



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

LIDIANE DINIZ DO NASCIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO, ANÁLISE FLUIDODINÂMICA E SECAGEM DE SEMENTES  
DE PAINÇO EM LEITO DE JORRO**

BELÉM

2014

LIDIANE DINIZ DO NASCIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO, ANÁLISE FLUIDODINÂMICA E SECAGEM DE SEMENTES  
DE PAINÇO EM LEITO DE JORRO**

Dissertação de Mestrado 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

AREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Lênio José Guerreiro de Faria.  
ORIENTADORA: Profa. Dra. Cristiane Maria Leal Costa

BELÉM

2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

---

Nascimento, Lidiane Diniz do  
Caracterização, análise fluidodinâmica e secagem de  
sementes de painço em leito de jorro / Lidiane Diniz do  
Nascimento.- 2014.

Orientador: Lênio José Guerreiro de Faria;  
Coorientadora:Cristiane Maria Leal Costa.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará.  
Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química, 2014

1.Secagem 2.Semente- secagem 3.Painço 4.Fluidização  
I. Título

CDD 22.ed.660.28426

---

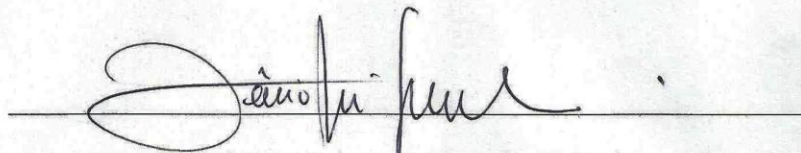
LIDIANE DINIZ DO NASCIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO, ANÁLISE FLUIDODINÂMICA E SECAGEM DE  
SEMENTES DE PAINÇO EM LEITO DE JORRO**

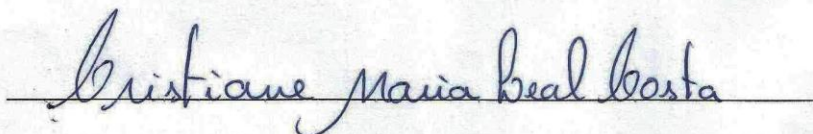
Data da avaliação: 16/05/2014

Conceito: APROVADA

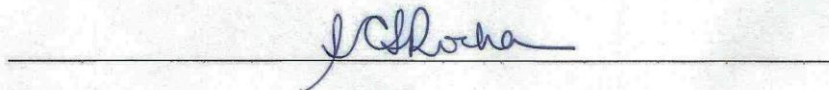
BANCA EXAMINADORA



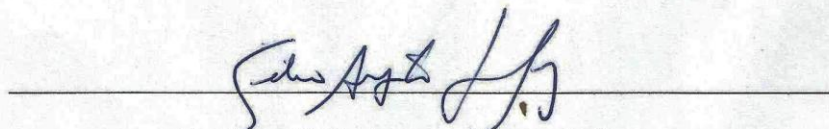
Prof. Dr. Lênio José Guerreiro de Faria  
(FEQ/ ITEC/ UFPA – Orientador)



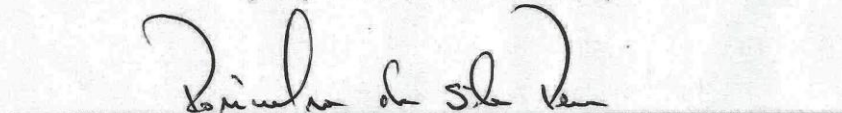
Profa. Dra. Cristiane Maria Leal Costa  
(FEQ/ ITEC/ UFPA – Orientadora)



Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha  
(DEPro/FEQ/UNICAMP – Membro)



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



Prof. Dr. Rosinelson da Silva Pena  
(FEA/ ITEC/ UFPA – Membro)

## DEDICATÓRIA

*Dedico  
este trabalho aos meus pais,  
meu irmão e meu noivo ,  
os quais são fundamentais em minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meus caminhos, pensamentos e me conceder tantas graças, sobretudo durante estes dois anos de desenvolvimento do Mestrado.

Aos meus pais, que me concederam meios para que eu pudesse ir em busca dos meus objetivos, apoiando e incentivando todas as etapas de minha vida.

Ao meu noivo Kauê Santana pelo incentivo, companheirismo e carinho dedicados.

Ao meu irmão Luciano pelos conselhos, longas conversas e paciência durante todos esses anos.

Aos meus orientadores, professores Cristiane Costa e Lênio Faria, pelo conhecimento compartilhado, apoio e compreensão, os quais foram fundamentais durante o decorrer deste Mestrado. Agradeço a vocês pela oportunidade de fazer parte desse Projeto.

À professora Sandra Rocha, que me recebeu durante o desenvolvimento desse projeto, me auxiliando em tudo que foi preciso e me concedendo momentos de descontração, os quais foram imprescindíveis para aliviar a saudade de casa.

Aos amigos do Laboratório (LSRP / UFPA), Elza, Maria, Érika, Rosilene e Elisângela, pelos momentos de estudo e bagunça (aniversários e festinhas), e em especial à Lorena Corumbá, pela amizade e apoio nos estudos experimentais.

Agradeço também aos amigos que fiz no (LSF/UNICAMP), os quais se dispuseram no que foi preciso.

Agradeço ao CNPq pela bolsa concedida e pelo apoio financeiro, assim como à UFPA e UNICAMP, pela infraestrutura disponibilizada.

Enfim, agradeço a todos que sempre acreditaram e apoiaram meus objetivos e me ajudaram a trilhar de maneira correta e responsável um caminho na vida.

*“Nem tudo é como você quer  
Nem tudo pode ser perfeito  
Pode ser fácil se você  
Ver o mundo de outro jeito...”*

*Dinho Ouro Preto e Alvin L*

## RESUMO

Realizou-se a caracterização química, física e qualitativa das sementes de painço (*S. italica*) e em seguida, foi avaliado o comportamento fluidodinâmico, à temperatura ambiente, para diferentes cargas de material em duas configurações de leito de jorro: cônico (500, 800, 1100 e 1400 g) e convencional (1300, 1700 e 2100 g). A partir dos dados experimentais foi verificado que as partículas eram adequadas ao sistema utilizado, partindo então para a obtenção dos parâmetros operacionais característicos do jorro, os quais foram comparados com seus respectivos valores teóricos calculados por correlações empíricas disponíveis na literatura. Ao avaliar as condições experimentais, foi necessário optar por apenas uma das configurações de leito de jorro, prevalecendo o leito convencional. Em seguida, foi definida uma carga ótima de painço (1700 g) e deu-se prosseguimento à análise da cinética de secagem das sementes em leito de jorro convencional nas temperaturas de 44, 65 e 86°C por 132 min, verificando-se a ausência de taxa de secagem constante, indicando que a secagem foi controlada pelos mecanismos de difusão. O coeficiente de difusão efetivo das sementes de painço correspondeu a valores entre  $0,7729 \times 10^{-11}$  e  $2,3189 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s e o valor de energia de ativação foi quantificado por meio da equação de Arrhenius, correspondendo à 24,86 kJ/mol. Os modelos matemáticos que melhor descreveram a curva de secagem foram Aproximação por Difusão, Page e Midilli et al. Além disso, foi aplicado um planejamento composto central rotacional com o objetivo de avaliar a influência das variáveis independentes tempo ( $X_1$ ) e temperatura ( $X_2$ ) nas respostas razão de umidade ( $X_R$ ), porcentagem de germinação (G) e índice de velocidade de germinação (IVG). As respostas selecionadas são determinantes no controle de qualidade de sementes, como no caso do teor de umidade, o qual deve ser adequado para o armazenamento. As respostas G e IVG são indicações do estado fisiológico da sementes, o que também é importante, de acordo com a finalidade do produto. Por meio das análises estatísticas, para um intervalo de confiança de 95%, verificou-se que  $X_R$  e IVG sofreram influência apenas de  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_2^2$ , enquanto G foi estatisticamente influenciado por  $X_2$  e  $X_2^2$ . Os efeitos, para todas as respostas, foram negativos, indicando que  $X_R$  e IVG decrescem com o aumento da temperatura e tempo de secagem enquanto G reduz com o aumento da temperatura. Por meio dos resultados estatísticos, foram propostos modelos quadráticos para as respostas analisadas, alcançando-se bons coeficientes de correlação ( $R^2$ ): 0,9632 ( $X_R$ ), 0,8999 (G) e 0,9724 (IVG). Posteriormente, foi determinado o ponto ótimo durante a secagem de sementes de painço em leito de jorro, por meio da Função desejabilidade, o qual foi correspondente a um tempo de secagem de 121 min à uma temperatura de 64°C, obtendo-se sementes com um percentual germinativo de 82,99% ; índice de velocidade de germinação de 29,33 (adimensional) e teor de umidade final igual a 11%.



## ABSTRACT

*S. italica* seeds were analyzed in chemical, physical and qualitative aspects and then the fluidynamics was evaluated at ambient temperature, for different loads of material in two spouted bed configurations: conical (500, 800, 1100 and 1400 g ) and conventional ( 1300, 1700 and 2100 g). From the experimental data it was found that the particles were suitable for the system used, so the operating parameters of the spouted bed were collected , which were compared with their theoretical values calculated by empirical correlations available in literature. According to experimental conditions, it was necessary to choose only one of the configurations of spouted bed, so it was decided to operate the conventional spouted bed. For the seed drying kinetics only the optimal load (1700g) was utilized and the temperatures used were 44 , 65 and 86 °C, verifying the absence of constant drying rate, indicating that drying was controlled by diffusion mechanisms. The effective moisture diffusivity was estimated, resulting in the range from  $0.7729 \times 10^{-11}$  to  $2.3189 \times 10^{-11}$  and the relationship between the temperature and the effective moisture diffusivity was described by Arrhenius equation, providing an activation energy of 24,86 kJ/mol. The mathematical models that best described the drying curve were Diffusion Approximation, Page and Midilli et al. Furthermore, a rotational central composite design was applied with the objective of evaluating the influence of the independent variables time ( $X_1$ ) and temperature ( $X_2$ ) on the responses moisture ratio ( $X_R$ ), germination (G) and speed germination index (SGI) . The chosen answers are necessities in the seeds quality control, as in the case of the moisture content during the storage. The G and SGI responses are indicative of the physiological state of the seeds, which are also important, in accordance with the purpose of the product. Through statistical analysis, for a confidence interval of 95%, it was found that  $X_R$  and SGI were influenced only by  $X_1$ ,  $X_2$  and  $X_2^2$  , while G was statistically affected by  $X_2$  and  $X_2^2$  . The effects for all responses were negative , indicating that SGI and  $X_R$  decrease with increasing of temperature and drying time. The answer G decreases with increasing of temperature. Quadratic models were proposed by the statistical analyzes, reaching good correlation coefficients ( $R^2$ ); 0.9632 ( $X_R$ ), 0.8998 (G) and 0.9724 (SGI). Then, the optimal value of the foxtail millet drying process was determined, using the concept of Desirability Function, which was corresponding to a drying time of 121 min at a temperature of 64 ° C, getting seeds with 82.99% of germination; speed germination index of 29.33 (dimensionless) and final moisture content of 11%.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

		p
Desenho 2.1 -	Ilustração da espiguetta e semente de <i>S. italica</i> .....	24
Gráfico 2.1 -	Diagrama de Geldart (1973).....	28
Desenho 2.2 -	Esquema do leito de jorro.....	29
Desenho 2.3 -	Transição dos regimes devido ao aumento do fluxo de gás..	30
Gráfico 2.2 -	Curva característica de um leito de jorro.....	32
Desenho 2.4 -	Representação esquemática do leito de jorro cônico.....	37
Gráfico 2.3 -	Curva de secagem típica em condições constantes de secagem.....	43
Fotografia 3.1 -	Sementes de painço <i>in natura</i> .....	56
Desenho 3.1 -	Configuração do leito usado como cônico.....	63
Desenho 3.2 -	Esquema do sistema experimental (leito de jorro cônico)....	64
Desenho 3.3 -	Configuração do leito de jorro convencional.....	66
Desenho 3.4 -	Esquema do sistema experimental utilizado (leito de jorro convencional).....	67
Fotografia 4.1 -	Teste de germinação com sementes de painço.....	81
Fotografia 4.2 -	Análise de MEV das sementes de painço.....	83
Gráfico 4.1 -	Classificação das sementes de painço pelo Diagrama de Geldart.....	83
Gráfico 4.2 -	Comportamento fluidodinâmicos em função do aumento da velocidade do ar para as diferentes cargas analisadas em leito cônico.....	84
Gráfico 4.3 -	Comportamento fluidodinâmico em função da diminuição da velocidade do ar para as diferentes cargas analisadas, em leito cônico.....	85
Gráfico 4.4 -	Comportamento fluidodinâmico em função do aumento de velocidade do ar para as diferentes cargas analisadas, em leito convencional.....	88

Gráfico 4.5 -	Comportamento fluidodinâmico em função da diminuição da velocidade do ar para as diferentes cargas analisadas, em leito convencional.....	89
Gráfico 4.6 -	Comportamento fluidodinâmico para a carga de sementes de 1700g.....	93
Gráfico 4.7 -	Comportamento da cinética de secagem das sementes de painço em leito de jorro.....	94
Gráfico 4.8 -	Curvas de secagem nas diferentes temperaturas ajustadas ao modelo de Aproximação por Difusão (1980).....	96
Gráfico 4.9 -	Representação de Arrhenius para a relação entre a difusividade efetiva ( $D_{eff}$ ) e a temperatura absoluta na secagem de sementes de painço.....	98
Gráfico 4.10 -	Diagrama de Pareto para a variável de resposta $X_R$ .....	100
Gráfico 4.11 -	Gráfico normal dos resíduos para $X_R$ em função do modelo reduzido.....	103
Gráfico 4.12 -	Superfície de resposta para $X_R$ .....	104
Gráfico 4.13 -	Curvas de nível para $X_R$ .....	104
Gráfico 4.14 -	Diagrama de Pareto para a variável de resposta $G$ .....	106
Gráfico 4.15 -	Gráfico normal dos resíduos para a resposta germinação.....	108
Gráfico 4.16 -	Superfície de resposta para $G$ .....	109
Gráfico 4.17 -	Curvas de nível para $G$ .....	109
Gráfico 4.18 -	Diagrama de Pareto para a variável de resposta $IVG$ .....	110
Gráfico 4.19 -	Gráfico normal dos resíduos para $IVG$ em função do modelo reduzido.....	113
Gráfico 4.20 -	Superfície de resposta para a variável $IVG$ .....	113
Gráfico 4.21 -	Curvas de nível para $IVG$ .....	114
Figura 4.1 -	Perfis para os valores preditos e a função desejabilidade.....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Composição centesimal da semente de painço.....	25
Tabela 2.2 -	Classificação de partículas de acordo com Geldart (1973)...	27
Tabela 2.3 -	Correlações empíricas para a velocidade de jorro mínimo...	38
Tabela 2.4 -	Correlações empíricas para a queda de pressão máxima.....	39
Tabela 2.5 -	Correlações empíricas para a queda de pressão no jorro estável.....	40
Tabela 2.6 -	Modelos de regressão não linear para avaliar a secagem.....	45
Tabela 2.7 -	Matriz codificada para um PCCR com 12 ensaios.....	51
Tabela 2.8 -	Valores escalonados de $D_G$ .....	54
Tabela 3.1 -	Comportamento de escoabilidade de sólidos em relação ao ângulo de repouso.....	60
Tabela 3.2 -	Correlações empíricas para a velocidade de jorro mínimo....	68
Tabela 3.3 -	Correlações empíricas para a queda de pressão máxima.....	69
Tabela 3.4 -	Correlações empíricas para a queda de pressão no jorro estável.....	70
Tabela 3.5 -	Modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem.....	74
Tabela 3.6 -	Valores codificados e originais para as variáveis utilizadas no PCCR.....	76
Tabela 3.7 -	Matriz de experimentos.....	77
Tabela 4.1 -	Composição centesimal das sementes de painço <i>in natura</i> ..	79
Tabela 4.2 -	Características qualitativas das sementes de painço <i>in natura</i> .....	80
Tabela 4.3 -	Caracterização física das sementes <i>in natura</i> .....	82
Tabela 4.4	Parâmetros fluidodinâmicos experimentais obtidos em leito de jorro cônico.....	86
Tabela 4.5 -	Parâmetros experimentais e teóricos de $U_{jm}$ para o leito de jorro cônico.....	86

Tabela 4.6 -	Resultados para queda de pressão máxima no leito cônico..	86
Tabela 4.7 -	Resultados para a queda de pressão no jorro estável em leito cônico.....	87
Tabela 4.8 -	Parâmetros fluidodinâmicos experimentais obtidos em leito de jorro convencional.....	89
Tabela 4.9 -	Parâmetros experimentais e teóricos de $U_{jm}$ para o leito de jorro convencional.....	90
Tabela 4.10 -	Resultados para queda de pressão máxima no leito convencional.....	91
Tabela 4.11 -	Resultados para a queda de pressão no jorro estável em leito convencional.....	92
Tabela 4.12	Parâmetros dos modelos aplicados aos dados das análises experimentais das curvas de cinética em leito de jorro.....	95
Tabela 4.13 -	Valores de difusividade efetiva ( $D_{eff}$ ) das sementes de painço em função da temperatura de secagem.....	97
Tabela 4.14 -	Matriz de Experimentos e os resultados experimentais para a secagem das sementes de painço em leito de jorro convencional.....	99
Tabela 4.15 -	Efeitos estimados para a variável de resposta razão de umidade ( $X_R$ ).....	100
Tabela 4.16 -	ANOVA para a variável de resposta razão de umidade ( $X_R$ )	101
Tabela 4.17 -	Coeficientes de regressão para a resposta razão de umidade	102
Tabela 4.18 -	ANOVA para a variável de resposta $X_R$ para a obtenção do modelo reduzido .....	103
Tabela 4.19 -	Efeitos estimados para a variável de resposta germinação ( $G$ ).....	105
Tabela 4.20 -	ANOVA para a variável de resposta germinação ( $G$ ).....	107
Tabela 4.21 -	Coeficientes de regressão para a resposta germinação.....	107
Tabela 4.22 -	Efeitos estimados para a variável de resposta índice de velocidade de germinação (IVG).....	110
Tabela 4.23 -	ANOVA para a variável de resposta índice de velocidade de germinação (IVG).....	111
Tabela 4.24 -	Coeficientes de regressão para a resposta índice de velocidade de germinação.....	111
Tabela 4.25 -	ANOVA para a variável de resposta IVG para a obtenção do modelo reduzido.....	112
Tabela 4.26 -	Parâmetros utilizados na otimização das respostas do processo de secagem.....	115

## ABREVIATURAS E SIGLAS

adim.	Adimensional
b.s.	base seca
FEQ	Faculdade de Engenharia Química
LFS	Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem
LSRP	Laboratório de Secagem e Recobrimento de Partículas
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
(RAS)	Regras para Análise de Sementes
PCCR	Planejamento composto central rotacional
UFPA	Universidade Federal do Pará
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
USA	United States of America

## SÍMBOLOS

$\theta$	Ângulo do cone (°)
$\emptyset$	Fator de forma
$\rho_{ap}$	Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{abs}$	Massa específica real (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_b$	Densidade <i>bulk</i> (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_p$	Massa específica da partícula (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_f$	Massa específica do ar (kg/m <sup>3</sup> )
$\mu$	Viscosidade do fluido kg/m.s
$\varepsilon_0$	Porosidade inicial do leito (adimensional)
$\varepsilon_l$	Porosidade do leito de partículas (adimensional)
$\varepsilon_p$	Porosidade da partícula (adimensional)
$\Delta P_{máx}$	Queda de pressão máxima (Pa)
$\Delta P_{PO}$ :	Queda de pressão na placa de orifício (cmH <sub>2</sub> O)
$\Delta P_S$	Queda de pressão estável (Pa)
Ar	Número de Arquimedes (adim.)
$d_f$	Graus de liberdade
$d_p$	Diâmetro da partícula (m)
$d_p^*$	Diâmetro adimensional da partícula
$dP/dZ$	Variação de pressão por unidade de comprimento
D	Desvio médio relativo
$D_0$	Diâmetro do fundo do leito cônico (m)
$D_b$	Diâmetro da superfície do leito (m)
$D_c$	Diâmetro da coluna (m)
$D_i$	Diâmetro de entrada do gás (m)
$D_G$	Desejabilidade global (adimensional)
$e$	Erro padrão da estimativa
$g$	Aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )
F	Estatística de Fisher (adimensional)
G	Porcentagem de germinação (%)
$G_1, G_2, G_n$	São o número de plântulas normais à primeira, segunda e à enésima contagem
H	Altura do leito estático (m)
IVG	Índice de velocidade de germinação (adimensional)
k	Número de variáveis dependentes (respostas)
k'	Número de variáveis independentes
m(t)	variação da massa de sólidos durante o processo em função do tempo
$m_{ss}$	massa de sólidos secos obtida em 24h
N	Número de experimentos
$N_1, N_2, N_3$	Número de dias da semeadura à primeira, à segunda e à enésima contagem
P	Índice descritivo (probabilidade de significância)
$P_{est}$	Pressão estática a montante da placa de orifício (cmH <sub>2</sub> O)

$R$	Indicativo de resíduo (aleatório ou tendencioso)
$R^2$	Coefficiente de determinação múltipla
$Re$	Número de Reynolds (adimensional)
$t$	Tempo (min)
$T$	Temperatura (°C)
$T_{ar}$	Temperatura do ar na entrada do orifício (°C)
$U^*$	Velocidade adimensional
$U_{mf}$	Velocidade de mínima fluidização (m/s)
$U_{jm}$	Velocidade de jorro mínimo (m/s)
$W_{ar}$	Vazão mássica (kg/min)
$X_1$ e $X_2$	Variáveis codificadas (adim.)
$X_{bs}$	Teor de umidade em base seca
$X_e$	Teor de umidade de equilíbrio
$X_i$	Umidade inicial da amostra
$X_R$	Razão de umidade ou teor de umidade (adimensional)
$X(t)$	Umidade da amostra em função do tempo
$Y$	Valor experimental
$Y'$	Valor predito



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
1.1 OBJETIVOS.....	22
<b>1.1.1 Gerais.....</b>	<b>22</b>
<b>1.1.2 Específicos .....</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>24</b>
2.1 PAINÇO ( <i>Setaria italica</i> ).....	24
<b>2.1.1 Descrição botânica.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1.2 Aspectos gerais: importância e aplicações.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 LEITO DE JORRO.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.1 Avaliação preliminar da partícula: classificação e regimes fluidodinâmicos.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2 Conceitos.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.3 Histórico e aplicações.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.4 Mecanismo fluidodinâmico.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.5 Parâmetros operacionais do leito de jorro .....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.6 Condições geométricas para operação estável no leito de jorro convencional .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.7 Leito de jorro cônico.....</b>	<b>35</b>
2.2.7.1 Aplicação.....	36
2.2.7.2 Condições geométricas para operação estável .....	36
<b>2.2.8 Correlações empíricas.....</b>	<b>37</b>
2.3 SECAGEM.....	40
<b>2.3.1 Conceitos e importância.....</b>	<b>40</b>
<b>2.3.2 Secagem em leito de jorro.....</b>	<b>42</b>
<b>2.3.3 Cinética de Secagem .....</b>	<b>42</b>
<b>2.3.4 Modelos para a avaliação da cinética de secagem.....</b>	<b>44</b>
<b>2.3.5 Período de taxa decrescente durante a secagem .....</b>	<b>46</b>
2.4 SEMENTES .....	47
<b>2.4.1 Qualidade das sementes.....</b>	<b>47</b>
2.4.1.1 Germinação.....	48
2.4.1.2 Vigor.....	48
<b>2.4.2 Secagem de Sementes.....</b>	<b>49</b>
2.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	50

2.5.1 Planejamento composto central rotacional (PCCR).....	50
2.5.2 Metodologia de Superfície de Resposta .....	51
2.5.3 Otimização de processos: Função Desejabilidade .....	51
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>56</b>
3.1 MATERIAL.....	56
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO – QUÍMICA.....	56
3.2.1 Teor de umidade .....	57
3.2.2 Resíduo Mineral de Fixo.....	57
3.2.3 Lipídios.....	57
3.2.4 Proteína Total.....	57
3.2.5 Carboidratos e Fibras.....	57
3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	58
3.3.1 Diâmetro médio equivalente .....	58
3.3.2 Massa específica absoluta.....	58
3.3.3 Massa específica aparente da partícula .....	58
3.3.4 Densidade <i>bulk</i> .....	59
3.3.5 Porosidade .....	59
3.3.6 Fator de forma .....	59
3.3.7 Ângulo de repouso.....	60
3.3.8 Classificação de Geldart.....	61
3.3.9 Análise de superfície.....	61
3.4 CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA.....	61
3.4.1 Pureza .....	61
3.4.2 Peso de mil sementes.....	61
3.4.3 Germinação e Índice velocidade de germinação .....	62
3.5 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL.....	62
3.5.1 Caracterizações preliminares.....	62
3.5.2 Fluidodinâmica em leito de jorro cônico.....	63
3.5.3 Fluidodinâmica em leito de jorro convencional.....	65
3.5.4 Parâmetros fluidodinâmicos .....	67
3.5.5 Análise da dinâmica nos dois leitos de jorro.....	71
3.6 SECAGEM EM LEITO DE JORRO CONVENCIONAL.....	71
3.6.1 Umidificação.....	71
3.6.2 Operação, condições e coleta de dados durante a cinética de secagem....	72
3.6.3 Construção das curvas de cinética de secagem.....	73

<b>3.6.4 Determinação do coeficiente efetivo de difusão e da energia de ativação</b>	74
3.7 PROJETO EXPERIMENTAL.....	75
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	79
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO - QUÍMICA .....	79
4.2 CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA.....	80
4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	81
4.4 ANÁLISE FLUIDODINÂMICA .....	83
<b>4.4.1 Leito cônico: determinação dos parâmetros experimentais e teóricos.....</b>	84
<b>4.4.2 Leito de jorro convencional: determinação dos parâmetros experimentais e teóricos.....</b>	88
<b>4.4.3 Análise dos resultados: comparação entre os leitos e tomada de decisão</b>	92
4.5 CARACTERÍSTICAS DA CINÉTICA DE SECAGEM.....	93
4.6 AVALIAÇÃO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	98
<b>4.6.1 Análise da variável <math>X_R</math> (razão de umidade).....</b>	99
4.6.1.1 Superfície de resposta e curvas de nível para $X_R$ .....	104
<b>4.6.2 Análise da variável G (porcentagem de germinação).....</b>	105
4.6.2.1 Superfície de resposta e curvas de nível para G .....	108
<b>4.6.3 Análise da variável IVG (índice de velocidade de germinação).....</b>	109
4.6.3.1 Superfície de resposta e curvas de nível para IVG .....	113
<b>4.6.4 Otimização das variáveis independentes .....</b>	114
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....</b>	118
5.1 CONCLUSÃO.....	118
5.2 SUGESTÕES.....	120
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	121
<b>APÊNDICE A .....</b>	133
<b>APÊNDICE B .....</b>	135
<b>APÊNDICE C .....</b>	137
<b>APÊNDICE D .....</b>	139

---

# Capítulo 1

## Introdução e Objetivos

---

## INTRODUÇÃO

O painço (*Setaria italica*) é classificado como forrageira, sendo uma das espécies pertencentes ao seu gênero com maior potencial econômico (PROTA, 2013). É utilizado para alimentação humana nos países em desenvolvimento (PAWAR; MACHEWAD; 2006) e em nações desenvolvidas é direcionado à alimentação de animais e no uso como forragem de pasto. No entanto, ainda existe escassez de informações com relação à sua aplicabilidade, de tal forma que, estudos de caracterização e aplicação de processos relacionados ao beneficiamento do produto podem contribuir para fins de produção agrícola, alimentício, entre outras, além de agregar valor ao produto.

A secagem da matéria-prima é fundamental, pois facilita o fluxo e o manuseio, propicia condições favoráveis para o armazenamento (evita o ataque de microorganismos), reduz os custos de transporte e promove a obtenção de materiais de qualidade (MUJUMDAR, 2006)). Para realizar esta operação unitária, existem uma série de secadores, que devem ser escolhidos de acordo com a finalidade e o tipo de produto manejado (MUJUMDAR, 2009). O leito de jorro é um exemplo de secador, apropriado para a secagem de partículas “grosseiras” (as quais são classificadas como pertencentes ao Grupo D de Geldart), o qual promove a movimentação das partículas de forma regular e cíclica, atingindo elevadas taxas de transferência de calor, tornando possível a operação com temperaturas mais elevadas, sem gerar tantos danos ao material (YANG, 2003).

Ao aplicar um processo de secagem é importante observar qual o tipo de material de trabalho e sua posterior finalidade. No caso das sementes, as quais são o objeto de estudo deste trabalho, as possíveis características desejadas podem ser: baixos teores de umidade (armazenamento seguro), boa emergência (garantia de germinação), velocidade durante a semeadura (que pode ser um reflexo do vigor), entre outros, os quais estão atrelados ao conceito de qualidade e produtividade.

Desta forma, a realização de estudos que avaliem a qualidade da semente de painço, sua caracterização físico-química e técnica de processamento são importantes para a valorização desta espécie, visto que ainda não existem sementes certificadas no mercado brasileiro. O leito de jorro torna-se uma alternativa interessante para a secagem dessas sementes visto que ainda não há informações da aplicação dessa técnica para essa espécie. O presente trabalho foi realizado com o apoio do Projeto de Cooperação Acadêmica entre o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará

(PPGEQ/UFPA) e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Gerais

- Caracterizar a partícula em estudo.
- Avaliar o comportamento fluidodinâmico em leito de jorro cônico e convencional.
- Realizar a secagem de partículas em leito de jorro.
- Montar um planejamento experimental e analisar os possíveis efeitos causados pelas variáveis independentes sobre as variáveis dependentes, no processo de secagem em leito de jorro.

### 1.1.2 Específicos

- Caracterizar as sementes de painço quanto à composição química, suas propriedades físicas e qualitativas.
- Avaliar a dinâmica das partículas em leito de jorro cônico e convencional e obter os parâmetros fluidodinâmicos característicos do jorro.
- Comparar os parâmetros experimentais do jorro com seus respectivos valores calculados, por meio de correlações empíricas.
- Fazer a modelagem matemática da cinética de secagem em leito de jorro, calcular os valores do coeficiente de difusão efetiva em diferentes condições de secagem e determinar o valor da Energia de ativação, utilizando a equação de Arrhenius.
- Por meio do planejamento composto central rotacional, quantificar a influência das variáveis de entrada (tempo e temperatura) nas variáveis de saída (razão de umidade, porcentagem de germinação e índice de velocidade de germinação) e propor modelos matemáticos que descrevam as possíveis relações entre as variáveis estudadas.
- Estimar a condição ótima, durante a secagem das sementes de painço, com o auxílio da técnica de otimização simultânea denominada Função Desejabilidade.

---

---

## **Capítulo 2**

### **Revisão da Literatura**

---

---



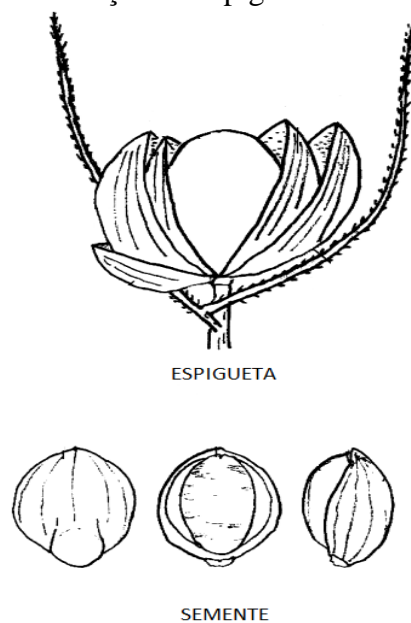
## REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 PAINÇO (*Setaria italica*)

#### 2.1.1 Descrição botânica

Trata-se de uma forrageira pertencente à família das Gramineae. Seu gênero, *Setaria*, compreende cerca de 100 espécies distribuídas nos trópicos, subtropicais e regiões temperadas, sendo a espécie *Setaria italica* umas das mais valiosas em termos econômicos (PROTA, 2013; EOL, 2013). Classificada como grama ereta, atinge uma altura de 90-150 cm. Seu período de crescimento é anual, durante o verão e considerado rápido, tornando-se maduro em 60-70 dias ou 90-120 dias, dependendo das condições e variedades (FAO, 2013). Seu grão é ovoide (Desenho 2.1), com 2 mm de comprimento, e sua coloração varia do amarelo-pálido, laranja, vermelho, marrom ao preto (PROTA, 2013).

Desenho 2.1 – Ilustração da espiguetas e semente de *S. italica*.



Fonte: Adaptado de Nasu et al (2007).

É importante ressaltar que a identificação desta espécie diante de outras pertencentes à mesma família como, por exemplo, *Panicum miliaceum*, ainda é complexa, especialmente devido à escassez de estudos relacionados à sua morfometria e taxonomia (LU et al, 2009).

### 2.1.2 Aspectos gerais: importância e aplicações

De acordo com Urben (1987) a crescente importância das forrageiras cultivadas, na rentabilidade da pecuária, tem sido destacada em muitos países, inclusive no Brasil. Durante muito tempo, somente as plantas nativas eram usadas como forrageiras. Todavia, com o aumento dos rebanhos, e dada a incapacidade das plantas nativas de suprirem todas as necessidades nutritivas dos animais, surgiu um enorme interesse no cultivo de plantas forrageiras, sobretudo as leguminosas e gramíneas, assim como, daquelas tidas como promissoras para este fim.

*Setaria italica* ou painço, como é popularmente conhecido, é cultivado extensivamente na China, Índia, Índias Orientais e outras partes da Ásia, Europa temperada, norte da África, Canadá e nos Estados Unidos (TAIRA, 1968). Desempenha um importante papel na agricultura e alimentação de muitos países em desenvolvimento, devido sua capacidade em crescer sob calor adverso e condições limitadas de chuva (PAWAR; MACHEWAD, 2006).

Sua semente pode ser cozida da mesma maneira que o arroz, apresentando muitas aplicações na alimentação humana, como: mingau, pudim, pães, bolos, farinha, etc. Na região Norte da China, o painço faz parte da dieta principal, sendo constantemente misturado a outros grãos, adicionado à farinha e outros cereais no preparo de pães e macarrão ou ainda germinados e consumidos como vegetal. É considerado um alimento nutritivo e frequentemente recomendado para idosos e mulheres grávidas. Ainda na China, desde os anos de 1990, é usado na base de formulações industriais, tais como: mini-batatas fritas, pães crocantes e farinha para alimentos de bebês, além de ser fermentado para fazer vinho e vinagre. Na Rússia e Mianmar é adicionado no preparo de cervejas e álcool (PROTA, 2013).

De acordo com Monteiro et al (1988), na Índia, esta espécie desempenha um papel importante na agricultura local, tornando-se um alimento base na alimentação devido apresentar um conjunto de substâncias importantes na nutrição humana. Na África é utilizado sobretudo por comunidades tribais, devido à escassez de outras alternativas alimentares (USHAKUMARI, LATHA, MALLESHI, 2004). Na Europa e nos Estados Unidos, o cultivo do painço é destinado primeiramente à alimentação de pássaros, sendo também usado como forragem, feno e silagem. O farelo produzido serve para alimentação de animais e pode ser usado para a extração de óleo (PROTA, 2013).

Anju e Sarita (2010) prepararam biscoitos a partir de variedades de painço e avaliaram sua qualidade sensorial e aceitabilidade. O valor nutricional e o índice glicêmico

dos *cookies* foram determinados com a finalidade de utilizá-los como alternativas na alimentação de diabéticos. O estudo demonstrou que o uso da farinha de *S. itálica* no preparo dos biscoitos resultou em *cookies* com menores índices glicêmicos, quando comparados àqueles feitos apenas com farinha de trigo. Portanto, a adição de painço à farinha tradicional poderia ser uma forma de valorizar esta espécie e lhe conceder maior importância até mesmo em países desenvolvidos.

Sireesha et al. (2011) avaliaram os benefícios associados a ingestão de extratos obtidos a partir da semente de painço sobre ratos diabéticos e concluíram que esse alimento promoveu uma redução significativa no percentual de açúcar no sangue (70%), enquanto que os animais não diabéticos submetidos à mesma dieta não sofreram efeitos colaterais. Além disso, os hamsters diabéticos alimentados com painço mostraram redução significativa nos teores de triglicérides, colesterol Total / LDL / Colesterol VLDL, além de exibirem crescimento nos teores de colesterol HDL.

Com relação à caracterização da sementes, a literatura fornece alguns parâmetros físicos e químicos, de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição centesimal da semente de painço

Análise (Unidade)	FAO (2013)	Taylor e Emmambux (2008)	Wankhede, et al.(1979)
Teor de umidade (%bs)	12	12	12,2
Resíduo Mineral Fixo (%)	-	1,6	3,6
Lipídios (%)	4	1,6	14,8
Proteína (%)	10	9,9	9,6
Carboidratos (%)	-	73	62,8

No Brasil, o painço é utilizado na alimentação de animais, principalmente de pássaros (CORRÊA et al., 2006 ). Sua cultura é considerada uma alternativa de rotação, principalmente na safrinha, por apresentar ciclo curto. O cultivo é feito utilizando-se o próprio grão, no qual é necessário fazer testes de germinação e vigor antes do plantio. No ano de 1999, Zancanella, Bonatti e Martucci relataram a inexistência de sementes certificadas no mercado brasileiro, o que ainda é verificado atualmente.

