;
- Utensílios para recepção e preparo da matéria prima .

–

4.5 – Ensaio Preliminares

Os primeiros testes da secagem do feijão verde foram realizados apenas em leite de jorro, porém, devido ao elevado teor de umidade do grão, em torno de 80%, durante os 15 minutos iniciais do processamento, o leite se mantinha estático, comportando-se como leite fixo. Como se desejava obter um produto final com um teor de umidade uniforme dos grãos, foi necessário se fazer a pré secagem em camada fina no secador de leite fixo até um nível de umidade que viabilizasse a secagem contínua, no leite de jorro. Justifica-se assim a utilização combinada dos secadores de leite fixo e de leite de jorro neste trabalho.

Inicialmente foram realizados ensaios no secador de leite fixo, com a finalidade de se observar o comportamento da secagem do feijão, e as características do feijão desidratado comparativamente ao feijão *in natura*. As curvas de secagem obtidas nos ensaios preliminares em secador de bandeja foram analisadas, com base nos fundamentos de secagem amplamente apresentados e discutidos na literatura Para se acompanhar a cinética de secagem do feijão, as

bandejas eram pesadas em intervalos regulares de 10 minutos. Paralelamente ao acompanhamento da pesagem, acompanhavam-se as medidas de temperatura através de termopares distribuídos em pontos distintos do secador, conforme mostra o esquema do equipamento ilustrado na Figura 4.3. A velocidade do ar era medida com um anemômetro digital, na saída do secador, onde também eram acompanhadas as medidas de umidade relativa e temperatura de bulbo seco, utilizando-se um termohigrômetro digital.

A caracterização física e fisico-química do feijão *in natura* e desidratado, foi feita de acordo com a metodologia descrita nos itens 4.2 e 4.3 respectivamente, também empregada nos ensaios realizados a partir do planejamento experimental.

Com a finalidade de se definir as melhores condições de secagem do feijão verde no leito de jorro, ensaios de pré-secagem em leito fixo foram realizados, para cargas de feijão correspondentes a 2,25 kg, igualmente distribuídas nas três bandejas do secador com velocidade e temperatura do ar fixadas em 0,53m/s e 60°C. A partir do balanço material e da umidade inicial do feijão, calculou-se a massa de feijão em cada bandeja, correspondente a três níveis distintos de umidade a serem alcançados, 30%, 40% e 50%, nos ensaios de pré-secagem 1, 2 e 3 respectivamente. Desta forma, as bandejas eram retiradas do secador à medida que alcançavam a massa previamente estimada. Maiores detalhes do equipamento e da metodologia utilizada nos ensaios de pré-secagem em leito fixo, são apresentados nos itens 4.4.1 e 4.6.2, respectivamente.

A definição da melhor condição inicial de umidade para se proceder à secagem do feijão verde no leito de jorro, foi feita considerando a resistência do grão ao atrito promovido pelas condições fluidodinâmicas deste tipo de secador, atendendo entretanto, às mínimas condições de se manter o jorro estável.

Os ensaios preliminares de secagem no leito de jorro foram conduzidos nas condições operacionais apresentadas na tabela 4.1. Nestes ensaios a metodologia experimental adotada foi a mesma descrita no item 4.6.4, para os ensaios realizados com base no planejamento experimental.

Tabela 4.1 Condições operacionais dos ensaios preliminares – leito de jorro

Ensaio	m (kg)	Tgi (°C)	v (m/s)	Xjo
Ensaio 1	1,37	57,4	0,76	34,60
Ensaio 2	1,15	59,0	0,89	40,70
Ensaio 3	1,20	58,5	0,89	52,40

4.6 – Procedimento experimental

O procedimento experimental para a obtenção do feijão verde desidratado está contido nas etapas descritas na Figura 4.5.

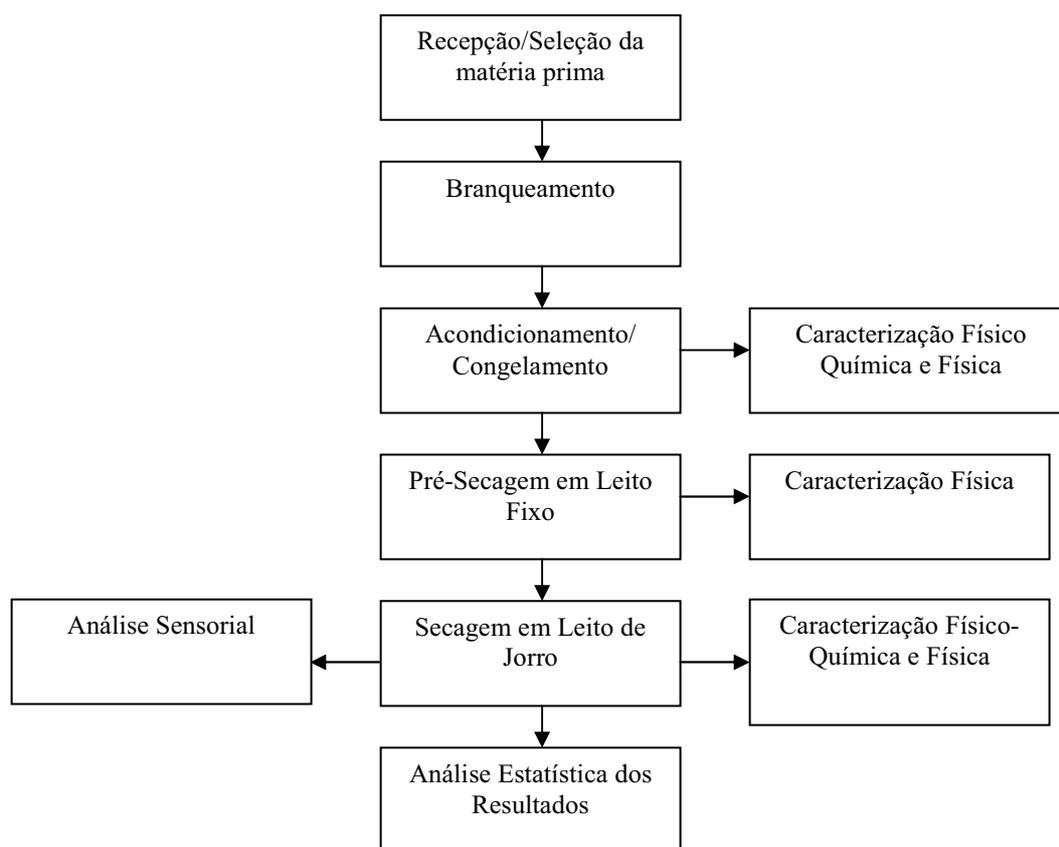


Figura 4.5 – Fluxograma do procedimento experimental para a obtenção do feijão verde.

De acordo com um planejamento fatorial 2^2 com 3 repetições no ponto central, foram realizados sete (7) ensaios no secador de leite de jorro. A matriz experimental, baseada no planejamento fatorial, encontra-se ilustrada na Tabela 4.2 abaixo:

Tabela 4.2 – Matriz Experimental

Ensaio	Tgi(°C)	m (kg)	v (m/s)	v/Vjm
1	60	1,25	0,77	1,25
2	70	1,25	0,77	1,25
3	60	1,25	0,86	1,4
4	70	1,25	0,86	1,4
5	65	1,25	0,82	1,325
6	65	1,25	0,82	1,325
7	65	1,25	0,82	1,325

4.6.1 – Branqueamento

A inativação enzimática do feijão verde foi realizada através do branqueamento em vapor de água ($T = 90^{\circ}\text{C}$) por aproximadamente 5 minutos, seguido do resfriamento em água corrente à temperatura ambiente.

4.6.2 - Pré-secagem em secador de bandeja

Os ensaios de pré-secagem do feijão no secador de bandeja foram planejados para fornecer grãos no nível de umidade de 40% (em base úmida). Estes experimentos eram conduzidos com uma temperatura de entrada do ar de secagem fixada em 60°C , e um nível médio de $0,53\text{ m/s}$ de velocidade do ar. Em intervalos regulares de tempo (10 min) medidas simultâneas da temperatura do ar em diversos pontos do secador, e da umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar na saída do secador eram registradas. Para o mesmo intervalo

de tempo efetuava-se a pesagem das bandejas acompanhando-se desta forma a perda de umidade do material ao longo do processo de secagem.

4.6.3 - Curvas hidrodinâmicas

As curvas foram obtidas apenas no sentido da vazão decrescente, com o feijão pré-seco a 40%. Para uma velocidade inicial de ar que promovesse uma boa circulação de grãos com condições de jorro estável, acompanhou-se às medidas de queda de pressão na medida em que se procedia à diminuição gradativa da vazão do ar, até interrupção completa do fluxo. A velocidade mínima na qual ainda se verificava condição de jorro estável foi registrada como a vazão de jorro mínimo.

4.6.4 – Secagem em leito de jorro

Os ensaios no leito de jorro tiveram duração de 50 minutos. Eram acompanhadas as medidas da temperatura do ar na entrada e na saída do secador, bem como as medidas simultâneas da temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar de exaustão no ciclone. Efetuava-se as medidas da velocidade do ar de exaustão com anemômetro digital, também na saída do ciclone. Acompanhava-se ainda, as medidas de queda de pressão no leito, e a altura da fonte de partículas. Sacos plásticos previamente pesados, foram utilizados para coletar o pó separado no ciclone e proveniente da quebra dos grãos. Em alguns ensaios foi feita a coleta de amostras dos grãos em intervalos de 10 minutos, para avaliação da umidade do feijão ao longo da secagem no leito de jorro.

Com a finalidade de se avaliar a uniformidade dos grãos em relação ao teor de umidade, ao final de alguns ensaios procedeu-se a coleta de grãos em 4 pontos distintos do leito: na superfície (centro e próximos a parede), na parte inferior próximo ao distribuidor e no meio do leito. Determinou-se a umidade destas amostras pelo método da secagem em estufa até peso constante.

Com a finalidade de se observar o comportamento fluidodinâmico do leito à medida em que os grãos se tornavam mais secos, e conseqüentemente mais leves e menores, dois ensaios no leito de jorro (ensaio 2 e no ponto central) foram repetidos com prorrogação do tempo de secagem. O feijão desidratado nestes ensaios foi utilizado nos testes sensoriais e nas análises microbiológicas.

As curvas de secagem foram construídas a partir dos dados de umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar, obtidos durante os 50 minutos da secagem, contados a partir do instante em que se ligava o secador carregado dos grãos. A metodologia empregada na construção das curvas de umidade e determinação das taxas de evaporação pode ser assim descrita:

1 – antes de proceder o carregamento do feijão ao secador, após estabilizado o sistema na temperatura de trabalho e com a vazão do ar no jorro fixada, registrava-se as medidas de umidade relativa e das temperaturas de bulbo seco na entrada e na saída do secador;

2 – considerando que nestas condições não ocorre qualquer processo de secagem, a umidade absoluta do ar de exaustão é a mesma do ar alimentado. Com os dados de umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar de exaustão, determinou-se através das cartas psicrométricas a umidade absoluta do ar. A partir da umidade absoluta e com a temperatura de bulbo seco do ar, medida na entrada do secador, as demais propriedades do ar alimentado foram determinados: umidade relativa, umidade de saturação, temperatura de bulbo úmido e densidade;

3 – a partir do momento em que se acionava o secador, registrava-se a cada dois minutos a temperatura e umidade relativa do ar na saída do secador. Utilizando-se as cartas psicrométricas, obteve-se todas as informações necessárias para construção das curvas de umidade e determinação das taxas de evaporação nos 50 minutos da secagem;

4 – a seguinte metodologia de cálculo foi empregada:

4.1 – calculou-se a vazão mássica de ar isento de umidade (W_{giu}), a partir dos dados psicrométricos do ar na saída do secador e da velocidade do ar no jorro, de acordo com a Equação 32:

$$W_{giu} = \frac{\pi D_c^2 v \rho_{ge}}{4(U_{ge} + 1)} \quad (32)$$

Estes cálculos foram efetuados com as medidas registradas a cada dois minutos a partir do instante em que se ligava o secador, sendo consideradas, portanto as variações na velocidade superficial do ar.

4.2 – as taxas de evaporação foram calculadas a partir da Equação 33:

$$W_{ev} = W_{giu} (U_{ge} - U_{gi}) \quad (33)$$

4.6.5 - Encolhimento do grão

Metodologia experimental empregada :

Foi realizado um ensaio de secagem do feijão em estufa com circulação de ar à temperatura de 70°C para avaliação do encolhimento do grão em diferentes níveis de umidade. 10 amostras de grãos de feijão in-natura foram colocadas na estufa. Em intervalos de tempo de cerca de 30 minutos, retirava-se uma amostra, pesava-a para determinação da umidade e pelo método do volume deslocado, media-se o diâmetro médio dos grãos. As amostras mais secas foram descartadas em virtude de apresentarem problemas com relação à determinação do volume deslocado, não havendo imersão completa dos grãos no líquido utilizado (álcool etílico PA).

Metodologia de cálculo empregada na modelagem do encolhimento:

Segundo KEEY (1972), o encolhimento é função da umidade do material, podendo ser representado por uma relação do tipo:

$$L = L_{iu} (1 + \beta Y) \quad (34)$$

Onde,

L e L_{iu} = Dimensão característica do material úmido e isento de umidade, m

Y = umidade do material em base seca;

β = coeficiente de encolhimento.

Considerando-se como dimensão característica o diâmetro do grão determinado pelo método do volume deslocado, os dados da razão dp/dp_o e Y , (dp_o , diâmetro inicial do grão) foram correlacionados. O ajuste linear aos dados experimentais permitiu a determinação, por extrapolação, do diâmetro do grão isento de umidade (dp_{iu}). Correlacionando-se então os dados de dp/dp_{iu} em função de Y , determina-se o coeficiente de encolhimento, a partir da inclinação da reta ajustada aos dados experimentais.

4.6.6 - Cinética de secagem

Metodologia experimental empregada:

A cinética de secagem do feijão verde foi analisada a partir dos resultados obtidos em dois ensaios de secagem, no secador de leito fixo. Nestes ensaios, os grãos de feijão foram distribuídos em uma única camada e de forma espaçada em apenas uma bandeja do secador. A metodologia empregada foi a mesma descrita no item 4.6.2, para a secagem do feijão em leito fixo, com acompanhamento sistemático da perda de massa, através da pesagem da bandeja em intervalos regulares de 5 minutos. Os experimentos foram realizados numa temperatura fixa de 60°C, para dois níveis de velocidade do ar, 0,53 e 0,73 m/s e massa inicial de feijão correspondente a 0,07 kg. Os ensaios tiveram duração de 160 minutos.

Metodologia de cálculo empregada na modelagem da cinética de secagem:

Quando no período de taxa decrescente a difusão é controlante, a umidade movimenta-se para a superfície em virtude da difusão molecular. O processo de evaporação de água na secagem de um sólido, pode então ser descrito, aplicando-se modelos matemáticos que

consideram como mecanismo principal a difusão baseada na segunda lei de Fick. De acordo com a segunda lei de Fick para um sólido esférico homogêneo, o transporte unidimensional da umidade, na direção radial pode ser expresso pela Equação (22), citada no item 3.4.1

Esta Equação (22), pode ser aplicada ao caso particular da secagem de uma esfera, com coeficiente de difusão constante, tendo como condição inicial, umidade uniforme em toda a esfera, e como condições de contorno, taxa de evaporação nula no centro e umidade de equilíbrio na superfície:

Se a curva de secagem apresentar o período de taxa constante Y_o será o teor de umidade crítico correspondente ao término do período a taxa constante.

A solução fornecida por Crank (1975) para a Equação (22), sujeita às condições inicial e de contorno descritas, é dada pela Equação (35) apresentada abaixo:

$$\frac{\bar{Y} - Y_{eq}}{Y_o - Y_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \right]^2 \exp \left(- \left[\frac{n\pi}{R_p} \right]^2 D_{ef} t \right) \quad (35)$$

Para tempos longos, a equação (28) converge rapidamente, podendo-se utilizar o primeiro termo da série como boa aproximação,

$$Y^* = \frac{\bar{Y} - Y_{eq}}{Y_o - Y_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \exp \left(- \frac{\pi^2 D_{ef} t}{R_p^2} \right) \quad (36)$$

Os valores de Def permitem um estudo quantitativo das características de secagem com relação às variáveis experimentais controladas tais como vazão de ar e temperatura. Para baixos valores de Y_{eq} é possível desprezá-lo da equação.

O comportamento da transferência de umidade na secagem de sólidos alimentícios normalmente não satisfaz as simplificações consideradas na solução da segunda lei de Fick; o sólido tem uma estrutura celular heterogênea, a transferência não é unidimensional, a difusão pode ocorrer sob vários mecanismos (na fase gasosa, e/ou líquida, e em várias direções), a temperatura do alimento aumenta durante o processo e ocorre o encolhimento com evaporação da água (Lima, 2001). Para representar esse afastamento das suposições iniciais, é comum e às vezes suficiente, substituir a difusividade, por um coeficiente de difusão efetivo, D_{ef} , a ser determinado experimentalmente.

A metodologia de cálculo empregada para o ajustar o modelo difusional baseado na segunda Lei de Fick, consiste em :

- 1- linearizar a equação 36, na forma da equação(37), descrita como segue:

$$\ln(Y^*) = A_0 + B_0 t \quad (37)$$

Onde :

$$A_0 = \ln \frac{6}{\pi^2} \quad (38)$$

$$B_0 = -\frac{\pi^2 \cdot D_{ef}}{R_p^2} \quad (39)$$

- 2 – construir o gráfico de $\ln Y^*$ em função do tempo, determinando-se a umidade de equilíbrio por extrapolação da curva da taxa de evaporação específica em função da umidade do grão em base seca.

- 3 – a partir da equação da reta ajustada aos dados experimentais, determinar a difusividade efetiva através do coeficiente angular B_0 .

- 4 – havendo um bom ajuste do modelo difusional aos dados experimentais, o coeficiente linear da reta ajustada, para o modelo em questão, deverá satisfazer a seguinte relação:

$$e^{A_0} = \frac{6}{\pi^2} = 0,608 \quad (40)$$

4.6.7 – Análise sensorial

Foram analisados os atributos aparência, textura, sabor, cor e odor do feijão verde desidratado, pelo método da escala Hedônica, atribuindo-se notas de um a nove. Os resultados foram avaliados através da Análise de Variância e do método de Tukey (Teixeira et al., 1987).

O índice de aceitabilidade (I.A.) foi calculado considerando-se a nota máxima como 100% e a pontuação média, em %, como sendo o Índice de Aceitabilidade. O produto é considerado aceito quando o I.A. for maior que 70% (Teixeira et al., 1987).

Utilizou-se um painel composto de 21 provadores, não treinados.

Capítulo 5

Resultados e discursões

5. Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos no estudo de secagem do feijão verde, *Vigna unguiculata L. Walp.* São incluídos os resultados das determinações físico-químicas e caracterização física dos grãos *in natura* e desidratados, resultados de ensaios preliminares de secagem em leito fixo e leito de jorro e curvas de secagem em leito fixo com modelagem dos dados experimentais obtidos. Definiu-se a partir dos resultados obtidos nos ensaios preliminares a metodologia e condições operacionais a serem fixadas nos ensaios combinados leito fixo-leito de jorro.

Como base num planejamento experimental fatorial do tipo 2^2 , com três repetições no ponto central, foram realizados sete ensaios de secagem no leito de jorro, com pré-secagem em leito fixo, com a finalidade de se analisar os efeitos das condições operacionais (temperatura e velocidade do ar), sobre as variáveis respostas do processo, (quebra do feijão, razão de umidade e fração de água evaporada), cujos resultados são apresentados como enfoque principal deste capítulo. Finalmente, apresenta-se os resultados da análise sensorial do produto reidratado.

5.1 Resultados dos Ensaios Preliminares

5.1.1 Determinações físico-químicas e caracterização física dos grãos

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 são mostrados os dados relativos às determinações físico-química e caracterização física dos grãos de feijão *in natura* e desidratado oriundos de diferentes lotes. Os resultados apresentados nas Tabelas mostram que o feijão verde apresenta uma certa uniformidade tanto em relação à composição como em relação às propriedades físicas do grão.

O feijão desidratado apresenta o mesmo pH do *in natura*, maior acidez e elevada concentração de sólidos solúveis. Há um razoável encolhimento e diminuição no ângulo de repouso do grão desidratado em relação ao *in natura*.

Tabela 5.1- Caracterização físico-química do feijão *in natura* e desidratado (ensaios preliminares)

Lote	Feijão	pH	Acidez (% ác cítrico)	Sólidos Solúveis (° Brix)	X(%)
1	<i>In natura</i>	6,10	0,28	12,5	61,9
	Desidratado	5,81	-	18,5	16,7
2	<i>In natura</i>	5,97	0,16	11,5	-
	Desidratado	6,28	0,91	27,0	-
3	<i>In natura</i>	6,65	0,18	18,9	71,0
	Desidratado	6,60	0,52	25,2	20,1
4	<i>In natura</i>	6,25	0,14	17,7	76,6
	Desidratado	6,58	0,98	39,0	9,3

Em relação ao feijão *in natura* observa-se que o feijão desidratado apresenta encolhimento e diminuição do ângulo de repouso da ordem de 21% e 23% (em média), respectivamente, como se observa na Tabela 5.2.

Tabela 5.2- Caracterização física dos grãos de feijão *in natura* e desidratado (ensaios preliminares)

Lote	Feijão	$d_p \times 10^2$ (m)	θ (°)
2	<i>In natura</i>	0,84	33,0
	Desidratado	0,68	25,7
3	<i>In natura</i>	0,81	34,5
	Desidratado	0,62	25,8
4	<i>In natura</i>	0,79	34,5
	Desidratado	0,62	25,6
5	<i>In natura</i>	-	32,4
	Desidratado	0,65	25,2

5.1.2 Ensaios de secagem em leito fixo

Com relação aos ensaios de secagem, os testes preliminares foram realizados para se promover os ajustes no equipamento, definir uma metodologia experimental e faixa de condições operacionais adequadas ao processamento do feijão verde. Dos ensaios preliminares de secagem que foram realizados, apresenta-se a seguir os resultados considerados mais relevantes.

Inicialmente foi realizada uma secagem no secador de bandeja. Devido às características deste secador (fluxo ascendente do ar que atravessa as bandejas), o desempenho da secagem em cada bandeja é diferente, uma vez que as condições do ar de secagem em cada uma delas, são distintas, em relação tanto às temperaturas como a umidade do ar. As Figuras 5.1 e 5.2 ilustram as curvas de secagem do feijão verde, que apresentam o comportamento clássico descrito na literatura.

