



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS

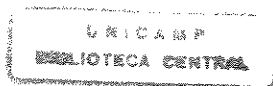
**ANÁLISE DE DANOS EM SEMENTES DE FEIJÃO PELA
FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO**

AUTOR: MÁRIO PAULO FILHO

ORIENTADORA: PROF^a. DR^a. SANDRA C. DOS SANTOS ROCHA

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

OUTUBRO DE 1999



43.81330

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UN CAMP
	P285a
V.	Ex.
TOMBO BC/	39652
PROC.	229/99
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	07-12-99
N.º CPD	

CM-00137468-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P285a Paulo Filho, Mário
Análise de danos em sementes de feijão pela
fluidodinâmica em leito de jorro / Mário Paulo Filho.--
Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientadora: Sandra C. Dos Santos Rocha.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Processo de leito de jorro. 2. Feijão. 3. Sementes -
Deterioração. I. Rocha, Sandra C. Dos Santos. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Química. III. Título.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 01 DE OUTUBRO DE 1999 PELA BANCA EXAMINADORA CONSTITUÍDA PELOS PROFESSORES DOUTORES:



Profª. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha
(orientadora)



Prof. Dr. Benedito Carlos Benedetti
(titular)



Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto
(titular)

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À REDAÇÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA POR MÁRIO PAULO FILHO E APROVADA PELA COMISSÃO JULGADORA EM 01 DE OUTUBRO DE 1999.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'S. Rocha', is positioned above a horizontal line.

Profª. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha
(orientadora)

*Aos meus pais, Mário (in memoriam) e Nagibe,
à minha esposa Angélica
e aos meus filhos Erick e Juliana*

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, a Profª. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha, pela paciência, dedicação e amizade durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À minha esposa, Angélica, pelo incentivo a iniciar o mestrado e apoio durante todo o tempo de estudos e elaboração da dissertação.

Às técnicas do Laboratório de Sementes da Faculdade de Engenharia Agrícola, Rosa e Laura pelas informações e colaboração na execução dos testes de germinação.

Aos meus colegas do Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem, Carlos, Carlos Alberto, Celina, Fábio, Josy, Marta, Osvaldo e Virgínia, e aos demais amigos da Faculdade de Engenharia Química, Daniela, Elenise, Jefferson e Miriam, pela colaboração, sugestões e companhia.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Química que, de certa forma, contribuíram para a execução deste trabalho.

ÍNDICE

NOMENCLATURA	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 – Leitos Porosos Fixos	4
2.1.1 – Introdução	4
2.1.2 – Porosidade	4
2.1.3 – Velocidade	5
2.1.4 – Queda de Pressão	5
2.2 – Leito de Jorro	6
2.2.1 – Introdução	6
2.2.2 – Requisitos para o Jorro	7
2.2.3 – Mecanismo	8
2.2.4 – Queda de pressão	9
2.2.5 – Velocidade de Jorro Mínimo	11
2.2.6 – Efeitos da Geometria da Coluna	12
2.2.7 – Efeitos das Propriedades dos Sólidos	12
2.2.8 – Efeitos do Fluxo de Gás	13
2.2.9 – Altura Máxima do Leito de Jorro	13
2.2.10 – Atrito no Leito de Jorro	14
2.2.11 – Leito de Jorro Bidimensional	14
2.3 – Secagem	16
2.3.1 – Introdução	16
2.3.2 – Secagem em Leito de Jorro	17
2.3.3 – Secagem em Leito Fixo	19
2.4 – Grãos e Sementes	21

2.4.1 – Composição Química das Sementes	21
2.4.2 – Conteúdo de Umidade de Equilíbrio	21
2.4.3 – Fragilidade dos Grãos	23
2.4.4 – O Feijão	25
2.4.4.1 – Aspectos Socioeconômicos	25
2.4.4.2 – Qualidade Nutricional	25
2.4.4.3 – Semente	26
2.4.5 – Vigor das Sementes	28
2.4.6 – Testes de Germinação em Laboratório	29
2.4.7 – Métodos para Determinar a Umidade de Grãos e Sementes	32
2.5 – Danos em Sementes Durante a Secagem	33
2.5.1 – Efeitos da Temperatura	33
2.5.2 – Efeitos Mecânicos	37
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL	41
3.1 – Material Utilizado	41
3.2 – Equipamento Experimental	42
3.3 – Procedimento Experimental	45
3.4 – Planejamento Experimental	48
3.5 – Métodos Experimentais	50
3.5.1 – Determinação de Danos Mecânicos nas Sementes de Feijão	50
3.5.2 – Determinação do Percentual de Germinação nas Sementes de Feijão	51
3.5.3 – Determinação do Conteúdo de Umidade das Sementes de Feijão	52
3.5.4 – Secagem de Feijão em Leito Fixo	52
3.5.5 – Secagem de Feijão em Leito de Jorro Cone – Cilíndrico	53
3.6 – Leito de Jorro Bidimensional	53
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1- Obtenção dos Dados Experimentais	58
4.1.1 – Fissuras nas Sementes de Feijão	59
4.1.2 – Germinação das Sementes de Feijão	63
4.1.3 – Danos em Sementes de Feijão por Atrito Mecânico e Temperatura	68
4.2 – Análise Estatística dos Resultados	71
4.2.1 – Variável de Resposta Razão de Fissuras	72
4.2.2 – Variável de Resposta Germinação Normal	80