No Estado de Goiás, em junho de 2012, agricultores apostaram na lavoura de painço, como maneira de fugir da concorrência do plantio de milho, visto que este alcança

em média 1800 kg por hectare, o que não representa uma alta produtividade, mas têm vantagens como baixo custo de produção e bom preço no mercado. Além disso os agricultores destacaram o plantio de painço como boa opção para rotação de cultura ( GLOBO RURAL, 2013).

Esta espécie é fundamental na manutenção de países em desenvolvimento, sendo imprescindível na alimentação humana, de animais e na agricultura de um modo geral. No Brasil, ainda há pouca informação sobre o painço e suas principais finalidades são na alimentação de pássaros e como forragem. Desta forma, a realização de estudos que avaliem a qualidade da semente, sua caracterização física e química (centesimal), o desenvolvimento de processos de secagem e posterior viabilidade germinativa são importantes para a valorização desta espécie de grande potencial.

## 2.2 LEITO DE JORRO

Antes de iniciar um determinado processo, seja ele de secagem ou não, é necessário verificar se a partícula em estudo apresenta as características necessárias ao jorro, compondo uma avaliação preliminar.

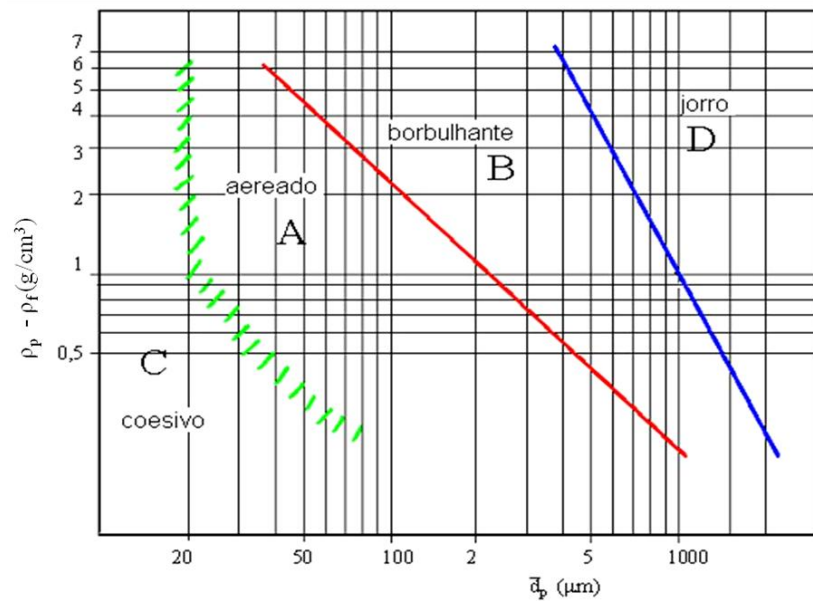
### 2.2.1 Avaliação preliminar da partícula: classificação e regimes fluidodinâmicos.

Segundo Geldart (1973), as partículas são classificadas em quatro grupos, de acordo com a diferença de densidade entre a partícula e o fluido,  $(\rho_p - \rho_f)$ , e o diâmetro da partícula,  $d_p$ . Tal classificação se tornou o padrão para demarcar os tipos de fluidização com gás, de acordo com a Tabela 2.2 e representado no Gráfico 2.1.

Tabela 2.2 – Classificação de partículas de acordo com Geldart (1973)

Grupo	Características
A	Quando fluidizadas por ar apresentam fluidização não borbulhante começando a $U_{mf}$ , seguida por fluidização borbulhante a medida que aumenta a velocidade
B	Apresentam fluidização borbulhante
C	Partículas muito finas, pó coesivos, os quais são incapazes de fluidizar
D	Partículas grandes com a habilidade de produzir leitos de jorro

Gráfico 2.1 – Diagrama de Geldart (1973).



Fonte: CORTEZ, 2002.

Baseado na hipótese da importância dos regimes laminar e turbulento no comportamento da fluidização, Goossen (1988) classificou as partículas de acordo com o número de Arquimedes. A classificação proposta é de uso geral, aplicada igualmente para fluidização com gás ou líquido. As quatro fronteiras sugeridas por Goossen são mostradas a seguir, onde  $Ar$  é o número de Arquimedes.

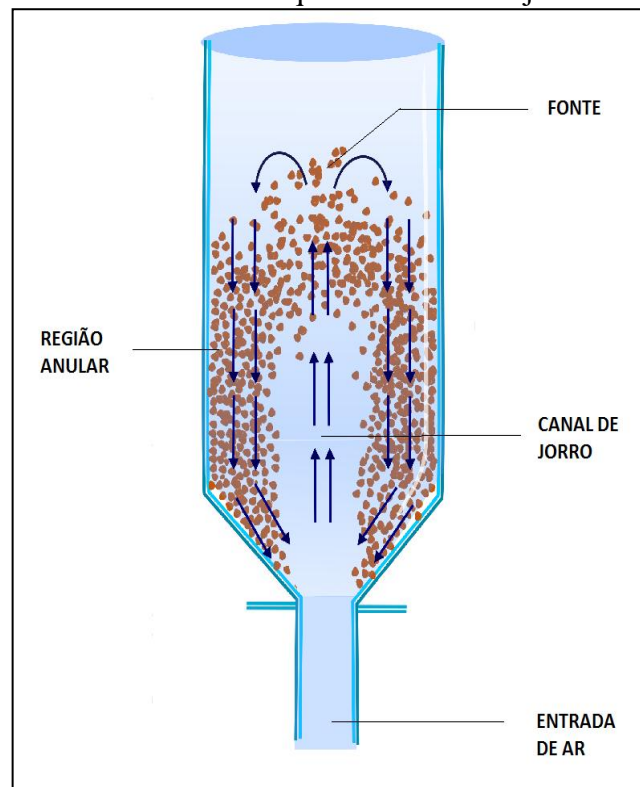
- Fronteira do Grupo C:  $Ar = 0,97$
- Fronteira do Grupo A/C:  $Ar = 9,8$
- Fronteira do Grupo A/B:  $Ar = 88,5$
- Fronteira do Grupo B/D:  $Ar = 176.900$

A demarcação entre os grupos de partículas elaborada por Goossen é comparável ao que foi proposto por Geldart (1973) quando o fluido utilizado é ar, exceto para o limite entre as regiões A/B (YANG, 2003).

### 2.2.2 Conceitos

O leito de jorro é um sistema constituído por um canal central denominado jorro, uma região periférica ao redor chamada de ânulo e uma fonte composta pelos sólidos que localizam-se acima da superfície do leito, os quais são arrastados pelo jorro, e posteriormente caem na região anular. Para eliminar zonas estagnadas, a parte inferior do leito é composta por uma base cônica divergente e a superior é constituída por uma coluna cilíndrica. A injeção do fluido é feita verticalmente por um orifício localizado no fundo da base cônica, conforme ilustra o Desenho 2.2.

Desenho 2.2 – Esquema do leito de jorro.

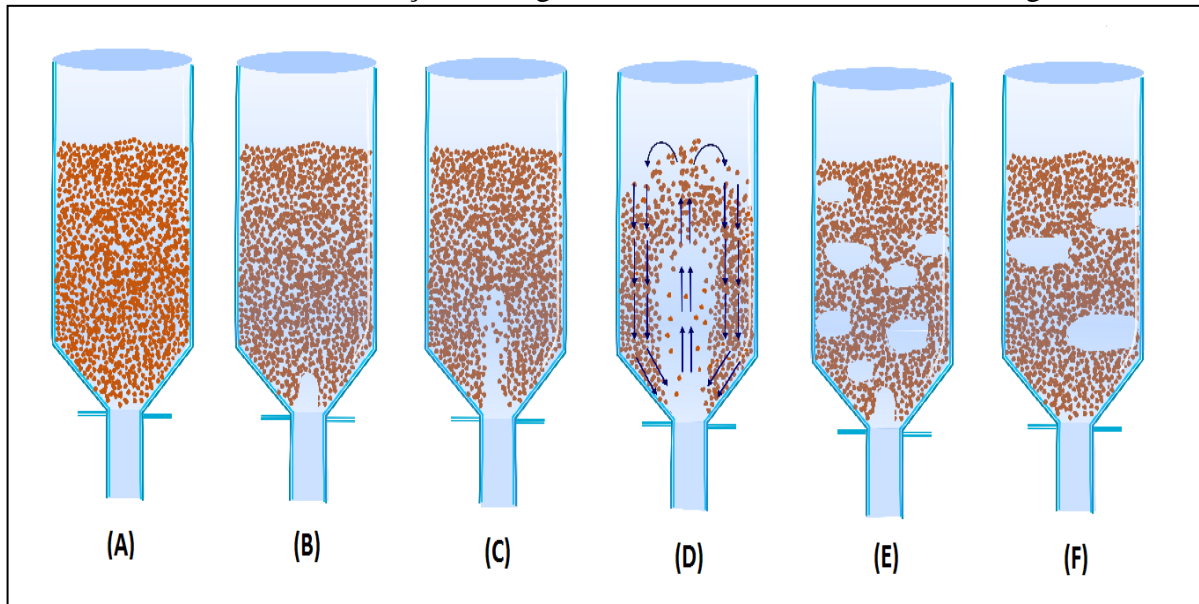


A injeção do fluido em altas vazões promove um fluxo de partículas ascendente e forma um canal central, dentro do leito de sólidos. Essas partículas alcançam a superfície do leito, estabelecem uma fonte e em seguida, caem na região anular onde movimentam-se vagarosamente no sentido descendente. Assim, o leito é composto por uma fase diluída no canal central que apresenta movimento ascendente dos sólidos em altas velocidades, os quais são arrastados por um fluxo simultâneo ao fluido, e uma região anular densa onde o fluido percola em contracorrente. Em geral, utiliza-se com mais frequência o fluido na fase gasosa,

tanto para leitos fluidizados quanto no jorro. Sua operação pode ser realizada em bateladas ou continuamente ( EPSTEIN; GRACE, 2011).

O Desenho 2.3 ilustra a transição de um leito estático ao leito de jorro, assim como de um leito de jorro borbulhante e em *slugging*, a medida que cresce a velocidade superficial do gás (vazão volumétrica do gás/ área da seção transversal da coluna).

Desenho 2.3 – Transição dos regimes devido ao aumento do fluxo de gás.



(A) Leito fixo; (B) Formação de uma pequena cavidade; (C) desenvolvimento do jorro interno; (D) jorro externo; (E) jorro borbulhante e (F) *slugging*.

### 2.2.3 Histórico e aplicações

O leito de jorro foi criado em 1954 por Gishler e Mathur, originalmente como uma alternativa ao leito fluidizado, aplicado na secagem de grãos de trigo. Percebeu-se que por meio deste método era possível promover a circulação das partículas de trigo mais vigorosamente e operar com uma vazão de fluido (ar) em maiores temperaturas, sem com isso danificar o grão.

A partir destes resultados, concluiu-se que o leito de jorro poderia ter inúmeras aplicações, para diferentes materiais. Após os primeiros estudos, realizados em 1954, foi possível afirmar “que o mecanismo de escoamento dos sólidos e do gás, por esta técnica é diferente da fluidização, mas parece servir aos mesmos propósitos para partículas grosseiras que o fluidizado alcança para finos materiais” ( EPSTEIN; GRACE, 2011 ).

O leito de jorro apresenta algumas características que o favorecem, quando comparado ao leito fluidizado, as quais podem ser tornar vantajosas, como:

- Para partículas grossas, o contato gás-sólido no leito de jorro é superior quando comparado ao fluidizado (ORTEGA-RIVAS, 2011). Se o leito for suficientemente fundo, pode-se dizer que praticamente todo o gás está atravessando a região anular e a porção remanescente se encontra no canal do jorro, movimentando as partículas com uma elevada velocidade e desse modo promovendo uma transferência de calor e massa eficiente. Quando tais partículas são submetidas à fluidização, o gás associado às bolhas penetra somente em regiões limitadas e isso pode restringir os processos de transferência.
- Processamento de materiais que são viscosos ou apresentam tendência a se tornar aderentes, são particularmente apropriados ao processamento em leito de jorro.
- O jorro garante que as partículas como um todo não se depositem no fundo do leito e porventura formem uma camada imóvel.
- Tratamento de materiais sensíveis ao calor, utilizando o ar em temperaturas superiores ao que normalmente se conseguiria (DAVIDSON, et al., 1985).

A técnica do leito de jorro abrange uma extensa lista de aplicações, como: extração de corante natural, pirólise, secagem de sólidos e pastas, assim como o recobrimento de partículas (BARROZO; SANTOS; CUNHA, 2013; FERNANDEZ-AKARREGI et al., 2013; KAHYAOGU; SAHIN; SUMNU, 2010; BEZERRA et al, 2013; BENELLI et al., 2013; BRAGA; ROCHA, 2013; ROSA; ROCHA, 2013). Segundo Davidson et al. (1985), o sistema também pode ser aplicado para a realização de reações químicas, combustão, coleta de aerossol e na modelagem do comportamento de gases.

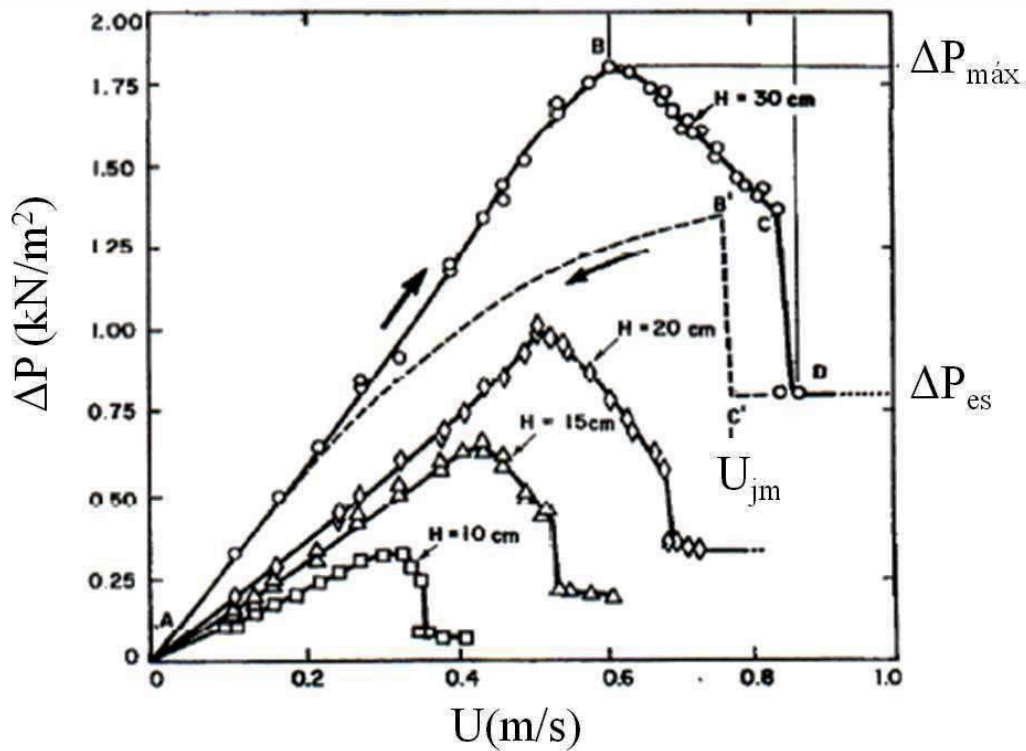
#### **2.2.4 Mecanismo fluidodinâmico**

A curva fluidodinâmica característica do leito de jorro cone-cilíndrico, ilustrada no Gráfico 2.2, representa o comportamento da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás.

A região A-B (Gráfico 2.2) mostra que um aumento na velocidade do gás resulta em um aumento constante na queda de pressão, caracterizando a região de leito fixo, no qual a pressão fornecida pela passagem do gás é inferior a pressão estática gerada pelas partículas, portanto o gás percola o leito sem movimentar as partículas.



Gráfico 2.2 – Curva característica de um leito de jorro.



Fonte: Mathur e Epstein (1974).

À medida que a velocidade do ar aumenta, as partículas próximas ao orifício de entrada do gás se deslocam, promovendo a formação de uma cavidade na região central, com maior resistência à passagem do ar, resultando numa maior queda de pressão no leito. Com o aumento da vazão de gás, a cavidade vai se alongando e surge o jorro interno. A queda de pressão aumenta até atingir o valor máximo ( $\Delta P_{\max}$ ) representada pelo ponto B. Neste ponto, o efeito do jorro interno é maior do que a camada sólida que limita a cavidade e conseqüentemente a queda de pressão diminui (B-C).

No ponto C, a quantidade de partículas deslocadas no canal central é suficiente para provocar uma expansão considerável do leito. Tal expansão, algumas vezes é acompanhada por expansões e contrações alternadas do jorro interno, gerando instabilidades e flutuações na queda de pressão, formação de bolhas e, para cargas mais profundas, fluidização de partículas na região adjacente ao jorro interno.

Um pequeno aumento na velocidade do gás além do ponto C, conhecido como jorro incipiente, faz com que a queda de pressão caia bruscamente até o ponto D, no qual o jorro surge através da superfície do leito. Nesse ponto, a vazão é denominada vazão de jorro mínimo, e a queda de pressão ( $\Delta P_s$ ) torna-se constante, de forma que um aumento na

velocidade do gás resulta apenas na elevação da fonte. Em alguns casos, o rompimento da camada de sólidos pela fonte (transição de regime) pode ocorrer com oscilações da fonte.

A instabilidade causada pela ruptura do jato através do leito faz com que a velocidade de jorro incipiente (C) e o princípio do jorro estável (D) não sejam exatamente reprodutíveis à medida que a vazão de ar cresce, sendo preferível trabalhar com o processo inverso, no qual a velocidade do gás é diminuída até o ponto C', onde se tem a menor velocidade do gás ou velocidade de jorro mínimo ( $U_{jm}$ ), na qual é possível obter o jorro estável. A partir deste ponto, uma pequena redução na velocidade do ar causa o colapso do jorro (com consequente aumento da queda e pressão), ponto B' (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

A curva de redução da vazão de gás mantém-se sempre abaixo da obtida pelo aumento de vazão, fato que se deve a energia utilizada para o gás penetrar entre os sólidos não ser mais requerida durante o colapso do jorro (MATHUR; EPSTEIN, 1974). A diferença entre os valores de queda de pressão no sentido ascendente e decrescente (histerese) é resultado da combinação de dois fatores: resistência extra criada pela compactação inicial do leito de partículas e maior empacotamento da seção acima do jorro interno, quando a velocidade está no sentido crescente, justificando os maiores valores de queda de pressão (EPSTEIN; GRACE, 2011).

Ao contrário da fluidização, o jorro apresenta um gradiente de pressão  $dP/dZ$  (sendo Z a distância vertical a partir do orifício de entrada do gás), não uniforme ao longo do comprimento do leito. Seus valores são menores próximos ao orifício e crescem até um valor máximo na superfície do leito. A queda de pressão é resultado de duas resistências paralelas: a do jorro na qual ocorre o transporte de partículas na fase diluída e a da região anular, na qual existe um movimento descendente das partículas em contracorrente com o gás. No topo do leito, o gradiente de pressão se aproxima à força necessária para suportar e fluidizar as partículas. Quando a velocidade do gás na região anular se torna similar a velocidade de fluidização, o leito de jorro alcança seu limite de estabilidade e nessas condições é alcançada a altura máxima do leito de jorro (ORTEGA-RIVAS, 2011).

Os pontos de interesse do Gráfico 2.2 são: velocidade de jorro mínimo, queda de pressão máxima e a queda de pressão no jorro estável, uma vez que determinam a menor vazão de gás que propicia o jorro, a potência máxima a ser fornecida pelo soprador e a potência consumida durante a operação, respectivamente.

### 2.2.5 Parâmetros operacionais do leito de jorro

O jorro externo é alcançado depois que o jorro interno ou jato rompe a superfície do leito empacotado, com o aumento da vazão de gás. Essa condição é denominada de jorro incipiente. O início do jorro, por outro lado, é definido como um estado adjacente ao jorro incipiente, quando a queda de pressão total cai a seu menor valor, aproximadamente constante. O jorro externo consegue ser mantido mesmo quando a vazão de gás é diminuída, conforme pode ser observado no Gráfico 2.2. A velocidade do gás correspondente ao ponto em que o jorro externo estável sofre colapso devido à diminuição da vazão de gás, sobretudo em leitos cilíndricos, é definida como velocidade de jorro mínimo ( $U_{jm}$ ) (EPSTEIN; GRACE, 2011).

Portanto, a velocidade do gás no jorro mínimo corresponde ao menor valor no qual um leito permanecerá no estado de jorro estável, a qual é função das propriedades do fluido e do sólido em estudo, bem como da geometria do leito. Para um dado material, seu valor diminui com a profundidade do leito e com o aumento diâmetro da coluna (ORTEGA-RIVAS, 2011).

Conforme mostrado no Gráfico 2.2, existe uma queda de pressão máxima durante a fluidodinâmica em leito de jorro, a qual é reprodutível se o leito for livremente empacotado e quando se realiza uma série de corridas sucessivas nas mesmas condições. Tal pico de pressão tem sido avaliado para colunas de diferentes geometrias, com diferentes partículas e fluidos (EPSTEIN; GRACE, 2011). Analisando o Gráfico 2.2, é possível observar que a  $\Delta P_{máx}$  é alcançada antes do estabelecimento do jorro externo e do jorro incipiente. Desta forma, o momento em que o leito sofre expansão, a qual pode ser perceptível ou não, corresponde ao pico de pressão no leito de jorro. Após a expansão, o leito ainda não apresenta jorro externo, mas a queda de pressão começa a reduzir, uma vez que o ar injetado já percola o leito com mais facilidade devido ao aumento da porosidade. Quando a queda de pressão reduz abruptamente, significa que o jorro externo foi iniciado e a queda de pressão no leito sofre pouca variação, correspondendo à  $\Delta P_s$ .

Deseja-se que a região de queda de pressão estável apresente um regime fluidodinâmico bem estabelecido, fonte estável e ausência de zonas mortas, proporcionando um movimento uniforme das partículas por todo o leito. É nessa faixa de pressão, por exemplo, que são realizados os processos de secagem e recobrimento, o que em outras palavras significa dizer que, a queda de pressão estável é a pressão de operação no leito de jorro.

### 2.2.6 Condições geométricas para operação estável no leito de jorro convencional

As duas condições geométricas que devem ser respeitadas a fim de alcançar um regime estável, tanto em colunas cônico-cilíndricas, quanto colunas cilíndricas de base plana, são:

- Diâmetro de entrada do gás/ Diâmetro da coluna ( $D_i/D_c$ ): De acordo com resultados experimentais :  $0,1 < \frac{D_i}{D_c} < 0,35$  , para manter um regime estável.
- Diâmetro de entrada do gás/ Diâmetro da partícula ( $D_i/d_p$ ): esta relação não deve exceder o valor de 30 (EPSTEIN; GRACE, 2011).

### 2.2.7 Leito de jorro cônico

O leito de jorro é um método de alta eficiência para as aplicações descritas anteriormente, no entanto ainda apresenta certos inconvenientes e/ou limitações tais como:

- elevada queda de pressão necessária para a formação do jorro;
- limitações geométricas relacionadas à eficiência e aumento de escala;
- vazões de gás limitadas mais por razões de estabilidade do leito (altura máxima) do que pelas necessidades de transferência de calor e de matéria (MUJUMDAR, 1989 apud MEDEIROS, 2001; DUTRA, 1984 apud LOURENÇO, 2006 ).

Apesar da versatilidade do leito de jorro convencional (cilíndrico com base cônica), existem situações nas quais o contato gás-sólido não é plenamente satisfatório. Desta forma, o leito de jorro cônico tem ganhado cada vez mais a atenção de pesquisadores, visto que consegue abranger uma grande faixa de condições operacionais, quando comparado ao leito de jorro convencional.

No leito cônico, a estabilidade do regime é mantida graças à força de arraste, que surge pelo escoamento do ar no leito e não é balanceada pela força de gravidade sobre as partículas (FREIRE; FERREIRA, 2009). Comparado ao leito de jorro convencional, apresenta algumas vantagens como:

- operação com menor perda de carga e velocidade do gás na região anular;
- sem limitação de altura máxima (MUJUMDAR, 1989 apud OLIVEIRA, 2002).

- Segundo Freire e Ferreira (2009), o leito de jorro cônico abrange uma larga faixa de condições operacionais, quando comparado ao tradicional, o que pode ser comprovado pelo diagrama geral dos regimes de escoamento proposto por Grace (1986) e complementado por Olazar et al. (1992).

Entretanto, Bacelos (2006) informa que o leito cônico apresenta algumas desvantagens capazes de inviabilizar sua utilização em maiores escalas, por exemplo durante a secagem de pastas, tais como: a instabilidade do jorro, o depósito de pó dentro da coluna e o incontrollável processo de aglomeração das partículas. Além disso, tanto o leito de jorro cônico quanto o convencional, apresentam dificuldade no que diz respeito ao aumento de escala (“scale up”), devido as características geométricas do equipamento.

#### 2.2.7.1 Aplicação

Dessa forma, a configuração cônica tem se mostrado útil na secagem de partículas de serragem que posteriormente são utilizadas como biomassa (OLAZAR et al., 2011), sendo recentemente aplicado na secagem e tratamento de resíduos provenientes da indústria de papel e agroindústria (SAN JOSÉ, et al., 2010; SAN JOSÉ et al., 2011). É indicado quando se torna necessário um movimento vigoroso das partículas, tal como sistemas com diferentes faixas granulométricas (SAN JOSÉ et al., 1994).

#### 2.2.7.2 Condições geométricas para operação estável

A operação em jorro cônico (Desenho 2.4) é sensível à geometria do leito e ao diâmetro da partícula, logo é necessário delimitar as condições que garantam a estabilidade e um eficiente contato gás-sólido (EPSTEIN; GRACE, 2011).

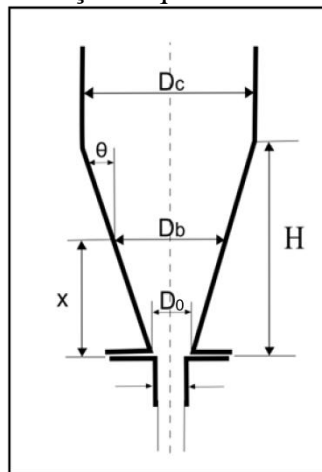
Com relação à geometria, para que o regime seja estável, é necessário que:

- Diâmetro de entrada do gás/ Diâmetro do fundo do cone ( $D_i/D_0$ ): Seu valor deve estar entre 0,5 e 0,83. O limite inferior é imposto pela queda de pressão e pela formação de zonas mortas no fundo do leito, um sério problema quando se trabalha com circulação de sólidos. Se o limite superior for ultrapassado o jorro torna-se mal definido e a instabilidade aumenta devido aos movimentos rotacionais.

- Ângulo do cone ( $\theta$ ): Não deve ser menor do que  $28^\circ$ . Do ponto de vista prático, ângulos maiores do que  $60^\circ$  não são recomendados, pois a taxa de circulação de sólidos se torna muito lenta, sobretudo em leitos profundos.
- Diâmetro de entrada do gás/diâmetro da partícula ( $D_i/d_p$ ): Esta relação deve ser de no mínimo 2 e não ultrapassar 60, afim de garantir um regime estável (EPSTEIN; GRACE, 2011).
- Altura máxima do leito de jorro: Esse parâmetro não existe no leito de jorro cônico, ou pelo menos não com o mesmo significado quando se tem  $d_p > 1$  mm no leito convencional (OLAZAR et al., 1992).
- Diâmetro da superfície do leito ( $D_b$ ): por considerações geométricas, é calculado de acordo com a seguinte equação :

$$D_b = D_0 + 2 \cdot H \cdot \tan(\theta/2) \quad \text{Equação ( 2.1 )}$$

Desenho 2.4 – Representação esquemática do leito de jorro cônico.



### 2.2.8 Correlações empíricas

A literatura fornece uma série de correlações, em sua maioria empíricas, capazes de estimar os parâmetros operacionais no processo em leito de jorro, tanto de configuração cônica quanto convencional. São limitadas pelas condições de operação em que foram desenvolvidas, como fatores geométricos, características das partículas entre outros. Mas apesar dessas restrições, as correlações têm sido aplicadas em diferentes contextos e validadas, no sentido de ressaltar a importância dos parâmetros nestas incluídos.

Por outro lado, é importante ressaltar que há muitas discordâncias entre os valores obtidos a partir dos modelos empíricos existentes, tornando a busca por correlações adequadas

um processo laborioso. As Tabelas 2.3, 2.4 e 2.5 disponibilizam uma série de correlações úteis na predição dos valores teóricos para a velocidade de jorro mínimo, queda de pressão máxima e queda de pressão estável (EPSTEIN; GRACE, 2011; ), respectivamente. É importante ressaltar que o sinal negativo, nas equações da Tabela 2.5, indica a direção vertical  $\left(-\frac{dP}{dz}\right)$  do eixo das coordenadas.

$$Re_{jm} = \frac{U_{mj}\rho_f d_p}{\mu_f} \quad \text{Equação (2.2)}$$

$$Ar = \frac{d_p^3(\rho_p - \rho_f)g\rho_f}{\mu_f^2} \quad \text{Equação (2.3)}$$

Tabela 2.3 – Correlações empíricas para a velocidade de jorro mínimo

Velocidade de jorro mínimo		
Autor	Modelo	Equação
Markowski e Kaminski (1983)	$Re_{jm} = 0,028 Ar^{0,57} \left(H/D_i\right)^{0,48} \left(D_c/D_i\right)^{1,27}$	(2.4)
Choi e Meisen (1992)	$U_{jm} / \sqrt{2gH} = 0,147 \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}\right)^{0,477} \left(d_p/D_c\right)^{0,61} \left(H/D_c\right)^{0,508} \left(D_i/D_c\right)^{0,243}$	(2.5)
Gorshtein e Mukhlenov (1964)	$Re_{jm} = 0,174 \frac{Ar^{0,50}}{\left(\tan \frac{\theta}{2}\right)^{2,5}} \left(D_b/D_i\right)^{0,85}$	(2.6)
Mathur e Gishler (1955)	$U_{jm} = \left(\frac{d_p}{D_c}\right) \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0,33} \left(\frac{2gH(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}\right)^{0,5}$	(2.7)
Brunello et al. (1974)	$U_{jm} = 0,663 d_p^{0,741} H^{0,592} \left[\frac{2gH(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0,5}$	(2.8)
Uemaki et al. (1983)	$U_{jm} = 0,977 \left(\frac{d_p}{D_c}\right)^{0,615} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0,274} \left[\frac{2gH(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0,324}$	(2.9)

Tabela 2.3 - Correlações empíricas para a velocidade de jorro mínimo (continuação)

Velocidade de jorro mínimo		
Autor	Modelo	Equação
Ogino et al. (1993)	$U_{jm} = 0,0151 \left[ \frac{\varepsilon_0^4}{2(1 - \varepsilon_0)} \right]^{0,5} \cdot \left[ (1 - \varepsilon_0) \frac{\rho_f(\rho_p - \rho_f)gD_c^3}{\mu^2} \right]^{0,25} \cdot \left( \frac{d_p}{D_c} \right) \cdot \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{0,33} \left[ \frac{2gH(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0,5}$	(2.10)
Olazar et al. (1992)	$Re_{jm} = 0,126 Ar^{0,5} \left( D_b/D_i \right)^{1,68} \tan(\theta/2)^{-0,57}$	(2.11)
Olazar et al. (1994)	$U_{jm} = \left( \frac{d_p}{D_c} \right) \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{0,1} \left[ 2gH \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0,5}$	(2.12)
Olazar et al. (1996)	$Re_{jm} = 0,126 Ar^{0,39} \left( D_b/D_i \right)^{1,68} \tan(\theta/2)^{-0,57} \text{ para } dp \leq 1 \text{ mm}$	(2.13)
Tvisk et al. (1967)	$Re_{jmi} = 0,4 Ar^{0,14} \left( H/D_i \right)^{1,24} \left( \tan \frac{\theta}{2} \right)^{0,42}$	(2.14)
Fane e Mitchell (1984)	$U_{jm} = 2D_c^{1 - \exp[-7D_c^2]} \left( \frac{d_p}{D_c} \right) \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{0,33} \left( \frac{2gH(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{0,5}$	(2.15)

Tabela 2.4 - Correlações empíricas para a queda de pressão máxima

Queda de pressão máxima		
Autor	Modelo	Equação
Olazar et al. (1993)	$-\Delta P_{m\acute{a}x}/\Delta P_s = 1 + 0,116 \cdot \left( H/D_i \right)^{0,5} [\tan(\theta/2)]^{-0,8} Ar^{0,0125}$	(2.16)
Kmiec (1980)	$-\Delta P_{m\acute{a}x} = g(1 - \varepsilon_0)(\rho_p - \rho_f)H[1 + 0,206 \exp(0,62 \cdot H/r_c)]$	(2.17)
Manurung (1964)	$-\Delta P_{m\acute{a}x}/\rho_b gH = \left[ 0,8 + \frac{6,8}{\tan\theta} \left( \frac{D_i}{D_c} \right) \right] - 34,4 \frac{d_p}{H}$	(2.18)
Ansejo et al. (1977)	$-\Delta P_{m\acute{a}x}/\rho_b gH = 1 + 2,8 \exp[-0,312 H/D_c]$	(2.19)



Tabela 2.4 - Correlações empíricas para a queda de pressão máxima (continuação)

Queda de pressão máxima		
Autor	Modelo	Equação
Yokogawa e Isaka (1971)	$-\Delta P_{m\acute{a}x} = g(1 - \varepsilon_m)(\rho_p - \rho_f)H \left[ \frac{D_i}{D_c} \right]^{0,14(D_c - D_i/H)}$	(2.20)
Olazar et al. (1994)	$-\Delta P_{m\acute{a}x} = 1 + 0,35 \left( \frac{H}{D_c} \right)^{0,1} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{1,1} Ar^{0,1}$	(2.21)

Tabela 2.5 - Correlações empíricas para a queda de pressão no jorro estável

Queda de pressão no jorro estável		
Autor	Modelo	Equação
Manurung (1964)	$-\frac{\Delta P_S}{H\rho_b g} = \frac{1}{1 + \left[ 0,81(\tan\theta)^{1,5} / \phi^2 \right] \left( \frac{D_c d_p}{D_i^2} \right)^{0,78} \left( \frac{D_c}{H} \right)}$	(2.22)
Olazar et al. 1994	$-\frac{\Delta P_S}{H\rho_b g} = 3,85 \times 10^{-2} \left( \frac{H}{D_i} \right)^{0,12} \left( \frac{D_c}{D_i} \right)^{0,69} (Re_{ms})^{-0,31}$	(2.23)
Pallai e Nemeth (1969)	$-\frac{\Delta P_S}{\Delta P_{m\acute{a}x}} = 0,8 - 0,01 \frac{D_c}{D_i}$	(2.24)
Ogino et al. (1993)	$\frac{\Delta P_S}{H\rho_b g} = 1,15 \left( \frac{H}{D_c} \right)^{0,5} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{0,33}$	(2.25)
Olazar et al. (1993)	$-\frac{\Delta P_S}{H\rho_b g} = 1,20 [\tan(\theta/2)]^{-0,11} (Re_{ms})^{-0,06} \left( \frac{H}{D_i} \right)^{0,08}$	(2.26)
Yokogawa e Isaka (1971)	$-\frac{\Delta P_S}{H\rho_b g} = \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{0,14 \frac{(D_c - D_i)}{H}}$	(2.27)

## 2.3 SECAGEM

### 2.3.1 Conceitos e importância

A secagem de sólidos é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nas indústrias agrícola, cerâmica, química, alimentícia, farmacêutica, de papel e celulose, mineral e de polímeros (MUJUMDAR, 2006).

De acordo com PARK et al (2007) a secagem é a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido, sendo a quantidade de água presente no sólido chamada de umidade. Em tal processo é possível observar dois fenômenos ocorrendo simultaneamente:

- Transferência de energia (calor) do ambiente para evaporar a umidade superficial. Esta transferência depende de condições externas de temperatura, umidade do ar, fluxo e direção de ar, área de exposição do sólido e pressão.
- Transferência de massa (umidade), do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo. O movimento interno da umidade no material sólido é função da natureza física do sólido, temperatura e conteúdo de umidade.

Van't Land (1991) define a secagem como uma operação unitária na qual ocorre uma separação líquido/sólido, acompanhada pelo fornecimento de calor, resultando na evaporação do líquido. Apesar de na maioria dos casos a água ser o líquido removido, a evaporação de um solvente também é considerada. Esta definição pode ser estendida para incluir a desidratação de alimentos e sais, além da remoção de grupos hidroxilas de moléculas orgânicas.

