



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

ELZA BRANDÃO SANTANA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO E
DA SECAGEM DE SEMENTES DE LINHAÇA (*Linum usitatissimum* L.) EM
LEITO DE JORRO**

**BELÉM
2011**

ELZA BRANDÃO SANTANA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO E
DA SECAGEM DE SEMENTES DE LINHAÇA (*Linum usitatissimum* L.) EM
LEITO DE JORRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

AREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos

ORIENTADOR: Prof. Dr. Cláudio Roberto Orofino Pinto

ORIENTADORA: Profa. Dra. Cristiane Maria Leal Costa

BELÉM

2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Santana, Elza Brandão

Análise experimental do comportamento fluidodinâmico e da secagem de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em leito de jorro /Elza Brandão Santana; orientadores, Cláudio Roberto Orofino Pinto e Cristiane Maria Leal Costa._ Belém - 2011

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2011

1. Processos em leito de jorro 2. Secagem 3. Linhaça- sementes
I. Título

CDD 22.ed. 660.284292

ELZA BRANDÃO SANTANA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO E
DA SECAGEM DE SEMENTES DE LINHAÇA (*Linum usitatissimum* L.) EM
LEITO DE JORRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

DATA DA AVALIAÇÃO: ____/____/____

CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cláudio Roberto Orofino Pinto
(FEQ – ITEC – UFPA – Orientador)

Profa. Dra. Cristiane Maria Leal Costa
(FEQ – ITEC – UFPA – Orientadora)

Prof. Dr. Raul Nunes de Carvalho Júnior
(FACET/UFPA- Campus de Abaetetuba)

Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo
(FEQ – ITEC – UFPA – Membro)

Prof. Dr. Lênio José Guerreiro de Faria
(FEQ – ITEC – UFPA – Membro)

Prof. Dr. Célio Augusto Gomes de Souza
(FEQ – ITEC – UFPA – Suplente)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família:
ao meu pai, meu irmão e meu
sobrinho que são as motivações de
minha vida.

AGRADECIMENTOS

À **DEUS**, pela sua bondade e misericórdia, ao permitir-me chegar até aqui e por ter posto em meu caminho algumas pessoas que, de tão especiais, foram fundamentais para a concretização deste sonho;

Aos meus orientadores: Professora Doutora **Cristiane Maria Leal Costa**, pela generosidade e paciência ao me orientar neste trabalho e ao Professor Doutor **Cláudio Roberto Orofino Pinto** pela orientação, paciência, confiança durante a realização deste trabalho;

À minha família, principalmente o meu pai **Ademir Cardoso Santana** e meu sobrinho **Lucas Brandão Santana**, sempre pacientes e compreensíveis a minha rotina acadêmica;

Em especial ao meu irmão **Hélio Brandão Santana** pela força nos momentos de desânimos;

À minha família acadêmica **Maria da Conceição da Costa Valente, Gisele Domont Martins, João Monteiro e Kelly Sarmento**, pela força e incentivo durante a realização deste trabalho.

Ao Professo M.Eng. **Reimar de Oliveira Lourenço** pelas orientações que foram bases para as análises iniciais deste trabalho;

A **Sr. Antônio Ambrósio dos Santos Valente**, responsável pela construção da base cônica sem o qual não seria possível a montagem da unidade experimental;

Ao discente da Engenharia Química **Madson Melo** pelo auxílio em meu trabalho que foi de grande importância nas análises experimentais;

Ao Engenheiro Químico M. Eng. **Matheus Furtado** e a Técnica de Laboratório **Rafaela Pinheiro** do LEQ, pelo auxílio e conhecimentos repassados, que muito contribuíram na realização deste trabalho;

Ao Senhor **Ferdinando Silva**, Técnico do Laboratório de Secagem e Recobrimento de Partículas do LEQ, pela paciência, amizade e carinho que teve comigo ao longo da realização deste trabalho;

Ao Professor Doutor **Lênio Faria** e sua equipe do laboratório de Engenharia de Produtos Naturais (LEPRON) por disponibilizar a infraestrutura necessária ao desenvolvimento deste trabalho;

Ao Técnico em Química e funcionário da FEA/ITEC/UFPA, Senhor **Mário Carneiro**, responsável pela análise da caracterização centesimal da semente de linhaça;

A Equipe do Laboratório de Geociências da UFPA, pela a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da semente de linhaça;

Enfim, a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A linhaça é a semente da planta do linho (*Linum usitatissimum* L.), uma espécie polimorfa originária do linho, sendo considerada uma das 6 plantas atualmente reconhecidas pelo Instituto Nacional do Câncer dos Estados Unidos (US National Cancer Institute - NCI) por suas propriedades específicas no combate ao câncer. Parte desse reconhecimento deve-se a notável característica de ser a fonte mais rica de precursores de lignina (esteróide vegetal de ação análoga ao estrógeno de mamíferos) na dieta humana. A variedade utilizada neste trabalho foi a “Linseed” de cor marrom e o objetivo deste trabalho foi analisar a fluidodinâmica dessa partícula em leito de jorro, estabelecida pelas medidas de tomadas de queda de pressão no leito a partir das deflexões em relação às velocidades de ar crescente e decrescente, obtendo assim informações para a determinação de parâmetros correlacionados ao processo, como: velocidade de mínimo jorro, queda de pressão máxima, queda de pressão no jorro estável e queda de pressão no mínimo jorro. Estes valores foram comparados aos correspondentes valores obtidos por equações empíricas citadas na literatura. Foi também avaliado o comportamento da secagem da matéria prima, mediante um planejamento estatístico 2^2 , tendo com as variáveis de entrada temperatura do gás (T_g) e o tempo de operação (t), para a quantificação das variáveis de resposta razão de umidade (X_r , adim.), germinação (G , %) e o índice de velocidade de germinação (IVG , t^{-1}) e analisadas estatisticamente pelo planejamento fatorial completo com três repetições no ponto central. A cinética de secagem das sementes de linhaça, previamente umidificadas, foi realizada nas temperaturas de 45, 55 e 65 °C, e dentre os três modelos propostos, o modelo de Midilli *et al.*, foi que melhor descreveu aos dados experimentais. Para os parâmetros fluidodinâmicos observou-se que a correlação de Gorshtein e Mukhlenov (1965) apresentou os menores desvios para queda e pressão de mínimo jorro e jorro estável, Abdelrazek (1969) apresentou o menor desvio para a velocidade no mínimo jorro e Pallai e Németh (1969) descreveu adequadamente a queda de pressão máxima. Foi observado que a carga de sementes e a temperatura exerceram influência significativa nos parâmetros fluidodinâmicos em leito de jorro. Com base na análise do planejamento estatístico proposto pode-se concluir que os parâmetros de entrada temperatura do gás e tempo de operação exerceram influência significativa sobre todas as variáveis de resposta, sendo observada influência quadrática das variáveis de entrada ao se observar a significância da curvatura sobre os parâmetros: Razão de umidade, Germinação e Índice de Velocidade de Germinação, propondo-se modelos representativos destes parâmetros com a presença da curvatura, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) superior a 99 %.

Palavras chave: leito de jorro, fluidodinâmica, secagem, linhaça.

ABSTRACT

Flaxseed is the seed of the flax plant (*Linum usitatissimum* L.) is polymorphic native flax, and is considered one of the six plants currently recognized by the National Cancer Institute of the United States (U.S. National Cancer Institute - NCI) for their properties specific anti-cancer. Part of this recognition should be the remarkable characteristic of being the richest source of lignin precursors (vegetable steroid action analogous to the mammalian estrogen) in the human diet. The variety used in this work was the "Linseed" brown and objective of this study was to analyze the fluid-dynamics of spouted bed. The fluid-dynamics was defined by the measurements of the bed pressure drop as a function of the flow rate for different seeds loads, so getting information to determine parameters related to the process, such as: minimum spouting velocity, maximum pressure drop, stable spout pressure drop and minimum spouted pressure drop. These values were compared with the values obtained by empirical equations found in the literature. It was also studied the drying of raw material, through a full factorial design 2^2 with com three central point and the statistical analysis of the results were realized and the effects of independent variables spouting air temperature (T_g) and time (t) on the responses humidity ratio (X_r , adim.), germination (G , %) and germination speed index (GSI , t^{-1}) were evaluated. The optimal operational point was determined as function of the entrance variables applying the concept of global desirability. The kinetics of drying was performed at temperatures of 45, 55 and 65 °C, and the Midilli *et al.* model showed the best fitting to the experimental data. For the fluid-dynamic parameters showed that the correlation of Gorshtein and Mukhlenov (1965) showed the lowest deviations for minimum spouted pressure drop and pressure drop in the steady spouted, Abdelrazek (1969) showed the smallest deviation to the minimum spouting velocity and Pallai and Németh (1969) described adequately the maximum pressure drop. It was observed that the mass of seeds processed and air-spouted temperature exerted a significant influence on fluid-dynamic. Based on the statistical analysis of experimental noticed that all variable T_g e t are statistically significant for the responses: humidity ratio, germination and germination speed index, proposing models representative of these parameters with the presence of curvature, obtaining the coefficient of determination (R^2) greater than 99 %.

Keywords: spouted bed, fluid dynamics, drying, flaxseed.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fotografia 2.1	Planta do linho	21
Fotografia 2.2	Flores características da linhaça	21
Desenho 2.1	As cachopas maduras	22
Desenho 2.2	Um corte para visualização interna da cachopa com 7 a 11 sementes de linhaça	22
Fotografia 2.3	Linhaça Marrom (a) e Linhaça Dourada (b)	23
Fotografia 2.4	Variedades de produtos de linhaça	27
Desenho 2.3	Partes constituintes das sementes	28
Desenho 2.4	Semente dicotiledônea (feijão) e semente monocotiledônea (milho)	30
Desenho 2.5	Diferentes fases de germinação para o milho (<i>Zeamays-Poaceae</i>)	36
Desenho 2.6	Diferentes fases de germinação para o feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	36
Gráfico 2.1	Curva típica de secagem	39
Gráfico 2.2	Curva típica da taxa de secagem (<i>X versus W</i>)	39
Diagrama 2.1	Classificação de <i>Geldart</i> para fluidização de partículas com ar e em condições ambiente	43
Desenho 2.7	Leito de jorro com suas regiões características	46
Diagrama 2.2	Regime para o trigo	47
Esquema 2.1	Regimes Dinâmicos obtidos em leito de jorro	51
Gráfico 2.2	Curva característica da queda de pressão em relação à vazão de gás	52
Esquema 2.2	Equipamento utilizado no recobrimento de partículas em leito de jorro	62
Fotografia 3.1	Sementes de linhaça marrom <i>in natura</i>	70
Esquema 3.1	Elipsoide triaxial e seus eixos principais	71
Esquema 3.2	Dimensões do leito	75
Fotografia 3.2	Leito de jorro	75
Esquema 3.3	Montagem do equipamento	76
Fotografia 3.3	Equipamento utilizado na fluidodinâmica	76
Imagem 4.1	(a) Sementes de linhaça marrom <i>in natura</i> , (b) Superfície da	84

	semente de linhaça 500 vezes ampliada	
Diagrama 4.1	Classificação das sementes de linhaça segundo Geldart (1973)	85
Gráfico 4.1	Comportamento fluidodinâmico para diferentes cargas de sementes de linhaça a temperatura ambiente	86
Gráfico 4.2	Comportamento fluidodinâmico da carga de 1590 g nas três temperaturas e a temperatura ambiente	91
Gráfico 4.3	Comportamento fluidodinâmico da carga de 2445 g nas três temperaturas e a temperatura ambiente	92
Gráfico 4.4	Comportamento fluidodinâmico da carga de 2955 g nas três temperaturas e a temperatura ambiente	92
Gráfico 4.5	Curva de secagem nas diferentes temperaturas ajustados ao modelo de Midilli <i>et al.</i> (2002)	97
Gráfico 4.6	Comportamento fluidodinâmico da carga de 1590 g a velocidade crescente e decrescente	100
Gráfico 4.7	Barras dos efeitos estimados e combinados para a resposta Razão de umidade	103
Gráfico 4.8	Distribuição normal dos resíduos para a Razão de umidade	104
Gráfico 4.9	Barras dos efeitos estimados e combinados para a resposta Germinação	106
Gráfico 4.10	Distribuição normal dos resíduos para a Germinação	107
Gráfico 4.11	Barras dos efeitos estimados e combinados para a resposta IVG	109
Gráfico 4.12	Distribuição normal dos resíduos para a resposta IVG	111
Gráfico 4.13	Perfis para os valores preditos e a função desejabilidade	113
Gráfico A1	Distribuição dos resíduos da cinética a temperatura de 45 °C	130
Gráfico A2	Distribuição dos resíduos da cinética a temperatura de 55 °C	131
Gráfico A3	Distribuição dos resíduos da cinética a temperatura de 65 °C	132
Gráfico B1	Comportamento fluidodinâmico para a temperatura de 28 °C	134
Gráfico B2	Comportamento fluidodinâmico para a temperatura de 45 °C	135
Gráfico B3	Comportamento fluidodinâmico para a temperatura de 55 °C	136
Gráfico B4	Comportamento fluidodinâmico para a temperatura de 65 °C	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição de Gorduras da Semente de Linhaça	25
Tabela 2.2	Equações de secagem	41
Tabela 3.1	Comportamento de escoabilidade de sólidos em relação ao ângulo de repouso	72
Tabela 3.2	Equações para queda de pressão máxima	78
Tabela 3.3	Equações para queda de pressão no jorro estável	78
Tabela 3.4	Equações para queda de pressão no jorro mínimo	78
Tabela 3.5	Equações para velocidade no jorro mínimo	78
Tabela 3.6	Modelos utilizados para avaliar a cinética de secagem	79
Tabela 3.7	Valores codificados e originais para as variáveis do planejamento	82
Tabela 3.8	Matriz de Planejamento	82
Tabela 4.1	Caracterização física de semente de linhaça <i>in natura</i>	83
Tabela 4.2	Caracterização qualitativa de semente de linhaça <i>in natura</i>	83
Tabela 4.3	Resultados da composição centesimal das sementes de linhaça <i>in natura</i>	84
Tabela 4.4	Parâmetros fluidodinâmicos para as diferentes cargas	87
Tabela 4.5	Comparação entre queda de pressão máxima experimental e calculada por correlações na literatura	88
Tabela 4.6	Comparação entre queda de pressão no jorro estável experimental e calculada por correlações na literatura	89
Tabela 4.7	Comparação entre queda de pressão no jorro mínimo experimental e calculada por correlações na literatura	89
Tabela 4.8	Comparação entre U_{mj} experimental e calculada por correlações na literatura	90
Tabela 4.9	Análise da perda de pressão máxima nas diferentes temperaturas	93
Tabela 4.10	Comparação entre queda de pressão no jorro estável experimental e calculada por correlações na literatura	94
Tabela 4.11	Comparação entre queda de pressão no jorro mínimo experimental e calculada por correlações na literatura	95
Tabela 4.12	Comparação entre U_{mj} experimental e calculada por correlações na literatura	96
Tabela 4.13	Parâmetros dos modelos aplicados aos dados das análises experimentais	99

	das curvas de cinética na fluidodinâmica em leito de jorro	
Tabela 4.14	Parâmetros do modelo de Midilli <i>et al.</i> em função da temperatura	100
Tabela 4.15	Matriz de experimentos e os resultados das variáveis de resposta	101
Tabela 4.16	Estimativa dos efeitos para a variável de resposta Razão de Umidade	102
Tabela 4.17	Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta Razão de umidade	102
Tabela 4.18	Coeficientes de regressão para Razão de umidade	103
Tabela 4.19	Estimativa dos efeitos para a variável de resposta Germinação	105
Tabela 4.20	Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta Germinação	105
Tabela 4.21	Estimativa dos efeitos para a variável de resposta IVG	108
Tabela 4.22	Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta IVG	109
Tabela 4.23	Coeficientes de regressão para IVG	110
Tabela 4.24	Parâmetros utilizados na otimização das respostas do processo de secagem em leito de jorro	112
Tabela C1	Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta Razão de Umidade	139
Tabela C2	Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta Germinação	139
Tabela C3	Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta IVG	139
Tabela D1	Valores escalonados de d ou D	142

LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS

- A - área do leito [L^2]
- A_c - área do cone [L^2]
- Ar - número de arquimedes [-]
- b - pressão barométrica local [$ML^{-1}T^{-2}$]
- d_1, d_2 e d_3 - dimensões da esfera [L]
- D_b - diâmetro relacionado geometricamente às outras dimensões do leito cônico [L]
- D_c - diâmetro do leito cilíndrico [L]
- D_{CC} - diâmetro circunscrito [L]
- D_{eff} - coeficiente de difusão efetivo de massa [L^2T^{-1}]
- d_f - graus de liberdade [-]
- D_i - diâmetro da entrada de ar [L]
- d_i - diâmetro de abertura da peneira [L]
- D_{IC} - diâmetro inscrito [L]
- d_p - diâmetro da partícula [L]
- E - expansão do leito [-]
- g - aceleração gravitacional [LT^{-2}]
- G - germinação [-]
- G_i - número total de plântulas germinadas [-]
- G_t - número total de plântulas da amostra [-]
- G_r - número total de plântulas da amostra [-]
- H- altura do leito [L]
- H_{je} - altura do leito no jorro estável [L]
- H_{jm} - altura do leito jorro mínimo [L]
- H_{max} - altura máxima do leito de jorro [L]
- H_{mf} - altura do leito na mínima fluidização [L]
- H_{min} - altura do leito de porosidade mínima [L]
- H_{PO} - queda de pressão na placa de orifício [$ML^{-1}T^{-2}$]
- K - coeficiente de secagem (T^{-1})
- K_0, K_1, a, b, c, g, h - constantes do modelo [-]
- L_p - espessura da placa [L]
- m_p - massa da partícula [M]
- m_{ss} - massa de sólidos secos [M]

m_{total} - massa total da amostra [M]
 m_w - massa de água [M]
 n - número de experimentos [-]
 $n-3$ - ômega 3 [-]
 $n-6$ - ômega 6 [-]
 P_1 - pressão estática a montante de placa de orifício [$ML^{-1}T^{-2}$]
 Q - vazão volumétrica [L^3T^{-1}]
 Q_m - vazão mássica [MT^{-1}]
 Re - número de Reynolds [-]
 r_e - raio da esfera [L]
 T - temperatura [θ]
 t - tempo [T]
 U_{jm} - velocidade no jorro mínimo [LT^{-1}]
 V_p - volume de partículas [L^3]
 W - taxa ou velocidade de secagem [$ML^{-2}T^{-1}$]
 X_0 - teor de umidade inicial [-]
 X_1, X_2 - variáveis codificadas [-]
 X_{bs} - teor de umidade em base seca [-]
 X_{eq} - umidade de equilíbrio [-]
 x_i - fração de massa retida [-]
 X_{livre} - umidade livre do material [-]
 X_r - razão de umidade [-]
 Y e Y' - valores experimentais e preditos [-]
 ΔP - queda de pressão [$ML^{-1}T^{-2}$]
 ΔP_{je} - queda de pressão no jorro estável [$ML^{-1}T^{-2}$]
 ΔP_{jm} - queda de pressão no jorro mínimo [$ML^{-1}T^{-2}$]
 ΔP_{mas} - queda de pressão máxima [$ML^{-1}T^{-2}$]
IVG - índice de velocidade de germinação [T^{-1}]

Letras gregas

ε - porosidade do leito [-]
 ε_{mf} - porosidade do leito na mínima fluidização [-]
 θ - ângulo da base [-]

λ - fator da forma da partícula [-]

μ - viscosidade absoluta [$ML^{-1}T^{-1}$]

ρ_b - massa específica aparente do sólido [ML^{-3}]

ρ_f - massa específica do fluido [ML^{-3}]

ρ_p - massa específica da partícula [ML^{-3}]

ϕ - esfericidade [-]

Abreviações

ABRATES - Associação Brasileira de Sementes

AOSA - Association of Official Seed Analysis

ISTA – International Seed Testing Association

TPG - Teste Padrão de Germinação

SUMÁRIO

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO	19
CAPITULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. SEMENTE DE LINHAÇA	21
2.1.1. Características agronômicas	21
2.1.2. O cultivo	23
2.1.3. Produção e importância econômica	24
2.1.4. Alimento funcional e composição	24
2.1.5. Comercialização e processamento	27
2.2. FISIOLOGIA DAS SEMENTES	27
2.2.1. Considerações Gerais	27
2.2.2. Composição das Sementes	28
2.2.3. Qualidades Fisiológicas	30
2.2.4. Fatores que afetam a qualidade das sementes	31
2.2.5. Fisiologia da germinação	34
2.3. SECAGEM DE SEMENTES	36
2.3.1. Cinética de Secagem	38
2.3.2. Modelos Matemáticos para Descrever Cinética de Secagem	41
2.4. FLUIDODINÂMICA	41
2.4.1. Classificação de partículas	42
2.4.2. Propriedades físicas do leito	44
2.5. LEITO DE JORRO	45
2.5.1. Considerações gerais	45
2.5.2. Tipos de jorro não convencional	46
2.5.3. Requisitos para o jorro	47
2.5.4. Características fluidodinâmicas do leito de jorro	50
2.5.5. Parâmetros fluidodinâmicos específicos do leito de jorro	52
2.5.6. Trabalhos fluidodinâmicos em leito de jorro	59
2.5.7. Aplicações do Leito de Jorro	60
2.5.8. Trabalhos de secagem utilizando leito de jorro	65
2.6. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	67
2.6.1. Projetos fatoriais completos em dois níveis	68
CAPITULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	70

3.1.	PARTÍCULAS	70
3.1.1.	Procedência e acondicionamento	70
3.2.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	70
3.2.1.	Caracterização física	70
3.2.2.	Caracterização qualitativa	72
3.2.3.	Caracterização centesimal	74
3.3.	EQUIPAMENTO UTILIZADO	75
3.3.1.	O leito	75
3.3.2.	Montagem experimental	75
3.4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	77
3.4.1.	Controle e medição da vazão do ar de fluidização	77
3.4.2.	Avaliação do comportamento fluidodinâmico	77
3.4.3.	Obtenção experimental das curvas de cinética de secagem	79
3.4.4.	Avaliação da Qualidade da Semente	80
3.5.	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	82
	CAPITULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
4.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUALITATIVA E CENTESIMAL DAS SEMENTES	83
4.1.1.	Resultados da caracterização física e qualitativa	83
4.1.2.	Resultados da caracterização centesimal	84
4.1.3.	Classificação da partícula segundo Geldart	85
4.2.	ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA	86
4.2.1.	Influência de diferentes cargas de sementes nos parâmetros característicos a temperatura ambiente	86
	Comparação entre os parâmetros fluidodinâmicos experimentais do leito	
4.2.2.	de jorro, para diferentes cargas, com os obtidos por correlação da literatura	87
4.2.3.	Parâmetros fluidodinâmicos característicos do leito de jorro a diferentes temperaturas	91
4.3.	COMPORTAMENTO CINÉTICO	97

4.4.	PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO	100
4.4.1.	Análise da variável de resposta razão de umidade (X_r)	101
4.4.2.	Análise da variável de resposta germinação (G)	105
4.4.3.	Análise da variável de resposta índice de velocidade de germinação (IVG)	108
4.5.	OTIMIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES	111
	CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	115
	CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS	118
	APÊNDICE A	129
	APÊNDICE B	133
	APÊNDICE C	138
	APÊNDICE D	140

INTRODUÇÃO

Estudos têm mostrado que o consumo de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) proporciona diversos benefícios ao organismo e os efeitos protetores a saúde tem sido atribuídos ao alto conteúdo de ligninas, composto fitoestrógeno que possui estrutura química muito semelhante à molécula de estrogênio, que pode atuar como antioxidante, redutor do colesterol, proteger contra a osteoporose, câncer de mama e do cólon (Thompson *et al.*, 1996; Prasad, 2000; Cordeiro; Fernandes e Barbosa, 2009), como também pelas altas concentrações de ácidos graxos poliinsaturados (55 %). A inclusão de alimentos fontes de ácidos graxos essenciais como o ácido linoléico (ômega-6) e ácido α -linolênico (ômega-3) é um fator importante e de grande interesse devido à ação benéfica no metabolismo humano.

Leitos móveis têm aplicação em diversas operações industriais dentre elas destaca-se a secagem de produtos agrícolas com o intuito de maximizar a eficiência do processo, minimizar possíveis danos físicos e ainda manter as propriedades/componentes de interesse do produto final. O leito de jorro é um destes sistemas, sendo indicado por proporcionar eficiente contato partícula-fluido para produtos com diâmetros maiores sem perder a homogeneidade do processo fluidodinâmico, ocorrendo o fenômeno de transferência de massa, que se desenvolve até alcançar o equilíbrio dinâmico entre a umidade do produto e a do ambiente.

Visando o melhor aproveitamento industrial das sementes de linhaça, tem-se como objetivo geral deste trabalho estudar o comportamento fluidodinâmico das sementes linhaça em leito de jorro e também avaliar condições adequadas de redução de umidade da matéria prima. Assim, propõem-se ainda como objetivos específicos:

- Projetar e construir a base cônica do leito de jorro para a montagem da unidade experimental;
- Determinar experimentalmente as propriedades físicas (massa específica aparente e real, porosidade, esfericidade, diâmetro médio e ângulo de repouso), centesimais (umidade, lipídios, proteínas, resíduo mineral fixo e carboidratos) e fisiológicas (peso de mil sementes, pureza, germinação, índice de velocidade de germinação e análise de superfície) das sementes de linhaça para a caracterização deste material;
- Realizar o estudo da fluidodinâmica em leito de jorro com diferentes cargas de semente e temperatura, determinando os parâmetros correlacionados ao processo, como: velocidade mínimo jorro, perda de carga máxima e perda no jorro estável,

Capítulo 1 - Introdução

avaliando os desvios entre os valores obtidos experimentalmente e os valores estimados por correlação da literatura, assim como a avaliar a porosidade e a expansão do leito;

- Verificar a influência das variáveis do processo de secagem: temperatura do ar de entrada e tempo de fluidização nas variáveis de resposta: razão de umidade, germinação e índice de velocidade de germinação.
- Estimar a condição ótima de secagem com base no planejamento fatorial proposto e com o auxílio da técnica de otimização simultânea denominada Função Desejabilidade.
- Determinar e avaliar o poder germinativo e o vigor das sementes submetidas à secagem, através de testes em laboratório comparando-os aos resultados alcançados com os das sementes originais.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SEMENTE DE LINHAÇA

2.1.1. Características agronômicas

Fotografia 2.1- Planta do linho



Fonte: Trucom (2010)

A linhaça é o fruto do linho (Fotografia 2.1) uma planta pertencente à família das Lináceas, caracterizada por apresentar uma altura de 30 e 130 cm, talos eretos e uma haste relativamente alongada, folhas estreitas ou lanceoladas e trinérveas, alternando entre verde e verde-claro. A planta tem um talo principal do qual saem vários ramos onde nascem às folhas, fruto capsular e flores pequenas azuis ou brancas isoladas, numerosas e grandes relativamente ao tamanho das plantas, têm as pétalas em disposição radiada, em geral em número de cinco. Os estames ocorrem no mesmo número ou em dobro (Fotografia 2.2) (SIMON e CHOPRA, 2001; MARQUES, 2008). Entre seus nomes populares destacam-se: a linhaça, linho (MARQUES, 2008) e linheiro (FERREIRA, 2004).

Fotografia 2.2- Flores características da linhaça



Fonte: Maurício (2000)

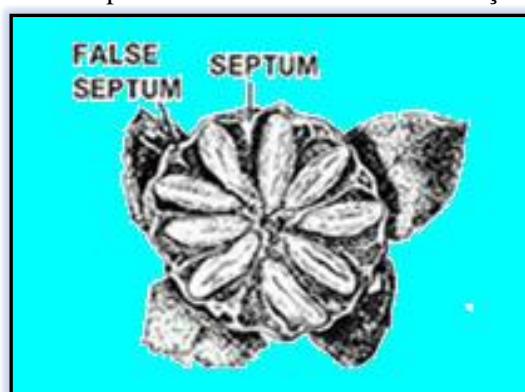
Os frutos apresentam-se em forma de cápsulas esféricas, chamados cachopas (Desenho 2.1) que contém duas sementes em cada um dos cinco compartimentos, totalizando cerca de 10 sementes por cápsula (Desenho 2.2), podendo haver variações de sete a 11 sementes em cada uma (COSKUNER e KARABA, 2007; TRUCOM, 2006). Cada planta pode ter dezenas de cachopas.

Desenho 2.1- As cachopas maduras



Fonte: Wikipédia (2007)

Desenho 2.2- Um corte para visualização interna da cachopa com 7 a 11 sementes de linhaça.



Fonte: Trucom (2010)

A semente do linho é um cereal (monocotiledônea) do grupo das oleaginosas (sementes com altos teores de lipídios) que se caracteriza por ser chata, oval, com uma extremidade pontiaguda e apresentando cerca de 5 mm de comprimento, 2,5 mm de largura e 1,5 mm de espessura. A cor do grão varia de marrom-avermelhada ao dourado (Fotografia 2.3) (MATIAS, 2007; JACINTO, 2007; MARQUES, 2008).

Fotografia 2.3- Linhaça Marrom (a) e Linhaça Dourada (b)



(a)

(b)

Fonte: Campos (2007)

2.1.2. O cultivo

O *linum usitatissimum* L. é uma espécie polimorfa e existem dois grupos de linho cultivados, facilmente reconhecíveis. O primeiro é cultivado para a produção têxtil e o segundo grupo é cultivado especialmente para a produção do óleo (JACINTO, 2007).

Os cultivos de linho destinados à produção de fibra têxtil (denominadas “Flax”) possuem plantas mais altas e menos ramificadas que as cultivadas oleaginosas e são cultivadas em regiões frias e temperadas do hemisfério norte, especialmente nos países da antiga União Soviética e leste da Europa. Os cultivos de linho oleaginoso (denominadas “Linseed”) apresentam menor estatura e desenvolvem mais ramificações basais. Possuem sementes maiores e são cultivadas em áreas mais amplas, em regiões mais quentes, como Argentina, Índia, Austrália, Estados Unidos e Canadá, durante o verão (FLOSS, 1983; TOMM *et al.*, 2006).

Do ponto de vista de registro, há dois tipos destinados à produção da semente oleaginosa comercial, o linho tradicional ou linhaça e o Solin (MAZZA 2000; TRUCOM, 2006). O Solin é uma oleaginosa que foi desenvolvida nos anos 1990, a partir do linho (*Linum usitatissimum* L.), utilizando técnicas avançadas de melhoramento genético, visando reduzir o teor de ácido α -linolênico, que é de 50% na linhaça, para menos de 5% no Solin (TOMM *et al.*, 2006). Desse modo, deu-se origem a um óleo mais estável, devido à redução das reações de oxidação e polimerização, tornando-o próprio para ser utilizado tanto em saladas, quanto para cozinhar. Os padrões da Comissão Canadense de Grãos (Canadian Grain Commission, CGC) definem que os cultivos de Solin devem ter grãos com tegumento amarelo, para diferenciá-los. No

Brasil, tem sido chamado de linhaça dourada, porém, ainda não há registro de plantio em escala significativa desse cultivo no país (MAZZA, 2000; TOMM *et al.*, 2006).

2.1.3. Produção e importância econômica

A produção mundial de linhaça foi estimada em 2500mil toneladas no ano de 2005, onde o Canadá ocupa o primeiro lugar, com 1082 mil toneladas, seguido pela China (480 mil toneladas por ano) e Estados Unidos (450 mil toneladas por ano). O Brasil encontra-se em 19º lugar, com 6 mil toneladas no ano de 2005 (FAO, 2007).

Na América do Sul, o maior produtor é a Argentina, com cerca de 80 ton/ano. O Brasil apresenta uma baixa produção, cerca de 21ton/ano (TURATTI, 2000).

Apesar da concorrência com as fibras sintéticas, o linho têxtil ainda é apreciado por suas qualidades de resistência, durabilidade e conforto. Seu campo de aplicação é vasto, sendo usado como linhas de costura, tecido para estofamento, lençóis toalhas e vestimentas.

O óleo de linhaça passou a ser valorizado, concomitantemente, com o aumento dos preços dos derivados do petróleo. Possibilitando a existência das lavouras de linho no Brasil, precisamente, em Guarani das Missões (RS) onde metade da população (10 mil habitantes) tem ligação com o plantio (CAMPOS, 2007). A empresa Giovelli, a única indústria do país que tira óleo das sementes, fornece as sementes para cerca de 300 produtores plantarem e depois compra a linhaça colhida. Anualmente, são esmagadas 90 mil sacas de 60 quilos, que se transformam em 2 mil toneladas de óleo que seguem, na maioria, para indústrias de São Paulo. A garantia do abastecimento, em parte, vem de uma lavoura própria da empresa de 500 hectares (CAMPOS, 2007).

O óleo é importante produto na fabricação de tintas, vernizes, sabões e cremes, além de ser combustível e lubrificante de motores. E também há o grande potencial da semente como alimento funcional, sendo utilizado o rejeito da extração do óleo como mais um composto nas rações para animais, justifica os estudos do processo de extração do óleo (MAURÍCIO, 2008).

2.1.4. Alimento funcional e composição

Os alimentos funcionais estão hoje entre os grandes avanços conseguidos pelo homem no intuito de promover e proporcionar saúde e qualidade de vida. Estes alimentos, que trazem naturalmente benefícios à saúde são desenvolvidos aproveitando-

se o conhecimento adquiridos por engenheiros, tecnólogos de alimentos, químicos, nutricionistas e profissionais da área da saúde (CRAVEIRO e CRAVEIRO, 2003).

Dentre os alimentos considerados funcionais, destaca-se a linhaça por ser uma excelente fonte de fibras, possui tanto fibras solúveis quanto insolúveis (NORTHRUP, 2004) e ser rica em ácidos graxos essenciais, com elevado teor de lipídios (32 a 38%), sendo que destes 50 a 55% são do ácido graxo insaturado α -linolênico (18:3n-3), pertencente à família ω -3 (GÓMEZ, 2003). Contém ainda ácido linoléico (da família ω -6) e ácidos graxos monoinsaturados e saturados.

Além da considerável quantidade de lipídios, apresentam em média 26% de proteína, 14% de fibras, 12% de mucilagem e 9% de umidade. Os principais elementos encontrados são enxofre, ferro, zinco, alguma quantidade de potássio, magnésio, fósforo e cálcio (MOURA, 2008). Já as vitaminas encontradas nas sementes de linhaça destacam-se tiamina (B1), riboflavina (B2), ácido ascórbico e as lipossolúveis A, D, E e K. (JACINTO, 2007; CAMPOS, 2007). Vale ressaltar, que esses teores podem variar de acordo com o cultivar, o meio ambiente, o processamento da semente, e métodos de análise.

A composição de gorduras da semente de linhaça, em uma estimativa percentual, pode ser vista na Tabela 2.1 abaixo:

Tabela 2.1. Composição de Gorduras da Semente de Linhaça

	Total de Gorduras (%)
Gorduras Saturadas	9
Gorduras Monoinsaturadas	18
Gorduras Poliinsaturadas	0
Ômega-3	57
Ômega-6	16

Fonte: Campos, 2007

As ligninas são fitoestrógenos com atividade estrogênica, e a linhaça é a maior fonte do principal precursor das ligninas mamárias, apresentando de 0,2 a 3,7 mg/g de glicosídeos, isso representa cerca de 12 a 15000 vezes mais que outros vegetais (MATIAS, 2007).

Vale ressaltar também que a inclusão de alimentos fontes de ácidos graxos essenciais na alimentação tem sido um fator importante e de grande interesse devido a

sua necessidade para o metabolismo humano e obtenção de energia (CARVALHO *et al.*, 2003). Os diversos efeitos do ômega-6 (ω -6) e ômega-3 (ω -3) no metabolismo das lipoproteínas, no funcionamento plaquetário e na integridade de vasos e artérias os tornam de especial interesse em relação à redução de risco e tratamento de doenças cardiovasculares (PRASAD, 1997).

2.1.4.1. Propriedades medicinais

A linhaça (*linum usitatissimum* L.) é uma das 6 plantas atualmente reconhecida pelo Instituto Nacional do Câncer dos Estados Unidos (US National Câncer Institute - NCI) por suas propriedades específicas no combate ao câncer. Parte desse reconhecimento deve-se a notável característica de ser a fonte mais rica de precursores lignina (esteróide vegetal de ação análoga ao estrógeno de mamíferos) na dieta humana (BOMBO, 2006; MARQUES, 2008).