As diferenças no comportamento da secagem em relação a cada bandeja encontra-se muito bem ilustrado nas Figuras 5.1 e 5.2, onde se observa a elevada taxa de secagem do feijão na bandeja 1, frente a bandeja 2 e desta última em relação à bandeja 3, principalmente nas duas primeiras horas do processo.

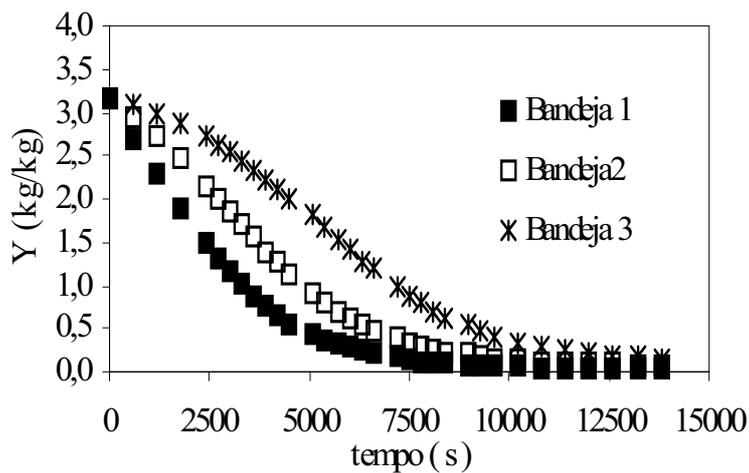


Figura 5.1 – Secagem do feijão verde em secador de bandeja - umidade em função do tempo (Tgi=59,3 °C, v=0,53m/s, m=2,1kg)

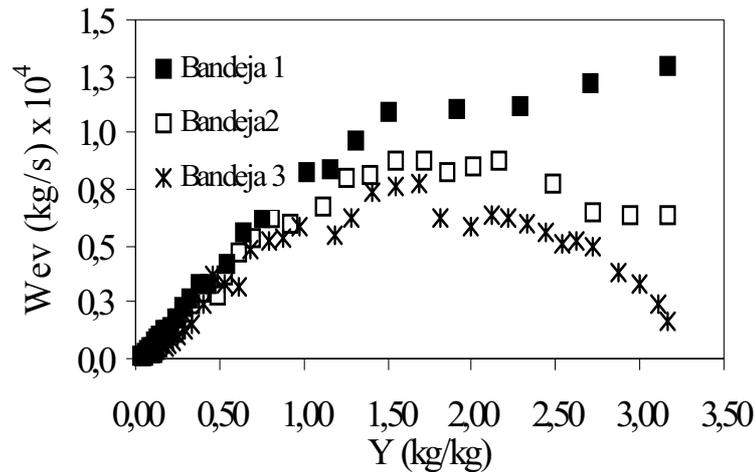


Figura 5.2 - Secagem do feijão verde em secador de bandeja - taxa de secagem em função da umidade ($T_{gi}=59,3^{\circ}C$, $v=0,53m/s$, $m= 2,1kg$)

Uma vez que apenas para a bandeja 1, as condições do ar de secagem são fixas e controladas, o comportamento ilustrado através da curva relativa a esta bandeja, é o que representa de forma mais precisa a cinética de secagem do feijão verde, ilustrada nas Figuras 5.1 e 5.2. Uma análise conjunta destas curvas, indica que o feijão passa inicialmente por um período de aquecimento, que para a bandeja 1 é acompanhado por um pequeno decréscimo na taxa de secagem. Visualiza-se nitidamente um período de taxa constante até atingir uma umidade crítica de cerca de 1,5 (kg H_2O /kg matéria seca) quando se identifica o início do período de taxa decrescente.

Para a bandeja 2, observa-se um comportamento semelhante, porém o aquecimento é acompanhado por um aumento da taxa de secagem, como consequência da diminuição da taxa na bandeja 1. Embora o período de taxa constante não esteja tão bem caracterizado como o observado na bandeja 1, visualmente identifica-se que o mesmo se estende até uma umidade crítica de cerca de 1,55(kg H_2O /kg matéria seca). Na bandeja 3, as oscilações decorrentes das modificações das condições do ar de secagem, comprometem uma análise coerente do comportamento da curva de secagem. Verifica-se, entretanto, que à medida que a secagem prossegue, as curvas tendem a coincidirem, e para tempos longos as taxas tornam-se praticamente às mesmas.

A Figura 5.3 ilustra as medidas das temperaturas de saída do ar que percola as bandejas 1, 2 e 3, respectivamente, ao longo do processo de secagem. Os termopares foram distribuídos ao longo do secador, sendo fixados em posições que tangenciam a superfície do leito de feijão em cada bandeja.

Conforme se observa em todas as curvas, o aumento da temperatura acompanha gradativamente a diminuição da umidade do material, sendo que para todas as bandejas este aumento torna-se mais importante em níveis de umidade próximos a 1,2 (kg H₂O/kg matéria seca). A partir deste nível de umidade, a temperatura retorna a crescer gradualmente com o decréscimo da umidade, observando-se uma nova mudança no comportamento da temperatura quando a umidade do material atinge níveis próximos a 0,4 (kgH₂O/kg matéria.seca) nas bandejas 1 e 2 e 0,8 (kgH₂O/kg matéria seca) na bandeja 3. Embora a temperatura medida não corresponda a temperatura do leito, a evidência deste resultado aponta para a identificação de mais de um período de taxa decrescente, na cinética de secagem do feijão verde. Todavia, para uma interpretação mais consistente sobre a cinética de secagem do feijão verde, torna-se imprescindível efetuar a modelagem de resultados experimentais obtidos em ensaios em diferentes níveis de temperatura e vazão do ar.

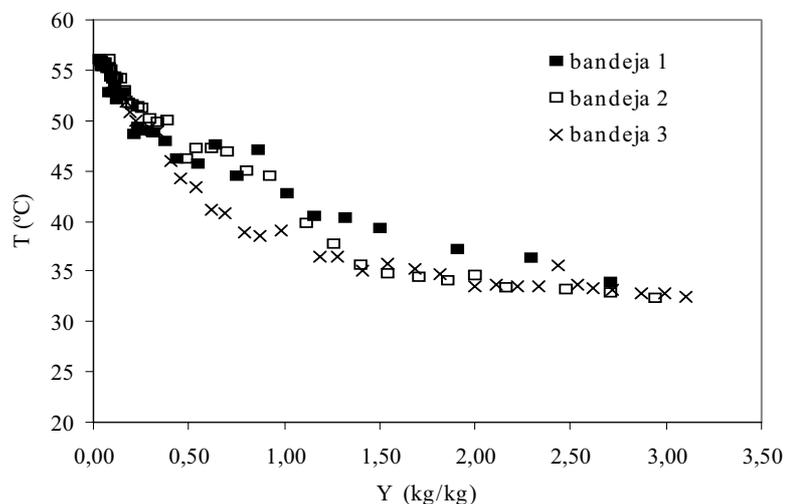


Figura 5.3 - Secagem do feijão verde em secador de bandeja - temperatura em função da umidade - ($T_{gi}=59,3^{\circ}C$, $v=0,53m/s$, $m=2,1kg$)

Na Figura 5.4 são ilustradas as curvas acumulativas da massa de água evaporada em cada bandeja, calculadas a partir das taxas de secagem. As curvas correspondentes a cada

bandeja mostram que a evaporação da maior parte da umidade do feijão ocorre em tempos bastante diferentes para cada bandeja.

De acordo com os cálculos efetuados, verifica-se que 90% da evaporação acontece em 90 minutos na bandeja 1, em 130 minutos na bandeja 2; estendendo-se este tempo na bandeja 3 para 180 minutos. Com base nestes resultados e considerando-se a necessidade de se trabalhar com uma maior uniformidade do produto desidratado, os ensaios de secagem no secador de bandejas passaram a ser realizados alternando-se as posições das bandejas, a cada vez em que se procedia a pesagem das mesmas, de acordo com o procedimento experimental adotado.

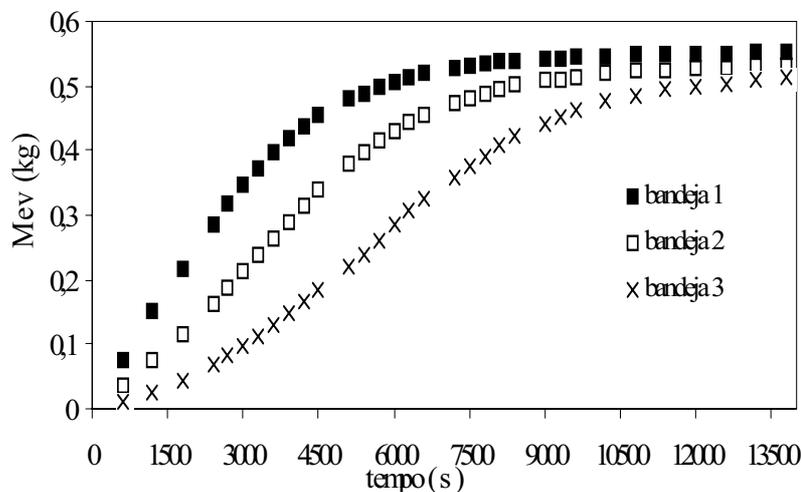


Figura 5.4 - Secagem do feijão verde em secador de bandeja - massa de água evaporada em função do tempo - ($T_{gi}=59,3^{\circ}C$, $v=0,53m/s$, $m= 2,1kg$)

5.1.3 Ensaio combinados

De acordo com a literatura consultada e com os testes preliminares de secagem, a secagem do feijão verde deveria ocorrer de forma combinada, leito fixo/leito de jorro, uma vez que pretendia-se obter grãos desidratados que apresentassem umidade uniforme (o que é promovido pelo jorro), mas sem grandes danos provocados pelo atrito (decorrente do jorro) e por longos períodos de exposição ao aquecimento (comum aos processos de secagem em leito fixo).

Os ensaios combinados leito fixo-leito de jorro, cujas condições operacionais são mostradas na Tabela 5.3 , foram realizados com a finalidade de se definir o teor de umidade inicial do grão a ser processado no jorro. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.5 a 5.9 e na Tabela 5.3.

Embora nestes experimentos tenha sido mantida a alternância na posição das bandejas, ainda se observou, principalmente para o ensaio 1, distintas performances de secagem nas bandejas. O comportamento atípico identificado no ensaio 1 cujas taxas de evaporação foram quase nulas nos 30 minutos iniciais (Figura 5.6) é justificado pelo fato deste ensaio ter sido iniciado com o feijão gelado. É importante se registrar que os dois pontos iniciais destas curvas coincidem para as três bandejas Para cada ensaio, foram estimadas as umidades médias de secagem em função do tempo a partir da média aritmética dos valores obtidos em cada bandeja. As curvas relativas aos valores médios da umidade e às taxas médias de evaporação ao longo dos ensaios 1, 2 e 3, estão ilustradas nas Figuras 5.5 e 5.6.

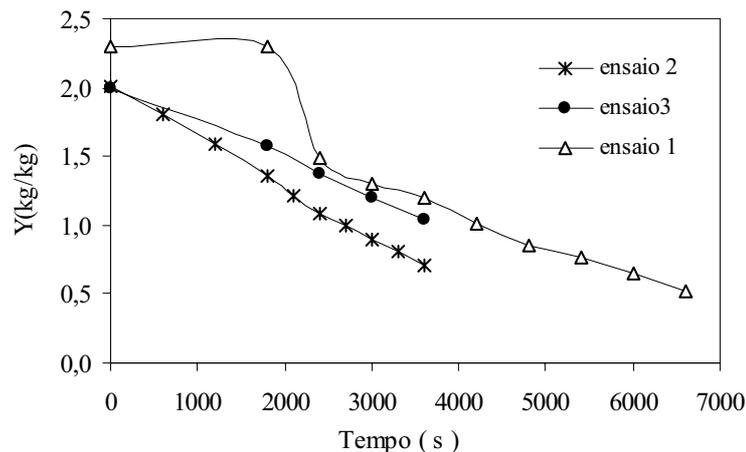


Figura 5.5 - Secagem do feijão verde em secador de bandeja - umidade em função do tempo – Ensaio 1 ($T_{gi}=60,6^{\circ}C$, $v=0,53m/s$, $m=2,5kg$); Ensaio 2 ($T_{gi}=60,7^{\circ}C$, $v=0,53m/s$, $m=2,5kg$); Ensaio 3 ($T_{gi}= 60,7^{\circ}C$. $v=0,53m/s$, $m=2,5kg$)

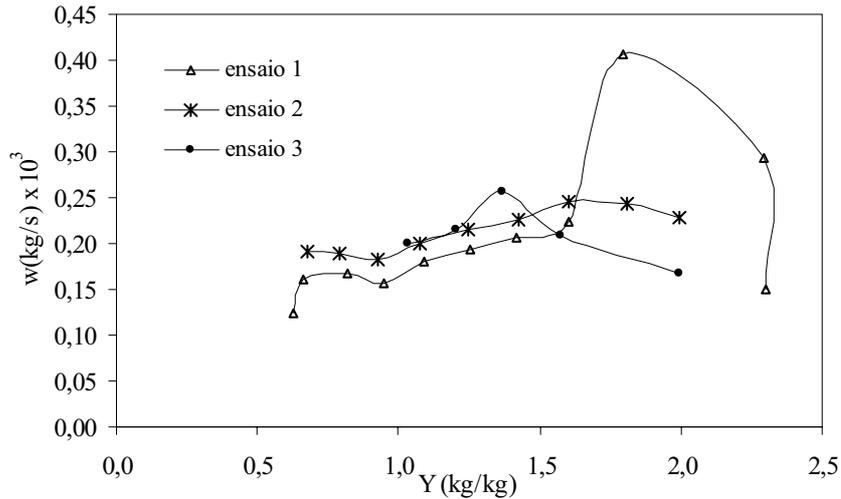
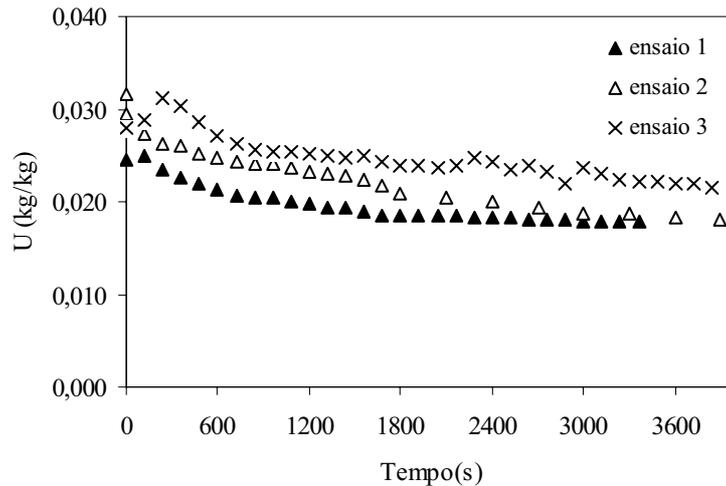


Figura 5.6 - Secagem do feijão verde em secador de bandeja - taxa de secagem em função da umidade - Ensaio 1 ($T_{gi}=60,6^{\circ}C$, $v=0,53m/s$, $m=2,5kg$); Ensaio 2 ($T_{gi}=60,7^{\circ}C$, $v=0,53m/s$, $m=2,5kg$); Ensaio 3 ($T_{gi}= 60,7^{\circ}C$. $v=0,53m/s$, $m=2,5kg$)

A Figura 5.7 mostra os resultados obtidos na secagem do feijão verde em leito de jorro, correspondentes às pré-secagens 1(30%), 2(40%) e 3(50%). O efeito da umidade inicial do grão é bem identificado nas curvas de umidade do ar na saída do secador de leito de jorro em função do tempo. Nesta figura se observa elevados teores de umidade do ar nos 10 primeiros minutos de secagem, o que se traduz em elevadas taxas de evaporação no início do processo. Estas taxas são diretamente proporcionais ao conteúdo de água inicial presente no material processado e tendem a se estabilizar em tempos inversamente proporcionais a umidade inicial do mesmo.



Figuras 5.7 - Secagem do feijão verde em secador leito de jorro - umidade absoluta do ar em função do tempo- Ensaio 1 ($T_{gi}=57,4^{\circ}C$, $v=0,76m/s$, $m=1,37kg$); Ensaio 2 ($T_{gi}=59,0^{\circ}C$, $v=0,89m/s$, $m=1,15kg$) e Ensaio 3 ($T_{gi}=58,5^{\circ}C$, $v=0,89m/s$, $m=1,20kg$).

Todos os ensaios foram conduzidos inicialmente em regime contínuo de aquecimento e fluidodinâmica tendo sido modificado para regime fluidodinâmico intermitente (fixo/jorro) quando se trabalhou com o feijão com umidade inicial de 50%. Com este teor de umidade não foi possível se atingir a pressão máxima necessária para formação do jorro estável, e o leito operou em condições alternadas leito fixo /leito de jorro durante os 10 minutos iniciais do processo. Na curva referente ao ensaio 3, Figura 5.7, identifica-se facilmente a fase inicial de secagem intermitente, leito fixo-leito de jorro.

O ensaio com o feijão com conteúdo médio inicial de água na faixa de 30% não apresentou qualquer problema de instabilidade fluidodinâmica, verificando-se, entretanto uma maior fragilidade dos grãos, identificada pela razoável quantidade de feijões quebrados e pó arrastado no ciclone.

O ensaio 2, cujo conteúdo inicial de água atingido na pré-secagem no secador de bandejas ficou em torno de 40%, também não apresentou qualquer problema de instabilidade fluidodinâmica, observando-se ainda uma melhor resistência do grão à quebra provocada pelo atrito e choque das partículas no leito de jorro.

Um resumo das condições operacionais e dos resultados obtidos nos ensaios combinados Leito fixo/ Leito de Jorro são mostrados na Tabela 5.3. A carga de feijão

processada em cada ensaio foi cerca de 2,5 kg no leito fixo e 1,25 kg no leito de jorro (média aproximada).

Tabela 5.3 - Condições operacionais e resultados obtidos nos ensaios de secagem combinada leito fixo /leito de jorro

Ensaio	Secador de Bandeja					Secador de Leito de Jorro			
	X(%)	v(m/s)	t (min)	Tgi(°C)	Xb	v(m/s)	t(min)	Tgi(°C)	Xj(%)
1	69,7	0,53	130	60,6	34,6	0,76	58	57,4	17,3
2	66,6	0,53	80	60,4	40,7	0,89	90	59,0	-
3	66,6	0,53	60	60,1	52,4	0,89	64	58,5	26,2

De acordo com os resultados mostrados e discutidos nos parágrafos precedentes, para os três ensaios de secagem combinada leito fixo-leito de jorro, o que apresentou os melhores resultados foi o ensaio 2, com pré-secagem em leito fixo até um nível de umidade de 40%. Neste ensaio verificou-se um bom desempenho em relação ao processo, com preservação da integridade do grão.

Os resultados do ensaio 2 na forma combinada leito fixo/leito de jorro, são mostrados nas Figuras 5.8 e 5.9. As taxas de evaporação no leito de jorro foram calculadas, a partir dos dados de umidade do ar na saída do secador, de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 4.

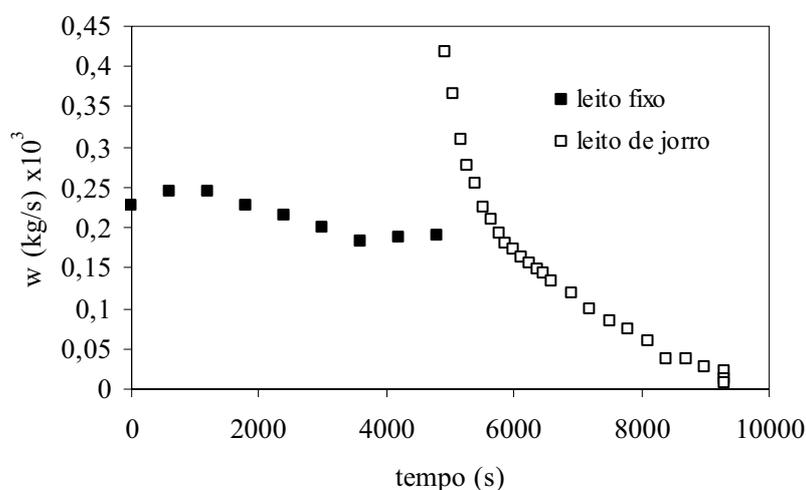


Figura 5.8 - Secagem combinada do feijão verde em secador de bandeja e em leito de jorro - taxa de secagem em função do tempo para o ensaio 2. Secador de bandeja ($T_{gi}=60,4^{\circ}C$, $v=0,53m/s$, $m=2,5kg$) Leito de Jorro ($T_{gi}=59,0^{\circ}C$, $v=0,89m/s$, $m=1,15kg$)

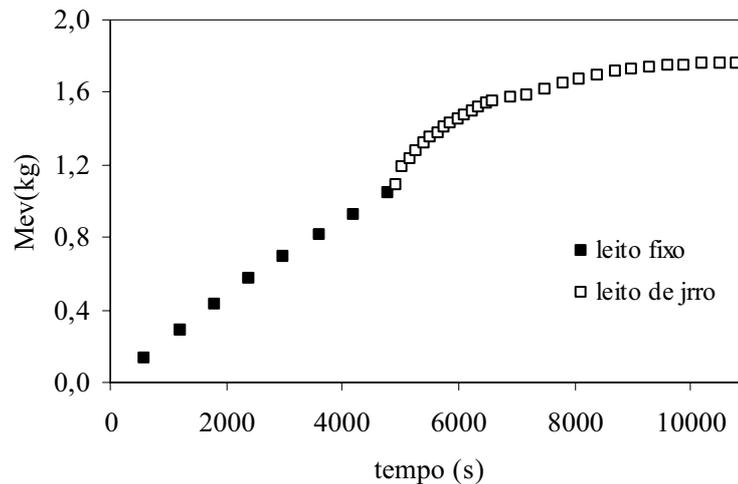


Figura 5.9 - Secagem combinada do feijão verde em secador de bandeja e em leito de jorro - massa de água evaporada em função do tempo para o ensaio 2. Secador de bandeja ($T_{gi}=60,4^{\circ}C$, $v=0,53m/s$, $m=2,5kg$) Leito de Jorro ($T_{gi}=59,0^{\circ}C$, $v=0,89m/s$, $m=1,15kg$)

Nestas figuras fica evidenciado o importante efeito da secagem combinada sobre o desempenho do processo como um todo. A rápida secagem do material no início do processo no jorro promove um aumento instantâneo da taxa de secagem que no leito fixo já se encontra em fase decrescente. Desta forma minimiza-se o tempo total de secagem para se atingir o teor de umidade desejado. O menor tempo de exposição ao aquecimento evita o comprometimento da qualidade do produto no que se refere às perdas nutricionais dos alimentos termosensíveis, principalmente os de origem vegetal tais como frutas, verduras e hortaliças.