Portanto, a secagem é uma operação complexa que envolve a transferência transiente de calor e massa juntamente com diversas taxas de processo, como transformações físicas ou químicas, as quais por sua vez podem promover mudanças na qualidade do produto e conseqüentemente nos mecanismos de calor e massa. Possíveis mudanças físicas podem ser: encolhimento, cristalização, entre outros (DEVAHASTIN; MUJUMDAR, 2000).

A secagem da matéria prima é importante no sentido de facilitar o manuseio, propiciar condições favoráveis para o armazenamento, redução dos custos de transporte, entre outros, os quais em geral, propiciam a obtenção de um produto de qualidade. Porém, é importante ressaltar que a secagem inadequada pode gerar danos irreversíveis ao produto e interferir na qualidade, de forma a torná-lo impróprio para o mercado (MUJUMDAR, 2006), visto que em alguns casos, é possível ocorrer reações químicas ou bioquímicas desejáveis e indesejáveis, que podem resultar em mudanças de cor, textura, odor ou outras propriedades do material sólido (DEVAHASTIN; MUJUMDAR, 2000).

### **2.3.2 Secagem em leito de jorro**

Classificar os secadores de uma única maneira é uma tarefa difícil, diante da variedade e complexidade das possibilidades existentes. Um exemplo disso são os secadores em leito fluidizados que podem ser subdivididos em mais de 30 categorias.

De maneira geral, os critérios de classificação utilizados são: regime (contínuo ou batelada), fornecimento de calor (condução, convecção, radiação ou combinações), tipo de leito (estacionário, dinamicamente ativos ou agitados), faixa operacional de temperatura, entre outros. Diversos autores vêm tentando organizá-los em categorias as quais são válidas de acordo com a utilização e interesse em questão. Talvez uma das maneiras mais úteis de classificação dos secadores é quanto ao tipo de fornecimento de energia térmica: direto ou indireto (MUJUMDAR, 2009).

Os secadores com regime hidrodinâmico ativo são caracterizados pela agitação do leito ou das partículas, devido uma força hidrodinâmica exercida sobre as partículas por uma corrente de ar com velocidade apropriada (PARK, 2007). Os leitos fluidizados são classificados nesta categoria, incluindo uma série de variações, tais como: leito fluidizado, leito vibro-fluidizado, pulso-fluidizado e o leito de jorro.

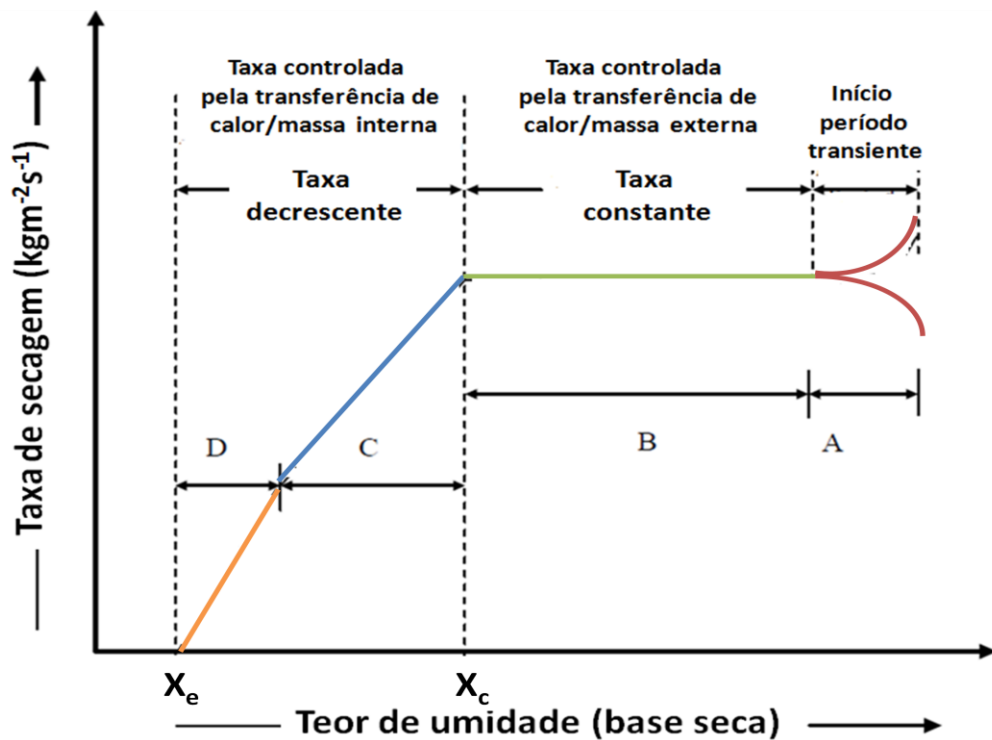
Secadores do tipo leito de jorro são apropriados para partículas pertencentes ao Grupo D na classificação de Geldart, as quais são grosseiras e densas demais para um leito fluidizado convencional. Neste sistema a movimentação das partículas é regular e circularória e tanto as operações em batelada como contínua são possíveis (YANG, 2003).

### **2.3.3 Cinética de Secagem**

Ao secar um sólido úmido, mediante um gás a temperatura e umidade fixas, manifesta-se um determinado comportamento, conforme mostra o Gráfico 2.3, o qual representa uma curva típica de secagem baseada na taxa (velocidade) de secagem em função do teor de umidade. O segmento A da curva é o período em regime não permanente, o qual pode ocorrer com uma velocidade crescente ou decrescente. Durante o período a taxa constante (segmento B), a superfície exposta do sólido está saturada de água, de forma que a massa retirada da superfície é imediatamente substituída pelo líquido que vem do interior do sólido, logo, a secagem ocorre como se fosse a evaporação de uma massa de líquido, sem haver influência direta do sólido na taxa de secagem. O mecanismo de deslocamento do

líquido, e por isso, a velocidade deste movimento, varia acentuadamente com a própria estrutura da partícula, como nos materiais com estruturas fibrosas, ou amorfas, nos quais o movimento do líquido ocorre por difusão. Se as taxas de difusão forem menores que o escoamento por gravidade ou por capilaridade, os sólidos nos quais a difusão controla o movimento do líquido tendem a apresentar períodos a taxa constante mais curtos, ou mesmo a secarem sem que haja um período de taxa constante perceptível (FOUST et al., 2012). Jangam e Mujumdar (2010) informam que uma variedade de alimentos e produtos agrícolas nem sempre apresentam, de forma definida, o período de taxa constante, que em alguns casos são muito curtos, o que está de acordo com Foust et al. (2012) e Park et al. (2007), e pode ser justificado pela complexidade de suas estruturas internas.

Gráfico 2.3 – Curva de secagem típica em condições constantes de secagem.



O ponto de transição entre a região constante (segmento B) e a faixa decrescente (segmento C) é o teor de umidade crítico ( $X_c$ ). Neste ponto, o movimento do líquido para a superfície do sólido torna-se insuficiente para substituir o líquido que está sendo evaporado. O teor de umidade crítico depende da facilidade com que a umidade se desloca no interior do sólido. Nos sólidos porosos, com estrutura complexa e irregular, é muito difícil prever  $X_c$  (FOUST et al., 2012). É importante ressaltar que este parâmetro não depende apenas das

propriedades do material, mas também das condições em que decorre a secagem (JANGAM; MUJUMDAR, 2010).

Durante o período de secagem C, denominado “primeiro período de taxa decrescente”, a superfície fica lentamente mais pobre em líquido, pois a velocidade do movimento do líquido para a superfície é menor que a velocidade com que a massa é transferida da superfície. Na região D não há, na superfície, qualquer área significativamente saturada do líquido. A parte da superfície que está saturada se torna seca, pela transferência convectiva de calor para a corrente gasosa e pela transferência de massa para a corrente do gás secante. O vapor, nos níveis mais internos da amostra sólida, difunde-se para a superfície que não está saturada e continua a difundir-se para a corrente gasosa. Este mecanismo é muito lento em comparação com a transferência convectiva que ocorre na superfície saturada. Nesta faixa toda a evaporação acontece a partir do interior do sólido. À medida que o teor de umidade continua a diminuir, a distância a ser coberta na difusão do calor e de massa aumenta até que em  $X_e$  atinge o teor de umidade de equilíbrio. Este ponto é atingido quando a pressão de vapor sobre o sólido é igual à pressão parcial do vapor no gás secante afluyente. Este período é denominado “segundo período de taxa decrescente”. A quantidade de umidade retida num sólido, em equilíbrio com um gás úmido, depende da estrutura do sólido, da temperatura do gás e do teor de umidade do gás. Em muitos materiais, depende também de o sólido reter, no início, mais ou menos líquido que o seu valor de equilíbrio (FOUST et al., 2012).

#### **2.3.4 Modelos para a avaliação da cinética de secagem**

O comportamento das curvas de secagem em camada delgada varia com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores. Desta forma, uma série de modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas. Em geral, essas equações baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (CORRÊA et al., 2007).

Afonso Júnior e Corrêa (1999) ressaltam que ao aplicar um modelo de secagem baseado na teoria da difusão de um líquido, é importante considerar algumas suposições, como: a redução de volume é desprezível; não há efeito de capilaridade; os corpos entram em

equilíbrio térmico com ar instantaneamente e os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro são desprezíveis. Devido às limitações de ordem prática, quando utilizadas para produtos biológicos estas suposições são normalmente consideradas satisfeitas.

Faria et al. (2012) mostraram que para a secagem de sementes de crambe, o modelo que melhor se ajustou foi o da Aproximação por Difusão. Para a secagem de sementes de mamão, Venturini et al. (2012) determinaram que o modelo de Page apresentou os melhores ajustes. No estudo da secagem de sementes de uva, o modelo de Lewis se mostrou o mais adequado (ROBERTS; KIDD; PADILLA-ZAKOUR, 2008). A Tabela 2.6 lista algumas equações aplicadas para prever a secagem em produtos agrícolas, onde  $X_R$  é definido conforme a Equação 2.28.

$$X_R = \frac{X(t) - X_e}{X_i - X_e} = \frac{X(t)}{X_i} \quad \text{Equação (2.28)}$$

$X_R$ : razão de umidade ou teor de umidade adimensional;

$X(t)$ : umidade da amostra em função do tempo;

$X_i$ : umidade inicial da amostra;

$X_e$ : umidade de equilíbrio.

Tabela 2.6 – Modelos de regressão não linear para avaliar a secagem

Designação (ano)	Modelo	Equação
Lewis (1921)	$X_R = \exp(-k.t)$	(2.29)
Henderson e Pabis (1961)	$X_R = a.\exp(-k.t)$	(2.30)
Page (1949)	$X_R = \exp(-k.t^n)$	(2.31)
Aproximação por Difusão (1980)	$X_R = a.\exp(-kt) + (1 - a).\exp(-k.b.t)$	(2.32)
Midilli et al. (2002)	$X_R = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	(2.33)
Wang e Singh (1978)	$X_R = 1 + a.t + b.t^2$	(2.34)
Herderson (1974)	$X_R = a.\exp(-k_1.t) + b.\exp(-k_2.t)$	(2.35)
Page modificado (1973)	$X_R = \exp(-k.t)^n$	(2.36)

### 2.3.5 Período de taxa decrescente durante a secagem

Segundo Park (1987), as explicações para o comportamento da secagem durante o período decrescente são derivadas de duas teorias: difusional e capilar. Conforme Marinos-Kouris e Maroulis (2006) a difusão em sólidos durante a secagem é um processo complexo, podendo envolver a difusão molecular, fluxo capilar, difusão de Knudsen ou ainda difusão superficial. Ao combinar esses fenômenos, pode-se definir a difusividade efetiva a partir da segunda Lei de Fick (Equação 2.37):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X \quad \text{Equação (2.37)}$$

Na qual  $D_{eff}$  é a difusividade efetiva ( $m^2/s$ ),  $X$  (kg/kg b.s.) é o conteúdo de umidade do material e  $t$  é o tempo. A transferência de umidade em meios heterogêneos pode ser convenientemente analisada utilizando a lei de Fick para materiais homogêneos, em que a heterogeneidade do material é contabilizada pela utilização de um difusividade efetiva. A Equação 2.37 mostra a distribuição da umidade do material em função do tempo, isto é, descreve o movimento da umidade dentro do sólido. Esta equação pode ser usada para as situações em que a difusão é o mecanismo que controla a secagem (MARINOS-KOURIS; MAROULIS, 2006).

Diversos autores têm determinado a difusividade efetiva por meio da Equação de Fick, tais como: Babalis e Belessiotis (2004), Gely e Santalla (2007), Kaptso et al. (2008) e Perea-Flores et al. (2012). Independentemente dos trabalhos sobre secagem, Park et al. (2007) informam que Crank (1975) apresentou uma variedade de soluções da equação de difusão para condições iniciais e de contorno variados, cabendo ressaltar que estas soluções se aplicam aos sólidos de formas geométricas simples (corpos semi-infinitos; placas, cilindros e esferas).

De acordo com Marinos-Kouris e Maroulis (2006) a difusividade depende fortemente da temperatura e do teor de umidade. Em materiais porosos, tanto a fração de vazios quanto a estrutura e distribuição dos poros afetam a difusividade significativamente. A relação entre a difusividade e a temperatura, geralmente pode ser descrita pela equação de Arrhenius, da seguinte forma (Equação 2.38):

$$D = D_0 \exp[-E_a/R(T + 273,15)] \quad \text{Equação (2.38)}$$

Onde  $D_0$  é o fator pré exponencial de Arrhenius ( $m^2/s$ ),  $E_a$  é a energia de ativação para a difusão da umidade,  $R$  é a constante universal dos gases ( $R = 8,31 \text{ J/molK}$ ) e  $T$  a temperatura absoluta em Kelvin. A dependência entre o teor de umidade e a difusividade é introduzida na equação de Arrhenius pela energia de ativação e pelo fator de Arrhenius, ambos considerados funções empíricas da umidade (MARINOS-KOURIS; MAROULIS, 2006).

## 2.4 SEMENTES

### 2.4.1 Qualidade das sementes

A utilização de sementes de boa qualidade é um fator de fundamental importância para o sucesso de culturas de interesse econômico, pois possibilita a obtenção de uma boa emergência no campo e de plantas vigorosas e uniformes, com reflexos diretos na produtividade. Sementes de baixa qualidade têm como consequência, por exemplo, a necessidade de ressemeadura, a qual é extremamente prejudicial devido a aquisição de uma nova quantidade de sementes e um novo preparo do solo, o que resulta em gastos extras. Além disso, ainda existe o risco de ocorrer a perda da época mais recomendada para semeadura (MARCOS FILHO, et al. 1987).

Em vista disso, foram desenvolvidas metodologias estabelecidas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento denominadas “Regras para Análise de Sementes” (RAS), as quais avaliam quesitos fundamentais para caracterização de um lote de sementes, tais como: pureza física, peso de mil sementes, germinação, teor de umidade e vigor.

A pureza física é uma característica que reflete a composição física de um lote de sementes, ou seja, permite identificar as diferentes espécies de sementes e os materiais inertes geralmente presentes em uma amostra, como por exemplo, a existência de patógenos. O peso de mil sementes fornece informações que facilitarão o cálculo para semeadura e regulagens de semeadeiras, assim como auxilia na avaliação da qualidade das sementes (estado de maturidade, sanidade, etc.) (MARCOS FILHO, et al. 1987). O tamanho e o peso específico das sementes, são importantes na identificação e controle de possíveis danos, visto que segundo Soave e Moraes (1987) esses parâmetros muitas vezes são reduzidos devido à



infecção por patógenos. Um exemplo são as sementes de soja incrustadas com esporos de *Peronospora manshurica*, as quais podem ficar de 12 a 26% mais leves que as sementes saudáveis do mesmo lote.

#### 2.4.1.1 Germinação

A germinação de sementes é a emergência e o desenvolvimento das estruturas essenciais do embrião, demonstrando sua aptidão para produzir uma planta normal, sob condições favoráveis de campo, sendo que sua porcentagem corresponde à proporção do número de sementes que produziu plântulas classificadas como normais, em condições e períodos especificados (BRASIL, 2009). Os objetivos principais do teste de germinação visam a obtenção de informações que permitam determinar as condições apropriadas para a semeadura, assim como comparar diferentes lotes (MARCOS FILHO, et al. 1987).

Os testes de germinação conduzidos em laboratórios, nem sempre conseguem representar fielmente as condições do campo, as quais podem ser bem adversas. Porém, deve ser lembrado que, embora em certos casos os resultados não satisfaçam os agricultores, estes testes são indispensáveis, principalmente por envolverem procedimentos padrões e possuir reprodutibilidade.

#### 2.4.1.2 Vigor

O teste de germinação não distingue amostras que germinam rapidamente, daquelas em que o processo é lento, além de não considerar o fato de que plântulas com certas deficiências apresentam potencial fisiológico inferior ao das perfeitamente normais (MARCOS FILHO, et al. 1987). A falta de uma estreita relação entre a germinação obtida em laboratório e a emergência em campo foi responsável pelo desenvolvimento do conceito de vigor (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000). Dessa forma, a avaliação do vigor identifica possíveis diferenças significativas na qualidade fisiológica de lotes que apresentem poder germinativo semelhante. Isso, porém, não significa que se deva promover a substituição do teste de germinação pelo de vigor, pois estes devem ser utilizados de forma complementar (MARCOS FILHO et al., 1987). De acordo com Carvalho e Nakagawa (2000), o vigor pode ser refletido através de várias características, como: velocidade de germinação, uniformidade de emergência, crescimento de plântulas, entre outras.

### **2.4.2 Secagem de Sementes**

Vários autores têm avaliado a secagem de sementes, a fim de obter um produto final em condições de ser armazenado, comercializado ou até mesmo processado. Alguns exemplos são Morais et al. (2013), que realizaram a modelagem matemática da secagem de grãos de feijão-caupi, enquanto Chayjan, Alizade e Shadidi (2012) trabalharam com sementes de pistache.

A umidade é uma variável que deve ser acompanhada desde a colheita, beneficiamento e armazenamento, visto que reflete a qualidade da semente. Durante a colheita mecânica, a máquina precisa ser bem ajustada de acordo com a umidade do material, uma vez que em sementes muito secas o pericarpo fica ressecado e pode se romper ou quebrar facilmente, aumentando o risco de penetração de micro-organismos. Para sementes muito úmidas, existe a possibilidade de lesões internas, resultando em plântulas anormais, embora a superfície esteja intacta. No armazenamento, por exemplo, a umidade da semente, a temperatura e a umidade relativa do ambiente devem ser controladas, pois de forma geral é verificado que se a semente possuir acima de 45% de umidade, a germinação pode ocorrer; entre 18 – 10% pode ocorrer aquecimento; de 12 – 18% há ocorrência de fungos de armazenamento; abaixo de 8 – 9% praticamente não ocorre a atividade de insetos e abaixo de 4 – 8% o armazenamento é seguro.

Sementes com alta umidade possuem condições favoráveis para o estabelecimento e disseminação de fungos e bactérias. Além disso, ocorre o aumento da respiração e o aumento da temperatura da semente com o acúmulo de produtos tóxicos prejudiciais à sua vitalidade, resultando na perda da capacidade de germinação (SOAVE; MORAES, 1987).

De acordo com Garcia et al (2004), a secagem de sementes, além de contribuir para a preservação da qualidade fisiológica durante o armazenamento, possibilita a antecipação da colheita evitando perdas de naturezas diversas durante o processo produtivo. Ao escolher o método de secagem, o fator quantidade de sementes é limitante e, quando é necessário secar grandes quantidades, é imprescindível a utilização de secagem artificial, cujos custos de operação estão relacionados com volume, velocidade de secagem e temperatura do ar. No Brasil, nas últimas décadas, surgiu a necessidade do desenvolvimento de trabalhos de pesquisa sobre secagem, com o objetivo de aprimorar a tecnologia de produção de sementes.

No entanto, é importante ressaltar o controle térmico durante a operação a fim de amenizar possíveis danos fisiológicos, os quais podem interferir nos mecanismos de trocas

hídricas e gasosas e aumentar a predisposição ao ataque de insetos e microorganismos (SOAVE; MORAES, 1987). A manifestação do dano térmico pode ser verificada através da análise de germinação, pela presença de plântulas anormais, redução na porcentagem e velocidade de germinação (HARRINGTON, 1972), além da análise de vigor.

## 2.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A atividade estatística mais importante não é a análise de dados, e sim o planejamento dos experimentos em que esses dados devem ser obtidos. A utilização de planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos permite obter do sistema em estudo o máximo de informação útil a partir de um número mínimo de experimentos (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

### 2.5.1 Planejamento composto central rotacional (PCCR)

Ao escolher um planejamento é essencial conhecer o número de variáveis independentes envolvidas, a disponibilidade de matéria prima, a viabilidade do número de ensaios que podem ser realizados e o custo do processo em estudo, não se esquecendo de levar em conta que existe um número mínimo de ensaios que devem ser realizados conforme o número de fatores que se deseja estudar, para que a discussão e análise dos resultados não fiquem comprometidas.

Para 2 ou 3 variáveis independentes é recomendado um planejamento composto central rotacional (PCCR), o qual é configurado pelos ensaios fatoriais, pontos centrais e axiais. Quando há 2 variáveis, temperatura e tempo, por exemplo, a estratégia é compor a matriz de planejamento da seguinte forma: um fatorial completo representado por  $2^2$ , 4 pontos axiais e 4 (ou outro número arbitrário) pontos centrais para a avaliação do erro puro, compondo um total de 12 ensaios, conforme é mostrado na Tabela 2.7. Neste caso utilizam-se pontos axiais do tipo  $\pm \alpha$ , onde  $\alpha = (2^{k'})^{1/4}$ . Para  $k' = 2$  variáveis,  $\alpha = 1,4142$  (RODRIGUES, LEMMA, 2009).

Tabela 2.7 – Matriz codificada para um PCCR com 12 ensaios

Ensaio	$X_1$	$X_2$
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	$-\alpha$	0
6	$+\alpha$	0
7	0	$-\alpha$
8	0	$+\alpha$
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

### 2.5.2 Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta é uma técnica de otimização baseada em planejamentos fatoriais que foi introduzida por G.E.P. Box na década de 1950 (BARROS NETO, SCARMINIO;BRUNS, 2010), a qual explora relações existentes entre algumas variáveis que supostamente interferem no processo (conhecidas como variáveis de entrada, variáveis independentes ou variáveis controláveis) com uma variável resposta (conhecida como variável dependente), tal como o rendimento do processo. Esta metodologia tem se mostrado útil em diversos campos, como engenharia química, otimização de processos e pesquisas na agricultura e na biologia por meio da simulação computacional. Pode inclusive, ser aplicada em qualquer procedimento experimental (TAQUEDA; COSTA; FARIA, 1998).

### 2.5.3 Otimização de processos: Função Desejabilidade

À medida que o número de variáveis de resposta avaliadas cresce, torna-se mais complexo avaliar o ponto ótimo somente pela superfície de resposta, ou pela sobreposição das

mesmas. Para estes casos, uma possível alternativa é usar a metodologia de otimização simultânea proposta por G.C. Derringer e R. Suich (1980).

De acordo com o método de Derringer e Suich defini-se uma Função Desejabilidade para cada resposta, com valores restritos para  $Y_i$  entre 0 e 1, no qual zero significa um valor inaceitável e um o valor mais desejável. As desejabilidades individuais são então combinadas utilizando-se a média geométrica, que fornece a desejabilidade global  $D_G$ :

$$D_G = \sqrt{d_1(Y_1) \times d_2(Y_2) \times \dots \times d_k(Y_k)} \quad \text{Equação (2.39)}$$

Em que:  $k$  denota o número de respostas. Se qualquer resposta  $Y_i$  for completamente indesejável ( $d_i(Y_i) = 0$ ), então a desejabilidade global é igual a zero, não importando o quão satisfatório possam ser os valores das outras respostas. Na prática, os valores ajustados  $\hat{Y}_i$  são usados no lugar de  $Y_i$ . Portanto, a otimização simultânea de várias respostas se reduz à maximização de um único valor, a desejabilidade global ( $D_G$ ). Nesse caso, o desafio se torna descobrir os níveis dos fatores que maximizem o valor de  $D_G$  (BARROS NETO, SCARMINIO;BRUNS, 2010).

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. De acordo com Costa (2003) o programa *Statistica*<sup>TM</sup> 7.0 utiliza uma classe de funções desejabilidade, baseadas no seguinte princípio: seja  $I_i$ ,  $S_i$  e  $M_i$ , os valores inferior, superior e mediano, respectivamente, os quais são desejados para a resposta  $Y_i$ , com  $I_i \leq M_i \leq S_i$ .

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

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) < I_i \\ \left( \frac{\hat{Y}_i(x) - I_i}{M_i - I_i} \right)^s & \text{se } I_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq M_i \\ \left( \frac{\hat{Y}_i(x) - S_i}{M_i - S_i} \right)^t & \text{se } M_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq S_i \\ 0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) > S_i \end{cases} \quad \text{Equação (2.40)}$$

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

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

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) < I_i \\ \left( \frac{\hat{Y}_i(x) - I_i}{M_i - I_i} \right)^s & \text{se } I_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq M_i \\ 1,0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) > M_i \end{cases} \quad \text{Equação (2.41)}$$

Em que  $\mathbf{M}_i$ , neste caso, é interpretado como um valor suficientemente grande para a resposta. Para minimizar a resposta, utiliza-se a seguinte definição:

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 1,0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) < M_i \\ \left( \frac{\hat{Y}_i(x) - S_i}{M_i - S_i} \right)^s & \text{se } M_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq S_i \\ 0 & \text{se } \hat{Y}_i(x) > S_i \end{cases} \quad \text{Equação (2.42)}$$

A desejabilidade, portanto, consiste em três etapas: primeiramente, conduzir os experimentos e ajustar as respostas dos modelos para todas as  $k$  respostas; em seguida, definir as funções desejabilidade individuais para cada resposta; e por último, maximizar a desejabilidade global  $D_G$ , em relação aos fatores controlados.

De acordo com Akhanzarova e Kafarov (1982), os valores numéricos de  $D_G$  e seus respectivos conceitos de qualidade, podem ser classificados de acordo com a Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Valores escalonados de  $D_G$ 

Valores de $D_G$ (desejabilidade)	Descrição da resposta (qualidade equivalente)
0,8 a 1,00	Aceitável e excelente
0,62 a 0,8	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)

---

---

## **Capítulo 3**

### **Materiais e Métodos**

---

---



## MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 MATERIAL

As sementes de *Setaria itálica* foram adquiridas no comércio varejista de Belém-Pará e separadas em dois lotes. O primeiro foi levado ao Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem (LFS/ UNICAMP), armazenadas em vasilhame plástico, e refrigeradas à temperatura de 6 °C. Utilizou-se esse lote de sementes para a determinação da massa específica real, microscopia eletrônica de varredura (MEV), ângulo de repouso e nos estudos preliminares de fluidodinâmica em leito de jorro cônico.

O segundo lote permaneceu armazenado em Belém, no Laboratório de Secagem e Recobrimento de Partículas (LSRP/UFPA), à 6°C desde a aquisição até a realização dos experimentos (caracterização química, análises de natureza física restantes, posteriores ensaios fluidodinâmicos, cinética de secagem e planejamento). A Fotografia 3.1 mostra a imagem da semente obtida em microscópio estereoscópico, marca LEICA modelo EZ4D, Alemanha.

Fotografia 3.1 - Sementes de painço *in natura*.



### 3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO - QUÍMICA

As sementes de painço foram trituradas em multiprocessador, em escala de bancada, e peneiradas em malha Tyler 14, obtendo-se assim o material utilizado para as análises químicas.

### 3.2.1 Teor de umidade

O teor de umidade foi determinado por aquecimento de três subamostras de  $\pm 5$ g em estufa a 105 °C com circulação de ar forçada por 24h, conforme proposto pela AOAC (1997). Os resultados foram expressos em porcentagem de matéria seca.

### 3.2.2 Resíduo Mineral Fixo

O teor de cinzas ou resíduo mineral fixo, das sementes de painço, foi determinado por incineração em mufla elétrica (marca Químis, modelo 318.24 de controle automático), a 550°C (AOAC, 1997).

### 3.2.3 Lipídios

O teor de lipídios das sementes de *Setaria italica* foi obtido de acordo com o método descrito pela AOAC (1997). A extração de lipídios foi realizada em triplicata, utilizando amostras de  $\pm 5$ g, depositadas em cartuchos confeccionados com papel de filtro e inseridos em aparelho tipo Soxhlet. A técnica fundamenta-se na solubilidade dos lipídios em solvente apropriado (éter de petróleo). Os lipídios extraídos foram posteriormente determinados gravimetricamente e expressos em porcentagem.

### 3.2.4 Proteína Total

O teor de proteínas das sementes de painço foi determinado pelo método Kjeldahl (AOAC, 1997), em triplicata, com fator de conversão nitrogênio-proteína igual a 6,25, conforme adotado por Taira (1968) e Wankhede et al. (1979). Os resultados foram expressos em porcentagem.

### 3.2.5 Carboidratos totais

Foi determinado por diferença: calculou-se a média da porcentagem de água, proteínas, lipídios e cinzas e o restante foi considerado carboidrato.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

#### 3.3.1 Diâmetro médio equivalente

Foi determinado com o auxílio de uma série de peneiras Tyler, na sequência decrescente de aberturas (mm): 2,00; 1,68; 1,40; 1,19 e 1,00, em um aparelho vibratório da marca Produtest, com rotação de 80 rpm, durante 10 minutos, em triplicata. O diâmetro médio foi calculado com a definição de Sauter pela Equação 3.1, onde  $x_i$  é a fração mássica retida e  $d_i$  é o diâmetro médio das partículas retidas na peneira, respectivamente.

$$d_p = \frac{1}{\sum_i^n \frac{x_i}{d_i}} \quad \text{Equação (3.1)}$$

#### 3.3.2 Massa específica absoluta

A massa específica absoluta foi obtida pela relação entre a massa da amostra de sementes e o volume do sólido, a qual exclui tanto os poros das partículas quanto os espaços interpartículas. Seu valor foi determinado por picnômetro a gás hélio, em aparelho Micromeritics AccuPyc 1330, USA, no Laboratório de Análises e Caracterização de Produtos e Processos (FEQ/UNICAMP). Este instrumento utiliza o método de deslocamento de gás, baseando-se no princípio de que o fluido é capaz de penetrar todos os poros abertos maiores que o diâmetro de sua molécula e, o que não é penetrado pelo gás é considerado como o volume de sólido. A principal vantagem desta técnica reside na não interação do gás com os constituintes da amostra (PRADO; SARTORI, 2002).

#### 3.3.3 Massa específica aparente da partícula

Também foi determinado o valor da massa específica aparente da semente, definida pela razão entre a massa de sólidos e o volume total das partículas, que inclui os poros, mas exclui os espaços interpartículas. Utilizou-se a método descrito por Webb e Orr (1998).

Nesta metodologia, coloca-se uma quantidade conhecida de material em um picnômetro ou balão volumétrico, completa-se o volume com um fluido que penetre pouco na amostra e que não interaja com a semente. Em seguida determina-se o peso do conjunto.

Tendo conhecimento da massa específica do solvente, é possível calcular o volume adicionado de solvente e por diferença determinar o volume de sementes contidas no recipiente volumétrico, prosseguindo-se o cálculo de sua massa específica aparente. Foram realizados experimentos preliminares com as sementes de painço e verificou-se que o etanol foi adequado para o teste, pois satisfaz as condições necessárias.

### 3.3.4 Densidade *bulk*

Definida como a razão entre a massa de uma quantidade conhecida de amostra pelo volume das partículas empacotadas livremente. Foi determinada por um procedimento que consistiu em acondicionar as sementes de painço em um recipiente de volume conhecido e quantificar a massa de partículas, conforme descrito por Holdich (2002).

### 3.3.5 Porosidade

A porosidade das partículas de painço foi determinada a partir da relação entre as massas específicas aparente ( $\rho_{ap}$ ) e absoluta ( $\rho_{abs}$ ), pela equação abaixo:

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{abs}} \quad \text{Equação (3.2)}$$

Para o leito fixo, a porosidade foi determinada pela Equação 3.3, em função das densidades *bulk* e aparente, conforme proposto por Keey (1992):

$$\varepsilon_l = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{ap}} \quad \text{Equação (3.3)}$$

### 3.3.6 Fator de forma

Para a determinação do fator de forma das partículas de painço, foi utilizado microscópio óptico marca Cole Parmer<sup>®</sup>, modelo 48920-20, USA, acoplado a um sistema de aquisição de micrografias Cole Parmer<sup>®</sup> NTSC, modelo 49901-030, USA. Seu valor foi

quantificado com auxílio do *software* Sigma Scan<sup>®</sup>, através da Equação abaixo, realizando-se um total de 100 medidas.

$$Fator\ de\ forma = \frac{4 \cdot \pi \cdot Area}{(Perímetro)^2} \quad \text{Equação (3.4)}$$

Um círculo perfeito apresenta um fator de forma igual a um, e para uma linha este parâmetro equivale a zero. Como referência, um triângulo equilátero apresenta fator de forma em torno de 0,61.

### 3.3.7 Ângulo de repouso

Definido como o ângulo máximo do talude formado pelos grãos em relação à horizontal, é influenciado pelo teor de umidade, tamanho e forma do grão. Conhecê-lo é importante para a determinação da capacidade estática dos silos, da capacidade das correias transportadoras e no dimensionamento de moegas, dutos e rampas de descarga de grãos (SILVA; CORRÊA, 2000).

Foi estimado o ângulo de repouso das partículas, pelo método do tambor rotativo, onde as sementes de painço foram adicionadas ao tambor e homogeneizadas, e em seguida lido o ângulo de inclinação formado ao deslizamento da primeira camada de partículas. Foram executadas 10 medidas experimentais, com as sementes *in natura*. Os ensaios foram executados no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem (UNICAMP).

As sementes de painço foram classificadas segundo o grau de escoabilidade, de acordo com a Tabela 3.1, conforme recomendado por Jong, Hoffmann e Finkers (1999).

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

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

### 3.3.8 Classificação de Geldart

Foi possível classificar qualitativamente as sementes de painço por meio do diagrama de Geldart (1973), a fim de prever seu comportamento fluidodinâmico.

### 3.3.9 Análise de superfície

A superfície das sementes *in natura* de *Setaria italica* foram avaliadas quanto a uniformidade, rugosidade e possíveis fissuras por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura, marca LEO Electron Microscopy/ Oxford (Inglaterra). As análises foram realizadas no Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração (FEQ/ UNICAMP).

## 3.4 CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA

### 3.4.1 Pureza

É um parâmetro utilizado para determinar a composição percentual por peso, a fim de identificar a presença de diferentes espécies de sementes e/ou material inerte na amostra, e por inferência no lote de sementes. A amostra foi homogeneizada e, posteriormente, o teor de pureza foi determinado por separação visual, com base no método descrito por BRASIL (2009), pesando-se cerca de  $1 \pm 0,05$  g de sementes em balança analítica marca GEHAKA, modelo AG 200 com precisão de 0,0001g. Em seguida a fração de sementes consideradas viáveis foi separada do material inerte e então novamente pesada, sendo realizadas 10 repetições experimentais.

### 3.4.2 Peso de mil sementes

Foi determinado de acordo com a metodologia descrita por BRASIL (2009), na qual 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.

### 3.4.3 Germinação e Índice de velocidade de germinação

O teste de germinação ocorreu em ambiente com iluminação regular e condições de temperatura e umidade controladas, 28°C e 86%, respectivamente. Utilizou quatro subamostras de 50 sementes puras, semeadas em papel mata borrão umedecido com água destilada, na proporção de 2,5 vezes o peso do papel seco. As contagens foram realizadas conforme descrito por Brasil (2009) e por meio desses valores foi possível determinar a porcentagem de germinação.

O percentual germinativo não permite distinguir amostras que germinem rapidamente, daquelas em que o processo é lento. Dessa forma, a avaliação do vigor identifica possíveis diferenças significativas na qualidade fisiológica de lotes que apresentem poder germinativo semelhante (MARCOS FILHO; CICERO; SILVA, 1987). De acordo com Carvalho e Nakagawa (2000), o vigor pode ser refletido através de várias características, como a velocidade de germinação. Portanto, foi avaliado o índice de velocidade de germinação (IVG) segundo a metodologia descrita por Nakagawa (1999), baseada na Equação de Maguire (1962):

$$IVG = \frac{G_1}{N_1} + \frac{G_2}{N_2} + \dots + \frac{G_n}{N_n} \quad \text{Equação (3.5)}$$

Onde o IVG representa o índice de velocidade de germinação (adim.);  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_n$  são o número de plântulas normais computadas na primeira contagem, na segunda contagem e na última contagem; e  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  equivalem ao número de dias da semeadura à primeira, à segunda e à última contagem, respectivamente.