Nos mamíferos, os precursores da lignina vegetal como os glicosídeos são convertidos primeiramente em enterodiol pela ação das bactérias no trato gastrointestinal e posteriormente oxidadas a enterolactona. Devido ao fato que o enterodiol e a enterolactona serem estruturalmente similares tanto aos estrogênios sintéticos como aos de ocorrência natural, ambos apresentam atividades estrogênica fraca e antiestrogênica e, portanto, podem desempenhar um papel na prevenção de cânceres dependentes de estrogênios (SANTOS, 2008).

Por conta dessa similaridade com o estrogênio, as ligninas têm sido relacionadas positivamente com a menopausa. Em um estudo realizado em Santa Maria RS, com 30 mulheres, 36,4% tiveram os sintomas da menopausa aliviados consumindo 10g/dia do grão de linhaça (COLPO *et al.*, 2006)

Em um estudo para analisar a capacidade da linhaça em reduzir as quantidades de colesterol sérico total, Rothemburg e Pereira (2007) mostraram que os ratos com altos índices de colesterol, ao terem linhaça adicionada em suas dietas hiperlipídicas, houve um efeito benéfico na redução do colesterol e uma menor deposição de gordura corporal em comparação com os ratos de dieta hiperlipídica exclusiva. Pessoas com níveis elevados de colesterol, que receberam pães com 50g de linhaça com baixo teor de gordura todos os dias, houve uma pequena, mas significativa redução dos níveis de colesterol total e LDL, corroborando com as observações feitas em animais (SIMON e CHOPRA, 2001; PITA, 2007).

2.1.5. Comercialização e processamento

Fotografia 2.4 - Variedades de produtos de linhaça



Fonte: Maurício (2008)

A linhaça (Fotografia 2.4) pode ser comercializada como fonte de proteína vegetal na forma de semente, farinha sem desengordurar (linhaça moída) e farinha desengordurada. Para ser considerada de boa qualidade, a farinha de linhaça tem que conter mais de 30% de proteína (MAZZA, 2000; OOMAH e GODFREY, 2006).

O processamento comercial da linhaça para produzir óleo e farinha é semelhante ao de outras oleaginosas. Este processo compreende as etapas de limpeza da semente, laminado, cozimento, pressão, extração com solvente e recuperação do solvente (OOMAH e MAZZA, 1998; MAZZA, 2000; TOMM, 2006).

As sementes são passadas através de máquinas seletoras que aspiram o material estranho como erva daninha, pedras e terra. A semente limpa, condicionada ao calor, é laminada em flocos e aquecida a 65°C por 20 minutos. Os flocos são transportados a uma prensa onde são extraídos 60-70% do óleo, sendo o restante extraído com hexano a 70°C, a fim de promover extração rápida do óleo residual. O hexano é removido sobre vácuo com a adição de calor na forma de vapor. A torta extraída normalmente entra na torradeira de dessolventizar a 75°C e é descarregada a 105°C em aproximadamente 30 minutos, originando a farinha ou farelo desengordurado (OOMAH e MAZZA, 1998).

2.2. FISIOLOGIA DAS SEMENTES

2.2.1. Considerações gerais

Segundo Barroso (1976), as características básicas para descrever uma semente externamente seriam a forma, superfície, consistência dos tegumentos, modificações da

testa, presença da papus, espinhos, aresta ou pêlos, internamente seriam as características do tecido de reserva, do tipo e da disposição do embrião em relação a este, do eixo hipocótilo-radícula e dos cotilédones.

A semente constitui uma importante fase do desenvolvimento de angiospermas e gimnospermas, visto que ela possibilita a sobrevivência do embrião (e conseqüentemente da espécie) e sua dispersão (APPEZZATO-DA-GLÓRIA e CARMELLO-GUERREIRO, 2003). Os gastos energéticos do embrião e os posteriores gastos com o crescimento inicial da plântula, que ainda não é autotrófica, são supridos por uma reserva nutritiva acumulada durante a maturação da semente (FERREIRA e BORGHETTI, 2004).

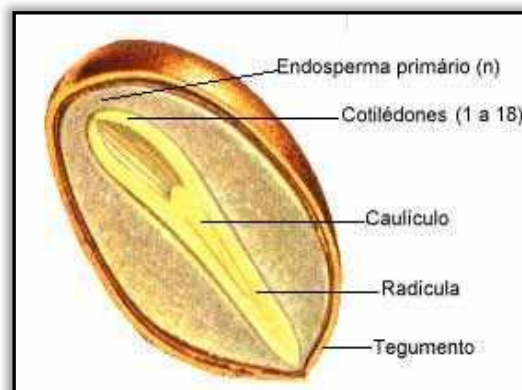
Dependem das características morfológicas, fisiológicas e bioquímicas da semente, o tempo e o local de estabelecimento do novo indivíduo, além do vigor da plântula jovem.

2.2.2. Composição das sementes

As sementes são formadas basicamente pelo: tegumento ou casca e pela amêndoa. O tegumento é formado pela testa e a tegma ou tégmen, e a amêndoa é formada pelo embrião e o albume ou endosperma ou até mesmo o perisperma.

Do ponto de vista funcional, elas são constituídas por: casca (cobertura protetora), tecido de reserva (endospermático) e tecido meristemático (eixo embrionário), que resultam dos componentes do óvulo, e que durante o seu desenvolvimento pós-fecundação sofrem modificações (Desenho 2.3) (CARVALHO e NAKAGAWA, 1980).

Desenho 2.3 - Partes constituintes das sementes



Fonte: Botânica (2011)

2.2.2.1. Tegumento

O tegumento é constituído de duas partes, uma externa a testa e o tegumento interno. Sua principal função é protetora, regulando a penetração de água e gases. Algumas espécies apresentam tegumentos impermeáveis à água, necessitando o uso de tratamentos químicos ou mecânicos que visem facilitar a sua penetração nos tecidos, tornando-o um componente muito importante na estrutura da semente no que se refere a sua atuação na dispersão (CARVALHO e NAKAGAWA, 1980).

2.2.2.2. Albume

O endosperma ou albume é um tecido de reserva que tem como função nutrir o embrião durante o seu crescimento. Muitas espécies florestais não possuem mais endosperma, quando a semente amadurece, como os eucalyptus e as leguminosas. Nestas espécies, o endosperma foi totalmente consumido pelo embrião, restando em alguns casos apenas resquícios do tecido de reserva (CARVALHO e NAKAGAWA, 1980).

2.2.2.3. Embrião

O embrião é a planta rudimentar. É formado por dois cotilédones ou paracotilédones, com função de reserva, de produção de alimentos para o crescimento da plântula e absorção de alimento de outros tecidos de reserva. Abaixo dos cotilédones, na zona de transição até a radícula, é a região denominada hipocótilo, que dará origem ao caulículo da plântula.

Efetivamente, o embrião é um verdadeiro vegetal em estado potencial, com seus órgãos rudimentares, representados pela radícula, cotilédones, caulículo e gêmula.

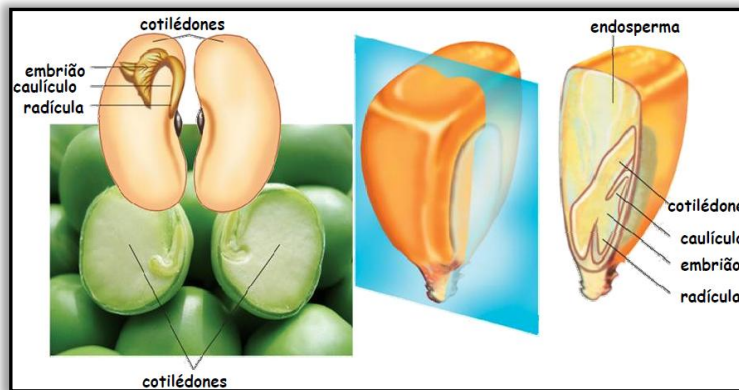
2.2.2.4. Radícula

A radícula é na realidade um conjunto de células meristemáticas e se encontram voltada para a micrópila. É a raiz rudimentar do embrião (CARVALHO e NAKAGAWA, 1980).

2.2.2.5. Cotilédones

Cotilédones são folhas modificadas que fazem parte do corpo do embrião podendo armazenar nutrientes que serão fornecidos a ele durante os estágios iniciais de desenvolvimento. Algumas sementes produzem um cotilédone sendo assim classificadas como monocotiledôneas, outras produzem duas cotilédones conhecidas como dicotiledôneas (Desenho 2.4).

Desenho 2.4 - Semente dicotiledônea (feijão) e semente monocotiledônea (milho)



Fonte: Castro (2011)

2.2.2.6. Caulículo

É a porção caulicular do embrião, que pode ser visualizada no Desenho 2.3 e Desenho 2.4.

2.2.3. Qualidades fisiológicas

Visando quantificar a qualidade fisiológica de sementes, permitindo o conhecimento dos efeitos dos fatores que podem alterá-la e a comparação entre os resultados obtidos por diferentes pesquisadores, a avaliação da qualidade das sementes é realizada por meio de testes padronizados e de aceitação universal. Os testes que avaliam a qualidade física das sementes visam quantificar o índice de fissuras no tegumento. Os índices de germinação e vigor permitem avaliar a qualidade fisiológica. O Teste Padrão de Germinação (TPG), o Teste de Envelhecimento Precoce e o Teste do Hipoclorito de Sódio são os testes mais indicados para serem realizados em laboratório para o poder germinativo, para o vigor e para o índice de fissuras respectivamente, (BRASIL, 1992).

No Brasil, a qualidade das sementes pode ser facilmente determinada em laboratórios especialmente montados para tal fim. Existem mais de 250 laboratórios credenciados para realização das análises de germinação e pureza, os quais, sob requisição especial, podem também realizar testes de vigor. Para a confiabilidade dos resultados, há as regras de análise de sementes, que internacionalmente são publicadas pela ISTA desde 1931, e no Brasil, há as regras nacionais, atualizadas em 2009. Assim, a determinação da qualidade fisiológica das sementes, através da germinação, segue procedimentos há muito tempo dominados. Para vigor, apesar de se dominar a técnica praticamente desde a década de 1970, apenas recentemente esta foi introduzida nos programas internos de controle de qualidade das empresas e está sendo incluída nas regras de análise de sementes (SEED NEWS, 2010). A importância da determinação do vigor é tal que entidades como a ISTA, ABRATES e AOSA possuem manuais publicados recentemente sobre os principais testes, como o de envelhecimento acelerado, de frio, deterioração controlada, tetrazólio e o de condutividade elétrica. Alguns testes são mais indicados para umas espécies do que para outras. Salienta-se que a germinação das sementes é realizada em condições ótimas para a semente desencadear o processo de germinação, enquanto a maioria dos testes de vigor é baseada em atributos para superar adversidades, integridade das membranas, atividade enzimática, entre outros. Entretanto, há uma estreita relação entre os resultados de vigor e germinação, quando as sementes apresentam qualidade fisiológica alta (SEED NEWS, 2010).

Em outras palavras, lotes de sementes com germinação superior a 90% tendem a apresentar também alto vigor (SEED NEWS, 2010).

A qualidade das sementes resulta do somatório de todos os atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários que contribuem para formação das plantas vigorosas capazes não só de promover uma rápida emergência, como também de garantir o seu estabelecimento, além de proporcionar crescimento e floração uniformes, garantindo desta forma uma elevada produtividade (BARROZO, 1995).

2.2.4. Fatores que afetam a qualidade das sementes

A escolha adequada de um lote de sementes é resultado do conhecimento de uma série de fatores que afetam a qualidade das mesmas, pois uma escolha bem feita representa uma base sólida para o sucesso de uma lavoura.

A qualidade fisiológica das sementes pode ser afetada por diversos fatores, entre os quais, os mais importantes são discutidos a seguir (POPINIGIS, 1977).

2.2.4.1. Fatores genéticos

A constituição genética da semente pode influenciar suas características de qualidade fisiológica. Diferentes de uma mesma espécie podem apresentar maior vigor e longevidade. Além de ser a base do vigor fisiológico, a constituição genética causa o vigor genético (vigor híbrido) observável na heterose (POPINIGIS, 1977).

2.2.4.2. Adversidade durante o desenvolvimento da semente

A semente atinge sua maturidade fisiológica (máximo vigor e máxima germinação) quando alcança máximo teor de matéria seca. Durante o período que vai da fertilização do óvulo, até o ponto de maturação fisiológica, as adversidades sofridas pelas sementes podem pré dispô-la a uma deterioração mais rápida.

Outras adversidades durante o desenvolvimento da semente, capazes de induzir rápida deterioração, são: indisponibilidade de água, temperatura ambiente, alta salinidade do solo, doenças da planta e danos causados por insetos (POPINIGIS, 1977).

2.2.4.3. Adversidade no campo, após a maturação fisiológica e antes da colheita

A deterioração é mínima no ponto de maturidade fisiológica da semente. Conseqüentemente, as condições adversas que ocorrem entre o ponto de maturidade e a colheita podem causar e/ou predispor a semente a uma deterioração acelerada.

As principais adversidades que contribuem para acelerar a deterioração da semente antes da colheita são: temperaturas extremas, danos causados por insetos, ataques por microrganismos e variação no teor da umidade.

2.2.4.4. Grau de maturidade

O grau de maturidade por ocasião da colheita afeta a qualidade fisiológica da semente. Em determinadas espécies, embora a colheita seja efetuada na época em que há maior proporção de sementes com alta qualidade fisiológica, mesmo assim serão acompanhadas de sementes imaturas, e outras em avançado estado de deterioração.

2.2.4.5. Tamanho da semente

O tamanho da semente, em muitas espécies, é indicativo de sua qualidade fisiológica. Assim, dentro do mesmo lote, as sementes pequenas apresentam menor germinação e vigor que as sementes de tamanho médio e grande (POPINIGIS, 1977).

2.2.4.6. Densidade da semente

Sementes já classificadas quanto ao tamanho, podem ser separadas quanto à sua densidade. Essa separação é feita rotineiramente em sementes de algumas espécies, pelo emprego da mesa gravidade. Dentro de um lote de tamanho homogêneo, as sementes de menor densidade normalmente apresentam menor qualidade fisiológica.

2.2.4.7. Injúrias mecânicas na colheita e beneficiamento

A injúria mecânica é causada por choques e ou abrasões das sementes contra superfícies duras ou contra outras sementes, resultando em sementes quebradas, trincadas, fragmentadas, arranhadas e inteiramente danificadas. Não só o aspecto físico da semente é atingido, pois sementes mecanicamente danificadas dificultam as operações de beneficiamento e apresentam menor germinação e vigor (ANDREWS, 1965 e DELOUCHE, 1967). De acordo com Moore (1974), em produção mecanizada de sementes, as injúrias mecânicas são as maiores forças destrutivas que atuam na redução da qualidade fisiológica e sanitária das mesmas.

2.2.4.8. Injúrias térmicas na secagem da semente

A operação de secagem pode pré-dispor as sementes a uma rápida perda de germinação e vigor durante o armazenamento. Os principais fatores envolvidos são: a temperatura que a semente atinge, e o tempo de exposição a essa temperatura. As sementes mais úmidas são mais sensíveis à temperatura. Por isso, quanto maior o seu teor de umidade, menor deve ser a temperatura empregada na secagem.

Alguns estudos mostram que sementes podem atingir temperaturas mais elevadas que as indicadas, sem redução imediata do seu poder germinativo, porém sofre redução no vigor rapidamente e no poder germinativo durante o armazenamento (POPINIGIS, 1977).

2.2.4.9. Teor de umidade da semente durante o armazenamento

O alto teor de umidade é a maior causa de reduções na qualidade fisiológica da semente armazenada. Diferentes níveis de umidade na semente criam condições diversas no armazenamento, que podem ser assim sumarizados:

- Teor de umidade superior a 45- 60 %: a semente germina.
- Teor de umidade entre 18 - 20 e 45 – 60 %: a velocidade respiratória da semente, e dos microorganismos é muito elevada. Se não houver aeração ou se esta for insuficiente, há um aquecimento da semente. Esse aquecimento espontâneo pode gerar temperatura suficientemente elevada para matar a semente.
- Teor de umidade entre 12 – 14 % e 18 – 20 %: pode ocorrer o desenvolvimento do microorganismo, principalmente de fungos (mofo), que podem infeccionar a semente, especialmente se esta estiver danificada. Além disso, a semente também respira ativamente, o que causa rápida perda de germinação e de vigor.
- Teor de umidade entre 4 e 8 %: favorável ao armazenamento em embalagens impermeáveis.

Assim, quanto maior o teor de umidade da semente armazenada, maior o número de fatores adversos à conservação da sua qualidade fisiológica (POPINIGIS, 1977).

Em geral elevados teores de umidade causam ou favorecem:

- A elevação da temperatura da semente devido aos processos respiratórios;
- Maior susceptibilidade da semente a danos térmicos durante a secagem;
- Maior atividade de microorganismos, principalmente fungos;
- Maior atividade de insetos durante o armazenamento.

A temperatura e a umidade do ar em que as sementes são armazenadas são os principais fatores que afetam a qualidade fisiológica da semente. A umidade relativa do ar controla o teor de umidade da semente, enquanto a temperatura afeta a velocidade dos processos bioquímicos na semente (POPINIGIS, 1977).

2.2.5. Fisiologia da germinação

A germinação inicia com a absorção de água - umidificação - que desencadeia processos de ativação do metabolismo do embrião para que este se desenvolva em uma plântula (esporófito jovem). Para que a água atinja os tecidos embrionários deve haver uma ruptura do envoltório da semente (perisperma, testa ou tegumentos) que em muitas

espécies é rígido e impermeável, o que caracteriza o fenômeno dormência. Após a quebra da dormência ocorre a umidificação, a atividade metabólica inicia e, a partir deste momento é iniciada também a mobilização das reservas do endosperma e cotilédones, que continua ocorrendo até a plântula adquirir a autotrofia (BEWLEY, 1997).

A germinação é considerada um dos mais importantes estádios do biociclo vegetal, caracterizada pela retomada das atividades anabólicas e catabólicas, incluindo a respiração, síntese de proteínas e mobilização das reservas após a absorção da água, possibilitando o crescimento do eixo embrionário, culminando com a protrusão da radícula. No desenvolvimento vegetal, a germinação é considerada uma fase crítica e está relacionada a aspectos fisiológicos e bioquímicos associados a fatores ambientais (natureza extrínsecas) e da própria semente (natureza intrínsecas) (BEWLEY e BLACK, 1982; DESAI *et al.*, 1997; CARVALHO e NAKAGAWA, 1980).

O conhecimento das condições adequadas para a germinação de sementes de uma espécie é de fundamental importância, principalmente pelas respostas diferenciadas que ela pode apresentar aos diversos fatores, como: água, luz, temperatura e oxigênio e ocorrência de agentes patogênicos associados ao tipo de substrato para sua germinação (BRASIL, 1992; CARVALHO; NAKAGAWA, 2000).

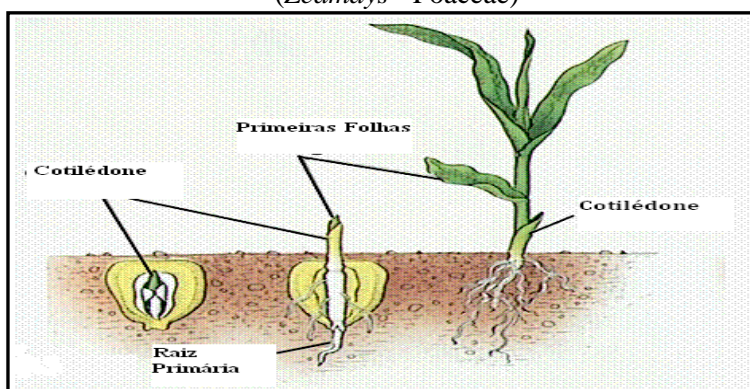
As sementes apresentam comportamento variável quanto à temperatura de germinação, não havendo uma temperatura ótima e uniforme para todas as espécies. Considera-se temperatura ótima aquela na qual a semente expressa seu potencial máximo de germinação e, temperaturas máxima e mínima aquelas nas quais acima e abaixo das mesmas onde não ocorre germinação (MAYER; POLJAKOFF-MAYBER, 1989).

O efeito da temperatura na germinação está relacionado com as necessidades das enzimas que participam em vários processos metabólicos durante a germinação, os quais afetarão, conseqüentemente, a velocidade e a percentagem final de germinação. A temperatura ótima para a maioria das espécies adaptadas ao clima tropical se encontra na faixa entre 15°C e 30°C, sendo definida geneticamente em função das condições fisiológicas da semente (CARVALHO e NAKAGAWA, 1980).

A germinação das sementes pode ser de dois tipos:

- **Hipógea:** os cotilédones permanecem no interior do solo. Exemplo: milho (*Zeamays-Poaceae*).

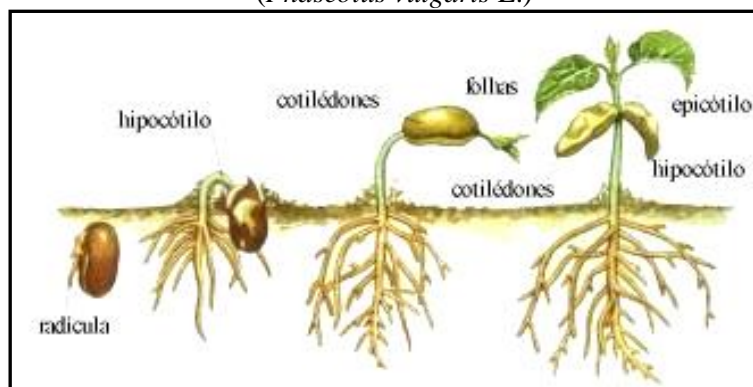
Desenho 2.5 - Diferentes fases de germinação para o milho
(*Zeamays* - Poaceae)



Fonte: <http://www.valerio.bio.br>

- **Epígea:** os cotilédones são elevados a certa distância do solo, graças a uma distensão do hipocótilo. Exemplos: feijão (*Phaseolus vulgaris* - Fabaceae) e mamona (*Ricinus communis* - Euphorbiaceae). Neste último caso, os tegumentos acompanham os cotilédones na sua elevação e posteriormente são eliminados.

Desenho 2.6 - Diferentes fases de germinação para o feijão
(*Phaseolus vulgaris* L.)



Fonte: <http://www.valerio.bio.br>

2.3. SECAGEM DE SEMENTES

A preservação de alimentos por secagem é ainda de crescente interesse para a manufatura de produtos finais e intermediários. Numa economia que está se tornando cada vez mais globalizada, a distribuição de produtos agrícolas e de outros produtos biológicos está crescendo, e normalmente processos de secagem são necessários para assegurar estabilidade durante o armazenamento e o transporte, uma vez que o teor de umidade é reduzido e, conseqüentemente, a disponibilidade de água para:

- O desenvolvimento de fungos e bactérias, que causam degradação microbiológica;

- O processo de respiração dos alimentos, que provoca perda de peso e gera calor;
- A ocorrência de reações bioquímicas que promovem a auto-degradação do produto.

A secagem é dos mais difundidos processos de transferência de calor e massa, com aplicações em diversas áreas da engenharia. Os estudos sobre os fenômenos de transportes que ocorrem durante a secagem em diferentes materiais particulados são de interesse não somente tecnológico, devido às suas inúmeras aplicações industriais, mas também de interesse técnico-científico, por causa da complexidade que o material apresenta (PRADO, 2004).

Observa-se que dois fenômenos ocorrem simultaneamente quando um sólido úmido é submetido à secagem (MENON e MUJUMDAR, 1987):

- Transferência de energia (calor) do ambiente para evaporar a umidade superficial, sendo esta transferência dependente das condições externas de temperatura, umidade do ar, velocidade e direção do ar, área de exposição do sólido e pressão;
- Transferência de massa (umidade), do interior para a superfície do material e subsequente evaporação devido ao primeiro processo sendo que o movimento interno da umidade no material é função da natureza física do sólido, temperatura e conteúdo de umidade.

Segundo Strumillo e Kudra (1986) a realização de estudos que viabilizem o desenvolvimento de secadores e o conhecimento de condições ótimas de operação é altamente desejável, uma vez que a secagem é uma operação unitária indispensável para a preservação das qualidades física, físico-química e fisiológica das sementes, condição esta diretamente associada a uma produtividade elevada. Diante da necessidade de reduzir custos energéticos do processo e da crescente preocupação em assegurar a qualidade do produto, investigações sobre diferentes métodos de secagem crescem de importância. Sendo assim, diferentes critérios devem ser considerados para a escolha do secador para um determinado material.

- O modo de funcionamento do equipamento pode ser contínuo ou batelada. A escolha depende da importância da produção e deve ser economicamente viável;
- A transmissão da fonte de calor, pois a escolha da temperatura de secagem é um ponto importante devendo ser considerado que: (a) uma temperatura elevada aumenta a velocidade de secagem, mas pode causar danos à superfície do material, impedindo a eliminação do conteúdo de umidade; (b) uma temperatura excessivamente baixa aumenta consideravelmente a duração da operação de secagem; (c) determinados

materiais são termosensíveis, e, portanto, não podem ser submetidos a temperaturas elevadas;

- O tempo de secagem: um ponto determinante para a eficiência global de secagem;
- A qualidade do produto a ser seco: o tipo de material desejado (textura do produto, material pulverizado, particulado, granulares, fibras, soluções, suspensões, etc.);
- A segurança;
- O consumo de energia.

2.3.1. Cinética de secagem

Os dados referentes a um processo de secagem são expressos geralmente em função da massa total do material úmido e do tempo de duração do processo, mas também se pode optar pela expressão destes dados em função da taxa de secagem.

O teor de umidade de um sólido é geralmente expresso em função de sua massa seca (X , Kg água. Kg sólido seco⁻¹), pois esta permanece constante durante todo o processo de secagem. O teor de umidade é definido, desta forma, como a razão entre o teor de água presente no material e a massa de sólidos secos:

$$X_{bs} = \frac{m_{total} - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (2.1)$$

Onde m_{total} é a massa total da amostra (Kg), m_{ss} é a massa de sólido seco (Kg) e X é o teor de umidade em base seca (Kg água).

A umidade, quantidade de água que pode ser removida do material, sem alteração da sua estrutura molecular, pode-se expressá-la também de duas formas:

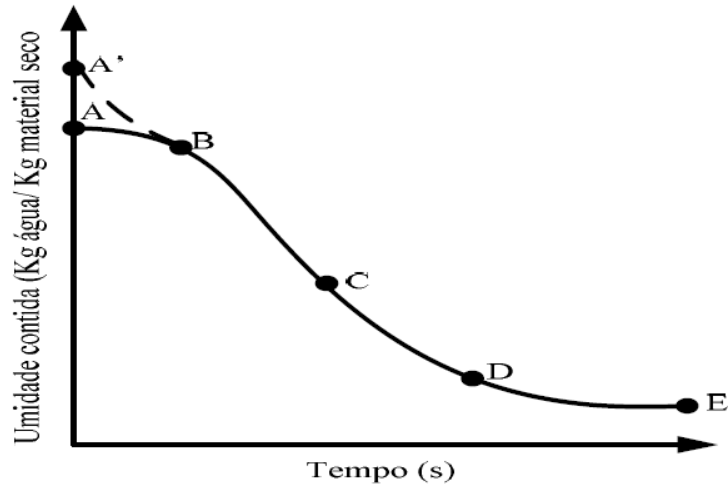
$$X_{bs} = \frac{m_w}{m_{ss}} \quad (2.2)$$

$$X_{bu} = \frac{m_w}{m_{total}} \quad (2.3)$$

Onde, m_w é a massa de água, X_{bu} e X_{bs} representam os teores de umidade do material em base úmida e em base seca, respectivamente.

Representando num gráfico os valores de X_{bs} , contra o tempo, obtém-se uma curva típica, conforme ilustrada no Gráfico 2.1.

Gráfico 2.1- Curva típica de secagem



Fonte: Geankoplis (1993)

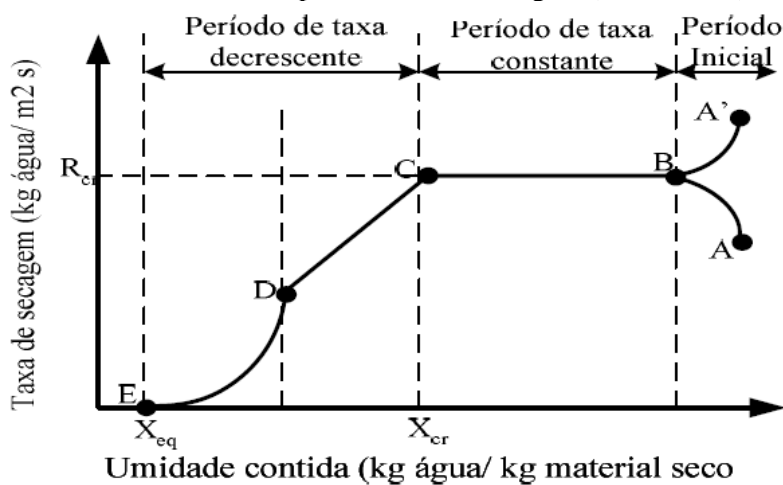
Esta curva representa um caso geral, quando inicialmente o sólido perde umidade por evaporação da superfície saturada (controle convectivo) e ao final por evaporação da umidade no seu interior (controle por difusão interna).

O Gráfico 2.2 ilustra a variação da taxa ou velocidade de secagem com teor de umidade livre do material. A umidade livre do material é estimada através da equação 2.4:

$$X_{\text{livre}} = W - X_{\text{eq}} \quad (2.4)$$

Onde, X_{eq} corresponde à umidade de equilíbrio do material nas condições operacionais.

Gráfico 2.2 - Curva típica da taxa de secagem (X versus W)



Fonte: Geankoplis (1993)

Nas curvas de secagem e de taxa de secagem (Gráficos 2.1 e 2.2, respectivamente) os segmentos AB e A'B, são termos representativos do período de aquecimento do material, também pode se caracterizar por período de acomodação térmica do produto às condições de secagem. Os segmentos BC, CD e DE, representam, respectivamente, os períodos de velocidade constante, e o primeiro e o segundo período de velocidade decrescente.

O ponto C, onde o período da velocidade constante termina e da velocidade decrescente começa, o que correspondente ao teor de umidade crítico do material, quando a taxa de imigração de umidade interna não é suficiente para manter a superfície úmida. No ponto D, tem início a última etapa do processo de secagem, onde a difusão interna da umidade é o mecanismo controlador. No ponto E, a taxa de secagem é praticamente nula e o sólido atinge sua umidade de equilíbrio.

Brooker, Baker-Arkema e Hall (1992) afirmam que, para a condução adequada do processo de secagem, é fundamental analisar adequadamente o mecanismo de remoção de umidade do produto a ser estudado que, dependendo do material, a umidade pode movimentar-se no seu interior, por diferentes mecanismos e que em produtos capilares porosos, como a maioria dos produtos de origem agrícola, os possíveis mecanismos de umidade são: difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica.

Na literatura podem ser encontrados vários modelos matemáticos para descrever o comportamento da secagem de produtos agrícolas em camada fina, esses modelos podem ser classificados como: teóricos, empíricos e semi-empíricos.

Nos métodos teóricos, segundo Brooker, Baker-Arkema e Hall. (1992), normalmente são consideradas as condições externas, os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos. O método empírico tem por base os dados experimentais e uma análise dimensional, apresentando uma relação direta entre o conteúdo médio de umidade e o tempo de secagem; porém, como para a formulação desses modelos não é levada em consideração os fundamentos científicos da secagem, ou seja, seus parâmetros não apresentam significado físico e não oferecem detalhes importantes dos processos que ocorrem durante o fenômeno, apenas descrevem os dados experimentais a partir das curvas de secagem (KEEY, 1972). Já os modelos semi-teóricos concorrem para o equilíbrio entre a teoria e a facilidade de aplicação de tais modelos.

2.3.2. Modelos Matemáticos para Descrever Cinética de Secagem

Diferentes teorias tentam explicar a cinética de secagem de materiais porosos, porém, o principal objetivo é descrever como a umidade é transferida do interior do sólido para evaporar na superfície e qual mecanismo de transferência controla o processo de secagem. Os modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para representar a cinética de secagem, podem ser sumarizados em dois grupos: 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).

A Tabela 2.2 apresenta algumas equações de secagem semi-empíricas utilizadas para descrever a remoção de umidade em camada delgada, descritas em diversos trabalhos como exemplo, em Radünz *et al.* (2010).

Tabela 2.2. Equações de secagem

Modelos	Equação
Newton	$X_r = \exp(-Kt)$ (2.9)
Dois termos	$X_r = a \exp(-K_0 t) + b \exp(-K_1 t)$ (2.10)
Henderson e Pabis Modificado	$X_r = a \exp(-Kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ (2.11)
Logaritmo	$X_r = a \exp(-Kt) + b$ (2.12)

Onde X_r é a razão de umidade, t é o tempo de secagem (min) e K é a constante de secagem.

2.4. FLUIDODINÂMICA

Os sistemas gás-sólido mais comuns podem ser classificados como não agitados, agitados mecanicamente e agitados por gás.

Os leitos fixos (não agitados) são aplicáveis a processos que não pedem alta taxa de transferência de calor e massa entre o gás e os sólidos, e nos quais a uniformidade de condições em partes diferentes do leito não é tão desejável. Em um leito fixo, não podem ser adicionados sólidos continuamente nem podem ser retirados (ou pelo menos

não é desejável) e o tratamento do gás normalmente é o objetivo principal. Por exemplo, a recuperação de vapores solventes por adsorção e reações catalíticas de vida longa. Sua aplicação se estende então ao tratamento de sólidos e processos de calcinação, secagem, dentre outros.

Uma agitação limitada pode ser dada aos sólidos por meios mecânicos pelo uso de agitadores internos. Em qualquer caso, a maioria do material é mantida ainda em uma condição de leito acumulado, mas o movimento relativo de partículas melhora a efetividade do contato entre as faces desde que a superfície esteja continuamente exposta à ação do gás. O sistema mecânico é usado principalmente para processos que envolvem tratamentos de sólidos, como calcinação, secagem e resfriamento, mas é obviamente indesejável para processos que requerem tratamento uniforme do gás (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

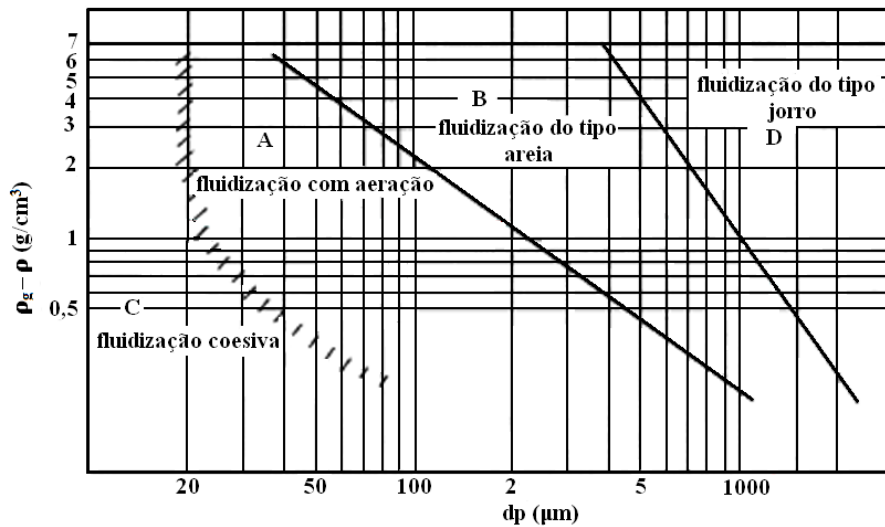
Em sistemas com agitação com gás, como leito fluidizado e leito de jorro, uma forma de agitação mais intensa é dada para cada partícula sólida pela ação da corrente de gás.

Segundo Kunii e Levenspiel (1991), fluidização é uma operação nas quais partículas sólidas são levadas ao estado “quase líquido” por meio da passagem de um gás ou líquido por elas. Surgido posteriormente, o leito de jorro tem sido considerado, erroneamente, como uma versão modificada de um leito fluidizado. Sendo ele utilizado para a análise de partículas maiores. Assim, alguns livros caracterizam o leito de jorro simplesmente como um tipo especial de leito fluidizado. Esta visão não é muito adequada, já que no seu desenvolvimento o leito de jorro tem exibido características particulares que o faz capaz de executar certas operações que exigem movimento cíclico mais homogêneo das partículas, que não podem ser executadas em um leito fluidizado devido a seu movimento de partículas comparativamente aleatório (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

2.4.1. Classificação de partículas

Em 1973, Geldart sugeriu a classificação de partículas sólidas em quatro grupos diferentes, caracterizados pela diferença de massa específica entre as partículas e o gás e pelo tamanho médio das partículas. A partir das observações experimentais desenvolvidas apresentou um diagrama cuja representação encontra-se no Diagrama 2.1.