5.2 Resultados referentes aos ensaios realizados de acordo com o planejamento experimental.

5.2.1 Determinações físico-químicas e caracterização física dos grãos

Os ensaios de secagem em leito de jorro foram realizados de acordo com um planejamento experimental do tipo fatorial 2^2 , com quatro ensaios, em dois níveis de velocidade e temperatura do ar, e três repetições no ponto central. A matriz experimental baseada no planejamento fatorial encontra-se ilustrada na Tabela 5.4. Os ensaios em destaque foram repetidos. Para os ensaios de pré-secagem em leito fixo foram fixadas condições operacionais de temperatura ($60^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$), carga de feijão (2,1kg) e velocidade do ar ($0,53 \pm 0.02$ m/s).

Tabela 5.4 - Matriz experimental

Ensaio/ Lote	v (m/s)	Tgi ($^{\circ}\text{C}$)
1/1	0,77	60
2/4	0,77	70
3/1+2	0,86	60
4/3	0,86	70
5/3	0,82	65
6/4	0,82	65
7/3	0,82	65

Os resultados referentes a umidade e caracterização físico-química do feijão *in natura* e desidratado no leito de jorro são mostrados na Tabela 5.5, onde se constata que o feijão *in natura* oriundo de diferentes lotes se manteve uniforme em relação à composição, conforme já se havia observado nos ensaios preliminares. Este resultado é decorrente dos cuidados mantidos em relação a uniformidade das condições de maturação do feijão processado. O feijão desidratado apresentou o mesmo pH do *in natura*, maior acidez e concentração de sólidos solúveis, conforme era previsto e constatado nas determinações físico-químicas realizadas nos ensaios preliminares.

Tabela 5.5- Caracterização físico-química do feijão verde *in natura* e desidratado no leito de jorro

Ensaio /Lote	pH		Acidez (% ac. cítrico)		X (%)		Sólidos Solúveis (° Brix)	
	<i>in natura</i> 1	desidratado	<i>in natura</i>	desidratado	<i>in natura</i>	desidratado	<i>in natura</i>	desidratado
1/1	6,35	6,37	0,16	0,23	74,42	20,36	10,17	-
2/4	6,90	6,98	0,14	0,31	69,70	15,44	10,90	12,5
3/(1+2)	6,49	6,83	0,13	0,38	75,00	19,29	10,90	11,6
4/3	6,54	6,81	0,12	0,47	73,56	16,89	9,00	13,9
5/3	6,54	6,81	0,12	0,30	73,56	19,61	9,00	14,2
6/4	6,90	6,99	0,14	0,38	69,70	18,01	10,90	12,3
7/3	6,54	6,90	0,12	0,39	73,56	17,25	9,0	14,6
2*/1	6,5	6,68	0,16	0,18	74,42	9,16	10,17	14,40
6*/2	6,63	6,83	0,11	0,37	75,58	20,38	11,6	14,2

2* - não considerado no planejamento devido a ausência de dados relativos a quebra do material

6* - não considerado no planejamento devido as condições psicrométricas do ar de secagem

Os dados relativos à caracterização física do feijão *in natura*, pré-seco em leito fixo e desidratado no leito de jorro, são apresentados nas Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8. Na Tabela 5.6 são mostrados dados do diâmetro do feijão, medidos pelo volume de líquido deslocado e os dados da densidade, calculadas a partir da picnometria líquida, conforme metodologia descrita no Capítulo 4.

Tabela 5.6 – Caracterização física dos grãos *in natura*, pré-seco e desidratado no leito de jorro – diâmetro e densidade do grão.

Ensaio/Lote	<i>In Natura</i>		Pré-seco		Desidratado
	$d_p \times 10^2$ (m)	ρ_p (kg/m ³)	$d_p \times 10^2$ (m)	ρ_p (kg/m ³)	$d_p \times 10^2$ (m)
1/1	0,80	980	0,68	857	0,62
2/4	0,76	975	0,68	800	0,62

3/(1+2)	0,80	980	0,70	799	0,69
4/3	0,77	970	0,66	827	0,56
5/3	0,77	970	0,66	829	0,59
6/4	0,71	975	-	-	-
7/3	0,77	970	0,61	828	0,54
2*/1	0,80	980	0,72	784	0,63
6*/2	0,80	970	0,68	809	0,57

2* - não considerado no planejamento devido a ausência de dados relativos a quebra do material

6* - não considerado no planejamento devido as condições psicrométricas do ar de secagem

Com relação a densidade, os resultados relativos aos grãos desidratados no leito de jorro mostraram-se inconsistentes, devido a inadequação da técnica de medida empregada, (picnometria em fase líquida). Devido a baixa densidade dos grãos desidratados, parte dos feijões não ficavam imersos no álcool etílico, comprometendo a aferição do volume da amostra água-feijão no picnômetro. Na Tabela 5.6 são apresentados conjuntamente com os dados das densidades, dados de diâmetros do feijão *in natura*, referentes a diferentes lotes e do feijão pré-seco e desidratado. Observa-se a uniformidade do feijão *in natura* com respeito a densidade e ao diâmetro e o efeito da umidade sobre estas, ilustrado também na Figura 5.10, que evidencia a diminuição da densidade e o encolhimento do grão à medida que a secagem prossegue.

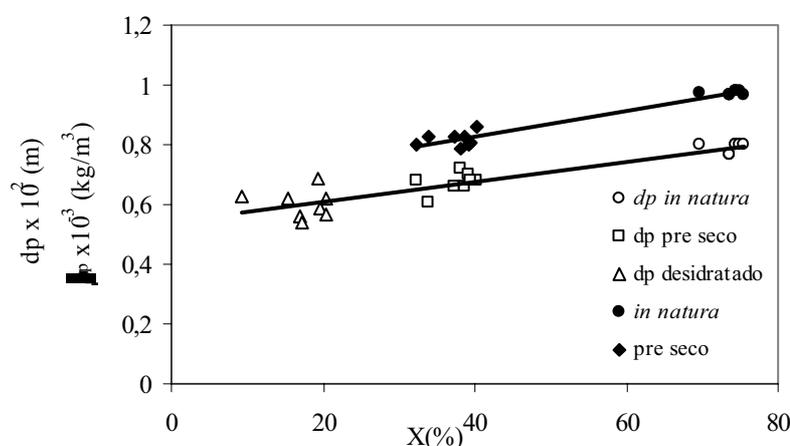


Figura 5.10 - Efeito da umidade (base úmida) sobre o diâmetro e densidade do grão.

Tabela 5.7- Caracterização física dos grãos *in natura* , pré-seco e desidratado no leito de jorro - Ângulo de repouso do grão.

Ensaio/ Lote	<i>In Natura</i>		Pré-seco		Desidratado	
	X(%)	θ	Xb(%)	θ	Xj(%)	θ
1/1	74,42	37,9	40,25	31,7	20,36	29
2/4	69,70	41,9	32,45	30,4	15,44	24,6
3/(1+2)	75,00	41,9	39,19	30,2	19,29	23,6
4/3	73,56	40,3	37,34	31,8	16,89	29,1
5/3	73,56	40,3	38,60	31,6	19,61	26,7
6/4	69,7	41,9	34,06	31,2	18,01	23,1
7/3	73,56	40,3	33,94	31,1	17,25	23,9
2*/1	74,42	37,9	38,20	34,5	9,16	25
6*/2	75,58	45,8	39,46	30,7	20,31	25,2

Na Tabela 5.7 são mostrados os dados do ângulo de repouso dos grãos desidratados, dos grãos pré-secos e dos grãos in-natura, nos diversos níveis de umidade. Observa-se um importante efeito da umidade do grão no ângulo de repouso, conforme fica evidenciado na Figura 5.11. Este resultado mostra que a escoabilidade do grão aumenta com a diminuição da umidade. Indica ainda que a secagem deve ocorrer em taxa constante, visto que a variação na escoabilidade é um indicativo de presença de água de superfície.

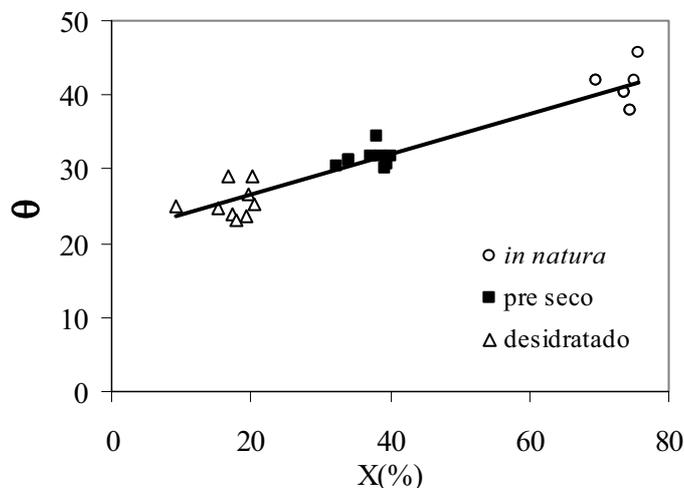


Figura 5.11 – Efeito da umidade (base úmida) sobre o ângulo de repouso

A esfericidade dos grãos, conforme se observa na Tabela 5.8 e Figura 5.12, não se altera com o processo de secagem. Para os três níveis de umidade, apresenta valores que oscilam em torno de uma esfericidade média de 0,6, com um desvio padrão de $\pm 0,04$. O desvio padrão médio, considerando-se as medidas de esfericidade dos grãos em cada nível de umidade foi de $\pm 0,05$, indicando que as variações observadas no gráfico ilustrado na Figura 12 são inerentes do método de medidas. Portanto, na secagem do feijão há preservação da forma do grão.

Tabela 5.8- Caracterização física dos grãos *in natura* , pré-seco e desidratado no leito de jorro – Esfericidade do grão

Ensaio/ Lote	<i>In Natura</i>		Pré-seco		Desidratado	
	X(%)	ϕ	Xb(%)	ϕ	Xj(%)	ϕ
1/1	74,42	0,58	40,25	0,61	20,36	0,59
2/4	69,70	0,57	32,45	0,55	15,44	0,54
3/(1+2)	75,00	0,59	39,19	0,61	19,29	0,57
4/3	73,56	0,60	37,34	0,65	16,89	0,57
5/3	73,56	0,60	38,60	0,55	19,61	0,58
6/4	69,7	0,57	34,06	0,53	18,01	0,58
7/3	73,56	0,60	33,94	0,66	17,25	0,60
2*/1	74,42	0,58	38,20	0,59	9,16	0,65
6*/2	75,58	0,59	39,46	0,53	20,31	0,66

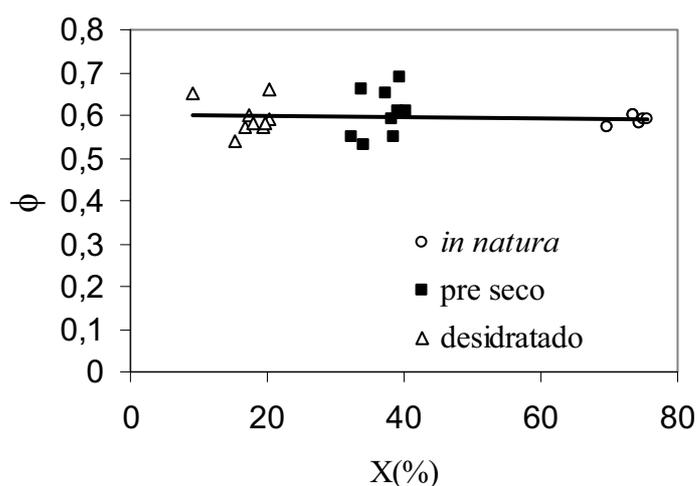


Figura 5.12 – Efeito da umidade (base úmida) sobre a esfericidade do grão de feijão

5.2.2- Encolhimento do grão

Conforme a metodologia descrita no Capítulo 4, foi realizado um ensaio em estufa, acompanhando-se o encolhimento do grão com a diminuição da umidade. A partir dos resultados obtidos neste ensaio foi possível ajustar um modelo linear aos dados do encolhimento em função da umidade do feijão em base seca.

Os dados relativos ao encolhimento dos grãos em diversos níveis de umidade são mostrados na Figura 5.13. O comportamento linear de dp/dp_o em função da umidade do grão em base seca, cujo coeficiente de correlação foi da ordem de 99%, permitiu a estimativa do diâmetro do grão isento de umidade, dp_{iu} , cujo valor (0,55cm), foi determinado a partir do coeficiente linear da reta ajustada aos dados experimentais.

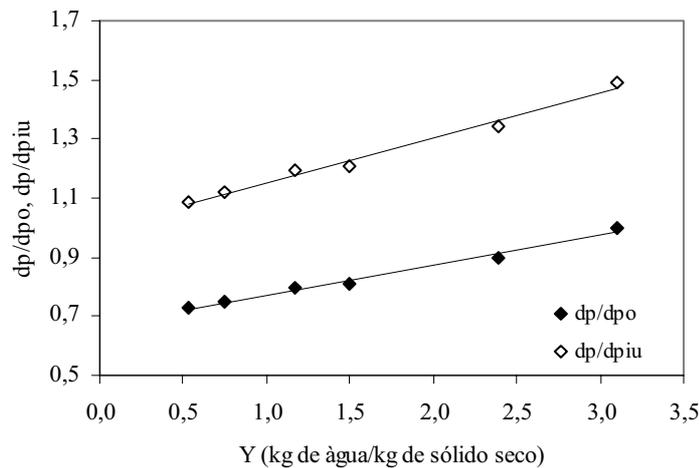


Figura 5.13 - Encolhimento do grão em função da umidade em base seca. Estimativa do coeficiente de encolhimento. Secagem na estufa ($T=75^{\circ}C$ e $v=0,2m/s$)

A reta ajustada aos dados de dp/dp_{iu} em função da umidade em base seca, apresentou um coeficiente angular de 0,155, que corresponde ao coeficiente de encolhimento do feijão, conforme modelo de encolhimento apresentado no Capítulo 4, Equação 34.

Aplicou-se o mesmo tratamento matemático aos dados experimentais dos diâmetros dos grãos relativos à pré-secagem em leito fixo e à secagem no leito de jorro, considerando-se todos os ensaios, e os feijões oriundos dos diferentes lotes. Para a modelagem foram considerados os diâmetros medidos pela técnica do volume de líquido deslocado. As Figuras 5.14 e 5.15 exibem os dados relativos ao encolhimento dos grãos em função da umidade (em base seca), para os ensaios em leito fixo e no leito de jorro, respectivamente. Para o leito fixo o diâmetro inicial foi considerado o diâmetro do feijão *in natura*, e para o leito de jorro o diâmetro do feijão pré-seco. O comportamento linear de dp/dp_o em função da umidade do grão em base seca, apresentou coeficiente de correlação de 85% e estimativa de $dp_{iu}=0,63$

$\times 10^{-2}$ m para o leito fixo e coeficiente de correlação de 83% e $dp_{iu} = 0,51 \times 10^{-2}$ m para o leito de jorro.

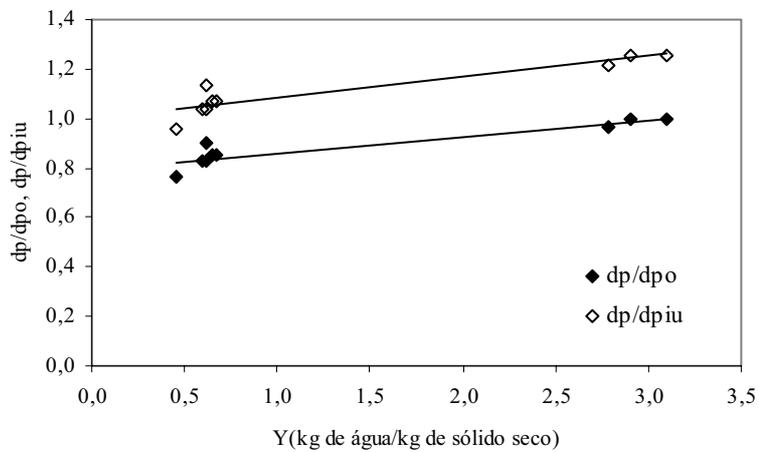


Figura 5.14- Encolhimento do grão em função da umidade em base seca. Estimativa do coeficiente de encolhimento. Secagem em leito fixo ($T=60^{\circ}\text{C}$ e $v=0,53\text{m/s}$)

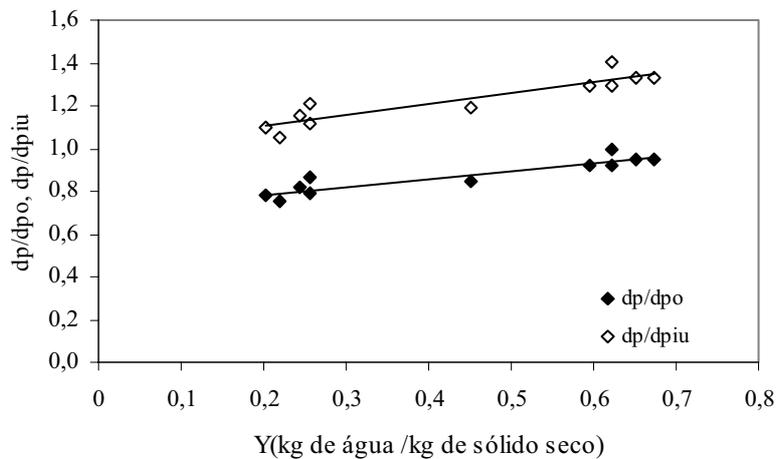


Figura 5.15- Encolhimento do grão em função da umidade em base seca. Estimativa do coeficiente de encolhimento. Secagem em leito de jorro (Condições operacionais conforme o planejamento experimental)

As retas ajustadas aos dados de $dp/dpiu$ em função da umidade em base seca, conforme ilustra as Figuras 5.14 e 5.15, apresentam coeficientes angulares de 0,084 e 0,51,

correspondentes aos coeficientes de encolhimento do feijão, processado no leito fixo e no leito de jorro, respectivamente. A seguir são mostrados na Tabela 5.9 as equações das retas e seus respectivos coeficientes de correlação para a análise do encolhimento dos três secadores (estufa, bandeja e jorro).

Tabela 5.9 - Equações e coeficientes de correlação para a análise do encolhimento do feijão verde em estufa , secador de bandeja e leito de jorro

Tipo de Secador	Equação	coeficiente de correlação
Estufa	$dp/dpiu=0,1525Y+0,9998$	$R^2=0,9862$
	$dp/dpo=0,1022Y+0,6699$	$R^2=0,9862$
Bandeja	$dp/dpiu=0,0839Y+1$	$R^2=0,8454$
	$dp/dpo=0,0667Y+0,7942$	$R^2=0,8454$
Jorro	$dp/dpiu=0,5143Y+1$	$R^2=0,8303$
	$dp/dpo=0,3655Y+0,7107$	$R^2=0,8303$

A partir dos modelos ajustados estimou-se o diâmetro do feijão nos diversos níveis de umidade, comparando-se os dados teóricos preditos pelos modelos, com os dados experimentais da estufa, do secador de bandeja e do leito de jorro. Conforme ilustra a Figura 5.16, para o ensaio de secagem na estufa, há uma excelente concordância entre os dados experimentais, e os preditos pelo modelo, como era esperado pelo coeficiente de correlação obtido.

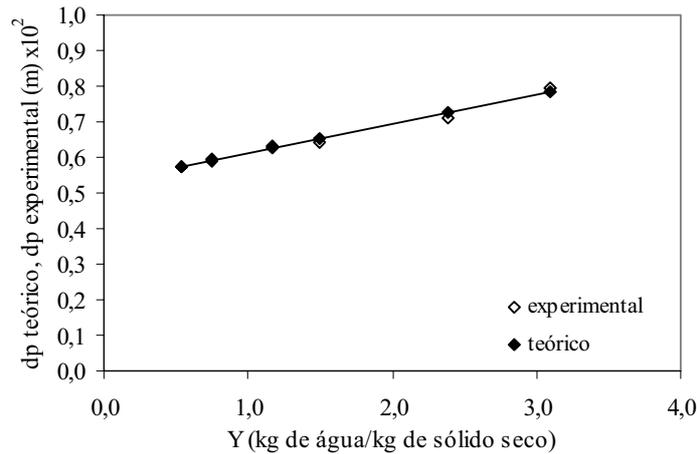


Figura 5.16 – Comparação entre os dados experimentais na estufa e os preditos pelo modelo – diâmetro do feijão em função da umidade

Para os ensaios no leito de jorro e no secador de leito fixo, os dados preditos pelos modelos concordam com os experimentais de forma satisfatória, como se observa nas Figuras 5.17 e 5.18, respectivamente. Os desvios observados podem ser justificados pelo fato dos resultados referentes à pré-secagem em leito fixo e leito de jorro terem sido obtidos em distintos ensaios, com feijões oriundos de três lotes diferentes.