## 3.5 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

### 3.5.1 Caracterizações preliminares

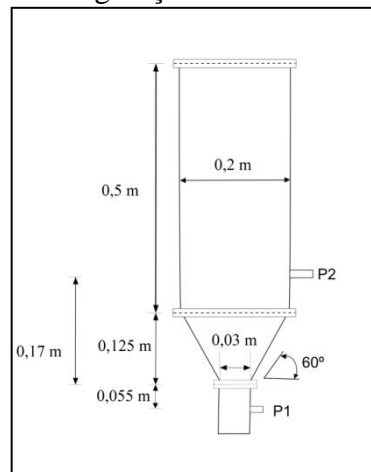
Além de avaliar a classificação da partícula pelo Diagrama de Geldart (1973), decidiu-se realizar testes fluidodinâmicos em dois tipos de leito: jorro cônico (UNICAMP) e jorro convencional (UFPA), a fim de avaliar o comportamento do material nas duas configurações e assim determinar qual dos leitos seria utilizado nas posteriores análises: secagem e planejamento experimental.

### 3.5.2 Fluidodinâmica em leito de jorro cônico

Todos os procedimentos em leito cônico foram executados na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem (LFS). Inicialmente realizou-se uma série de ensaios, com diferentes quantidades de material, para verificar os valores de carga máxima e mínima, de acordo com as restrições do sistema de aquisição de dados e configuração do leito. Dessa forma, variou-se as cargas nos seguintes valores: 500; 800; 1100 e 1400 g. Os experimentos foram realizados em temperatura ambiente, a qual se manteve em torno de 28,5°C.

Foi utilizado um leito de jorro com geometria cônico-cilíndrica construído em acrílico Plexiglas®. O equipamento tinha a base cônica com altura de 0,12 m, ângulo de 60°, diâmetro de entrada de ar ( $D_i$ ) de 0,03 m e diâmetro interno e altura da coluna de 0,2 e 0,5 m, respectivamente (Desenho 3.1), com relação  $D_i/D_c$  de 0,15. Os dados experimentais, necessários para a construção das curvas fluidodinâmicas, foram coletados por meio de um instrumento virtual construído com o auxílio do *software* LABVIEW™ 8.6

Desenho 3.1 – Configuração do leito usado como cônico.



Ao leito de jorro, foram conectados dois pontos de tomada de baixa e alta pressão localizados a 0,17 m acima e 0,055 m abaixo da entrada de ar do leito, respectivamente, conectados também a um transdutor diferencial de pressão por meio de mangueiras com comprimento de 0,66 m.

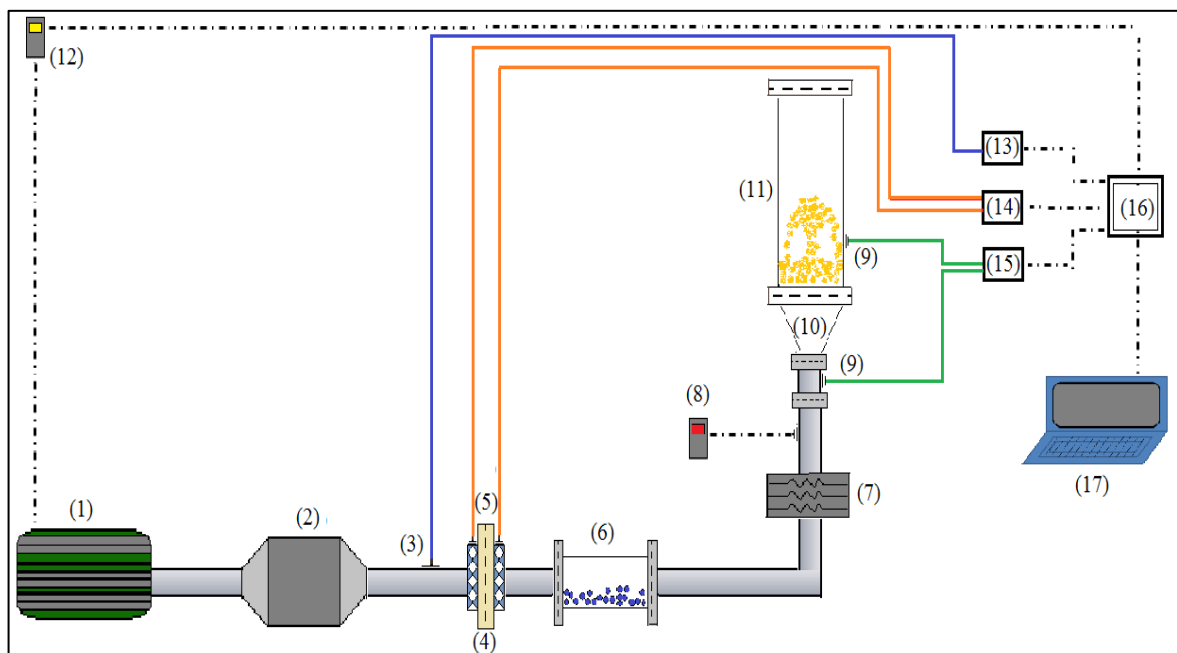
É importante salientar que o sistema utilizado para o estudo fluidodinâmico é completamente instrumentado para ser usado como secador, de forma que o ar de secagem que alimentava a câmara *plenum* era fornecido por um compressor radial Ibram® de 7,5 cv de



potência (1), conectado a um inversor de frequência (12), cuja função foi ajustar a vazão de ar, conforme mostra o Desenho 3.2.

O ar passava através de uma linha de aço galvanizado de 0,0605 m de diâmetro externo e 0,0532 m de diâmetro interno, atravessando um trocador de calor (2), a placa de orifício (4) com diâmetro de 0,0214 m, um leito de sílica gel (6) e um aquecedor elétrico constituído de três resistências, que em paralelo correspondem a 1220 W (7). Mediu-se a temperatura do ar com um termopar (8), o qual seguiu em direção à câmara de jorro, constituída pela parte cônica (10) e cilíndrica (11).

Desenho 3.2 – Esquema do sistema experimental (leito de jorro cônico) .



O sistema em que os dados foram adquiridos era composto por três transdutores de pressão marca Cole e Parmer®, sendo dois transdutores diferenciais (14) e (15), e um transdutor absoluto (13).

Os transdutores de pressão recebiam os sinais pneumáticos de pressão no leito (9), na placa de orifício (5) e na linha (3), respectivamente, transformando em sinal analógico, que foi recebido pelo sistema de aquisição de dados (16) e enviado para o microprocessador (17).

Os valores da vazão do ar de entrada no leito foram obtidos pelas medidas de pressão estática na linha e da pressão na placa de orifício, cujos valores inseridos na equação de calibração (Equação 3.6), permitiram a obtenção da vazão mássica do ar ( $Q$ ) em kg/min (OWER; PANKHURST, 1977).

$$W_{ar} = 2,0196 \left[ \frac{\Delta P_{PO}}{273 + T_{ar}} \right]^{1/2} - 0,6388 \left[ \frac{\Delta P_{PO}^{3/2}}{(P_{est} + 760)(273 + T_{ar})^{1/2}} \right] \quad \text{Equação (3.6)}$$

Onde:

$W_{ar}$ : Vazão mássica (kg/min)

$T_{ar}$ : temperatura do ar na entrada do orifício (°C)

$\Delta P_{PO}$ : Queda de pressão na placa de orifício (cmH<sub>2</sub>O)

$P_{est}$ : Pressão estática a montante da placa de orifício (cmH<sub>2</sub>O)

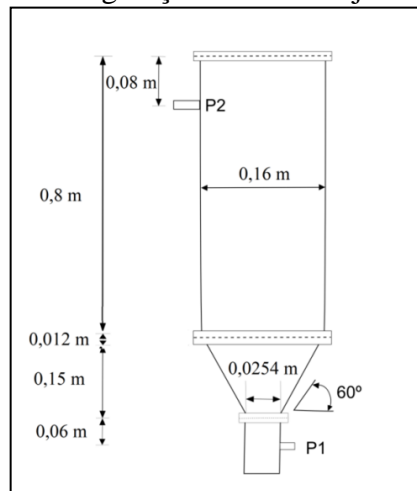
Para determinação das curvas fluidodinâmicas, primeiramente foi realizado um teste em branco, a fim de verificar a queda de pressão na tela que suportava as partículas e nas paredes do leito. Posteriormente, o leito foi carregado com o material de trabalho e gradativamente aumentou-se a vazão de ar, sendo possível adquirir os valores de queda de pressão no leito, na placa de orifício e na linha, em tempo real. Os valores da queda de pressão no leito foram descontados da queda de pressão do teste em branco.

### 3.5.3 Fluidodinâmica em leito de jorro convencional

Os ensaios em leito de jorro convencional foram realizados na Universidade Federal do Pará (UFPA), variando a quantidade de sementes, de acordo com as restrições impostas pela configuração do equipamento. Foram executados ensaios fluidodinâmicos para as seguintes cargas: 1300, 1700 e 2100 g, em temperatura ambiente (28°C).

O sistema experimental utilizado consistiu em um leito de geometria cônico-cilíndrica, com uma base cônica de 0,15 m de altura, ângulo de 60° e diâmetro de entrada do ar ( $D_i$ ) de 0,0254 m. Sua coluna cilíndrica foi confeccionada em acrílico, a fim de permitir a visualização da dinâmica das partículas, com dimensões de 0,8 m de altura e diâmetro interno ( $D_c$ ) de 0,16 m, de tal forma que a relação  $D_i/D_c$  foi de 0,16 (Desenho 3.3).

Desenho 3.3 – Configuração do leito de jorro convencional.



O Desenho 3.4 mostra o sistema experimental instalado no Laboratório de Secagem e Recobrimento de Partículas (UFPA), utilizado nesta etapa dos ensaios, o qual era constituído pela parte cônica confeccionada em ferro (11) e por uma coluna cilíndrica (12) em acrílico. Conforme é visualizado, o fluxo de ar necessário foi fornecido por um soprador de 4 CV (1), instalado em uma tubulação de ferro galvanizado de duas polegadas (0,0508 mm) de diâmetro. Ao longo da linha havia uma válvula globo (2) com o objetivo de ajustar o fluxo de ar que atravessava a tubulação, um trocador de calor (3), uma placa de orifício (5) de 0,003 m de espessura, um leito de sílica gel (7), um conjunto de resistências elétricas em série (8) controladas por um variac (13), e um termopar (10) utilizado para monitorar a temperatura do ar ao entrar no leito.

As tomadas de pressão na linha (4), na placa de orifício (6) e no leito (9) foram obtidas por meio de manômetros diferenciais de tubo em forma de U, com os fluidos manométricos, mercúrio, tetracloreto de carbono e água destilada, respectivamente (14).

A equação geral de Ower e Pankhurst (1977) para a vazão de ar na entrada do leito é função de uma série de parâmetros, como: diâmetros do orifício da tubulação e da placa de orifício, assim como do coeficiente de descarga. Visto que os sistemas experimentais utilizados para os leitos de jorro cônico e convencional não são idênticos e portanto não apresentam as mesmas características geométricas, foi necessário calcular uma equação de Ower e Pankhurst (1977) em função das características do sistema experimental no qual foi utilizado o leito de jorro convencional, resultando a Equação 3.7:

$$W_{ar} = 2,7099 \left[ \frac{\Delta P_{PO}}{273 + T_{ar}} \right]^{1/2} - 0,8546 \left[ \frac{\Delta P_{PO}^{3/2}}{(P_{est} + 760)(273 + T_{ar})^{1/2}} \right] \quad \text{Equação (3.7)}$$

Onde:

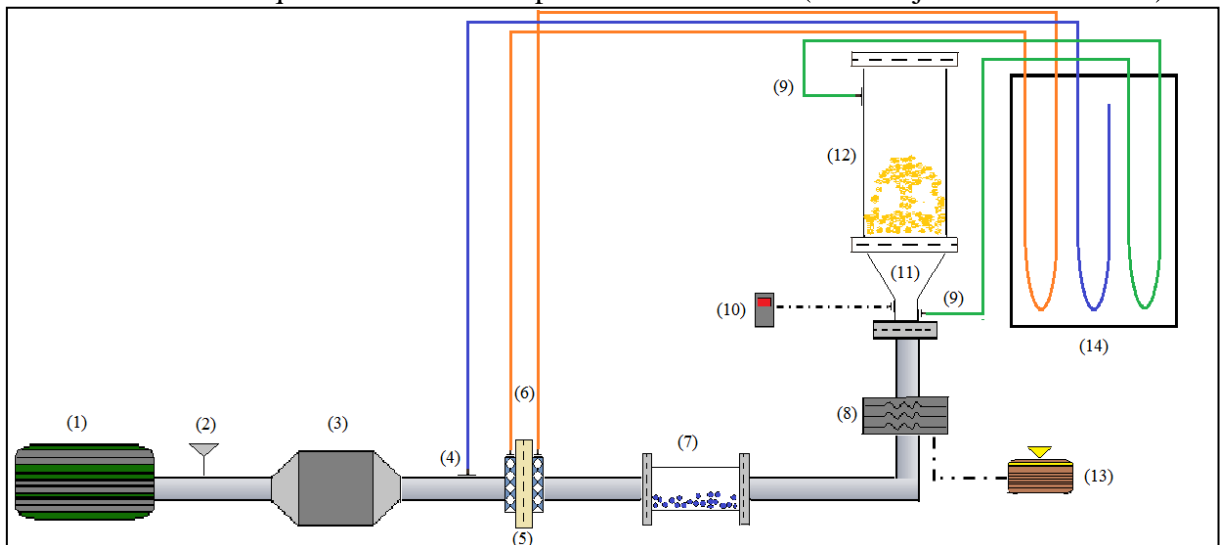
$W_{ar}$ : Vazão mássica (kg/min)

$T_{ar}$ : temperatura do ar na entrada do orifício (°C)

$\Delta P_{PO}$ : Queda de pressão na placa de orifício (cmH<sub>2</sub>O)

$P_{est}$ : Pressão estática a montante da placa de orifício (cmH<sub>2</sub>O)

Desenho 3.4 – Esquema do sistema experimental utilizado (leito de jorro convencional).



Antes de construir as curvas fluidodinâmicas, foi realizado um ensaio com o leito vazio, para verificar a queda de pressão na tela que suportava as partículas e pelo atrito com as paredes. Posteriormente, o leito foi carregado com o material de trabalho e gradativamente aumentou-se a vazão de ar, tornando possível adquirir os valores de queda de pressão no leito, na placa de orifício e na linha. Os valores da queda de pressão no leito foram descontados da queda de pressão do teste em branco.

### 3.5.4 Parâmetros fluidodinâmicos

Os parâmetros fluidodinâmicos são determinados com o objetivo de verificar as melhores condições relacionadas à dinâmica das partículas. Esses índices são geralmente considerados como indicativos do comportamento dinâmico do leito e podem ser explorados

como uma forma de monitorar o processo (COSTA, 2010). A velocidade de jorro mínimo ( $U_{jm}$ ), queda de pressão estável ( $\Delta P_S$ ) e queda de pressão máxima ( $\Delta P_{máx}$ ) foram quantificadas com base nas curvas características.

A metodologia consistiu em carregar o leito com as partículas e em seguida ligar o soprador, aumentando a vazão de ar até um determinado limite, o qual teve como referência a visualização de um regime estável, pois além deste ponto foram verificadas oscilações e uma má fluidização, o que poderia acarretar em descaracterização do jorro, e formação de “*slugging*”. Os testes de fluidodinâmica foram obtidos realizando medidas de vazão crescente (ida) e decrescente (volta) do ar de entrada, com suas respectivas quedas de pressão na linha, no leito e na placa de orifício. Mediu-se a velocidade de jorro mínimo baseada na curva decrescente, devido ser mais reprodutiva do que a curva de crescente, uma vez que a curva crescente é mais suscetível a possíveis variações, devido por exemplo, à compactação ao carregar o leito. A partir desses ensaios, realizados em duplicata para diferentes cargas (leito cônico: 500, 800, 1100 e 1400 g; leito convencional: 1300, 1700 e 2100 g), foram construídos os gráficos de queda de pressão em função da velocidade superficial do gás, conforme descrito por Mathur e Epstein (1974).

Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os valores teóricos estimados por meio de correlações empíricas sumarizadas nas Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4. Em seguida, foi calculado o desvio relativo, conforme mostra a Equação 3.8.

$$\text{Desvio Relativo} = \frac{|\text{valor teórico} - \text{valor experimental}|}{\text{valor experimental}} \cdot 100 \quad \text{Equação (3.8)}$$

Tabela 3.2 - Correlações empíricas para a velocidade de jorro mínimo

Leito cônico	Equação
Markowski e Kaminski (1983)	$Re_{mj} = 0,028 Ar^{0,57} \left( H/D_i \right)^{0,48} \left( D_c/D_i \right)^{1,27} \quad (2.4)$
Choi e Meisen (1992)	$\frac{U_{mj}}{\sqrt{2gH}} = 0,147 \left( \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0,477} \left( d_p/D_c \right)^{0,61} \left( H/D_c \right)^{0,508} \left( D_i/D_c \right)^{0,243} \quad (2.5)$

Tabela 3.2 - Correlações empíricas para a velocidade de jorro mínimo (continuação)

Leito cônico		Equação
Gorshtein e Mukhlenov (1964)	$Re_{mj} = 0,174 \frac{Ar^{0,50}}{\left(\tan \frac{\theta}{2}\right)^{2,5}} \left(D_H/D_i\right)^{0,85}$	(2.6)
<b>Leito convencional</b>		<b>Equação</b>
Mathur e Gishler (1955)	$U_{jm} = \left(\frac{d_p}{D_c}\right) \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0,33} \left(\frac{2gH(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}\right)^{0,5}$	(2.7)
Choi e Meisen (1992)	$\frac{U_{mj}}{\sqrt{2gH}} = 0,147 \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}\right)^{0,477} \left(d_p/D_c\right)^{0,61} (H/D_c)^{0,508} \left(D_i/D_c\right)^{0,243}$	(2.5)
Brunello et al (1974)	$U_{jm} = 0,663 d_p^{0,741} H^{0,592} \left[\frac{2gH(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0,5}$	(2.8)
Uemaki et al (1983)	$U_{jm} = 0,977 \left(\frac{d_p}{D_c}\right)^{0,615} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0,274} \left[\frac{2gH(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0,324}$	(2.9)
Ogino et al (1993)	$U_{jm} = 0,0151 \left[\frac{\varepsilon_0^4}{2(1 - \varepsilon_0)}\right]^{0,5} \cdot \left[ (1 - \varepsilon_0) \frac{\rho_f(\rho_p - \rho_f)gD_c^3}{\mu^2} \right]^{0,25} \cdot \left(\frac{d_p}{D_c}\right) \cdot \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0,33} \left[\frac{2gH(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0,5}$	(2.10)

Tabela 3.3 - Correlações empíricas para a queda de pressão máxima

Leito cônico		Equação
Olazar et al (1993)	$-\frac{\Delta P_{máx}}{\Delta P_s} = 1 + 0,116 \cdot \left(H/D_i\right)^{0,5} [\tan(\theta/2)]^{-0,8} Ar^{0,0125}$	(2.16)
Kmiec (1980)	$\Delta P_{máx} = g(1 - \varepsilon_0)(\rho_p - \rho_f)H_0 [1 + 0,206 \exp(0,62 \cdot H/r_c)]$	(2.17)

Tabela 3.3 - Correlações empíricas para a queda de pressão máxima (continuação)

Leito convencional	Equação
Manurung (1964 olazar 1994)	$-\Delta P_{m\acute{a}x}/\rho_b g H = \left[ 0,8 + \frac{6,8}{\tan\theta} \left( \frac{D_i}{D_c} \right) \right] - 34,4 \frac{d_p}{H}$ (2.18)
Asenjo et al. (1977)	$-\Delta P_{m\acute{a}x}/\rho_b g H = 1 + 2,8 \exp[-0,312 H/D_c]$ (2.19)
Kmiec (1980)	$-\Delta P_{m\acute{a}x} = g(1 - \varepsilon_0)(\rho_p - \rho_f)H_0[1 + 0,206 \exp(0,62 \cdot H/r_c)]$ (2.17)

Tabela 3.4 - Correlações empíricas para a queda de pressão no jorro estável

Leito cônico	Equação
Manurung (1964)	$-\frac{\Delta P_s}{H\rho_b g} = \frac{1}{1 + \left[ 0,81(\tan\theta)^{1,5}/\phi^2 \right] \left( \frac{D_c d_p}{D_i^2} \right)^{0,78} \left( \frac{D_c}{H} \right)}$ (2.22)
Leito convencional	Equação
Olazar et al 1994	$-\frac{\Delta P_s}{H\rho_b g} = 3,85 \times 10^{-2} \left( \frac{H}{D_i} \right)^{0,12} \left( \frac{D_c}{D_i} \right)^{0,69} (Re_{ms})^{-0,31}$ (2.23)
Pallai e Nemeth (1969)	$-\frac{\Delta P_s}{\Delta P_{m\acute{a}x}} = 0,8 - 0,01 \frac{D_c}{D_i}$ (2.24)
Ogino et al (1993)	$\frac{\Delta P_s}{H\rho_b g} = 1,15 \left( \frac{H}{D_c} \right)^{0,5} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{0,33}$ (2.25)
Manurung (1964)	$-\frac{\Delta P_s}{H\rho_b g} = \frac{1}{1 + \left[ 0,81(\tan\theta)^{1,5}/\phi^2 \right] \left( \frac{D_c d_p}{D_i^2} \right)^{0,78} \left( \frac{D_c}{H} \right)}$ (2.22)

### 3.5.5 Análise da dinâmica nos dois leitos de jorro

Após os ensaios preliminares no leito de jorro cônico (UNICAMP) e leito de jorro convencional (UFPA), foi realizada a comparação entre os dados obtidos experimentalmente com os valores teóricos (determinados pelas correlações empíricas), para as duas configurações de leito.

Em seguida, foram verificados os valores de velocidade de jorro mínimo e queda de pressão estável com o objetivo de fixar as condições de operação para a secagem, de tal forma que garantisse a estabilidade do jorro, sem zonas mortas, à vazão de ar constante.

## 3.6 SECAGEM EM LEITO DE JORRO CONVENCIONAL

### 3.6.1 Umidificação

Visto que as sementes utilizadas durante os experimentos foram adquiridas no comércio de Belém (PA), tornou-se necessário a reumidificação do material, pois um dos objetivos desse trabalho era avaliar a secagem dessas sementes. Para isso, foi realizado um levantamento com o objetivo de verificar o conteúdo de umidade inicial de produtos agrícolas submetidos à secagem.

Constatou-se que sementes de nabo forrageiro submetidas à secagem em bandejas, apresentavam um teor de umidade inicial de 36 %b.s. (SOUSA et al., 2011); sementes de crambe continham diferentes teores de umidade inicial: 11, 13, 17, 25 e 28%b.s., e tiveram estes valores reduzidos por meio de um secador de leito fixo horizontal, com ventilação de ar forçada (FARIA et al., 2012). Ao realizar a cinética de secagem de sementes de feijão, as umidades iniciais das partículas foi de 20 e 30 %b.s no trabalho desenvolvido por Lima (1995), enquanto Afonso Júnior e Corrêa (1999) avaliaram sementes com teores de umidade inicial iguais à: 20,6 37,3 e 59,6%b.s. Para sementes de abóbora, o conteúdo inicial de umidade correspondia a 67%b.s. (SACILIK, 2007).

Com base nesses valores, as sementes de painço *in natura* foram reumidificadas de acordo com o seguinte procedimento: aspergiu-se um volume definido de água destilada sobre as sementes, as quais posteriormente foram armazenadas à 6°C. A cada 24h o processo foi repetido, completando um ciclo de 48 h, a fim de alcançar um teor de umidade em torno de 30% ± 0,01 em base seca. De acordo com o estudo realizado por Lima (1995), tanto as sementes de feijão verde umidificadas artificialmente, quanto as sementes úmidas



naturalmente, apresentaram o mesmo comportamento cinético, comprovando que o método consegue ser eficaz, de acordo com as características estruturais de cada material.

### **3.6.2 Operação, condições e coleta de dados durante a cinética de secagem**

De acordo com os resultados fluidodinâmicos obtidos experimentalmente, a configuração de leito escolhida para dar continuidade aos estudos de secagem e planejamento experimental foi o leito de jorro convencional, definindo-se a massa de 1700g de sementes como carga de operação, levando em conta a dinâmica das partículas, estabilidade, viabilidade do processo e quantidade de matéria prima.

Antes de iniciar a cinética, ainda com o leito vazio, o compressor foi ligado e a válvula globo aberta de tal forma que a queda de pressão no leito, na placa de orifício e na linha estivessem dentro da faixa de operação que garantisse uma fluidodinâmica estável (condições de velocidade de jorro mínimo e queda de pressão estável previamente determinadas). O aquecimento do ar foi ligado (resistências elétricas) e ajustou-se as temperaturas de operação. Foram necessários aproximadamente 40 min para que o sistema se tornasse estável.

Após esse período, o leito foi carregado com as sementes de painço umidificadas, com um teor inicial de umidade na faixa de 30%b.s., e o fluxo de ar foi levemente ajustado, para que a vazão utilizada fosse ligeiramente superior à vazão de jorro mínimo. Alcançada esta condição, mantiveram-se constantes a queda de pressão e a vazão de ar (1200 Pa e 0,62 m/s, respectivamente) durante a cinética de secagem, condições estas necessárias para manter o jorro estável.

O intervalo de trabalho para a variável temperatura do ar de secagem foi escolhido com base no planejamento experimental, correspondendo: 44, 65 e 86°C. Durante os ensaios, o teor de umidade das sementes foi monitorado em intervalos de tempo definidos, retirando-se amostras em duplicata através da parte superior do leito (sistema aberto) com o auxílio de um “amostrador”, as quais em seguida foram pesadas em balança analítica e imediatamente transportadas com o auxílio de um dessecador para uma estufa com circulação forçada de ar à  $105 \pm 3$  °C por 24h. As amostras foram coletadas nos seguintes intervalos de tempo: 0; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 90; 110 min e a última verificação foi ao final da secagem em 132 min, totalizando um tempo para a avaliação da cinética de secagem de 2 h e 12 min. Ressalta-se que a massa de partículas retiradas (em torno de 3 g) não influenciou a dinâmica do processo. Posteriormente a massa de sólido seco, de acordo com seu respectivo intervalo

de tempo, foi quantificada e o teor de umidade determinado, plotando-se em seguida a curva de secagem.

### 3.6.3 Construção das curvas de cinética de secagem

As curvas de cinética foram construídas com o auxílio das Equações 3.9 e 3.10, plotando-se os valores de  $X_R$  em função do tempo de secagem.

$$X_{bs} = \left( \frac{m(t) - m_{ss}}{m_{ss}} \right) \times 100 \quad \text{Equação (3.9)}$$

$$X_R = \frac{X(t) - X_e}{X_i - X_e} = \frac{X(t)}{X_i} \quad \text{Equação (3.10)}$$

$m(t)$ : variação da massa de sólidos durante o processo em função do tempo;

$m_{ss}$ : massa de sólidos secos obtida em 24 h;

$X_{bs}$ : teor de umidade em base seca;

$X_R$ : razão de umidade ou teor de umidade adimensional;

$X(t)$ : teor de umidade da amostra em função do tempo;

$X_i$ : umidade inicial da amostra;

$X_e$ : umidade de equilíbrio.

Uma vez que a umidade de equilíbrio ( $X_e$ ) é significativamente menor do que o conteúdo de umidade inicial ( $X_i$ ) e devido a variações na umidade relativa do ar de secagem durante o processo, foi assumido que seu valor foi igual a 0 g/g de material em base seca, simplificando a equação original  $X_R = X(t) - X_e / X_i - X_e$ , para  $X_R = X(t) / X_i$ . Outros autores também fizeram essa consideração, tais como: Sacilik (2007), Doymaz e Pala (2003) e Diamante e Munro (1993).

Os pontos experimentais das curvas de cinética foram ajustadas por meio de modelos empíricos disponíveis na literatura, conforme a Tabela 3.5. Seus ajustes foram realizados através de uma estimativa não linear, utilizando o método Quasi - Newton, com o auxílio do software Statistica<sup>®</sup> 7.0.

Tabela 3.5 – Modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem

Designação (ano)	Modelo	Equação
Lewis (1921)	$X_R = \exp(-k.t)$	(2.29)
Henderson e Pabis (1961)	$X_R = a.\exp(-k.t)$	(2.30)
Page (1949)	$X_R = \exp(-k.t^n)$	(2.31)
Aproximação por Difusão (1980)	$X_R = a.\exp(-kt) + (1 - a).\exp(-k.b.t)$	(2.32)
Midilli et al. (2002)	$X_R = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	(2.33)
Wang e Singh (1978)	$X_R = 1 + a.t + b.t^2$	(2.34)

Os modelos mais adequados foram escolhidos com base nas estatísticas: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio médio relativo – D (Equação 3.11), erro padrão da estimativa – (e) (Equação 3.12) (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999) e pela análise dos gráficos da distribuição dos resíduos (aleatório ou tendencioso).

$$D = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - Y'|}{Y} \quad \text{Equação (3.11)}$$

$$e = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y')^2}{df}} \quad \text{Equação (3.12)}$$

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

### 3.6.4 Determinação do coeficiente efetivo de difusão e da energia de ativação

O coeficiente efetivo de difusão foi obtido através do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, aos dados experimentais de secagem das sementes de painço. A solução analítica da difusão para uma esfera é dada pela Equação 3.13 (CRANCK, 1975)

$$X_R = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad \text{Equação (3.13)}$$

Na qual  $D_{eff}$  é a difusividade efetiva ( $m^2/s$ ),  $r$  é o raio da esfera (m),  $n$  é o número de termos e  $t$  é o tempo em segundos. Para períodos mais longos de secagem a Equação 3.13 pode ser simplificada em função apenas do primeiro termo, que após ser logaritmando se apresenta de acordo com a Equação 3.14:

$$\ln X_R = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad \text{Equação (3.14)}$$

Para determinar a difusividade efetiva, foi realizada a plotagem dos termos  $\ln(X_R)$  *versus* tempo, fornecendo a relação:  $a = D_{eff} \pi^2 / r^2$ . A energia de ativação ( $E_a$ ) foi determinada pela inclinação da equação de Arrhenius (Equação 3.15):

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \left[ \frac{E_a}{R(T + 273,15)} \right] \quad \text{Equação (3.15)}$$

Onde  $D_0$  é o fator pré exponencial de Arrhenius ( $m^2/s$ ),  $E_a$  é a energia de ativação para a difusão da umidade,  $R$  é a constante universal dos gases ( $R = 8,31 \text{ J/molK}$ ) e  $T$  a temperatura absoluta em Kelvin. O valor de  $E_a$  foi calculado pela regressão linear de  $\ln D_{eff}$  *versus* temperatura.

### 3.7 PROJETO EXPERIMENTAL

Ao estabelecer um planejamento, torna-se necessário definir quais serão as variáveis de entrada ou independentes, responsáveis por um possível efeito sobre as variáveis de resposta (saída) ou dependentes (entrada). Após essa primeira decisão, realiza-se um levantamento de informações a fim de estimar possíveis faixas operacionais para as variáveis escolhidas.

A literatura fornece uma série de condições de operação e variedades de produtos submetidos ao estudo de secagem, tais como o trabalho desenvolvido por Roberts, Kidd e Padilla Zakour (2008), que avaliaram a cinética de secagem de sementes de uva, as quais costumam ser resíduos em indústrias de processamento de sucos e vinho, em um secador

convectivo à uma velocidade de ar constante e igual a 1,5 m/s, nas temperaturas de 40, 50 e 60°C. Faria (1998) avaliou a secagem de sementes de urucum em leito fixo, com diferentes temperaturas do ar de secagem: 26, 40, 60, 80 e 94°C. No que diz respeito a secagem de grãos por diferentes métodos, Lima (1995) avaliou a cinética de sementes de feijão, não só no leito de jorro, mas também nos leitos fluidizados e fixo, utilizando temperaturas para o ar de secagem de 73 e 83°C.

No presente trabalho foram utilizados cinco níveis de tempo: 48, 60, 90, 120 e 132 min e cinco diferentes temperaturas: 44, 50, 65, 80 e 86°C (Tabela 3.6). Por se tratar de secagem em jorro, método que promove um bom contato entre as partículas com o ar de secagem, foram utilizados intervalos de tempo relativamente curtos com o propósito de avaliar a influência deste parâmetro nas respostas propostas. Com relação aos valores atribuídos à variável  $X_2$ , verifica-se que os três primeiros níveis: -1,41; -1 e 0 equivalentes à 44, 50 e 65°C, representam valores utilizados rotineiramente em processos de secagem de magnitude industrial, escala piloto ou em laboratório, como mostram os trabalhos acima citados. Por outro lado, os níveis +1 e +1,41 (80 e 86°C, respectivamente) são considerados como valores elevados quando se trata da secagem de produtos naturais, mas que foram introduzidos neste planejamento com a finalidade de identificar com maior amplitude de que forma a variável temperatura influencia no processo de secagem e na qualidade fisiológica da semente.

Tabela 3.6 – Valores codificados e originais para as variáveis utilizadas no PCCR

Variáveis originais (notação)	Variáveis Codificadas	Unidades	Níveis				
			-1,41	-1	0	+1	+1,41
Tempo de secagem (t)	$X_1$	min	48	60	90	120	132
Temperatura do ar (T)	$X_2$	°C	44	50	65	80	86

O projeto experimental consistiu em um planejamento composto central rotacional (PCCR), com quatro repetições no ponto central, totalizando 12 ensaios (Tabela 3.7), para determinar a influência dos parâmetros tempo ( $X_1$ ) e temperatura do ar de secagem ( $X_2$ ) sobre a razão de umidade ( $X_R$ ), a porcentagem germinativa (G) e o índice de velocidade de germinação (IVG).

A interpretação dos resultados foi realizada utilizando o aplicativo *Statistica*®7.0, baseada na análise de variância e na análise estatística dos experimentos, com o objetivo de encontrar um modelo que descrevesse, com base nas evidências experimentais, o comportamento do processo estudado, aplicando em seguida a metodologia de superfície de resposta (em função dos modelos propostos para cada variável de resposta). O ponto ótimo (em função dos dados experimentais) foi determinado por meio da Função Desejabilidade Global, conforme descrito por Akhnazarova e Kafarov (1982) e Barros Neto, Scarminio e Bruns (2010).

Tabela 3.7 - Matriz de experimentos

Corridas	$X_1$	$X_2$	$X_R$	G (%)	IVG
1	-1	-1	$X_{R1}$	$G_1$	$IVG_1$
2	+1	-1	$X_{R2}$	$G_2$	$IVG_2$
3	-1	+1	$X_{R3}$	$G_3$	$IVG_3$
4	+1	+1	$X_{R4}$	$G_4$	$IVG_4$
5	$-\alpha$	0	$X_{R5}$	$G_5$	$IVG_5$
6	$+\alpha$	0	$X_{R6}$	$G_6$	$IVG_6$
7	0	$-\alpha$	$X_{R7}$	$G_7$	$IVG_7$
8	0	$+\alpha$	$X_{R8}$	$G_8$	$IVG_8$
9	0	0	$X_{R9}$	$G_9$	$IVG_9$
10	0	0	$X_{R10}$	$G_{10}$	$IVG_{10}$
11	0	0	$X_{R11}$	$G_{11}$	$IVG_{11}$
12	0	0	$X_{R12}$	$G_{12}$	$IVG_{12}$

---

---

## **Capítulo 4**

### **Resultados e Discussão**

---

---

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO - QUÍMICA

A Tabela 4.1 mostra a composição centesimal das sementes de painço *in natura*. A porcentagem de carboidratos foi obtida por diferença.

Tabela 4.1 – Composição centesimal das sementes de painço *in natura*

Propriedade (Unidade)	Valor médio $\pm$ desvio
Teor de umidade (% bs)	13,85 $\pm$ 1,02
Proteína (%)	11,19 $\pm$ 0,23
Resíduo mineral fixo (%)	2,90 $\pm$ 0,07
Lipídios (%)	3,26 $\pm$ 1,00
Carboidratos totais* (%)	68,84 $\pm$ 1,41

\*Obtidos por diferença. discutir esses dados

Alguns autores reportam o teor de proteína de sementes de *Setaria itálica* nas seguintes faixas: 10,6 a 15,2 % (TAIRA, 1968); 9,6 % (WANKHEDE et al., 1979) e FAO (2013) informa que sementes apresentam em torno de 10g/ 100 g. Portanto, o resultado encontrado neste trabalho é compatível com a literatura.

O teor de umidade determinado neste experimento está na faixa dos resultados encontrados por Wankhede et al. (1979) e FAO (2013 ou 1995), 12,2 e 12%, respectivamente. É importante manter o controle de umidade em grãos e sementes, pois a respiração aumenta exponencialmente com o acréscimo no teor de umidade, ocasionando perdas no poder germinativo e vigor (PARK et al, 2007).