4.3 – Leito de Jorro Bidimensional	87
4.4 – Fotografia das Sementes Danificadas	101
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	105
5.1 – Conclusões	105
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

NOMENCLATURA

\hat{A}	ângulo de inclinação do cone, °
A_p	área da partícula, m^2
Ar	número de Archimedes, -
d_{CR}	diâmetro do círculo circunscrito, m
d_{eq}	diâmetro equivalente das sementes, m
d_{IN}	diâmetro do círculo inscrito, m
d_p	diâmetro da partícula sólida, m
DGN	diferença do percentual de germinação normal, %
Dh	queda de pressão em termos de diferença de altura manométrica, mm H_2O
D_c	diâmetro do leito cilíndrico, m
D_i	diâmetro da entrada de ar, m
F	percentual final de fissuras nas sementes, %
Fo	percentual inicial de fissuras nas sementes, %
g	aceleração da gravidade local, m/s^2
GD	percentual de germinação final de sementes danificadas, %
GDo	percentual de germinação inicial de sementes danificadas, %
GI	percentual de germinação final de sementes infeccionadas, %
GL	graus de liberdade, -
GM	percentual de germinação final de sementes mortas, %
GMo	percentual de germinação inicial de sementes mortas, %
GN	percentual de germinação normal final das sementes, %
GNo	percentual de germinação normal inicial das sementes, %
H	altura do leito, m
H_m	altura máxima do leito, m
k	permeabilidade do leito, m^2
m	massa média das sementes, kg
MQ	média quadrática, -
P	pressão atmosférica local, Pa
q	velocidade superficial do fluido, m/s
q_{jm}	velocidade de jorro mínimo estável, m/s

Q	vazão mássica do ar, kg/s
Q_{JM}	vazão mássica do ar de jorro mínimo estável, kg/s
Re_i	número de Reynolds referente ao orifício de entrada do gás, -
RF	razão de fissuras, -
SQ	soma quadrática, -
t	tempo de exposição ao jorro, s
T	temperatura do gás, °C
v	velocidade intersticial do fluido, m/s
V	volume médio das sementes, m ³
V_p	volume da partícula, m ³
V_s	volume de sólidos, m ³
V_t	volume total do leito, m ³
X	conteúdo de umidade final do sólido, base úmida, kg água / kg sólido úmido
X_o	conteúdo de umidade inicial do sólido, base úmida, kg água / kg sólido úmido
X_{eq}	conteúdo de umidade de equilíbrio, base úmida, kg água / kg sólido úmido

Letras Gregas

ΔP	queda de pressão, Pa
ΔP_J	queda de pressão de jorro estável, Pa
ΔP_M	queda de pressão máxima em leito de jorro, Pa
ε	porosidade do leito, -
ϕ	esfericidade das sementes, -
λ	fator da forma da partícula, -
μ	viscosidade dinâmica do fluido, kg/m.s
ρ_A	massa específica aparente das sementes, kg/m ³
ρ_f	densidade do fluido, kg/m ³
ρ_R	massa específica real das sementes, kg/m ³
ρ_s	densidade do sólido, kg/m ³

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química de sementes de feijão (WATT e MERRIL, 1963) -----	21
Tabela 2.2 - Conteúdo de umidade de equilíbrio (% em massa) base úmida (MCLEAN, 1989) -	22
Tabela 2.3 - Conteúdos de umidade de equilíbrio higroscópico (% base seca), de sementes de feijão "carioca", obtidos por desorção (MATA, 1997). -----	23
Tabela 3.1 - Propriedades físicas do feijão -----	42
Tabela 3.2 - Variáveis independentes -----	49
Tabela 3.3 - Experimentos realizados -----	50
Tabela 3.4 - Secagem em leito de jorro -----	53
Tabela 3.5 - Variáveis independentes -----	56
Tabela 3.6 - Experimentos realizados -----	57
Tabela 4.1 - Características originais dos grãos -----	58
Tabela 4.2 - Resultados obtidos para grãos submetidos a leito de jorro -----	59
Tabela 4.3 - Fissuras originais das sementes -----	59
Tabela 4.4 - Fissuras em sementes submetidas ao leito de jorro -----	61
Tabela 4.5 - Alteração no conteúdo de umidade das sementes -----	63
Tabela 4.6 - Germinação de sementes de feijão sem tratamento -----	64
Tabela 4.7 - Germinação de sementes de feijão expostas ao leito de jorro -----	64
Tabela 4.8 - Características originais das sementes de feijão -----	68
Tabela 4.9 - Fissuras em sementes expostas ao leito de jorro -----	69
Tabela 4.10 - Germinação em sementes expostas ao leito de jorro -----	70
Tabela 4.11 - Comparação entre os conteúdos de umidade -----	70
Tabela 4.12 - Variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta do planejamento ---	72
Tabela 4.13 - Efeitos das variáveis independentes e suas interações para a variável de resposta razão de fissuras -----	73
Tabela 4.14 - Coeficientes de regressão das variáveis independentes e suas interações para a variável de resposta razão de fissuras -----	75
Tabela 4.15 - Análise de variância para a variável resposta razão de fissuras -----	80
Tabela 4.16 - Efeitos das variáveis independentes e suas interações para a variável de resposta Germinação normal -----	81