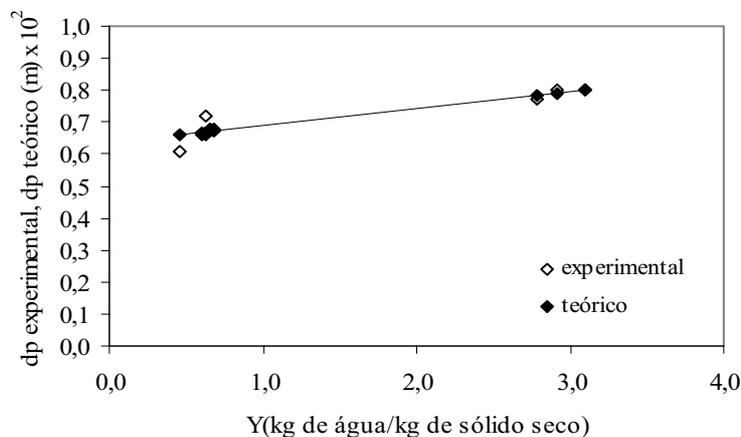


Figura 5.17 – Comparação entre os dados experimentais no secador de bandeja e os preditos pelo modelo – diâmetro do feijão em função da umidade

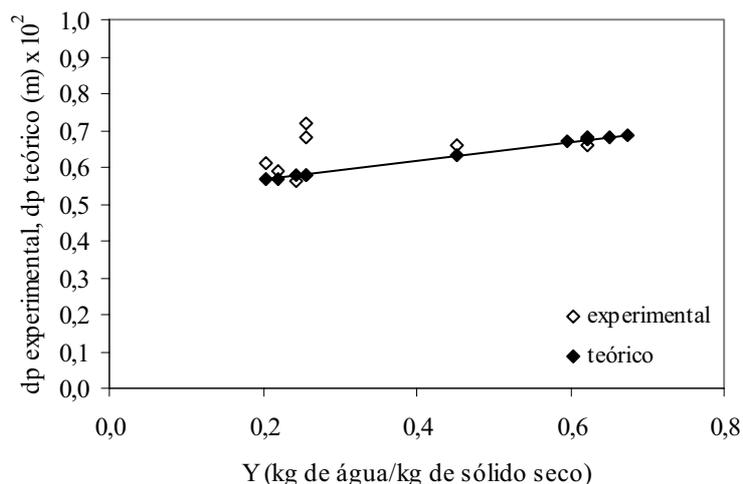


Figura 5.18 – Comparação entre os dados experimentais no leito de jorro e os preditos pelo modelo – diâmetro do feijão em função da umidade

Com relação ao leito de jorro, os ensaios de secagem foram realizados em diferentes condições de temperatura e vazão do ar. O coeficiente de encolhimento calculado a partir do modelo linear ajustado, da ordem de 0,5, é 6 vezes superior ao coeficiente estimado para o leito fixo, verificando-se assim uma importante interferência da fluidodinâmica do leito de jorro sobre o encolhimento do grão. É importante se registrar que o efeito da fluidodinâmica sobre o encolhimento, apesar deste parâmetro está relacionado com a porosidade e estrutura do material, se deve às mudanças nas características da superfície do material provocadas pela quebra e perda da película que envolve o grão, com exposição da água de superfície. Tanto o descascamento como a quebra dos grãos, devido ao atrito no jorro, podem interferir no processo de secagem e conseqüentemente, no encolhimento. O coeficiente de encolhimento do feijão processado na estufa (0,155), também foi superior ao do feijão processado no secador de leito fixo (0,084), o que pode ser atribuído a heterogeneidade das condições de secagem, tanto no que se refere ao material (feijões de lotes diferentes) como a temperatura (75°C na estufa e 60°C no secador), distribuição do ar e às características do leito (camada fina na estufa e camada espessa no secador).

A cinética de quebra para quatro ensaios distintos no leito de jorro são apresentados na Figura 5.19. Nesta figura observa-se que a quebra dos grãos aumenta no decorrer dos ensaios. Inicialmente a quebra se refere ao descascamento dos grãos, evidenciada pela pequena

quantidade de material recolhido no ciclone. Com o descascamento ocorrem as mudanças no processo de secagem, bastante discutidas nos parágrafos anteriores. À medida que a secagem prossegue, as partículas tornam-se mais leves intensificando-se o movimento do jorro, bastante evidenciado pela diminuição da queda de pressão e elevação da fonte. As elevadas taxas de circulação de sólidas, caracterizadas pelo aumento da velocidade de escoamento das partículas na parede da coluna, aumentam o atrito entre os grãos, favorecendo a quebra dos mesmos. Conforme se observa na Figura 5.19, para o mesmo tempo de processamento a quebra dos grãos se verifica com maior intensidade nos ensaios realizados com maior vazão do ar.

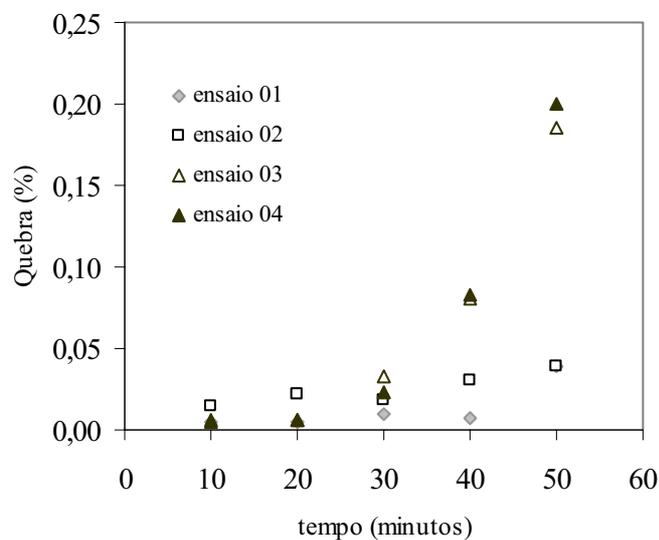


Figura 5.19 – Cinética da quebra do feijão 1 ($v=0,77\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 2 ($v=0,77\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), 3 ($v=0,86\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 4 ($v=0,86\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$),

5.2.3 - Curvas Hidrodinâmicas

A obtenção das curvas hidrodinâmicas se refere às medidas de queda de pressão em função da vazão do ar, para o leito de partículas. A apresentação e discussão das curvas hidrodinâmicas obtidas para o leito de feijão, nas condições citadas no Capítulo 4, torna-se essencial para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, tanto no que se refere à produção de pó (quebra dos grãos), como a estabilidade do leito.

As curvas características do leito para diferentes cargas de feijão apresentam desvios em relação ao comportamento clássico descrito na literatura. Os desvios poderiam ser justificados pelas respectivas mudanças nas propriedades físicas dos grãos e características do leito ao longo dos ensaios fluidodinâmicos, decorrentes do processo simultâneo de secagem, conforme pode se observar nas Tabelas 5.10 e 5.11.

Tabela 5.10 – Características do leito do feijão verde antes e após a obtenção das curvas hidrodinâmicas

X(%)		m(kg)		H(m)		$\rho_l(\text{kg/m}^3)$	
inicial	final	inicial	Final	inicial	final	inicial	Final
40,25	24,4	1,00	0,705	0,145	0,121	601,59	630,3
40,25	27,67	1,25	0,925	0,169	0,143	550,03	574,8
40,25	25,08	1,50	1,09	0,185	0,151	559,78	597,5

Tabela 5.11 – Características dos grãos do feijão verde antes e após a obtenção das curvas hidrodinâmicas

m (kg)		dp(m)		$\rho_p(\text{kg/m}^3)$		θ		Ar	
inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final
1,00	0,705	$6,8 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^{-3}$	857,0	897,9	31,7	29	$8,117 \times 10^6$	$7,428 \times 10^6$
1,25	0,925	$6,8 \times 10^{-3}$	$6,6 \times 10^{-3}$	857,0	895,3	31,7	29	$8,117 \times 10^6$	$7,754 \times 10^6$
1,50	1,09	$6,8 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^{-3}$	857,0	915,0	31,7	29	$8,117 \times 10^6$	$7,570 \times 10^6$

As variáveis fluidodinâmicas do leito de feijão com umidade inicial de 40%, para três cargas de grãos, foram obtidas a partir das curvas características, ilustradas na Figura 5.20. Verifica-se que em relação ao comportamento da velocidade de jorro mínimo os resultados são coerentes com a literatura, observando-se que esta variável aumenta com a carga processada. Já em relação a queda de pressão de jorro estável, o aumento da carga não proporcionou o aumento esperado da queda de pressão em condições de jorro estável.

As curvas características do leito de jorro obtidas no sentido da vazão decrescente, para um processo em que as partículas têm propriedades constantes, são identificadas pela

queda de pressão constante nas condições de jorro estável até que a velocidade relativa às condições de mínimo jorro é alcançada.

Em condições de secagem simultânea, a exposição às condições de jorro modifica as características do leito, devido tanto a diminuição da carga, decorrente da perda de água como às importantes modificações nas propriedades físicas dos grãos, tanto em relação a densidade como ao tamanho dos mesmos, devido ao encolhimento, Tabelas 5.10 e 5.11, respectivamente. Estas modificações promovem diferentes condições de estabilidade, caracterizadas pela uniformidade na queda de pressão, em distintos patamares, antes de alcançar as condições de jorro mínimo. Conforme se pode observar na Figura 5.20, este comportamento é evidenciado nas curvas características relativas às cargas de 1,0 e 1,25 kg de feijão. No final do ensaio relativo a obtenção da curva característica para a carga inicial de 1,0 kg de feijão, o leito estático ocupava apenas a parte cônica da coluna.

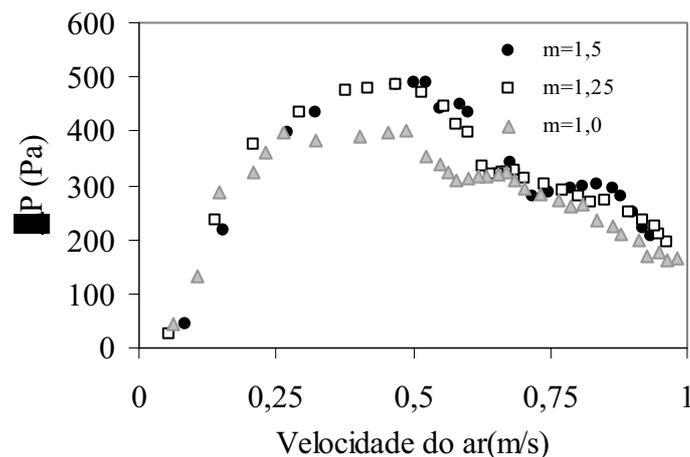


Figura 5.20 - Curvas hidrodinâmicas do leito de jorro para diferentes cargas de feijão verde pré-desidratados a 40% de umidade.

Com base nos dados apresentados nas Tabelas 5.10 e 5.11 e nas características geométricas da coluna, foram estimadas as variáveis fluidodinâmicas velocidade de jorro mínimo e queda de pressão de jorro estável a partir de uma série de correlações da literatura. Para efeito de comparação, foram estimados valores preditos pelas correlações para o leito na condição inicial e na condição final atingida ao se encerrar o ensaio.

Na Tabela 5.12 observa-se que a correlação de ABDELRAZEK (1969) prevê valores para a velocidade de jorro mínimo inferiores aos valores experimentais. Os desvios entre os valores preditos e os experimentais, para as três cargas de feijão foram de 33% em média. As velocidades de jorro mínimo preditas pela correlação de MATHUR – GISHLER (1955), são superiores às obtidas experimentalmente, com desvios médios da ordem de 54,5%. Observa-se que os valores preditos por ambos os modelos são ligeiramente superiores (10% em média) para os leitos nas condições iniciais, sendo mais acentuadas para as maiores cargas. Com relação à carga inicial de 1kg, para a condição atingida no final do ensaio, foram utilizadas as correlações de TSVIK (1967) e NIKOLAEV E GOLUBEV (1964), para predição da velocidade de jorro mínimo em leitos cônicos, Tabela 5.13. Os valores preditos pelas respectivas correlações são inferiores ao valor experimental, apresentando desvios de 35,87% e 98,44%. É importante se registrar que as correlações para o leito cônico prevêm velocidades de jorro mínimo inferiores às preditas por MATHUR E GISHLER (1955), para o leito cônico-cilindrico.

Embora os valores preditos pelas correlações apresentem importantes desvios em relação aos dados experimentais, os resultados mostram que para a faixa de condições operacionais em que foram conduzidos os ensaios fluidodinâmicos à velocidade de jorro mínimo não sofreu grande influência do processo de secagem. Justifica-se portanto, a coerência do comportamento da velocidade de jorro mínimo em função da carga de feijão processada.

Tabela 5.12 – Resultados Experimentais da velocidade de jorro mínimo – Comparação com previsões da literatura para leito cônico cilíndrico

m (kg)	tempo (min)	Vjm(m/s) Experimental	MATHUR-GISHLER (1955)		ABDELRAZEK (1969)	
			Vjm(m/s)	desvio(%)	Vjm(m/s)	desvio(%)
1	0	0,5787	0,9737	68,26	0,4159	28,13
	31	0,6404	0,9593	49,80	0,4076	36,35
1,25	0	0,7175	1,0998	53,28	0,4884	31,93
	39	0,7175	0,9815	36,79	0,4203	41,42

Tabela 5.13 – Resultados Experimentais da velocidade de jorro mínimo – Comparação com previsões da literatura para leito cônico

m (kg)	tempo (min)	Vjm(m/s) Experimental	TSVIK (1967)		NIKOLAEV E GOLUBEV (1964)	
			Vjm(m/s)	desvio(%)	Vjm(m/s)	desvio(%)
1	28	0,5787	0,3711	35,87	0,009	98,44

Os resultados experimentais relativos a queda de pressão de jorro estável, bem como os preditos pelas correlações da literatura, são apresentados nas Tabelas 5.14 e 5.15. De acordo com os dados apresentados os desvios dos valores preditos pela correlação de MANURUNG (1964) em relação aos experimentais são da ordem de 70% para as cargas de 1 e 1,25 kg e 110% para a carga de 1,5 kg. As quedas de pressão de jorro estável preditas são superiores aos valores experimentais obtidos, observando-se uma diminuição de cerca de 10% na queda de pressão estimada a partir das condições finais atingidas no leito.

A correlação de MALEK(1965) prevê valores bastante próximos dos experimentais com desvio mínimo de 0,36% para a carga de 1,25 kg, nas condições iniciais e máximo de 31,29 para a carga de 1,5kg também nas condições iniciais do leito. Excetuando-se o valor estimado para a carga de 1,5 kg de feijão, todos os valores preditos por esta correlação são inferiores aos valores experimentais obtidos. Constata-se uma importante influência do processo de secagem sobre a queda de pressão de jorro estável, cujos valores preditos para o leito mais úmido são cerca de 27% superiores aos preditos para o leito no final do ensaio. Os desvios dos valores preditos pela correlação de Nascimento em relação aos experimentais são da mesma ordem de grandeza dos preditos pela correlação de MANURUNG (1964), verificando-se entretanto que não há praticamente influência do processo de secagem sobre a queda de pressão estimada por esta correlação.

Para o leito cônico a correlação de MUJUMDAR (1981) prevê uma queda de pressão 50,34% inferior ao valor experimental obtido, enquanto a correlação de MUKHLENOV E GORSHTEIN (1981) prevê um valor 71% superior ao experimental. O valor predito por MUJUMDAR (1985) para a queda de pressão no leito de feijão após evaporação de parte da água, é inferior a predita pelos demais autores para o leito úmido. Ainda para a carga de 1kg, comparando-se os resultados preditos por MANURUNG (1964) com os preditos por

MUKHLENOV E GORSHTEIN (1965) não haveria influência do processo de secagem sobre a queda de pressão de jorro estável.

Os resultados apresentados e discutidos com respeito a queda de pressão de jorro estável, são controvertidos em relação às predições das correlações, o que levaria a uma discussão mais aprofundada sobre o efeito da secagem dos grãos sobre esta variável. Em relação à correlação de MALECK (1965), que prevê apenas a influência da carga sobre o ΔP , os resultados obtidos são mais coerentes. Com respeito ao Número de Arquimedes(Ar) calculado a partir das propriedades dos grãos antes e após os ensaios, o baixo valor de Ar estimado para o leito de 1,5 kg ao final do ensaio, poderia justificar a baixa queda de pressão obtida nas condições de jorro estável.

Tabela 5.14 - Resultados Experimentais da queda de pressão de jorro mínimo – Comparação com previsões da literatura para leitos cônico cilíndrico

m (kg)	tempo (min)	ΔP_{jm} (Pa) Experimental	MANURUNG (1964)		MALECK (1965)		NASCIMENTO (1976)	
			ΔP_{jm} (Pa)	Desvio (%)	ΔP_{jm} (Pa)	Desvio (%)	ΔP_{jm} (Pa)	Desvio (%)
1	0	315,54	528,17	67,39	257,48	18,40	491,2	55,67
	0	323,03	595,13	84,23	321,85	0,36	555,64	72,01
1,25	31	323,03	529,61	63,95	238,24	26,24	550,8	70,51
1,5	0	294,17	683,56	132,37	386,22	31,29	620,08	110,79
	39	294,17	594,42	102,07	280,65	4,59	624,16	112,18

Tabela 5.15 - Resultados Experimentais da queda de pressão de jorro mínimo – Comparação com previsões da literatura para leito cônico

m (kg)	tempo (min)	ΔP_{jm} (Pa) Experimental	MUJUNDAR (1981)		MUKHLENOV E GORSHTEIN (1965)	
			ΔP_{jm} (Pa)	desvio(%)	ΔP_{jm} (Pa)	desvio(%)
1	28	315,54	156,7	50,34	539,64	71,02

Com base nas condições de jorro mínimo e no comportamento fluidodinâmico do leito para as três cargas de feijão e considerando-se a faixa de vazão de ar do soprador para as condições de perda de carga no leito, foram definidos os níveis máximo e mínimo de vazão

(velocidade do ar) a serem fixados no planejamento experimental, fixando-se a carga de feijão a ser processada nestes ensaios em 1,25 kg.

5.2.4 -Análise das taxas de evaporação no leito de jorro

Com os dados de umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar na saída do secador, obteve-se, de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 4, os dados de umidade absoluta, a partir dos quais foram construídas as curvas de secagem do feijão no leito de jorro. As curvas de secagem dos ensaios realizados e repetidos nas condições intermediárias de temperatura e velocidade (ponto central), mostradas nas Figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24 ilustram o comportamento de secagem do feijão verde, no leito de jorro.

Os ensaios 5, 6 e 7, relativos a repetição no ponto central, são inicialmente analisados quanto a reprodutibilidade.

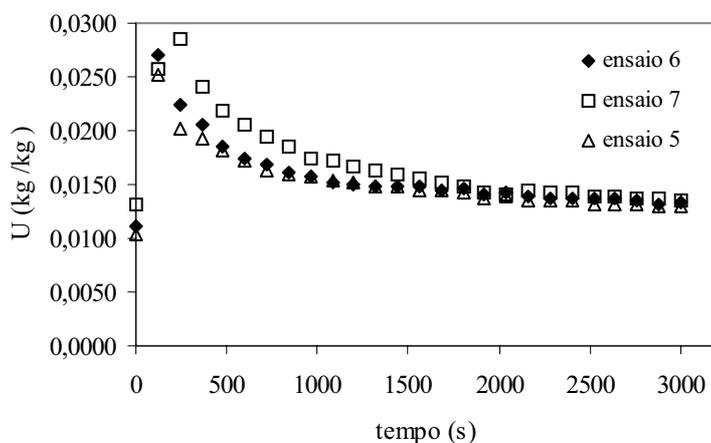


Figura 5.21 – Umidade do ar em função do tempo – Ensaios 5, 6 e 7 ($v = 0,82\text{m/s}$, $T = 65^\circ\text{C}$)

Na Figura 5.21, observa-se que as curvas referentes aos ensaios 5 e 6 são praticamente coincidentes, o que confirma a reprodutibilidade dos ensaios repetidos nas mesmas condições operacionais. Todavia, para o ensaio 7, não se confirma a reprodutibilidade dos resultados, o que é justificado pela condição de umidade do ar de secagem ser mais elevada do que a dos ensaios 5 e 6, conforme se observa na Figura 5.21. Não foi possível controlar as condições

psicrométricas do ar alimentado ao secador, cujo teor de umidade, influenciou o comportamento ilustrado nas demais curvas relativas aos ensaios repetidos em condições operacionais fixas e correspondentes ao nível intermediário de temperatura e velocidade (Figuras 5.22, 5.23, e 5.24).

É importante se registrar a elevada transiência de regime observada nos 5 minutos iniciais dos ensaios de secagem no leito de jorro, decorrentes de instabilidade no movimento do leito, (dependendo das condições operacionais o leito opera em condições de leito fixo por alguns instantes, ou com alternância de regime, fixo/jorro nos instantes iniciais) e do aquecimento dos grãos. De uma forma geral, aos 10 minutos de secagem, para todos os ensaios, as condições correspondentes a temperatura do ar nos diversos pontos de medidas ao longo do secador são estabilizadas, e o leito opera em condições estacionárias em relação a vazão e temperatura do ar. Com relação ao regime fluidodinâmico, à medida que a secagem prossegue o movimento das partículas se torna mais intenso, a fonte aumenta e a queda de pressão no leito tende a cair.

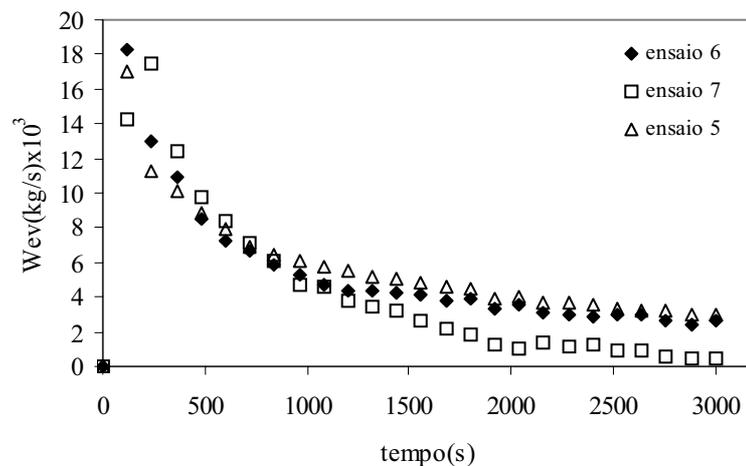


Figura 5.22 – Taxas de evaporação em função do tempo - Ensaio 5, 6 e 7 ($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$)

Os efeitos da transiência de regime no início do processo e da umidade do ar de secagem são evidenciados na Figura 5.22, que ilustra as taxas de evaporação em função do tempo de secagem, calculadas de acordo com a metodologia descrita no capítulo 4. Verifica-se que as maiores taxas de evaporação ocorrem nos 10 minutos iniciais, tendendo a estabilizar

à medida que a secagem prossegue. Este comportamento foi observado em todos os ensaios de secagem no leito de jorro.

Com relação a reprodutibilidade dos resultados, nas curvas ilustradas na Figura 5.22, verifica-se que após os 10 minutos de instabilidade do regime, as curvas referentes aos ensaios 5 e 6 praticamente coincidem. Já em relação ao ensaio 7, devido a elevada umidade do ar de secagem, as taxas de evaporação são mais baixas.

Por integração das curvas das taxas de evaporação com o tempo, determinou-se a massa de água evaporada durante a secagem. A quantidade total de água evaporada foi estimada, como a diferença entre a massas inicial e final de água contida no feijão, respectivamente antes e após o processo de secagem. Estes dados foram comparados com os obtidos a partir da integração das taxas de evaporação, o que permitiu a validação da metodologia empregada no tratamento dos dados experimentais, relativos às curvas de secagem.