Em relação à porcentagem de lipídios, o valor calculado (3,2664 g/100 g) está conforme o previsto por FAO (2013) (4 g/100 g), mas diverge de Wankhede et al. (1979), que apresenta um valor correspondente a 14,8 g/100 g. De acordo com o Instituto Adolfo Lutz (2008) o teor de lipídios é quantificado com base na solubilidade do reagente utilizado diante da amostra avaliada. Sua obtenção é feita por meio de extração com um determinado solvente orgânico, resultando em um resíduo que posteriormente é quantificado gravimetricamente. Esse resíduo obtido não é constituído somente pelos lipídios, mas por todos os componentes



que, nas condições da determinação, sejam extraídos pelo solvente. A metodologia empregada por Wankhede et al. (1979) para a determinação da porcentagem de lipídios, descreve a utilização de uma mistura clorofórmio:metanol (2:2 v/v), enquanto que neste trabalho foi utilizado éter de petróleo como solvente, o que pode estar atrelado à diferença entre os valores obtidos.

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA

No que diz respeito à caracterização qualitativa, de acordo com o estudo feito por Carmona, Martins e Fávero (1998), o tempo médio de germinação das sementes de *Setaria geniculata* à 25°C, na presença de luz, foi em média de 6 dias e o índice de uniformidade de germinação foi de 18,2. Com relação à porcentagem de germinação, verificou-se por meio do teste de Tukey que a presença ou ausência de luz não influenciou estatisticamente na germinação, resultando em 36 e 34%, respectivamente.

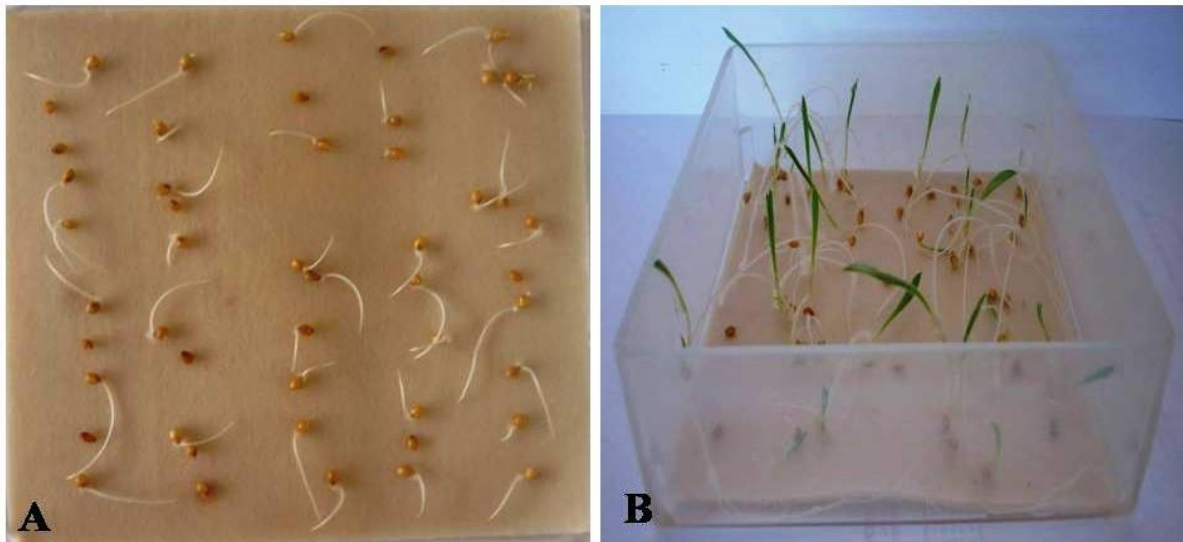
Silva et al. (2011) também adotaram a metodologia descrita por Brasil (2009) e encontraram para o painço os seguintes percentuais de germinação em 10 dias: para a temperatura igual a 20°C a germinação foi equivalente a 64%, para 25°C foi de 65% e na faixa de temperatura de 20-30°C se manteve em 64%. Estes resultados foram realizados na condição de semeadura sobre papel.

A Tabela 4.2 mostra os resultados da caracterização qualitativa das sementes de painço *in natura* (teor de umidade de  $13,85 \pm 1,02$  % b.s). É observado que as sementes apresentam boa capacidade germinativa (88%) e que seu IVG foi elevado, mostrando que a maior parte das sementes germinaram nos primeiros dias de contagem. Foram utilizadas quatro subamostras de 50 sementes e os resultados apresentados são as médias das replicatas. A Fotografia 4.1 mostra o desenvolvimento das sementes durante os ensaios.

Tabela 4.2 – Características qualitativas das sementes de painço *in natura*

Análise (Unidade)	Valor médio $\pm$ desvio
Germinação (%)	$88 \pm 4,32$
Índice de velocidade de germinação (IVG)	$36,87 \pm 4,68$
Peso de mil sementes (g)	$5,29 \pm 0,03$
Pureza (%)	$88,78 \pm 1,98$

Fotografia 4.1 – Teste de germinação com sementes de painço.



Onde: (A) representa as sementes no 2º dia e (B) ao 10º dia.

Como pode ser observado, as sementes avaliadas neste estudo apresentaram porcentagens de germinação superior ao relatado por Silva et al. (2011), o que pode estar relacionado às condições de armazenagem da semente (tempo, temperatura e umidade) antes da realização dos ensaios, uma vez que estes parâmetros podem influenciar significativamente nos percentuais de germinação, assim como no vigor (STANISAVLJEVIC et al., 2011; CARMONA; MARTINS; FÁVERO, 1998; FINCH-SAVAGE et al., 2010).

Além disso, Carvalho e Nakagawa (2000) relatam que a origem das sementes pode ter grande reflexo em seu comportamento durante a fase da germinação, ressaltando que esta influência pode estar relacionada com as condições climáticas a que as plantas foram submetidas durante a fase de produção, gerando reflexos na qualidade, e podendo ou não resultar em efeitos na sua composição química.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os resultados dos ensaios para a determinação das propriedades físicas, realizadas com as sementes de painço *in natura*, são apresentados na Tabela 4.3. Verifica-se que o valor de massa específica aparente é menor do que a real, conforme prevê a teoria (KEEY, 1992).

Ainda analisando a Tabela 4.3, é observado que as sementes de painço são classificadas, em função do ângulo de repouso, como sólidos que apresentam boa fluidez (JONG; HOFFMAN; FINKERS, 1999), favorecendo as condições de escoabilidade, transporte e armazenagem, assim como a dinâmica no leito de jorro. Segundo Park et al.

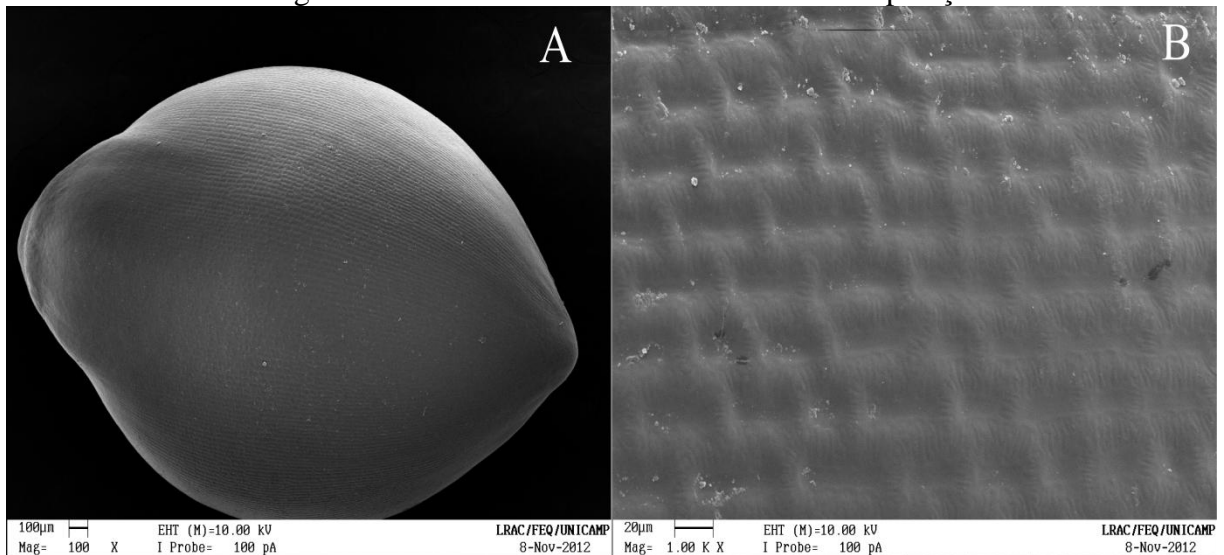
(2007), o ângulo de repouso determina o volume do cone na parte superior do silo, inclinação do fundo do silo para a descarga natural, inclinação de dutos de transporte por gravidade e capacidade de transporte nas correias transportadoras. Dentre os fatores que afetam o ângulo de repouso, pode-se destacar o tamanho e a forma dos grãos, a orientação das partículas e, principalmente, a rugosidade da superfície do grão (MOHSENIN, 1970).

Tabela 4.3 - Caracterização física das sementes *in natura*

Propriedade (Unidade)	Valor médio $\pm$ desvio
Massa específica absoluta ( $\text{g/cm}^3$ )	$1,3943 \pm 0,0021$
Massa específica aparente da partícula ( $\text{g/cm}^3$ )	$1,1630 \pm 0,0050$
Porosidade da partícula	0,17
Densidade <i>bulk</i> ( $\text{g/cm}^3$ )	$0,753 \pm 0,0086$
Fator de forma (adim)	$0,74 \pm 0,04$
Ângulo de repouso ( $^\circ$ )	$32,3 \pm 0,8$
Diâmetro médio de Sauter (mm)	$1,746 \pm 0,0018$
Comprimento (mm)	$2,96 \pm 0,14$
Largura (mm)	$2,1 \pm 0,09$
Espessura (mm)	$1,49 \pm 0,15$

Foi possível observar através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) que a semente apresenta baixa rugosidade superficial, uma vez que esta foi verificada somente a partir de um aumento de 1000 vezes (Fotografia 4.2). Partículas com baixa rugosidade apresentam a tendência a escoar com mais facilidade, o que está de acordo com o baixo valor de ângulo de repouso encontrado.

Fotografia 4.2 – Análise de MEV das sementes de painço.

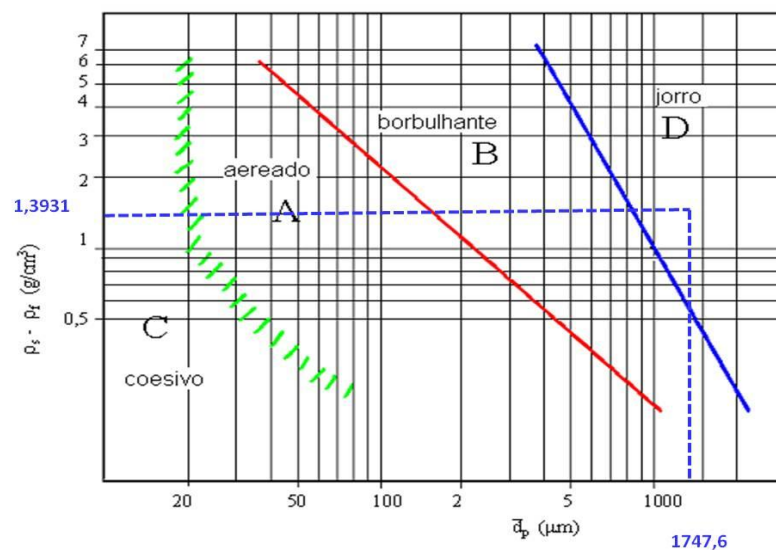


Onde: (A) – Semente com aumento na magnitude de 100x (B) – Superfície da partícula com aumento de 1000x.

#### 4.4 ANÁLISE FLUIDODINÂMICA

De acordo com o diagrama de Geldart (1973) as sementes foram classificadas como favoráveis ao leito de jorro (Gráfico 4.1), portanto deu-se início aos ensaios práticos com o objetivo de avaliar a dinâmica das partículas experimentalmente.

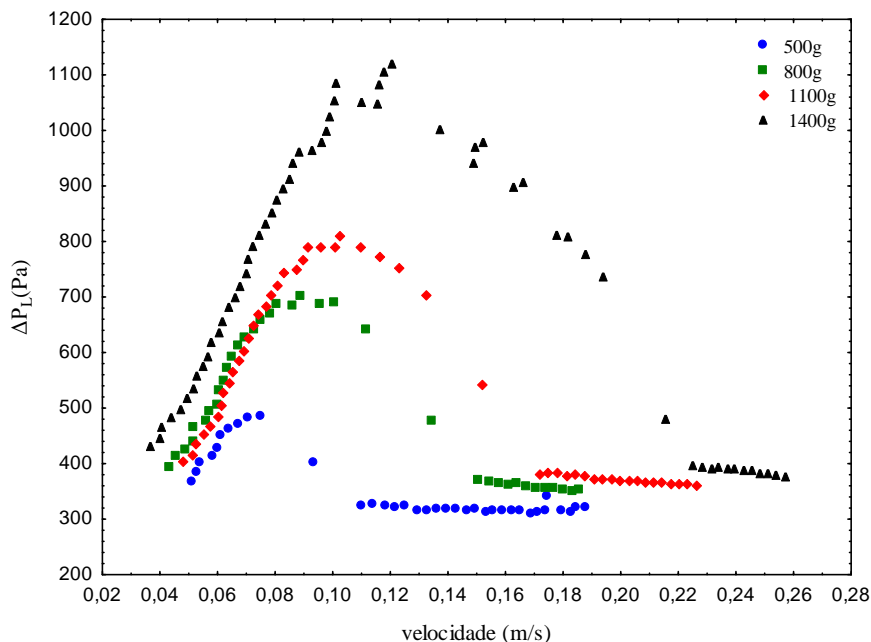
Gráfico 4.1 – Classificação das sementes de painço pelo Diagrama de Geldart.



#### 4.4.1 Leito cônico: determinação dos parâmetros experimentais e teóricos

O Gráfico 4.2 mostra o comportamento da curva de  $\Delta P_L \times$  velocidade crescente do ar, realizadas para as cargas de 500, 800, 1100 e 1400g, em leito de jorro cônico. Foi verificado visualmente o regime de jorro estável para todas as massas de semente de painço utilizadas, ressaltando que os experimentos foram realizados à temperatura ambiente.

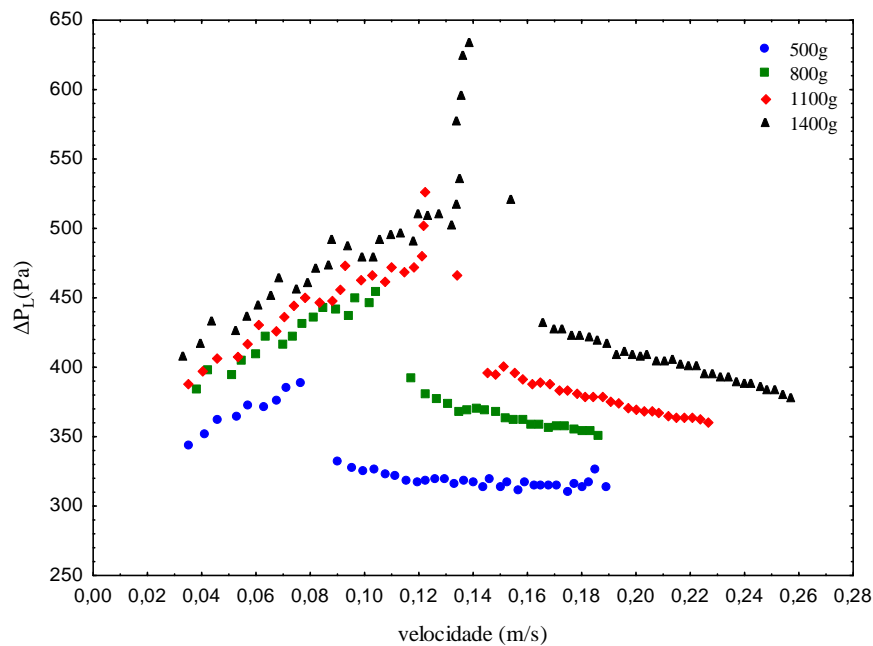
**Gráfico 4.2** – Comportamento fluidodinâmico em função do aumento da velocidade do ar para as diferentes cargas analisadas em leito cônico.



A carga mínima de sementes de painço utilizada nos testes fluidodinâmicos foi de 500 g, pois abaixo dessa quantidade de material o sistema de aquisição de dados não conseguia capturar as quedas de pressão do leito, já que eram valores muito pequenos. Isto pode estar associado à configuração do leito ( $D_i/D_c = 0,15$ ) e ao fato das sementes de painço apresentarem uma massa específica aparente pequena ( $1,1630 \text{ g/cm}^3$ ). A carga máxima avaliada foi de 1400 g, por questões de limitação de matéria prima.

Os valores correspondentes à velocidade de mínimo jorro, queda de pressão máxima e estável, cresceram com o aumento no valor da carga de material (Gráficos 4.2 e 4.3), o que está de acordo com a literatura e também foi observado por Souza (2003), Cordeiro e Oliveira (2005) e Santana (2011), utilizando partículas de vidro e teflon, extrato de folhas de *Maytenun ilicifolia* e sementes de linhaça, respectivamente.

**Gráfico 4.3** – Comportamento fluidodinâmico em função da diminuição da velocidade do ar para as diferentes cargas analisadas, em leito cônico.



Esse comportamento está relacionado ao conceito de queda de pressão no leito, a qual é diretamente proporcional ao peso de sólidos dividido pela área da seção transversal da coluna, portanto, o aumento da força peso proporciona resultados maiores para os valores de queda de pressão para suportar o leito. Ao analisar o Gráfico 4.3 nota-se que para as cargas de 500 e 800 g o colapso do jorro é praticamente instantâneo, estabelecendo-se então o leito fixo. Porém, após o mínimo jorro, ainda é possível observar uma fase intermediária e posteriormente o leito fixo para as cargas de 1100 (próximo a velocidade de 0,12 m/s e queda de pressão no leito na faixa entre 470 a 520 Pa) e 1400 g (numa velocidade em torno de 0,14 m/s e queda de pressão entre 520 a 630 Pa). Tal comportamento está associado ao aumento da carga (e proporcionalmente à altura do leito de sementes), o que possivelmente promove mudanças na dinâmica das partículas na região do jorro interno.

A Tabela 4.4 mostra os parâmetros experimentais do jorro e as Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 sintetizam os valores teóricos obtidos pelas correlações, para a  $U_{jm}$ ,  $\Delta P_{máx}$  e  $\Delta P_S$ , assim como seus desvios relativos.

Almeida e Rocha (2002) realizaram o estudo fluidodinâmico de sementes de brócolos, variando a carga de sementes, e em seguida compararam seus dados experimentais com os valores obtidos por correlações empíricas. Os autores verificaram que para a  $U_{jm}$ , o modelo proposto por Tsvik et al. (1967) forneceu desvios na faixa de 14 a 26,2%.

**Tabela 4.4** - Parâmetros fluidodinâmicos experimentais obtidos em leito de jorro cônico

Massa (g)	Altura do leito estático (cm)	$U_{jm}$ (m/s) experimental	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (Pa) experimental	$\Delta P_S$ (Pa) experimental
500	8,0	4,14*/0,09**	450 - 490	300 a 340
800	10,0	5,47* / 0,12**	700 - 800	340 - 360
1100	12,0	6,28*/0,14**	810 - 830	360 - 380
1400	14,0	7,43*/0,16**	998 - 1120	375 - 400

\*Calculado com base no diâmetro de entrada.\*\* Calculado com base no diâmetro da coluna.

**Tabela 4.5** – Parâmetros experimentais e teóricos de  $U_{jm}$  para o leito de jorro cônico

Massa (g)	500	800	1100	1400
$U_{jm}$ (m/s) experimental	4,14*/0,09**	5,47* / 0,12**	6,28*/0,14**	7,43*/0,16**
$U_{jm}$ (m/s) Eq. 2.4*	5,14	5,72	6,25	6,72
Desvio Relativo (%)	24,22	4,65	0,51	9,45
$U_{jm}$ (m/s) Eq. 2.5**	0,12	0,15	0,18	0,21
Desvio Relativo (%)	23,76	20,67	25,04	24,57
$U_{jm}$ (m/s) Eq. 2.6*	5,11	5,92	6,71	7,49
Desvio Relativo (%)	23,48	8,25	6,86	0,75

\*Calculado com base no diâmetro de entrada.\*\* Calculado com base no diâmetro da coluna.

**Tabela 4.6** - Resultados para queda de pressão máxima no leito cônico

Massa (g)	500	800	1100	1400
$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (Pa) experimental	470	750	820	1110
$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (Pa) Eq. 2.16	728,47	938,99	1163,79	1392,95
Desvio Relativo (%)	48,67	17,23	40,22	24,37
$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (Pa) Eq. 2.17	750,29	969,16	1205,51	1462,57
Desvio Relativo (%)	53,12	20,99	45,24	30,58

**Tabela 4.7** - Resultados para a queda de pressão no jorro estável em leito cônico

Massa (g)	500	800	1100	1400
$\Delta P_S$ (Pa) experimental	320	350	370	390
$\Delta P_S$ (Pa) Eq. 2.22	111,50	165,97	228,19	297,15
Desvio Relativo (%)	65,16	52,58	39,95	25,71

No presente trabalho, durante o estudo fluidodinâmico e considerando-se que para procedimentos experimentais, erros aceitáveis não devem ser superiores à 30%, é observado pela Tabela 4.5, que o modelo de Makowski e Kaminski (1983) (Equação 2.4) para a  $U_{jm}$  forneceu desvios extremamente satisfatórios para as cargas de 800, 1100 e 1400 g, correspondendo a 4,65; 0,51 e 9,45%, respectivamente. O modelo proposto por Choi e Meisen (1992), Equação 2.5, resultou em desvios em torno de 20% para todas as cargas avaliadas. A correlação empírica de Gorshtein e Mukhlenov (1964) (Equação 2.6) forneceu resultados satisfatórios para todas as massas de sementes testadas, ressaltando-se os desvios calculados para as cargas de 800, 1100 e 1400 g, que corresponderam a 8,25; 6,86 e 0,75%, respectivamente.

Durante o cálculo da  $\Delta P_{m\acute{a}x}$  o modelo proposto por Olazar et al. (1993), que corresponde à Equação 2.16, foi satisfatório para as cargas de 800 e 1400 g (17,23 e 24,37%, respectivamente) e ao usar o modelo de Kmiec (1980), Equação 2.17, resultou em desvios aceitáveis apenas para a carga de 800 g (20,99%). A  $\Delta P_{m\acute{a}x}$  é um parâmetro influenciado, entre outros fatores, pela compactação inicial do leito.

Com relação a  $\Delta P_S$ , com exceção do que foi observado para a carga de 1400 g utilizando a correlação de Manurung (1964) (Equação 2.22), os demais desvios foram insatisfatórios. Almeida e Rocha (2002) ao avaliar a  $\Delta P_S$  para diferentes cargas, por meio das correlações de San José et al. (2006) e Pallai e Nemeth (1969), encontraram desvios nas faixas entre 70,9 a 111,5% e 88,4 a 129,4%, respectivamente.

Resultados mostrando diferenças no comportamento entre as correlações são comuns quando se trata de análises empíricas, as quais envolvem tanto similaridades geométrica e dinâmica entre os sistemas, como também influência das faixas de propriedades físicas dos materiais utilizados nos experimentos, além da precisão na obtenção dos parâmetros experimentais (ALMEIDA; ROCHA, 2002).

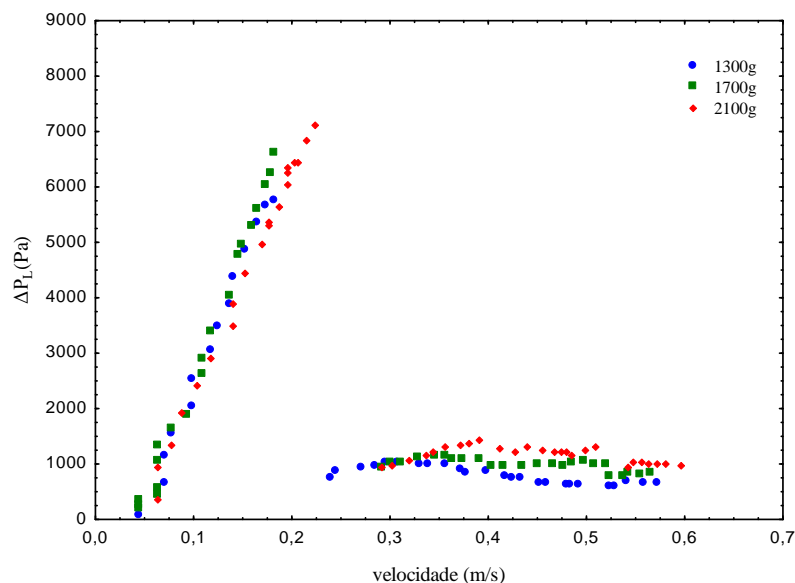


#### 4.4.2 Leito de jorro convencional: determinação dos parâmetros experimentais e teóricos

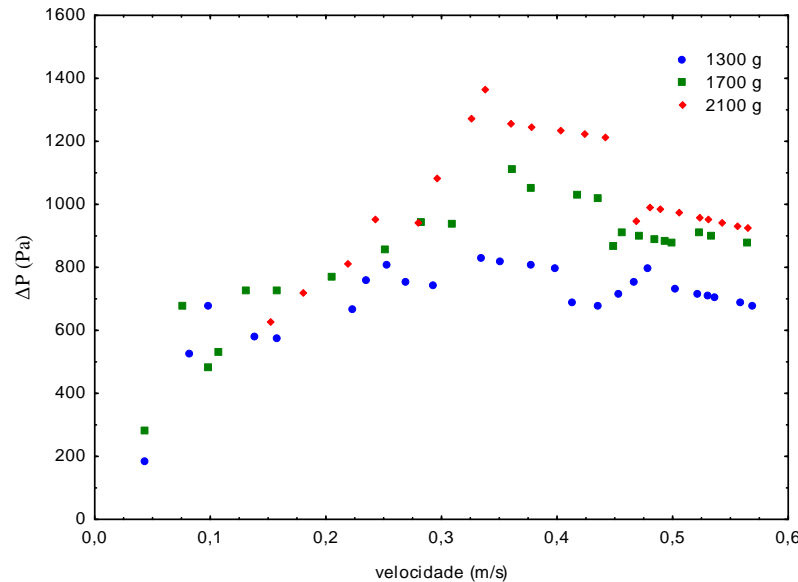
As cargas utilizadas no leito de jorro convencional foram determinadas em função das restrições do leito disponível. Uma vez que a região cônica foi confeccionada em ferro galvanizado, foi inviável trabalhar com cargas de sementes que apresentassem altura inicial do leito menor do que 15 cm, ou seja, que estivessem apenas na região cônica, visto que seria impossível acompanhar o desenvolvimento do processo, como a expansão do leito, o estabelecimento do jorro, o regime estável e o jorro mínimo. Desta forma, a carga mínima de sementes deveria ser aquela que pudesse ser visualizada na coluna cilíndrica (confeccionada em acrílico), a qual correspondeu à 1300 g. Posteriormente determinou-se uma carga máxima (2100 g), baseada em questões de disponibilidade de matéria prima, e a carga intermediária foi igual a 1700 g.

Os Gráficos 4.4 e 4.5 representam as curvas de  $\Delta P_L$  x velocidade crescente e decrescente do ar, respectivamente, para as cargas de 1300, 1700 e 2100 g, as quais são semelhantes as descritas por diferentes literaturas (CORDEIRO; OLIVEIRA, 2005; PORTO; LISBÔA, 2005; BUTZGE ; DAMATO; ROCHA, 2012) e estão de acordo com o que foi descrito por Mathur e Epstein (1974).

**Gráfico 4.4** – Comportamento fluidodinâmico em função do aumento de velocidade do ar para as diferentes cargas analisadas, em leito convencional.



**Gráfico 4.5** – Comportamento fluidodinâmico em função da diminuição da velocidade do ar para as diferentes cargas analisadas, em leito convencional.



Por meio da análise gráfica e com o auxílio de dados experimentais, foi elaborada a Tabela 4.8, a qual sintetiza os parâmetros de jorro obtidos experimentalmente.

**Tabela 4.8** – Parâmetros fluidodinâmicos experimentais obtidos em leito de jorro convencional

Massa (g)	Altura do leito estático (cm)	$U_{jm}$ (m/s) experimental	$\Delta P_{máx}$ (Pa) experimental	$\Delta P_S$ (Pa) experimental
1300	20,0	16,50*/0,41**	5600	800
1700	23,0	17,92*/0,45**	6650	900
2100	25,0	18,71*/0,47**	7100	1000

\*Calculado com base no diâmetro de entrada.\*\* Calculado com base no diâmetro da coluna.

Analisando o Gráfico 4.4 juntamente com a Tabela 4.8 verifica-se que os parâmetros fluidodinâmicos aumentam à medida que a carga de sementes se eleva. Tal comportamento também foi obtido para o leito cônico, assim como em diferentes literaturas. De acordo com Santana (2011), durante o estudo dos parâmetros fluidodinâmicos experimentais em leito de jorro, à medida que a carga de sementes de linhaça foi variada, observou-se que para a  $\Delta P_{máx}$ , a correlação de Pallai e Németh (1969) apresentou desvios de 38,63; 0,43 e 5,43% para as massas de 1590, 2445 e 2955g, respectivamente. O modelo empírico proposto por Mukhlenov e Gorshtein (1965) para o cálculo da  $\Delta P_S$  resultou em

desvios satisfatórios, no intervalo de 24,38; 16,73 e 8,67%, para as cargas de 1590, 2445 e 2955g, respectivamente. Durante a avaliação do parâmetro  $U_{mj}$ , os menores desvios alcançados ao utilizar a correlação de Groshtein e Mukhlenov (1964), foram de 1,04% para a massa de 1590g, 16,05% para 2445g e 26,62% para 2955g de sementes de linhaça.

Oliveira (2002) constatou que para seus resultados experimentais da fluidodinâmica em leito de jorro, ao avaliar o ângulo do cone, a correlação que resultou em menores desvios para a  $U_{jm}$  foi a proposta por Olazar et al. (1992), com desvio médio de  $18,0 \pm 12,8\%$  para o ângulo de  $60^\circ$  e de  $8,6 \pm 12,0\%$  para o ângulo de  $40^\circ$ . Com relação a  $\Delta P_{máx}$ , Olazar et al. (1992) novamente mostrou-se a mais adequada, com desvios de  $7,4 \pm 5,8\%$  e  $23,1 \pm 13,9\%$  para os ângulos de  $60^\circ$  e  $40^\circ$ , respectivamente.

As Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 exibem os valores teóricos para a  $U_{jm}$ ,  $\Delta P_{máx}$  e  $\Delta P_S$ , mensurados por meio das correlações teóricas, assim como os desvio relativos, ao comparar os resultados experimentais e teóricos.

**Tabela 4.9** – Parâmetros experimentais e teóricos de  $U_{jm}$  para o leito de jorro convencional

Massa (g)	1300	1700	2100
$U_{jm}$ (m/s) experimental	16,5*/0,41**	19,72*/0,45**	18,71*/0,47**
$U_{jm}$ (m/s) Eq. 2.7**	0,3983	0,4265	0,4448
Desvio Relativo (%)	2,85	5,23	5,35
$U_{jm}$ (m/s) Eq. 2.5**	0,3481	0,3774	0,3967
Desvio Relativo (%)	15,10	16,13	15,58
$U_{jm}$ (m/s) Eq. 2.8**	0,5613	0,5867	0,6029
Desvio Relativo (%)	36,9	30,38	28,29
$U_{jm}$ (m/s) Eq. 2.9**	0,3565	0,3817	0,3982
Desvio Relativo (%)	13	15,16	15,27
$U_{jm}$ (m/s) Eq 2.10**	0,3813	0,4377	0,4766
Desvio Relativo (%)	6,9	2,73	1,40

\*Calculado com base no diâmetro de entrada.\*\* Calculado com base no diâmetro da coluna.

A equação proposta por Mathur e Gishler (1955), representada pela Equação 2.7, é um dos modelos mais utilizados para a determinação de velocidade de jorro mínimo ( $U_{jm}$ ) e

conseguiu ajustar bem os valores encontrados neste trabalho, de tal forma que seus desvios para as diferentes cargas não foram superiores à 6%. O modelo de Choi e Meisen (1992) (Equação 2.5), também resultou em desvios satisfatórios para as cargas de 1300, 1700 e 2100 g, com desvios relativos iguais à 15,1; 16,13 e 15,58%, respectivamente. Para a Equação 2.8 (BRUNELLO et al., 1974), os desvios foram pouco satisfatórios (na faixa de 30%), o que pode ser justificado pelo fato de que o modelo empírico foi desenvolvido para condições de geometria do leito e características da partícula diferentes das utilizadas neste trabalho. As Equações 2.9 e 2.10, representaram as equações empíricas de Uemaki et al. (1983) e Ogino et al. (1993), ambas foram satisfatórias, sobretudo a última.

**Tabela 4.10** - Resultados para queda de pressão máxima no leito convencional

Massa (g)	1300	1700	2100
$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (Pa) experimental	5600	6650	7100
$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (Pa) Eq. 2.18	3283,57	3826,15	4200,34
Desvio Relativo (%)	41	42,4	36,83
$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (Pa) Eq. 2.19	4028,38	4451,93	4725,09
Desvio Relativo (%)	28,06	33,05	28,95
$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (Pa) Eq. 2.17	2713,60	3494,16	4149,24
Desvio Relativo (%)	51,54	47,45	37,61

Os modelos utilizados com o objetivo de mensurar a queda de pressão máxima ( $\Delta P_{m\acute{a}x}$ ), conforme mostra a Tabela 4.10, apresentaram desvios não satisfatórios, com exceção daqueles obtidos pela Equação 2.19 (ANSEJO et al., 1977), com valores de 28,06% para a carga de 1300 g; 33,05% para 1700 g e 28,95% para a massa de 2100 g de sementes. Modelos empíricos são restritos as condições de geometria do leito, características da partícula e condições do fluido utilizado. Dessa maneira, utilizar condições experimentais, que estejam fora das especificações impostas pelas equações teóricas aplicadas, resulta em erros que são mensurados pelos desvios relativos, os quais podem ser extremamente grandes.

Os valores teóricos para a  $\Delta P_s$  foram todos satisfatórios, pois estiveram abaixo ou na faixa de 30% (Tabela 4.11).

**Tabela 4.11** - Resultados para a queda de pressão no jorro estável em leito convencional

Massa (g)	1300	1700	2100
$\Delta P_S$ (Pa) experimental	800	900	1000
$\Delta P_S$ (Pa) Eq. 2.25	590,04	707,78	777,98
Desvio Relativo (%)	26	21,35	22,20
$\Delta P_S$ (Pa) Eq. 2.26	1021,78	1021,78	1171,44
Desvio Relativo (%)	27,7	13,53	17,14
$\Delta P_S$ (Pa) Eq. 2.27	967,08	1187,15	1347,44
Desvio Relativo (%)	20,88	31,91	34,74
$\Delta P_S$ (Pa) Eq. 2.24	573,77	711,08	810
Desvio Relativo (%)	28,28	20,99	18,99

#### 4.4.3 Análise dos resultados: comparação entre os leitos e tomada de decisão

Em ambas as configurações foi possível obter experimentos estáveis, com ausência de *sluggins* e zonas mortas. Sabe-se que a  $\Delta P_{m\acute{a}x}$  aumenta à medida que cresce altura do leito, o que se confirma neste trabalho, onde para o leito cônico as alturas iniciais do leito estão na faixa de 8 a 14 cm, resultando em quedas de pressão máxima em torno de 470 à 1100 Pa, enquanto no leito convencional, as quedas de pressão são superiores (5600 a 7100 Pa) e as alturas de leito fixo estão entre 20 e 25 cm.

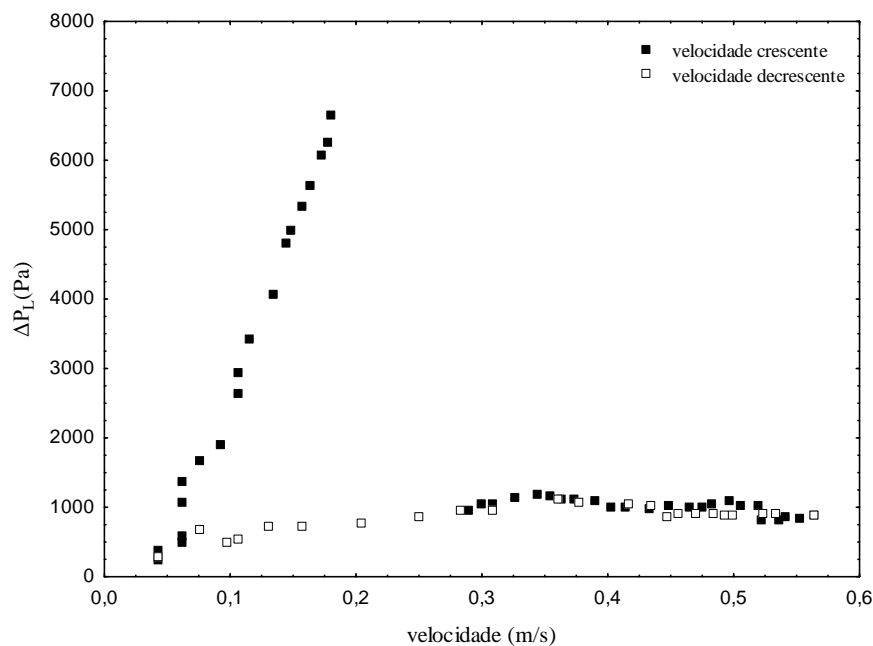
Ao realizar os experimentos, os valores das cargas de sementes utilizadas no leito de jorro convencional foram superiores àquelas avaliadas no leito de jorro cônico, o que resultou em diferenças notáveis nas faixas de queda de pressão no leito. Além disso, os dois equipamentos possuíam características geométricas diferentes, o que também influenciou nos valores de queda de pressão.