Tabela 4.17 - Coeficientes de regressão das variáveis independentes e suas interações para a variável de resposta germinação normal -----	82
Tabela 4.18 - Análise de variância para a variável resposta germinação normal -----	87
Tabela 4.19 - Características originais das sementes -----	88
Tabela 4.20 - Fissuras nas sementes de feijão submetidas ao leito de jorro bidimensional -----	88
Tabela 4.21 - Germinação nas sementes de feijão expostas ao leito de jorro bidimensional -----	90
Tabela 4.22 - Variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta do planejamento para leito de jorro bidimensional -----	91
Tabela 4.23 - Efeitos das variáveis independentes e suas interações para a variável resposta razão de fissuras em leito de jorro bidimensional -----	92
Tabela 4.24 - Coeficientes de regressão das variáveis independentes e suas interações para a variável de resposta razão de fissuras em leito de jorro bidimensional -----	93
Tabela 4.25 - Análise de variância para a variável de resposta razão de fissuras em leito de jorro bidimensional -----	96
Tabela 4.26 - Efeitos das variáveis independentes e suas interações para a variável resposta germinação normal em leito de jorro bidimensional -----	96
Tabela 4.27 - Coeficientes de regressão das variáveis independentes e suas interações para a variável de resposta germinação normal em leito de jorro bidimensional -----	98
Tabela 4.28 - Análise de variância para a variável de resposta germinação normal em leito de jorro bidimensional -----	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de leito de jorro com indicação da direção dos sólidos em movimento (MATHUR e EPSTEIN, 1974) -----	07
Figura 2.2 - Diagrama de regime para o trigo (MATHUR e EPSTEIN, 1974) -----	08
Figura 2.3- Gráfico queda de pressão versus velocidade do ar em leito de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974) -----	09
Figura 2.4 - Estrutura interna da semente de feijão (ARAÚJO et al., 1996) -----	27
Figura 2.5 - Estrutura externa da semente de feijão (ARAÚJO et al., 1996) -----	27
Figura 2.6 - Classificação das plântulas de feijão com 8 dias de idade (COLBRY, SWOFFORD e MOORE, 1986) -----	32
Figura 2.7 - Danos na casca de sementes de feijão (FORNAL et al., 1993) -----	35
Figura 2.8 - Danos no cotilédone de sementes de feijão (FORNAL et al., 1993) -----	36
Figura 3.1 - Esquema do equipamento experimental -----	43
Figura 3.2 - Fotografia do equipamento -----	43
Figura 3.3 - Dimensões do leito cone - cilíndrico -----	44
Figura 3.4 - Fotografia do leito cone - cilíndrico -----	45
Figura 3.5 - Gráfico queda de pressão versus vazão de ar em leito de jorro 45 ° -----	47
Figura 3.6 - Gráfico queda de pressão versus vazão de ar em leito de jorro 60 ° -----	47
Figura 3.7 - Dimensões do leito bidimensional -----	54
Figura 3.8 - Fotografia do leito bidimensional -----	55
Figura 3.9 - Gráfico queda de pressão versus vazão de ar em leito de jorro bidimensional -----	56
Figura 4.1 - Razão de fissuras em sementes para dois níveis de umidade m leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 45 ° -----	62
Figura 4.2 - Razão de fissuras em sementes para dois níveis de umidade m leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 60 ° -----	62
Figura 4.3 - Germinação normal em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 45 ° -----	65
Figura 4.4 - Germinação normal em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 60 ° -----	66
Figura 4.5 - Diferença de germinação normal em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 45 ° -----	66

Figura 4.6 - Diferença de germinação normal em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 60 ° -----	67
Figura 4.7 - Gráfico percentual de fissuras e germinação normal para sementes de feijão em leito de jorro -----	68
Figura 4.8 - Gráfico razão de fissuras para sementes de feijão em leito de jorro nas temperaturas de 30 °C, 60 °C e 80 °C -----	71
Figura 4.9 - Gráfico diferença de germinação normal para sementes de feijão em leito de jorro nas temperaturas de 30 °C, 60 °C e 80 °C -----	71
Figura 4.10 - Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável razão de fissuras -----	74
Figura 4.11 - Gráfico valores previstos versus observados para a variável razão de fissuras ----	75
Figura 4.12 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus ângulo e tempo ---	77
Figura 4.13 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus ângulo e vazão ---	77
Figura 4.14 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus conteúdo de umidade e ângulo -----	78
Figura 4.15 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus vazão e tempo ----	78
Figura 4.16 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus ângulo e tempo ---	79
Figura 4.17 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus conteúdo de umidade e vazão -----	79
Figura 4.18 - Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável germinação normal -----	81
Figura 4.19 - Gráfico valores previstos versus observados para a variável germinação normal -	83
Figura 4.20 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus tempo e ângulo -----	84
Figura 4.21 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus vazão e ângulo -----	84
Figura 4.22 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus conteúdo de umidade e ângulo -----	85
Figura 4.23 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus vazão e tempo -	85
Figura 4.24 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus conteúdo de umidade e tempo -----	86
Figura 4.25 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus conteúdo de umidade e vazão -----	86
Figura 4.26 - Razão de fissuras para sementes em dois níveis de umidade em leito de jorro bidimensional -----	89