A Figura 5.23 ilustra as curvas acumulativas da massa de água evaporada em função do tempo, para os ensaios 5, 6 e 7. Também nestas curvas identifica-se a reprodutibilidade dos ensaios 5 e 6, e o efeito da umidade do ar de secagem no ensaio 7.

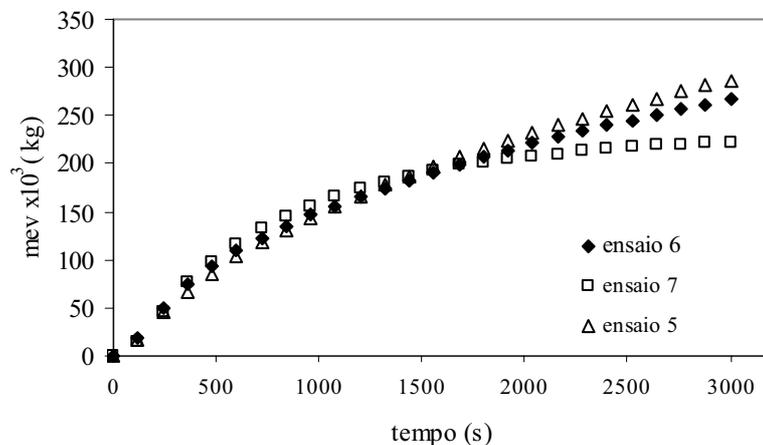


Figura 5.23 - Curvas acumulativas da massa de água evaporada com o tempo – Ensaios 5, 6 e 7 ($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$)

Considerando-se que em relação às quantidades de água inicialmente presentes no feijão pré-seco, também não foi possível se manter condições completamente uniformes, para se neutralizar o efeito da variação no teor de umidade inicial do feijão desidratado no leito de

jorro, foram calculadas as frações de água (relativa à água contida inicialmente no leito de feijões), evaporadas ao longo do tempo de secagem. A Figura 5.24 ilustra as curvas referentes às frações de água evaporadas nos ensaios 5, 6 e 7. O comportamento dos ensaios 5 e 6 é o mesmo. Embora as curvas não se mostrem sobrepostas, em virtude certamente das condições de transiência inicial do processo, as mesmas são paralelas e apresentam em relação às frações evaporadas uma defasagem de 4 minutos. Com respeito ao ensaio 7, o efeito da umidade inicial do ar mostra-se menos acentuado, observando-se entretanto, problemas de reprodutibilidade dos resultados principalmente na fase final da secagem.

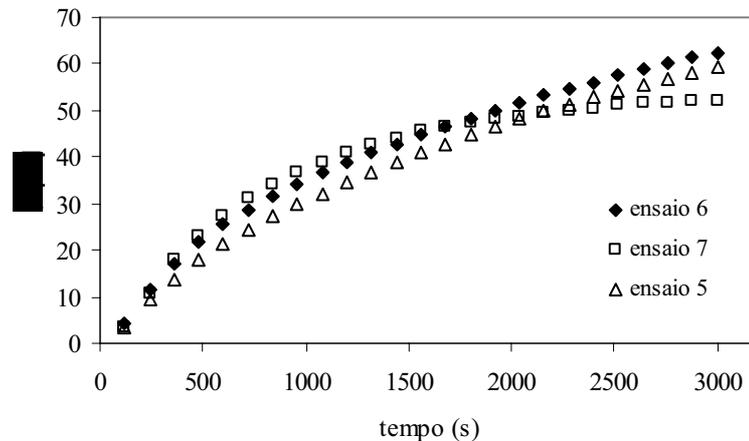


Figura 5.24 – Fração de água evaporada em função do tempo – Ensaios 5, 6 e 7 ($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$)

As Figuras 5.25, 5.26 , 5.27 e 5.28 ilustram as curvas de secagem relativas aos ensaios 1, 2, 3, 4 e 6. Nestes ensaios, apesar das condições psicrométricas do ar de secagem não controladas, condições ambientais mais uniformes favoreceram a uniformidade da umidade do ar na entrada do secador, conforme se observa na Figura 5.25. As diferenças observadas em relação as curvas de secagem são decorrentes portanto, das diferentes condições de temperatura e vazão do ar mantidas nestes ensaios..

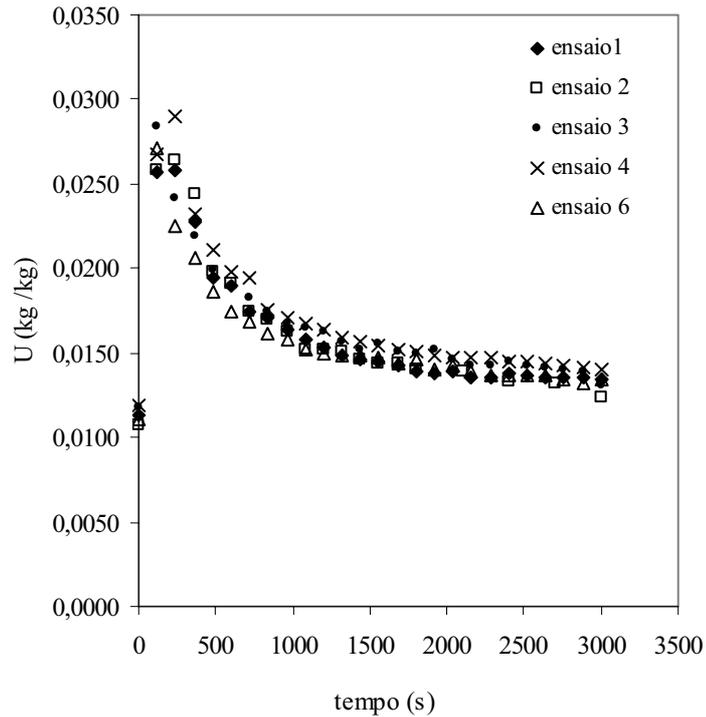


Figura 5.25 – Umidade do ar em função do tempo – Ensaio 1($v=0,77\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 2($v=0,77\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), 3($v=0,86\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 4($v=0,86\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), e 6($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$).

Observando-se a Figura 5.26, verifica-se que principalmente em relação as taxas de evaporação iniciais, apesar das variações decorrentes das condições em que são efetuadas as medidas, do tempo de resposta do instrumento, e da transiência em relação ao aquecimento e movimento dos grãos, de um modo geral, os ensaios realizados nas condições de maior velocidade do ar (3 e 4), e maior temperatura (2) apresentam as maiores taxas iniciais. A partir dos 15 minutos as curvas se aproximam, verificando-se entretanto, através do paralelismo das curvas, que principalmente em relação aos ensaios 3 e 4 o comportamento das taxas de secagem se mantém.

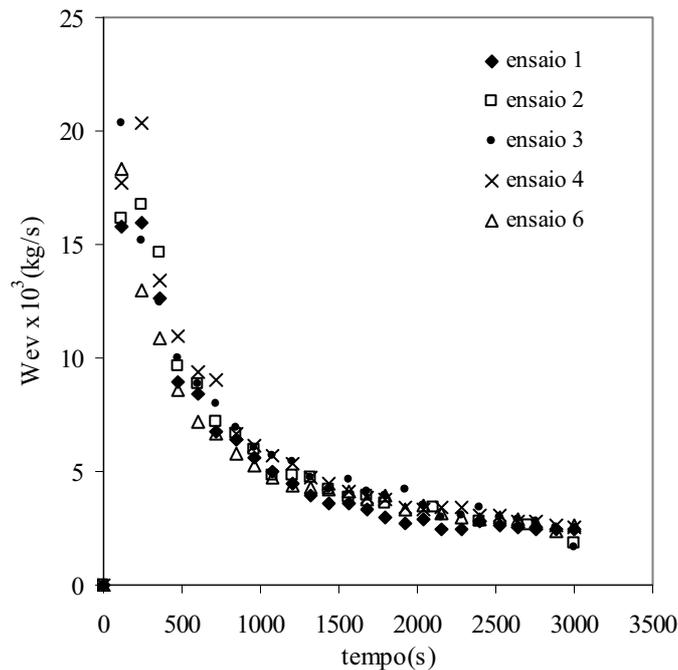


Figura 5.26 – Taxas de evaporação em função do tempo – Ensaio 1($v=0,77\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 2($v=0,77\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), 3($v=0,86\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 4($v=0,86\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), e 6($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$).

A Figura 5.27 ilustra as curvas acumulativas da massa de água evaporada em função do tempo, para os ensaios 1,2,3,4 e 6. O efeito da vazão do ar e da temperatura sobre as taxas de evaporação são evidenciados nestas curvas, onde se constata a maior influência da velocidade do ar frente a influência da temperatura, quando se compara as curvas referentes aos ensaios 3 e 2. A coincidência das curvas relativas aos ensaios 1 e 6 indica que na faixa de condições operacionais em que foram realizados estes ensaios (níveis mínimos e intermediários de temperatura e velocidade), não houve efeito do aumento simultâneo da velocidade e temperatura do ar sobre as taxas de evaporação.

Neutralizando-se, entretanto, o efeito da variação no teor de umidade inicial do feijão desidratado no leito de jorro, as curvas relativas as frações de água evaporada ilustradas na Figura 5.28, mostram, contrariamente ao que se observa na Figura 5.27, que em relação ao ensaio 1, as condições de temperatura e velocidade do ar mantidas no ensaio 6, influenciaram

favoravelmente a fração de água evaporada neste ensaio. De acordo com a sobreposição das curvas referentes aos ensaios 2, 3 e 6, ilustradas na Figura 5.28, o efeito do aumento simultâneo da velocidade e temperatura do nível mais baixo para o intermediário, (ensaio 6), é equivalente ao do aumento individual da temperatura ou da velocidade do nível mais baixo para o nível mais alto (ensaios 2 e 3, respectivamente).

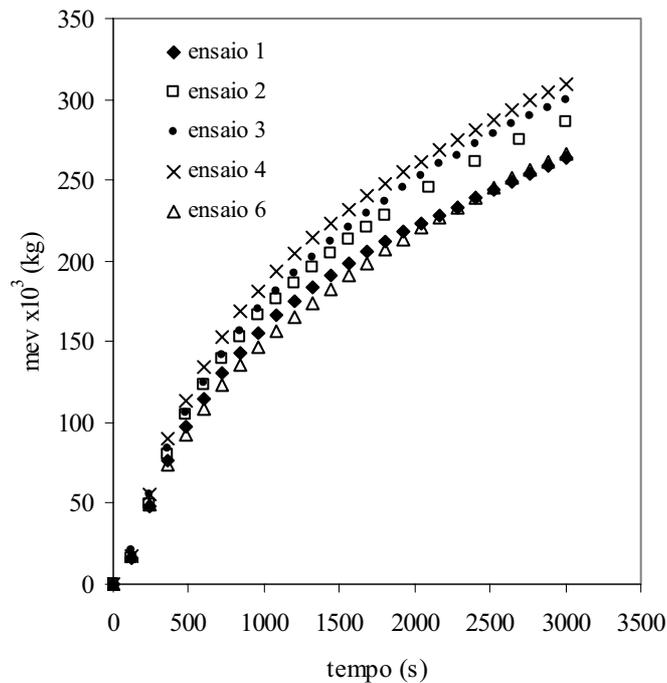


Figura 5.27 - Curvas acumulativas da massa de água evaporada com o tempo – Ensaios 1($v=0,77\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 2($v=0,77\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), 3($v=0,86\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 4($v=0,86\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), e 6($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$).

As curvas ilustradas na Figura 5.28 evidenciam ainda, o efeito das condições operacionais sobre as taxas de evaporação em relação ao tempo de secagem. Verifica-se que cerca de 50% da água contida no leito de feijão é evaporada em 26 minutos no ensaio 4, conduzido nas condições de maior velocidade e temperatura do ar, em 32 minutos nos ensaios 2, 3 e 6, cujos efeitos das variáveis operacionais já foram discutidos no parágrafo precedente, aumentando para 46 minutos no ensaio 1, realizado nas condições de menor temperatura e velocidade do ar.

Analisando-se o comportamento das curvas para uma fração evaporada de água em torno de 30%, verifica-se que esta fração é atingida em intervalos de tempo muito próximos e correspondente a 14 minutos, em média, para os ensaios 1,2,3, 4 e 6. Este resultado evidencia efeitos de magnitudes menos intensas na fase inicial do processo de secagem, em relação às condições de temperatura e velocidade do ar.

Os resultados obtidos em relação às curvas de secagem, foram de primordial importância para definição das variáveis respostas a serem analisadas estatisticamente a partir do planejamento experimental. Com base nestes resultados alguns ensaios foram descartados da análise estatística em virtude de terem sido realizados em condições desfavoráveis em relação a umidade do ar de secagem.

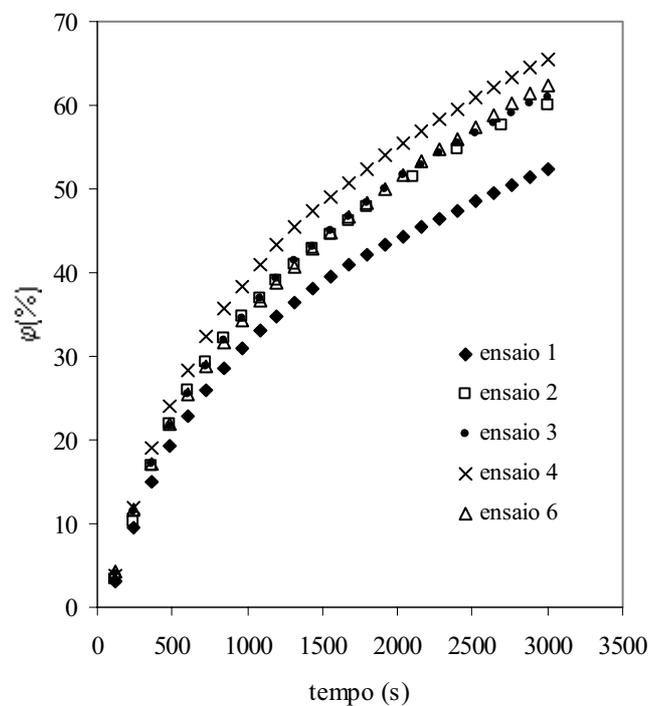


Figura 5.28 – Fração de água evaporada em função do tempo Ensaios 1($v=0,77\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 2($v=0,77\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), 3($v=0,86\text{m/s}$, $T=60^{\circ}\text{C}$), 4($v=0,86\text{m/s}$, $T=70^{\circ}\text{C}$), e 6($v=0,82\text{m/s}$, $T=65^{\circ}\text{C}$).

5.3 - Cinética de secagem do feijão verde

Foram realizados dois ensaios de secagem do feijão em camada fina para se avaliar a cinética de secagem e investigar modelos que se ajustem ao dados experimentais, podendo ser utilizados para simular o processo de secagem. As condições experimentais empregadas nestes ensaios são mostradas na tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Condições operacionais para os ensaios de secagem em camada fina

Ensaio	tempo(min)	T _{gi} (°C)	V(m/s)	m(kg)
a	160	60	0,53	0,07
b	165	60	0,73	0,07

As curvas de secagem do feijão verde em estufa para as duas velocidades citadas anteriormente são mostradas nas Figuras 5.29 e 5.30. Identifica-se nestas figuras uma certa uniformidade nas taxas de evaporação nos 10 minutos iniciais da secagem, caracterizando um período de secagem à taxa constante coincidente com o período de aquecimento do material. Observa-se na Figura 5.30 que as taxas de evaporação do ensaio b, nos 10 minutos iniciais, são ligeiramente superiores as taxas do ensaio a, constatando-se assim a influência da vazão do ar nesta fase inicial da secagem. A partir do 10 minutos de secagem as curvas ilustradas nas Figuras 5.29 e 5.30, praticamente coincidentes, evidenciam o período de taxa decrescente que se mantém ao longo do processo. A coincidência destas curvas indica que para a faixa de velocidade do ar em que foram conduzidos os dois ensaios, não há influência da vazão do ar, sobre as taxas de secagem no período de taxa decrescente, o que caracteriza resistência externa ao transporte de umidade desprezível, e que o mecanismo de controle do processo é difusional.

Considerando-se o efeito da vazão do ar sobre as taxas de secagem no leito de jorro, o resultado obtido na secagem dos grãos em camada fina, em relação ao efeito da vazão do ar, é contraditório. Uma análise preliminar destes resultados levaria a discussão sobre o efeito do maior encolhimento e da quebra dos grãos no leito de jorro. De acordo com os resultados apresentados e discutidos no item 5.2, o efeito da vazão do ar é mais evidente à medida que a secagem prossegue, ou seja quando os grãos sofrem maior encolhimento e a quebra aumenta significativamente. Numa primeira hipótese, pode-se sugerir que o efeito da vazão do ar sobre

as taxas de secagem no leito de jorro se deve às mudanças nas características da superfície dos grãos, em decorrência do descascamento e quebra, devido ao atrito no leito, que se intensifica à medida que a secagem prossegue.

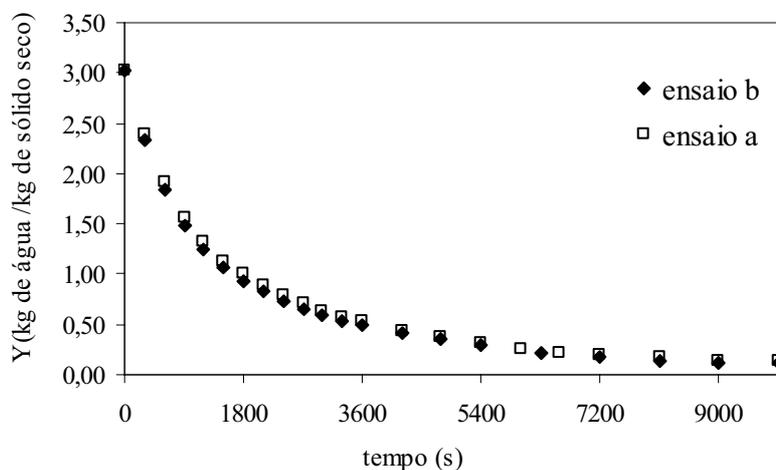


Figura 5.29 – Curva de umidade em função do tempo para o feijão verde desidratado no secador (camada fina) . Ensaio a e b, ($v=0,53$ e $0,73\text{m/s}$).

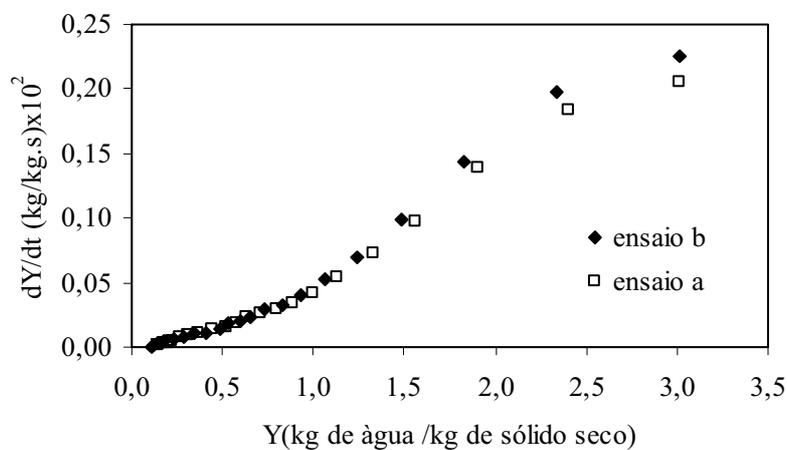


Figura 5.30 – Curva da taxa específica de evaporação em função do tempo para o feijão verde desidratado no secador (camada fina). Ensaio a e b, ($v=0,53$ e $0,73\text{m/s}$).

5.3.1 -Período de taxa decrescente

Considerando o período de taxa decrescente observado nos dois ensaios de secagem do feijão verde na estufa e identificados nas curvas apresentadas nas Figuras 5.29 e 5.30, estimou-se os coeficientes de difusão efetivos a partir da modelagem dos dados experimentais. Com base na 2ª Lei de Fick, utilizou-se o modelo descrito pela Equação 22 para uma esfera, considerando-se condições de equilíbrio na superfície dos grãos, coeficiente de difusão efetivo da água no feijão constante e difusão unidimensional, na direção radial. Com essas considerações a 2ª Lei de Fick pode ser escrita segundo a Equação 36 apresentada no Capítulo 4.

O modelo tem como condição inicial distribuição de umidade uniforme. No caso em estudo, em que se aplica ao período de taxa decrescente, logo após o período de taxa constante, há na realidade uma distribuição de umidade inicial não uniforme. Outra simplificação importante e talvez não muito realística é que no modelo acima não é levado em consideração o encolhimento do material. Nos próximos estudos, sugere-se investigar melhor estes efeitos.

A Figura 5.31 ilustra a estimativa da umidade de equilíbrio do feijão, a partir da extrapolação dos dados experimentais obtidos no período de taxa decrescente. A reta ajustada aos dados experimentais relativos a ambos os ensaios apresentou coeficiente de correlação da ordem de 98,0 % fornecendo uma umidade de equilíbrio de 0,074 kg de água/kg de sólido seco.

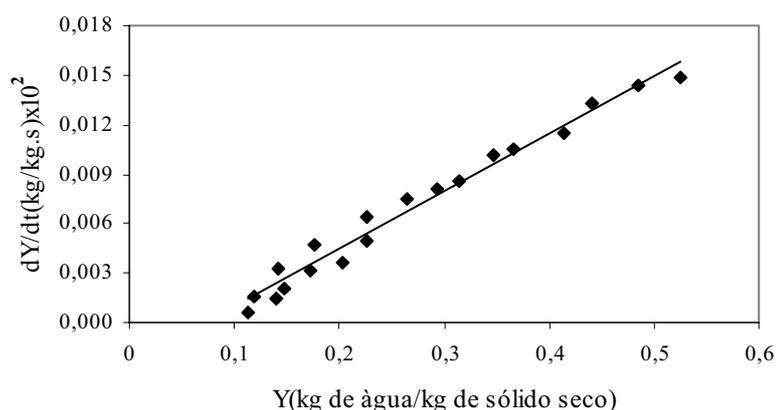


Figura 5.31 - Estimativa da umidade de equilíbrio para os ensaios a e b. (v=0,53 e 0,73m/s).

A Figura 5.32 ilustra as retas ajustadas conforme Equação 36 aos dados experimentais obtidos no período de taxa decrescente, para os ensaios a e b. Observa-se nesta figura, um bom ajuste linear aos dados experimentais obtidos nestes ensaios.