As características das partículas analisadas nos dois leitos são constantes, porém sabe-se que o sistema leito de jorro é extremamente sensível à geometria do equipamento, como: altura do cone, altura do leito estático, diâmetro de entrada do ar e diâmetro da coluna, entre outros parâmetros, conforme pode ser observado pelas correlações teóricas sumarizadas

neste trabalho, lembrando que as condições em que o experimento é desenvolvido também interferem.

Foi decidido que a cinética de secagem e o planejamento experimental seriam desenvolvidos apenas no leito de jorro convencional (UFPA), visto que essa configuração tem sido amplamente utilizada para a secagem de partículas e apresentou boa dinâmica durante sua operação. Para dar continuidade aos experimentos, foi definido que a carga de sementes seria igual a 1700 g (correspondente ao valor intermediário testado durante as análises fluidodinâmicas). A carga selecionada apresentou uma boa dinâmica de partículas, estabilidade e comportamento fluidodinâmico conforme mostra o Gráfico 4.6.

Gráfico 4.6 – Comportamento fluidodinâmico para a carga de sementes de 1700g.



#### 4.5 CARACTERÍSTICAS DA CINÉTICA DE SECAGEM

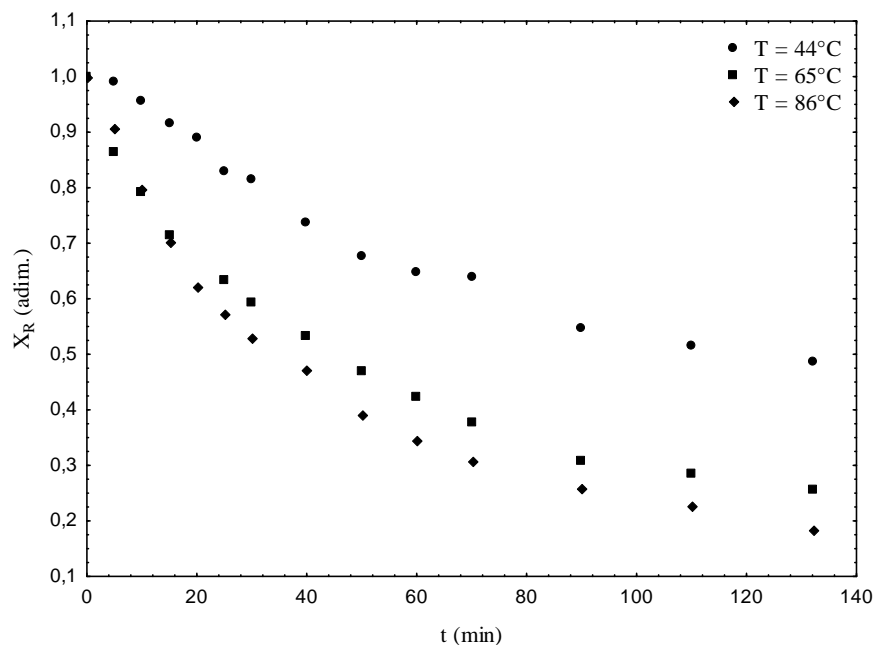
Em função dos resultados experimentais da secagem de sementes de painço em leito de jorro, foram construídas as curvas de secagem ( $X_R$  versus  $t$ ), conforme mostra o Gráfico 4.7, nas temperaturas de 44, 65 e 86 °C. O teor de umidade inicial das sementes de painço foi de 30% ± 0,01 b.s.

Pela análise do Gráfico 4.7 verifica-se que o aumento da temperatura do ar de secagem promoveu uma maior taxa de remoção de água do material, o que está de acordo com o resultado encontrado por pesquisadores que também avaliaram o comportamento

cinético de produtos agrícolas (THOMPSON; PEART; FOSTER, 1968; DOYMAZ; PALA, 2003; CORRÊA et al., 2007; SOUSA et al., 2011; MORAIS et al., 2013).

Também é possível observar que a secagem das sementes de painço ocorreu no período de taxa de secagem decrescente, indicando que ocorre uma maior resistência à transferência de calor e massa do interior do produto para sua superfície e, portanto, a difusão é o principal mecanismo que governa o movimento da água (KASHANINEJAD et al., 2007). Resultados semelhantes foram encontrados para o feijão adzuki (ALMEIDA, et al., 2009), trigo parbolizado (MOHAPATRA; RAO, 2005), pimenta vermelha (KALEEMULLAH; KAILAPPAN, 2006) entre outros. Produtos alimentícios e agrícolas nem sempre apresentam de forma definida o período de taxa constante, o que pode estar associado à complexidade da estrutura interna destes materiais (JANGAM; MUJUMDAR, 2010; FOUST et al., 2012).

Gráfico 4.7 – Comportamento da cinética de secagem das sementes de painço em leito de jorro.



Com a finalidade de analisar o comportamento da cinética de secagem, aplicaram-se alguns modelos matemáticos, os quais ao serem ajustados aos dados experimentais, resultaram em uma série de coeficientes característicos, como pode ser observado na Tabela 4.12. A escolha do modelo mais adequado foi baseada na análise dos coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio médio relativo (D), erro médio da estimativa (e) e análise dos gráficos de resíduos (R) (Tabela 4.12). Kashaninejad et al. (2007) recomendam que os modelos selecionados devem apresentar desvio médio relativo (D) inferiores a 10%.

Por meio da Tabela 4.12 é verificado que todos os modelos analisados apresentam coeficiente de determinação ( $R^2$ ) muito bons, sendo superiores à 96%. Com relação ao desvio médio relativo (D), todos são inferiores a 10% , enquanto que os valores do erro padrão estimado estão abaixo de 0,06%. No entanto, ao avaliar a distribuição de resíduos (R) (Apêndice D) observa-se que nem todos os modelos apresentam o comportamento desejado (distribuição aleatória). Este resultado reforça que, para determinar se um modelo é adequado ou não aos dados experimentais, é necessária a avaliação de um conjunto de parâmetros estatísticos e não apenas de um componente.

Tabela 4.12 - Parâmetros dos modelos aplicados aos dados das análises experimentais das curvas de cinética em leite de jorro

Modelos	Temperatura (°C)	Parâmetros			$R^2$ (%)	D (%)	e (%)	$R^*$	
k									
Lewis (1921)	44	0,0065			98,74	0,08	0,03	A	
	65	0,0145			96,49	2,16	0,06	T	
	86	0,0182			97,73	5,44	0,05	T	
k                      a									
Henderson e Pabis (1961)	44	0,0064	<b>0,9950</b>		98,75	0,19	0,03	A	
	65	0,0122	<b>0,9102</b>		98,31	1,96	0,04	T	
	86	0,0162	<b>0,9341</b>		98,39	4,39	0,05	T	
k                      n									
Page (1949)	44	0,0098	0,900		99,02	0,41	0,03	A	
	65	0,0466	0,7060		99,73	0,20	0,02	A	
	86	0,0461	0,7560		99,62	1,25	0,02	A	
a                      k                      b									
Aproximação por Difusão (1980)	44	0,9974	0,0007	-3,8883	99,50	0,37	0,02	A	
	65	0,3441	0,0544	0,1409	99,60	0,18	0,02	A	
	86	0,5606	0,0397	0,1654	99,92	0,05	0,01	A	
a                      k                      n                      b									
Midilli et al. (2002)	44	<b>1,0110</b>	0,0065	1,1330	<b>0,0022</b>	99,75	0,03	0,02	A
	65	<b>0,9933</b>	0,0362	0,7973	<b>0,0006</b>	99,70	6,96	0,02	A
	86	<b>1,0125</b>	0,0365	0,8602	<b>0,0008</b>	99,80	4,31	0,02	A
a                      b									
Wang e Singh (1978)	44	-0,0072	0,0000		99,50	0,38	0,02	A	
	65	-0,0143	0,0000		97,70	1,6398	0,05	A	
	86	-0,0163	0,0000		97,74	1,6091	0,05	T	

$R^*$  - Resíduo: A – aleatório (desejado); T – tendencioso (indesejado).

De acordo com a Tabela 4.12, para os parâmetros obtidos através do modelo de Midilli et al. (2002) (Equação 2.33), foi verificado que os valores de “a” são em torno de 1,

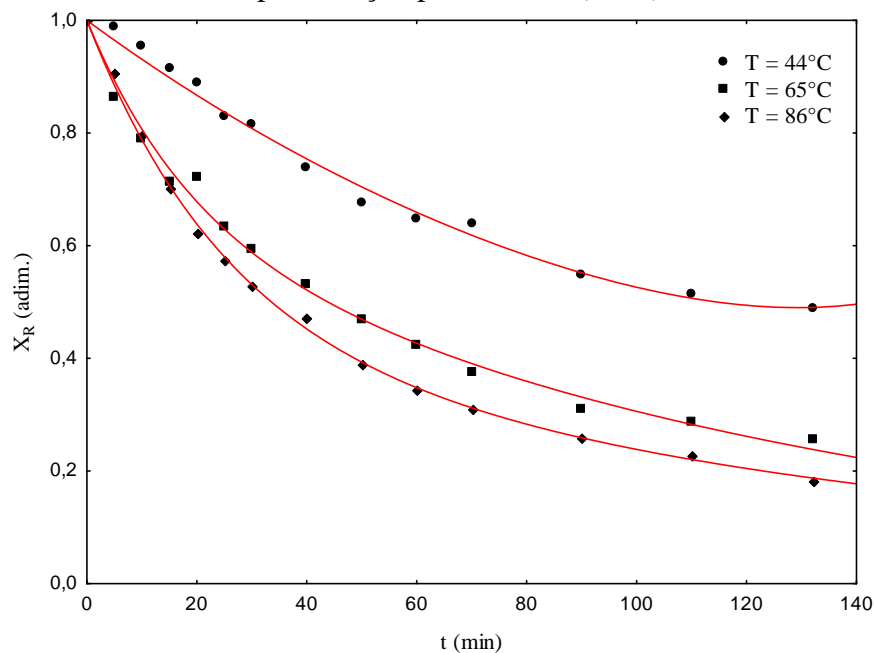


enquanto “ $b$ ” foi aproximadamente 0. Se “ $a$ ” e “ $b$ ” são iguais a 1 e 0, respectivamente, então a Equação 2.33 se torna equivalente a Equação 2.31, ou seja o ajuste alcançado pelo modelo de Midilli et al. (2002) se torna igual ao obtido por de Page (1949) (Equação 2.31). Comportamento semelhante foi obtido para o ajuste alcançado pelo modelo de Henderson e Pabis (1961) (Equação 2.30), no qual os valores de “ $a$ ” foram aproximadamente iguais a 1, ou seja, seus resultados são correspondentes aos obtidos pelo modelo de Lewis (1921) (Equação 2.29), percebendo-se também a semelhança entre os valores de “ $k$ ” resultantes desses dois modelos.

Dessa forma, os modelos que se ajustaram de maneira satisfatória à cinética de secagem de sementes de painço (*Setaria italica*), de acordo com as condições em que este trabalho foi desenvolvido, foram: Aproximação por Difusão (1980), Page (1949) e Midilli et al. (2002), sendo que o primeiro deles foi considerado o melhor, pois resultou nos maiores valores de  $R^2$  e menores desvios médios relativos. O Gráfico 4.8 mostra o ajustes dos dados experimentais ao modelo teórico.

O modelo de Aproximação por Difusão (1980) também foi escolhido como o mais adequado para descrever a cinética de secagem de sementes de mamona em leito fluidizado (PEREA-FLORES et al., 2012), assim como para representar a secagem de sementes de crambe em leito fixo (FARIA et al., 2012).

Gráfico 4.8– Curvas de secagem nas diferentes temperaturas ajustadas ao modelo de Aproximação por Difusão (1980).



Sharaf-Eldeen; Blaisdell; Hamdy (1980) propuseram o modelo de Aproximação por Difusão, para descrever a secagem de milho. De acordo com os autores, “*a*” e “*b*” são constantes características do produto (neste caso o milho) e “*k*” é um parâmetro que depende da temperatura do ar de secagem e do conteúdo de umidade do material. Com relação às sementes de painço, analisando a Tabela 4.12, é verificado que os parâmetros do modelo de Aproximação por Difusão (1980) são sensíveis à variação na temperatura, sendo que os parâmetros “*a*” e “*k*” não apresentaram comportamento uniforme, enquanto “*b*” cresceu com o aumento de temperatura.

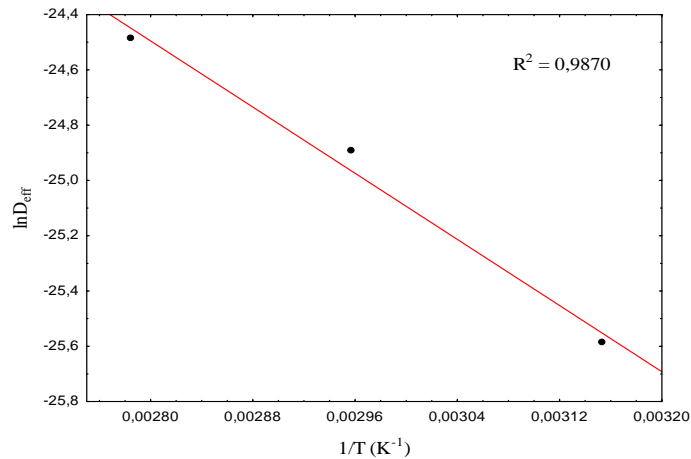
Os valores do coeficiente de difusividade efetiva, obtidos em diferentes temperaturas durante a secagem das sementes de painço em leito de jorro convencional, estão descritos na Tabela 4.13, na qual é observado que a  $D_{\text{eff}}$ , durante a secagem de sementes de painço, variou entre  $0,7729 \times 10^{-11}$  e  $2,3189 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ , para temperaturas entre 44 e 86°C. Estes valores estão dentro da faixa prevista para produtos biológicos, que segundo Perea-Flores et al. (2012), em geral estão entre  $10^{-9}$  e  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Tabela 4.13 - Valores de difusividade efetiva ( $D_{\text{eff}}$ ) das sementes de painço em função da temperatura de secagem

Temperatura (°C)	$D_{\text{eff}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$R^2$ (%)
44	$0,77 \times 10^{-11}$	98,90
65	$1,55 \times 10^{-11}$	98,30
86	$2,32 \times 10^{-11}$	98,10

Vários autores têm estudado o efeito da temperatura na difusividade efetiva de materiais agrícolas (DOYMAZ; PALA, 2003; ALMEIDA et al., 2009; FARIA et al., 2012). Esta relação pode ser quantificada usando a equação de Arrhenius, a fim de obter a energia de ativação ( $E_a$ ) a partir dos dados experimentais de difusividade efetiva, na qual  $E_a$  representa a barreira energética que precisa ser ultrapassada para ativar a difusão da umidade. Portanto, plotou-se os valores de  $\ln D_{\text{eff}}$  em função do inverso do temperatura absoluta ( $1/T$ ), conforme mostra o Gráfico 4.9.

Gráfico 4.9 - Representação de Arrhenius para a relação entre a difusividade efetiva ( $D_{eff}$ ) e a temperatura absoluta na secagem de sementes de painço.



O Gráfico 4.9 mostra uma relação linear entre  $\ln D_{eff}$  e o inverso da temperatura absoluta ( $1/T$ ), podendo ser descrita satisfatoriamente pela Equação de Arrhenius, alcançando um valor de  $R^2$  igual a 0,987. Os valores de  $D_0$  (fator pré exponencial) e energia de ativação ( $E_a$ ) foram equivalentes a  $1,008 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  e 24,86 kJ/mol, respectivamente. A Equação 4.1 mostra o efeito da temperatura na difusão em sementes de painço.

$$D_{eff} = 1,008 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{24867,174}{T}\right) \quad \text{Equação (4.1)}$$

O valor encontrado para  $E_a$  está de acordo com os resultados obtidos em diferentes estudos, como: 30,79 kJ/mol para sementes de pistache (KASHANINEJAD et al., 2007), 33,15 kJ/mol para sementes de abóbora (SACILIK, 2007), 24,77 kJ/mol para sementes de nabo forrageiro (SOUSA et al., 2011) e 30,26 a 36,82 kJ/mol para sementes de linhaça (VALENTE, 2011).

#### 4.6 AVALIAÇÃO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A Tabela 4.14 apresenta a matriz de experimento composta pelas variáveis originais e os valores das respostas, avaliadas durante o processo de secagem de sementes de painço em leito de jorro convencional, seguindo um planejamento composto central rotacional (PCCR). A partir dos resultados obtidos foi realizada a análise estatística com o auxílio do aplicativo Statistica<sup>®</sup> 7.0, considerando o nível de significância  $\alpha = 0,05$  (confiança 95%).

Tabela 4.14 - Matriz de Experimentos e os resultados experimentais para a secagem das sementes de painço em leito de jorro convencional

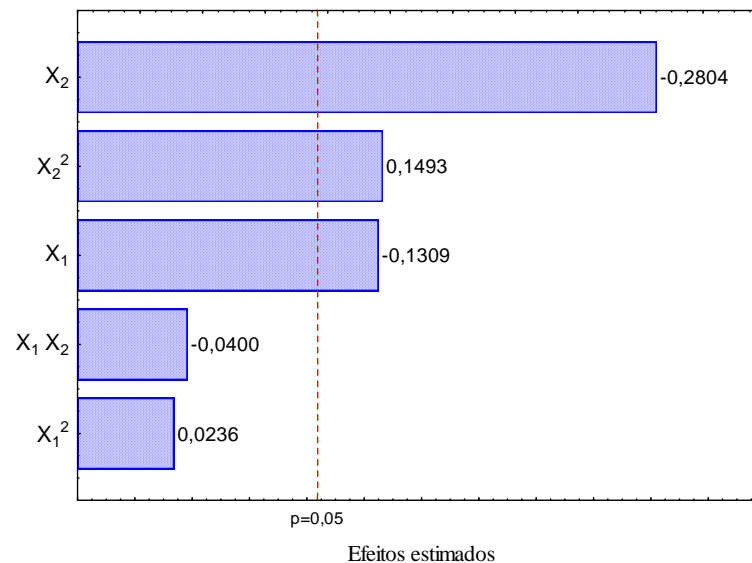
Corridas	Variáveis Codificadas		Variáveis Originais		Variáveis de Resposta		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	t (min)	T (°C)	X <sub>R</sub> (adim.)	G (%)	IVG (adim.)
1	-1	-1	60	50	0,67	84,5	32,52
2	+1	-1	120	50	0,59	83,5	31,02
3	-1	+1	60	80	0,44	77	19,94
4	+1	+1	120	80	0,28	58	10,81
5	- $\alpha$	0	48	65	0,53	89	35,17
6	+ $\alpha$	0	132	65	0,33	80,5	27,31
7	0	- $\alpha$	90	44	0,76	82,5	26,1
8	0	+ $\alpha$	90	86	0,35	34	4,74
9	0	0	90	65	0,35	78	30,86
10	0	0	90	65	0,4	88,5	29,07
11	0	0	90	65	0,43	86	33,75
12	0	0	90	65	0,45	89,5	32,46

#### 4.6.1 Resultados para a variável de resposta X<sub>R</sub> (razão de umidade)

Os efeitos das variáveis independentes sobre a resposta são apresentados na Tabela 4.15. É observado que somente X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> e X<sub>2</sub><sup>2</sup> exercem influência estatística na resposta X<sub>R</sub>, pois seus efeitos em módulo, são maiores ou da mesma grandeza do erro. O diagrama de barras ou de Pareto confirma a maior significância dos efeitos individuais de X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> e X<sub>2</sub><sup>2</sup>, conforme mostra o Gráfico 4.10, no qual os efeitos estatisticamente significativos para X<sub>R</sub> estão à direita da reta vertical indicativa do limite de rejeição da hipótese nula. Valores à esquerda da reta encontram-se dentro da região de hipótese nula e portanto não são estatisticamente significativos.

Tabela 4.15 - Efeitos estimados para a variável de resposta razão de umidade ( $X_R$ )

Efeitos	Valores estimados $\pm$ erro
Grande média	0,4075 $\pm$ 0,0217
$X_1$	-0,1309 $\pm$ 0,0311
$X_1^2$	0,0236 $\pm$ 0,0345
$X_2$	-0,2804 $\pm$ 0,0311
$X_2^2$	0,1493 $\pm$ 0,0345
$X_1 X_2$	-0,0400 $\pm$ 0,0435

Gráfico 4.10 - Diagrama de Pareto para a variável de resposta  $X_R$ .

Percebe-se pela análise da Tabela 4.15 que os efeitos provocados pelas variáveis codificadas  $X_1$  e  $X_2$  são negativos. Isso significa que a elevação dos valores de temperatura de 44°C para 86°C e o aumento do tempo de 48 min para 132 min, provocam efeitos negativos na resposta  $X_R$ , ou seja, maiores valores de temperatura e tempo de secagem favorecem a redução do teor de umidade final das sementes. Este comportamento está de acordo com os resultados obtidos pela cinética de secagem de painço e corroboram com o previsto teoricamente (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

De acordo com Faria (1998), a análise de variância permite avaliar a probabilidade que cada efeito possui de ser considerado estatisticamente significativo para a variável de resposta, ou seja, de estar fora da região de aceitação de hipótese nula, situação na

qual os efeitos não são considerados apenas ruído ou erros aleatórios e sim efeitos significativos.

Portanto, foi realizada a ANOVA para a resposta  $X_R$  (Tabela 4.16) e de acordo com os resultados obtidos para um nível de 95% de confiança, confirmou-se que as variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_2^2$  são estatisticamente significativas, pois somente estas variáveis apresentam  $F_{cal}$  maior do que o valor de  $F$  tabelado ( $F_{1,3} = 10,128$ ), disponível em Box, Hunter e Hunter (1978), indicando que estão distribuídas fora da região de aceitação da hipótese nula.

Ao avaliar a coluna com os valores de  $p$ , chega-se à mesma conclusão, pois  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_2^2$  apresentam menor probabilidade de estar dentro da região de hipótese nula (sem significância estatística para a resposta), o que é evidenciado pela ordem de grandeza dos valores numéricos encontrados.

Tabela 4.16 – ANOVA para a variável de resposta razão de umidade ( $X_R$ )

Efeitos	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	$p$
$X_1$	0,0341	1	0,0342	18,0593	0,0239
$X_1^2$	0,0008	1	0,0008	0,4688	0,5426
$X_2$	0,1567	1	0,1567	82,8553	0,0028
$X_2^2$	0,0354	1	0,0354	18,7197	0,0227
$X_1 X_2$	0,0016	1	0,0016	0,8458	0,4255
Falta de ajuste	0,0005	3	0,0002	0,0812	0,9658
Erro puro	0,0057	3	0,0019	-	-
Total (correlação)	0,2341	11	-	-	-

$R^2 = 0,9738$ ,  $\alpha = 0,05$ .

De acordo com os resultados obtidos pela análise estatística, foi proposto um modelo completo para a variável de resposta razão de umidade (Equação 4.2) em função das variáveis de entrada, cujos coeficientes de regressão estão sumarizados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Coeficientes de regressão para a resposta razão de umidade

Efeitos	Coeficientes de regressão estimados $\pm$ erro
Grande média	0,4075 $\pm$ 0,0217
$X_1$	-0,0654 $\pm$ 0,0154
$X_1^2$	0,0118 $\pm$ 0,0173
$X_2$	-0,1402 $\pm$ 0,0154
$X_2^2$	0,0747 $\pm$ 0,0173
$X_1 X_2$	-0,0200 $\pm$ 0,0217

$$X_R = 0,4075 - 0,0654X_1 - 0,1402X_2 - 0,02X_1X_2 + 0,0118X_1^2 + 0,0747X_2^2 \quad \text{Equação (4.2)}$$

Onde a variável codificada está relacionada à variável original conforme as Equações 4.3 e 4.4:

$$X_1 = \frac{t - 90}{30} \quad \text{Equação (4.3)}$$

$$X_2 = \frac{T - 65}{15} \quad \text{Equação (4.4)}$$

O modelo descrito pela Equação 4.2 representa bem os dados experimentais, de acordo com as restrições deste trabalho, uma vez que seu coeficiente de determinação múltipla ( $R^2$ ) é equivalente à 0,9738. No entanto, a fim de verificar a possibilidade de reduzir os parâmetros na equação para a resposta  $X_R$  (Equação 4.2), foi realizada uma nova análise de variância (Tabela 4.18) considerando apenas as variáveis que apresentaram significância estatística, ou seja,  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_2^2$  e obteve-se o modelo reduzido, como mostra a Equação 4.5.

Tabela 4.18 – ANOVA para a variável de resposta  $X_R$  para a obtenção do modelo reduzido

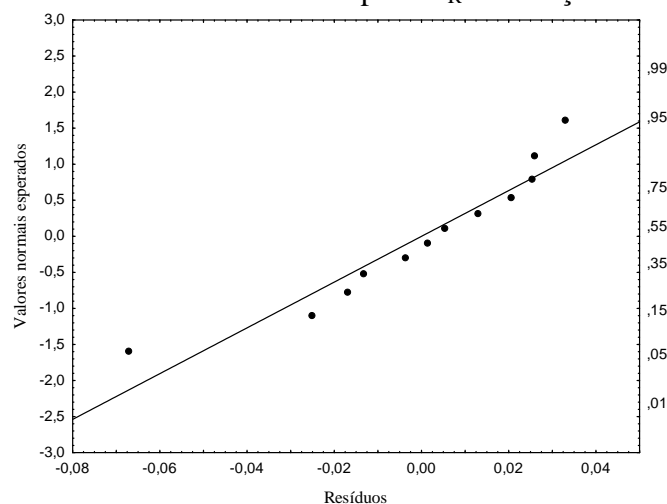
Efeitos	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	$p$
$X_1$	0,0341	1	0,0342	18,0593	0,0239
$X_2$	0,1567	1	0,1567	82,8553	0,0028
$X_2^2$	0,0354	1	0,0354	18,7197	0,0227
Falta de ajuste	0,0029	5	0,0006	0,3117	0,8791
Erro puro	0,0057	3	0,0019	-	-
Total (correlação)	0,2341	11	-	-	-

$R^2 = 0,9632$   $\alpha = 0,05$ .

$$X_R = 0,4075 - 0,0654X_1 - 0,1402X_2 + 0,0747X_2^2 \quad \text{Equação (4.5)}$$

De acordo com a Tabela 4.18, é verificado que não houve alteração na influência das variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_2^2$  sobre a resposta  $X_R$  e que o modelo reduzido (Equação 4.5) consegue reproduzir ou explicar 96,32% das variabilidades experimentais, valor inferior ao alcançado pelo modelo completo, mas ainda muito satisfatório. Com base nos modelos completo e reduzido, conclui-se que  $X_R$  apresenta comportamento quadrático, o que também foi observado por Santana (2011).

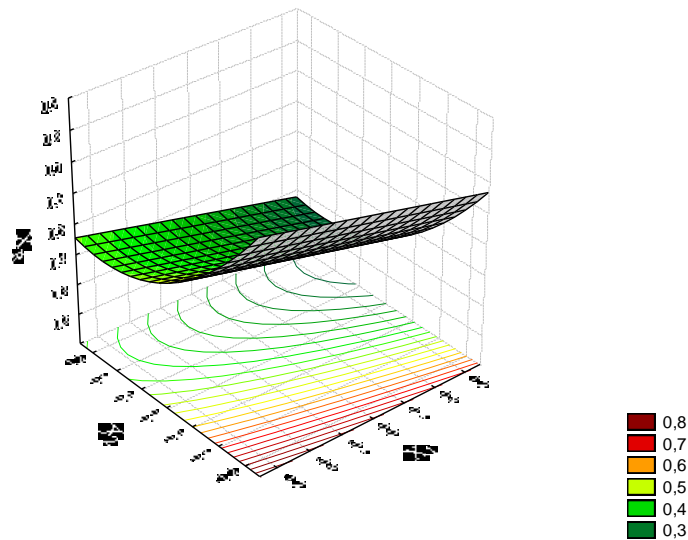
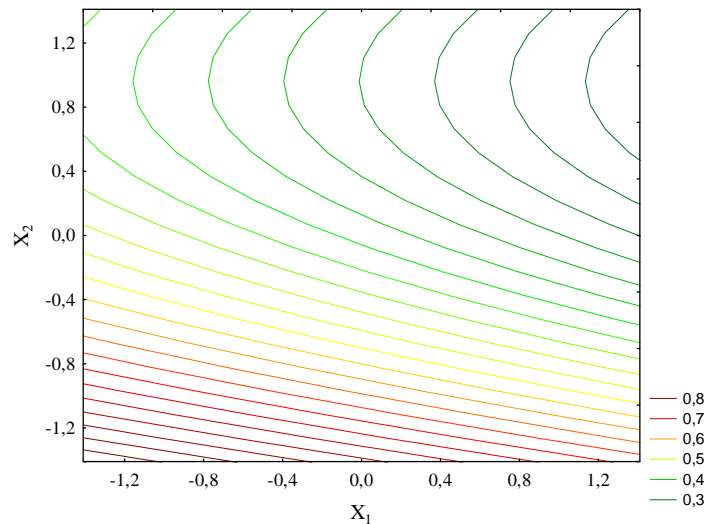
O Gráfico 4.11 ilustra a correlação entre os valores preditos pelo modelo reduzido e os valores observados experimentalmente, no qual verifica-se que a maioria dos resíduos estão localizados próximo ao zero e com distribuição em torno da curva normal, indicando um bom ajuste ao modelo proposto.

Gráfico 4.11 - Gráfico normal dos resíduos para  $X_R$  em função do modelo reduzido.



4.6.1.1 Superfície de resposta e curvas de nível para  $X_R$ 

O modelo estatístico reduzido proposto para  $X_R$  é visualizado por meio da superfície de resposta e respectivas curvas de nível, conforme os Gráficos 4.12 e 4.13, respectivamente. Representa-se no eixo z a resposta, neste caso  $X_R$ , e nos eixos x e y as duas variáveis independentes  $X_1$  e  $X_2$ , respectivamente. É importante ressaltar que os valores nos eixos x e y estão codificados, portanto os mesmos precisam ser inseridos nas Equações 4.3 e 4.4 para obter os valores reais.

Gráfico 4.12 - Superfície de resposta para  $X_R$ .Gráfico 4.13 - Curvas de nível para  $X_R$ .

Verifica-se que para a obtenção de baixos valores de razão de umidade ( $X_R$ ) é necessário operar em altas temperaturas (elevados níveis de  $X_2$ ) em qualquer intervalo de tempo ( $X_1$ ).

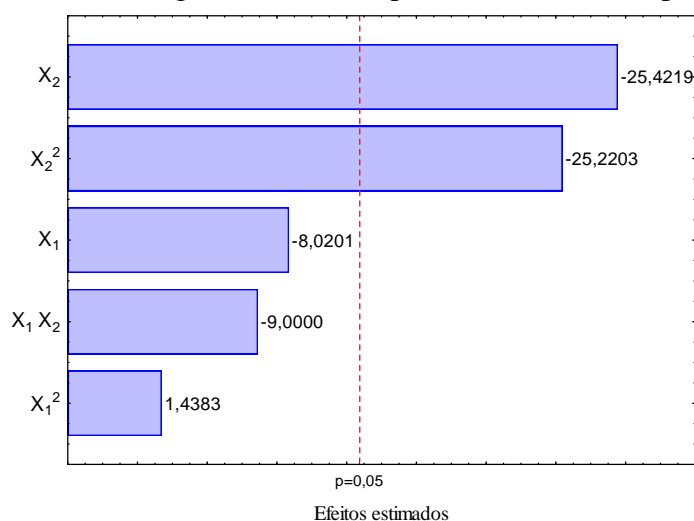
#### 4.6.2 Análise da variável G (porcentagem de germinação)

Os efeitos das variáveis independentes sobre a resposta G são apresentados na Tabela 4.19, verificando-se que somente  $X_2$  e  $X_2^2$  exercem influência estatística na resposta, uma vez que seus efeitos em módulo, são maiores ou da mesma grandeza do erro. Este resultado é confirmado pelo Gráfico 4.14, no qual os efeitos estatisticamente significativos para Gestão à direita da reta vertical, ou seja, ultrapassam o limite de rejeição e portanto estão fora da região de hipótese nula.

Tabela 4.19 - Efeitos estimados para a variável de resposta germinação (G)

Efeitos	Valores estimados $\pm$ erro
Grande média	85,4871 $\pm$ 2,6061
$X_1$	-8,0201 $\pm$ 3,6911
$X_1^2$	1,4383 $\pm$ 4,1378
$X_2$	-25,4219 $\pm$ 3,6911
$X_2^2$	-25,2203 $\pm$ 4,1378
$X_1 X_2$	-9,0000 $\pm$ 5,2122

Gráfico 4.14 - Diagrama de Pareto para a variável de resposta G.



Carlesso et al. (2009) ressaltam que além de especificar um valor de temperatura limite para a secagem de sementes, também é importante considerar as condições de secagem, o teor de água e do tempo de exposição, a fim de garantir as qualidades fisiológicas do material. Analisando a Tabela 4.19, verifica-se que o aumento na temperatura provoca uma redução na porcentagem de germinação (G) das sementes de painço. Apesar disso, observando a matriz de experimentos (Tabela 4.14), com exceção dos ensaios 3,4, 8 e 9, os percentuais de germinação das sementes de painço ainda se mostram elevados, sendo em média equivalente a 85,5%. Tal resultado mostra que apesar de operar em condições de temperatura relativamente altas, as sementes não sofreram danos que as impossibilitasse de germinar, o que pode estar associado à utilização do secador tipo leito de jorro, o qual permite operar em altas temperatura (superiores quando comparadas ao leito fixo), sem com isso danificar a semente, em escala de laboratório. Além disso, é importante ressaltar que cada tipo de semente apresenta características fisiológicas peculiares, de maneira que algumas são mais ou menos resistentes às condições adversas. Pawar e Machewad (2006) relatam que a espécie *S. itálica* consegue crescer sob calor adverso e condições limitadas de chuva, indicando que é capaz de germinar mesmo quando submetida ao estresse térmico e sob condições baixas de umidade.

Através da ANOVA para a resposta G (Tabela 4.20), para um nível de 95% de confiança e de acordo com os resultados obtidos, confirmou-se que as variáveis  $X_2$  e  $X_2^2$  são estatisticamente significativas, visto que somente estas variáveis apresentam  $F_{\text{cal}}$  maior do que o valor de F tabelado ( $F_{1,3} = 10,128$ ) (BOX; HUNTER; HUNTER, 1978). Pela análise do

valor de  $p$ , chega-se à mesma conclusão, uma vez que  $X_2$  e  $X_2^2$  apresentam menor probabilidade de estar dentro da região de hipótese nula.

Tabela 4.20 – ANOVA para a variável de resposta germinação (G)

Efeitos	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	$p$
$X_1$	128,262	1	128,262	4,7213	0,1181
$X_1^2$	3,282	1	3,282	0,1208	0,7511
$X_2$	1288,699	1	1288,699	47,4368	0,0063
$X_2^2$	1009,255	1	1009,255	37,1505	0,0088
$X_1 X_2$	81,000	1	81,000	2,9816	0,1827
Falta de ajuste	204,879	3	68,293	2,5139	0,2345
Erro puro	81,500	3	27,167	-	-
Total (correlação)	2861,417	11	-	-	-

$$R^2 = 0,8999, \alpha = 0,05$$

A partir dos resultados fornecidos pela análise estatística, propôs-se um modelo estatístico para a variável de resposta germinação (Equação 4.6), em função das variáveis codificadas. Os coeficientes de regressão do modelo são apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Coeficientes de regressão para a resposta germinação

Efeitos	Coeficientes de regressão estimados $\pm$ erro
Grande média	85,4871 $\pm$ 2,6061
$X_1$	-4,0101 $\pm$ 1,8455
$X_1^2$	0,7191 $\pm$ 2,0689
$X_2$	-12,7109 $\pm$ 1,8455
$X_2^2$	-12,6102 $\pm$ 2,0689
$X_1 X_2$	-4,500 $\pm$ 2,6061

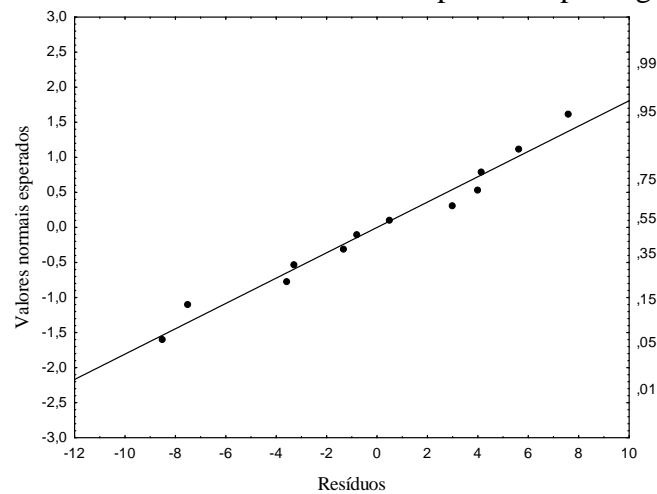
$$G = 85,4871 - 4,0101X_1 - 12,7109X_2 - 4,5X_1X_2 + 0,7191X_1^2 - 12,6102X_2^2 \quad \text{Equação (4.6)}$$

O modelo completo descrito pela Equação 4.6 apresenta coeficiente de determinação múltipla ( $R^2$ ) equivalente à 0,8999, logo consegue reproduzir ou explicar 89,99% das variabilidades experimentais. Com o intuito de reduzir o modelo proposto pela Equação 4.6, foi realizada uma ANOVA considerando apenas as variáveis estatisticamente

significativas para a resposta G ( $X_2$  e  $X_2^2$ ), obtendo-se um modelo reduzido com valor de  $R^2$  igual a 0,8256, ou seja, inferior ao determinado para o modelo completo. Além disso, foi verificado que o modelo reduzido apresentou uma tendência na distribuição de resíduos e não homogeneidade da variância, indicando sua inadequação. Portanto, para a resposta germinação, optou-se pelo modelo completo (Equação 4.6), ressaltando que todas as análises realizadas consideraram um nível de significância  $\alpha = 0,05$ .