Diagrama 2.1- Classificação de Geldart para fluidização de partículas com ar e em condições ambiente.



Fonte: Geldart (1986)

Grupo A: As partículas deste grupo apresentam diâmetro médio pequeno (20-100μm) e baixa massa específica (menor que 1,4g/cm³), e possui uma grande faixa de fluidização entre a velocidade de mínima fluidização e a velocidade para iniciar as bolhas, proporcionando alta expansão do leito e alta mistura do gás e do sólido. Quando a velocidade do gás aumenta acima da velocidade de bolhas, a fluidização é borbulhante e é caracterizada por bolhas que ascendem mais rápido que o gás através do leito de sólidos; as bolhas dividem-se e coalescem quando sobem em direção ao topo do leito e quando as bolhas atingem o diâmetro do leito, o regime torna-se pistonado.

Grupo B: As partículas deste grupo apresentam diâmetro e massa específica, $40 < d_p < 500 \mu m$ e $4 g/cm^3 > \rho_p > 1,4 g/cm^3$, respectivamente; ocorrendo a formação de bolhas logo acima de velocidade de mínima fluidização, de forma que a coalescência é o fenômeno predominante. O tamanho das bolhas aumenta com a altura do leito e a velocidade do gás em excesso, apresentando expansão do leito e mistura de partículas moderadas. A areia é um exemplo típico desse grupo.

Grupo C: As partículas deste grupo têm propriedades coesivas e diâmetro pequeno, é extremamente difícil de fluidizar as forças interparticulares, com a formação de canais e sem formação de bolhas. Entretanto, o uso de agitadores mecânicos ou mesmos de vibração podem quebrar os caminhos preferenciais, melhorando assim a fluidização. Proporciona também baixa expansão do leito e apresenta pobre mistura dos sólidos.

Grupo D: As partículas desse grupo têm diâmetro grande e/ou são muito densas; por isso na fluidização convencional deste tipo de partículas pode haver a formação de

caminhos preferenciais, proporcionar baixa expansão do leito e baixa mistura de sólidos. Desta forma, partículas deste grupo são mais adequadas ao leito de jorro.

2.4.2. Propriedades físicas do leito

2.4.2.1. Altura do leito

A altura do leito também denominada profundidade, é a distância vertical L entre a placa porosa e a superfície do leito. A altura do leito estático será representada por H_e . A altura do leito de porosidade mínima é H_{\min} . À medida que a velocidade do fluido vai aumentando, o leito vai se expandindo, conseqüentemente a altura irá aumentar. Esta altura H será a altura do leito de porosidade ε (GOMIDE, 1986).

2.4.2.2. Porosidade

A porosidade de um leito significa a fração de vazios deste mesmo leito e pode ser calculada pela equação (2.13):

$$\varepsilon = \frac{V_{t0} - V_s}{V_{t0}} = 1 - \frac{m_p}{\rho_p AH} \quad (2.13)$$

Uma equação empírica usada para estimativa da porosidade de mínima fluidização em função do diâmetro do material em micrómetros é por McCabe e Smith (1993).

$$\varepsilon_{mf} = 1 - 0,356(\log d_p - 1) \quad (2.14)$$

2.4.2.3. Expansão

A expansão do leito refere-se à variação da altura dos sólidos em relação à altura de mínima fluidização, fornecendo a porcentagem de aumento da altura do leito de partículas (Equação 2.15):

$$E = \frac{H - H_{mf}}{H_{mf}} 100 \quad (2.15)$$

2.5. LEITO DE JORRO

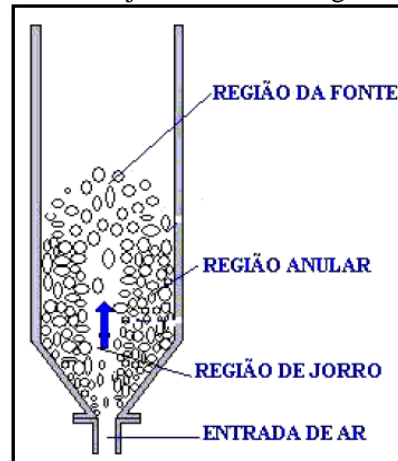
2.5.1. Considerações gerais

O termo leito de jorro foi dado pelo National Research Council of Canada em 1954, por Gishler e Mathur. Estes pesquisadores desenvolveram esta técnica inicialmente como um método para secagem de trigo. Eles puderam usar uma vazão de ar quente muito maior do que na secagem convencional de trigo, sem prejuízo para o grão. Percebendo que a técnica apresentava uma aplicação mais ampla, eles estudaram as características de um leito de jorro, utilizando ar e água, como fluidos para promover o jorro com uma variedade de materiais sólidos. Com base neste estudo preliminar, eles foram capazes de afirmar que o mecanismo de fluxo de sólidos e de gás nesta técnica é diferente da fluidização, mas parece alcançar o mesmo propósito para partículas maiores, como a fluidização alcança para materiais finos.

O sistema de leito de jorro (Desenho 2.7) consiste basicamente de uma coluna cilíndrica de base cônica, contendo partículas sólidas de um tamanho considerável, maiores que 1 mm, e de um orifício de entrada do fluido localizado na parte inferior central da base cônica. Esta base cônica é utilizada para aumentar o movimento de sólidos e eliminar espaços mortos no fundo do leito. O próprio vaso normalmente é um cilindro circular, entretanto, o uso de um vaso completamente cônico foi prática comuns em alguns estudos (PASSOS *et al.*, 1997).

O ar em alta velocidade é adicionado a este conjunto pela base inferior do tronco de cone, permeando entre as partículas. A intensa circulação destas partículas começa quando a vazão do ar é suficiente para promover o transporte pneumático das mesmas na região central do leito. Ao atingirem a fonte as partículas perdem totalmente a sua energia cinética, caindo posteriormente na região anular e aí fazem um movimento descendente até regiões inferiores do leito. Sendo que região anular é caracterizada por possuir baixa porosidade.

Desenho 2.7- Leito de jorro com suas regiões características.



Fonte: Duarte (2006)

2.5.2. Tipos de jorro não convencional

Encontra-se na literatura diversas alterações da configuração convencional do leito de jorro, dentre as quais se destacam:

- Leito de jorro cônico: Constituído apenas por uma base cônica, esse leito tem como principal vantagem a maior carga, ou seja, para uma mesma altura do leito é possível alimentar uma carga inicial maior do que aquela comparada com um leito convencional, onde o ângulo da base tronco-cônica é igual ao ângulo do leito cônico.

- Leito de jorro com tubo “draft”: Nesta variação há a inserção de um tubo concêntrico à parte cilíndrica do leito. Com a utilização desse artifício, consegue-se a melhora do comportamento fluidodinâmico, com o direcionamento do ar na região de jorro central, o que possibilita uma redução na queda de pressão para o jorro já estabelecido.

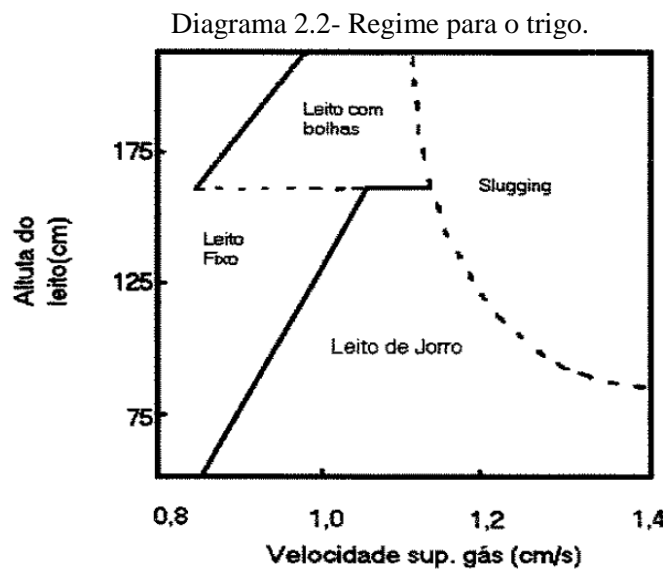
Sua principal vantagem é a menor distribuição de tempo de residência das partículas, bem como, a homogeneização da circulação de partículas. Como desvantagens, destacamos o comprometimento da permeação do ar na região anular e a diminuição das taxas de transferência de calor e massa nessa região, o que pode acarretar prejuízo em operações de secagem e revestimento. Para estas situações utiliza-se um draft poroso, que contorna o problema da redução das taxas de transferências de calor e massa, e mantém uma homogeneização na circulação das partículas.

- Leito de jorro-aerado: A porção cônica do leito recebe uma vazão de ar auxiliar, promovendo um aumento da porosidade nesta região, melhorando com isso as taxas de transferência de calor e massa.

- Leito de seção retangular: Leito composto por um prisma retangular com uma base de tronco de pirâmide, muito utilizado para o estudo da influência do ângulo da base com uma das variáveis de processo de recobrimento.
- Leito vibro-jorrado: A movimentação das partículas é auxiliada pela agitação oriunda de um sistema de vibração mecânica, localizado na base do leito.

2.5.3. Requisitos para o jorro

O jorro é um fenômeno observável, que depende de várias combinações como velocidade do gás, características das partículas sólidas e configurações geométricas do vaso. Fixando-se alguns dados como tipo da partícula e seu diâmetro (d_p), dimensões do vaso como diâmetro da entrada de ar (D_i) e diâmetro do leito cilíndrico (D_c), tipo do fluido injetado (ar), é possível traçar um gráfico com dados experimentais de altura do leito versus velocidade superficial do gás, obtendo-se informações importantes sobre o regime. Esse tipo de diagrama pode apresentar quatro fases distintas que corresponderão ao leito fixo, leito de jorro, leito com fluidização agregativa e leito fracionado (“slugging”). Conforme representado no Diagrama 2.2, ilustrado em Mathur e Epstein (1974).



Fonte: Mathur e Epstein (1974)

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

Diversos são os mecanismos que podem causar instabilidade no regime de jorro, e a estimativa da altura máxima do jorro estável é um desses fatores, pois a partir desta tem-se uma ideia de qual altura de leito deve ser utilizada no processo. Assim, por ser

um parâmetro importante para o projeto adequado do leito, muito autores têm apresentado correlações para este parâmetro.

A Equação proposta por Malek e Lu (1965) (Equação 2.16) é um exemplo para predição da altura máxima do leito para proporcionar condições de jorro estável, baseada numa série de variáveis:

$$\frac{H_{max}}{D_c} = 0,105 \left(\frac{D_c}{d_p} \right)^{0,75} \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{0,4} \left(\frac{\lambda^2}{\rho_p^{1,2}} \right) \quad (2.16)$$

Onde, λ é o fator da forma da partícula, definido como:

$$\lambda = \frac{A_p}{V_p} \quad (2.17)$$

2.5.3.2. 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 representado pela relação entre o diâmetro do orifício de entrada do fluido no cone (D_i) e o diâmetro superior do cone (D_c) (Equação 2.18):

$$\frac{D_i}{D_c} = 0,35 \quad (2.18)$$

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. Isto pode ser resolvido por um bocal convergente ou com a colocação de uma tampa cônica.

2.5.3.3. 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 pode prejudicar a estabilidade.

Sólidos em uma ampla faixa de densidades têm sido usados em jorro sem qualquer indicação de que exista limite de densidades de partículas, além do qual a ação do jorro não seria realizada.

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

2.5.3.4. 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, sólidos movimentam-se no leito, que é rompido a altas taxas de fluxo de gás. Esse rompimento, no caso de partículas grossas, leva à formação do fracionamento do leito (“slugging”).

2.5.3.5. 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 elasticidades 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 de atrito para cada material, pela escolha dos parâmetros do projeto. Segundo Paulo Filho (1999), uma investigação, na Universidade de British Columbi, sobre esse aspecto do leito de jorro e algumas indicações do comportamento do atrito foram comprovados em experimentos realizados, com fertilizantes como leito de ureia, na qual 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 variável que mais influenciou no atrito entre as partículas foi o diâmetro de entrada de ar e conseqüentemente a velocidade do ar na entrada do leito (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

2.5.4. Características fluidodinâmicas do leito de jorro

O jorro acontece acima de um valor de velocidade de gás para uma determinada combinação de gás, sólidos e configuração do leito.

Os sólidos podem ser alimentados no leito no topo, perto da parede, unindo-se à massa móvel descendente de partículas na região anular, ou com o gás entrante. Em um processo contínuo, partículas sólidas podem ser retiradas através de um orifício lateral conectado a um tubo e posicionado próximo à região da fonte, tornando contínua a saída de partículas na região anular devidamente aerada.

O mecanismo de transição de um leito jorrado é melhor descrito pela seguinte seqüência (MATHUR e EPSTEIN, 1974) e visualizado pelo Esquema 2.1 a seguir:

- Com uma baixa velocidade do gás este simplesmente percola através das partículas sem perturbá-las e a queda de pressão aumenta com a velocidade do gás, como em qualquer leito empacotado estático;
- Ao atingir uma certa velocidade do gás, a velocidade do jato se torna suficiente alta para arrastar as partículas da vizinhança imediata da entrada de gás, formando uma cavidade relativamente vazia pouco acima desta entrada. As partículas que rodeiam a

cavidade são comprimidas contra o material acima, formando um arco compacto, que oferece uma resistência maior para fluir. Por isso, apesar de uma existência de uma cavidade oca, a queda de pressão total através do leito continua a aumentar;

- Com o aumento da velocidade do gás, a cavidade alonga para um jorro interno. O arco de sólidos compactados acima do jorro interno aumenta de maneira que a queda de pressão através do leito aumenta mais até alcançar o valor máximo;

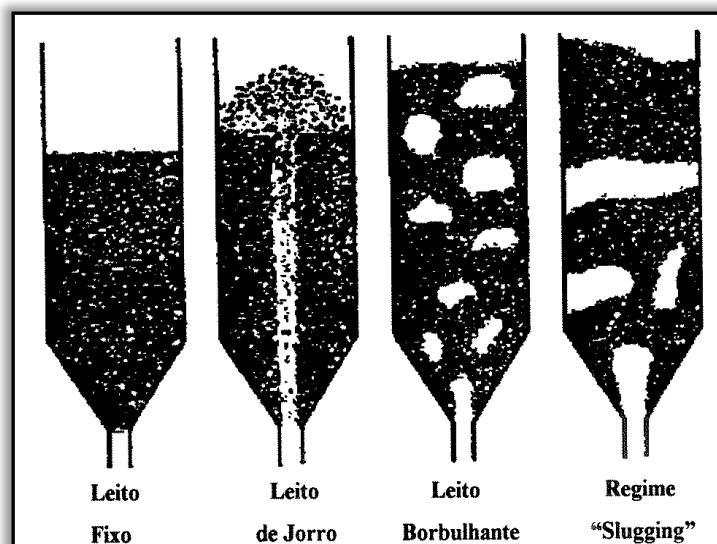
- Se a velocidade do gás é aumentada, a altura do jorro interno relativamente oco se torna grande em compactação com os sólidos empacotados acima do jorro e assim a pressão cai;

- Muitos sólidos são descolados da região central causando uma expansão significativa do leito. Esta expansão do leito causa uma diminuição na queda de pressão.

Com um pequeno aumento na velocidade do gás, atingi-se o chamado ponto de jorro incipiente; o jorro interno quebra-se e a concentração de sólidos na região exatamente acima do jorro interno decresce abruptamente, causando uma considerável redução na queda de pressão. Assim todo o leito torna-se móvel e em estado de jorro;

- Caso continue aumentando a velocidade do gás, o gás adicional simplesmente passa através da região de jorro, o qual é agora estável e a resistência é para atravessar o caminho, causando uma elevação da fonte sem efeito significativo na queda de pressão.

Esquema 2.1 – Regimes Dinâmicos obtidos em leito de jorro



Fonte: Mathur e Epstein (1974)

O conhecimento das características do fluxo de sólidos em um leito de jorro é de grande interesse para o seu projeto e aumento de escala. Porém, no fluxo multifásico gás-sólido, a observação do movimento das partículas é difícil, devido à grande

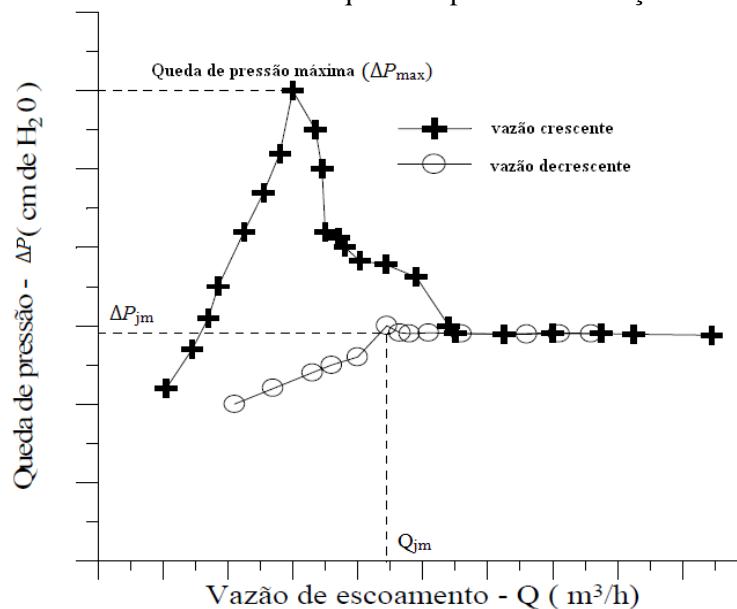
quantidade de partículas e do gás, mas elas podem afetar o fluxo que é medido instantaneamente.

2.5.5. Parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro

2.5.5.1. Curva característica

O mecanismo de transição do leito fixo para o leito de jorro pode ser mostrado na curva característica da queda de pressão em função da vazão de gás, ilustradas no Gráfico 2.2.

Gráfico 2.2 - Curva característica da queda de pressão em relação à vazão de gás.



Fonte: Santos (2008)

2.5.5.2. Queda de pressão

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}).

2.5.5.2.1. Queda de pressão máxima

O valor máximo da queda de pressão ocorre antes do leito entrar no regime de jorro, mas é associada geralmente com a entrada do gás a alta velocidade no leito de sólidos, que requer desta energia para romper a estrutura de um pacote de sólidos. A

relação, primeiro proposta por Becker (1961) e mais recentemente por Pallai e Németh (1969), é equivalente a:

$$-\Delta P_{max} = H(\rho_p - \rho_f)(1 - \varepsilon)g \quad (2.19)$$

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

$$\frac{\Delta P_{max}}{H\rho_b g} = \left[\frac{6,8}{tg\theta} \left(\frac{D_i}{D_c} \right) + 0,80 \right] - 34,4 \frac{d_p}{H} \quad (2.20)$$

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 descrita pela Equação (2.21). Esta correlação foi obtida a partir de dados da coluna ($\theta = 10 - 60^\circ$, $H = 10 - 25 \text{ cm}$) e para um material muito fino de quartzo ($d_p = 0,16 - 0,28 \text{ mm}$).

$$\frac{\Delta P_{max}}{H\rho_b g} = 1 + 0,062 \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{2,54} \left[\left(\frac{D_c}{D_i} \right) - 1 \right] \left(tg \frac{\theta}{2} \right)^{-0,18} \quad (2.21)$$

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

$$\frac{\Delta P_{max}}{\Delta P_{jm}} = 1 + 6,65 \left(\frac{H}{D_i} \right)^{1,2} \left(tg \frac{\theta}{2} \right)^{0,5} (Ar)^{0,2} \quad (2.22)$$

Onde Ar é o número de Archimedes, dado por:

$$Ar = \frac{g\varphi d_p^3 (\rho_p - \rho_f) \rho_f}{\mu^2} \quad (2.23)$$

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

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

Sampaio *et al.* (1984), propuseram uma correlação empírica a partir de dados experimentais do material utilizado (resina ABS-Y, polipropileno, painço, alpiste e sorgo). Os dados da coluna e da partícula são: ($\theta = 60^\circ$, $D_i = 2,5-3,8$ cm, $\varphi = 0,64-0,87$, $\rho_p = 0,87-1,24$ g/cm³, $\rho_b = 0,52-0,76$ g/cm³).

$$\frac{\Delta P_{max}}{\rho_b g H} = 1 + 0,055 \left\{ \left[\left(\frac{H}{D_i} \right)^{2,54} \right] - \left[0,018 \left(\frac{D_b}{D_i} \right) \right] \right\} \quad (2.24)$$

Olazar *et al.* (1994), propuseram uma correlação empírica a partir de dados experimentais do material utilizado esferas de vidro, poliestireno, ervilha e arroz. Os dados da coluna e da partícula são: ($\theta = 30-60^\circ$, $D_i = 1,5-15$ cm, $D_c = 8,8-90$ cm, $d_p = 2,16-6,17$ mm, $\rho_p = 0,845-2,986$ g/cm³, $\rho_b = 0,52-0,76$ g/cm³).

$$\frac{\Delta P_{max}}{\Delta P_{je}} = 1 + 0,166 \left[\left(\frac{H}{D_i} \right)^{1,80} \right] \left\{ \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]^{-0,80} \right\} (Ar)^{0,0125} \quad (2.25)$$

Markowski e Kaminski (1983) propuseram a seguinte correlação empírica.

$$\frac{\Delta P_{max}}{\rho_b g H} = 1 + 6,65 (Ar)^{-0,2} \left[\left(\frac{H}{D_i} \right)^{1,2} \right] \left\{ \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right)^{0,5} \right\} \quad (2.26)$$

2.5.5.2.2. Queda de pressão no jorro estável

Manurung (1964) correlacionou seus dados experimentais para poliestireno, carvão ativo ($d_p = 1 - 4$ mm, $\rho_p = 1,09 - 1,43$ mg/m³) e propôs a expressão empírica expressão pela Equação (2.27) para vasos cônicos cilíndricos com as seguintes especificações ($D_c = 15$ cm, $\theta = 60^\circ$).

$$\Delta P_{je} = \frac{H_{je} \rho_b g}{1 + [0,81 (\operatorname{tg} \theta)^{1,5} / \psi^2] \left(\frac{D_c d_p}{D_c^2} \right)^{0,78} \left(\frac{D_c}{H} \right)} \quad (2.27)$$

Mukhlenov e Gorshtein (1965), trabalhando com vasos cônicos, também propuseram uma correlação empírica a partir de dados experimentais. Os dados da coluna e da partícula são: ($\theta = 12-60^\circ$, $D_i = 1,3-1,29$ cm, $H=3-3,15$ cm, $d_p= 0,5-2,5$ mm).

$$\Delta P_{je} = \frac{\Delta P_{max}}{\left(1 + 6,65 \left(\frac{H}{D_i}\right)^{1,2} \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2}\right)^{0,5} (Ar)^{0,2}\right)} \quad (2.28)$$

Pallai e Németh (1969) com a seguinte característica do $D_c=15,2-61$ cm propuseram chegaram à seguinte correlação:

$$\frac{\Delta P_{je}}{\Delta P_{max}} = 0,8 - \left[0,01 \left(\frac{D_c}{D_i}\right)\right] \quad (2.29)$$

Sampaio *et al.* (1984) propuseram a Equação (2.30) ao utilizar : resina ABS-Y, polipropileno, painço, alpiste e sorgo . Para obtenção dessa correlação utilizaram os seguintes dados de coluna e partícula: ($\theta = 60^\circ$, $D_i = 2,5 -3,8$ cm, $\varphi = 0,64 - 0,87$, $\rho_p= 0,87-1,24$ g/cm³, $\rho_b= 0,52-0,76$ g/cm³).

$$\frac{\Delta P_{je}}{\rho_b g H_{je}} = 1 + 0,055 \left\{ \left[\left(\frac{H_{je}}{D_i}\right)^{2,54} \right] - \left[0,018 \left(\frac{D_c}{D_i}\right) \right] \right\} \quad (2.30)$$

Olazar *et al.* (1994) propuseram correlação seguinte utilizando : esferas de vidro, polibutadieno, poliestireno, ervilha e arroz. Para obtenção dessa correlação utilizaram os seguintes dados de coluna e partícula: ($\theta = 30 - 60^\circ$, $D_i = 1,5 - 15$ cm, $D_c= 8,8 - 90$ cm, $d_p= 2,16-6,17$ mm, $\rho_p= 0,845 - 2,986$ g/cm³).

$$\frac{\Delta P_{je}}{\rho_b g H_{je}} = 0,04 \left[\left(\frac{H_{je}}{D_i}\right)^{1,10} \right] (Re_{jm,i}^{0,20}) \left\{ \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^{-0,11} \right\} (Ar^{0,0125}) \quad (2.31)$$

San Jose *et al.* (1996) propuseram a seguinte correlação para a determinação da:

$$\Delta P_{je} = (\Delta P_s)_{cone} + (\Delta P_s)_{cilindro} \quad (2.32)$$

Onde:

$$\left(\frac{\Delta P_s}{(H_0 - H_c) \rho_b g} \right)_{cil.} = 3,85 * 10^{-2} \left[\frac{(H_0 - H_c)}{D_i} \right]^{0,12} \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{0,69} (Re_i)_{jm}^{0,31} \quad (2.33)$$

$$\left(\frac{\Delta P_{jm}}{\Delta P_{je}}\right)_{cone} = 1 + 035 \left[\frac{(H_0 - H_c)}{D_c}\right]^{0,1} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{1,1} Ar^{0,1} \quad (2.34)$$

$$(Re_i)_{jm} = 0,126 Ar^{0,5} \left(\frac{D_c}{D_i}\right)^{1,68} (\tan\theta)^{-0,57} \quad (2.35)$$

2.5.5.2.3. Queda de pressão no jorro mínimo

Para vasos cônicos, Mukhlenov e Gorshtein (1965) propuseram correlação empírica descrita pela Equação (2.36), derivada da Equação (2.28). Para obtenção dessa correlação utilizaram os seguintes dados de coluna e partícula: ($\theta = 10 - 60^\circ$, $D_i = 1,03 - 1,29$ cm, $H_0 = 3-3,15$ cm, $\rho_p = 0,98-2,36$ g/cm³).

$$\frac{\Delta P_{jm}}{H_{jm} \rho_b g} = \frac{7,68 \left(\tan \frac{\theta}{2}\right)^{0,2}}{Re_i^{0,2} \left(\frac{H}{D_i}\right)^{0,33}} \quad (2.36)$$

Malek *et al.* (1963) estudaram correlações de ΔP_{mj} 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:

$$\Delta P_{jm} = \left(\frac{2mg}{3A_c}\right) \quad (2.37)$$

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, $\theta = 35^\circ$), e chegaram a seguinte correlação:

$$\Delta P_{jm} = \frac{2}{3} (1 - \varepsilon_{mf}) H_{jm} \rho_p g \quad (2.38)$$

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

$$\frac{\Delta P_{jm}}{\rho_p (U_{i,jm})^2} = 2,35 (Ar) \left(\frac{H}{d_p}\right) Re_{i,jm}^{-2,285} \quad (2.39)$$

2.5.5.3. Velocidade de jorro mínimo

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

Com respeito ao efeito da forma das partículas, cabe ressaltar que a velocidade de jorro mínimo (U_{jm}), nos leitos constituídos por partícula esféricas é aproximadamente 60 % maior do que em leitos de partículas não esféricas, de alturas equivalentes (PATEL *et al.*, 1986).

Mathur e Gishler (1955) desenvolveram uma correlação empírica para U_{jm} baseada em análise dimensional. Resultados foram derivados para um número restrito de tamanhos de materiais para jorro em colunas de 7,6 até 30,5 cm de diâmetro usando ar como fluido. A equação é dada pela expressão:

$$U_{jm} = \left(\frac{d_p}{D_c}\right) \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{1/3} \left[2gH_{jm} \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{1/2} \quad (2.40)$$

Nikolaev e Golubev (1964) propuseram a seguinte correlação também válida para vasos cônicos ($D_i = 2-5$ cm, $H = 9 - 15$ cm, $d_p = 1,75-5,6$ mm).

$$\frac{(U_{jm})_i \rho g d_p}{\mu g} = (Re_i)_{jm} \quad (2.41)$$

Onde $(Re_i)_{jm}$ é calculado da seguinte forma:

$$(Re_i)_{jm} = 0,051(Ar)^{0,59} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0,10} \left(\frac{H_{jm}}{D_c}\right)^{0,25} \quad (2.42)$$

Groshtein e Mukhlenov (1964) propuseram a seguinte correlação baseado nos dados do equipamento e dos materiais ($D_i = 1,0 - 1,3$ cm, $H_0 = 3 - 15$ cm, $d_p = 0,5-2,5$ mm, $\theta = 12 - 60^\circ$, $\rho_p = 0,98 - 2,36$ g/cm³).

$$(Re_i)_{jm} = 0,174 \frac{Ar^{0,50}}{\left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2}\right)^{2,5}} \left(\frac{D_b}{D_i}\right)^{0,85} \quad (2.43)$$

Goltsiker (1967) para a determinação da U_{jm} utiliza-se o número de Reynolds mostrado a seguir, para fertilizantes e sílica gel ($d_p=1,0 - 3,0$ mm).

$$(Re_i)_{jm} = 73(Ar)^{0,14} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{0,47} \left(\frac{H_{jm}}{D_i} \right)^{0,9} \quad (2.44)$$

Tsvik *et al.* (1967) para a determinação da U_{jm} encontrou a seguinte correlação para o número de Reynolds, para fertilizantes ($d_p= 1,5 - 4,0$ mm, $\rho_p= 1,65 - 1,70$ mg/m³), válida para vasos cônicos.

$$(Re_i)_{jm} = 0,4(Ar)^{0,14} \left(\frac{H_{jm}}{D_i} \right)^{1,24} \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)^{0,42} \quad (2.45)$$

Abdelrazek (1969) para vasos cilíndricos com base cônica utilizando esferas de vidro e aço com tamanhos uniformes ($d_p=0,5-0,8$ mm, $\rho_p= 2,46-7,07$ mg/m³) é expressa pela seguinte equação.

$$U_{jm} = \frac{1}{1,74} \left[\left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3} \left(\frac{2gH_{jm}(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{1/2} - 0,25 \right] \quad (2.46)$$

Markowski e Kaminski (1983) para a determinação da U_{jm} encontrou a seguinte correlação para o número de Reynolds:

$$(Re_i)_{jm} = 0,028Ar^{0,57} \left[\left(\frac{H_{jm}}{D_i} \right)^{0,48} \right] \left[\left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{1,27} \right] \quad (2.47)$$

Olazar *et al.* (1993) utilizando esferas de vidro, polibutadieno, poliestireno, ervilha e arroz ($d_p= 2,16 - 6,17$ mm, $\rho_p= 0,845 - 2,986$ g/cm³, $D_i = 1,5 - 15$ cm, $D_c= 8,8 - 90$ cm, $\theta= 30 - 60^\circ$) determinaram a seguinte correlação para o número de Reynolds:

$$(Re_i)_{jm} = 0,174Ar^{0,5} \left[\left(\frac{D_b}{D_i} \right)^{0,85} \right] \left\{ \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]^{-1,25} \right\} \quad (2.48)$$

San Jose *et al.* (1996) determinou a seguinte correlação para o número de Reynolds:

$$(Re_i)_{jm} = 0,126Ar^{0,5} \left[\left(\frac{D_b}{D_i} \right)^{1,68} \right] \left\{ \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]^{-0,57} \right\} \quad (2.49)$$

2.5.6. Trabalhos de fluidodinâmica em leito de jorro

DA SILVA (1998) – Monitoramento de regimes de contato gás-sólido em leito de jorro cone-cilindro por medidas de queda de pressão em tempo real

Neste trabalho o objetivo foi determinar um método de identificação de regimes de contato gás-sólido em leito de jorro cone-cilindro, a partir da queda de pressão no leito. Foram analisados os leitos fixo, de jorro e “slugging”. Os dados de queda de pressão no leito foram adquiridos em tempo real pelo software “labtech”. A taxa de amostragem utilizada foi de 128 Hz em um intervalo de 12 segundos, após a instalação do regime fluidodinâmico desejado no leito. Nos espectros observaram-se picos dominantes em determinada faixa de frequência dependendo do regime instalado. Para o leito de jorro estável o pico dominante esteve na faixa de frequência de 4,5 – 6,9 Hz, enquanto para o regime “slugging”, este se situou entre 1, 125 – 2,5 Hz. Os valores foram comparados com os valores calculados por correlações encontradas na literatura, implementadas em um programa desenvolvido na linguagem Borland Delphi 2.0.

OLAZAR *et al.* (2001) - Effect of operating conditions on solid velocity in the spout, annulus and fountain of spouted beds.

Uma sonda de fibra óptica foi utilizada para estudar o efeito das condições operacionais (ângulo da base, o diâmetro de entrada de gás, altura do leito estagnado, diâmetro das partículas e velocidade do gás) sobre a velocidade das partículas em três zonas de leito de jorro: bico, anel e na fonte. Os resultados experimentais comprovam a validade da equação de Epstein e Grace (1984) para predição da componente vertical da velocidade da partícula no bico, estabelecendo a relação do parâmetro da equação com as condições de funcionamento. Também foi comprovado que a equação de Mathur e Epstein (1974) é válida para prever a velocidade das partículas na fonte. A partir dos valores dos componentes verticais (experimental) e componentes horizontais (calculado) de velocidade de partícula, mapas de vetor velocidade ao longo do leito foram

estabelecidas e zonas preferenciais de fluxo contínuo de sólido no bico foram determinadas.

ISHIKURA *et al.* (2003) – Hydrodynamic behavior of gas and particles in a spout-fluid bed with a draft tube.

Estudaram a fluidodinâmica de um leito de jorro com tubo draft (tubo interno) poroso e sem poros contendo uma pequena quantidade de partículas finas. Informações como altura da fonte, diâmetro do jorro e taxa de recirculação das partículas foram analisadas e comparadas para diferentes configurações. O comportamento cinético das partículas é previsto a partir da teoria cinética do fluxo granular, enquanto que a intensidade do atrito é calculado a partir de um modelo proposto por Johnson *et al.*(1990). Os resultados numéricos mostram que a taxa de fluxo de gás através do anel aumenta com o aumento da zona de arrastamento. A taxa de circulação de sólidos diminui com a diminuição da velocidade do gás de entrada e da altura da zona de arraste.

DUARTE *et al.* (2009) –Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica do leito de jorro operando com mistura de partículas.

O Objetivo deste trabalho foi estudar, através de experimentos e simulações, misturas de partículas, para tanto, no primeiro momento foram obtidos perfis experimentais de velocidade de sólidos utilizando-se uma câmera de alta precisão (2000 frames/s) a uma determinada altura do leito em relação à base do mesmo variando-se o tamanho e a quantidade das partículas para verificar a influência de mistura de partículas na fluidodinâmica do leito de jorro – neste caso utilizou-se um leito com sua parede frontal construída em vidro para uma melhor visualização das partículas. Após esta primeira etapa de experimentos realizou-se simulações fundamentando-se da técnica de fluidodinâmica computacional afim de comparação.

2.5.7. Aplicações do leito de jorro

2.5.7.1. Recobrimento

Um trabalho pioneiro neste tema foi realizado por Liu e Lister (1993). Neste trabalho sementes pequenas, como de mostarda e de nabo foram recobertas com dois tipos de fertilizantes em leito de jorro. Os autores estudaram o efeito das propriedades

das sementes e do material recobridor e de outras variáveis operacionais na taxa de revestimento e na sua elutriação. Conceição Filho (1997) estudou os efeitos da temperatura e da vazão do ar de jorro na eficiência do processo e no índice de germinação das sementes de soja recobertas com macronutrientes e KCl).

Logo, o recobrimento de partículas possui diversas aplicações nas indústrias químicas, farmacêuticas, de alimentos e de produtos agrícolas. O objetivo é aplicar uma camada uniforme de um material sobre a superfície de uma partícula com diversas finalidades (PICOLLO *et al.*, 1997).

Os principais objetivos do revestimento de partículas são:

- Baixar a taxa de dissolução de substâncias químicas;
- Tornar o manuseio de produtos mais fácil;
- Inibir sabores e odores desagradáveis;
- Aumentar o volume para melhor manuseio;
- Adicionar material para suprir futura carência pela partícula;
- Proporcionar boa estética ao produto;
- Proporcionar resistência mecânica.