Figura 4.27 - Germinação normal para sementes em dois níveis de umidade em leito de jorro bidimensional -----	90
Figura 4.28 - Diferença de germinação normal em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro bidimensional -----	91
Figura 4.29 - Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável razão de fissuras em leito de jorro bidimensional-----	92
Figura 4.30 - Gráfico valores previstos versus observados para a variável razão de fissuras em leito de jorro bidimensional -----	93
Figura 4.31 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus vazão e tempo em leito de jorro bidimensional -----	94
Figura 4.32 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus conteúdo de umidade e tempo em leito de jorro bidimensional -----	95
Figura 4.33 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus conteúdo de umidade e vazão em leito de jorro bidimensional-----	95
Figura 4.34 - Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável germinação normal em leito de jorro bidimensional -----	97
Figura 4.35 - Gráfico valores previstos versus observados para a variável germinação normal em leito de jorro bidimensional -----	98
Figura 4.36 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus vazão e tempo para leito de jorro bidimensional -----	99
Figura 4.37 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus conteúdo de umidade e tempo em leito de jorro bidimensional -----	99
Figura 4.38 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus conteúdo de umidade e vazão em leito de jorro bidimensional -----	100
Figura 4.39 - Fotografia de semente sem nenhum dano -----	101
Figura 4.40 - Fotografia de semente sem nenhum dano -----	102
Figura 4.41 - Fotografia de semente com fissura -----	102
Figura 4.42 - Fotografia de semente com fissura -----	103
Figura 4.43 - Fotografia de semente com fissura -----	103
Figura 4.44 - Fotografia de semente com perda parcial da casca -----	104
Figura 4.45 - Fotografia de semente com perda parcial da casca -----	104

RESUMO

Neste trabalho analisou-se experimentalmente os danos mecânicos em sementes de feijão, variedade carioca, de procedência do "IAC" (Instituto Agrônomo de Campinas), em leito de jorro. O equipamento utilizado, em escala de laboratório, consiste em um leito de acrílico cone-cilíndrico ou um leito bidimensional acoplado a um soprador e a um resfriador de ar para controlar a temperatura do ar em cerca de 30 °C. Para a obtenção dos dados experimentais, utilizou-se um planejamento experimental fatorial de dois níveis, sendo avaliadas as influências de quatro variáveis de processo, para o leito cone - cilíndrico: ângulo de inclinação do cone de 45 e 60 °, tempo de exposição ao jorro de 1:30 e 3:00 h, vazão de ar de 2,2 e 2,5 kg/min e conteúdo de umidade da semente de 9,3 e 13,8 % em uma carga de 3 kg de sementes. Para o leito bidimensional uma carga de 1,8 kg de sementes foi submetida ao tempo de exposição de 1:30 e 3:00 h, a vazão de ar de 1,8 e 2,1 kg/min e conteúdo de umidade de 12,1 e 9,5 % . As respostas analisadas foram fissuras causadas no grão e o poder de germinação das sementes. Para a determinação das fissuras das sementes (incluindo quebra e perda da casca), foi utilizado o método do entumescimento em hipoclorito de sódio, sendo a observação feita a olho nu ou com lupa, e posteriormente utilizou-se microscópio com câmera acoplada. O teste de germinação foi feito em papel umedecido, em câmara de germinação com temperatura controlada a 25 °C e umidade relativa a 90 % durante 9 dias. A análise dos resultados mostrou que exercem influência significativa na fissura das sementes, submetidas ao leito de jorro cone - cilíndrico, o tempo de exposição, a vazão de ar e, principalmente, o conteúdo de umidade inicial. Com relação ao leito bidimensional a única influência significativa foi o conteúdo de umidade inicial das sementes. As sementes de baixo conteúdo de umidade sofreram um aumento significativo em suas fissuras quando comparadas com as fissuras originais. Com relação aos resultados dos testes de germinação, verificou-se que não houve influência significativa de nenhuma das variáveis independentes, em ambos os leitos, ficando os valores finais de sementes germinadas acima do especificado para o feijão.

ABSTRACT

In this work the mechanical damage on bean seeds, type "Carioca" IAC (Campinas Agronomic Institute), submitted to spouted bed regime was experimentally analysed. The equipment consisted of a cone – cylindrical or a two – dimensional spouted bed, of laboratory scale, a blower and a cooler used to control the air temperature at about 30 °C. A factorial planning was applied in two levels to evaluate the influences of the following process variables: cone angles of 45 and 60 °, air flowrates and 2.2 and 2.5 kg/min, times of the seeds exposure to spout of 1:30 and 3:00 h and initial moisture contents of the seeds of 9.3 and 13.8% in the cone – cylindrical bed with 3 kg of seeds. For the two – dimensional bed the weight of seeds was set in 1.8 kg and the variables analysed were: air flowrates of 1.8 and 2.1 kg/min, times of the seeds exposure to the spout of 1:30 and 3:00 h and seeds critical moisture contents of 9.5 and 12.1%. these influences were evaluated on the mechanical damage measured by the fissures and the germination of the seeds. To determine the percentage of fissures, including peeling and rupture, the seeds were dipped into a sodium hypochloride solution, and the observation was made with a magnifier. The germination test was made by exposure of the seeds in a germination chamber with controlled temperature at 25 °C and relative humidity of 90% for 9 days. The results showed that the percentage of fissures in the seeds submitted to the cone – cylindrical bed is influenced by the time of exposure, the air flowrate and the initial moisture content. For the two – dimensional bed, the only significative influence on the fissures was the initial moisture content of the seeds. The seeds that were exposed to the spout and having low initial moisture content presented a significative increase in the fissures when compared to the original seeds. For the results of germination, it was verified that no significant influence occurred, for both bed geometries, in the final values of germinated seeds, with were higher than the minimum specified for good quality bean seeds.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é um grão de elevado valor nutritivo, principalmente com relação à quantidade de proteínas, ferro e potássio, além de ser uma fonte de carboidratos, lipídios, fibras e vitaminas hidrossolúveis. Sua produção mundial é insignificante se comparada a outros grãos e o seu consumo é restrito a poucos países. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de feijão, devido a sua boa adaptação às condições climáticas, e seu consumo faz parte do dia a dia na mesa do brasileiro. Segundo dados estatísticos (IBGE, 1997), o Brasil em 1995 possuía uma área plantada de 5.366.321 ha, colheu 2.946.168 t de feijão, em três safras anuais, obtendo um rendimento médio de 588 kg/ha.