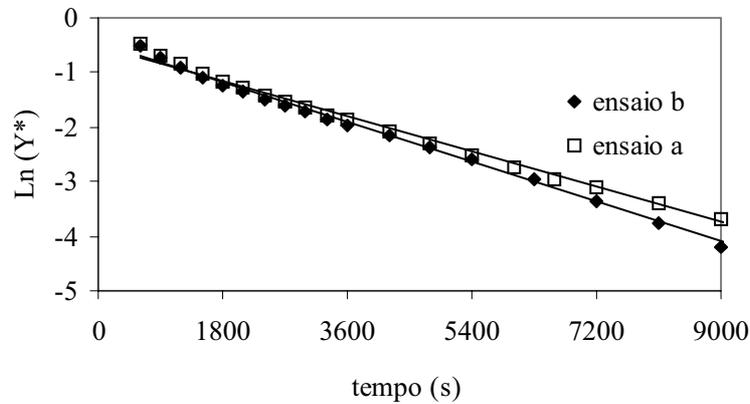


Figura 5.32 – Estimativa da difusividade a partir do modelo difusional para o ensaio de velocidade igual a 2,6 m/s e 3,6 m/s

A Tabela 5.17 apresenta um resumo dos resultados referentes ao ajuste do modelo difusional de Fick aplicado aos dados experimentais e as difusividades efetivas calculadas a partir do modelo.

Tabela 5.17 - Difusividades efetivas calculadas a partir do ajuste do modelo difusional de Fick. Parâmetros das retas ($\text{Ln}(Y^*) = A_0 + B_0 t$), ajustadas ao período de taxa decrescente com respectivos coeficientes de correlação

Ensaio	Y_{eq} (kg/kg)	A_0	B_0	e^{A_0}	R^2	Def (m^2/seg)
a	0,074	-0,4631	-0,0004	0,6293	0,9960	$1,87 \times 10^{-9}$
b	0,074	-0,5019	-0,0004	0,6053	0,9890	$1,87 \times 10^{-9}$

Para o cálculo das difusividades efetivas, foram empregados valores médios do diâmetro do grão ao longo do período de secagem em taxa decrescente. Para os dois ensaios, os diâmetros foram estimados a partir do modelo de encolhimento apresentado no item 5.2.2, considerando-se a umidade do feijão no início do período de taxa decrescente e ao final do processo de secagem.

Conforme se observa na Tabela 5.17, para ambos os ensaios houve um bom ajuste linear aos dados experimentais, com coeficientes de correlação superiores a 98%, o que permitiu uma estimativa de difusividades efetivas, a partir dos coeficientes angulares das retas ajustadas. Constata-se que não há influência da vazão do ar sobre a difusividade efetiva, cujos valores são idênticos, o que evidencia a consideração de resistência externa desprezível e mecanismo de controle difusional, nesta etapa da secagem do feijão verde. Difusividades efetivas de $1,4 \times 10^{-9}$, $1,70 \times 10^{-9}$ e $2,70 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ foram encontradas por SENADEERA et al (2003) para grãos de ervilha desidratados em leito fluidizado, para três níveis de temperatura 30, 40 e 50°C, respectivamente. Constata-se assim que a difusividade efetiva determinada no presente trabalho, $1,87 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ é consistente com os resultados obtidos para a ervilha, cujas características são bastante semelhantes à do feijão verde. É importante evidenciar que o valor da difusividade térmica encontrado é válido apenas para a temperatura de 60 °C.

Verifica-se ainda, que os coeficientes lineares das retas ajustadas não apresentam desvios importantes em relação ao valor predito pelo modelo difusional para uma esfera com condições de equilíbrio na superfície ($e^{A_0} = 6/\pi^2 = 0,608$). Os desvios poderiam ser justificados pela imprecisão na estimativa dos coeficientes lineares, pelo fato do encolhimento do grão ter sido considerado apenas no cálculo da difusividade e mesmo assim com base na estimativa de um valor médio, e pelas demais simplificações relativas à umidade de equilíbrio e à condição de umidade inicial uniforme. Apesar de todas as simplificações, o modelo difusional ajusta-se de forma bastante satisfatória aos dados experimentais, podendo ser empregado para uma predição aproximada da cinética de secagem do feijão verde em camada fina.

5.4 -Resultados do planejamento fatorial 2² com repetição no ponto central

Uma análise dos resultados através de métodos estatísticos foi feita utilizando-se o programa “Statistica”. A tabela 5.18 relaciona as variáveis independentes, na forma codificada, para a velocidade do ar e temperatura com as variáveis respostas quebra, razão de umidade e fração evaporada em 20 e 50 minutos da secagem.

As variáveis codificadas T* e V*, são definidas nas Equações 41 e 42.

$$T^* = (T - 65)/5 \quad (41)$$

$$V^* = (V - 29,44)/1,66 \quad (42)$$

Tabela 5.18 – Planejamento fatorial 2²– Matriz das variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta

Experimentos	T*	V*	Xj/Xb (%)	Q x 10 ² (%)	φ ₂₀ (%)	φ ₅₀ (%)
01	-1	-1	50,60	6,46	34,87	52,50
02	1	-1	47,60	12,35	39,01	59,91
03	-1	1	49,20	31,08	39,27	61,10
04	1	1	44,80	31,69	43,23	66,50
05	0	0	50,80	24,36	40,37	61,24
06	0	0	51,60	24,00	40,82	59,13
07	0	0	51,50	25,64	40,00	62,49

5.4.1 Análise dos Efeitos

A tabela 5.19 apresenta um resumo dos efeitos das variáveis independentes V* e T* e da interação entre elas, sobre as variáveis de resposta Xj/Xb , Q, φ₂₀ e φ₅₀ para um modelo de primeira ordem com uma interação e limite de confiança de 95% para a quebra e 90% de confiança para as demais.

Tabela 5.19 – Estimativa dos efeitos para X_j/X_b , Q , φ_{20} e φ_{50}

Variáveis Independentes	Efeitos estimados			
	X_j/X_b (%)	$Q \times 10^2$ (%)	φ_{20} (%)	φ_{50} (%)
Média	49,442	22,225	39,652	60,410
V*	-2,100	21,980	4,310	7,595
T*	-3,700	3,250	4,050	6,405
V*.T*	-0,700	-2,640	-0,090	-1,005

A análise das variáveis de resposta razão de umidade, definida como a razão entre a umidade final e a umidade do feijão pré seco (X_j/X_b), fração evaporada em 20 minutos e fração evaporada em 50 minutos mostrou que dentro do limite de confiança de 90%, foram significativas a temperatura (T*) e a velocidade (V*). Esses resultados são mostrados nos “Diagramas de Pareto” que permitem uma melhor visualização dos efeitos significativos, ilustrados nas Figura 5.33, 5.34, 5.35. Para a variável resposta quebra, dentro do limite de confiança de 95%, apenas a variável velocidade foi significativa, conforme se observa no “Diagrama de Pareto” da Figura 5.36 .

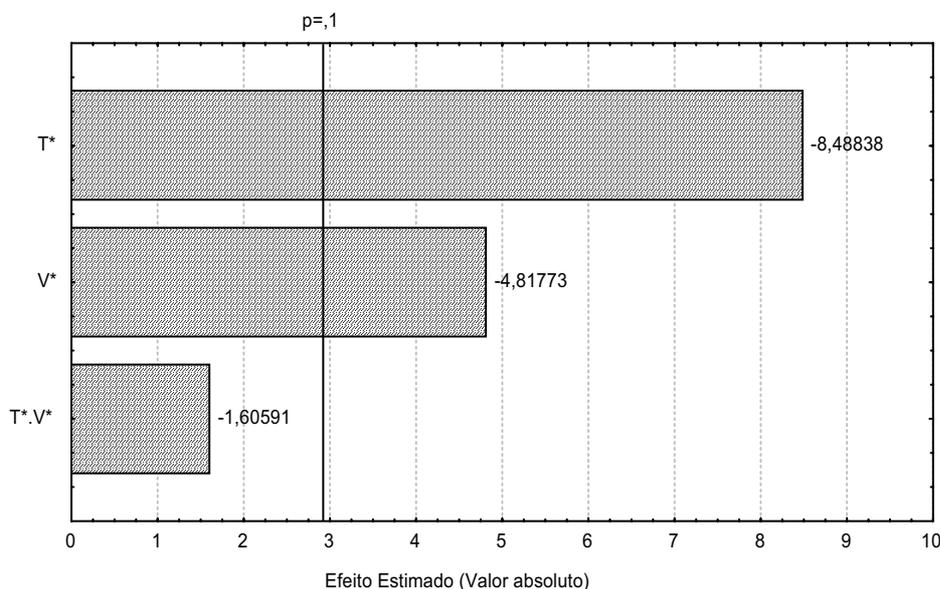


Figura 5.33 – Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável de resposta razão da umidade

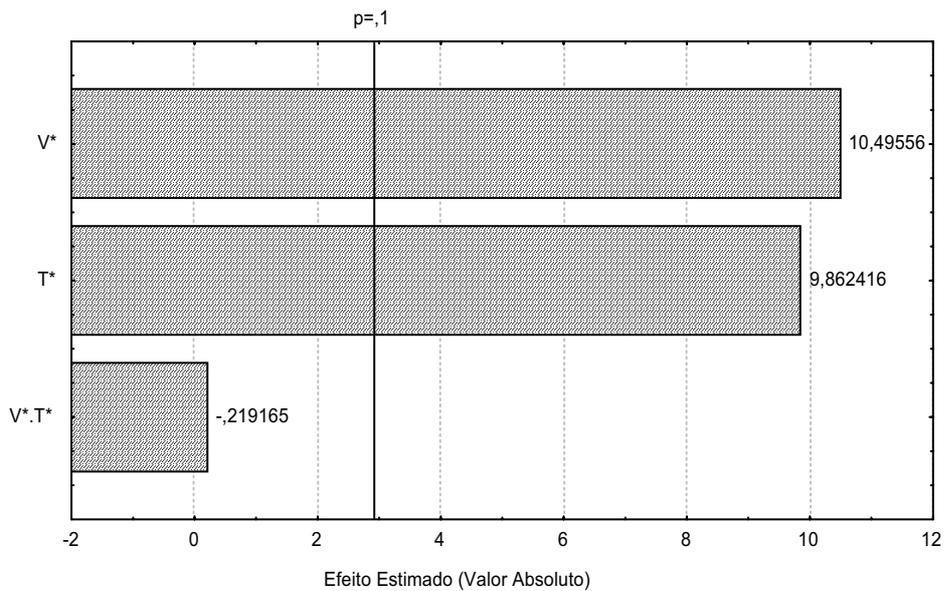


Figura 5.34 – Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável resposta φ_{20}

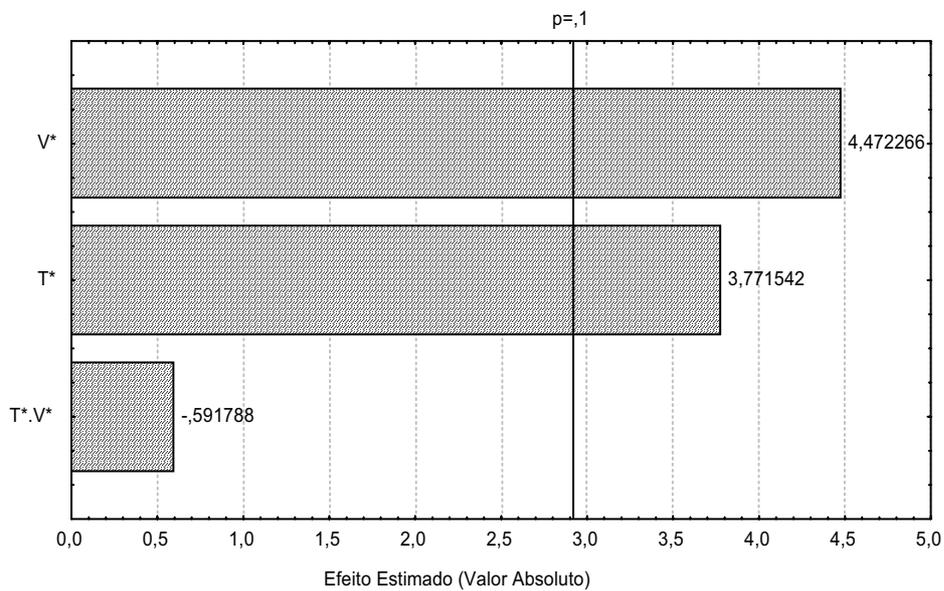


Figura 5.35 – Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável resposta φ_{50}

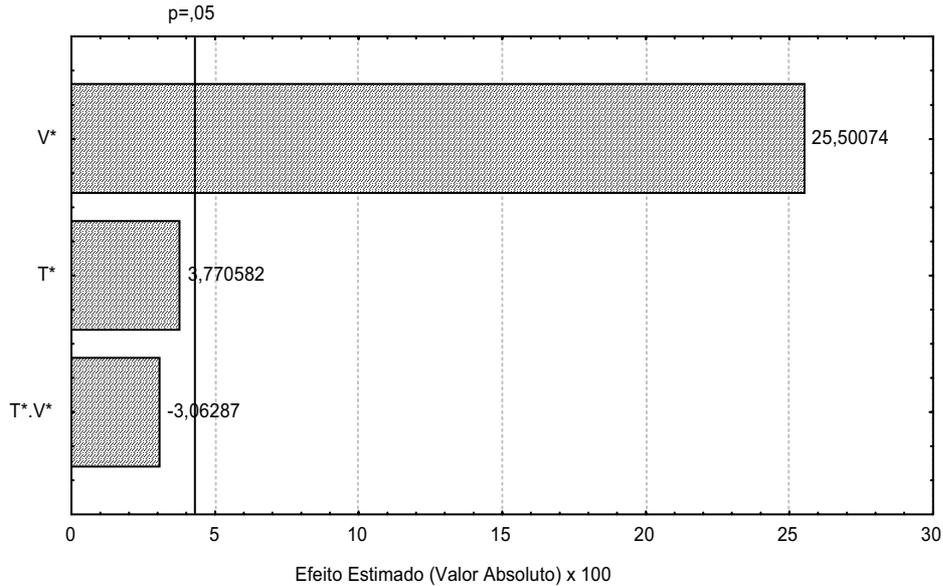


Figura 5.36 – Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável de resposta quebra

5.4.2 Análise de Regressão dos Modelos Estatísticos

Para todas as variáveis respostas analisadas os termos não significativos podem ser eliminados do modelo estatístico. As Equações 43 a 46 correspondem aos modelos estatísticos codificados para as variáveis respostas X_j/X_b , Q , φ_{20} e φ_{50} , em função apenas das variáveis que influenciam em cada resposta, respectivamente:

$$X_j/X_b = 49,442 - 1,850T^* - 1,050V^* \quad (43)$$

$$\varphi_{20} = 39,652 + 2,025T^* + 2,155V^* \quad (44)$$

$$\varphi_{50} = 60,410 + 3,202T^* + 3,797V^* \quad (45)$$

$$Q = 0,222 + 0,110V^* \quad (46)$$

Para cada modelo representado nas Equações 43 a 46 a significância estatística foi determinada pela análise de variância, cujos resultados são mostrados nas Tabelas A1 a A4 do Anexo 1.

A tabela 5.20 mostra uma síntese dos resultados da análise de regressão para todas as variáveis respostas analisadas

Tabela 5.20 – Resultados da Análise de regressão – X_j/X_b , Q , φ_{20} e φ_{50}

Variável Resposta	Qualidade de Ajuste (%)	Coeficiente de correlação	Teste F (Regressão)			Teste F (Falta de Ajuste)		
			Fcal	Ftab	Fcal/Ftab	Fcal	Ftab	Fcal/Ftab
X_j/X_b (90%)	23,23	0,48817	1,91	4,32	0,44	48,94	9	5,44
φ_{20} (90%)	87,25	0,91499	21,53	4,32	4,98	8,64	9	0,96
φ_{50} (90%)	86,33	0,93163	23,71	4,32	5,49	0,44	9	0,05
Q (95%)	88,68	0,9057	48,03	6,61	7,27	21,90	19,16	1,14

Em relação a razão de umidade, a equação ajustada apresenta um coeficiente de correlação 0,48817, enquanto o valor da qualidade do ajuste é de 23,23 % . O valor de F é apenas 0,44 vezes superior ao F tabelado, o que demonstra que o modelo não é significativo para fins preditivos, de acordo com BOX e WETZ (1963). A comparação entre os valores predtos e os observados para a razão de umidade é ilustrada na Figura 5.37. Observa-se no gráfico grandes desvios entre os valores observados e os preditos pelo modelo, comprovando a inadequação do mesmo.

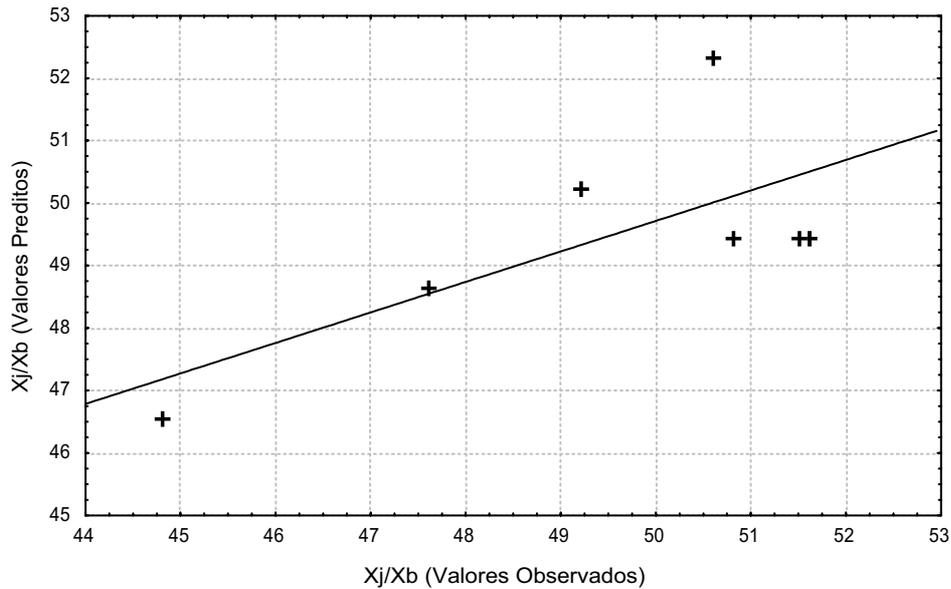


Figura 5.37 – Valores observados versus valores preditos - $X_j/X_b(\%)$

De acordo com os dados da tabela 5.20, o coeficiente de correlação entre as respostas observadas e os valores preditos pelo método estatístico de primeira ordem, ajustado aos dados da fração de água evaporada em 20 minutos é de 0,91499. O valor de 83,04 % da variação total em torno da média é explicada pela regressão para um valor máximo explicável de 99,12. Com relação ao teste F, que verifica se o modelo explica uma quantidade significativa da variação nos dados obtidos pela simulação, observa-se que o valor de F é 4,98 vezes superior ao valor tabelado, para um nível de confiança de 90%, mostrando que a equação ajustada é estatisticamente significativa e útil para fins preditivos.

Realizando-se um teste F da razão MQ_{faj}/MQ_{ep} , pode-se avaliar se o modelo está ou não bem ajustado às observações experimentais. Valores altos de MQ_{faj}/MQ_{ep} ($F > 1$), significa falta de ajuste. Os resultados da análise de variância para o modelo estatístico de primeira ordem ajustado aos dados de φ_{20} mostrados na Tabela 5.20, fornecem $MQ_{faj}/MQ_{ep} = 8,64$, valor inferior ao F tabelado, $F_{2,2} = 9$. Há portanto, um ajuste satisfatório do modelo às observações experimentais. A comparação entre os valores observados e os preditos pelo modelo é ilustrada na no gráfico da Figura 5.38, onde se confirma razoável qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais.

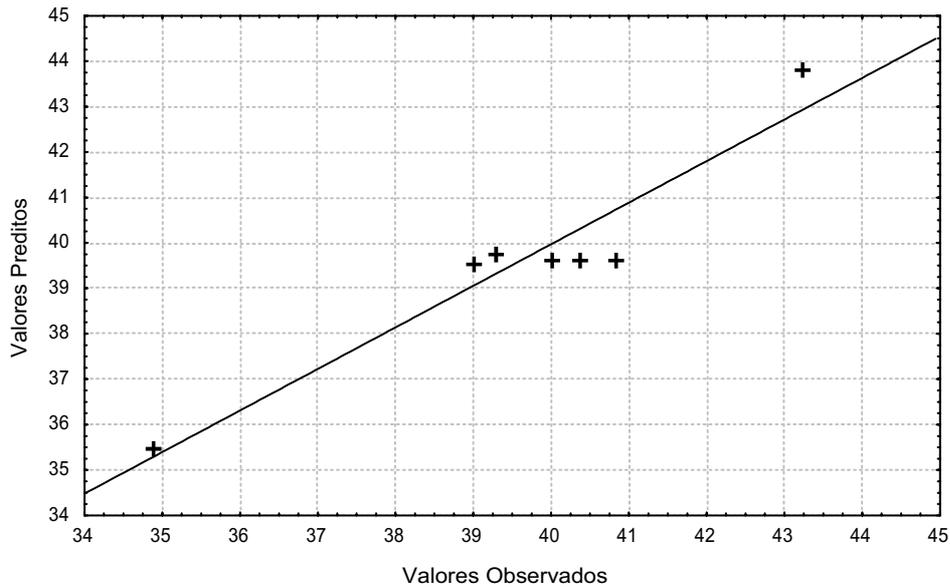


Figura 5.38 - Valores observados versus valores preditos - ϕ_{20}

O modelo ajustado aos dados da fração evaporada nos 50 minutos de secagem apresenta uma boa qualidade de ajuste conforme se pode observar na Tabela 5.20. A regressão explica 86,33 % da variação total em torno da média em relação ao valor máximo explicável de 94,61 %. O coeficiente de correlação é 0,93163, o que significa que há um bom ajuste entre os valores observados e os preditos pela correlação. O valor de F obtido pelo modelo é 5,49 vezes superior ao F tabelado a um nível de confiança de 90%. O teste F garante portanto, que para a fração de água evaporada nos 50 minutos de secagem o modelo ajustado é estatisticamente significativo e preditivo.

Com relação ao teste F para a razão MQ_{faj}/MQ_{ep} , os resultados da análise de variância para o modelo estatístico de primeira ordem ajustado aos dados de ϕ_{50} mostrados na Tabela 5.14, fornecem $MQ_{faj}/MQ_{ep}=0,44$, valor bastante inferior ao F tabelado, $F_{2,2}= 9$. Desta forma, há um bom ajuste do modelo às observações experimentais.