Tendo em vista os objetivos citados, o revestimento de partículas apresenta inúmeras aplicações, estendendo-se a vários setores:

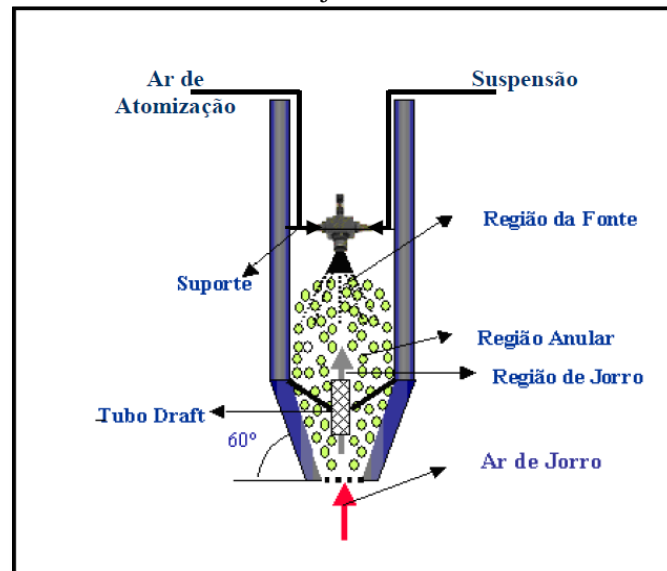
- Recobrimento de grânulos de fertilizantes com enxofre (WEISS e MEISEN, 1983);
- Recobrimento de microesferas de combustível nuclear (PICCININI e ROVERO, 1983);
- Recobrimento de sementes com fertilizantes (LIU e LISTER, 1993);
- Recobrimento de comprimidos (PICOLLO *et al.*, 1997)
- Recobrimento de sementes de soja com micronutrientes e inoculante (LUCAS, 2000 e DUARTE, 2002).

O leito de jorro é um equipamento que devido à boa movimentação das partículas e ao ótimo contato fluido-partículas, tem sido tema de diversos trabalhos de recobrimento de partículas. Entretanto, o uso desse equipamento para revestir sementes de produtos agrícolas é um assunto ainda pouco estudado, havendo um número reduzido de trabalhos sobre o tema.

No leito de jorro, o revestimento é feito pela pulverização da suspensão recobridora sobre as sementes utilizando um bico atomizador pneumático (Esquema 2.2). Neste caso o revestimento é caracterizado pelo crescimento que ocorre em torno da

semente, na qual partículas do material pulverizado colidem e aderem-se à superfície formando camadas concêntricas. Este mecanismo é denominado formação de camadas.

Esquema 2.2 – Equipamento utilizado no recobrimento de partículas em leito de jorro



Fonte: Duarte (2006)

Quando se estuda o revestimento de sementes, é necessário que se faça uma análise criteriosa da qualidade do produto final, pois não se justificaria recobrir a semente com nutrientes e ao mesmo tempo danificá-la. Os danos causados às sementes podem ser produzidos pela temperatura do ar ou pelos choques entre elas dentro do leito. A temperatura de operação também pode afetar a qualidade do inoculante. Nesse caso, a temperatura passa a ser o fator limitante para a sobrevivência das bactérias fixadoras de nitrogênio, já que estas são sensíveis a altas temperaturas. A qualidade das sementes recobertas pode ser avaliada pelos índices de germinação, vigor e sementes não fissuradas, bem como pelo aparecimento, pela quantidade e qualidade dos nódulos nas raízes da planta de soja. Lucas (2000) revestiu sementes de soja com micronutrientes e inoculante, estudou os efeitos das variáveis vazões de ar de jorro, de ar de atomização e de suspensão na qualidade final das sementes e na eficiência do processo. O autor obteve correlações envolvendo algumas destas variáveis para determinar as melhores condições que assegurem uma boa qualidade final das sementes.

2.5.7.2. Misturas de sólidos

Poucos estudos sobre mistura e segregação de partículas em leitos de jorro estão disponíveis na literatura. Olazar *et al.* (1993) estudaram a estabilidade de leitos de jorro cônicos e desenvolveram modificações na região de entrada de leitos cônicos a fim de reduzir a segregação de misturas binárias de esferas de vidro. Foram realizados vários experimentos com misturas binárias de partículas de esferas de vidro entre 1 e 8 mm, que foram utilizados para desenvolver correlações para previsão da velocidade de jorro mínimo de misturas em leitos de jorro com contator na entrada. Em continuação ao trabalho de Olazar *et al.* (1993), San José *et al.* (1994) estudaram os efeitos de segregação radial e longitudinal para misturas binárias e ternárias em leito de jorro cônico com contator. Além disso, eles estabeleceram correlações úteis para a concepção do contator, que relacionam o índice de global de mistura às variáveis de projeto dos contadores e as propriedades da mistura de sólidos.

Larachi *et al.* (2002) estudaram a circulação e mistura de sólidos em leito de jorro. Neste estudo foram avaliadas as características fluidodinâmicas em quatro regiões do leito: cilíndrica anular, cônica anular, jorro e fonte. Os autores evidenciaram que partículas na região cilíndrica anular podem se transferir para a região de jorro através da interface.

2.5.7.3. Simulação de modelos matemáticos

Atualmente, simulações numéricas têm sido utilizadas para obter resultados fluidodinâmicos de vários equipamentos, incluindo o leito de jorro. Essas simulações, quando comparadas aos dados experimentais, podem ser extremamente úteis na obtenção de informações em regiões de difícil medida (KAWAGUCHI *et al.*, 2000).

Em relação ao leito de jorro, há poucos trabalhos que consideram mais de uma fase granular. Santos *et al.* (2009), simularam um leito de jorro composto por multi-partículas, considerando duas fases granulares iguais, dispostas em regiões diferentes no leito. Assim, os autores verificaram que a utilização do modelo que define o arraste entre as duas fases granulares melhora a descrição das interações entre as partículas, proporcionando um cálculo mais preciso da relação entre a velocidade e a queda de pressão, inclusive uma melhor predição da condição de jorro mínimo. Foi observado

que os melhores resultados foram obtidos quando as multi-partículas foram simuladas como uma mistura de partículas com o percentual de mistura de 50%.

2.5.7.4. Granulação

A granulação tem por objetivo transformar partículas de pós cristalinos ou amorfos em agregados sólidos de resistência e porosidade variadas. Em comparação a uma simples mistura de pós, o granulado apresenta algumas vantagens, segundo Le Hir (1997):

- Melhor conservação da homogeneidade de distribuição dos componentes e das fases granulométricas;
- Maior densidade;
- Facilidade superior de escoamento;
- Maior reprodutibilidade em medições volumétricas;
- Resistência mecânica superior.

A utilização de um leito de jorro para a produção de grãos de tamanhos milimétricos, partindo-se de suspensões, foi primeiramente proposta por Berquin (1961). Nestes processos, uma fase líquida é injetada na base do leito de partículas do material a ser granulado, juntamente com o gás de entrada aquecido.

Dados extensos sobre granulação de materiais tais como pigmentos inorgânicos, tintas orgânicas e outras substâncias sensíveis ao calor, foram registrados por Romankov e Rashkovskaya (1968), tanto para escala de bancada, quanto para unidades de tamanho industrial, onde o sistema utilizado foi essencialmente o mesmo de Berquin (1966), porém utilizando diferentes arranjos na alimentação e descobriram que materiais pastosos e viscosos, introduzidos no topo do leito através de um alimentador vibracional, podem ser bem empregados na granulação ou secagem.

2.5.7.5. Secagem

A principal justificativa do uso do leito de jorro na secagem de material particulado se deve à sua característica de boa agitação dos sólidos e um efetivo contato gás-sólido. Os baixos investimentos iniciais e o custo operacional reiteram mais ainda o interesse pela aplicação do leito de jorro em secagem de cereais (FREIRE e SARTORI, 1992).

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 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 para os mais variados grãos.

2.5.8. Trabalhos de secagem utilizando leito de jorro

PETERSON (1962) – Spouted bed drier.

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.

OLIVEIRA (1999) - Estudo da secagem em leito de jorro, com condições operacionais intermitentes de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade carioca.

Neste trabalho estudou-se o comportamento do processo de secagem do feijão em leito de jorro em escala laboratorial, com condições operacionais contínuas e intermitentes quanto ao aquecimento e ao regime fluidodinâmico, do ar de secagem. Os experimentos em regime intermitente contemplaram dois tipos de regime: leito de jorro/leito fixo e leito de jorro/descanso. Uma montagem em escala de laboratório e operada em batelada foi utilizada, contendo um secador construído em acrílico, com a base cônica e a coluna cilíndrica. Para a obtenção dos dados experimentais utilizou-se a técnica de planejamento fatorial em 2 níveis, sendo avaliadas as influências das seguintes variáveis de processo: temperatura do ar de secagem, com valores de 80 e 60 °C, umidade inicial dos grãos, com valores de 30 e 20 %b.s., e tempo de intermitência da fonte de aquecimento e/ou fornecimento de ar, com valores de 40 e 20 minutos. A análise energética do processo indicou resultados promissores de melhora na eficiência da

secagem para as condições intermitentes, principalmente trabalhando-se com intermitência com interrupção no suprimento de ar ao leito.

DIAS *et al.* (2000) – Effect of drying in two-dimensional spouted bed drying on physical and technological properties of black beans (*Phaseolus vulgaris*, L).

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 6 h), da vazão de ar injetado no sistema (25,64; 29,14 m/s) e da carga de grãos (3; 3,5 e 4,0 Kg) 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 6 horas 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.* (2008) - Phycocyanin content of *spirulina platensis* dried in spouted bed and thin layer.

O objetivo deste trabalho foi estudar a secagem de *Spirulina platensis*, avaliando as características do produto final quanto ao seu conteúdo ficocianina e sua solubilidade em água. Duas técnicas de secagem foram usados: o leito de jorro e camada delgada. Para a secagem em leito de jorro, a geometria cone-cilíndrico foi escolhido, ou seja, leito convencional tipo jorro (CSB) e leito de jorro jet, com uma concentração de massa de 5 %. A camada fina de secagem foi realizada em temperaturas entre 50 e 60 °C, com uma carga de material de 4 kg/m² na bandeja. O secador de leito de jorro tipo CSB demonstrou boa funcionalidade, não apresentando uma queda durante os experimentos. A solubilidade em solução aquosa média foi semelhante em todas as técnicas de secagem, sendo os valores encontrados em torno de 37 %. Os maiores valores de ficocianina foram encontrados a temperatura de 50 °C no leito de jorro tipo CSB, no entanto, a camada fina foi excluída de forma a não atingir o teor de umidade comercial.

2.6. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Em um planejamento de experimentos é realizada uma série de testes nos quais são feitas variações, propositalmente, nos parâmetros de controle do processo, com o objetivo de observar e identificar as variações na resposta (MONTGOMERY, 1991).

Segundo Faria (1998), pode-se determinar através de experimentos estatisticamente planejados:

1. Variáveis ou fatores, do processo que são mais influentes no(s) parâmetro(s) de resposta de interesse;
2. Níveis de ajuste das variáveis do processo influentes na resposta, de modo que a variabilidade do parâmetro de resposta seja mínima;
3. Níveis de ajuste das variáveis influentes do processo, de modo que o valor do resultado seja próximo do valor nominal;
4. Níveis de ajuste das variáveis influentes na resposta, de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja reduzido.

Na secagem as técnicas de planejamento fatorial e metodologia de superfícies de resposta têm sido empregadas para otimização do processo, minimizando o número de experimentos, que em sua maioria são trabalhosos e dispendiosos (FARIA, 1998).

Para se realizar um planejamento fatorial é necessário selecionar um número fixo de níveis para cada um dos fatores (variáveis), e então, realizar-se os experimentos com todas as possíveis combinações de níveis, por exemplo, um planejamento de dois níveis (2^k) e três variáveis ($k=3$), resulta em oito corridas ($2^3=8$) (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978).

A metodologia de superfície resposta (MSR) consiste em um grupo de técnicas matemático-estatística utilizada para análise e modelagem de problemas, nos quais uma resposta particular é função de diversas variáveis e o principal objetivo é otimizar esta resposta. As superfícies representam uma boa forma de ilustrar graficamente a relação entre as diferentes variáveis experimentais e as respostas, oferecendo valiosas informações sob o comportamento das variáveis na região estudada (MONTGOMERY, 1991).

2.6.1. Projetos fatoriais completos em dois níveis

Planejamentos deste tipo são de grande utilidade em investigações preliminares, quando se deseja saber se determinados fatores têm ou não influência sobre a resposta (BARROS, SCARMINIO, BRUNS, 1995).

Para estudar o efeito de qualquer fator sobre a resposta é preciso fazê-lo variar e observar o resultado dessa variação. Um planejamento fatorial em que todas as variáveis são estudadas em apenas dois níveis é o mais simples de todos. Havendo k variáveis controladas, o planejamento irá requerer a realização de $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ensaios diferentes, sendo chamado de planejamento fatorial 2^k . A listagem das combinações é chamada matriz de planejamento. Trabalhando-se apenas com dois níveis de cada variável, a série experimental é reduzida substancialmente (BARROS, SCARMINIO, BRUNS, 1995).

Segundo Box, Hunter e Hunter (1978) estes projetos são importantes por que:

- i) requerem, relativamente, poucos experimentos por fator estudado e, embora sejam incapazes de explorar completamente uma ampla região no espaço fatorial, podem indicar as principais tendências e determinar uma nova direção para experimentos posteriores;
- ii) quando uma maior exploração local é necessária, estes podem ser aumentados para formar os projetos compostos;
- iii) podem formar a base para os projetos fatoriais fracionários em dois níveis, ao quais são de grande importância no estágio inicial da investigação, quando é necessário selecionar os fatores mais importantes;
- iv) podem ser usados, assim como o projeto fatorial fracionário na construção de blocos, fornecendo respostas sofisticadas para problemas com um maior grau de complexidade;
- v) a interpretação dos resultados pode ser feita através da matemática elementar.

As variáveis independentes nos projetos fatoriais em dois níveis são codificadas, pois a codificação adimensionaliza as variáveis aumentando a exatidão na estimativa dos coeficientes, uma vez que as variáveis estão sendo estudadas dentro de um mesmo intervalo.

Nos planejamentos em dois níveis costuma-se identificar os níveis alto e baixo com os sinais (+) e (-), respectivamente. A atribuição destes sinais aos níveis superiores ou inferiores é feito de forma arbitrária e não interfere na realização dos experimentos

ou interpretação dos resultados, além de permitir esquematizar o planejamento na forma de uma matriz de planejamento. Para evitar a ocorrência de distorção estatística dos resultados, isto é, para impedir que erros atípicos sejam obrigatoriamente associados a determinadas combinações de níveis, os ensaios devem ser realizados em ordem totalmente aleatória. Uma maneira simples de fazer isso é sortear a ordem de realização dos experimentos (TAQUEDA, COSTA, FARIA, 1996 e BARROS, SCARMINIO, BRUNS, 1995).

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. PARTÍCULAS

3.1.1. Procedência e acondicionamento

As partículas utilizadas foram sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.), da variedade “Linseed” da cor marrom, adquiridas no mercado local da cidade de Belém/Pará. Elas foram acondicionadas no laboratório de secagem e recobrimento de partículas (LSRP) da FEQ/UFPA, armazenadas em recipientes plásticos e mantidas em ambiente a 7 °C e 85 % de umidade relativa até a realização do trabalho.

Fotografia 3.1 - Sementes de linhaça marrom *in natura*



3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.2.1. Caracterização física

O conhecimento das propriedades físicas das sementes de linhaças é importante para o estudo desta matéria-prima, assim como para o projeto de equipamentos, desenvolvimento e simulação de processos unitários. Desta forma, foram determinadas experimentalmente as propriedades físicas, detalhadas a seguir:

a) Massa específica absoluta

A determinação da massa específica absoluta ou real das sementes de linhaça foi realizada em cinco réplicas no Laboratório de Engenharia de Produtos Naturais (LEPRON) da FEQ/UFPA, através do método de picnometria de comparação, recomendado por Webb e Orr (1997). A massa específica absoluta exclui tanto os poros das partículas quanto os espaços interpartículas.

A massa específica aparente, definida pela razão entre a massa de sólidos e o volume total das partículas, que inclui os poros, mas exclui os espaços interpartículas.

b) Porosidade do Leito

A determinação da porosidade do leito foi obtida pelo método empírico descrito por McCabe e Smith (1993) de acordo com a Equação 2.13.

c) Esfericidade

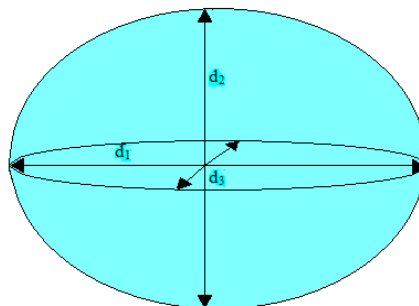
A Equação 3.1 foi utilizada para estimar a esfericidade, conforme descrito por Peçanha e Massarani (1986). A determinação foi realizada com o auxílio de um microscópio ótico marca DMI com aumento de 40 vezes, com retículo de 1 cm, subdividido em 10 mm, para a tomada do diâmetro circunscrito (D_{CC}) e inscrito (D_{IC}), e de um paquímetro para a tomada da espessura (e) da linhaça.

$$\varphi = \frac{D_{IC}}{D_{CC}} \quad (3.1)$$

Para efeito de comparação foi também determinada a esfericidade através do método de Mohsenin (1970), considerando-se a linhaça um elipsóide triaxial (Esquema 3.1). Este método assume que o volume de sementes é equivalente ao volume de um elipsóide triaxial e que o diâmetro da esfera circunscrita é igual ao maior eixo do elipsóide. O grau de esfericidade é calculado através da média geométrica dos três eixos mutuamente perpendiculares do sólido pelo maior eixo (Equação 3.2).

$$\varphi = \frac{\sqrt[3]{d_1 d_2 d_3}}{d_3} \quad (3.2)$$

Esquema 3.1 – Elipsóide triaxial e seus eixos principais



d) Diâmetro médio equivalente do sólido

O diâmetro médio da semente de linhaça foi determinado através de análise granulométrica, com a utilização de peneiras do tipo Tyler/Mesh com a seguinte série de peneiras: 8, 9, 10 e 12 e de um agitador da marca Produtest, 220V-5A, onde as sementes permaneceram sob agitação por um período de 15 minutos. Para que com os dados obtidos fosse analisado com o auxílio da equação de Sauter, mostrada na Equação 3.3:

$$d_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}}$$

e) Ângulo de repouso

O ângulo de repouso das partículas foi estimado pelo método do tambor rotativo e classificado, quanto ao grau de escoabilidade, acordo com a Tabela 3.1, conforme recomendado por Jong, Hoffmann e Finkers (1999). Foram executadas 10 medidas experimentais para a estimativa do valor médio.

Tabela 3.1. Comportamento de escoabilidade de sólidos em relação ao ângulo de repouso

Ângulo de Repouso (°)	Escoabilidade
> 60	Sem fluidez
> 60	Coesivo
60 – 45	Fluidez regular
45 – 30	Boa fluidez
30 – 10	Excelente fluidez
<10	Aerado

3.2.2 Caracterização qualitativa

a) Pureza

Para a determinação da pureza das sementes de linhaça utilizou-se o método contido em Brasil (1992), sendo que esta análise foi realizada com o número de repetições igual a 10, onde o processo resumia-se a pesagem de cerca de 1 g de sementes em balança analítica da marca GEHAKA, modelo AG 200 com precisão de 0,0001g, separando as sementes normais das impurezas/sementes quebradas e pesando novamente.

b) Peso de mil sementes

Conforme a metodologia descrita por Brasil (1992), o peso de mil sementes foi determinado usando oito repetições de 100 sementes, proveniente da porção de sementes classificadas como normais do teste de pureza.

A partir da separação visual pesaram-se cada grupo de 100 sementes para assim realizarmos análises dos desvios padrão, para identificação da variabilidade da semente.

c) Análise de superfície

As sementes de linhaças foram analisadas quanto à uniformidade pelo método descrito por Becher e Schlünder (1998), em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), Leo Zeiss, modelo 1430 (Inglaterra), localizado no Laboratório de Geociência da UFPA.

d) Germinação e Índice velocidade de germinação

Uma amostra do trabalho contendo 400 sementes foi retirada ao acaso e distribuída igualmente em quatro placas de germinação (gerbox). As placas “gerbox” continham papel de germinação, embebidas em água destilada, esterilizado previamente em solução a 0,025 % de cloro ativo em água.

As sementes foram postas uniformemente a uma distância de aproximadamente 1 cm, para minimizar a competição e contaminação entre elas. As placas foram tampadas e colocadas à temperatura ambiente por aproximadamente cinco dias.

Para a determinação do percentual de sementes germinadas a contagem das plântulas foi feita diariamente, sendo consideradas todas aquelas que apresentaram desenvolvimento normal ou mesmo pequenos defeitos em suas estruturas, desde que mostrassem um desenvolvimento satisfatório, com todas as estruturas essenciais presentes.

3.2.3. Caracterização Centesimal

As análises descritas a seguir foram conduzidas com a finalidade de caracterizar as sementes quanto a sua composição centesimal através de métodos padronizados:

a) Umidade

Para a determinação do conteúdo de umidade da linhaça *in natura* foi utilizado o método padrão descrito na norma analítica 4.5.1 segundo o Instituto Adolfo Lutz (1985), cujo procedimento foi conduzido em triplicata e as massas de sementes pesadas em balança analítica da marca GEHAKA, modelo AG 200 com precisão de 0,0001g. As massas foram postas em estufa com circulação de ar forçada, da marca FABRE a 105°C por 24 horas, para a determinação da massa de sólido seco.

b) Proteína

A quantidade de proteína da linhaça *in natura* foi determinada através do método padrão descrita na norma analítica 4.12, segundo o Instituto Adolfo Lutz (1985) utilizando um sistema digestor modelo TE 10013, marca Tecnal (Brasil) e um destilador de nitrogênio MA-036, marca Marconi (Brasil). Os ensaios foram realizados em triplicata.

c) Resíduo mineral fixo

A determinação do resíduo mineral fixo das sementes de linhaça foi realizado, em triplicata e conduzido a partir da incineração, a 550°C, em mufla elétrica de marca Quimis, modelo 318.24 de controle automático. Conforme descrito na Norma Analítica 4.6, disponibilizado pelo Instituto Adolfo Lutz (1985).

d) Lipídios

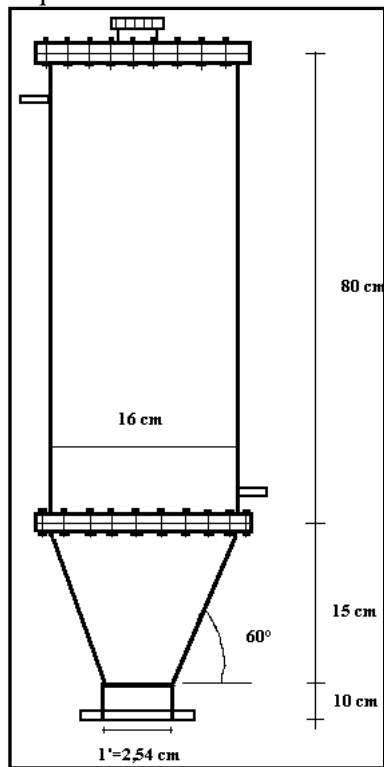
Os ensaios foram realizados em triplicata, utilizando o aparelho de Soxhlet com o auxílio de uma bateria de aquecimento CT-340 da marca Logen e utilizando como solvente éter de petróleo, para a realização da extração de lipídios. O procedimento para a determinação do teor de lipídios seguiu a Norma Analítica 4.6 descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (1985).

3.3. EQUIPAMENTO UTILIZADO

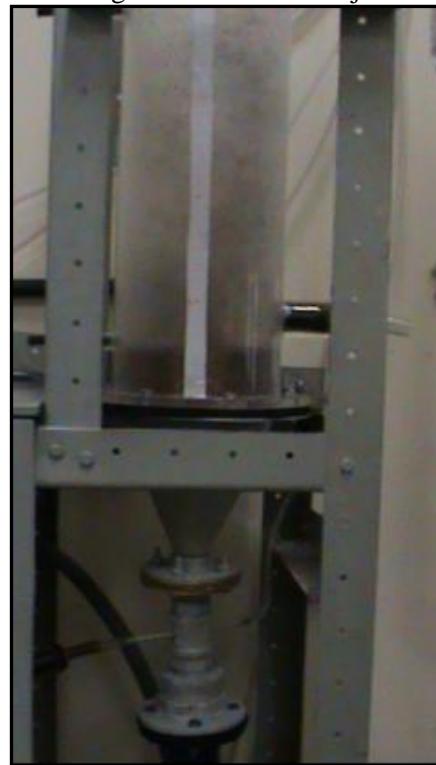
3.3.1. O leito

O sistema experimental (Esquema 3.2) utilizado na condução dos ensaios de fluidização/secagem consiste em um leito cone-cilindrico. O cone foi construído em ferro galvanizado, com ângulo de 60° , 15 cm de altura, diâmetro de entrada do ar igual a 2,54 cm e diâmetro superior de 16 cm. Já o corpo cilíndrico foi confeccionado em resina acrílica, para possibilitar a visualização do regime de operação desejado, apresentando 16 cm de diâmetro interno e 80 cm de altura. Estas dimensões, segundo a literatura (Becker, 1961) não só favorece o estabelecimento de jorro estável para partículas do grupo D, por apresentar uma relação $D_i/D_c=0,17$, como favorece a circulação de sólidos e evita zonas mortas.

Esquema 3.2 - Dimensões do leito



Fotografia 3.2 - Leito de jorro

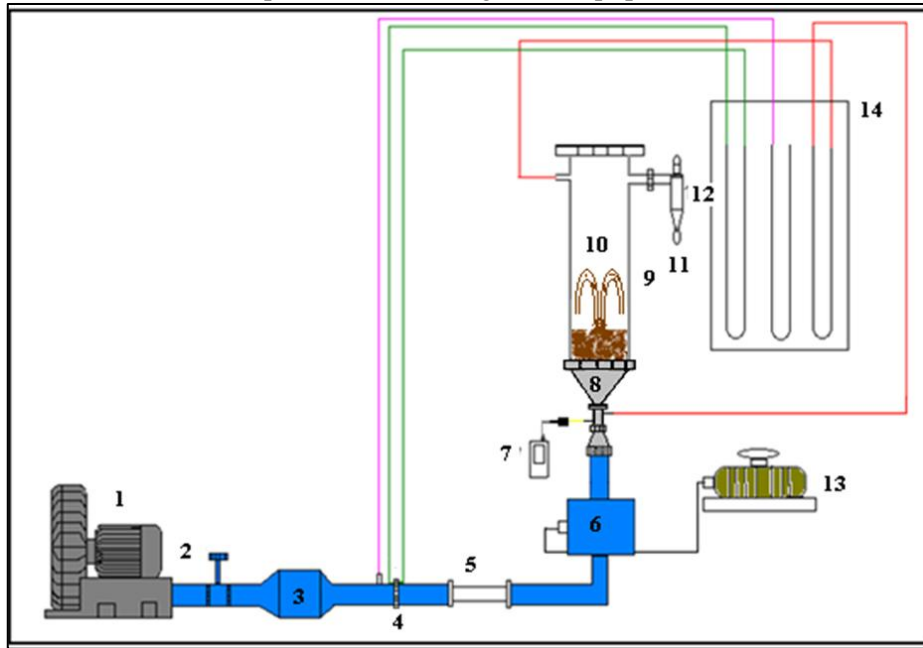


3.3.2. Montagem experimental

A montagem experimental do leito de jorro convencional, pode ser visualizada no Esquema 3.3. O leito está conectado a um soprador (1) de 4 CV através de uma tubulação de ferro galvanizado de duas polegadas. Ao longo da linha estão dispostos os acessórios: uma válvula globo (2) para o controle da vazão, um trocador de calor (3), a placa de orifício (4), um leito de sílica (5), aquecedores de ar (6), um termometro digital

(7), o cone de ferro (8), o cilindro em acrílico (9), leito com sementes de linhaça (10), um ciclone (12), um variac (13) e um quadro com manômetros diferenciais em U (14).

Esquema 3.3 - Montagem do equipamento



A Fotografia 3.3 ilustra o sistema experimental em leito jorro instalado no Laboratório de Secagem e Recobrimento de Partículas da FEQ/UFGA, utilizado nos ensaios experimentais de fluidização e secagem com sementes de linhaça.

Fotografia 3.3 - Equipamento utilizado na fluidodinâmica



3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.4.1. Controle e medição da vazão do ar de fluidização

As medidas de vazão foram obtidas através de um medidor de placa de orifício e as tomadas de pressão diferencial foram instaladas nos cantos da placa, uma a jusante e outra a montante, sendo que a leitura foi feita por um manômetro tipo tubo em U. A calibração da placa de orifício permitiu a obtenção da vazão do ar em função da queda de pressão na placa. O procedimento para a calibração adotada é descrito em Ower e Pankhurst (1977), resultando na Equação 3.4:

$$Q_m = 2,7099 \frac{\Delta H_{PO}^{1/2}}{(273 + b)} - 0,8546 \left[\frac{\Delta H_{PO}^{3/2}}{(P_1 + b)(273 + T)^{1/2}} \right] \quad (3.4)$$

Onde: Q_m é a vazão mássica (kg/min); T é a temperatura do ar na entrada (°C); b é a pressão barométrica local (mmHg); P_1 é a pressão estática a montante de placa de orifício (cmH₂O); ΔH_{PO} é a queda de pressão na placa de orifício (cmH₂O).

3.4.2. Avaliação do comportamento fluidodinâmico

Foram realizados testes de fluidodinâmica com as cargas de 1590, 2445 e 2955 g de sementes de linhaça, as quais correspondem às alturas de 5, 10 e 15 cm, respectivamente, nas temperaturas ambiente (28 °C), 45, 55 e 65 °C.

Os gráficos com os comportamentos fluidodinâmicos foram realizados com o aumento gradativo da vazão sendo tomados a cada momento a deflexão correspondente nos manômetro referentes à perda de carga na placa de orifício (ΔH_{PO}) em CCl₄, a perda de carga no leito (ΔH_{Leito}) em cmH₂O e a perda de carga total (ΔH_{Total}) em cmHg, para a determinação da carga a ser utilizada no planejamento de experimentos.

Foram estimados, a partir das curvas características, os parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro, como: queda de pressão máxima (ΔP_{max}), queda de pressão no jorro estável (ΔP_{je}), queda de pressão no jorro mínimo (ΔP_{jm}) e velocidade de jorro mínimo (U_{jm}), e comparados com os valores estimados pelas correlações que foram citadas na revisão bibliográfica e sumarizadas nas Tabelas 3.2 a 3.5.

Tabela 3.2. Equações para queda de pressão máxima

Autor	Equação
Pallai e Németh (1969)	$\Delta P_{\max} = H(\rho_p - \rho_f)(1 - \varepsilon)g$
Manurung (1964)	$\frac{\Delta P_{\max}}{H\rho_f g} = \left[\frac{6,8}{\text{tg}\theta} \left(\frac{D_i}{D_c} \right) + 0,80 \right] - 34,4 \frac{d_p}{H}$

Tabela 3.3. Equações para queda de pressão no jorro estável

Autor	Equação
Mukhlenov e Gorshtein (1965)	$\Delta P_{je} = \frac{\Delta P_{\max}}{\left(1 + 6,65 \left(\frac{H}{D_i} \right)^{1,2} \left(\text{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{0,5} (Ar)^{0,2} \right)}$
Sampaio <i>et al.</i> (1984)	$\frac{\Delta P_{je}}{\rho_f g H_{je}} = 1 + 0,055 \left\{ \left[\left(\frac{H_{je}}{D_i} \right)^{2,54} \right] - \left[0,018 \left(\frac{D_c}{D_i} \right) \right] \right\}$

Tabela 3.4. Equações para queda de pressão no jorro mínimo

Autor	Equação
Mukhlenov e Gorshtein (1965)	$\frac{\Delta P_{jm}}{H_{jm} \rho_b g} = \frac{7,68 \left(\text{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{0,2}}{\text{Re}_i^{0,2} \left(\frac{H}{D_i} \right)^{0,33}}$
Malek <i>et al.</i> (1965)	$\Delta P_{jm} = \left(\frac{2mg}{3A_c} \right)$

Tabela 3.5. Equações para velocidade no jorro mínimo.

Autor	Equação
Mukhlenov e Gorshtein (1965)	$(\text{Re}_i)_{jm} = 0,174 \frac{Ar^{0,50}}{\left(\text{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{2,5}} \left(\frac{D_b}{D_i} \right)^{0,85}$
Abdelrazek (1969)	$U_{jm} = \frac{1}{1,74} \left[\left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3} \left(\frac{2gH_{jm}(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{1/2} - 0,25 \right]$

3.4.3. Obtenção experimental das curvas de cinética de secagem

A construção das curvas de cinética de secagem foi realizada com o auxílio da Equação (2.1), plotando os valores dos teores de umidade em base seca (X_{bs}) em função do tempo de secagem.

Os pontos experimentais das curvas de cinética de secagem foram ajustados através de três modelos matemáticos empíricos encontrados da literatura utilizados para camadas delgadas em leito fixo, conforme sumarizado na Tabela 3.6. Estas correlações são sumarizadas nos trabalhos descritos por Corrêa *et al.* (2007), Radünz *et al.* (2010) e Meziane (2011). Os ajustes foram realizados, utilizando uma estimativa não linear, por meio do método dos mínimos quadrados, com auxílio do software de Statistica® 7.0. A escolha do modelo mais adequado foi realizada com base nas estatísticas: coeficiente de determinação (R^2), o desvio médio relativo (D), erro padrão da estimativa (e) e pela análise dos gráficos da distribuição dos resíduos (aleatório ou tendencioso) (MENKOV, 2000a e 2000b).

Tabela 3.6. Modelos utilizados para avaliar a cinética de secagem

Modelo/Referência	Equação
Page Modificado	$X_t = a \cdot \exp(-K \cdot t)^n$ (3.5)
Midilli <i>et al</i>	$X_t = a \cdot \exp(-K \cdot t^n) + b \cdot t$ (3.6)
Henderson e Pabis	$X_t = a \cdot \exp(-K \cdot t)$ (3.7)

Para avaliar o ajuste matemático das curvas que descrevem o comportamento da secagem das sementes de linhaça em leito de jorro, foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação, R^2 ; desvio médio relativo, D (Equação 3.8); erro padrão da estimativa, e (Equação 3.9) e análise dos gráficos de resíduos.

$$D = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - Y'|}{Y} \quad (3.8)$$

$$e = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y')^2}{df}} \quad (3.9)$$

Onde, n representa o número de experimentos; df os graus de liberdade (número de pontos experimentais obtidos menos o número de constantes no modelo); Y e Y' são os valores experimentais e preditos, respectivamente.

A constante cinética (K) descrita em todos nos modelos matemáticos sumarizados na Tabela 3.6, descreve um aumento deste parâmetro com a temperatura do ar de secagem, e é comumente representada por uma equação tipo Arrhenius (SOUZA, ARNOSTI JUNIOR e SARTORI, 1998; MARTINAZZO *et al.*, 2007; MADHIYANON, PHILA e SPONRONNARIT, 2009; DUC, HAN e KEUM, 2011). Desta forma, para verificar o efeito da temperatura de secagem no parâmetro K, foram avaliadas as Equações 3.10 a 3.12, onde os valores de K utilizados foram os estimados a partir do modelo matemático (Tabela 3.6) que melhor descreveu a cinética da secagem das sementes de linhaça em leito de jorro.

$$K = \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot T) \quad (3.10)$$

$$K = \alpha \cdot \exp(\beta/T) \quad (3.11)$$

$$K = \alpha \cdot \exp(\beta/T^\delta) \quad (3.12)$$

3.4.4. Avaliação da Qualidade da Semente

Segundo o Comitê de Vigor Internacional de Analista de Sementes (ISTA) o vigor da semente é a soma de todas as propriedades da semente as quais determinam o nível de atividade e o desempenho da semente, ou do lote de sementes durante a germinação e a emergência de plântulas. Já a *Association of Official Seed Analysis* (AOSA, 1983) definiu o vigor de sementes como aquelas propriedades que determinam o potencial para uma emergência rápida e uniforme e para o desenvolvimento de plântulas normais, sob uma ampla faixa de condições ambientais.

Desta forma, visando avaliar o desempenho/vigor das sementes de linhaça *in natura* e submetidas ao processamento em leito de jorro determinou-se: o índice de velocidade de germinação e a germinação das plântulas.

Os testes de avaliação da qualidade das sementes foram realizados após cada processo de fluidização. Uma amostra do trabalho contendo 400 sementes foi retirada ao acaso e distribuída igualmente em quatro placas de germinação (gerbox). As placas “gerbox” continham papel de germinação, embebidas em água destilada, esterilizado previamente em solução a 0,025 % de cloro ativo em água.