Após a colheita, devido ao elevado conteúdo de umidade dos grãos, estes devem ser secos, antes do armazenamento, para que não deteriore ou desenvolvam fungos e outros microorganismos. Tal procedimento se faz necessário tanto para a produção de grãos, para consumo alimentício, como para a produção de sementes, para o plantio.

O processo de secagem mais usado é o natural, onde as sementes são expostas ao sol. Isto dificulta o controle do processo, pois as sementes ficam sujeitas as variações do clima, o que impossibilita o estabelecimento de um tempo de secagem fixo e de um conteúdo de umidade final uniforme. Os processos mecânicos de secagem permitem um controle mais eficiente, com uma redução do tempo de secagem e a secagem mais homogênea dos grãos ou sementes, embora isso tudo envolva um custo mais elevado. Dos processos mecânicos, o mais utilizado para grãos e sementes de feijão envolve um leito fixo por onde passa uma corrente de ar, aquecida ou não, proveniente de um soprador. O processo pode ser descontínuo, onde após a secagem, o material é transferido para o armazenamento, ou contínuo onde as sementes caminham em sentido contrário ao fluxo de ar aquecido, com intermitência ou não de aquecimento. Mais recentemente, com a proposta de utilização do leito de jorro, verificou-se uma maior uniformidade no conteúdo de umidade dos grãos e sementes de feijão secos do que no leito fixo, embora o processo envolva

um consumo maior de energia. Provavelmente, um leito com utilização de intermitência entre leitos fixo e jorro, obtenha resultados satisfatórios, tanto em relação ao consumo de energia, como em qualidade de produto.

A secagem em leito fixo pode produzir danos na semente devido ao aquecimento, porém, o manuseio, o transporte e a secagem em leito de jorro poderá produzir, também, danos mecânicos. No caso do leito de jorro, os danos mecânicos ocorrem devido ao atrito entre a partícula e as paredes do secador e entre as próprias partículas em movimento. Apesar de existirem vários estudos sobre danos devido à temperatura, não se encontra na literatura trabalhos sobre danos mecânicos causados a grãos e sementes por secagem em leito de jorro.

O presente trabalho tem por objetivo estudar os danos mecânicos causados em sementes de feijão submetidas ao processo em regime aerodinâmico de leito de jorro, geometria cone-cilíndrica e geometria bidimensional, em escala de laboratório, pela caracterização dos danos em amostras, através dos seguintes parâmetros:

- trincas ou fissuras, perda da casca e quebra da semente verificadas por observação visual no grão entumecido, utilizando lupa;
- avaliação do poder germinativo das sementes mediante testes de germinação;
- avaliação da semente entumecida em microscópio.

Para esse estudo propõe-se um planejamento de experimentos fatorial 2^4 , para o leito cone-cilíndrico, onde foram verificados os efeitos das seguintes variáveis independentes no dano mecânico:

- vazão de ar na entrada do leito,
- geometria do leito, através do ângulo de inclinação do cone,
- tempo de exposição das sementes no leito,
- conteúdo de umidade das sementes.

Para o leito de jorro bidimensional o planejamento foi fatorial 2^3 , onde foram verificados os efeitos:

- vazão de ar na entrada do leito,
- tempo de exposição das sementes no leito,

- conteúdo de umidade das sementes.

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira: o capítulo 1 traz os objetivos propostos para o trabalho; no capítulo 2 é apresentada a revisão da bibliografia relativa ao assunto do trabalho; a metodologia experimental e a caracterização do material são descritas no capítulo 3; o capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e sua análise e o capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas e as sugestões para trabalhos futuros no mesmo tema.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Leitos Porosos Fixos

2.1.1- Introdução

Sistemas de contato gás - sólido podem ser classificados em não agitados, mecanicamente agitados e gás agitados. O primeiro tipo é aplicado em processos que envolvem altas taxas de transferência de calor e massa entre o gás e o sólido, e em que a uniformidade de condições em diferentes partes do leito não é crítica.

Os fluidos são forçados a escoar através de leitos estacionários de sólidos particulados ou porosos numa grande diversidade de situações práticas. São exemplos importantes as operações de filtração, absorção de gases em colunas de recheio, reatores catalíticos, transferência de calor nos regeneradores, secagem, entre outras. Por serem utilizados tradicionalmente como secadores de grãos e sementes, será realizada aqui uma breve revisão sobre o contato gás - sólido em leito fixo.