A análise de variável resposta quebra foi calculada como a razão entre a massa de pó coletada e a carga inicial de feijão (1,25 kg). Com relação ao teste F, que verifica se o modelo explica uma quantidade significativa da variação nos dados obtidos pela simulação, observa-se que o valor de F é 7,27 vezes superior ao valor tabelado, a um nível de confiança de 95%

mostrando que a equação ajustada é estatisticamente significativa e útil para fins preditivos . Todavia, o teste F para a razão MQ_{faj}/MQ_{ep} identifica problemas de adequação do modelo às observações experimentais, pois o $MQ_{faj}/MQ_{ep} = 21,90$ é ligeiramente superior ao F tabelado, $F_{3,2} = 19,16$. Considerando-se entretanto, o gráfico ilustrado na Figura 5.39, observa-se um ajuste razoável do modelo aos dados experimentais.

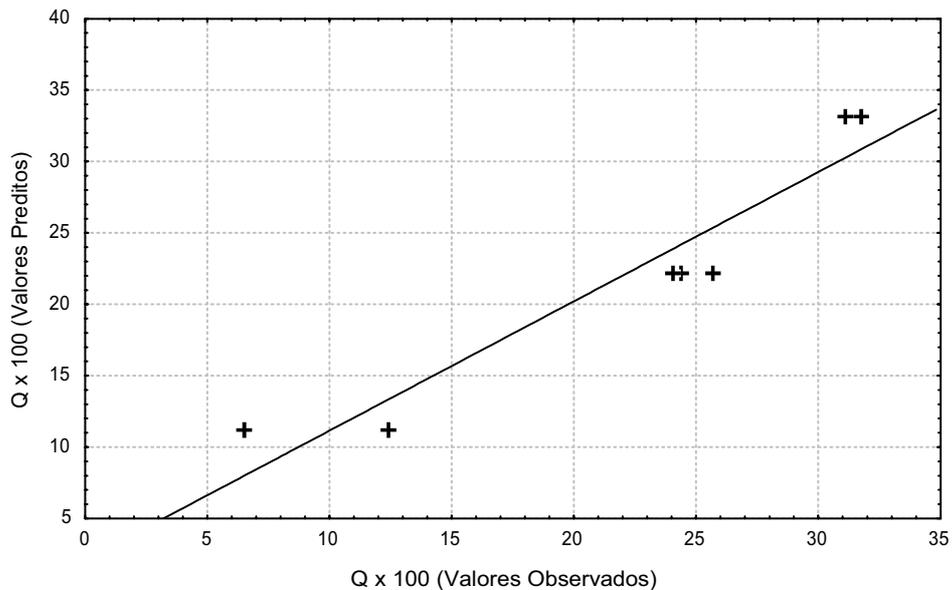


Figura 5.39 - Valores observados versus valores preditos - Q

5.4.3 Análise das Superfícies de Respostas

A comparação dos valores de F tabelados com relação aos obtidos pelos modelos para a fração de água evaporada aos 20 e 50 minutos de secagem, garantem que os modelos apresentam uma quantidade de variação devido ao modelo ajustado superior a variação não explicada, mostrando que os valores experimentais são representados pelos modelos ajustados. Verifica-se desta forma que os dois modelos são estatisticamente validados, sendo utilizados para gerar as superfícies de resposta. Para a variável resposta quebra, embora se tenha detectado problemas em relação a falta de ajuste, como a razão $MQ_{faj}/MQ_{ep} = 1,14$, corresponde a um valor muito próximo do valor limite, (1,0), também foi utilizado o modelo para gerar sua superfície de resposta.

A metodologia de superfícies de resposta é uma técnica de otimização baseada no emprego de planejamento fatorial, introduzida por G.E.P. BOX na década de 1950, e que

desde então tem sido usada com grande sucesso na modelagem de diversos processos industriais (BRUNS et al., 1996). Essa metodologia é constituída das etapas distintas modelagem (ajuste de modelos a resultados experimentais) e deslocamento (máxima inclinação de um modelo), com o objetivo de atingir uma região ótima (máxima ou mínima)

As Figuras 5.40 e 5.41, mostram as superfícies de resposta para as variáveis fração evaporada aos 20 e 50 minutos, respectivamente. Em ambas figuras observa-se a influência positiva da velocidade e da temperatura do ar sobre a fração de água evaporada.

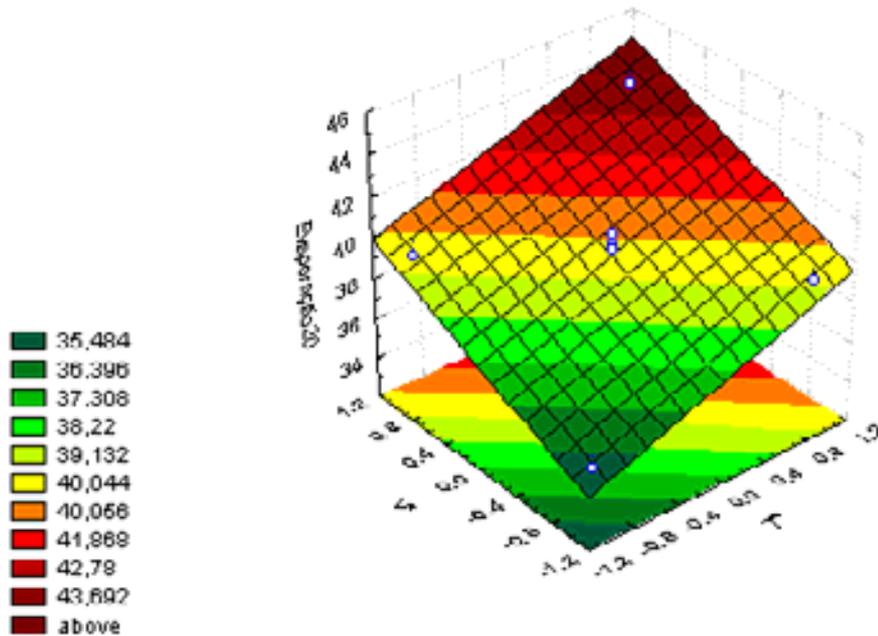


Figura 5.40 – Superfície de resposta para a fração de água evaporada em vinte minutos (φ_{20}).

De acordo como o comportamento observado na Figura 5.40, verifica-se, que a influência da velocidade é ligeiramente superior a da temperatura. No nível mais alto de temperatura o aumento percentual da taxa de evaporação em 20 minutos, com o aumento da velocidade é de 11,6%, enquanto para o nível mais alto de temperatura o aumento percentual é de 13,0%. Com relação a influência da temperatura o comportamento se repete, o aumento da temperatura, para o nível mais alto de velocidade do ar, provoca um aumento percentual

de 9,1% na fração de água evaporada, enquanto para a menor velocidade do ar, o aumento percentual é de 10,3%.

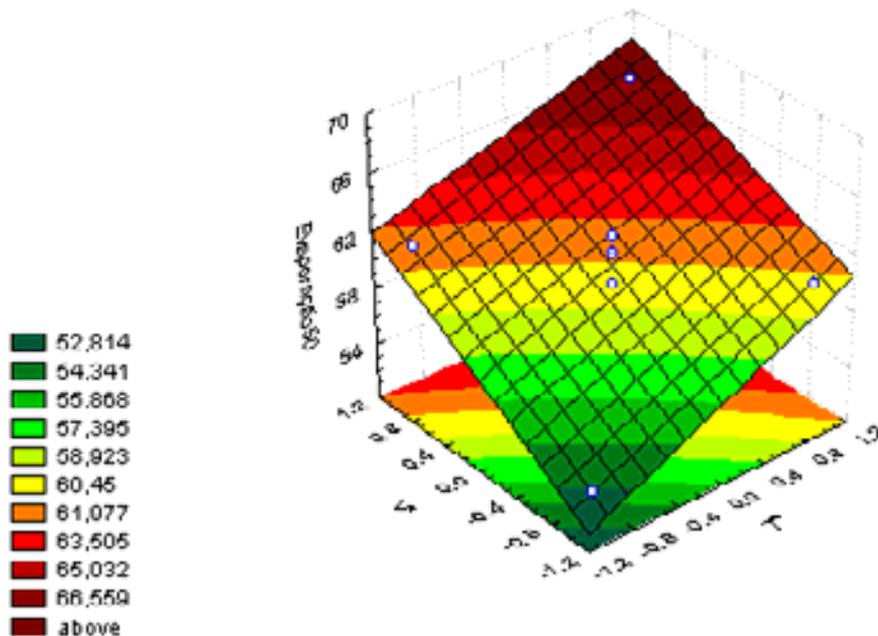


Figura 5.41 – Superfície de resposta para a fração de água evaporada em 50 minutos.

(Φ_{50})

Na Figura 5.41 o comportamento da fração evaporada em função da velocidade e da temperatura do ar, aos 50 minutos de secagem, é o mesmo verificado para os 20 minutos. Observa-se- entretanto, que a influência da velocidade frente a da temperatura, torna-se mais importante, principalmente no nível mais baixo de temperatura quando o aumento da velocidade provoca um aumento percentual na fração evaporada de cerca de 17,1%. No nível mais alto de temperatura o percentual cai para 12,8 %, enquanto o aumento da temperatura provoca aumentos de 11,41% e 7,3%, na fração de água evaporada no menor e maior nível de velocidade do ar, respectivamente.

A Figura 5.42, mostra a superfície de resposta para a variável quebra em função da temperatura e da velocidade do ar. Conforme se pode observar nesta figura, não se verifica influência da temperatura sobre a quebra do feijão, dentro da faixa de confiabilidade de 95%... Tanto para o nível máximo como para o mínimo de temperatura o aumento da

velocidade do ar do menor para o maior nível em que foram conduzidos os experimentos, provoca um aumento percentual da quebra da ordem de 188,9%. Este resultado constata o importante efeito da vazão do ar sobre a quebra do feijão.

O importante efeito da velocidade do ar na secagem do feijão no que se refere às taxas de evaporação e conseqüentemente à performance do processo de secagem vai de encontro ao efeito desta sobre a quebra do feijão, que além de comprometer a qualidade do produto, provoca prejuízos devido às perdas de material. Necessário se faz aprofundar os estudos sobre a secagem do feijão verde, visando-se encontrar uma faixa de condições operacionais que minimize as perdas, sem comprometer a performance de secagem.

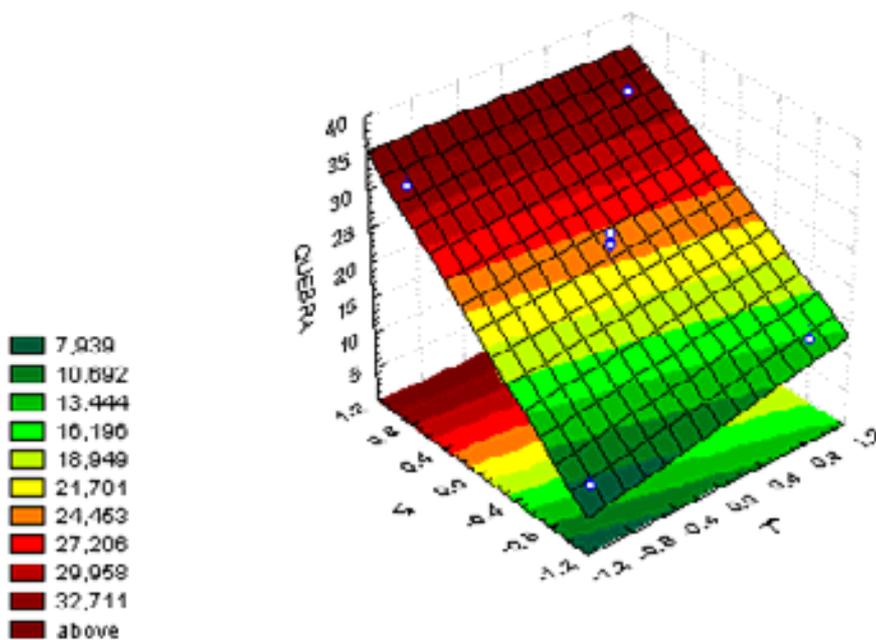


Figura 5.42– Superfície de resposta para a quebra do feijão. (Q)

5.5 – Resultados da análise sensorial

As amostras de feijão verde foram denominadas de A (*in natura*), B (branqueado /congelado), C (desidratado em leito de jorro). Os resultados para os atributos estudados relativos as três amostras e as respectivas análises de variância são apresentados no Anexo I (Tabelas de A5 a A14)

As médias das notas atribuídas pelos provadores nos atributos aparência, textura, sabor, cor e odor para as amostras A, B e C são apresentados na tabela 21.

Tabela 21 – Médias dos valores atribuídos pelos provadores aos três tipos de feijão, em uma escala hedônica de 21 pontos

Atributo	A	B	C
Aparência	7,19 _a	7,0 _a	6,14 _a
Textura	7,24 _a	7,38 _a	5,57 _b
Sabor	7,67 _a	6,62 _a	7,10 _a
Cor	6,95 _{ab}	7,67 _{ac}	5,95 _b
Odor	7,19 _a	6,52 _a	7,0 _a

Médias na mesma linha acompanhadas de mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% e 1% de significância

O resultado da análise de variância mostrou que não houve diferença significativa a $p < 0,05$ e $p < 0,01$ nos atributos aparência, sabor e odor entre as três amostras de feijão verde e a aceitação ficou entre *gostei ligeiramente* e *gostei regularmente*. Nos atributos textura e cor houve diferença significativa a $p < 0,05$ e $p < 0,01$ e a aceitação ficou entre *indiferente* e *gostei ligeiramente* para a textura e *gostei ligeiramente* e *gostei regularmente* para cor (Tabela 21).

Baseado no teste de Tukey encontrou-se que, tanto em relação a textura como a cor, a amostra C (feijão desidratado em leito de jorro) diferiu das demais. No entanto as amostras A (feijão *in natura*) e B (feijão branqueado/congelado) não apresentaram diferença significativa a $p < 0,05$ e $p < 0,01$ em nenhum dos atributos. Os resultados dos índices de aceitabilidades das três amostras do feijão nos atributos analisados são apresentados na figura 5.43. As amostras A (feijão *in natura*) e B (feijão branqueado/congelado) foram

aceitas em todos atributos analisados por apresentarem índice de aceitabilidade (I.A.) maiores que 70%. A amostra C (feijão desidratado em leite de jorro) só conseguiu aceitação nos atributos sabor e odor, nos outros atributos os valores do índice de aceitabilidade foram próximo de 60%. Segundo alguns provadores a amostra do feijão desidratado não estava com uma textura adequada, considerado como “duro”, mas esse problema pode ser solucionado definindo-se o tempo adequado de cozimento do grão.

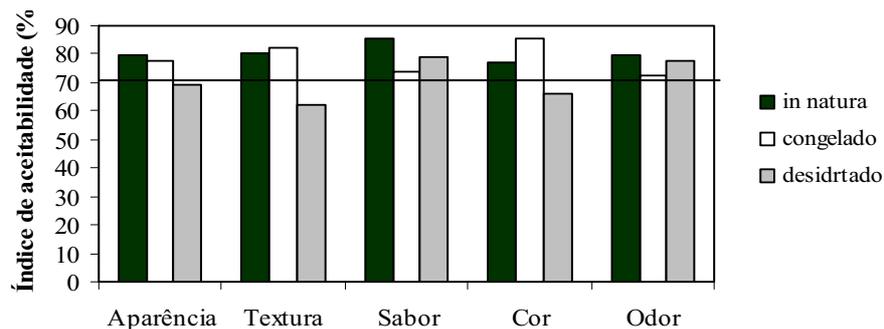


Figura 5.43 – Índice de aceitabilidade (I.A.) para o feijão verde *in natura*, branqueado/congelado e desidratado

Capítulo 6

Conclusões e sugestões

6. Conclusões e sugestões

6.1 Conclusões

Com base nos resultados apresentados e discutidos, as conclusões do presente trabalho são as seguintes:

6.1.1 Com relação à caracterização física e físico-química do feijão desidratado e in-natura:

- O feijão verde in-natura adquirido no mercado local e oriundo de diferentes lotes apresenta uniformidade em relação à caracterização físico-química e propriedades físicas do grão;
- O feijão desidratado apresenta maior acidez e concentração de sólidos solúveis do que o feijão in-natura não se observando mudanças no pH, decorrentes do processo de secagem;
- Com a secagem, ocorre encolhimento do grão, diminuição na sua densidade e no ângulo de repouso;:
- O modelo de encolhimento linear proposto apresentou um bom ajuste aos dados experimentais obtidos na secagem em estufa, e ajuste satisfatório aos dados obtidos no secador de leito fixo e no leito de jorro. Os coeficientes de encolhimento, calculados a partir dos modelos ajustados, foram da ordem de 9%, 15% e 50%, para o feijão processado no secador de leito fixo, na estufa e no leito de jorro;

6.1.2. Com relação aos ensaios preliminares

- A análise das curvas de secagem do feijão verde no secador de leito fixo de bandejas, identificou dois períodos distintos de secagem: períodos de taxa constante e de taxa decrescente, com umidade crítica de 1,5 (base seca).
- Os resultados dos ensaios de secagem combinada leito fixo /leito de jorro mostraram que a pré-secagem em leito fixo até um nível de umidade de 40%, apresentou os melhores resultados em relação ao desempenho do processo, e qualidade do grão;

- As curvas das taxas de evaporação mostraram o importante efeito da secagem combinada sobre o desempenho do processo pois minimiza o tempo total de secagem para se atingir o teor de umidade final desejado, com menor comprometimento da qualidade do grão;
- As curvas características do leito para diferentes cargas de feijão apresentaram o comportamento clássico descrito na literatura, verificando-se entretanto a influência das mudanças nas características físicas dos grãos ao longo do processo de secagem, sobre as variáveis fluidodinâmicas do leito

6..1.3. Com relação cinética de secagem do feijão verde em camada fina:

- Identificou-se nas curvas de secagem um curto período de taxa constante que coincide com o período de aquecimento do material, verificando-se de forma bem definida o período de taxa decrescente
- Para o período de taxa decrescente constatou-se condições de controle interno, com resistência externa ao transporte de umidade desprezível;
- Foi proposto um modelo difusional para geometria esférica, baseado na 2ª Lei de Fick, que aplicado aos dados experimentais obtidos no período de taxa decrescente, permitiu a determinação dos coeficientes de difusão da água nos grãos de feijão;
-
- Apesar das muitas simplificações consideradas, a consistência dos resultados obtidos mostrou que o modelo proposto para o período de taxa decrescente pode ser empregado para uma predição da cinética de secagem do feijão verde em camada fina;

6..1.4. Com relação aos ensaios no leito de jorro com pré-secagem em leito fixo, realizados conforme o planejamento experimental :

- Identificou-se nas curvas de secagem obtidas a partir dos dados psicrométricos do ar na saída e entrada do secador, o importante efeito da vazão e temperatura do ar nas taxas de secagem;

- As taxas de evaporação mostraram-se mais elevadas no início da secagem, tendendo a se estabilizarem ao longo processo. Dentro do curto intervalo de tempo em que os ensaios de secagem no leito de jorro foram realizados, 50 minutos, não foram identificadas taxas de secagem nulas;
- O início do processo de secagem no leito de jorro é acompanhado de intensa transiência de regime, tanto em relação ao comportamento fluidodinâmico do leito com ao aquecimento do material e às taxas de secagem.
- O teor de umidade do ar na entrada do secador, (não controlado no presente trabalho) interfere nas taxas de secagem, assim como o conteúdo inicial de água presente nos grãos de feijão.

6.1.5 Com relação a análise estatística;

- Para a faixa de condições operacionais em que foram conduzidos os ensaios no leito de jorro, não se identificou efeitos significativos das variáveis independentes, temperatura e velocidade do ar de secagem, nem de sua interação, sobre as características físicas dos grãos;
- Para o modelo de primeira ordem, e confiabilidade de 90%, verificou-se efeitos negativos e significativos da temperatura e velocidade do ar na variável resposta razão de umidade definida como a razão entre as umidades inicial e final do feijão no leito de jorro. O efeito da temperatura foi mais importante.
- Mantendo-se a confiabilidade de 90%, verificou-se efeitos positivos e significativos da temperatura e velocidade do ar nas variáveis resposta, frações de água evaporada aos 20 e 50 minutos de secagem. Os efeitos são da mesma ordem de importância em relação as variáveis T e V, porém de maior magnitude sobre a variável resposta fração evaporada aos 50 minutos de secagem;
- Para uma confiabilidade de 95%, apenas a velocidade do ar apresentou efeito positivo e significativo sobre a variável resposta quebra. Comparado aos efeitos da velocidade do ar sobre as demais variáveis resposta, razão de umidade e frações de água evaporado, a ordem de magnitude do efeito da velocidade sobre a quebra é incontestavelmente mais importante.

- Foi possível se obter modelos empíricos estatisticamente significativos e preditivos para as variáveis resposta, frações de água evaporada aos 20 e 50 minutos de secagem e para a quebra.

6.1.6. A análise dos resultados referentes às características do feijão desidratado, a performance dos processos de secagem, conjuntamente com a análise das superfícies de resposta permite concluir que:

- O importante efeito da velocidade do ar na secagem do feijão no que se refere às taxas de evaporação e conseqüentemente à performance do processo de secagem vai de encontro ao efeito desta sobre a quebra do feijão, que além de comprometer a qualidade do produto, provoca prejuízos devido às perdas de material.
- Necessário se faz aprofundar os estudos sobre a secagem do feijão verde, visando-se encontrar uma faixa de condições operacionais que minimize as perdas, sem comprometer a performance de secagem;
- Considerando-se os benefícios sócio-econômicos que o aproveitamento do feijão verde, em escala industrial ou semi-industrial, pode trazer para a região Nordeste e com base nos resultados obtidos, conclui-se que a secagem do feijão verde é potencialmente viável, devendo-se intensificar os estudos que conduzam a otimização do processo de forma econômica e sem comprometimento da qualidade do produto final..

6.1.7 – Com relação a análise sensorial

- Os resultados da análise sensorial do feijão reidratado apresentaram índice, de aceitabilidade maiores que 70% em relação aos atributos sabor e odor, sendo considerados aprovados..