As sementes foram postas uniformemente a uma distância de aproximadamente 1 cm, para minimizar a competição e contaminação entre elas. As placas foram tampadas e colocadas à temperatura ambiente por aproximadamente cinco dias.

Para a determinação do percentual de sementes germinadas a contagem das plântulas foi feita diariamente, sendo consideradas todas aquelas que apresentaram desenvolvimento normal ou mesmo pequenos defeitos em suas estruturas, desde que mostrassem um desenvolvimento satisfatório, com todas as estruturas essenciais presentes.

a) Índice de velocidade de germinação

Teste baseado no princípio de que lotes de sementes que possuem maior velocidade de germinação são mais vigorosos. Por isso através deste teste determina-se o vigor avaliando a velocidade da germinação das sementes (MAGUIRE, 1962).

$$IVG = \frac{G_1}{t_1} + \frac{G_2}{t_2} + \dots + \frac{G_i}{t_i} \quad (3.13)$$

Onde IVG é o índice de velocidade de germinação; G é o número de plântulas germinadas ocorridas a cada dia; t é o tempo em dias.

Quanto maior o índice, utilizado por Maguire, maior será a velocidade de germinação das sementes.

b) Germinação

Além destas variáveis também se analisa a porcentagem de germinação adaptadas das equações citadas por Labouriau e Agudo (1987), descrita a seguir:

$$\% G = \frac{G_1 + G_2 + \dots + G_i}{G_t} \cdot 100 \quad (3.14)$$

Onde: G_i : número total de plântulas germinadas até o dia da contagem; G_t : número total de plântulas da amostra.

3.5. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

No atual trabalho foi realizado um planejamento fatorial de 2^2 , com três repetições no ponto central, que totalizaram sete corridas experimentais, Para executar os experimentos de forma organizada e com um número controlado de ensaios, adotou-se um planejamento fatorial, o qual permitiu verificar os efeitos individuais e a interação das variáveis sobre as respostas analisadas, e assim indicar as variáveis mais importantes para o processo estudado.

O planejamento experimental proposto foi conduzido visando identificar, durante o processo de fluidização/secagem em leito de jorro, quais as variáveis operacionais: temperatura do ar de entrada (T_g) e tempo de fluidização (t) que influenciam nas respostas: razão de umidade das sementes, dada pela relação entre conteúdo de umidade final e inicial (X_r), percentagem de germinação (G) e índice de velocidade de germinação (IVG). Na Tabela 3.7 estão apresentados os valores codificados e os originais para as variáveis do planejamento experimental da fluidização/secagem de sementes de linhaça.

Tabela 3.7. Valores codificados e originais para as variáveis do planejamento

Variáveis Originais (notação)	Variáveis codificadas	Unidades	Níveis		
			-1	0	+1
Temperatura do ar (T_g)	X_1	°C	45	55	65
Tempo de fluidização (t)	X_2	min	60	90	120

As 7 corridas experimentais foram realizadas de forma aleatória com o objetivo de minimizar o erro. A matriz original do planejamento com as indicações dos valores das variáveis de resposta avaliadas (X_r , G e IVG) estão sumarizadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8. Matriz de Planejamento

Corridas	X_1	X_2	X_r (adim.)	G (%)	IVG (t^{-1})
01	-	-	X_{r1}	G_1	IVG_1
02	+	-	X_{r2}	G_2	IVG_2
03	-	+	X_{r3}	G_3	IVG_3
04	+	+	X_{r4}	G_4	IVG_4
05	0	0	X_{r5}	G_5	IVG_5
06	0	0	X_{r6}	G_6	IVG_6
07	0	0	X_{r7}	G_7	IVG_7

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÕES FÍSICA, QUALITATIVA E CENTESIMAL DAS SEMENTES

4.1.1. Resultados da caracterização física e qualitativa

Os resultados da caracterização física para semente de linhaça *in natura* estão apresentados na Tabela 4.1, a qual contém parâmetros estatísticos da variabilidade e da precisão dos ensaios.

Tabela 4.1. Caracterização física de semente de linhaça *in natura*

Propriedade (Unidade)	Valor médio \pm erro padrão da média	Coefficiente de variação (%)
Massa específica real (g/cm ³)	1,2853 \pm 0,0557	8,66
Massa específica aparente (g/cm ³)	1,1138 \pm 0,0458	8,22
Porosidade do leito (adim.)	0,4884 \pm 0,0004	0,38
Esfericidade (adim.)	0,50 \pm 0,00008 * 0,54 \pm 0,00978 **	10,02* 9,92 **
Diâmetro médio da semente (μ m)	1738,7 \pm 0,00049	0,49

* (método de Peçanha e Massarani, 1986), ** (método de Mohsenin, 1970)

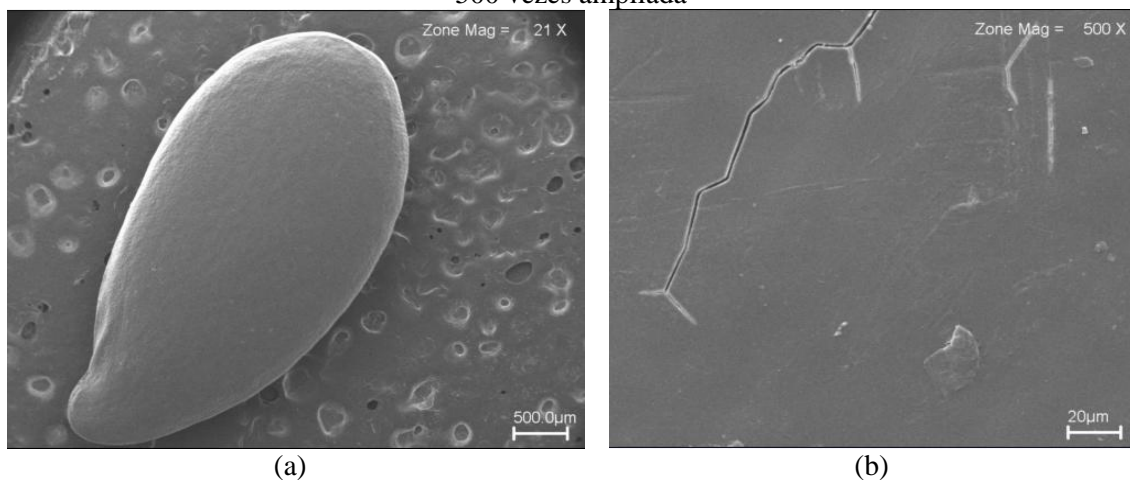
Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.1, observa-se que os valores médios obtidos para cada uma das propriedades físicas estimadas apresentam valores baixos para tanto para o erro padrão da média e como para os coeficientes de variação, e que segundo Gomes (1987), valores de coeficiente de variação abaixo de 10 % são considerados satisfatórios na condução de pesquisas agropecuárias.

Tabela 4.2. Caracterização qualitativa de semente de linhaça *in natura*

Propriedade (Unidade)	Valor médio \pm erro padrão da média	Coefficiente de variação (%)
Pureza (%)	0,85021 \pm 0,0066	2,48
Peso de mil sementes (g)	0,5245 \pm 0,0113	2,31
Ângulo de Repouso (°)	3,9 \pm 0,21	1,36
Germinação (%)	98,00 \pm 0,7071	1,44
IVG (t ⁻¹)	40,71 \pm 0,3958	2,24

A análise de superfície mostrou a uniformidade da semente, indicando que a semente apresenta um formato elipsóide triaxial. Sendo que a presença de fissuras foi notada apenas com a ampliação de 500 vezes no microscópio de varredura eletrônica, confirmando-se a homogeneidade da semente de linhaça. Sendo assim, pode-se esperar que a quebra da semente seja pouco frequente.

Imagem 4.1- (a) Sementes de linhaça marrom *in natura*, (b) Superfície da semente de linhaça 500 vezes ampliada



4.1.2. Resultados da caracterização centesimal

Os resultados da composição centesimal, apresentados na Tabela 4.3, constituem valores médios de ensaios realizados e também apresentaram baixos valores para o erro padrão da média e para o coeficiente de variação, confirmando a homogeneidade e linearidade dos ensaios experimentais das sementes de linhaça.

Tabela 4.3. Resultados da composição centesimal das sementes de linhaça *in natura*

Análise	Valor médio \pm erro padrão da média	Coefficiente de variação (%)
Umidade (%bs)	6,9 \pm 0,04	0,82
Proteína (%)	21,43 \pm 0,24	1,58
Resíduo Mineral Fixo (%)	3,74 \pm 0,00005	0,002
Lipídios (%)	28,89 \pm 0,16	1,96
Carboidratos* (%)	39,04 \pm 0,92	2,27

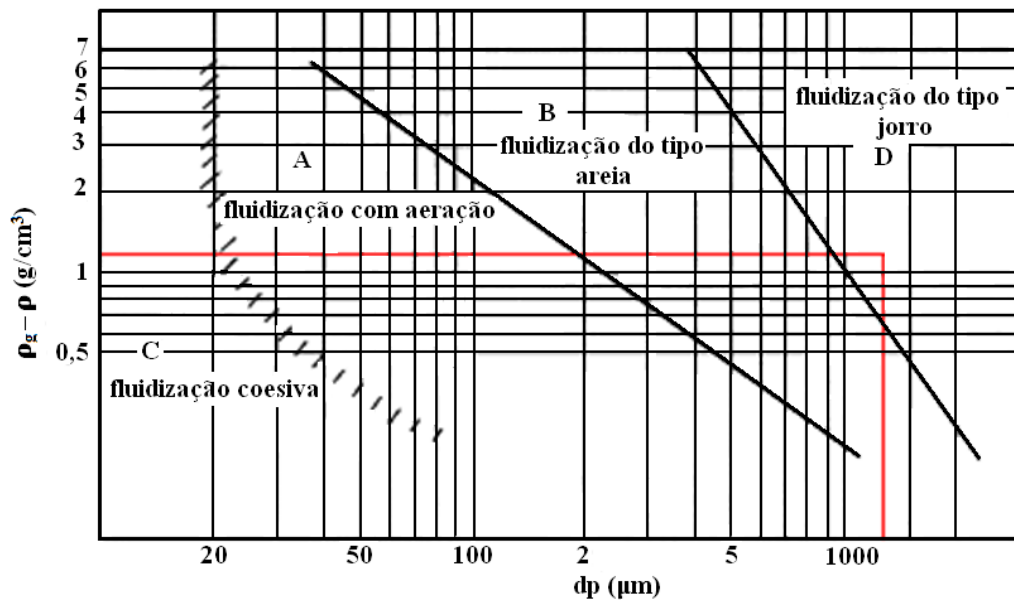
* Obtidos por diferença

4.1.3. Classificação da partícula segundo Geldart

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.1, referentes às propriedades físicas da semente de linhaça, diâmetro médio e massa específica e na classificação das partículas propostas por Geldart (1973), foi identificado o tipo de partícula que caracteriza as sementes.

No Diagrama 4.1, que ilustra a classificação de sólidos em contato com ar nas condições ambiente, é destacado pelas interações das linhas em vermelho, a classificação para sementes de linhaça.

Diagrama 4.1 - Classificação das sementes de linhaça segundo Geldart (1973)



Dados para sementes de linhaça

$$\rho_{Ar} = 1,1879 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_p - \rho_{Ar} = 1,2841 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_p = 1,2853 \text{ g/cm}^3$$

$$d_p = 1738,7 \mu\text{m} \text{ ou } 1,7387 \text{ mm}$$

As partículas desse grupo têm diâmetros maiores e/ou são muito densas; por isso na fluidização convencional deste tipo de partículas pode haver a formação de caminhos preferenciais, proporcionar baixa expansão do leito e baixa mistura de sólidos. Desta forma, partículas deste grupo são mais adequadas ao leito de jorro, sendo assim classificadas como do **grupo D**.

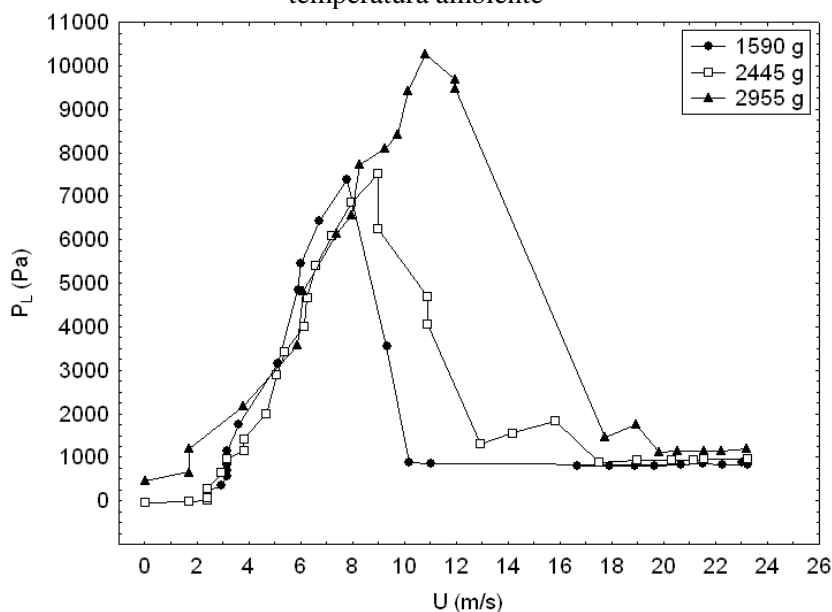
4.2. ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA

4.2.1. Influência de diferentes cargas de sementes nos parâmetros característicos a temperatura ambiente

As curvas fluidodinâmicas das sementes de linhaça com umidade inicial de 6,99 %bs, as quais correspondem às alturas do leito de sólidos de 5, 10 e 15 cm, respectivamente, foram obtidas experimentalmente para as cargas de 1590, 2445 e 2955 g, na temperatura ambiente em torno de $28 \pm 1^\circ\text{C}$.

O Gráfico 4.1 descreve o comportamento fluidodinâmico das sementes de linhaça para as três diferentes cargas na temperatura ambiente. Observa-se que para todas as cargas analisadas é encontrado comportamento típico de uma curva de leito de jorro conforme descrito em Mathur e Epstein (1974), indicando que a circulação de sólidos foi adequada, confirmando a observação visual.

Gráfico 4.1 - Comportamento fluidodinâmico para diferentes cargas de sementes de linhaça a temperatura ambiente



Para a estimativa e análise dos parâmetros fluidodinâmicos utilizaram-se as curvas fluidodinâmicas sumarizadas no Apêndice A, as quais foram construídas a velocidade crescente e decrescente.

Na Tabela 4.4 estão sumarizados os parâmetros fluidodinâmicos para as três cargas avaliadas, onde se observa que os valores obtidos para queda de pressão máxima, jorro mínimo, jorro estável, como também a velocidade e a porosidade de mínimo jorro

umentam diretamente com a carga de sólidos, comportamento semelhante foi observado por Paulo Filho (1999), Almeida (2002), Costa (2003) e Adeodato (2003), avaliando a fluidodinâmica em leito de jorro de sólidos como feijão, sementes de brócolos e poliestireno.

O comportamento observado confirma os fundamentos da fluidização uma vez que a queda de pressão no leito é diretamente proporcional ao peso de sólidos dividido pela área da seção transversal da coluna, ou seja, o aumento da força peso proporciona resultados maiores para os valores de queda de pressão.

A análise dos dados (Tabela 4.4), referentes à porosidade do leito de sementes na condição de mínimo jorro e a expansão do leito de sólidos, demonstram que estes parâmetros apresentaram comportamento inverso em relação aos demais, fato este, que pode ter tido influência do modo de empacotamento dos sólidos no leito, como também da esfericidade da partícula, ou seja, a porosidade depende da forma com que as partículas se acomodam no interior do leito, o que para uma menor carga de sementes, poderá resultar numa maior fração de vazios.

Já o comportamento da expansão do leito pode ser explicado pela dificuldade com que a vazão do fluido percorre o leito, ou seja, quanto menor a carga de sólido, mais fácil o fluxo do fluido vence a resistência da força peso, tornando possível o eficaz transporte das partículas e proporcionando uma maior expansão do leito.

Tabela 4.4. Parâmetros fluidodinâmicos para as diferentes cargas

Carga (g)	U_{mj} (m/s)	ΔP_{mj} (Pa)	ΔP_{je} (Pa)	ΔP_{max} (Pa)	ε_{mj} (adim.)	H_{mj} (cm)	E (%)
1590	12,32	890,98	765,64	7381,82	0,4805	6,00	28,00
2445	14,82	1248,07	940,35	7518,52	0,4587	12,50	25,00
2955	16,95	1251,52	1123,02	10270,18	0,4390	16,80	10,71

4.2.2. Comparação entre os parâmetros fluidodinâmicos experimentais do leito de jorro, para diferentes cargas, com os obtidos por correlação da literatura

4.2.2.1. Queda de pressão máxima (ΔP_{max})

Os resultados estimados para a queda pressão máxima no leito de jorro, para as três cargas de sementes avaliadas, e as respectivas comparações obtidas com as correlações da literatura, estão apresentados na Tabela 4.5. A análise do comportamento fluidodinâmico em relação à queda de pressão máxima (Figura 4.1)

demonstra a elevação da queda de pressão com a carga de sólidos no leito apresentando um valor médio de $8390,17 \pm 940,83$ Pa (Tabela 4.5). Observa-se também que a correlação proposta por Pallai e Németh (1969), descrita pela Equação 2.19, apresentou desvios bastante satisfatórios, (baixo de 10 %) para as cargas de 2445 e 2955g. Já a equação de Manurung (1964), Equação 2.20, apresentou resultado aceitável apenas a carga de 2445 g com desvio de 10,50 %, e não foram observados desvios aceitáveis para carga de 1590 g, ou seja, menores que 20 %, para nenhuma das equações avaliadas, conforme recomendado por Mathur e Epstein (1974).

Comportamento semelhante foi observado por Almeida (2003) o qual afirma que a obtenção deste tipo de resultados é comum em se tratando de análise empírica, pois para que tais correlações possam descrever satisfatoriamente os dados experimentais tornam necessários envolver tanto similaridades geométricas e dinâmicas entre os sistemas, como também entre as propriedades físicas dos materiais nos experimentos e não obstante a precisão dos parâmetros experimentais.

Tabela 4.5. Comparação entre queda de pressão máxima experimental e calculada por correlações na literatura

Carga (g)	ΔP_{\max} (Pa)			Desvio (%)	
	Exp.	Eq. (2.19)	Eq. (2.20)	Eq. (2.19)	Eq. (2.20)
1590	7381,82	4530,35	4009,13	38,63	45,69
2445	7518,52	7550,58	8307,66	0,43	10,50
2955	10270,18	10827,53	13078,89	5,43	27,35

4.2.1.2. Queda de pressão no jorro estável (ΔP_{je})

Os resultados para queda de pressão no jorro estável, para todas as cargas utilizadas, e os respectivos desvios obtidos para as correlações avaliadas (Equação 2.28 e 2.30) estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Comparação entre queda de pressão no jorro estável experimental e calculada por correlações na literatura

Carga (g)	ΔP_{je} (Pa)			Desvio (%)	
	Exp.	Eq. (2.28)	Eq. (2.30)	Eq. (2.28)	Eq. (2.30)
1590	765,64	578,97	10,69	24,38	98,60
2445	940,35	783,01	58,33	16,73	93,80
2955	1123,02	1025,68	153,11	8,67	86,37

Observa-se (Tabela 4.6) que a correlação de Mukhlenov e Gorshtein (1965), Equação 2.28, apresentou resultados satisfatórios somente para as cargas de 2445 e 2955 g. Já a equação de Sampaio *et al.* (1984) não forneceu boa precisão para este parâmetro. Resultados semelhantes, ou seja, que não descreveram os dados experimentais, foram também obtidos por Almeida e Rocha (2002) ao avaliar os modelos de San Jose *et al.* (1996) e Pallai e Nemeth (1969).

Também com base nos resultados apresentados na Tabela 4.6, constata-se um valor médio de $958,30 \pm 90,37$ Pa para queda de pressão no jorro estável para as sementes de linhaça.

4.2.1.3. Queda de pressão no mínimo jorro (ΔP_{mj})

Na Tabela 4.7 são sumarizados os valores da queda de pressão no jorro mínimo obtidos experimentalmente e os estimados pelas correlações de Mukhlenov e Gorshtein (1965) e Malek *et al.* (1963), descritas pelas Equações 2.36 e 2.37, respectivamente.

Tabela 4.7. Comparação entre queda de pressão no jorro mínimo experimental e calculada por correlações na literatura

Carga (g)	ΔP_{mj} (Pa)			Desvio (%)	
	Exp.	Eq. (2.36)	Eq. (2.37)	Eq. (2.36)	Eq. (2.37)
1590	890,98	625,19	1576,85	29,83	76,80
2445	1248,07	1022,31	2421,29	18,09	94,00
2955	1251,52	1191,43	2629,26	4,80	110,08

Observa-se (Tabela 4.7) que os valores considerados aceitáveis, ou seja, inferiores a 20 %, o para o parâmetro queda de pressão no mínimo jorro, a temperatura ambiente, foram obtidos através da correlação de Mukhlenov e Gorshtein (1965) com

valores na ordem 18,09 e 4,80 % para a carga de 2445 e 2955 g, respectivamente. Já para o modelo de Malek *et al.* (1963), não foram obtidos resultados descritivos para os dados experimentais em toda a faixa de massa de sólidos avaliada. O valor médio para a queda de pressão no mínimo jorro foi de $1130,19 \pm 119,61$ Pa.

4.2.1.3. Velocidade no mínimo jorro (U_{mj})

Com base nos dados dispostos na Tabela 4.8, o qual sumariza os valores obtidos para a velocidade de mínimo jorro, a diferentes cargas de sólidos, constata-se que U_{mj} sofreu uma elevação com o aumento da carga de sólidos no leito, apresentando um valor médio de $14,70 \pm 1,34$ m/s (Tabela 4.8).

Os menores desvios para U_{mj} foram obtidos nos experimentos conduzidos para a carga de 1590 g de sementes, ou seja, 1,04 e 7,89 % quando comparados os resultados experimentais e os obtidos pelas correlações de Mukhlenov e Gorshtein (1965) e Abdelrazek (1969), respectivamente. Entretanto, vale ressaltar que a equação de Mukhlenov e Gorshtein (1965) descreveu também a U_{mj} para a carga de 2445 g e que, diante das dificuldades descritas por diversos autores (MATHUR e EPSTEIN, 1974; SUTANTO, EPSTAIN e GRACE, 1985, EPSTAIN e GRACE, 2011), ainda podemos considerar adequado o valor obtido para a carga de 2955 g (26,62 %), por se tratar de um valor numérico muito próximo da região considerada como satisfatória (20 %). A determinação experimental da U_{mj} é estimada a velocidade decrescente no ponto onde ocorre o colapso do leito, ou seja, um ponto de difícil determinação/reprodutibilidade experimental.

Tabela 4.8. Comparação entre U_{mj} experimental e calculada por correlações na literatura

Carga (g)	U_{mj} (m/s)			Desvio (%)	
	Exp.	Eq. (2.43)	Eq. (2.46)	Eq. (2.43)	Eq. (2.46)
1590	12,32	12,44	11,34	1,04	7,89
2445	14,82	12,44	23,63	16,05	59,43
2955	16,96	12,44	31,76	26,62	87,27

4.2.3. Parâmetros fluidodinâmicos característicos do leito de jorro a diferentes temperaturas

Foram construídas curvas fluidodinâmicas para as três cargas estudadas a diferentes temperaturas (28, 45, 55 e 65 °C), as quais são mostradas nos Gráficos 4.2 ao 4.4, para análise do comportamento fluidodinâmico e determinação dos parâmetros específicos do leito de jorro em função da temperatura.

Observa-se, a partir da análise dos Gráficos 4.2 a 4.4, a diminuição da perda de carga máxima frente às mudanças de temperatura, este comportamento foi constatado para todas as cargas analisadas. Foi observado também que o aumento da temperatura favorecia a formação do jorro, ou seja, que o jorro se estabelecia em condições precoces quando comparada às corridas desenvolvidas a temperatura ambiente. Tal comportamento sugere que o aumento da temperatura favorece a quebra das forças inter-partículas (coesão), proporcionado assim a formação do jorro bem mais rápida que a temperatura ambiente.

Gráfico 4.2 - Comportamento fluidodinâmico da carga de 1590 g nas três temperaturas e a temperatura ambiente

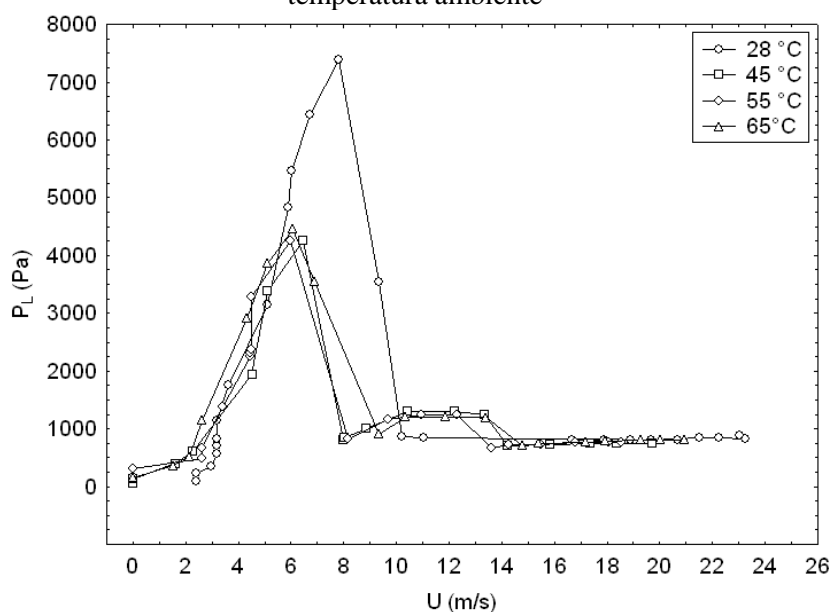


Gráfico 4.3 - Comportamento fluidodinâmico da carga de 2445 g nas três temperaturas e a temperatura ambiente

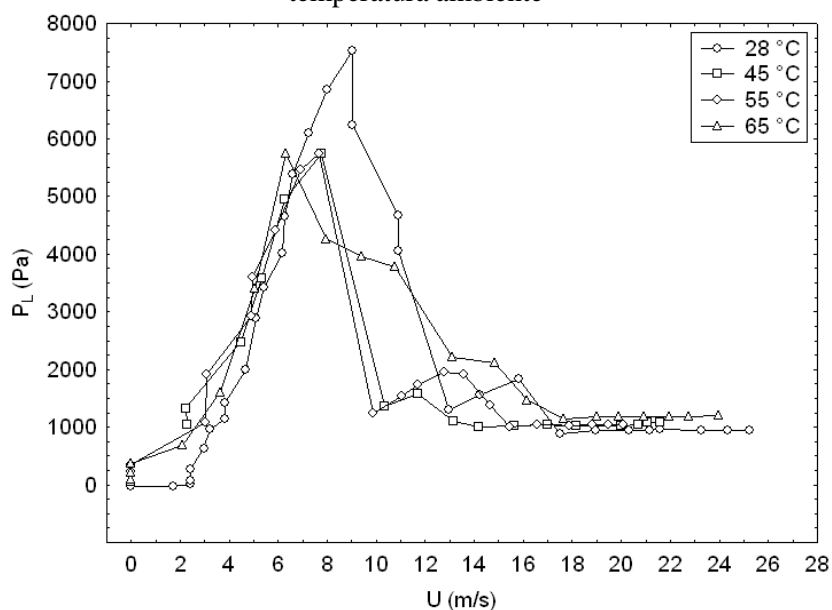
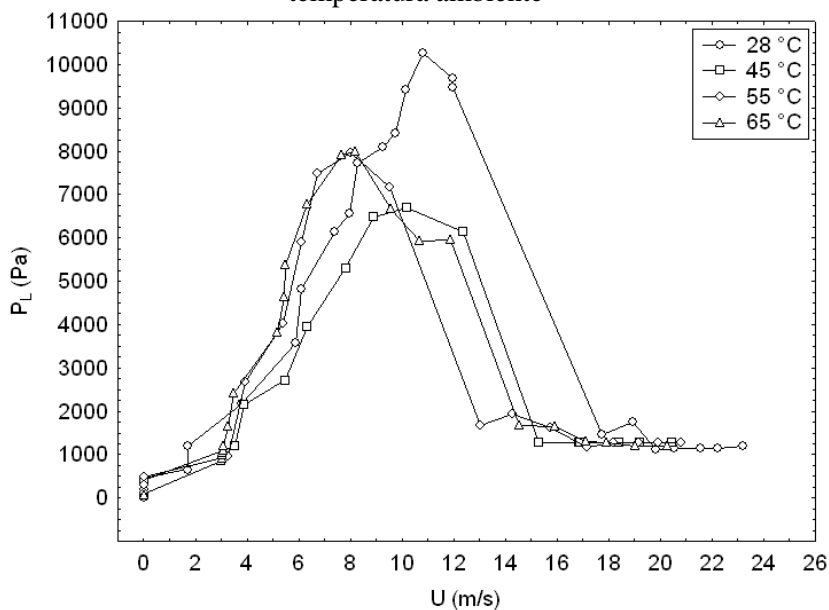


Gráfico 4.4 - Comportamento fluidodinâmico da carga de 2955 g nas três temperaturas e a temperatura ambiente



4.2.2.1 Queda de pressão máxima

A Tabela 4.9 sumariza os valores experimentais e estimados por correlações da literatura (Equação 2.19 e 2.20) para a queda de pressão máxima para as três cargas de sólidos avaliadas e nas temperaturas variando de 28 a 65 °C.

Analisando a Tabela 4.9 observa-se a influência significativa que o aumento da temperatura apresentou frente às cargas de 1590, 2445 e 2955 g de sementes de linhaça,

ou seja, verifica-se que quando a temperatura do ar de jorro é elevada para valores acima da ambiente, favorece a diminuição da queda de pressão máxima. No entanto, em relação as temperatura 45, 55 e 65 °C verifica-se a queda de pressão máxima do leito de sólidos não apresentou diferenças significativas.

Quando comparado os valores experimentais da queda de pressão máxima com os estimados por correlação da literatura, observa-se que apenas a correlação de Pallai e Németh (1969), Equação 2.19, apresentou desvios menores que 20 %, onde o menor desvio encontrado para o parâmetro queda de pressão máxima foi de 3,97 %, a temperatura de 45 °C, para a carga de 1590 g. Esta mesma correlação também apresentou baixos desvios nas temperaturas de 55 e 65 °C, de 4,19 e 8,60 %, respectivamente.

Entretanto, não foram observados desvios satisfatórios (menores que 20 %) quando foi avaliada a correlação de Manurung (1964), para as cargas de 1590, 2445 2955 g nas três temperaturas em estudo.

Tabela 4.9. Análise da queda de pressão máxima nas diferentes temperaturas

Carga (g)	Temperatura (°C)	ΔP_{\max} (Pa)			Desvio (%)	
		Exp.	Eq. (2.19)	Eq. (2.20)	Eq. (2.19)	Eq. (2.20)
1590	28	7381,82	4530,35	4009,13	38,63	45,69
	45	4246,30	4077,55	3364,53	3,97	20,76
	55	4255,92	4077,65	3364,62	4,19	20,94
	65	4461,72	4077,75	3364,70	8,60	24,59
2445	28	7518,52	7550,58	8307,66	0,43	10,50
	45	5735,72	8767,10	9903,59	52,85	72,66
	55	5745,52	8926,74	10817,85	55,37	76,32
	65	5750,29	8926,95	10130,96	55,24	76,18
2955	28	10270,18	10827,53	13078,89	5,43	27,35
	45	6684,73	10828,15	13079,64	61,98	95,66
	55	7959,88	10828,44	13079,99	36,04	64,32
	65	7999,53	10828,69	13080,29	35,37	63,52

4.2.2.2. Queda de pressão no jorro estável

Analisando o comportamento das curvas fluidodinâmicas e analisando as correlações, para o parâmetro perda de pressão no jorro estável, em relação aos valores experimentais, apenas a correlação de Mukhlenov e Gorshtein (1965) obteve os menores desvios para todas as três temperaturas avaliadas, porém os valores obtidos para o desvio só foram satisfatórios para a carga de 2445 g para as corridas de fluidodinâmica conduzidas nas temperaturas de 45, 55 e 65 °C, com os desvios de 10,92; 8,17 e 18,70 %, respectivamente, e, para a carga de 2955 g, nas temperaturas de 55 e 65 °C as quais forneceram desvios de 15,91 e 15,98 %, respectivamente.

Tabela 4.10. Comparação entre queda de pressão no jorro estável experimental e calculada por correlações na literatura

Carga (g)	Temp. (°C)	ΔP_{je} (Pa)			Desvio (%)	
		Exp.	Eq. (2.28)	Eq. (2.30)	Eq. (2.28)	Eq. (2.30)
1590	28	765,64	466,18	10,69	39,11	98,60
	45	725,97	470,12	10,41	35,24	98,57
	55	730,14	466,27	10,35	36,14	98,58
	65	746,74	497,28	9,15	33,41	98,77
	28	940,35	783,01	58,33	16,73	93,80
2445	45	1020,44	909,01	58,75	10,92	94,24
	55	1037,18	952,41	54,32	8,17	94,76
	65	1175,38	955,52	47,96	18,70	95,25
	28	1123,02	1025,68	153,11	8,67	86,37
2955	45	1281,32	1002,35	143,59	21,77	88,79
	55	1281,41	1077,50	119,06	15,91	15,91
	65	1283,38	1078,23	115,76	15,98	15,98
	28	1123,02	1025,68	153,11	8,67	86,37

4.2.2.3. Queda de pressão no mínimo jorro

Com a análise do comportamento das sementes de linhaça em leito de jorro (Tabela 4.11) nas diferentes temperaturas observou-se que a queda de pressão no mínimo jorro sofreu pouca ou quase nenhuma influência do aumento de temperatura, para todas as cargas estudadas. Dentre as duas correlações avaliadas a correlação de Mukhlenov e Gorshtein (1965), identificada pela Equação 2.36, foi a que obteve os menores desvios, porém apresentando desvios adequados apenas para as corridas com a carga de sólidos de 2445 g, para as três temperaturas avaliadas (45, 55 e 65 °C), obtendo desvios na ordem de 14 %.

Tabela 4.11. Comparação entre queda de pressão no mínimo jorro experimental e a calculada por correlações na literatura

Carga (g)	Temp. (°C)	ΔP_{mj} (Pa)			Desvio (%)	
		Exp.	Eq. (2.36)	Eq. (2.37)	Eq.(2.36)	Eq.(2.37)
1590	28	890,98	625,19	1576,85	29,83	76,80
	45	880,82	588,25	1574,58	33,22	78,76
	55	962,91	591,95	1574,58	31,40	82,47
	65	854,09	597,29	1574,58	30,07	84,36
2445	28	1248,07	1022,31	2421,29	18,09	94,00
	45	1276,99	1089,54	2421,29	14,68	89,61
	55	1275,29	1096,40	2421,29	14,03	89,86
	65	1244,56	1058,35	2421,29	14,96	94,55
2955	28	1251,52	1191,43	2629,26	4,80	110,08
	45	1733,34	1164,32	2629,26	32,83	51,69
	55	1537,87	1181,44	2629,26	23,18	70,97
	65	1537,53	1182,23	2629,26	23,11	71,00

4.2.2.4. Velocidade no mínimo jorro

Com base nos dados sumarizados na Tabela 4.12, constata-se que a velocidade no mínimo jorro sofreu uma redução pouco expressiva com o aumento de temperatura, este comportamento repetiu-se para todas as cargas estudadas. Dentre as duas correlações avaliadas destaca-se a equação por Mukhelenov e Gorshtein (1965), e identificada pela Equação 2.43, por apresentar baixos desvios para todas as cargas avaliadas.

Entretanto, os menores desvios foram obtidos através da correlação de Abdelrazek (1969), Equação 2.46, na carga de 1590 g e nas temperaturas de 45, 55 e 65 °C, com desvios de 2,24; 2,22 e 0,10 %, respectivamente.