O Gráfico 4.15 ilustra a correlação entre os valores preditos pelo modelo proposto pela Equação 4.6 e os valores observados experimentalmente, verificando-se que os resíduos estão distribuídos em torno da curva normal e sua maioria estão em torno do zero, confirmando que o modelo proposto ajusta bem os dados experimentais.

Gráfico 4.15 - Gráfico normal dos resíduos para a resposta germinação.



#### 4.6.2.1 Superfície de resposta e curvas de nível para G

O modelo estatístico proposto para G é visualizado por meio da superfície de resposta e respectivas curvas de nível, conforme os Gráficos 4.16 e 4.17, respectivamente. Representa-se no eixo z a resposta G e nos eixos x e y as duas variáveis independentes  $X_1$  e  $X_2$ . Pela análise dos Gráficos 4.16 e 4.17 é verificado que para obter porcentagens de germinação acima de 80%, é necessário operar com níveis de  $X_2$  abaixo de 0,4 (temperaturas menores que 71°C), para qualquer valor de  $X_1$  (tempo, min).

Gráfico 4.16 – Superfície de resposta para G.

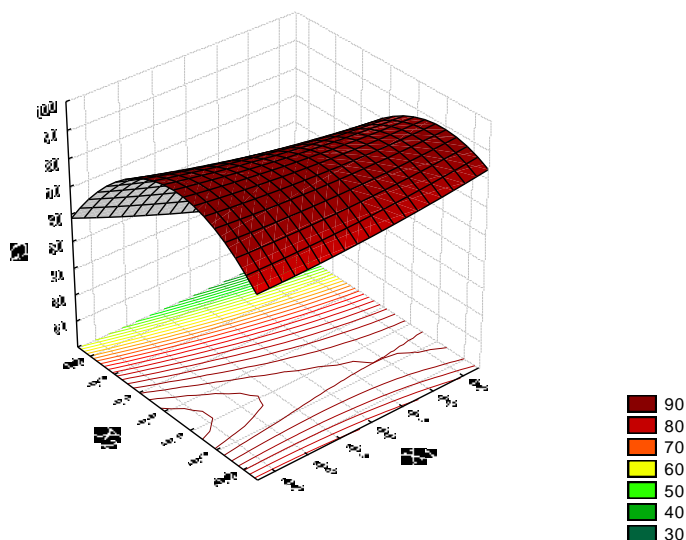
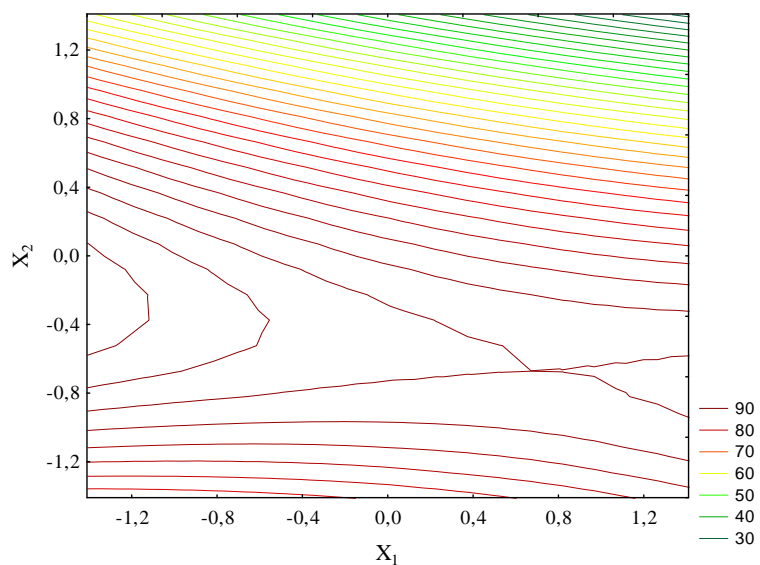


Gráfico 4.17 – Curvas de nível para G.



#### 4.6.3 Análise da variável IVG (índice de velocidade de germinação)

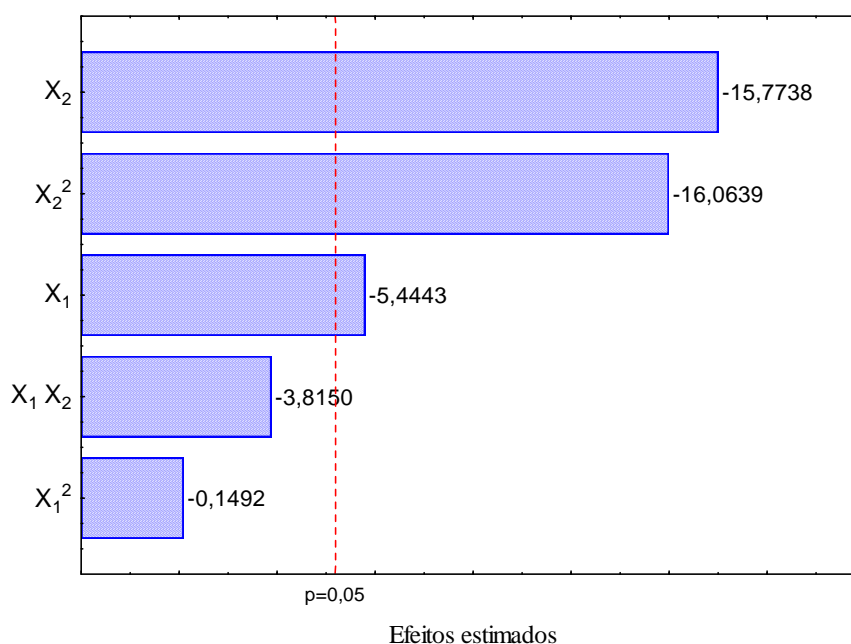
Os efeitos das variáveis independentes sobre a resposta IVG são apresentados na Tabela 4.22, evidenciando que somente as variáveis codificadas  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_2^2$  exercem influência estatística na resposta, uma vez que seus efeitos em módulo, são maiores ou da mesma grandeza do erro. O diagrama de Pareto (Gráfico 4.18) confirma que as variáveis  $X_1^2$  e

a interação  $X_1X_2$  não produzem efeitos estatisticamente significativos para IVG, uma vez que estão à esquerda da reta vertical, ou seja, não ultrapassam o limite de rejeição e portanto estão na região de hipótese nula.

Tabela 4.22 - Efeitos estimados para a variável de resposta índice de velocidade de germinação (IVG)

Efeitos	Valores estimados $\pm$ erro
Grande média	31,5341 $\pm$ 1,0122
$X_1$	-5,4443 $\pm$ 1,4335
$X_1^2$	-0,1492 $\pm$ 1,6071
$X_2$	-15,7738 $\pm$ 1,4335
$X_2^2$	-16,0639 $\pm$ 1,6071
$X_1 X_2$	-3,8150 $\pm$ 2,0243

Gráfico 4.18 - Diagrama de Pareto para a variável de resposta IVG



De acordo com Carvalho e Nakagawa (1988), citado por Alves et al. (2005), a temperatura apresenta grande influência, tanto na porcentagem de germinação quanto na velocidade do processo germinativo. Pela análise da Tabela 4.22, é verificado que o aumento da temperatura e do tempo de secagem interferem negativamente na resposta IVG, uma vez que seus efeitos são negativos. Esse comportamento também foi observado durante o estudo

da secagem de sementes de mamão, no qual o aumento da temperatura de 50°C para 58°C influenciou negativamente no vigor das sementes (CARLESSO et al.,2009).

Os resultados fornecidos pela ANOVA (Tabela 4.23) confirmam que somente as variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_2^2$  são estatisticamente significativas, pois estas variáveis apresentam  $F_{cal}$  maior do que o valor de  $F$  tabelado disponível em Box, Hunter e Hunter (1978), o qual equivale a  $F_{1,3} = 10,128$ , em 95% de confiança. A coluna com os valores de  $p$ , retifica as conclusões fornecidas pelo Teste F.

Tabela 4.23 – ANOVA para a variável de resposta índice de velocidade de germinação (IVG)

Efeitos	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	$p$
$X_1$	59,105	1	59,1055	14,4234	0,0321
$X_1^2$	0,035	1	0,0353	0,0086	0,9319
$X_2$	496,147	1	496,1468	121,0734	0,0016
$X_2^2$	409,451	1	409,4506	99,9172	0,0021
$X_1 X_2$	14,554	1	14,5542	3,5516	0,1559
Falta de ajuste	0,977	3	0,3255	0,0794	0,9668
Erro puro	12,294	3	4,0979	-	-
Total (correlação)	1007,556	11	-	-	-

$$R^2 = 0,9868, \alpha = 0,05$$

Partindo dos resultados da análise estatística, um modelo matemático foi proposto para a variável de resposta índice de velocidade de germinação (Equação 4.7) em função das variáveis codificadas. Os coeficientes de regressão do modelo são apresentados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 - Coeficientes de regressão para a resposta índice de velocidade de germinação

Efeitos	Coeficientes de regressão estimados $\pm$ erro
Grande média	31,5341 $\pm$ 1,0122
$X_1$	-2,7222 $\pm$ 0,7168
$X_1^2$	-0,0746 $\pm$ 0,8035
$X_2$	-7,8869 $\pm$ 0,7168
$X_2^2$	-8,0319 $\pm$ 0,8035
$X_1 X_2$	-1,9075 $\pm$ 1,0121



$$IVG = 31,5341 - 2,7222X_1 - 7,8869X_2 - 1,9075X_1X_2 - 0,0746X_1^2 - 8,0319X_2^2 \quad \text{Equação (4.7)}$$

O modelo descrito pela Equação 4.7 possui um coeficiente de determinação múltipla ( $R^2$ ) equivalente à 0,9868. Porém, a fim de verificar a possibilidade de reduzir os parâmetros na equação para a resposta IVG (Equação 4.7), foi realizada uma nova análise de variância (Tabela 4.25) considerando apenas as variáveis que apresentaram significância estatística, ou seja,  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_2^2$  e obteve-se o modelo reduzido, como mostra a Equação 4.8.

Tabela 4.25 – ANOVA para a variável de resposta IVG para a obtenção do modelo reduzido

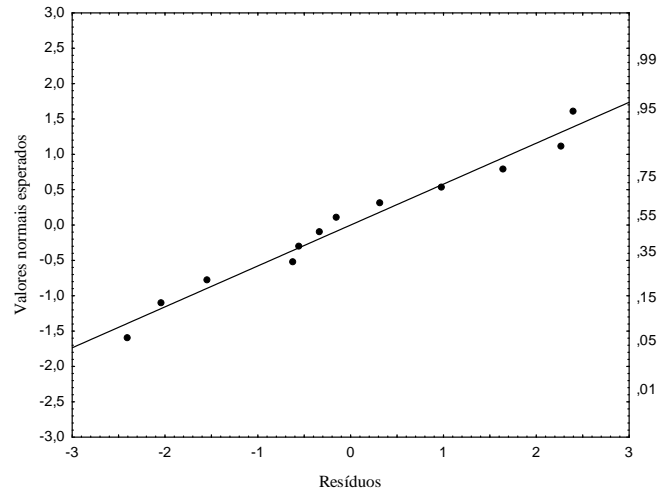
Efeitos	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor de F	Valor de p
$X_1$	59,105	1	59,1055	14,4234	0,0321
$X_2$	496,147	1	496,1468	121,0734	0,0016
$X_2^2$	424,444	1	409,4506	99,9172	0,0021
Falta de ajuste	15,566	5	3,1132	0,7597	0,6332
Erro puro	12,294	3	4,0979	-	-
Total (correlação)	1007,556	11	-	-	-

$$R^2 = 0,9724, \alpha = 0,05$$

$$IVG = 31,5341 - 2,7222X_1 - 7,8869X_2 - 8,0319X_2^2 \quad \text{Equação (4.8)}$$

Analisando a Tabela 4.25, é verificado que não houve alteração na influência das variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_2^2$  sobre a resposta IVG e que o modelo reduzido (Equação 4.8) é capaz de reproduzir ou explicar 97,24% das variabilidades experimentais, indicando sua excelente adequação. Através da análise do Gráfico 4.19 é verificado que os valores preditos pelo modelo e os valores observados experimentalmente estão distribuídos em torno da curva normal e sua maioria estão em torno do zero, confirmando o bom ajuste.

Gráfico 4.19 - Gráfico normal dos resíduos para IVG em função do modelo reduzido.



#### 4.6.3.1 Superfície de resposta e curvas de nível para IVG

O modelo estatístico proposto para IVG é visualizado por meio da superfície de resposta e respectivas curvas de nível, conforme os Gráficos 4.20 e 4.21, respectivamente. Representa-se no eixo z a resposta IVG e nos eixos x e y as duas variáveis independentes  $X_1$  e  $X_2$ .

Gráfico 4.20 - Superfície de resposta para a variável IVG.

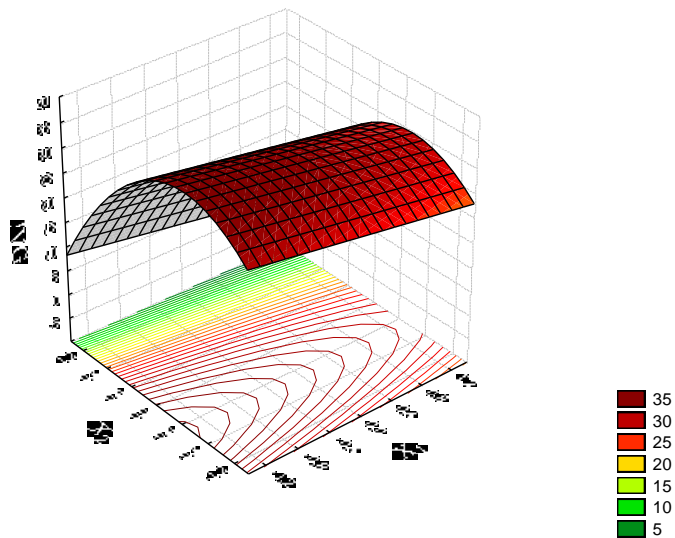
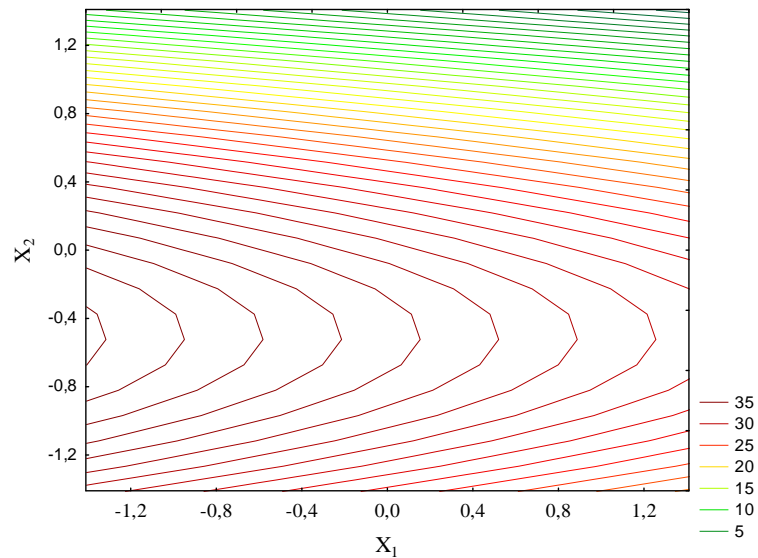


Gráfico 4.21 - Curvas de nível para IVG.



Os Gráficos 4.20 e 4.21 mostram que para qualquer valor de  $X_1$  (tempo) a resposta IVG possui seus mais altos valores para níveis de  $X_2$  abaixo de 0,4. Isso significa dizer que, em termos das variáveis reais, independentemente do tempo de secagem ao qual as sementes de painço sejam expostas, seus resultados para IVG serão elevados, desde que a operação seja conduzida em temperaturas menores que  $71^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.6.4 Otimização das variáveis independentes

A estimativa das condições ótimas durante a secagem de sementes de painço em leito de jorro convencional foi realizada por meio da técnica de otimização simultânea “Função Desejabilidade”, proposta por Derringer e Suich, referenciada em Barros Neto, Scarmínio e Bruns (2007).

A Tabela 4.26 sumariza a programação estabelecida no software *Statistica* para a entrada dos valores utilizados durante a otimização do processo, indicando os valores numéricos para o limite inferior (LI), o valor mediano (M) e o limite superior (LS), todos obtidos experimentalmente. As colunas  $s$  e  $t$  representam os valores atribuídos a estes índices, durante a busca pelo ponto ótimo, por meio da Função Desejabilidade.

Tabela 4.26 – Parâmetros utilizados na otimização das respostas do processo de secagem

Respostas	LI	M	LS	<i>s</i>	<i>t</i>
Razão de umidade	0,28	0,52	0,76	10	10
Germinação	34	61,75	89,5	10	10
Índice de velocidade de germinação	4,74	19,96	35,17	10	10

A Figura 4.1 representa o diagrama da Função Desejabilidade para a descrição das condições otimizadas na secagem de painço, dentro das faixas de valores estabelecidas nos ensaios experimentais. As linhas tracejadas verticais (em vermelho) sinalizam as condições de máxima desejabilidade global.

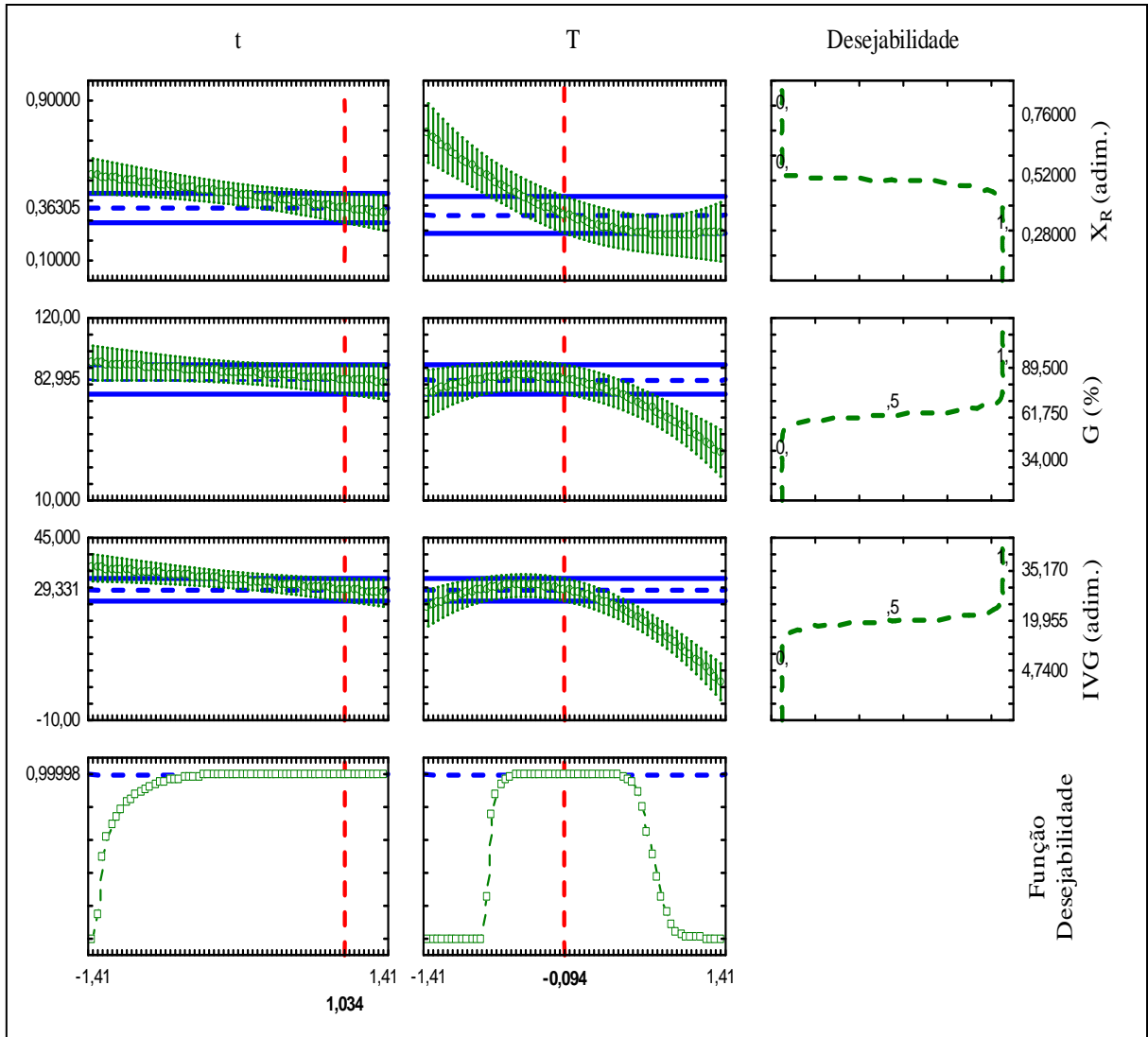
A análise da Figura 4.1 indica que a Função Desejabilidade possui um valor otimizado em 0,9999; o que de acordo com a classificação de Akhanazarova e Kafarov (1982) é classificado como resposta aceitável e excelente. Os gráficos da última coluna mostram os perfis das desejabilidades das quatro respostas, definidas a partir dos valores escolhidos para os limites e os expoentes, na Tabela 4.26.

Desta forma, dentro das condições experimentais estabelecidas, o ponto ótimo é alcançado quando o tempo se encontra próximo ao nível +1 (1,034) e a temperatura está próxima ao nível central (-0,094). Esse resultado significa que, se a secagem de painço em leite de jorro for realizada durante 121 min à 64°C, é possível obter sementes com um percentual germinativo igual a 82,99% ; índice de velocidade de germinação de 29,33 (adimensional) e teor de umidade final igual a 11 %b.s.

É importante ressaltar que os valores ótimos encontrados para a Função Desejabilidade estão dentro das faixas previstas pelos modelos descritos anteriormente para  $X_R$  (Seção 4.6.1), G (Seção 4.6.2), e IVG (Seção 4.6.3) reafirmando a coerência das equações propostas e complementação entre os resultados. Apesar da metodologia de superfície de resposta não indicar com precisão um ponto ótimo para as três variáveis simultaneamente (como a Função Desejabilidade é capaz), esta metodologia se mostra adequada para indicar as faixas em que os melhores resultados podem ser obtidos.

Portanto, verifica-se que é possível realizar a secagem das sementes de painço em leite de jorro e obter sementes com teor de umidade adequado ao armazenamento, sem com isso danificar a qualidade fisiológica do embrião, pois se consegue alcançar elevadas porcentagens germinativas com um índice de velocidade de germinação muito satisfatório.

Figura 4.1 - Perfis para os valores preditos e a função desejabilidade



---

---

## **Capítulo 5**

### **Conclusão e Sugestões**

---

---

## CONCLUSÃO E SUGESTÕES

### 5.1 CONCLUSÃO

De acordo com as condições em que as análises foram realizadas, conclui-se que:

- As sementes de painço possuem boa fluidez, pouca rugosidade superficial, fator de forma igual a 0,74 e formato arredondado, características que a conferem comportamento dinâmico extremamente satisfatório, sobretudo em leito de jorro, uma vez que são classificadas pelo diagrama de Geldart como favoráveis a este sistema.
- As sementes de painço apresentaram comportamento fluidodinâmico satisfatório nas duas configurações de leito utilizadas (jorro cônico e convencional)
- A correlação de Choi e Meisen (1992) se mostrou adequada na predição dos valores de  $U_{jm}$ , tanto para o leito de jorro cônico, quanto para o convencional, com desvios relativos na média de 23,51 e 15,60%, respectivamente.
- Foi verificado que durante a secagem, o mecanismo de transferência de massa ocorreu predominantemente por difusão, comportamento característico de produtos fibrosos, como os de origem agrícola.
- Os modelos que melhor se adequaram ao comportamento cinético, foram: Aproximação por Difusão (1980), Page (1949) e Midilli et al. (2002).
- Os coeficientes de difusão efetiva para as sementes de painço cresceram com o aumento da temperatura. O coeficiente efetivo de difusão foi descrito pela equação de Arrhenius, alcançando um valor de  $R^2 = 0,9870$ , e obteve para a energia de ativação valor igual a 24,86 kJ/mol.
- O leito de jorro se mostrou uma alternativa eficaz para a secagem de sementes de painço, tornando possível operar em condições amplas de temperatura (44 a 86°C) e em curtos intervalos de tempo (48 a 132 min).

- O PCCR foi uma ferramenta útil durante a obtenção e interpretação dos dados experimentais, visto que possibilitou a verificação das influências das variáveis de entrada sobre as variáveis resposta, tanto de forma isolada quanto as possíveis interações.
- Dentro das restrições experimentais, as influências estatisticamente significativas na resposta  $X_R$ , foram,  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_2^2$ , ambas influenciando na redução da razão de umidade, ou seja, reduzindo o teor de umidade final das sementes.
- Somente as variáveis codificadas  $X_2$  e  $X_2^2$  promoveram efeitos estatisticamente significativos sobre a resposta G. Apesar deste efeito, foi observado que as porcentagens de germinação se mantiveram satisfatórias, o que pode estar associado à configuração do secador utilizado (leito de jorro), às características fisiológicas da semente, entre outros.
- A resposta IVG foi estatisticamente influenciada pelas variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_2^2$ , de tal forma que o aumento da temperatura e tempo de secagem reduziram o índice de velocidade de germinação.
- Os modelos propostos para avaliar as respostas  $X_R$ , G e IVG apresentaram coeficientes de correlação iguais a 0,9632; 0,8999 e 0,9724, respectivamente, indicando que os ajustes foram adequados e que as variáveis dependentes e independentes estão relacionadas por funções quadráticas.
- O ponto ótimo, para a secagem de painço em leito de jorro, é alcançado em 121 min à uma temperatura de 64°C, obtendo-se sementes com um percentual germinativo igual a 82,99% ; índice de velocidade de germinação de 29,33 (adimensional) e teor de umidade final igual a 11%b.s.
- Os resultados obtidos pelos modelos propostos para  $X_R$ , G e IVG estão de acordo ao encontrado pela Função Desejabilidade.
- A secagem de sementes de painço em leito de jorro se mostrou adequada, visto que foi possível secar as sementes até um teor de umidade adequado ao armazenamento, sem com isso danificar as características fisiológicas da semente.



## 5.2 SUGESTÕES

- Durante o trabalho desenvolvido, as respostas G e IVG foram medidas imediatamente, portanto seria interessante avaliar essas respostas em função do tempo e condições de armazenamento.
- Analisar a qualidade nutricional das sementes após a secagem.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO JÚNIOR, P.C; CORRÊA, P.C. **Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 3, n. 3, p. 349-353, 1999.
- AKHANAAROVA, S.; KAFAROV, V. **Experiment optimization in chemistry and chemical engineering**. Moscow: Mir, 1982.
- ALMEIDA, C.; ROCHA, S.C.S. **Fluidodinâmica de sementes de brócolos em leito fluidizado e leito de jorro**. Scientia Agrícola, v. 59, p. 645-652. 2002.
- ALMEIDA, D.P.; RESENDE, O. COSTA, L.M.; MENDES, U.C.; SALES, J.F.. **Cinética de secagem de feijão adzuki (*Vigna angularis*)**. Global Science and Technology, v. 2, p. 72-83. 2009.
- ALVES, M.C. S.; FILHO, S. M.; BEZERRA, A. M. E., OLIVEIRA, V. C. **Germinação de sementes e desenvolvimento de plântulas de *Moringa oleifera* L. em diferentes locais de germinação e submetidas à pré-embebição**. Ciência e agrotecnologia, v. 29, n. 5, p. 1083-1087, 2005.
- ANJU, T.; SARITA, S. **Suitability of Foxtail Millet (*Setaria itálica*) and Barnyard Millet (*Echinochloa frumentacea*) for development of low glycemic index biscuits**. Malaysian Journal of Nutrition. V.16, p. 361 – 368. 2010.
- AOAC. Association of Official Analytical Chemists. **Official Methods of Analysis**. 16<sup>th</sup> edition. Gaithersburg: AOAC, 1997.
- ASENJO, J.A.; MUNOZ, R.; PYLE, D.L. **On the transitions from a fixed to a spouted bed**. Chemical Engineering Science, vol. 32, p. 109 - 117. 1977.
- BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. **Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs**. Journal of Food Engineering, v. 65, p. 449–458. 2004.
- BACELOS, M.S. **Análise do comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro com misturas de tamanho de partículas**. 2006, 113 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 4<sup>a</sup> Edição. Porto Alegre: Bookman, 2010. 414 p. Capítulo 1.
- BARROZO, M.A.S.; SANTOS, K.G.; CUNHA, F.G. **Mechanical extraction of natural dye extract from *Bixa orellana* seeds in spouted bed**. Industrial Crops and Products. V. 45, p. 279-282. 2013.

- BENELLI, L.; SOUZA, C.R.F.; OLIVEIRA, W.P. **Spouted bed performance on drying of an aromatic plant extract**. Powder Technology. V. 239, p. 59-71. 2013.
- BEZERRA, C.V.; AMANTE, E.R.; OLIVEIRA, D.C.; RODRIGUES, A.M.C.; SILVA, L.H.M. **Green banana (*Musa cavendishii*) flour obtained in spouted bed** - Effect of drying on physico-chemical, functional and morphological characteristics of the starch. Industrial Crops and Products. V. 41, p. 241-249. 2013.
- BOX, G.E.P; HUNTER, W.G; HUNTER, J.S. **Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis, and model building**. New York: Wiley, 1978. 653p.
- BRAGA, M.B.; ROCHA, S.C.S. **Drying of milk-blackberry pulp mixture in spouted bed**. The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 91, p. 1786 – 1792. 2013. doi:10.1002/cjce.21918.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNDA/DNDV/CLAV, 1992. 365p.
- BRUNELLO, G.; NINA, G. D.; NUNES, F.C.S.; NASCIMENTO, C.A.O. **Minimum Air Requirement for Spouting Mixed Particles. International Symposium on Spouted Beds**. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 52, p. 170 – 173. 1974.
- BUTZGE, J.J.; DAMATO, A.V.; ROCHA, S.C.S. **Estudo da fluidodinâmica e da secagem de soja em leito de jorro**. XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Búzios, RJ. p. 3122-3131. 2012.
- CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; THIÉBAUT, J. T. L.; OLIVEIRA M. T. R. **Germinação e vigor de sementes de mamão (*Carica papaya* L.) cv. Golden secadas em altas temperaturas**. Revista Brasileira de Sementes, vol. 31, nº 2, p.228-235. 2009.
- CARMONA, R.; MARTINS, C.R.; FÁVERO, A.P. **Fatores que Afetam a Germinação de Sementes de Gramíneas Nativas do Cerrado**. Revista Brasileira de Sementes, v. 20, n. 1, p. 16-22. 1998.
- CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4ª Edição. Jaboticabal: FUNEP. 588p. 2000. ISBN: 85-87632-01-9.
- CHAYJAN, R.A.; ALIZADE, H.H.A.; SHADIDI, B. **Modeling of some pistachio drying characteristics in fix, semi fluid and fluid bed dryer**. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, v.14, p. 143-154. 2012.
- CHOI, M.; MEISEN, A. **Hydrodynamics of shallow, conical spouted beds**. Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 70, p. 916– 924. 1992.
- CORDEIRO, D.S.; OLIVEIRA, W.P. **Technical aspects of the production of dried extract of *Maytenus ilicifolia* leaves by jet spouted bed drying**. International Journal of Pharmaceutics, v. 299, p. 115–126. 2005.

- CORRÊA, P.C.; JÚNIOR, P.C.A.; RIBEIRO, D.M.; SILVA, F.F. **Equilíbrio higroscópico de milho, alpiste e painço**: Obtenção e modelagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.10, n.1, p.162–167, 2006.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. **Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas**. *Engenharia Agrícola*, v. 27, n. 2, p. 501-510. 2007.
- CORTEZ, O. A. **Estudo Fluidodinâmico e Cinético da Ustulação de Concentrados de Sulfeto de Zinco em Reator de Leito Fluidizado**. 2002. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.
- COSTA, M. A. **Fluidodinâmica e ampliação de escala de leitos de jorro bidimensionais**. 1998, 155p. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1998.
- COSTA, M. A. **Peletização de Sementes de Brócolos em Leito de Jorro Cônico**. 2003. 209p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 2003.
- COSTA, C.M.L. **Caracterização e análise experimental do recobrimento de sementes de jambu (*Spilanthes oleracea*) em leito fluidizado**. 2010. 182f. Tese de Doutorado ( Faculdade de Engenharia Química) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Campinas, SP, 2010.
- CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2nd edition., Oxford University Press, Oxford, 1975.
- DAVIDSON, J. F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. **Fluidization**. Academic Press, INC. P. 201-221. 1985.
- DEVAHASTIN, S.; MUJUMDAR, A.S. **Fundamental Principles of Drying** .In: MUJUMDAR, A.S. **MUJUMDAR'S Practical Guide to industrial drying**: Principles, Equipment and New Developments. Canada: Exergex Corp, 2000. p. 1 - 22. ISBN 9748591395.
- DIAMANTE, L.M.; MUNRO, P.A. **Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices**. *Solar Energy*, v. 51, p. 271-276. 1993.
- DOYMAZ, I.; PALA, M. **The thin-layer drying characteristics of corn**. *Journal of Food Engineering*, v. 60, p. 125-130. 2003.
- EOL. *Encyclopedia Of Life*. **Setaria italica - Foxtail millet**. Disponível em:< <http://eol.org/pages/1114673/overview>> Acesso em: 21/10/2013 às 12:23h.
- EPSTEIN, N; GRACE, J. R. **Spouted and spout-fluid beds** : fundamentals and applications. United Kingdom: Cambridge University Press, 2011. 340 p.

- FANE, A.G.; MITCHELL, R.A. **Minimum spouting velocity of scaled-up beds**. Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 62, p. 437–439. 1984.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Setaria itálica*. 2013. Disponível em: < <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/cropView?id=9732>> .Acesso em 16/09/13 às 13:59 h.
- FARIA, L.J.G. **Análise experimental do processo de secagem de urucum (*bixa orellana* L.) em leito fixo**. UNICAMP, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Química, 274f. Campinas, SP, 1998.
- FARIA, R.Q.; TEIXEIRA, I.R.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R; RESENDE, O. **Cinética de secagem de sementes de crambe**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.16, n.5, p. 573-583. 2012.
- FERNANDEZ-AKARREGI, A.R.; MAKIBAR, J.; LOPEZ, G.; AMUTIO, M.; OLAZAR, M. **Design and operation of a conical spouted bed reactor pilot plant (25 kg/h) for biomass fast pyrolysis**. Fuel Processing Technology. V. 112, p. 48-56. 2013.
- FINCH-SAVAGE, W. E.; CLAY, H. A.; LYNN, J. R; MORRIS, K. **Towards a genetic understanding of seed vigour in small-seeded crops using natural variation in Brassica oleracea**. Plant Science, p. 582–589. 2010.
- FOUST, A.S; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Capítulo 18, p. 401-434. 699p.
- FREIRE, J.T.; FERREIRA, M.C. **Aplicações em sistemas particulados**. São Carlos: Suprema, 2009. 380p. P. 97-112.
- GARCIA, D. C. ; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. **A secagem de sementes**. Ciência Rural, v. 34, n.2, p. 603-608. 2004.
- GELDART, D. **Types of Gas Fluidization**. Powder Technology, v.7, p. 285-292. 1973.
- GELY, M.C.; SANTALLA, E.M. **Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds**. Journal of Food Engineering, v. 78, p. 1029–1033. 2007.
- GLOBO RURAL. **Em GO, agricultores apostam no painço como alternativa para safrinha**. G1 Economia: Agronegócios. Disponível em: < <http://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2012/06/em-go-agricultores-apostam-no-painco-como-alternativa-para-safrinha.html> > Acesso em: 18/09/13 às 9:00 h.
- GOOSSEN, W. R. A. **Classification of fluidized particles by Archimedes number**. Powder Technology. V. 98, p. 48–53, 1998.