2.1.2- Porosidade

A porosidade (ε) corresponde ao grau de compactação do leito e pode ser calculada pela relação entre o volume de vazios e o volume total do leito (V_t). Chamando de V_s o volume do sólido, então, tem-se a porosidade pela expressão (MCCABE E SMITH, 1978):

$$\varepsilon = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (2.1)$$

2.1.3- Velocidade

Chama-se de v a velocidade média do fluido através dos canais do leito, conhecida também como velocidade intersticial. Porém, em muitos casos é mais conveniente empregar q , a velocidade da corrente antes de entrar em contato com a primeira capa de sólidos. A velocidade q recebe o nome de velocidade superficial ou velocidade no tubo vazio. As velocidades q e v podem ser relacionadas pela expressão (MCCABE E SMITH, 1978):

$$v = \frac{q}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

2.1.4- Queda de Pressão

Para escoamentos a baixa velocidade em leitos porosos estacionários, DARCY (1830) propôs uma equação da perda de pressão por comprimento do leito ($\Delta P / H$) com comportamento linear em relação a velocidade superficial q :

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\mu \cdot q}{k} \quad (2.3)$$

No qual k é a permeabilidade do meio, que corresponde a uma propriedade do meio que indica uma maior ou menor facilidade de escoamento. A permeabilidade pode ser obtida experimentalmente ou estimada por correlações como a de CARMAN-KOZENY:

$$k = \frac{\varepsilon^3 \cdot d_p^2}{150(1 - \varepsilon)^2} \quad (2.4)$$

Para escoamentos a altas vazões há um desvio apreciável da linearidade em relação à lei de DARCY. A partir de dados experimentais obtidos com diferentes tipos de recheio, ERGUN (1952) propôs a seguinte correlação por ajuste:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2 \cdot q}{d_p^2 \cdot \varepsilon^3} + \frac{1,75[(1-\varepsilon)\rho_f]q^2}{\varepsilon^3 \cdot d_p} \quad (2.5)$$

O segundo termo da equação de ERGUN é quadrático e para baixas velocidades torna-se desprezível. Nota-se que o primeiro termo é a expressão da Lei de DARCY, onde a permeabilidade k é calculada pela correlação de CARMAN-KOZENY (MCCABE E SMITH, 1978).

2.2- Leito de Jorro

2.2.1- Introdução

Injetando-se um fluido, verticalmente e com velocidade suficiente, em um vaso recheado com partículas relativamente grossas, ocorrerá um regime fluidodinâmico que se chama de “leito de jorro”. Essas partículas formam um fluxo ascendente na região central do leito formando uma fonte no topo e, posteriormente, descem pela região periférica do leito.

A fase central é chamada de região de jorro e apresenta alta porosidade, a fase periférica é conhecida como região anular e a porosidade equivale à de um leito fixo expandido. Os vasos utilizados podem ser de colunas cilíndricas com base cônica, cônicos ou bidimensionais (seção transversal retangular). Os sólidos podem ser injetados, continuamente, pela base ou pelo topo do vaso, sendo recolhidos lateralmente pelo topo. O fluido injetado pode ser um gás ou líquido, dependendo da aplicação. Nas aplicações com gás, o ar é usado preferencialmente. A Figura 2.1 é um esquema do leito de jorro.

Originalmente, o leito de jorro era caracterizado como um tipo especial de leito fluidizado, mas desenvolvimentos nos últimos anos demonstraram características próprias. O termo leito de jorro foi usado pela primeira vez no Canadá em 1954 por GISHLER e MATHUR, mas o trabalho só foi publicado em 1959. As aplicações comerciais, iniciadas em 1962, são

secagem de grãos, cristalização evaporativa, mistura, resfriamento, recobrimento e granulação de sólidos, entre outras.

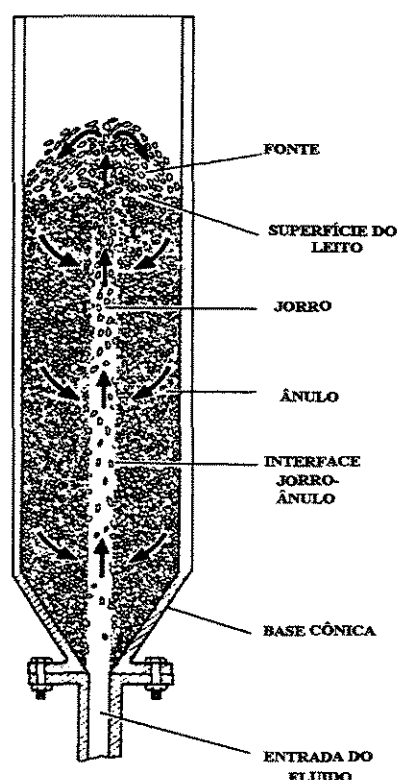


Figura 2.1 – Esquema de leito de jorro com indicação da direção dos sólidos em movimento (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

2.2.2- Requisitos para o Jorro

O jorro é um fenômeno observável, que depende de várias combinações como velocidade do gás, características das partículas sólidas e configuração geométrica do vaso.