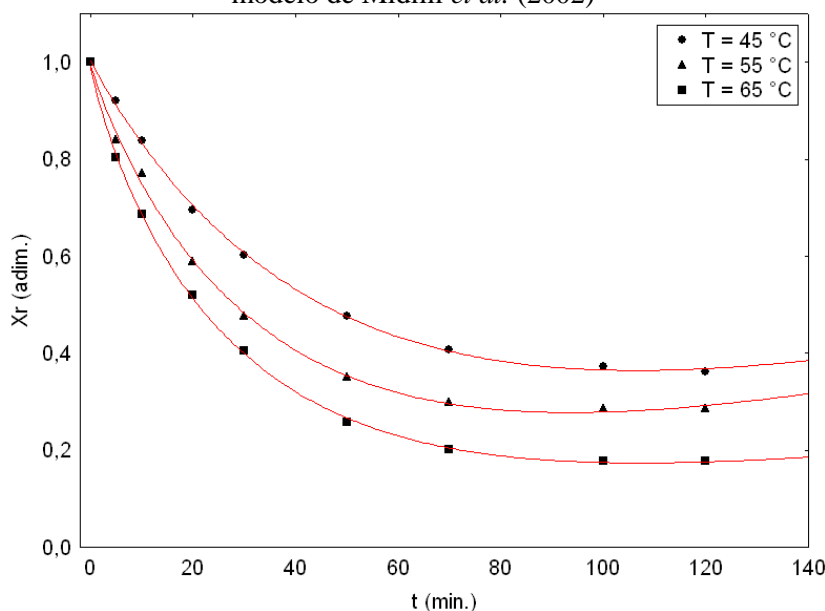
Tabela 4.12. Comparação entre U_{mj} experimental e calculada por correlações na literatura

Carga (g)	Temp. (°C)	U_{mj} (m/s)			Desvio (%)	
		Exp.	Eq. (2.43)	Eq. (2.46)	Eq. (2.43)	Eq. (2.46)
1590	28	12,32	12,44	11,34	1,04	7,89
	45	11,14	12,85	10,89	15,39	2,24
	55	11,48	13,05	11,23	13,64	2,22
	65	11,54	13,24	11,55	14,71	0,10
2445	28	14,82	12,44	23,63	16,05	59,43
	45	10,14	12,85	25,20	26,76	148,58
	55	10,85	13,05	25,99	20,25	139,50
	65	11,81	13,24	25,03	12,08	111,91
2955	28	16,96	12,44	31,76	26,62	87,27
	45	11,22	12,85	32,26	14,57	187,60
	55	12,20	13,05	33,69	6,97	176,12
	65	12,40	13,24	34,22	6,77	176,05

4.3. COMPORTAMENTO CINÉTICO

A partir dos resultados experimentais da secagem das sementes de linhaça em leito de jorro foram construídas curvas de secagem (X_r versus t), Gráfico 4.5, nas temperaturas de 45, 55 e 65 °C. Na Tabela 4.13 são apresentados os valores obtidos para as constantes dos diferentes modelos matemáticos utilizados para avaliar o comportamento da secagem das sementes de linhaça em leito de jorro e os respectivos valores dos parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), desvio médio relativo (D), erro médio da estimativa (e) e análise dos gráficos de resíduos (R).

Gráfico 4.5 - Curvas de secagem nas diferentes temperaturas ajustados ao modelo de Midilli *et al.* (2002)



As curvas de secagem em leito de jorro (Gráfico 4.5), para sementes de linhaça, demonstram que o conteúdo de umidade do material diminui continuamente com o tempo e com a temperatura do ar de secagem, fato este que concorda com a teoria de secagem, conforme sumariza Strumillo e Kudra (1986). Comportamento semelhante foi observado por vários pesquisadores trabalhando com diferentes processos de secagem (leitos fixo ou móvel) e/ou matérias primas (LIMA e ROCHA, 1997; SRINIVASAKANNAN e BALASUBRAMANIAN, 2009; RADÜNZ *et al.*, 2010; KADAM *et al.*, 2011). Entretanto, é importante destacar que o comportamento obtido para cinética de secagem das sementes de linhaça, em leito jorro, corrobora com os obtidos por Lima (1995), Oliveira (1999) e Medeiros (2004), também para secagem em leito de jorro, de feijão carioca e feijão verde, respectivamente.

A influência significativa da temperatura sobre as curvas de secagem das sementes demonstra também que quanto maior a temperatura maior a taxa de remoção de umidade, conseqüentemente menor o tempo de equilíbrio com o ambiente para que as sementes nas condições operacionais.

Ainda com relação ao Gráfico 4.5 observa-se que as sementes de linhaça, submetidas à secagem em leito de jorro, alcançaram o equilíbrio com o ambiente com cerca de 70 min de operação, atingindo um conteúdo de umidade 5,39, 4,77 e 3,65 % bs para as temperaturas de 45, 55 e 65 °C, respectivamente. Estes resultados demonstram que o processo de secagem em leito de jorro, para sementes de linhaça, mostrou-se mais eficiente quando comparados com os resultados obtidos por Valente (2011), pois a análise das curvas de cinética de secagem para sementes de linhaça, em leito fixo e fluidizado, obtidas por esse autor, nas temperaturas de 40, 60 e 80 °C, demonstraram que o equilíbrio termodinâmico só foi alcançado para o processo conduzido em leito fluidizado e com cerca de 150 min de operação, ou seja, o dobro do tempo de operação obtido neste trabalho. Vale ressaltar também que o processo de secagem conduzido em leito de jorro não apresentou arraste de partículas para fora do leito, sugerindo que não houve quebra (dano físico) nas estruturas das sementes de linhaça.

Desta forma, diante do exposto, para a secagem de sementes de linhaça, é possível dizer que dentre os processos de remoção de umidade, até então avaliados (fixo, fluidizado e jorro), a secagem em leito de jorro e demonstra ser o processo mais eficiente para a remoção de umidade, indicando que o mesmo proporciona altas taxas de transferência de calor e massa, intensa mistura de sólidos conseqüentemente uniformidade na distribuição de temperatura no interior do leito.

Os valores para os parâmetros dos modelos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem de sementes de linhaça, nas as diferentes temperaturas avaliadas, estão apresentados na Tabela 4.13 e a partir da análise da mesma, observa-se que dentre os modelos matemáticos avaliados o que melhor descreveu os dados da cinética de secagem das sementes de linhaça, nas temperaturas de 45, 55 e 65 °C, foi o modelo de Midilli *et al* (2002), por apresentar valores menores que 10 % para o desvio médio relativo, coeficiente de determinação na ordem de 0,999, pequenos valores para o erro padrão da estimativa e distribuição de resíduos totalmente aleatórios. Comportamento semelhante foi observado por Reis *et al* (2004), Martinazzo *et al.* (2007), Radünz *et al.* (2010) e Meziane (2011). Destaca-se ainda que, mesmo o modelo de Midilli *et al.* (2002) ser um modelo sugerido na literatura para descrever os processos de secagem

conduzidos em camada fina (delgada), o mesmo descreveu satisfatoriamente os dados experimentais.

Tabela 4.13. Parâmetros dos modelos aplicados aos dados das análises experimentais das curvas de cinética na fluidodinâmica em leito de jorro

Modelos	Temp. (°C)	Parâmetros				R ²	D (%)	e	R
		a	K						
Henderson e Pabis	45	0,932	0,011			0,964	7,44	0,014	T
	55	0,899	0,015			0,942	20,9	0,035	T
	65	0,917	0,024			0,974	39,2	0,056	T
		a	K	n					
Page Modificado	45	0,932	0,104	0,104		0,964	7,45	0,015	T
	55	0,899	-0,123	-0,123		0,948	20,9	0,038	T
	65	0,917	0,154	0,154		0,974	39,2	0,061	T
		a	K	n	b				
Midilli <i>et al.</i>	45	1,005	0,023	0,969	0,002	0,999	0,07	0,0004	A
	55	0,998	0,038	0,922	0,002	0,999	0,07	0,0003	A
	65	0,997	0,053	0,864	0,001	0,999	0,16	0,0006	A

A: distribuição aleatória (desejada); B: distribuição tendenciosa (modelo inadequado)

Verifica-se na Tabela 4.14 que o coeficiente de secagem K, para todos os modelos avaliados, aumentou com a temperatura, indicando estar relacionado com a difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente (BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL, 1992; MADAMBA, DRISCOLI e BUCKLER, 1996).

Dessa forma, com base nos valores apresentados na Tabela 4.13 e visando avaliar o comportamento da constante de secagem e dos demais parâmetros cinéticos, realizaram-se ajustes matemáticos com os parâmetros de Midilli *et al.*, em função da temperatura do ar de secagem.

Na Tabela 4.14 são apresentadas as equações para estimativa dos parâmetros dos modelos de Midilli *et al.*, em função da temperatura do ar de secagem, em °C, com os respectivos coeficientes de determinação (R²), erro médio relativo (D) e erro médio da estimativa (e).

Tabela 4.14. Parâmetros do modelo de Midilli *et al.* em função da Temperatura

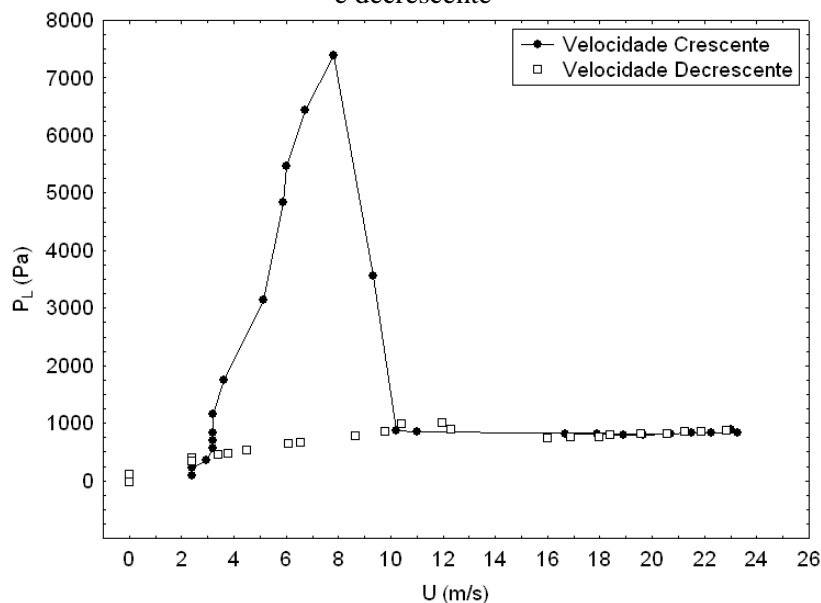
Parâmetros	R ²	D (%)	e
Valor médio: b = 0,0016	-	-	-
$a = 0,325 \cdot 10^{-4} T^2 - 0,00398 T + 1,1186$	0,999	0,0	0,0
$n = -0,54 \cdot 10^{-4} T^2 + 0,68 \cdot 10^{-3} T + 1,0476$	0,999	0,0	0,0
$K = 0,004 \exp(-0,04 T)$	0,996	0,446	0,0
$K = 0,354 \exp(-122,98/T)$	0,999	0,007	0,0
$K = 1,911 \exp(-38,53/T^{0,5696})$	0,999	0,003	0,0

Os parâmetros a e n são adequadamente representados por modelos de 2ª ordem, apresentando baixos valores para os erros médios relativos e para os erros médios da estimativa, assim como valores para o coeficiente de determinação próximo da unidade. Já a constante cinética (K) é satisfatoriamente representada pela Equação 3.12, descrita no item 3.4.3.

4.4. PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO

As corridas de secagem, segundo o planejamento estatístico proposto (Tabela 4.15) foram conduzidas com a carga de 1590 g de sementes. A escolha desta carga de sementes se deu pelo comportamento fluidodinâmico estável (Gráfico 4.6) apresentado e também pelo fator econômico.

Gráfico 4.6 - Comportamento fluidodinâmico da carga de 1590 g a velocidade crescente e decrescente



Na Tabela 4.15 estão representadas as variáveis originais e codificadas e os respectivos valores das respostas obtidas na análise do processo de secagem em leito de jorro das sementes de linhaça. A matriz de experimentos consta de 4 corridas iniciais do projeto fatorial e 3 réplicas no ponto central, totalizando 7 ensaios experimentais.

Com os resultados obtidos a partir da matriz de experimentos, realizou-se uma análise estatística com o auxílio do aplicativo Statistica[®]7.0 utilizando o método de Box-Hunter, considerando o nível de significância $\alpha = 0,05$ (confiança 95%).

Tabela 4.15. Matriz de experimentos e os resultados das variáveis de resposta

Corrida	Variáveis Codificadas		Variáveis Originais		Variáveis de Resposta		
	X ₁	X ₂	T (°C)	t (min)	Xr (adim.)	G (%)	IVG (t ⁻¹)
01	-	-	45	60	0,396	95,25	32,11
02	+	-	65	60	0,269	93,33	31,98
03	-	+	45	120	0,322	89,25	31,66
04	+	+	65	120	0,166	88,00	29,37
05	0	0	55	90	0,226	93,48	31,57
06	0	0	55	90	0,227	93,35	31,56
07	0	0	55	90	0,225	93,45	31,58

4.4.1. Análise da variável de resposta razão de umidade (Xr)

Ao realizar a análise de variância para a variável razão de umidade (Tabela C1) sem considerar a influência da curvatura obteve-se um valor para o coeficiente de determinação (R^2) de 37,18 %, indicando que um modelo linear não descreve adequadamente a resposta analisada. Deste modo, conduziu-se novamente análise, considerando desta vez a curvatura para o modelo, ou seja, avaliado a significância de um modelo polinomial de segunda ordem.

Os resultados obtidos considerando o efeito do parâmetro curvatura são apresentados na Tabela 4.16, sugerindo que tanto a curvatura como os efeitos isolados das variáveis X₁(Tg) e X₂(t) e combinação binária das mesmas apresentam significância estatística para as variáveis de respostas razão de umidade, Germinação e Índice de velocidade de Germinação, pois seus efeitos são maiores quando comparados aos

desvios, evidenciando que estes efeitos não ocorrem simplesmente devido a erros experimentais.

Tabela 4.16. Estimativa dos efeitos para a variável de resposta Razão de Umidade

Efeitos	Valores Estimados \pm Erro
<i>Curvatura</i>	-0,3361 \pm 0,0023
X ₁	-0,1415 \pm 0,0010
X ₂	-0,0885 \pm 0,0010
X ₁ X ₂	-0,0145 \pm 0,0010
Grande Média	0,2882 \pm 0,0005

A análise da ANOVA (Tabela 4.16), para a resposta X_r, confirma a influência das variáveis X₁ (Tg) e X₂ (t), da combinação binária X₁X₂ e da curvatura para o modelo, pois apresentam menor probabilidade de estar dentro da região de hipótese nula (sem significância estatística para a resposta), evidenciado pela ordem de grandeza dos valores numéricos da coluna de probabilidade. A análise do teste F ratifica a influência destes parâmetros na resposta X_r, onde o valor do F calculado foi bem superior ao valor de F tabelado em 5 % de probabilidade.

Tabela 4.17. Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta Razão de umidade

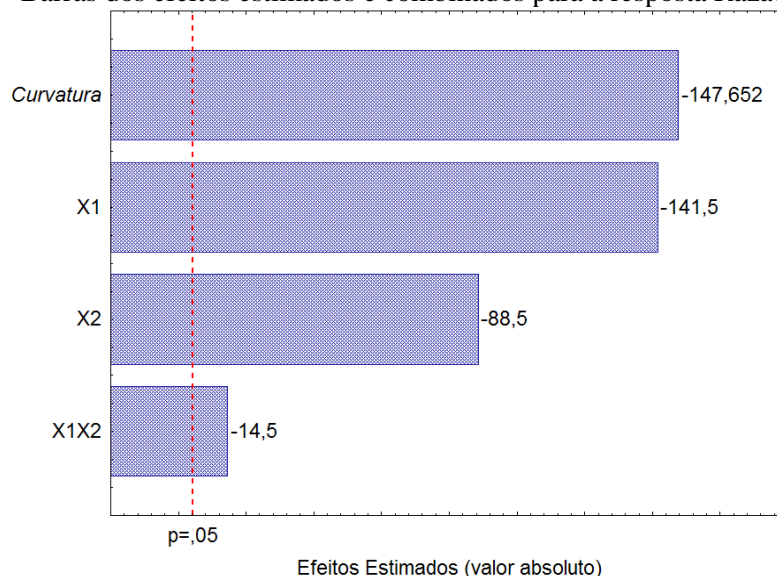
Efeitos	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	F _{$\alpha=0,05$}	Probabilidade (Pr)
<i>Curvatura</i>	0,02180	1	0,021801	21801,19	18,51	0,000046
X ₁	0,02002	1	0,020022	20022,25	18,51	0,000050
X ₂	0,00783	1	0,007832	7832,25	18,51	0,000128
X ₁ . X ₂	0,00021	1	0,000210	210,25	18,51	0,004723
Erro Puro	0,000002	2	0,000001	-		-
Total (Correlação)	0,03471	6	-	-		-

$$R^2 = 0,99994$$

O Gráfico 4.7 representa o diagrama de Pareto, o qual confirma a influência da curvatura e demonstra a influência que as variáveis individuais e combinadas exercem na resposta Razão de umidade, quando estes efeitos estão localizados a direita da reta vertical indicativa do limite de rejeição da hipótese nula, (Pr = 0,05). Tal comportamento foi também observado durante a cinética de secagem, ou seja, a

temperatura e tempo de secagem contribuem na redução da umidade, concordando não somente com os trabalhos de Costa e Silveira (1997), Lima e Rocha (1997) e Oliveira *et al.* (2008), mas fundamentalmente com a teoria de secagem descrita em Strumillo e Kudra (1986). Ressalta-se ainda que a maior influência é realmente exercida pela curvatura, ou seja, este fato confirma o quanto ela é significativa, indicando a não-linearidade da razão de umidade.

Gráfico 4.7 - Barras dos efeitos estimados e combinados para a resposta Razão de umidade



Com base nas variáveis mais influentes, observadas na análise estatística realizada anteriormente, é proposto um modelo estatístico para a variável de resposta razão de umidade, descrito pela Equação 4.1, em função das variáveis codificadas que apresentam alguma significância para o ajuste proposto, segundo os coeficientes de regressão apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18. Coeficientes de regressão para Razão de umidade

Parâmetros	Coefficientes
Constante	0,3941
<i>Curvatura</i>	-0,1681
X ₁	-0,0012
X ₂	-0,0001
X ₁ X ₂	-0,000003

$$X_r = 0,3941 - 0,0012X_1 - 0,0001X_2 - 0,000003X_1X_2 - \text{Curvatura} \quad (4.1)$$

Onde a variável codificada está relacionada à variável original, conforme a equação 4.2 e 4.3:

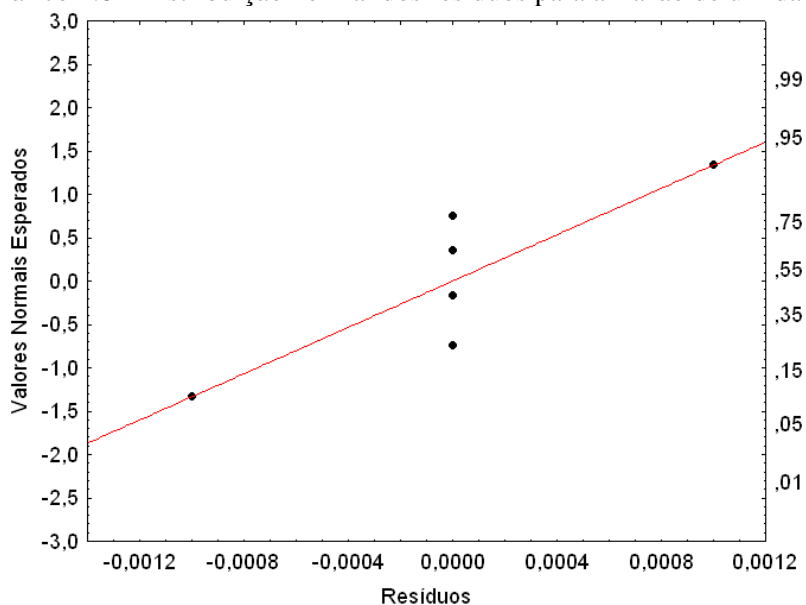
$$X_1 = \frac{T - 55}{10} \quad (4.2)$$

$$X_2 = \frac{t - 90}{30} \quad (4.3)$$

O modelo descrito pela Equação 4.1 representa muito bem os dados experimentais dentro da região estudada neste trabalho, visto o excelente valor da estatística $R^2 = 0,9999$ ou 99,99 % (Tabela 4.17), a qual representa a proporção de variabilidade em torno da média que é explicada pela equação de regressão.

O Gráfico 4.8 ilustra a probabilidade normal dos resíduos, onde se observa que o modelo proposto gera resíduos baixos, ou seja, na faixa de 0,0012 a - 0,0012. Entretanto, verifica-se que a maioria dos resíduos estão localizados próximo ao zero, porém com uma distribuição em torno da curva normal, sugerindo uma normalidade para o modelo, a pesar de tratar-se da análise de uma operação unitária envolvendo produtos naturais, onde as variáveis descritivas do processo, são muitas vezes de difícil controle e avaliação.

Gráfico 4.8 - Distribuição normal dos resíduos para a Razão de umidade



4.4.2. Análise da variável de resposta germinação (G)

Semelhante ao ocorrido com a variável de resposta X_r a variável germinação (G) também demonstrou falta de ajuste quando avaliado ao modelo linear (Tabela C2), assim realizou-se novamente a análise de variância, porém considerando o efeito da curvatura. Os efeitos para a curvatura, as variáveis isoladas X_1 e X_2 e combinação binária $X_1.X_2$ são apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19. Estimativa dos efeitos para a variável de resposta Germinação

Efeitos	Valores Estimados \pm Erro
<i>Curvatura</i>	- 3,39448 \pm 0,057290
X_1	- 1,58500 \pm 0,025166
X_2	- 5,66500 \pm 0,025166
X_1X_2	0,33500 \pm 0,025166
Grande Média	91,45750 \pm 0,012583

Verificou-se (Tabela 4.19) que todas as variáveis e suas combinações apresentaram significância estatística para a resposta Germinação, e, também a combinação binária por apresentarem efeitos numericamente maiores que o erro, ou seja, a temperatura e o tempo devem ser considerados para a avaliação da resposta relacionada à Germinação. Entretanto, tais efeitos não devem ser interpretados somente com relação ao erro padrão, podendo ainda ser analisados em mais um parâmetro estatístico, Pr (probabilidade – Tabela 4.20).

A análise de variância, apresentada na Tabela 4.20, indica que todas as variáveis e também da curvatura exercem alguma influência para o modelo, apresentando valor do F calculado maior que o F tabelado em 5 % de probabilidade.

Tabela 4.20. Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta Germinação

Efeitos	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	$F_{\alpha=0,05}$	Probabilidade (Pr)
<i>Curvatura</i>	2,22339	1	2,22339	3510,61	18,51	0,000285
X_1	2,51223	1	2,51223	3966,67	18,51	0,000252
X_2	32,09222	1	32,09222	50671,93	18,51	0,000020
$X_1 X_2$	0,11222	1	0,11222	177,20	18,51	0,005596
Erro Puro	0,00127	2	0,00063	-		-
Total (Correlação)	41,70714	6	-	-		-

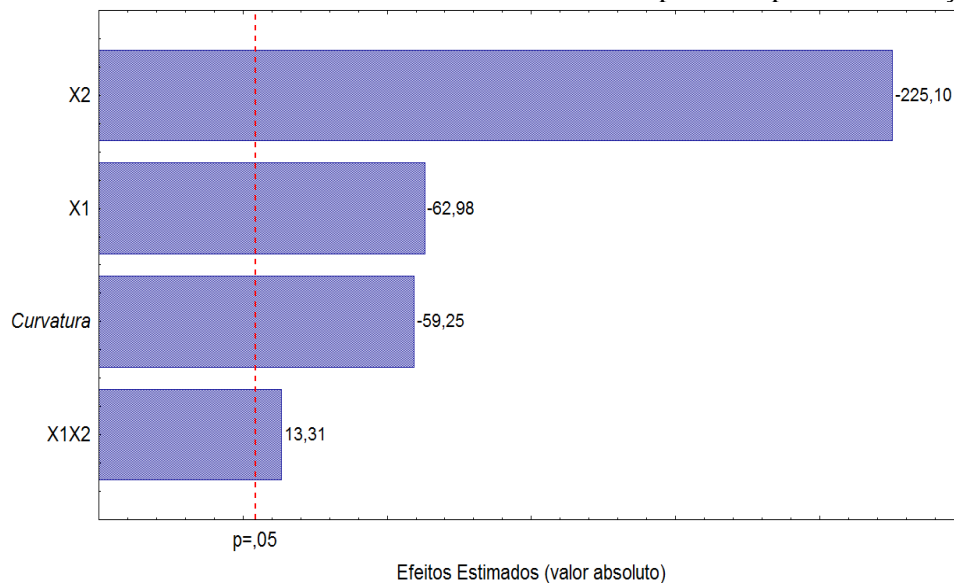
$$R^2 = 0,99997$$

Com base na estatística Pr, para o nível de 95% de confiança, confirma-se à influência das variáveis isoladas X_1 (Tg) e X_2 (t) e da combinação binária por apresentarem menores probabilidades de estar dentro da região de hipótese nula (sem significância estatística para a resposta).

O Gráfico 4.9 representa o diagrama de Pareto, o qual demonstra a influência que as variáveis individuais e combinadas exercem na resposta Germinação e, em semelhança ao comportamento da razão e umidade mostra a influência da curvatura, quando estes efeitos estão localizados a direita da reta vertical indicativa do limite de rejeição da hipótese nula, ($Pr = 0,05$), onde também são confirmados os efeitos mencionados anteriormente.

Ainda com relação ao Gráfico 4.9 demonstra-se que a influência do tempo e da temperatura tendem a diminuir a germinação, assim como a curvatura. Entretanto, a combinação binária temperatura com o tempo de secagem favorecem a germinação.

Gráfico 4.9 - Barras dos efeitos estimados e combinados para a resposta Germinação



Com base nas variáveis mais influentes observadas na análise estatística realizada anteriormente, é proposto um modelo estatístico para a variável de resposta Germinação, descrito pela Equação 4.4, em função das variáveis codificadas que apresentam alguma significância para o ajuste proposto.

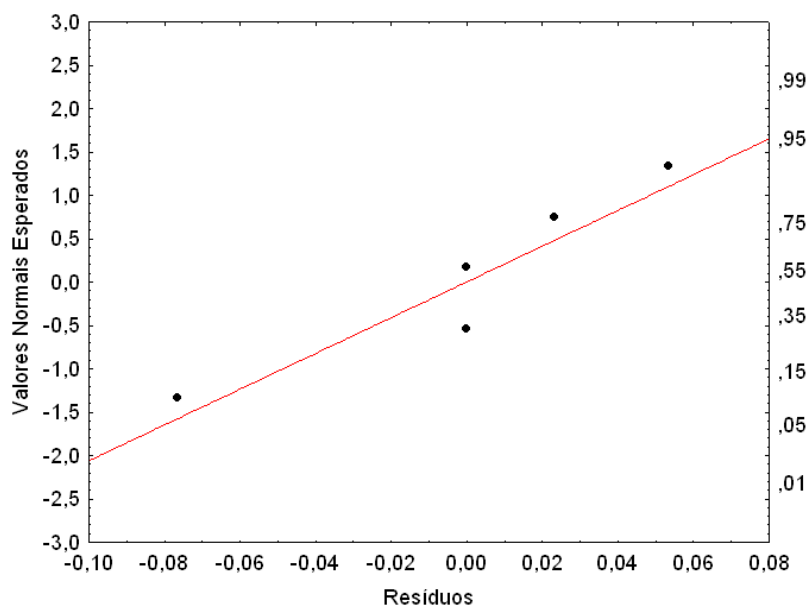
$$G(\%) = 95,1739 - 0,0184X_1 - 0,0576X_2 + 0,00006X_1X_2 - Curvatura \quad (4.4)$$

Onde a variável codificada está relacionada às variáveis originais, conforme as Equações 4.2 e 4.3.

O modelo descrito pela Equação 4.4 representa satisfatoriamente os dados experimentais dentro da região estudada neste trabalho, visto que o valor da estatística $R^2 = 0,9999$ ou 99,99 % (Tabela 4.20).

Da comparação entre os valores experimentais, para a variável Germinação (G), e os estimados pelo modelo, indicado no Gráfico 4.10, é observado uma aglomeração próximo a reta representativa entre os valores dos resíduos e os valores normais esperados, sugerindo um ajuste satisfatório. Além do que, os valores obtidos para os resíduos são baixo e distribuídos numa faixa estreita (0,06 a -0,08) e ao longo da curva normal de probabilidade. Sugerindo a ausência de um comportamento tendencioso e que o modelo proposto pode descrever adequadamente a variável analisada dentro do domínio experimental estudado neste trabalho.

Gráfico 4.10 - Distribuição normal dos resíduos para a Germinação



Destaca-se, diante dos que os resultados obtidos para a germinação de sementes de linhaça após a secagem em jorro, que o parâmetro (G) é mais fortemente influenciado pelo tempo de operação, seguido pela temperatura do ar de secagem, ou seja, que o fator preponderante para a perda da capacidade germinativa da matéria prima seria o fato dos sólidos estarem em movimento cíclico e intenso dentro do leito o que

poderia causar danos mecânicos (quebra ou fissuras) a sua estrutura diminuindo a germinação e/ou o desenvolvimento das sementes.

Entretanto, apesar dos resultados obtidos indicam que os fatores temperatura e tempo de secagem influenciam negativamente nesta resposta, os valores alcançados para este parâmetro (G) ainda são aceitáveis para a comercialização (mínimo alcançado 88 %). Estes resultados concordam com os obtidos por Costa (2003), o qual após também submeter às sementes de brócolis a condições severas de processamento em leito de jorro, temperatura variando de 40 a 70 °C, tempo de processo 1,5 a 3 h e W_g/W_{jm} 2 a 3, constatou que as sementes, mesmo depois de processadas em condições desfavoráveis, apresentaram pequena variação na percentagem de germinação, 93,63 % para 84,25 %, demonstrando assim forte resistência, mantendo-se também em um nível de qualidade aceitável (o padrão nacional mínimo de germinação é de 70 %).

4.4.3. Análise da variável de resposta índice de velocidade de germinação (IVG)

Igualmente ao ocorrido com as variáveis de resposta X_r e G, o índice de velocidade de germinação também se mostrou ser inadequado ao modelo de linear (Tabela C3). Desta forma, para as análises do planejamento para a resposta IVG também foi levado em consideração o efeito da curvatura.

Na Tabela 4.21 são apresentados os efeitos e os respectivos erros padrão de cada variável isolada e sua combinação binária.

Tabela 4.21. Estimativa dos efeitos para a variável de resposta IVG

Efeitos	Valores Estimados \pm Erro
<i>Curvatura</i>	- 1,06845 \pm 0,022765
X_1	- 1,21000 \pm 0,010000
X_2	-1,53000 \pm 0,010000
$X_1 X_2$	- 1,08000 \pm 0,010000
Grande Média	31,28000 \pm 0,005000

Nota-se (Tabela 4.22) que a combinação binária e as variáveis isoladas apresentaram efeitos numericamente maiores que o erro, ou seja, a temperatura e o tempo devem ser considerados para a avaliação da resposta relacionada ao IVG. Porém, para confirmações de tais efeitos há a necessidade de serem analisados em relação a

mais um parâmetro estatístico, Pr (probabilidade), Tabela 4.22, o qual confirma a probabilidade destes efeitos estarem dentro da região de hipótese nula é muito pequena.

Outro teste que também confirma a significância das variáveis X_1 , X_2 e X_1X_2 , é o teste F, pois os valores obtidos para o F calculado foi bem superior ao valor de F tabelado, em 5 % de probabilidade.

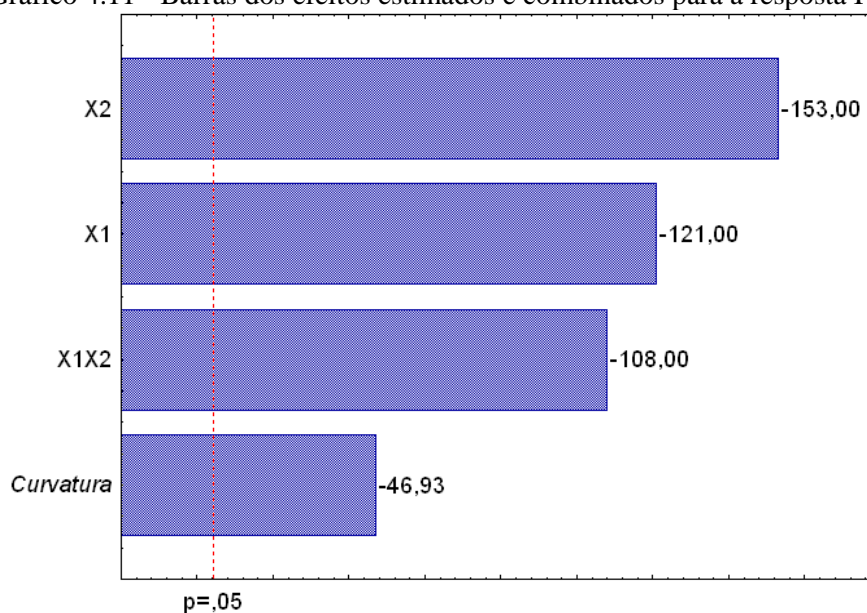
Tabela 4.22. Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta IVG

Efeitos	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	$F_{\alpha=0,05}$	Probabilidade (Pr)
<i>Curvatura</i>	0,220279	1	0,220279	2202,79	18,51	0,000454
X_1	1,464100	1	1,464100	14641,00	18,51	0,000068
X_2	2,340900	1	2,340900	23409,00	18,51	0,000043
X_1X_2	1,166400	1	1,166400	11664,00	18,51	0,000086
Erro Puro	0,000200	2	0,000100	-	-	-
Total (Correlação)	5,115771	6	-	-	-	-

$$R^2 = 0,99996$$

O Gráfico 4.11 representa o diagrama de Pareto, o qual demonstra a influência que as variáveis individuais, combinadas e a curvatura exercem na resposta IVG, quando estes efeitos estão localizados a direita da reta vertical indicativa do limite de rejeição da hipótese nula, ($Pr = 0,05$), onde também são confirmados os efeitos mencionados anteriormente.

Gráfico 4.11 - Barras dos efeitos estimados e combinados para a resposta IVG



No gráfico é demonstrado que a influência das variáveis isoladas e da combinação binária da Temperatura e do tempo tende a diminuir o IVG. Com base nas variáveis mais influentes observadas na análise estatística realizada anteriormente, é proposto um modelo estatístico para a variável de resposta Índice de velocidade germinação, descrito pela equação 4.5, em função das variáveis codificadas que apresentam alguma significância para o ajuste proposto, segundo os coeficientes de regressão apresentados na Tabela 4.23.

Tabela 4.23. Coeficientes de regressão para IVG

Efeitos	Valores Estimados \pm Erro
<i>Curvatura</i>	- 0,53422 \pm 0,011382
X ₁	- 0,00145 \pm 0,000135
X ₂	-0,00453 \pm 0,000135
X ₁ X ₂	- 0,00020 \pm 0,000002
Grande Média	32,10422 \pm 0,009810

$$IVG = 32,10422 - 0,00145 X_1 - 0,00453 X_2 - 0,00020 X_1 X_2 + Curvatura \quad (4.5)$$

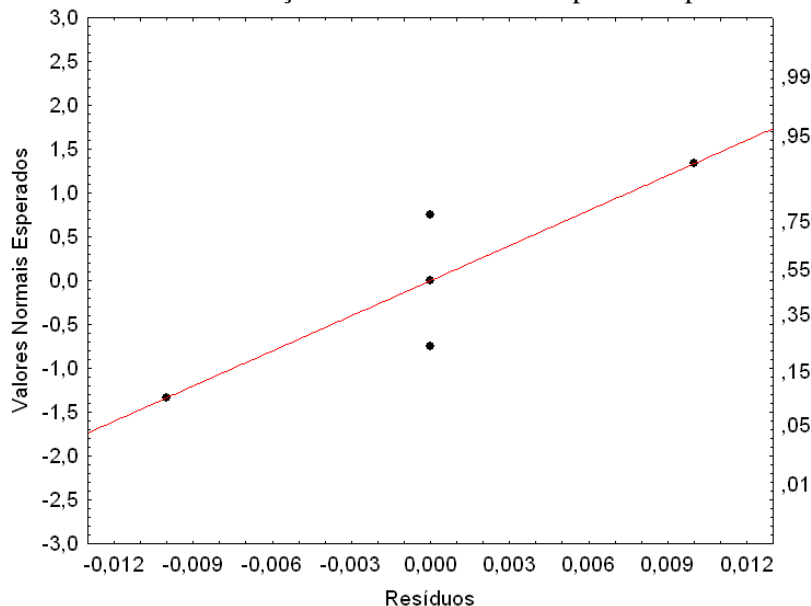
O modelo descrito pela Equação 4.5 representa satisfatoriamente os dados experimentais dentro da região estudada neste trabalho, visto que o valor da estatística $R^2 = 0,99996$ ou 99,99 % (Tabela 4.23), a qual representa a proporção de variabilidade em torno da média que é explicada pela equação de regressão, pode ser considerado muito bom, em se tratando de um produto natural, cujas variáveis são difíceis de controlar e de se avaliar.