- GORSHTEN, A. E.; MUKHLENOV, I. P. **Hydraulic Resistance of a Fluidized Bed in a Cyclon without a Grate. Critical Gas Rate Corresponding to the Beginning of Jet Formation.** Zhurnal Prikladnoi Khimii (Leningrad) v. 37, p.1887-1893. 1964.
- GRACE, J. R. **Contacting modes and behavior classification of gas–solid and other two-phase suspension.** The Canadian Journal Of Chemical Engineering. V. 64, p. 353–363, 1986.
- HARRINGTON, J.F. Seed storage and longevity. In: KOZLOWSKI, T.T. **Seed biology.** New York : Academic, 1972. V.3, p.145-245.
- HOLDICH, R.G. **Fundamentals of Particle Technology.** United Kingdom: Midland Information Technology and Publishing, 2002.169p. Capítulo 3, p. 21-28. ISBN 0-9543881-0-0.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos ( versão eletrônica).** Coordenadores Odair Zenebon, Neus Sadocco Pascuet e Paulo Tigles. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020p.
- JANGAM, S.V.; MUJUMDAR, A.S. Basic Concepts and Definitions in Drying of Foods. In: JANGAM, S.V.; LAW, C.L.; MUJUMDAR, A.S. **Drying of Foods, Vegetables and Fruits.** Volume 1 . Published in Singapore: 2010. ISBN: 978-981-08-6759-1. p. 1-30.
- JONG, J. A. H.; HOFFMANN, A. C.; FINKERS, H. J. **Properly determine powder flowability to maximize plant output.** Chemical Engineering Progress, v. 95, n. 4, p. 25-34, 1999.
- KAHYAOGLU ,L. N.; SAHIN, S.; SUMNU, G. **Physical properties of parboiled wheat and bulgur produced using spouted bed and microwave assisted spouted bed drying.** Journal of Food engineering. V. 98, p. 159-169. 2010.
- KALEEMULLAH, S.; KAILAPPAN, R. **Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies.** Journal of Food Engineering, v. 76, p. 531-537, 2006.
- KAPTSO, K.G.; NJINTANG, Y.N.; KOMNEK, A.E.; HOUNHOUIGAN, J.; SCHER, J.; MBOFUNG, C.M.F. **Physical properties and rehydration kinetics of two varieties of cowpea (*Vigna unguiculata*) and bambara groundnuts (*Voandzeia subterranea*) seeds.** Journal of Food Engineering, v. 86, p. 91–99. 2008.
- KASHANINEJAD, M.;MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. **Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts.** Journal of Food Engineering, v.78, p. 98- 108. 2007.
- KEEY, R. B. **Drying of loose and particulate materials.** New York: Hemisphere Pub. Corp., 1992. 504p. Capítulo 2, p. 11-27.
- KMIEC, A. **Hydrodynamics of flows and heat transfer in spouted beds.** The Chemical Engineering Journal, vol 19, p. 189 - 200. 1980.

- LIMA, A. C. C. **Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado**. Campinas, SP, 1995. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.
- LOURENÇO, R.O. **Identificação e monitoramento de regimes de escoamento em leito de jorro**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, MG. Uberlândia, 2006. 115f.
- LU, H.; ZHANG, J.; WU, N.; LIU, K.; XU, D.; LI, Q. **Phytoliths Analysis for the Discrimination of Foxtail Millet ( *Setaria italica*) and Common Millet ( *Panicum miliaceum*)**. PLOS one, V. 4, N° 2, p. 1-15. 2009.
- MAGUIRE, J.D. **Speed of Germination Aid in selection and Evaluation for Seedling Emergence and Vigor**. Crop Science, v. 2, n° 2, p. 176-177. 1962.
- MANURUNG, F. **Studies in the spouted bed technique with particular reference to lowtemperature coal carbonization**. Tese de Doutorado, University of New South Wales, Kensington, Australia (1964).
- MARCOS FILHO, J.; CICERO, S.M.; SILVA, W.R. **Avaliação da qualidade das sementes**. Piracicaba: FEALQ, 1987. 230p. Capítulo 10, p. 150.
- MARINOS-KOURIS, D.; MAROULIS, Z.B. Transport Properties in the Drying of solids. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. Third Edition. New York: Taylor & Francis Group, 2006. p. 82-120.
- MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. **Hydrodynamic Characteristics of Jet Spouted Beds**. Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 61, p.377-381. 1983.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974. 304 p.
- MATHUR, K.B.; GISHLER, P.E. **A technique for contacting gases with solid particles**. American Institute of Chemical Engineers Journalv. **1**, p. 157-164. 1955.
- MEDEIROS, M.F.D. **Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro**. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP: 2001. 247f.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. **A thin layer drying model of parboiled wheat**. Journal of Food Engineering, v. 66, p. 513-518. 2005.
- MOHSENIN, N. N. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publishers,. 1970.

- MONTEIRO, P.V.; GOPAL, D.H.; VIRUPAKSHA, T. K.; RAMACHANDRA, G. **Chemical Composition and *In Vitro* Protein Digestibility of Italian Millett (*Setaria italica*)**. Food Chemistry. V. 29, p. 19-26. 1988.
- MORAIS, S.J.S.; DEVILLA, I.A.; FERREIRA, D.A.; TEIXEIRA, I.R. **Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)**. Revista Ciência Agronômica, v. 44, n. 3, p. 455-463, 2013.
- MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. Third Edition. New York: Taylor & Francis Group, 2006. 1312p.
- MUJUMDAR, A.S. **Drying: principles and practice**. ALBRIGHT, L.F. Albright Chemical Engineering Handbook. New York: CRC Press, 2009. 1909p. ISBN: 978-0-8247-5326-7. Capítulo 23 p.1668 – 1716.
- NAKAGAWA, J. Testes de Vigor Baseados no Desempenho das Plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA NETO, J.B. **Vigor de Sementes: Conceitos e Testes** Londrina: ABRATES, 1999. 218p. Capítulo 2, p. 1-24.
- NASU, H.; MOMOHARA, A.; YASUDA, Y.; HE, J. **The occurrence and identification of *Setaria italica* (L.) P. Beauv. (foxtail millet) grains from the Chengtoushan site (ca. 5800 cal B.P.) in central China, with reference to the domestication centre in Asia**. Vegetation History and Archaeobotany. V. 16, p. 481 – 494. 2007.
- OGINO F., ZHANG, L.; MAHASHI, Y., **Minimum rate of spouting and peak pressuredrop in a spouted bed**. International Chemical Engineering of Japan, v. 33, p. 265-272. 1993.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; AGUAYO, A.T.; ARANDES, J.M.; BILBAO, J. **Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds**. Industrial Engineering Chemistry Research. V. 31, p. 1784-1793. 1992.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; AGUAYO, A.T.; ARANDES, J.M.; BILBAO, J. **Pressure drop in conical spouted beds**. The Chemical Engineering Journal, v. 51, p. 53-60. 1993.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; AGUAYO, A.T.; ARANDES, J.M.; BILBAO, J. **Hydrodynamics of nearly flat base spouted beds**. The Chemical Engineering Journal, vol. 55, p. 27-37. 1994.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; CEPEDA, E.; ORITZ DE LATIERRO, R.; BILBAO, J. **Hydrodynamics of fine solids on conical spouted beds**. In: LARGE, J.F.; LAGUERIE, C. **Fluidization VIII**. New York: Engineering Foundation, 1996. p. 197-205.
- OLAZAR, M.; LOPEZ, G.; ALTZIBAR, H.; AMUTIO, M.; BILBAO, J. **Effect of temperature on the drying of sawdust in a conical spouted bed**. European Drying Conference – Euro Drying 2011. Palma. Balearic Island, Spain, 26-28. October 2011.



- OLIVEIRA, W.P. **Contribuição ao estudo do processo de revestimento de partículas em leite de jorro**. Tese de Livre Docência. Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto. Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2002. 139f.
- ORTEGA-RIVAS, E. **Unit Operations of Particulate Solids -Theory and Practice**. CRC Press, página 265. (249 – 279), 2011.
- 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 forms in a spouted bed apparatus by the so-called phase diagram. In: **International Congress Chemical Engineer (CHISA)**:Praga: Czechoslovak Society for Industrial Chemistry, 1969.
- PARK, K. J. **Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem**. Tese de Livre Docência em Fenômenos de Transporte DEA - FEA - UNICAMP. Campinas, 1987. 54 p.
- PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. **Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem**. 2007. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>> Acessado em: 16/02/13 às 14:44 h.
- PAWAR, V.D.; MACHEWAD, G. M. **Processing of foxtail for improved nutrient availability**. Journal of Food Processing and Preservation. V. 30, p. 269-279. 2006.
- PEREA-FLORES, M.J.; GARIBAY-FEBLES, V.; CHANONA-PÉREZ, J.J.; CALDERÓN-DOMINGUEZ, G.; MÉNDEZ-MÉNDEZ, J.V.; PALACIOS-GONZÁLES, E.; GUTIÉRREZ-LÓPES, G.F. **Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures**. Industrial Crops and Products, v.38, p. 64-71. 2012.
- PORTO, P.S.S; LISBÔA, A.C.L. **Fluidynamics of oil shale particles in spouted and fluidized beds**. 4<sup>th</sup> Mercosur Congress on Process Systems Engineering, Costa Verde, RJ - Brazil. p. 1-10. 2005.
- PRADO, M.M.; SARTORI, D.J.M. **Estudo do fenômeno de encolhimento durante a secagem de sementes com diferentes características superficiais**. Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra, v. 21, N° 3, p. 11-20. 2002.
- PROTA. PLANT RESOURCES OF TROPICAL AFRICA. *Setaria italic*. 2013. Disponível em: <<http://www.prota4u.org/protav8.asp?h=M4&t=Setaria,italica&p=Setaria+italica>> Acessado em: 16/09/13 às 14:44 h.
- ROBERTS, J.S.; KIDD, D.R.; PADILLA-ZAKOUR, O. **Drying kinetics of grape seeds**. Journal of Food Engineering, v. 89, p. 460 -465. 2008.

- RODRIGUES, M.I.; LEMMA, A.F. **Planejamento de Experimentos e otimização de processos**. 2ª Edição. Campinas: Cárita Editora, 2009. 358p.
- ROSA, G.S.; ROCHA, S.C.S. **Use of vinasse to produce slow-release coated urea in spouted bed**. The Canadian Journal of Chemical Engineering. V. 91, p. 589-597. 2013.
- SACILIK, K. **Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.)**. Journal of Food Engineering, v. 79, p. 23-30. 2007.
- SAN JOSÉ, M.J. ; OLAZAR, M.; PEÑAS, F.J.;BILBAO, J. **Segregation in Conical Spouted Beds with Binary and Tertiary Mixtures of Equidensity Spherical Particles**. Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 33, p. 1838- 1844, 1994.
- SAN JOSÉ, M. J.; ALVAREZ, S.; MORALES, A.; LÓPEZ, L.B. **Diluted spouted bed at high temperature for the treatment of sludge wastes**. Chemical Engineering Transactions. V. 20. p. 303-308. 2010.
- SAN JOSÉ, M. J.; ALVAREZ, S.; LÓPEZ, L.B. ; GARCIA, I. **Drying of mixtures of agricultural wastes in a conical spouted bed contactor**. Chemical Engineering Transactions. V. 24. p.673-678. 2011.
- SANTANA, E.B. **Análise experimental do comportamento fluidodinâmico e da secagem de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em leito de jorro**. 2011, 142p. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- SHARAF-ELDEEN, Y.I.; BLAISDELL, J.L.; HAMDY, M.Y. **A model for ear corn drying**. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. p. 1261-1271. 1980.
- SILVA, J.S.; CORRÊA, P.C. Estrutura, composição e propriedades dos grãos. In: SILVA, J.S. **Secagem e Armazenamento de Produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 2000. p. 21 – 37.
- SILVA, E.C.; CARVALHO, C.de; UEMURA, V.Y.; NOVENBRE, A.D.L.C. **Métodos para o teste de germinação de sementes de cultura de inverno**. 19º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP (SIICUSP). Resumo de Congresso. 2011.
- SIREESHA, Y.; KASETTI, R.B.; NABI, S.A.; SWAPNA, S.; APPARAO, C. **Antihyperglycemic and hypolipidemic activities of *Setaria italica* seeds in STZ diabetic rats**. Pathophysiology, v. 18, issue 2, p. 159-164. 2011. doi: 10.1016/j.pathophys.2010.08.003. Epub 2010 Sep 24.
- SOAVE J; MORAES SA. Medidas de controle de doenças transmitidas por sementes. In: SOAVE J; WETZEL M.M. (Coord). **Patologia de sementes**, Campinas, Fundação Cargill, 1987. p.192-216.

SOUSA, K.A.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; COSTA, L.M. **Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.)**. Revista Ciência Agronômica, v. 42, n. 4, p. 883-892. 2011.

SOUZA, C.R.F. **Estudo comparativo da produção de extrato seco de *Bauhinia forficata* Link pelos processos spray-dryer e leito de jorro**. 2003, 180 p. Dissertação ( Mestrado em Ciências Farmacêuticas ) - Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto.

STANISAVLJEVIC, R.; DJOKIC, D.; MILENKOVIC, J.; DUKANOVIC, L.; STEVOVIC, V.; SIMIC, A.; DODIG, D. **Seed Germination and Seedling Vigour of Italian Ryegrass, Cocksfoot and Timothy Following Harvest and Storage**. Ciência e Agrotecnologia, v.35, n. 6. p. 1141-1148. 2011.

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

TAIRA, H. **Amino acid composition of different varieties of foxtail millet (*Setaria itálica*)**. Food Research Institute, Japan. Vol. 16, pag. 1025 – 1027. 1968.

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: **Tópicos especiais em tecnologia de produtos naturais**. UFPA, NUMA, POEMA, p. 205-219.1998.

TAYLOR, J.R.N.; EMMAMBUX , M. N. Gluten-free foods and beverages from millets. In: Arendt, E. K.; Dal Bello, F. **Gluten-Free Cereal Products and Beverages** . Academic Press: United States of America, 2008. 1ª Edição, p. 123.

THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. **Mathematical Simulation of Corn Drying: A new Model**. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, v. 11, nº 4, p. 582-586. 1968.

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 fertilizer**. Uzbekskii Khimicheskii Zhurnal, v.11, p. 50–59. 1967.

UEMAKI, O.; YAMADA, R.; KUGO, M. **Particle Segregation in a Spouted Bed of Binary Mixtures of Particles**. The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 61, p. 303 - 307. 1983.

URBEN, A.F. Teste de Sanidade de Sementes Forrageiras. In: SOAVE J; WETZEL M.M. (Coord). **Patologia de sementes**. Campinas, Fundação Cargill, 1987. p. 406 - 429.

USHAKUMARI, S.R.; S. LATHA; N.G. MALLESHI. **The functional properties of popped, flaked, extruded and roller-dried foxtail millet (*Setaria itálica*)**. International Journal of Food Science & Technology., v. 39, p. 907-915. 2004.

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

VAN'T LAND, C.M.. **Industrial drying equipment: selection and application**. New York: Marcel Dekker, 1991. 362p.

VENTURINI, T.; BENCHIMOL, L.R.; BERTUOL, D.A.; DA ROSA, M.B.; MEILI, L. **Estudo da secagem e extração de sementes de mamão (*Carica Papaya* L.)**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET/UFSM, v.5. n. 5, p. 950 - 959. 2012.

WANKHEDE, D.B.; SHEHNAJ, A.; RAGHAVENDRA RAO, M.R. **Carbohydrate Composition of Finger Millet (*Eleusine coracana*) and Foxtail Millet (*Setaria italica*)**. Qualitas Plantarum, vol. 28, Nº 4, p. 293-303. 1979.

WEBB, P. A.; ORR, C. Modern Methods of Particle Characterization . Adapted from Chapter 1 of **Analytical Methods in Fine Particle Technology**. Norcross (USA): Micromeritics Instrument Corporation, 1998. p. 1-17.

YANG, W. C. **Handbook of fluidization and fluid particle systems**. Nova York: Marcel Dekker. 2003.

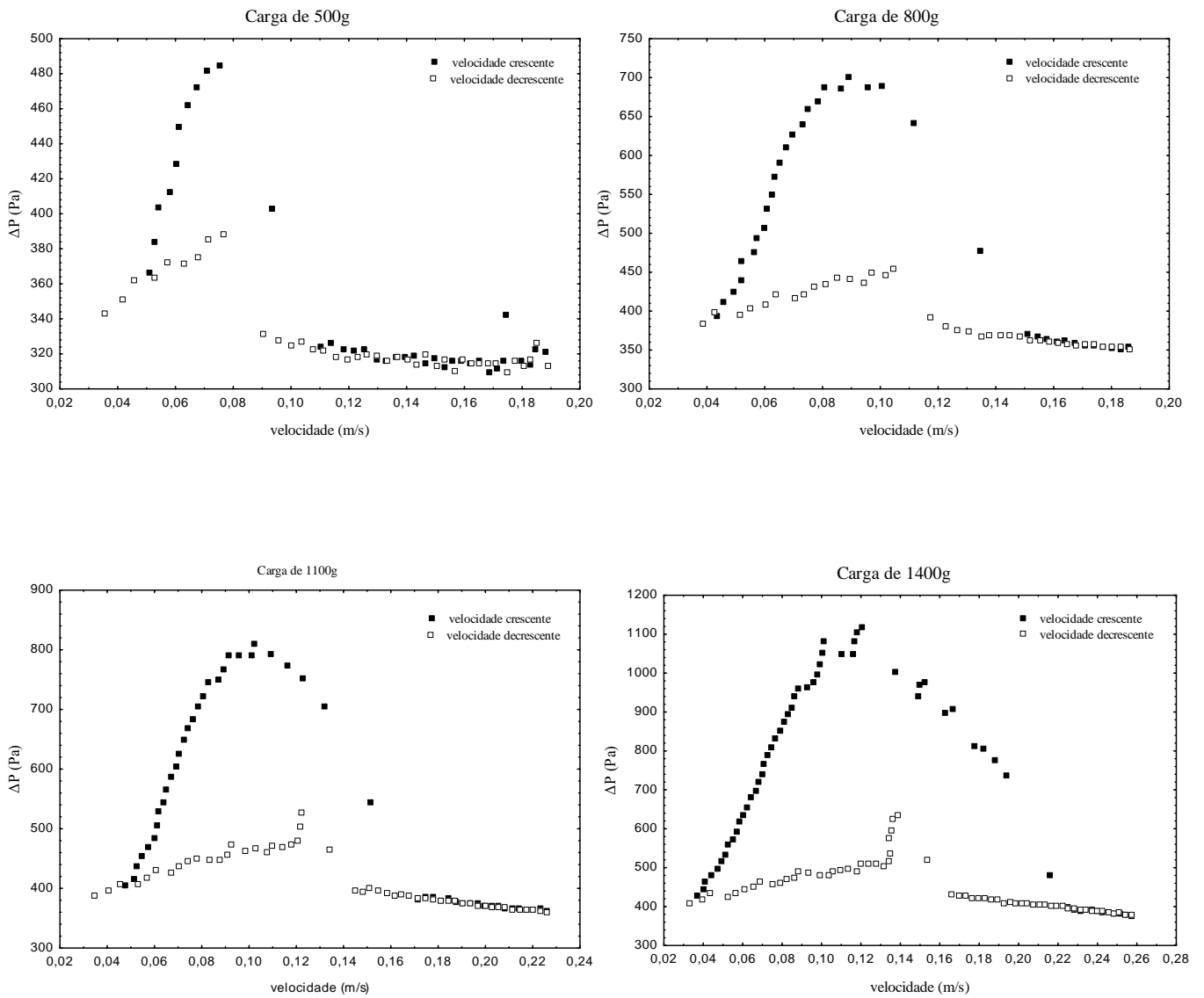
YOKOGAWA, A.; ISAKA, M. **Pressure drop and distribution of static pressure in the spouted bed**. Hitachi Zosen Giho, v. 32, p. 47–53. 1971.

ZANCANELLA, E.F.; BONATTI, J.L.; MARTUCCI, L.M.V. **Cultura do painço**. Campinas: CATI, 1999. Folder.

## **APÊNDICE A**

**CURVAS FLUIDODINÂMICAS PARA DIFERENTES CARGAS DE SEMENTES DE  
PAINÇO EM LEITO DE JORRO CÔNICO.**

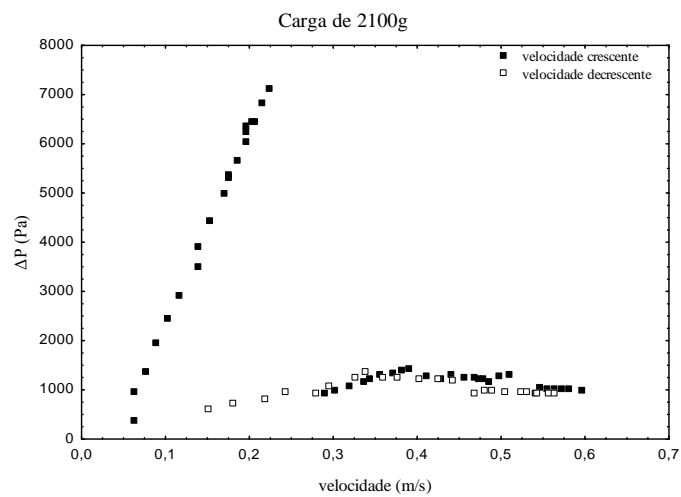
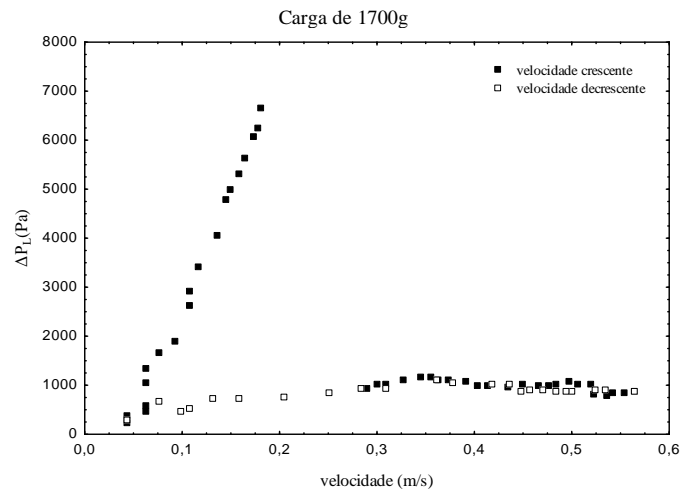
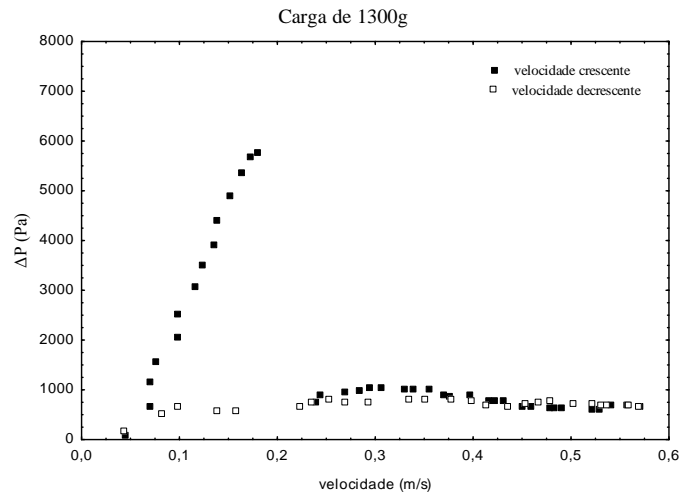
Gráfico A1- Comportamento fluidodinâmico para diferentes cargas em leito de jorro cônico.



## **APÊNDICE B**

### **CURVAS FLUIDODINÂMICAS PARA DIFERENTES CARGAS DE SEMENTES DE PAINÇO EM LEITO DE JORRO CONVENCIONAL**

Gráfico B1- Comportamento fluidodinâmico para diferentes cargas em leito de jorro convencional.





## **APÊNDICE C**

**CURVAS DE SECAGEM EM DIFERENTES TEMPERATURAS AJUSTADAS AOS  
MODELOS DE MIDILLI et al E PAGE**

Gráfico C1 – Curvas de secagem nas diferentes temperaturas ajustadas ao modelo de Midilli et al. (2002).

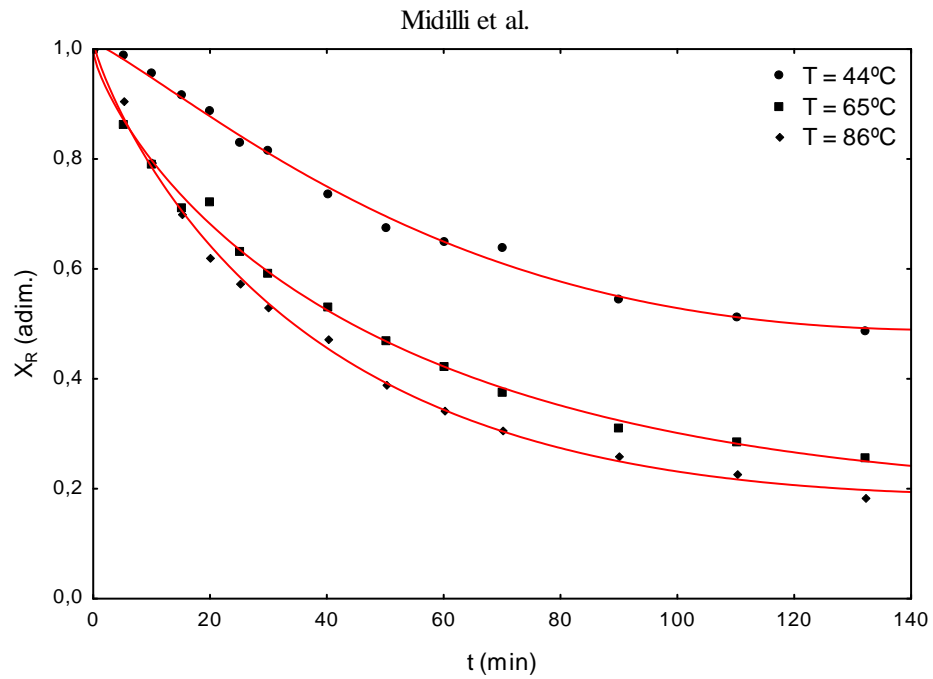
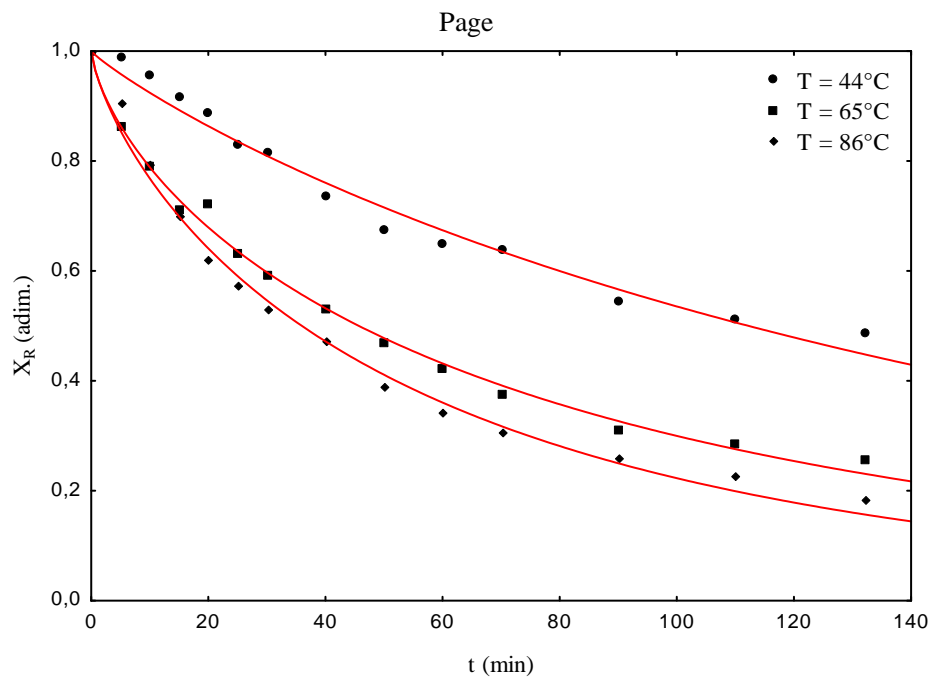


Gráfico C2 – Curvas de secagem nas diferentes temperaturas ajustadas ao modelo de Page (1949).



## **APÊNDICE D**

**DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS  
MATEMÁTICOS UTILIZADOS NA DESCRIÇÃO DA CINÉTICA DE  
SECAGEM DAS SEMENTES DE PAINÇO (*Setaria italica*) EM  
LEITO DE JORRO CONVENCIONAL**

Gráfico D1 – Distribuição dos resíduos para os seis modelos testados para descrever a cinética de secagem das sementes de painço em leito de jorro na temperatura de 44°C.

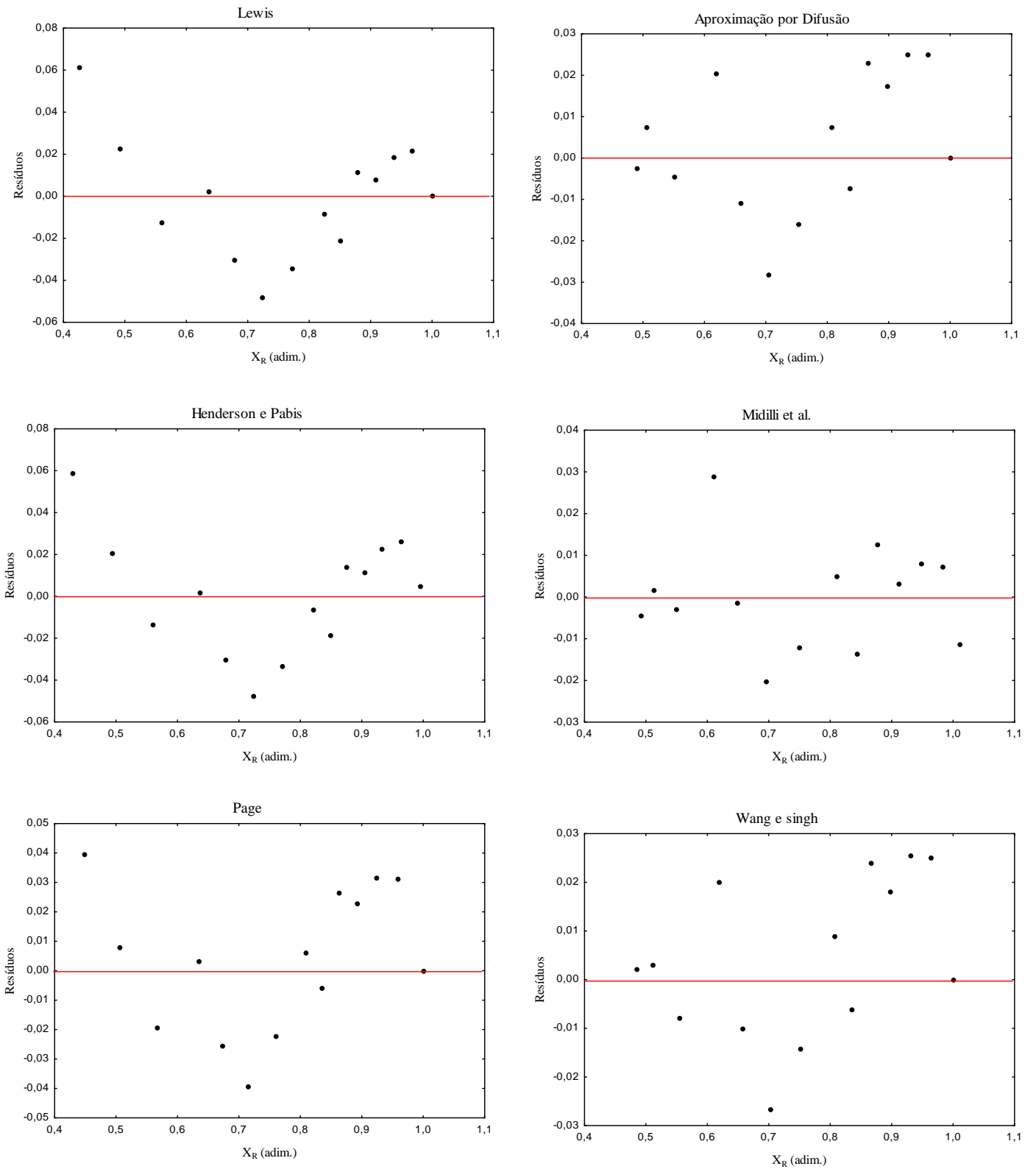


Gráfico D2 – Distribuição dos resíduos para os seis modelos testados para descrever a cinética de secagem das sementes de painço em leito de jorro na temperatura de 65°C.

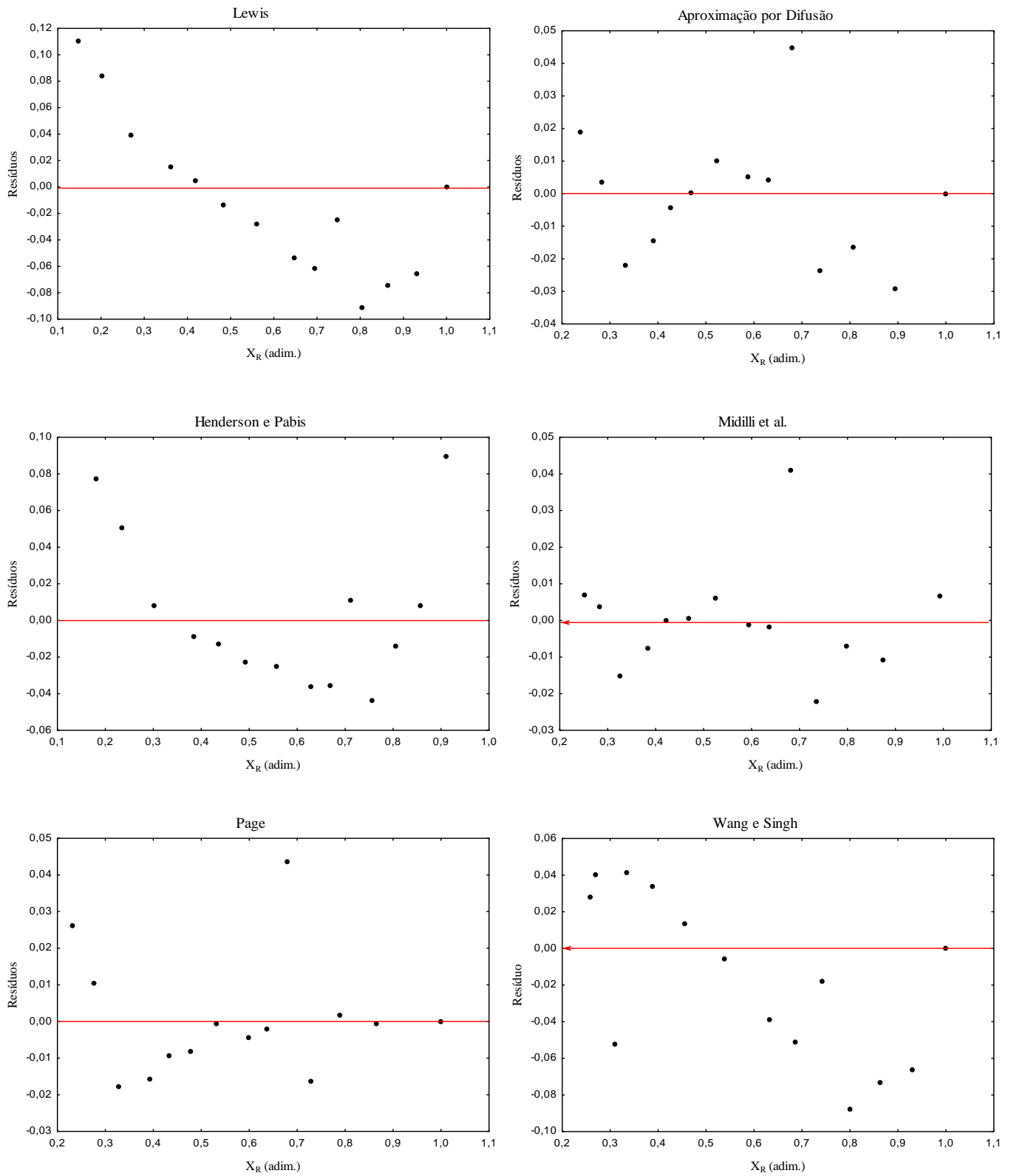


Gráfico D3 – Distribuição dos resíduos para os seis modelos testados para descrever a cinética de secagem das sementes de painço em leito de jorro na temperatura de 86°C.