Se forem fixados alguns dados como tipo da partícula e seu diâmetro (d_p), dimensões do vaso como diâmetro da entrada de ar (D_i) e diâmetro do leito cilíndrico (D_c), tipo do fluido injetado (ar), e traçado um gráfico com dados experimentais altura do leito versus velocidade superficial do gás, obtém-se informações importantes sobre o regime. Esse tipo de diagrama pode apresentar quatro fases distintas que corresponderão ao leito fixo, leito de jorro, leito com fluidização agregativa e leito fracionado ("slugging"). A Figura 2.2 ilustra um diagrama

representativo de regimes. Observa-se, então, que tem-se uma velocidade mínima do fluido e uma altura máxima do leito para que obtenha-se o jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

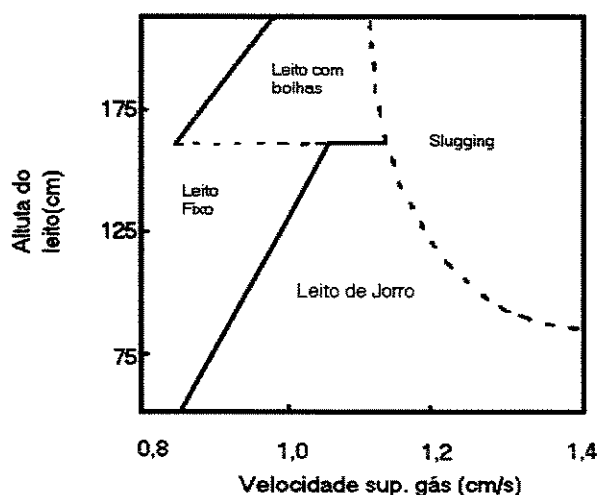


Figura 2.2 - Diagrama de regime para o trigo (MATHUR e EPSTEIN, 1974)

2.2.3- Mecanismo

O mecanismo de transição de um leito fixo para um leito de jorro pode ser descrito por um diagrama obtido com dados experimentais de queda de pressão (ΔP) versus velocidade superficial do gás, como na Figura 2.3. A sequência é a seguinte:

- A baixas vazões o gás simplesmente passa pelas partículas sem causar distúrbios, a queda de pressão cresce linearmente com a vazão como em um leito estático.
- A uma certa vazão, a velocidade torna-se suficientemente alta para empurrar as partículas, formando uma cavidade junto à entrada de ar, a queda de pressão através do leito continua a aumentar.
- Com um acréscimo na vazão do fluido, a cavidade aumenta para um jorro interno. A queda de pressão atinge seu máximo valor, identificado como ponto B na figura.
- Quando a velocidade ultrapassa o ponto de queda de pressão máxima, a altura interna do oco do jorro torna-se um pacote de sólidos sobre o jorro. A queda de pressão decresce.
- A partir de valores superiores de velocidade, os sólidos se deslocam para o centro causando a expansão do leito. A queda de pressão para de decrescer.

- Com um leve acréscimo na vazão, o jorro interno atinge a superfície do leito. A queda de pressão mantém-se constante a partir desse ponto e o regime é o de um leito de jorro estável.

A velocidade de jorro incipiente (C) e o princípio do jorro (D) são dependentes do histórico do leito, não sendo exatamente reprodutível. A velocidade mais reprodutível é a velocidade de jorro mínimo (q_{jm}), que é obtida pelo decréscimo do escoamento de gás: o leito permanece em estado de jorro até o ponto C', que representa a condição de mínimo jorro. Uma pequena redução na velocidade do gás, nestas condições, causa o colapso do jorro e a queda de pressão aumenta subitamente para o ponto B'. Diminuindo ainda a velocidade do gás tem-se a queda de pressão decrescendo permanentemente ao longo de B'A.

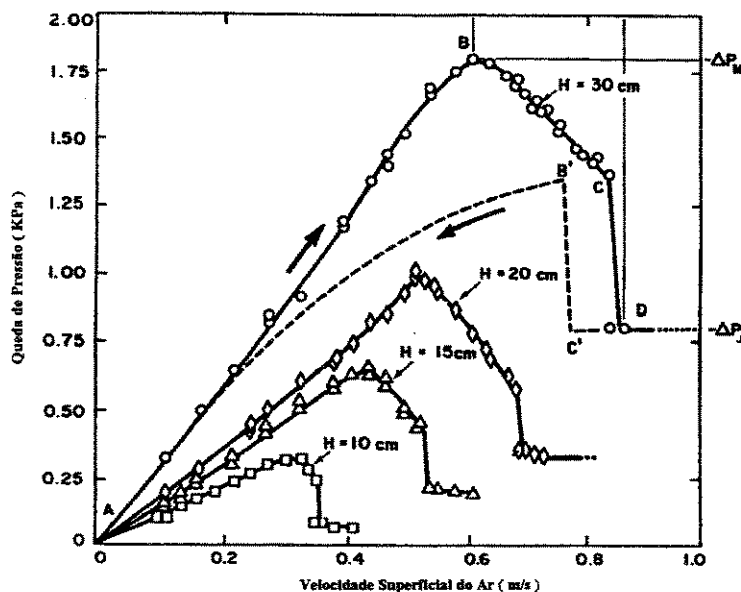


Figura 2.3 - Gráfico queda de pressão versus velocidade do ar em leito de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974)

2.2.4- Queda de Pressão

Os valores da queda de pressão que interessam no projeto e operação de um leito de jorro são os correspondentes ao pico da queda de pressão (ΔP_M) e a queda de pressão do jorro estável (ΔP_J).