O Gráfico 4.12, o qual representa a probabilidade normal dos resíduos, demonstra que os resíduos obtidos pela comparação entre os dados experimentais e os valores gerados pelo modelo propostos são pequenos e estão distribuídos ao longo da curva normal de probabilidade, indicando um ajuste satisfatório, mesmo se tratando de uma variável de resposta (IVG) que depende de condições climáticas (temperatura e umidade) e de fatores intrínsecos da matéria prima.

Os resultados obtidos para o IVG confirmam o que foi discutido anteriormente para a variável germinação, ou seja, que o parâmetro tempo de secagem/jorro é o fator de maior influência nas características fisiológicas da semente. Porém, vale ressaltar que

mesmo as sementes sendo submetidas ao estresse mecânico as mesma ainda mantiveram sua capacidade germinativa satisfatória.

Gráfico 4.12 - Distribuição normal dos resíduos para a resposta IVG



Medeiros *et al.* (2005) também observaram mudanças nas propriedades físicas dos grãos de feijão submetidos a secagem em leito de jorro, tendo a percentagem de quebra dos grãos de feijão maximizada a partir de 40min de operação. Já Paulo filho e Rocha (2000) e Dias *et al.* (2000), trabalhando com variedades diferentes de feijão, não constaram mudanças significativas no poder de germinação das sementes submetidas ao processamento em leito de jorro.

4.5. OTIMIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

A otimização das variáveis independentes, X_1 e X_2 , as quais representam temperatura e tempo de secagem, respectivamente para o processo de secagem de secagem das sementes de linhaça em leito de jorro foi realizada com o auxílio da técnica de otimização simultânea denominada “Função Desejabilidade” proposta por Derringer e Suich (1980), descrita em Akhanazarova e Kafarov (1982) e Barros Neto, Scarminio e Bruns (2007).

A técnica de otimização simultânea é baseada na transformação de uma função desejabilidade para cada variável de resposta, com valores descritos entre 0 e 1, onde 0

representa um valor completamente indesejado e a resposta transformada em 1 o valor mais desejável.

Na Tabela 4.24 é descritas a programação estabelecida no software *Statistica*® 7.0 para a entrada dos valores numéricos necessários à otimização do processo de secagem de sementes de linhaça em leito de jorro. São especificados os valores numéricos para o limite mínimo (LI), o valor mediano (M) e o limite superior (LS) que determinam a importância da função para encontrar o valor médio desejado, como também os valores dos expoentes s e t (Apêndice D) que determinam a importância da função para encontrar o valor médio desejado.

Tabela 4.24. Parâmetros utilizados na otimização das respostas do processo de secagem em leito de jorro

Respostas	LI	M	LS	s	t
Razão de umidade	0,166 (1)	0,281 (0,5)	0,396 (0)	10	10
Germinação	88,00 (0)	91,63 (0,5)	95,25 (1)	5	5
Índice de velocidade de germinação	29,37 (0)	30,74 (0)	32,11 (1)	5	5

O Gráfico 4,13 representa o digrama da Função Desejabilidade para a descrição das condições otimizadas na secagem em leito de jorro de sementes de linhaça, dentro do domínio experimental estabelecido este trabalho.

A análise do Gráfico 4.13 indica que a Função Desejabilidade possui um valor otimizado em 0,9560; que de acordo com a classificação de Akhanazarova e Kafarov (1982), (Tabela D1), considera-se essa resposta aceitável e excelente.

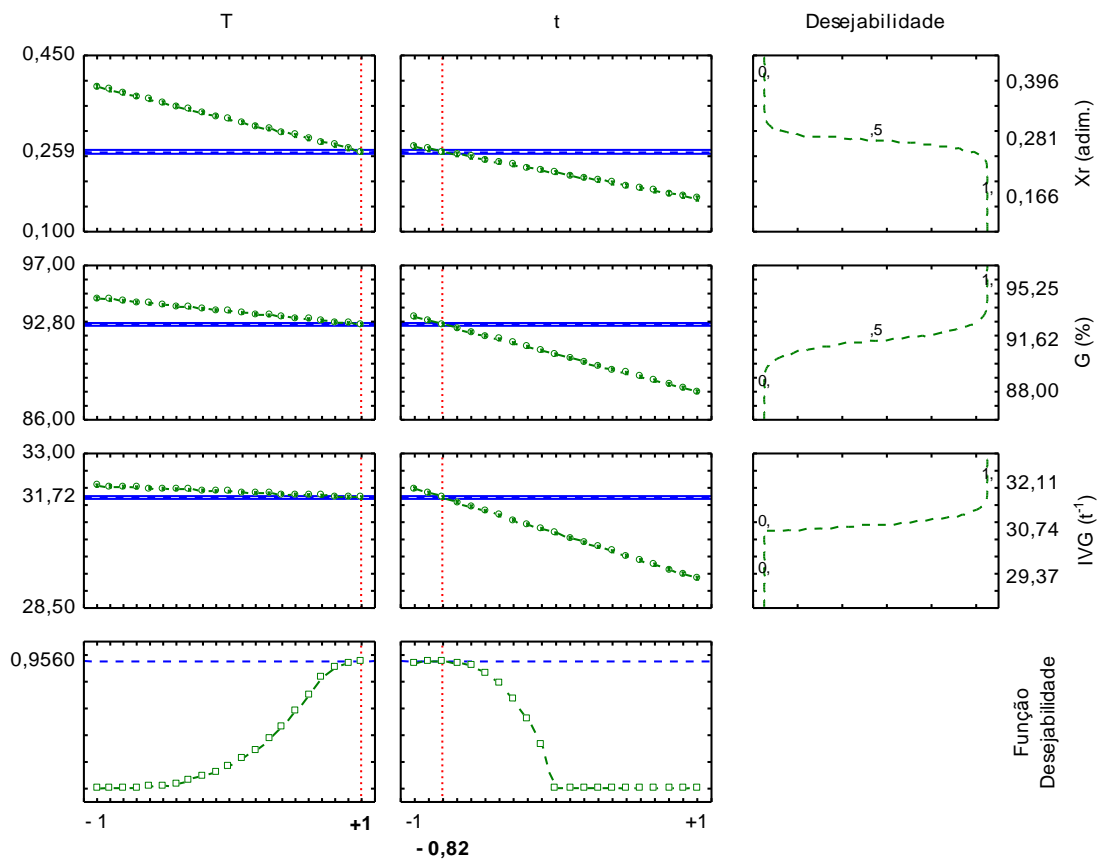
Os gráficos da última coluna mostram os perfis das desejabilidades das três respostas otimizadas (Tabela 4.25). Observa-se que para as respostas analisadas, tem-se um patamar de desejabilidade 1, acima de 95 % para germinação e 32 (t^{-1}) para o índice de velocidade de germinação. Já para a razão de umidade abaixo de 0,166.

As linhas tracejadas verticais (em vermelho) sinalizam as condições de máxima desejabilidade global, que para a secagem das sementes de linhaça em leito jorro, alcançou 0,9560; como pode ser visualizado na última linha do Gráfico 4.12.

Com base no Gráfico 4.12, ressaltam-se as observações discutidas anteriormente que o parâmetro tempo de secagem/jorro é o fato de mais influencia, não somente no conteúdo de umidade final das sementes (X_r), mas também nas variáveis que descrevem as características fisiológicas das sementes (G e IVG), podendo-se destacar a tendência

crecente ilustradas pelas linhas verde em destaque nos gráficos de T e t em relação a Xr, G e IVG.

Gráfico 4.13 - Perfis para os valores preditos e a função desejabilidade



A condição estabelecida como ótima para a razão de umidade das sementes de linhaça em leito de jorro, dentro das condições experimentais estabelecidas neste trabalho avaliado, corresponde a 0,259 nas condições do nível máximo (+1) para a temperatura do ar de secagem e tempo de secagem próximo ao nível mais baixo (-0,8).

Desta forma, com base na otimização estatística (Gráfico 4.12) confirma-se que a variável T e t, dentro da faixa estudada, influenciam nas respostas consideradas. Dentre as condições estabelecidas neste trabalho, o valor ótimo da Função Desejabilidade é quando a T é deslocada para o nível máximo (65 °C) e t para próximo do valor mínimo (65,4 min) obtendo assim 0,259 para Xr, 92,80 % para G e 31,72 t⁻¹ para IVG.

Diante dos resultados apresentados e discutidos neste trabalho sugere-se levar em consideração que não são apenas os parâmetros relacionados ao movimento intenso do processo jorro que podem influenciar negativamente nas propriedades fisiológicas das sementes, mas também os fatores ligados ao processo de secagem como um todo, pois como Bovi, Martins e Spiering (2004) observaram a secagem progressiva das

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

sementes de pupunha afeta não somente a percentagem de germinação como também o vigor, danificando as membranas celulares, tornando a germinação mais lenta e diminuindo o crescimento das estruturas das plântulas.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, apresentados e discutidos para o estudo experimental do comportamento fluidodinâmico e da secagem de sementes de linhaça em leito de jorro, nas condições operacionais utilizadas neste trabalho, podem ser sumarizadas a seguintes conclusões:

- O equipamento utilizado apresentou-se eficiente para a análise do comportamento fluidodinâmico das partículas, proporcionando boa reprodutibilidade nas corridas experimentais, conforme os dados em duplicatas obtidos no ponto central.
- A caracterização física, qualitativa e centesimal das sementes de linhaça apresentou uma boa precisão para os ensaios por apresentarem baixos valores para os coeficientes de variação (menores que 10 %).
- As sementes de linhaça podem ser classificadas como do grupo D, segundo Geldart (1973).
- A expansão e a porosidade do leito de sementes reduziram com o aumento das cargas de sementes.
- Pode-se se observar que a carga exerceu influência sobre a queda de pressão máxima, onde a correlação de Pallai e Németh (1969) foi que apresentou o menor desvio para a carga de 2445 g de 0,43 %.
- Para a queda de pressão no jorro estável o menor desvio ocorreu para o modelo de Mukhlenov e Gorshtein (1965) para a carga de 2955 g, em torno de 8,67 %.
- Pode-se se observar que a carga exerceu influencia sobre a queda de pressão no mínimo jorro. Sendo que o menor desvio ocorreu para o modelo de Mukhlenov e Gorshtein (1965) para a carga de 2955 g, em torno de 4,80 %.
- Observou-se que a carga exerceu influencia sobre a velocidade no mínimo jorro. Sendo que o menor desvio ocorreu para o modelo de Mukhlenov e Gorshtein (1965) para a carga de 1590 g, em torno de 1,04 %.
- Pode-se se observar que a temperatura exerceu influência sobre a queda de pressão máxima nas diversas cargas, onde a correlação de Pallai e Németh (1969) foi que apresentou o menor desvio para a carga de 1590 g a 45 °C de 3,97 %.
- A correlação de Mukhlenov e Gorshtein (1965) obteve o menor desvio de 8,17 % para de 2445 g para a temperatura 55 °C, no parâmetro queda de pressão no jorro estável.

- A temperatura mostrou-se influente na queda de pressão no mínimo jorro, onde a correlação de Mukhlenov e Gorshtein (1965) foi a que obteve o menor desvio para a carga de 2445 g, para a temperatura de 55 °C de 14,03 %.
- A velocidade no mínimo jorro também sofreu influência da temperatura sendo que o menor desvio foi obtido pela correlação de Abdelrazek (1969) na carga de 1590 g na temperatura de 65 °C de 0,10 %.
- Na análise do comportamento cinético observou-se que o conteúdo de umidade das sementes diminui continuamente com tempo de secagem e sob forte influencia da temperatura do ar de entrada.
- Dentre os modelos matemáticos utilizados na análise da cinética de secagem, o modelo de Midilli *et al.* (2002) foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais para as três temperaturas estudadas.
- Foi observada que as variáveis isoladas temperatura do ar (T) e tempo (t) exercem influência na resposta X_r , assim como a combinação binária delas, para 95 % de confiança, diminuindo o conteúdo de umidade final das sementes de linhaça, quando esta passa do nível mais baixo (45°C) para o nível mais alto (65°C) do planejamento.
- Foi observada que os parâmetros avaliativos das características fisiológicas das sementes (G e IVG) foram fortemente influenciados pela variável isolada tempo (t) de operação e seguida pela temperatura do ar de secagem, indicando ser este que o fator preponderante para a diminuição da capacidade germinativa da matéria prima.
- Foi possível secar e/ou jorrar as sementes de linhaça, em escala de laboratório, com temperatura variando de 45 a 65 °C e tempo de fluidização de 1 a 2 h, sem causar danos às estruturas essenciais do embrião, possibilitando a normal emergência e desenvolvimento das plântulas.
- As sementes de linhaça, mesmo submetidas a movimentos intensos dentro do leito e temperatura elevada ainda mantiveram a percentagem de germinação dentro de limites comercialmente aceitáveis.
- Constatou-se que os modelos estatísticos obtidos para descrever as variáveis de resposta X_r , G e IVG levam em consideram a curvatura, sugerindo que as variáveis de processo podem ter significância quadrática as resposta avaliadas.

Capítulo 5 – Conclusões

- A maioria das sementes submetidas a secagem em jorro retardaram a germinação após o processo, mas iniciada a emergência ou a protusão da radícula, não se notou qualquer diferença de comportamento das plântulas em relação às *in natura*.
- O valor ótimo da Função Desejabilidade ocorre quando a temperatura é deslocada para o nível máximo (65 °C) e o tempo de secagem para próximo do valor mínimo (65,4 min) obtendo assim 0,259 para X_r , 92,80 % para G e 31,72 t^{-1} pra IVG.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAZEK, I. D. **An analysis of thermo-chemical deposition in spouted beds.** Ph. D. thesis, Univ. of Tennessee, Knoxville, 1969.
- ADEODATO, M. G. **Análise Fluidodinâmica de Leito de Jorro Durante o Recobrimento de Partícula.** 1989. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- AKHNAZAROVA, S.; KAFAROV, V. **Experiment optimization in chemistry and chemical engineering.** Moscow: Mir, 1982.
- ALMEIDA, C. **Recobrimento de sementes de brócolos em leito de jorro e leito fluidizado.** 2002. 148f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- ALMEIDA, C.; ROCHA, S. C. S. Fluidodinâmica de sementes de brócolos em leito fluidizado e leito de jorro. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 645-652, 2002.
- ANDREWS, C. Mechanical injury on seeds. In: SHORT. Course for seeds man. Mississippi, 1965. **Proceedings Mississippi: Seed Technology Laboratory**, p.125-130, 1965.
- AOSA, Association of official seed analysis. Seed Vigour Testing Handbook. Washin, 1983, 93p.
- APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. **Anatomia Vegetal.** Viçosa: Editora UFV, p.438, 2003.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos.** Editora da Unicamp, Campinas, SP, 3ª ed., p.480, 2007.
- BARROS, N. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e Otimização de Experimentos**, UNICAMP, Campinas, p.299, 1995.
- BARROZO, M. A. S. **Transferência e calor e massa entre o ar e semente de soja em leito deslizante e escoamento cruzado.** 1995. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.
- BECHER, R. D.; SCHLÜNDER, E. U. Fluidized bed granulation - the importance of a drying zone for the particle growth mechanism. **Chemical Engineering and Processing**, v.37, n.1, p.1-6, 1998.
- BECKER, H. A. An investigation of laws governing the spouting of coarse particles. **Chem. Eng.** . v.13, p.245, 1961.
- BERQUIN, Y. F. A new granulation process and its application in the field of fertilizer manufacture. **Génie Chim.**, v.8, n.45, 1961.
- BERQUIN, Y. F. **Method and apparatus for granulating melted solid and hardenable fluid products.** U.S. N°.3.231.413 to PEC, Paris, 1966.

- BEWLEY, J. D. Seed germination and dormancy. **Plant Cell**, v. 9, p. 1055-1066, jul. 1997.
- BEWLEY, J. D.; BLACK, M. **Physiology and biochemistry of seed in relation to germination. Viability, dormancy an environmental control**. Berlin: Springer Verlag, p.375, 1982.
- BOMBO, A. J. **Obtenção e caracterização nutricional de snacks de milho (Zeamays L.) e linhaça (Linum usitatissimum L.)**. 2006. 96 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- BOTÂNICA - PORTAL ELETRÔNICO. **Composição da Semente**. Disponível em: <<http://www.sabedoria.ebrasil.net/db/biologia/estudos/biologia/biologiag/semente.php.htm>>. Acesso em: 11 janeiro 2011.
- BOVI, M. L. A.; MARTINS, C. C.; SPIERING, S. H. Desidratação de sementes de quatro lotes de pupunheira: efeitos sobre a germinação e o vigor. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 109-112, 2004.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statics for experimenters: an introduction to design**, N.Y.: John Wiley, 1978.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para Análise de Sementes**, Brasília, DF: SNDA/DNPV/CLAV, p.365, 1992.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oil seeds**. Van Nostrand Reinold, New York, p.450, 1992.
- CAMPOS, V. M. C. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais CETEC, **Produção e beneficiamento de sementes de linhaça**. Disponível em:< <http://www.sbirt.ibict.br>> Acesso em: 15 maio 2010.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: Ciência, Tecnologia e Produção**. Campinas: Fundação Cargill, p.429, 1980.
- CARVALHO, P. O.; CAMPOS, P. R. B.; NOFFS, M. D.; OLIVEIRA, J. G.; SHIMIZU, M. T.; SILVA, D. M. Aplicação de lipases microbianas na obtenção de concentrados de ácidos graxos poliinsaturados. **Química Nova**, São Paulo, v. 26, p. 75-80, 2003.
- CASTRO, R. **Reino plantas: Gimnosperma e Angiosperma**, 2011.
- COLPO, E.; FRIEDRICH, L.; OLIVEIRA, V. R. de. Benefícios do uso da semente de linhaça. **Nutrição em Pauta**. n. 81, p. 25-8, Nov - dez. 2006.
- CONCEIÇÃO FILHO, R. S. **Recobrimento de sementes de soja com fertilizantes e leite de jorro**. 1997. 58f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1997.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do

feijão (*phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.501-510. 2007.

COSKUNER, Y.; KARABA, E. Some physical properties of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.). **Journal of Food Engineering**. Turkey, v. 78, n. 3, p. 1067-1073, 2007.

COSTA, M. A. **Peletização de Sementes de Brócolos em Leito de Jorro Cônico**. 2003. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

CRAVEIRO, A. A.; CRAVEIRO A. C.; QUEIROZ, D. C. **Quitosana: A fibra do futuro**. 1ª Edição, p.281. Fortaleza/CE, Editora Eletrônica Sandro Vasconcelos, 2003.

DELOUCHE, J. C. Mechanical damage to seed. In: Short course for seedmans 3, Mississippi, 1967. Proceedings.Mississippi: **Seed Technology**. Laboratory, p.69-71, 1967.

DESAI, B. B.; KOTTECHA, P. M.; SALUNKHE, D. K. **Seeds handbook: biology, production, processing and storage**. New York, v.1, p.627, 1997.

DIAS, M. C.; MARQUES, W. M.; BORGES, S. V.; MANCINI, M. C. Avaliação dos efeitos da secagem em leito de jorro bidimensional sobre as propriedades do feijão. In: **XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, 1998. Anais do XXVI ENEMO, Teresópolis, RJ, 2000, p. 371-376.

DOS SANTOS, K. G. **Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais**. 2008. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

DUARTE, C. R. **Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e revestimento de partículas em leito de jorro**. 2006. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2006.

DUARTE, C. R. O Uso de um Modelo de Balanço Populacional na Modelagem do Crescimento da Camada de Recobrimento de Soja em Leito de Jorro. **XXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, 2001, São João Del Rei. Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2001. v. 1.

DUARTE, C. R., BARROZO, M. A. S., SANTOS, D. A.; PETRI JÚNIOR, I. Estudo Experimental e de Simulação da Fluidodinâmica do Leito de Jorro Operando com Mistura de Partículas. **VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, 2009, Uberlândia. Anais do VIII COBEQ-IC, 2009.

DUC, L. A.; HAN, J. W.; KEUM, D. H. Thin layer drying characteristics of rapeseed (*Brassica napus* l.). **Journal of Stored Products Research**, v. 47, p. 32-38, 2011.

EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and Spout-Fluid Beds – Fundamentals and Applications**. Cambridge, 2011.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Fats oils in human nutrition**, 2008.

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

FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário eletrônico aurélio**, versão 5.0. Positivo Software, 2004.

FERREIRA, A. G.; BORGHETTI, F. **Germinação: do básico ao aplicado**. Porto Alegre: Artmed.2004.

FLOSS; E. **Linho Cultivo e Utilização**. Passo Fundo: Faculdade de Agronomia, Universidade de Passo Fundo, (Boletim Técnico, n. 3), 1983.

FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos especiais em sistemas particulados**. São Carlos, Editora da UFSCar, p. 330, 1992.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport process and unit operations**, 3 ed., New Jersey: Prentice Hall, 1993.

GELDART, D. **Gas fluidization technology**, John Wiley & sons, Inc. New York, 1986.

GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, v.7, p. 285-292, 1973.

GELPERIN, N. I.; AINSHTEIN, V. G.; GELPERIN, E. N.; L'VOVA, S. D. Hydrodynamics properties of fluidized granular materials in conical and conical-cylindrical sets. **Khin.Tekhnol.Top.Masel**, v.5, N°8, p.51, 1960.

GHOHS, B. A study on the spouted bed- A theoretical analysis. **Indian Chem. Engr.** v.7, p.16, 1965.

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

GOMES, F. P. **A Estatística Moderna na Pesquisa Agropecuária**. 3. ed. Piracicaba: Nobel, 1987.

GÓMEZ, M. E. D. B. **Modulação da composição de ácidos graxos poli-insaturados ômega de ovos e tecidos de galinhas poedeiras, através da dieta**. 2003. 149f. Tese (Doutorado em Bromatologia) - Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Alimentos, Universidade de São Paulo 2003.

GOMIDE, R. **Operações Unitárias-Operações com Sistemas Sólidos Granulares**. v. 1., São Paulo, 1986.

GROSHTEIN, A. E.; MUKHLENOV, I. P. **Critical speed of gas corresponding of the beginning of spouting**, 1964.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 3ª ed. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, v.1, 1985.

ISHIKURA, T.; NAGASHIMA, H., IDE, M. Hydrodynamics of a spouted bed with a porous draft tube containing a small amount of finer particles, **Powder Technology**, v. 131, p. 56-65, 2003.

JACINTO, K. A. **Efeito do consumo de farinha de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) no crescimento de ratos wistar e sua relação com a digestibilidade de globulinas e fatores antinutricionais protéicos nas albuminas.** 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) – Centro de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

JOHNSON, G., SCHOLLES, K.; SEXTY, R. W. **Exploring strategic management.** Scarborough, Ontario: Prentice Hall, 1990.

JONG, J. A. H.; HOFFMANN, A. C.; FINKERS, H. J. Properly determine powder flow ability to maximize plant output. **Chemical Engineering Progress**, v. 95, n. 4, p.25-34, 1999.

KADAM, D. M.; GOYAL, R. K.; SINGH, K. K.; GUPTA, M. K. Thin layer convective drying of mint leaves. **Journal of Medicinal Plants Research**, v. 5, p. 164-170, 2011.

KAWAGUCHI, T., SAKAMOTO, M., TSUJI, T. T. Quasi-three-dimensional numerical simulation of spouted beds in cylinder, **Powder Technology**, v. 109, p. 3-12, 2000.

KEEY, R. B. **Drying: Principles and practice.** New York; Pergamon, 1972.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**, John Wiley: New York, 1991.

LABOURIAU, L. G.; AGUDO, M. On the physiology of seed germination in *Salvia hispanica* L. I. Temperature effects. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, 1987, v.59, n. 1, p. 37-56.

LARACHI, F.; BERNARD, P.; GRANDJEAN, A.; CHAOUHI, J. Mixing and circulation of solids in spouted beds, **Chemical Engineering Science**, v. 10, p. 1-11, 2002.

LE HIR, A. **Abrégé de pharmacie galénique – Formes Pharmaceutiques.** 5^{eme}. Ed. Paris: Masson, 1997.

LIMA, A. C. C. de. **Análise experimental de secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado.** 1995. 172f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 1995.

LIMA, A. C. C.; ROCHA, S. C. S. Bean drying in fixed, spouted and spot-fluid beds – comparison and empirical modeling. In: **Inter-American drying conference (IADC).** 1997, Itú. *Proceedings*. Itú: DTF/FEQ/UNICAMP, 1997, p. 165-172.

LIU, L. X.; LISTER, J. D. Spouted bed seed coating: the effect of process variables on maximum coating rate and elutriation, **Powder Technology**, v. 36, p. 422-442, 1993.

- LUCAS, K. B. C. **Inoculação de sementes de soja e recobrimento com micronutrientes em leite de jorro**. 2000. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2000.
- MADAMBA, P. S., DRICOLL, R. H., BUCKLE, K. A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 29, n.1, p.75-97, 1996.
- MADHIYANON, T.; PHILA, A.; SOPONRONNARIT, S. Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p.2849-2854, 2009.
- MAGUIRE, J. D. Speeds of germination-aid selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science, Madison**, v.2, p. 176-177, 1962.
- MALEK, M. A.; LU, B. C. Y. Pressure drop and spoutable bed height in spouted bed. **Industrial and Engineer Chemical Process Design and Develop**, v.4, p.123-128, 1965.
- MALEK, M. A.; MADONNA, L. A.; LU B. C. Y. Estimation of spout diameter in a spouted bed, I&EC, **Proc. Design Dev.**, v.4, n.1, p.123 – 128, 1963.
- MANURUNG, F. **Studies in the spouted bed technique with particular reference to low temperature coal carbonization**. 1964. Ph.D. thesis, Univ. of New South Wales, Kensington, Australia, 1964.
- MARCOS FILHO, J. Teste de envelhecimento acelerado. In: Krzyzanowski, F.C.; VIEIRA, R.D.; França-Neto, J.B. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES. cap.3, p.1-24, 1999.
- MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. Hydrodynamic Characteristics of Jet-Spouted Beds, **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.61, p. 377-381, 1983.
- MARQUES, A. C. **Propriedades funcionais da linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em diferentes condições de preparo e de uso em alimentos**. 2008. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P.C.; REZENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 301-306, 2007.
- MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. A technique for contacting gases with coarse solid particles. **A.ICh.E.J.**, n.1, p.157, 1954.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**.1.ed London: Academic Press, p.304, 1974.
- MATIAS, A. C. G. **Avaliação de efeitos fisiológicos da fração fibra alimentar dos grãos de amaranto (*Amaranthus cruentus* L.) e linhaça (*Linum usitatissimum* L.)**. 2007. 111f. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

- MAURÍCIO. **Linhaça Produção de Óleos e Sementes**. Disponível em: <<http://www.ruralsementes.com.br/produtos/Linha%C3%A7a%20%5>>. Acesso em: 30 abril 2008.
- MAYER, A. M.; POLJAKOFF-MAYBER, A. The germination of seeds. **Oxford: Pergamon Press**, p.270, 1989.
- 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.
- MAZZA, G. **Alimentos Funcionais: Aspectos Bioquímicos y procesado**. Editorial Acribia, S. A. Zagaragoza, España, 2000.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**, 5ª ed., New York: McGraw-Hill, 1993.
- MEDEIROS, U. K. L. de. **Estudo da Secagem de Feijão Verde (*Vigna unguiculata* L. Walp) – Análise Experimental do Processo Combinado Leito Fixo/Leito de Jorro**. 2004. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2004.
- MEDEIROS, U. K. L.; GURGEL, A. R.; ANDRADE JÚNIOR, W. M.; XAVIER, C. H.; ARAÚJO, A. A. L.; MAGALHÃES, M. M. A.; MEDEIROS, M. F. D. Mudanças nas propriedades físicas dos grãos de feijão verde durante o processo de secagem em leito de jorro – efeitos sobre o comportamento fluidodinâmicos e quebra dos grãos. In: **VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, 2005. Anais do VI COBEQ-IC, Campinas-SP, 2005. (suplemento CD-ROM).
- MENKOV N. D. Moisture sorption isotherms of lentil at several temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 44, p. 205-211, 2000a.
- MENKOV N. D. Moisture sorption isotherms of vetch seeds at four temperatures. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 76, p. 373-380, 2000b.
- MENON, A. S., MUJUMDAR, A. S. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker Inc., cap. 9, p. 295-326, 1987.
- MEZIANE, S. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**. v. 52, p. 1644-1649, 2011.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, Philadelphia, v.20, n.7, p.1503–1513, 2002.
- MOHSENIN, N., Physical properties of plant and animal materials. **New York: Gordon and Breach Science Publisher**, p.587-593, 1970.
- MONTGOMORY, D. C. **Diseño y análisis de experimentos**. Traduzido por Jaime Delgado Saldivar. México: Iberoamérica, 1991.
- MOURA, N. C. **Características físico-químicas, nutricionais e sensoriais de pão de forma com adição de grãos de linhaça (*Linum usitatissimum* L.)**. 2008. 98f.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.

MUJUMDAR, A. S. Drying of granular materials, lecture notes. **Montreal: Department of Chemical Engineering**, McGill University, 1981.

MUKHLENOV, I. P.; GROSHTEIN, A. E. Investigation of a spouting bed. **Khim. Prom. (Moscou)** v.41, p.443, 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 characteristics of the spouting bed. *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Tekhmol.* v.7, p.855, 1964.

NORTHRUP, C. **A sabedoria da Menopausa: criando saúde física e emocional, curando-se durante a mudança.** São Paulo: Ed. Gaia, 2004.

OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; AGUAYO, A. T.; BILBAO, J. Hydrodynamics of nearly flat base spouted beds. **Chemical Engineering Journal**, v.55, p.27-37, 1994.

OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; IZQUIERDO, M. A.; SALAZAR, A. O.; BILBAO, J. Effect of operation conditions on solid velocity in spout, annulus and fountain of spouted beds, **Chemical Engineering Science**, v. 56, p. 3585-3594, 2001.

OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; PEÑAS, F. J.; AGUAYO, A. T.; BILBAO, J. Stability and hydrodynamics of conical spouted beds with binary mixtures. **Ind. Eng. Chem. Res.** p. 2826-2835, 1993.

OLIVEIRA, C. A. **Estudo da secagem em leito de jorro, com condições operacionais intermitentes de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade carioca.** 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1999.

OLIVEIRA, E. G.; ROSA, G. S.; MORAES, M. A.; PINTO, L. A. A. Phycocyanin content of *Spirulina Platensis* dried in spouted bed and thin layer. **Journal Food Process Engineering**, v. 31, p. 34-50, 2008.

OLIVEIRA, M. T. R.; BERBERT, P. A.; VIERA, H. D. THIÉBAUT, J. L.; CARLESSO, V. O.; PEREIRA, R. C. Avaliação do vigor de sementes de carambola em função da secagem e do armazenamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v. 13, p. 477-482, 2009.

OOMAH, B. D.; MAZZA, G. Compositional changes during commercial processing of flaxseed. **Industrial Crops and Products.** v.9, p. 29-37, 1998.

OOMAH, B., D.; DER, T. J.; GODFREY, D. V. Thermal characteristics of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) proteins. **Food Chemistry.** v.98, 2006.

OWER, E.; PANKURST, R. C. The measurement of flow. 5 ed. **New York: Pergamon. Press**, p.51-54, 1977.

PALLAI, I.; NEMETH, J. Analysis of flow in a spouted bed apparatus by the so called phase diagram. In: **International Congress Chemical Engineer (CHISA)**, 1969.

PASSOS, M. L.; MASSARANI, G.; FREIRE, J. T.; MUJUMDAR, A. S. Drying of pastes in spouted beds of inert particles: design criteria and modeling. **Drying Technol.**, v.15, n.2, p. 605-624, 1997.

PATEL, K.; BRIDGWATER, J., BAKER, C. G. J. Spouting behavior of wet solids. In: MUJUMDAR, A.S.; ROQUE, M.A.A. **Drying'86**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, p. 183-189, 1986.

PAULO FILHO, M. **Análise de danos em sementes de feijão pela fluidodinâmica em leito de jorro**. 1999. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1999.

PAULO FILHO, M.; ROCHA, S. C. S. Avaliação de danos em sementes de feijão pela fluidodinâmica em leito de jorro cone-cilíndrico. In: **XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2000. Anais do XIII COBEQ, Águas de São Pedro-SP, 2000. (suplemento CD-ROM).

PEÇANHA, R. P.; MASSARANI, G. Dimensão característica e forma de partículas. In: **Anais do XIV Encontro Sobre Escoamentos Em Meios Porosos**, Campinas, SP, 1986, p. 302-312.

PETERSON, W. S., Spouted bed drier, **Can. L. Chem. Eng.**, p.40-226, 1962.

PICCININI, N.; ROVERO, G. Thick coatings by thermochemical deposition in spouted bed. **Can. J. Chem. Eng.**, Ottawa, v.61, p.448-453, 1983.

PICOLLO, S. V.; ROCHA, S. C. S.; QUEIROZ FILHO, A. V. Análise da cinética do recobrimento de comprimidos em leito de jorro bidimensional para atomização da solução no topo, no fundo e na base angulada do leito. **Anais do XXV Encontro sobre Escoamento em meios porosos**, São Carlos-SP, 1997, v.II, p. 540-554.

PITA, M. C. G. **Fontes Marinhas e vegetais de PUFA's na Dieta de Poedeiras: efeito na composição lipídica da gema de ovo e tempo de incorporação dos ácidos graxos**. 2007. 136f. Tese (Doutorado em Medicina Veterinária) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, 2007.

POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. Brasília, DF: AGIPLAN, 1977.

PRADO, M. M. do. **Secagem em Leito Fixo de Sementes com Mucilagens**. 2004. 162f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2004.

PRASAD, K. **Dietary flaxseed in prevention of hypercholesterolemia therosclerosis**. Atherosclerosis, Saskatoon, v. 132, n.1, p.69-76, 1997.

RADÜNZ, L. L.; AMARAL, A. S.; MOSSI, J. A.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Engenharia na Agricultura**, v.19, n.1, 2011.

RADÜNZ, L. L.; MOSSI, J. A.; ZAKRZEWSKI, C. A.; AMARAL, A. S.; GRASSMANN, L. Análise cinética de secagem de folhas de sálvia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p. 979-986, 2010.

REIS, G. G.; SILVA, L. G.; MANCINI, M. C.; CALÇADA, L. A. Secagem de sementes de hortaliças em leito fixo e fluidizado. **XXXI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

ROMANKOV, P. G.; RASHKOVSKAYA, N. B. **Drying in a suspended state**. 2ª Edição Leningrad: Chem. Publ. House, p. 616, 1968.

ROTHENBURG, H. C.; PEREIRA, F. M. **Avaliação dos efeitos da ingestão de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em ratos wistar fêmeas e hipercolesterolêmicos**. 2007. 25 f. Monografia (Bacharelado em Nutrição) - Faculdade Assis Gurgacz, 2007.

SAMPAIO, L. *et al.* Apreciações relativas a dinâmica do leito de jorro cônico convencional e modificado. In: **XII Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos**, Maringá, Pr. 198. Anais do XII ENEMP, Pr., 1984, v. 1, p. 218-235.

SAN JOSE, M. J.; OLAZAR, M.; AGUADO, R. E.; BILBAO, J. Influence of the conical section geometry on the hydrodynamics of shallow spouted. **Chemical Engineer Journal**, v.62, p.113-120, 1996.

SAN JOSÉ, M. J.; OLAZAR, M.; PEÑAS, F. J.; BILBAO, J. Segregation in conical spouted beds with binary and ternary mixtures of equidensity spherical particles. **Ind.Eng. Chem. Res.** 33, 1838-1845, 1994.

SANTOS, D. A.; PETRI JÚNIOR, I.; BARROZO, M. A. S.; DUARTE, C. R. Mixture of particles influence in computer simulations of a spouted bed, In: **Seventh International Latin American Conference on Powder Technology**, Atibaia-SP, Brasil. Anais do XVII PTECH, v. CD ROM, 2009, p. 546-551.