6.2. Sugestões

- Aprofundar os estudos sobre a secagem do feijão verde, visando minimizar a quebra do grão, mediante diminuição gradativa da velocidade do ar à medida que a secagem prossegue;
- Aprofundar a análise das curvas de secagem do feijão verde no leito fixo e no leito de jorro, visando a modelagem e simulação do processo;
- Ampliar o planejamento experimental para uma configuração estrela, incluindo outras variáveis independentes (carga e umidade inicial do feijão) e de resposta (reidratação, atividade de água);
- Quantificar a quebra em termos de amostragem de feijões quebrados e produção de pó em relação a carga de feijão seco produzido no leito de jorro;
- Realizar o estudo de atividade de água do feijão verde e obter as isotermas de desorção em diferentes níveis de temperatura;
- Realizar estudo de vida de prateleira do feijão em diferentes níveis de umidade, visando a conservação e armazenamento do grão;
- Estudar a reidratação do grão, analisando o efeito do conteúdo de água do feijão desidratado e das condições de processamento nas características do produto reidratado.

Capítulo 7

Referências bibliográficas

7. Referências bibliográficas

ABDELRAZEK. I. D., An analysis of thermo-chemical deposition in spouted beds. Ph.D. thesis, Univ. of Tennessee, Knoxville, 1969.

ALVES FILHO, O; MASSARANI,G., Secagem de produtos agrícolas – coletânea de trabalhos 2. Rio de Janeiro, UFRJ, 1987. p. 77-89.

ANTUNES, P.L., Composição e propriedades nutricionais das proteínas do feijão rosinha G2 (*Phaseolus vulgaris L.*). Campinas, 1979. 166p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E., Planejamento e otimização de experimentos. Campinas: Ed. UNICAMP, 1996, 299 p.

BARROZO, M. A. S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T., Secagem de grãos em camada fina: um estudo sobre as equações de secagem, Revista Brasileira de Engenharia Química, v. XIV, n. 1998.

BARROZO, M. A. S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T., Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamento cruzados. Secagem de sementes de soja. In: Tópicos especiais em sistemas particulados. São Carlos: Gráfica da UFSCar, p. 119-159, 1998.

BARROZO, M. A. S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T., Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamento cruzados. Secagem de sementes de soja. In: Tópicos especiais em sistemas particulados. São Carlos: Gráfica da UFSCar, p. 119-159, 1994.

BECKER, H. A., *An investigation of laws governing the spouting of coarse particles*. Chem. Eng. Sci. 13, 245(1961).

BOX, G.E.P.; HUNTER, J.H.; HUNTER, W.G., *Statistics for experimenters – in Introduction do design, data analysis and model bilding*, New York, John Wiley & Sons, 1978, 653p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL,C.W., Drying cereal grains, The Avi Publissing Company Inc., 1974. 265p.

BRUNELLO, G.; PECK, R.E.; DELLA NINA, G., *The drying of barley malt in the spouted bed dryer*, Can. J. Chem. Eng, v.52, p.201-205, 1974.

BRUSEWITZ, G.H., Drying Temperature Effects on Peanut Pod Moisture Variation, *Transations of the ASAE*, n. 17(1), p. 85-87,1974.

BRUSEWITZ, G.H., Corn Moisture Variability During Drying, Mixing and Storage, *J. Agric. Engr. Res.*, n. 37, p. 281-288, 1987.

CANESIN, J. M.; MASSARANI, G., Secagem de arroz em leito de jorro. In: ANAIS DO 3º ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE SECAGEM, 3,1984, Viçosa.

CARPINETTI, L. C. R., Planejamento de experimentos. São Carlos: Departamento de Engenharia Mecânica, EESC/USP, 1996. V. 1. (Mimeografado). In: FARIA, LÊNIO JOSÉ QUERREIRO. Análise experimental do processo de secagem de urucum (*Bixa Orellana L.*) em leito fixo. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1998, 274 p. Tese (Doutorado).

CHAU, N.N.; KUNZE, O.R., Moisture Content Variation among Rice Grains, *Transations of the ASAE*, n. 25(4), p. 1037-1040, 1982.

Centro Nacional de Pesquisa do Arroz e Feijão- “Cultura do Caupi, *Vigna unquiculata (L), Walp*, descrição e recomendações técnicas de cultivo”. Circular Técnico da Embrapa N° 18, 1984.

COSTA, C. M. L., Influência das condições de secagem no rendimento e na composição do óleo essencial de pimenta longa (*piper hispidinervium* C. DC.). Belém: Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, 1999. 214p.

CRANCK, J. The mathematics of diffusion. Oxford: Claredon Press, 2. ed., 1975, 414 p.

CREMASCO, M. A.; ROCHA, S. C. S.; MASSARANI, G., Secagem de milho em leito de jorro para arroz III. In: MASSARANI,G. Secagem de produtos agrícolas – coletânea de trabalhos 2. Rio de Janeiro, UFRN, 1987. p.69-76.

DIAS, M. C.; MARQUES, W.M.; BORGES, S. V.; MANCINI, M. C., Efeito da secagem em leito de jorro bidimensional sobre as propriedades físicas e tecnológicas do feijão preto (*Phaseolus vulgaris*, L.). Ciênc. Tecnol. Aliment., set./dez. 2000, vol.20, no.3, p.299-301.

DINCER, L.; DOST, S., *Na analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying*. Drying Technology, 13 (182): 425-435, 1995.

FARIA, L. J. G., Análise experimental do processo de secagem de urucum (*Bixa Orellana* L.) em leito fixo. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 274 p. Tese (Doutorado).

FRANCO, G., *Tabela de composição química dos alimentos*, Rio de Janeiro, Editora Atheneu, 9ª edição, 1997, 306p.

FREITAS, M.E.A.; PASSOS, M.L., *Estudo da secagem de grãos e sementes em leito de jorro em regime transiente*, In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Viçosa, 1995. Resumo. Viçosa, UFV, 1995. Res.146.

FURTUNATO, A.A.; MAGALHÃES, M. M. A., “Estudo das características físico-químicas, microbiológicas e bioquímicas do feijão verde *Vigna unguiculata* (L), Walp, e sua coservação” Anais do 1º Congresso Brasileiro de Engenharia Química de Iniciação Científica, pp 93-96, São Carlos, 1995.

FURTUNATO, A.A. “Estudo do Processamento Térmico do Feijão Verde, *Vigna unguiculata (L), Walp*, em salmoura acidificada, acondicionado em latas. Relatório Interno, UFRN, Natal,1995.

FURTUNATO, A. A.; MAGALHAES, M. M. A., MARIA, Z. L.. Estudo do feijão verde (*Vigna unguiculata (L) Walp*) minimamente processado. Ciênc. Tecnol. Aliment., set./dez. 2000, vol.20, no.3, p.299-301.

GELPERIN, N. I.; AINSHTEIN, V. G.; GELPERIN, E. N.; L’VOVA, S. D., *Hydrodynamics properties of fluidized granular materials in conical and conical-clindrical sets*. Khin. Tekhnol. Top. Masel 5, No. 8, 51(1960).

GHOSH, B., A.study on the spouted bed – A theoretical analysis. Indian Chem. Engr. 7, 16. (1965).

GOLTSIKER, A. D., Doctoral dissertation, Lensovet Technol. Inst., Leningrad, 1967. Quoted by Romankov and Rashkovskaya [201, Chapter 1].

GORSHTEIN, A.E.; MAKHULENOV, I.P., *On the mechanics of formation of spouting beds*, Zh. Prikl. Khim. (Leningrad) 37, 1887 (1964).

HAWLADER, M. N. A.; UDDIN, M. S.; HD, J. C.; *Drying characteristics of tomatoes*. Journal of Food Engineering, 14 259-268, 1991.

HENDERSON, J. M.; HENDERSON, S. M., A computacional procedure for deepbed drying analysis Journal of Agricultural Engineering Research. V. 13, p. 87-95, 1968.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz – *Métodos Químicos e Físicos para Análises de Alimentos*. São Paulo, 1976, v.1, 316 p.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz – *Métodos Químicos e Físicos para Análises de Alimentos*. 3 ed., São Paulo, 1985.

JAYAS, D.S.; CENKOWSKI,S.; PABIS,S.; MUIR,W.E. Review of thin-layer drying and wetting equations, Drying Technology, v.9, n.3, p.551-588, 1991.

JUMAH, R. Y.; MUJUNDAR,S.A. A Mathematical Model for Constant and Intermittent Batch Drying of Grains in a Novel Rotating Jet Spouted Bed, Drying Tecnology,_v.14, n. 3 e 4, p.765-803,1996.

JUNIOR, P. C. A.; CORREA, P. C., Efeitos imediato e latente da secagem de sementes de feijão colhidas com diferentes níveis de umidade , Ciênc. Agrotec., Larvras, v.24 (edição especial), p. 33-40, dez 2000.

KALWAR, M.I.; RAGHAVAN, G.S.V. Batch drying of shelled corn in two-dimensional spouted beds with draft plates, Drying Technology, v.11, n.2 p.339-354,1993.

KEEY, R. B., Drying principles and practice. New York: Pergamon, 1972, 381.

KEEY. R. B. Drying of loose and particule materials. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992, 537 p.

LEWIS, W. K., The rate of drying of solid materials. Industrial Engineering Chemical, v. 13. p. 427, 1921.

LIMA, A. C.C., *Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de forro fluidizado*. Campinas, 1995. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

LUIKOV, A. V., Heat an mass transfer in capillary porous bodies. London: Pergamon Press, 1966, 380 p.

MADONNA, L. A.; LAMA, R. F.; AND BRISSON, W. L., Solids-air jets. Brit. Chem. Eng. 6 524. (1961).

MALECK, M. A.; MADONNA, L. A. ; LU, B. C. Y. Estimation of spout diameter in a spouted bed. Ind. Eng. Process. Des. Develop., v. 2, p.30, 1965..

MANURUNG, F., *Studies in the spouted beds technique with particular reference to low temperature coal carbonization*. Ph.D. thesis, Univ. of New South Wales, Kensington, Australia, 1964.

MATHUR, K. B.; GISHLER. P. E., *A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying*, J Appl. Chem., v. 5, p. 624, 1955a apud.

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. Spouted beds, New York, Academic Press, 1974. 304 p.

MATHUR, K. B.; GISHLER. P. E., A technique for contacting gases with coarse solid particles. A.I. Ch. E. J. 1, 157 (1955).

MAYTA, S. M. A.; MASSARANI, G.; PINTO, J. C., Modeling of grain drying in continuous cross-flow sliding bed dryers. The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 74, p. 797-805, 1996.

MEDEIROS, M. F. D., *Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 233 p. Tese (Doutorado).

MOHSENIN, N. N., *Physical properties of plant and animal materials*. New York, Gordon and Breach Science Publis (1978)

MOREY, R.V.; KEENER H.M.; THOMPSON T.L.; WHITE, G.M.; BAKKER-ARKEMA, F.W., The Present Status of Grain Drying Simulation, *ASAE Paper*, n. 78, 1978.

MUJUNDAR, A. S., “ Drying of Granular Materials, lecture notes”. Montreal: Department of Chemical Engineering, McGill University, 1981.

MUJUMDAR, A. S., Spouted beds: Principiles and recente developments. *Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos – ENEMP*. São Carlos, v. 1, p. 03-13, 1989.

MUJUMDAR, A. S., *Handbook of industrial Drying*, Marcel Dekker Inc., New York, 1995, 742 p.

MUKHLENOV, I.P. AND GORSHTEIN, A.E., *Investigation of a spouting bed*, Khim. Prom. (Moscow) 41, 443 (1965).

MUKHLENOV, I.P. AND GORSHTEIN, A.E., Hydraulic resistance of the suspended layer in grateless conical sets. *Zh. Prikl. Khim. (Leningrad)*37. 609 (1964).

MUKHLENOV, I.P. AND GORSHTEIN, A.E., Hidrodynamics of reactors with a spouting bed of granular materials. *Vses. Konf. Khim. Reactrom Novosibirsk*. 3. 553 (1965).

NASCIMENTO, C. A. O.; DELLA NINA, G.; BRUNELLO, G., Perda de carga em leito de jorro constituído por misturas de partículas, 1º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, 1976.

NIKOLAEV, A. M.; GOLUBEV, L. G., Basic hydrodynamic chacacteristics of the spouting bed. *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim Tekhnol*. 7. 855 (1964).

- OLIVEIRA, C. A., Estudo da secagem em leito de jorro, com condições operacionais intermitentes, de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade “carioca”. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 144 p. Dissertação (Mestrado).
- OVERHULTZ, D.G.; WHITE, G.M.; HAMILTON, H.E.; ROSS, I.J., Drying Soybean with Heated Air, *Transactions of the ASAE*, n. 16(1), p. 112-113, 1973.
- PAGE, C., *Factors influencing the maximum rates of drying shelled corn in layer*. West Lafayette, Department of the Agricultural Engineering. Purdue University, 1949.
- PALLAI, I.; NÉMETH, J., *Analysis of flow forms in a spouted bed apparatus by the so called phase diagram*. Int. Congr. Chem. Eng. (CHISA), 3rd, Prague, September 1969, Paper No. C2.4. Czechoslovak Society for Industrial Chemistry. Rosa.
- PARRY, J.L., Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review, *J. agric. Engng. Res.*, v.32, n. 1 p.1-29, 1985.
- PAULO FILHO, M., *Análise de danos em sementes de feijão pela fluidodinâmica em leito de jorro*. 1999 114f., Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.
- PAULO FILHO, M.; ROCHA, S. C. S., “Avaliação de danos em sementes de feijão pela fluidodinâmica em leito de jorro cone-cilindrico”. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Publicado em CD ROM- Águas de São Pedro, setembro de 2000.
- PETERSON, W. S., “Spouted bed drier”, *Can. J. Chem.Eng.*, 40, 226, 1962.
- PUZZI, D., Manual de armazenamento de grãos: armazéns e silos, São Paulo, Agronômica Ceres, 1977. 405 p.

ROMERO-PEÑA, LECSI, M., Estudo de pré-tratamento par a obtenção de tomate desidratado em fatias. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 129 p. Dissertação (Mestrado).

RUMSEY. T.R., Walnut moisture Content Variability During Fixed Bed Drying, *ASAE Paper*, n. 87, 1987.

SENADEERA, W.; BHANDARI, B. R.; YOUNG, G.; WIJESINGHE, B., Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering*, 58, 277-283, (2003).

SHAN-HUA, C., Modelos empíricos e teóricos de secagem analisados com base em dados par feijão, Campinas, 1989. 245p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

SHERWOOD. T.K., *The drying of Sodids II. Industrial and Engineering Chemistry*, vol 22, n°10, 976-980. Oct. 1929.

TAQUEDA, M. E. S.; COSTA, C. M. L.; FARIA, L. J. G., Planejamento e análise estatística de experimentos aplicados ao beneficiamento de produtos naturais. In: FARIA, L. J. G. e COSTA, C. M. L. (Coords). *Tópicos especiais em tecnologia de produtos naturais*. Belém: UFPA/NUMA/POEMA, p. 205-219, 1998. (Série Poema, 7).

TEIXEIRA E.; MEINERT, E. M.; BARRETA, P. A., *Análise Sensorial de Alimentos*, Florianópolis: editora da UFSC, 1987.

TSVIK, M. Z.; NABIEV, M. N.; RIZAEV, N. U.; MERENKOV, K. V.; VYZGO, V. S., The velocity for external spouting in the combined process for production of granulated fertilizers. *Uzb. Khim. Zh.* 11, No. 2, 50 (1967).

VIEIRA, B. M., et al., *Produção de grãos de feijão*, Cultura do Feijoeiro Comum no Brasil, coordenado por Ricardo Silva et al, Piracicaba, Potafos, 1996.

VISWANATHAN, K.; LYALL, M. S.; RAYCHAUDHURI, B. C. *Spouted bed drying of agricultural grains*, Can. J. Chem. Eng, v.64, p.223-232, 1986.

XAVIER, N.J.D. Comunicação pessoal, Campinas, 1994.

ZIMMERMANN, O. J. M.; TEIXEIRA, G. M., *Origem e Evolução: Cultura do Feijoeiro Comum no Brasil*, coordenado por Ricardo Silva et al, Piracicaba, Potafos, p.57-68, 1996.

WADSWORTH, J.I.; MATTHEWS, J.; SPADARO, J.J., Moisture Content Variation in Freshly Harvested Rice Associated with Kernel Thickness, *Transation of the ASAE*, n. 25(4), p. 1127-1130, 1982.

Anexos

Anexo 1

Tabela A1 - Análise de variância – razão de umidade

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Números de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	18,10	2	9,0500
Resíduos	18,98	4	4,7443
Falta de Ajuste	18,60	2	9,2986
Erro Puro	0,38	2	0,1900
Total	37,08	6	

Tabela A2 - Análise da variância – evaporação em 20 minutos

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Números de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	34,98	2	17,4893
Resíduos	3,25	4	0,8125
Falta de Ajuste	2,91	2	1,4563
Erro Puro	0,34	2	0,1686
Total	38,23	6	

Tabela A3 - Análise de variância – evaporação em 50 minutos

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Números de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	98,71	2	49,3540
Resíduos	8,33	4	2,0820
Falta de Ajuste	2,56	2	1,2799
Erro Puro	5,77	2	2,8840
Total	107,04	6	

Tabela A4 - Análise de variância – quebra

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Números de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	483,12	1	483,1204
Resíduos	50,30	5	10,0598
Falta de Ajuste	48,81	3	16,2710
Erro Puro	1,49	2	0,7429
Total	533,42	6	

Tabela A5 – Notas relativas a três amostras de feijão verde (A- *in natura*, B- branqueado/ congelado, C desidratado -) – aparência

Aparência				
Provedor	Amostras			Média
	A	B	C	
1	6	6	7	6,33
2	9	9	8	8,67
3	7	4	6	5,67
4	8	5	7	6,67
5	5	7	4	5,33
6	8	8	7	7,67
7	8	3	3	4,67
8	8	7	6	7,00
9	8	8	8	8,00
10	8	8	3	6,33
11	8	8	6	7,33
12	7	7	5	6,33
13	3	7	2	4,00
14	8	8	8	8,00
15	8	3	8	6,33
16	8	9	6	7,67
17	6	7	7	6,67
18	8	9	8	8,33
19	6	9	7	7,33
20	7	8	6	7,00
21	7	7	7	7,00
Média	7,19	7,00	6,14	6,78

Tabela A6 - Análise de variância (ANOVA) – aparência

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F
Entre	82,89	20,00	4,14	1,91

provedores				
Entre amostras	13,08	2,00	6,54	3,01
Resíduos	86,92	40,00	2,17	
Total	182,89	62,00		

Tabela A7– Notas relativas a três amostras de feijão verde (A- *in natura*, B- branqueado/ congelado, C desidratado -)textura

Textura				
Provedor	Amostras			Média
	A	B	C	
1	4	8	3	5,00
2	7	9	8	8,00
3	4	7	4	5,00
4	7	6	8	7,00
5	5	5	4	4,67
6	8	8	8	8,00
7	9	2	4	5,00
8	8	8	4	6,67
9	7	7	4	6,00
10	8	7	5	6,67
11	9	9	7	8,33
12	8	8	4	6,67
13	7	8	4	6,33
14	9	9	7	8,33
15	9	7	5	7,00
16	7	8	4	6,33
17	7	8	7	7,33
18	7	9	6	7,33
19	8	7	8	7,67
20	7	8	6	7,00
21	7	7	7	7,00
Média	7,24	7,38	5,57	6,73

Tabela A8 - Análise de variância (ANOVA) – textura

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F
Entre provedores	73,08	20,00	3,65	1,85
Entre amostras	42,51	2,00	21,25	10,79

Resíduos	78,83	40,00	1,97	
Total	194,41	62,00		

Tabela A9 – Notas relativas a três amostras de feijão verde (A- *in natura*, B- branqueado/ congelado, C desidratado -)-sabor

Sabor				
Provedor	Amostras			Média
	A	B	C	
1	4	8	6	6,00
2	9	9	9	9,00
3	7	4	8	6,33
4	8	6	8	7,33
5	8	4	4	5,33
6	8	8	9	8,33
7	9	1	3	4,33
8	7	6	7	6,67
9	7	7	6	6,67
10	9	6	7	7,33
11	9	9	8	8,67
12	8	4	6	6,00
13	6	6	6	6,00
14	8	8	8	8,00
15	8	7	9	8,00
16	8	9	4	7,00
17	8	8	8	8,00
18	8	6	8	7,33
19	7	8	8	7,67
20	8	8	8	8,00
21	7	7	9	7,67
Média	7,67	6,62	7,10	7,13

Tabela A10- Análise de variância (ANOVA) – sabor

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F
Entre provedores	80,98	20,00	4,05	1,79
Entre amostras	11,56	2,00	5,78	2,56
Resíduos	90,44	40,00	2,26	
Total	182,98	62,00		

Tabela A11 – Notas relativas a três amostras de feijão verde (A- *in natura*, B- branqueado/ congelado, C desidratado -)- cor

Cor				
Provedor	Amostras			Média
	A	B	C	
1	6	8	7	7,00
2	8	9	7	8,00
3	7	8	6	7,00
4	8	8	7	7,67
5	7	6	2	5,00
6	8	8	7	7,67
7	6	2	5	4,33
8	8	8	6	7,33
9	8	8	7	7,67
10	9	8	4	7,00
11	8	7	6	7,00
12	7	8	4	6,33
13	4	8	2	4,67
14	8	8	8	8,00
15	5	8	6	6,33
16	7	9	6	7,33
17	8	7	8	7,67
18	7	9	8	8,00
19	4	9	6	6,33
20	6	8	6	6,67
21	7	7	7	7,00
Média	6,95	7,67	5,95	6,86

Tabela A12 - Análise de variância (ANOVA) – cor

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F
Entre provedores	67,71	20,00	3,39	1,86
Entre amostras	31,14	2,00	15,57	8,55
Resíduos	72,86	40,00	1,82	
Total	171,71	62,00		

Tabela A13 – Notas relativas a três amostras de feijão verde (A- *in natura*,

B- branqueado/ congelado, C desidratado
 -)– odor

Odor				
Provedor	Amostras			Média
	A	B	C	
1	7	8	8	7,67
2	9	9	8	8,67
3	8	3	8	6,33
4	8	5	7	6,67
5	7	5	4	5,33
6	8	8	9	8,33
7	9	2	5	5,33
8	7	6	6	6,33
9	7	7	7	7,00
10	7	7	4	6,00
11	8	8	8	8,00
12	6	6	5	5,67
13	7	7	7	7,00
14	9	9	9	9,00
15	6	3	9	6,00
16	9	9	5	7,67
17	7	6	8	7,00
18	6	7	8	7,00
19	4	8	8	6,67
20	5	7	7	6,33
21	7	7	7	7,00
Média	7,19	6,52	7,00	6,90

Tabela A14 - Análise de variância (ANOVA) – odor

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F
Entre provedores	63,43	20,00	3,17	1,26
Entre amostras	4,95	2,00	2,48	0,98
Resíduos	101,05	40,00	2,53	
Total	169,43	62,00		