SEED NEWS - A Revista Internacional de sementes. **Benefícios e Obtenção de Sementes de Alta Qualidade**. Ano XIV - n. 5. Reportagem de capa do mês set/out 2010.

SILVA, V. A. **Monitoramento de regimes de contato gás-sólido em leito de jorro cone-cilindro por medidas de queda de pressão em tempo real**. 1998. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1998.

SIMON, D.; CHOPRA, D. **O guia Deepak Chopra de ervas: 40 receitas naturais para uma saúde perfeita**. Rio de Janeiro. Campus, p.157-9, 2001.

SOUZA, U.; ARNOSTI JUNIOR, S.; SARTORI, D.J.M. Drying kinetics of *Brachiaria brizantha* seeds. In: **International Drying Symposium**, 11,1998, Halkidiki, Greece. Proceedings...Greece: A. S. Mujumdar, 1998. Bv., p. 1389-1396.

SRINIVASAKANNAN, C.; BALASUBRAMANIAN, N. Estimation of diffusion parameters in fluidized bed drying. **Advanced Powder Technology**. v. 20, p. 390-394, 2009.

STRUMILLO, C., KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design.** Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers. 1986.

SUTANTO, W.; EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. Hydrodynamics of spout-fluid bed. **Powder technology**, v. 44, p. 205-212, 1985.

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 (Série Poema,7), UFPA/NUMA/PEMA, 1998. p.205-2019.

TOMM, G. O. **Indicações para o cultivo de linho no Rio Grande do Sul.** Guarani das Missões: Giovelli, p.40, 2006.

TRUCOM, C. **O que é a linhaça.** Revista eletrônica: Doce limão: Disponível em: <<http://www.docelimao.com.br/site/linhaca/218-o-que-e-a-linhaca.html>> Acesso em: 19 de Novembro 2010.

TRUCOM, C.. **A importância da linhaça na saúde.** São Paulo: Alaúde, p.151, 2006.

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. n. 2, p.50, 1967.

TURATTI, J. M. Óleos vegetais como fonte de alimentos funcionais. **Óleos e Grãos**, São Caetano do Sul, set./out., n.56, p.20-27, 2000.

VALENTE, M. C. C. **Avaliação das condições de secagem no rendimento e na qualidade do óleo de linhaça (*Linum usitatissimum* L.).** 2011. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

WEBB, P. A.; ORR, C. **Analytical Methods in Fine Particle Technology**, Micromeritics Instrument Corporation, Norcross, USA, 1997.

WEISS, P. J.; MEISEN, A. Laboratory Studies on Sulphur Coating Urea by the Spouted Bed Process, **Can. J. Chem. Eng.** v. 61, p. 440-447, 1983.

WIKIPÉDIA. **Linho**, 2007. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Linho>>. Acesso em: 20 junho 2010.

APÊNDICE A

**DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS PARA OS TRÊS MODELOS MATEMÁTICOS
UTILIZADOS PARA DESCREVER A CINÉTICA DE SECAGEM DAS
SEMENTES DE LINHAÇA (*Linum usitatissimum* L.) EM LEITO DE JORRO**

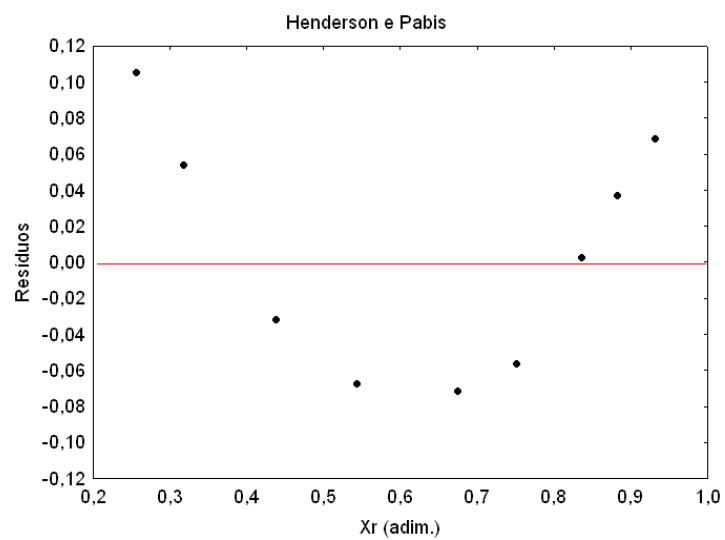
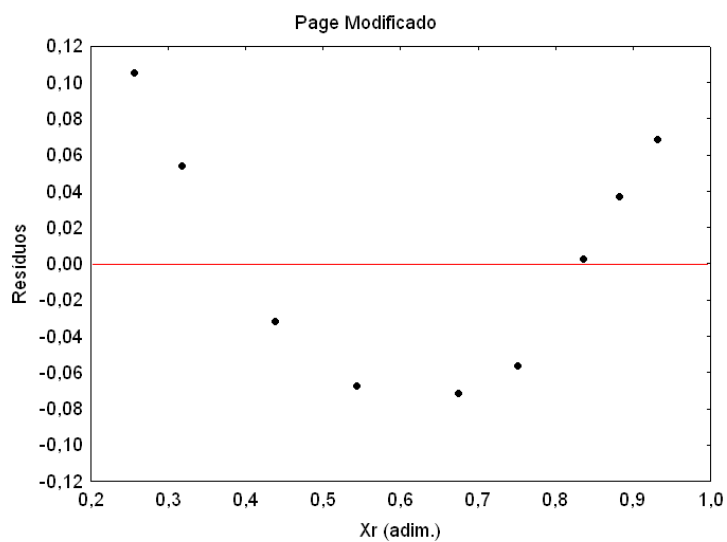
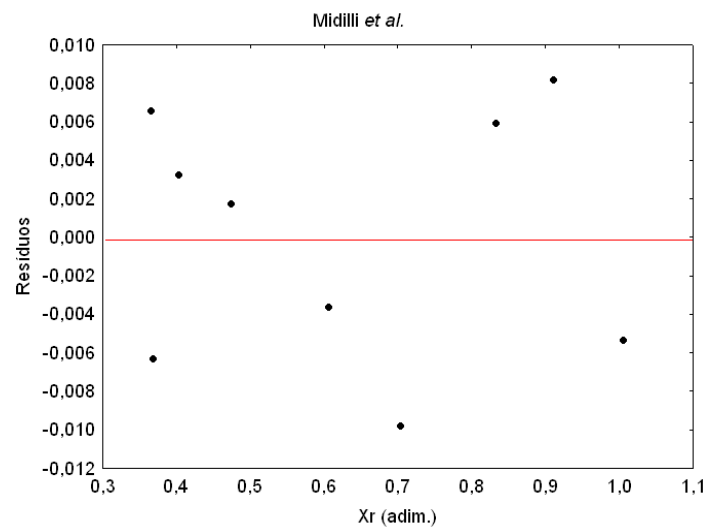


Gráfico A1 - Distribuição dos resíduos da cinética a temperatura de 45 °C

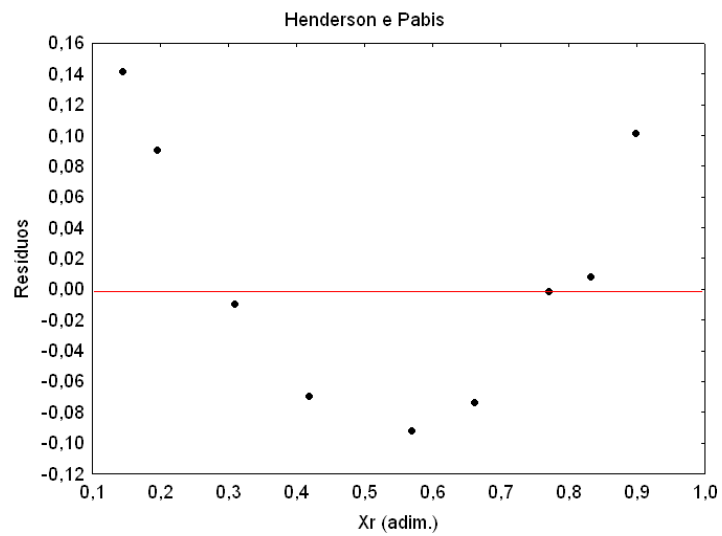
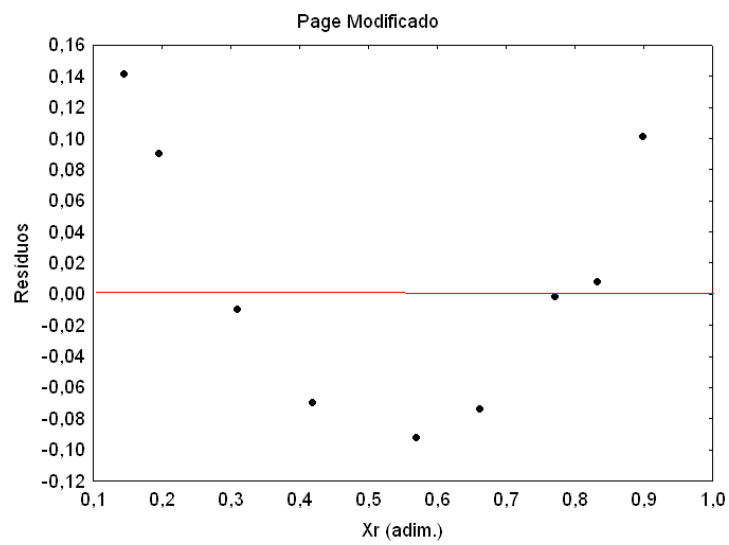
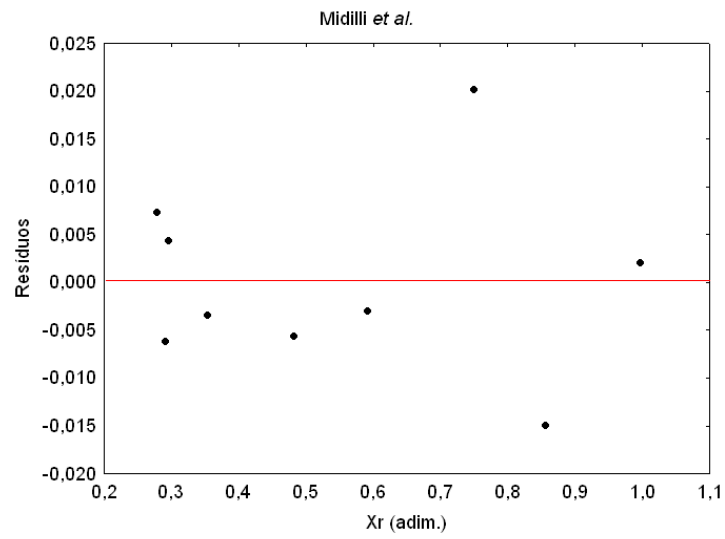


Gráfico A2 - Distribuição dos resíduos da cinética a temperatura de 55 °C

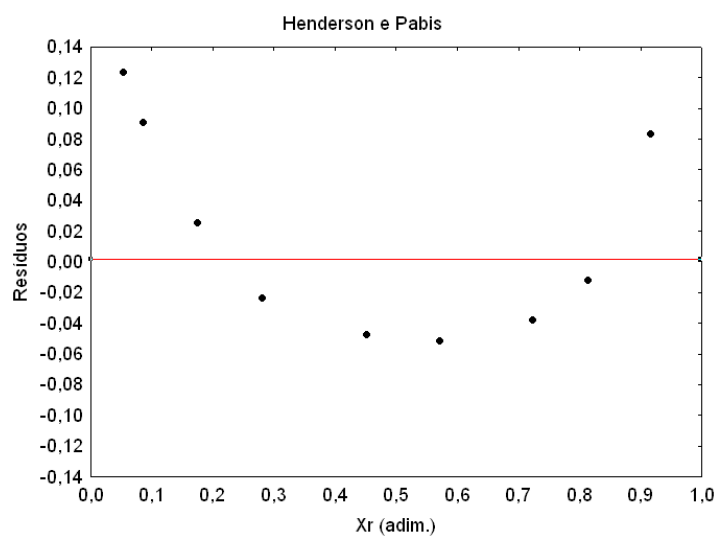
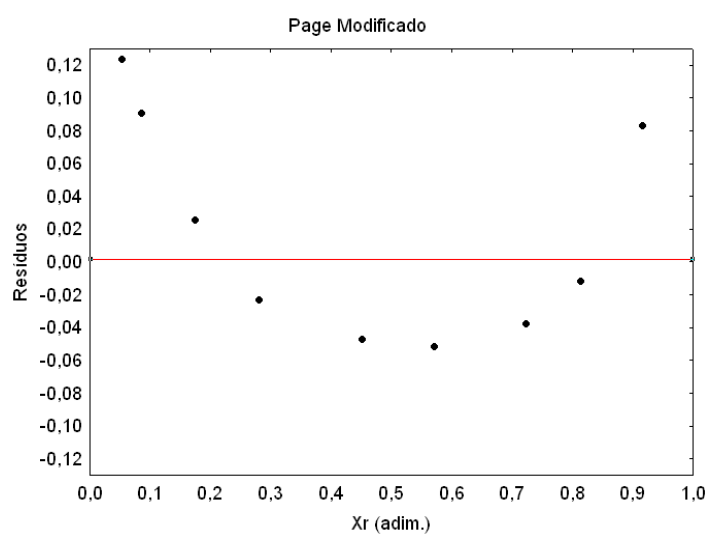
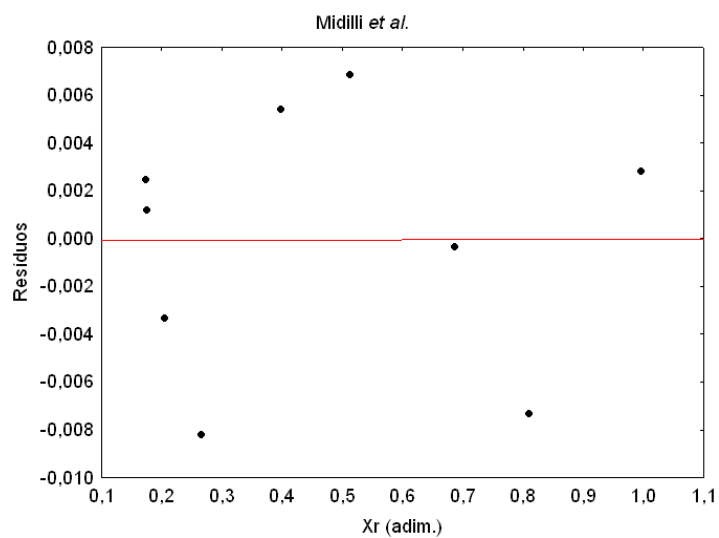


Gráfico A3 - Distribuição dos resíduos da cinética a temperatura de 65 °C

APÊNDICE B

CURVAS FLUIDODINÂMICAS PARA AS TRÊS CARGAS E TEMPERATURAS DE TRABALHO

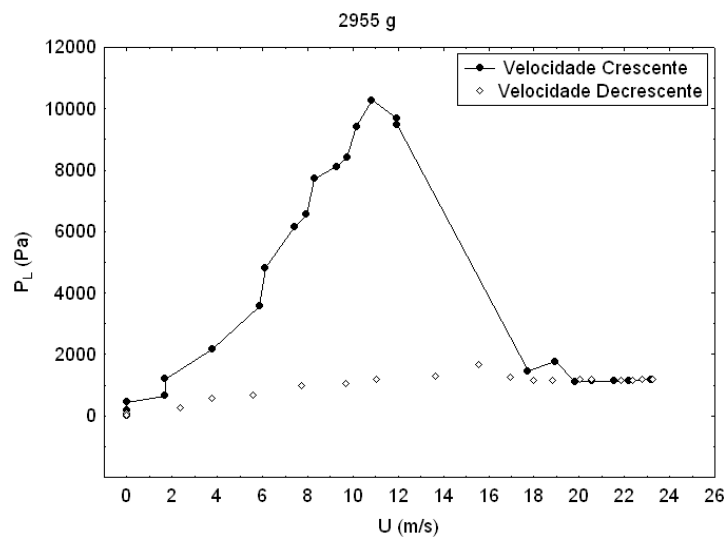
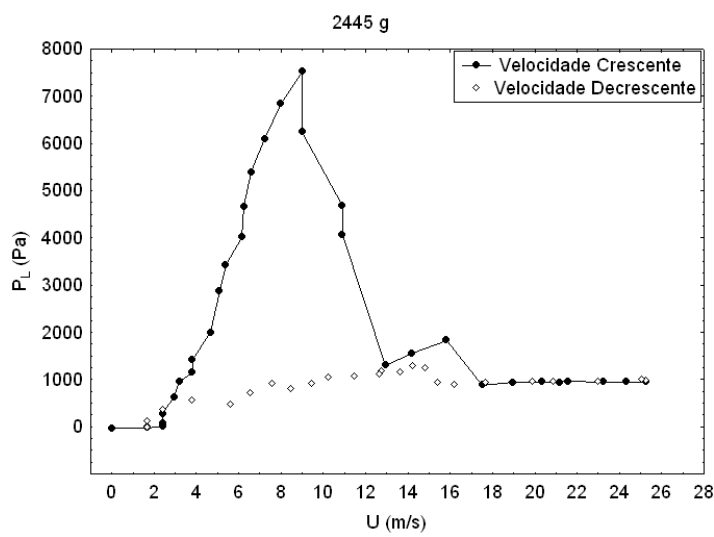
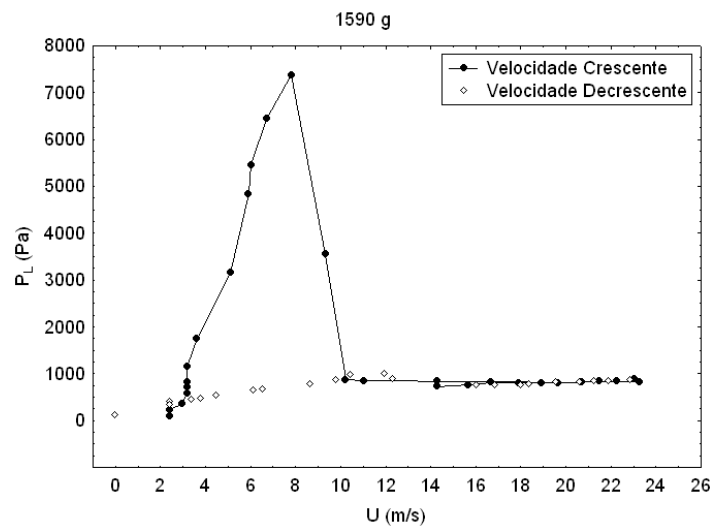


Gráfico B1 - Comportamento fluidodinâmico para a temperatura de 28 °C

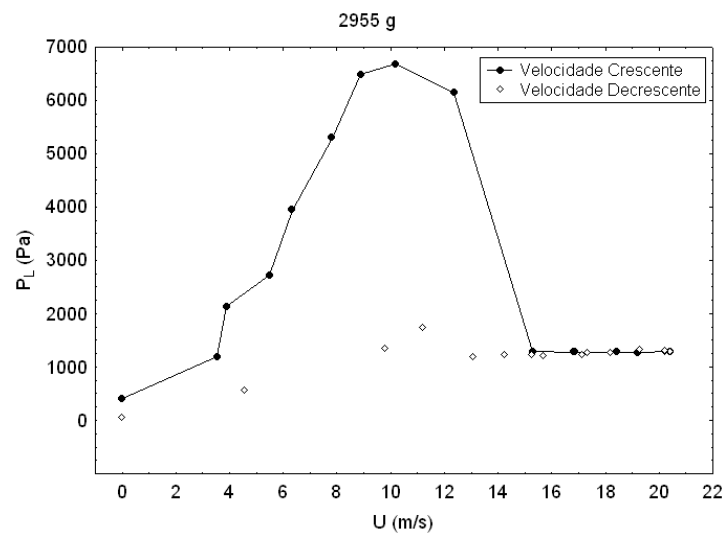
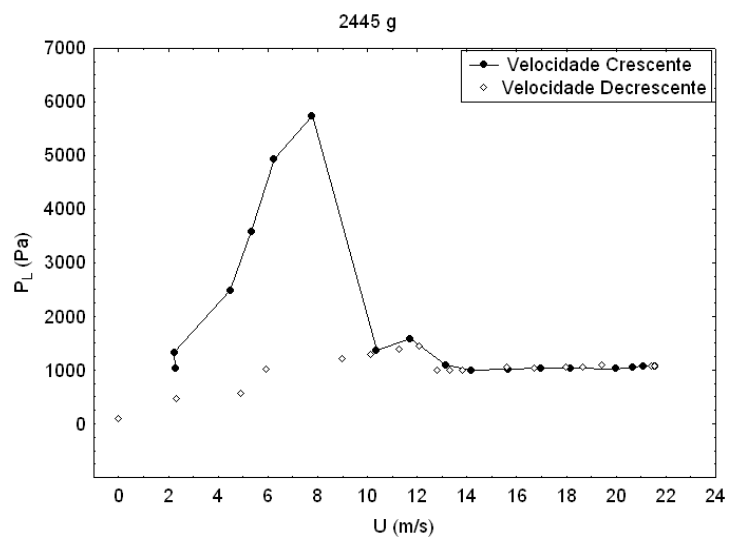
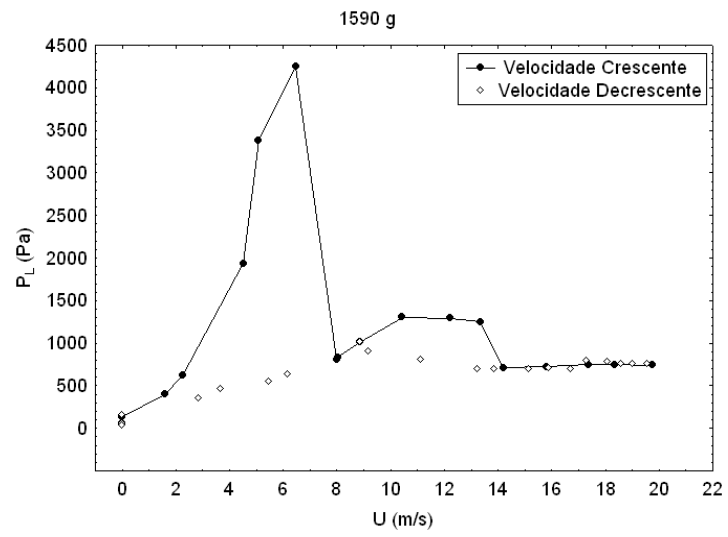


Gráfico B2 - Comportamento fluidodinâmico para a temperatura de 45 °C

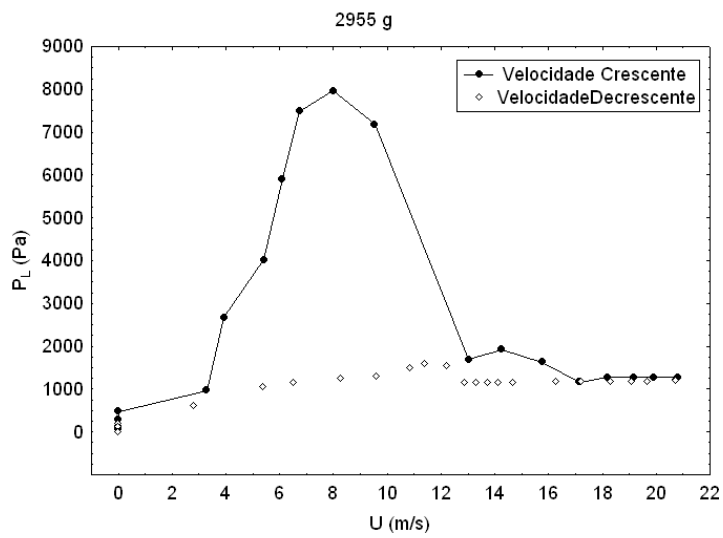
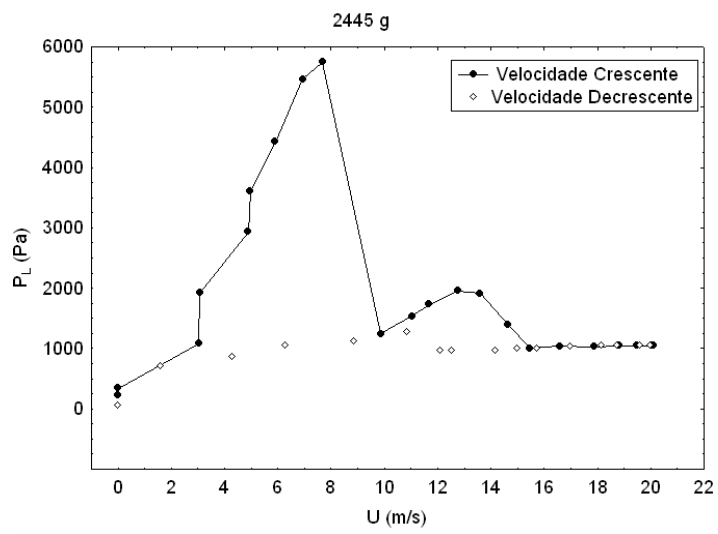
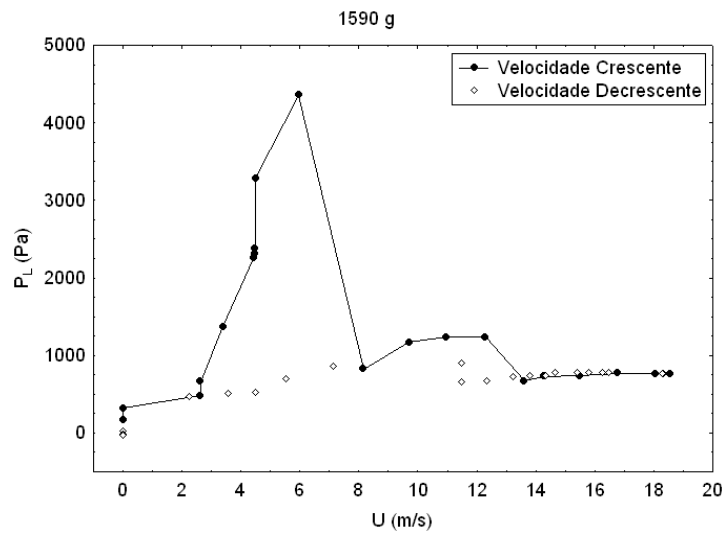


Gráfico B3 - Comportamento fluidodinâmico para a temperatura de 55 °C

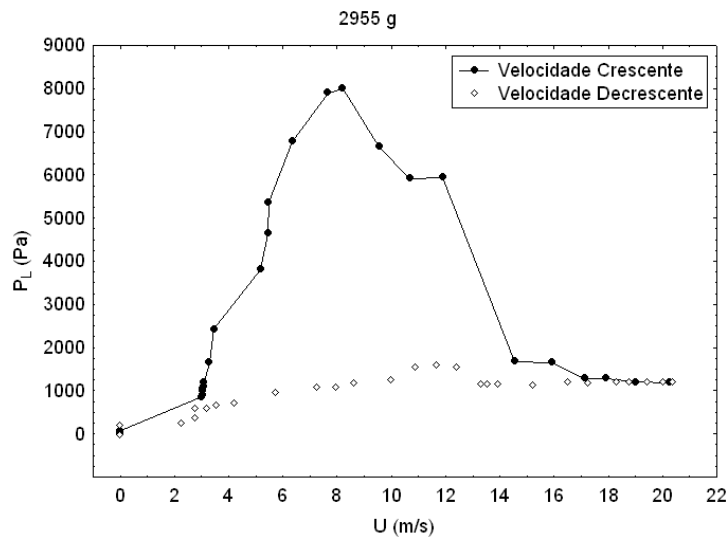
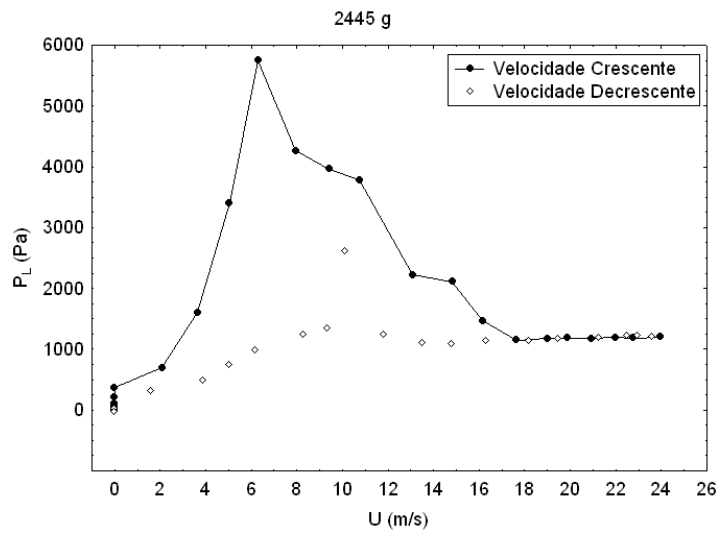
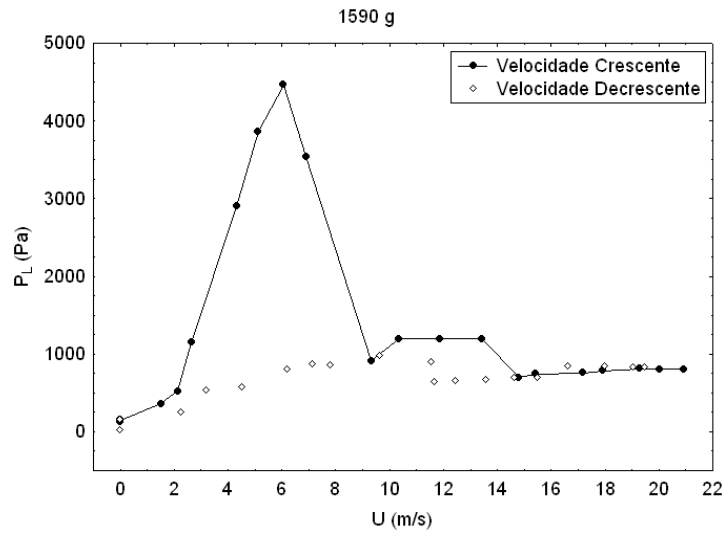


Gráfico B4 - Comportamento fluidodinâmico para a temperatura de 65 °C

APÊNDICE C

**TABELAS DA ANÁLISE DA VARIANCI (ANOVA) PARA OS PARÂMETROS
RAZÃO DE UMIDADE E GERMINAÇÃO, DESCONSIDERANDO A
PRESENÇA DE TERMOS QUADRÁTICOS**

Tabela C1. Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta Razão de umidade

Efeitos	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Probabilidade (Pr)
X ₁	0,007449	1	0,007449	7449,14	0,000134
X ₂	0,000761	1	0,000761	760,57	0,001312
X ₁ X ₂	0,007197	1	0,007197	7196,83	0,000139
Falta de ajuste	0,021801	1	0,021801	21801,19	0,000046
Erro Puro	0,000002	2	0,000001	-	-
Total (Correlação)	0,034710	6	-	-	-

$$R^2 = 0,3718, R_{\text{ajustado}} = 0,00$$

Tabela C2. Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta Germinação

Efeitos	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Probabilidade (Pr)
X ₁	1,04762	1	1,04762	226,104	0,004394
X ₂	30,74292	1	30,74292	6635,162	0,000151
X ₁ X ₂	0,11973	1	0,11973	25,841	0,036588
Falta de ajuste	2,35632	1	2,35632	508,557	0,001961
Erro Puro	0,00927	2	0,00463	-	-
Total (Correlação)	41,37329	6	-	-	-

$$R^2 = 0,9428, R_{\text{ajustado}} = 0,8856$$

Tabela C3. Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta IVG

Efeitos	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Probabilidade (Pr)
X ₁	1,247136	1	1,247136	12471,36	0,000080
X ₂	2,164866	1	2,164866	21648,66	0,000046
X ₁ X ₂	1,989247	1	1,989247	19892,47	0,000050
Falta de ajuste	0,220279	1	0,220279	2202,79	0,000454
Erro Puro	0,000200	2	0,000100	-	-
Total (Correlação)	5,115771	6	-	-	-

$$R^2 = 0,9569, R_{\text{ajustado}} = 0,9138$$

APÊNDICE D

FUNÇÃO DESEJABILIDADE

Akhanazarova e Kafarov (1982) e Barros Neto, Scarminio e Bruns (2007) descrevem a técnica de otimização simultânea denominada “Função desejabilidade”, porém no trabalho desenvolvido por Costa (2003) a técnica é descrita como segue: para cada resposta $\mathbf{Y}_i(\mathbf{x})$, a Função Desejabilidade $\mathbf{d}_i(\mathbf{Y}_i)$ assume números entre 0 e 1 para possíveis valores de \mathbf{Y}_i , com $\mathbf{d}_i(\mathbf{Y}_i) = \mathbf{0}$ representando um valor completamente indesejável e $\mathbf{d}_i(\mathbf{Y}_i) = \mathbf{1}$ representando um valor completamente desejável ou ideal. As desejabilidades individuais são então combinadas utilizando-se a média geométrica, que fornece a desejabilidade global \mathbf{D} :

$$D = \sqrt{d_1(Y_1) \times d_2(Y_2) \times \dots \times d_k(Y_k)} \quad (\text{D1})$$

Em que: \mathbf{k} denota o número de respostas. Se qualquer resposta \mathbf{Y}_i for completamente indesejável ($\mathbf{d}_i(\mathbf{Y}_i) = \mathbf{0}$), então a desejabilidade global é igual a zero. Na prática, os valores ajustados $\hat{\mathbf{Y}}_i$ são usados no lugar de \mathbf{Y}_i .

Dependendo da resposta que se deseja obter, ou seja, se deve ser maximizada, minimizada ou assumido um valor intermediário, diferentes tipos de funções desejabilidade podem ser utilizadas. O programa *Statistica*TM 7.0, utiliza uma classe de funções desejabilidade proposta por Derringer e Suich (1980), que é baseada no seguinte princípio: seja \mathbf{I}_i , \mathbf{S}_i e \mathbf{M}_i , os valores inferior, superior e mediano, respectivamente, os quais são desejados para a resposta \mathbf{Y}_i , com $\mathbf{I}_i \leq \mathbf{M}_i \leq \mathbf{S}_i$.

Se a resposta é do tipo mediana, então sua função desejabilidade individual é

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) < I_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - I_i}{M_i - I_i}\right)^s & \text{se } I_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq M_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - S_i}{M_i - S_i}\right)^t & \text{se } I_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq M_i \\ 0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) > S_i \end{cases} \quad \text{D2}$$

Os expoentes \mathbf{s} e \mathbf{t} determinam a importância da função para encontrar o valor médio desejado. Para $\mathbf{s} = \mathbf{t} = \mathbf{1}$, a função desejabilidade aumenta linearmente com \mathbf{M}_i ; para $\mathbf{s} < \mathbf{1}$, $\mathbf{t} < \mathbf{1}$, a função é convexa; e para $\mathbf{s} > \mathbf{1}$, $\mathbf{t} > \mathbf{1}$, a função é côncava.

Se a resposta deve ser maximizada, a desejabilidade individual é definida da seguinte forma:

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) < I_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - I_i}{M_i - I_i}\right)^s & \text{se } I_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq M_i \\ 1,0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) > M_i \end{cases} \quad (\text{D3})$$

Em que \mathbf{M}_i , neste caso, é interpretado como um valor suficientemente grande para a resposta.

Finalmente, para minimizar a resposta, utiliza-se a seguinte definição:

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 1,0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) < M_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - S_i}{M_i - S_i}\right)^s & \text{se } M_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq S_i \\ 0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) > S_i \end{cases} \quad (\text{D4})$$

A desejabilidade, portanto, consiste em três etapas: primeiro, conduzir os experimentos e ajustar as respostas dos modelos para todas as \mathbf{k} respostas; segundo, definir as funções desejabilidade individuais para cada resposta; e por último, maximizar a desejabilidade global \mathbf{D} , em relação aos fatores controlados.

Segundo Akhanazarova e Kafarov (1982), os valores numéricos de d e D e seus respectivos conceitos de qualidade, podem ser classificados de acordo com os índices sumarizados na Tabela D1.

Tabela D1. Valores escalonados de d ou D

Valores d ou D (desejabilidade)	Descrição da resposta (qualidade equivalente)
0,80 a 1,00	aceitável e excelente
0,62 a 0,80	aceitável e bom
0,37 a 0,63	Aceitável porém pobre
0,20 a 0,37	valor limite
0,00 a 0,20	Inaceitável

Fonte: Akhanazarova e Kafarov (1982)