O valor máximo da queda de pressão ocorre antes do leito entrar no regime de jorro, mas é associada geralmente com a entrada do gás a alta velocidade no leito de sólidos, que requer deste energia para romper a estrutura de um pacote de sólidos. A relação, primeiro proposta por BECKER (1961) e mais recentemente por PALLAI e NÉMETH (1969), é equivalente a:

$$-\Delta P_M = H(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon)g = H \cdot \rho_A \cdot g \quad (2.6)$$

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

$$\frac{\Delta P_M}{H \rho_A g} = \left[\frac{6,8}{\operatorname{tg} \hat{A}} \left(\frac{D_i}{D_c} \right) + 0,80 \right] - 34,4 \frac{d_p}{H} \quad (2.7)$$

GELPERIN et al. (1960) obtiveram dados experimentais para ΔP_M que em alguns casos foram iguais a duas a três vezes o peso do leito. A correlação empírica desenvolvida ficou:

$$\frac{\Delta P_M}{\Delta P_J} = 1 + 0,062 \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{2,54} \cdot \left[\left(\frac{D_c}{D_i} \right) - 1 \right] \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\hat{A}}{2} \right)^{-0,18} \quad (2.8)$$

MUKHELENOV e GORSSTEIN (1965), trabalhando com vasos cônicos, propuseram uma correlação empírica a partir de dados experimentais:

$$\left(\frac{\Delta P_M}{\Delta P_J} \right) = 1 + 6,65 \left(\frac{H}{D_i} \right)^{1,2} \left(\operatorname{tg} \frac{\hat{A}}{2} \right)^{0,5} (Ar)^{0,2} \quad (2.9)$$

Na qual Ar é o número de ARCHIMEDES:

$$Ar = \frac{g d_p^3 (\rho_s - \rho_f) \rho_f}{\mu^2} \quad (2.10)$$

No estado de jorro, a queda de pressão surge devido a duas resistências paralelas, aquela devido ao jorro (fase diluída) e aquela devido à região anular. Para vasos cônicos, MUKHLENOV e GORSHTAIN (1965) propuseram a seguinte correlação empírica:

$$\frac{-\Delta P_j}{H\rho_A g} = \frac{7,68 \left(\operatorname{tg} \frac{\hat{A}}{2} \right)^{0,2}}{\operatorname{Re}_i^{0,2} \left(\frac{H}{D_i} \right)^{0,33}} \quad (2.11)$$

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

2.2.5- Velocidade de Jorro Mínimo

A mínima velocidade (q_{jm}) do fluido para que o leito entre em estado de jorro, depende das propriedades do sólido e do fluido e das características geométricas do vaso, principalmente o seu diâmetro (D_c). A velocidade de jorro mínimo assume seu valor máximo quando a altura do leito é máxima.

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

$$q_{jm} = \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left[2gH \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

Outras correlações para o cálculo da velocidade de jorro mínimo foram desenvolvidas, empiricamente, com dados experimentais. Pode-se citar as de BECKER (1961), WAN-FYONG (1969), MANURUNG (1964), GORSHTAIN-MUKHLENOV (1964), entre outras.

2.2.6- Efeitos da Geometria da Coluna

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

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

MANURUNG (1964) demonstrou que uma máxima estabilidade é obtida com um desenho de entrada que não permita que o jato de gás seja desviado do caminho vertical antes que este penetre no leito de partículas. Isto pode ser resolvido por uma saliência com tela, um bocal convergente ou com a colocação de uma tampa cônica.

2.2.7- Efeitos das Propriedades dos Sólidos

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

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

O formato e as características superficiais das partículas tem influência na estabilidade do jorro, mas tem-se verificado dificuldades para avaliar, quantitativamente seus efeitos. Uma equação empírica de MALEK e LU (1965), para a altura máxima de jorro estável, sugere que

pode-se jorrar partículas não esféricas em leitos mais profundos do que as esféricas (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

2.2.8- Efeitos do Fluxo de Gás

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

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

2.2.9- Altura Máxima do Leito de Jorro

Existem três mecanismos que podem causar instabilidade no regime de jorro estável, além do limite superior na altura do leito: a fluidização de sólidos na região anular, o estrangulamento do jorro e a propagação da instabilidade.

No desenvolvimento de equações para determinação da altura máxima (H_m), os dois últimos mecanismos tem sido ignorados completamente, as correlações propostas baseiam-se no primeiro mecanismo ou simplesmente são empíricas.

MALEK e LU (1965) propuseram uma equação suportada por um amplo limite de variáveis para ser de interesse prático. A correlação é dada pela expressão:

$$\frac{H_m}{D_c} = 0,105 \cdot \left(\frac{D_c}{d_p} \right)^{0,75} \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{0,4} \left(\frac{\lambda^2}{\rho_s^{1,2}} \right) \quad (2.13)$$

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

2.2.10- Atrito no Leito de Jorro

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

Mesmo para materiais mais frágeis, a extensão de danos provocados pelo atrito também depende das condições do jorro; ou seja, é possível exercer algum controle do atrito para dado material, pela escolha dos parâmetros de projeto. Uma investigação sobre esse aspecto do leito de jorro e algumas indicações do comportamento do atrito foram comprovadas por experimentos realizados, com fertilizantes como leito de uréia, na Universidade de British Columbia. Foram utilizados diferentes tamanhos de orifícios de entrada, ângulos do cone, profundidades do leito e velocidades do ar, usados para análises de amostras extraídas de um leito de jorro a intervalos de 10 min. A quantidade finamente polvilhada foi coletada em um ciclone após 2 h de jorro, sendo medida uma quantidade de 0 - 9 g por kg de peso do leito sobre a extensão das condições estudadas. Concluiu-se que a variável que mais influenciou no atrito entre as partículas foi o diâmetro da entrada de ar e consequentemente a velocidade do ar na entrada do leito (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

2.2.11- Leito de Jorro Bidimensional

A principal característica dos leitos de jorro é o movimento contínuo e cíclico de partículas entre o jorro e o ânulo, que pode ser descrita quantitativamente pela circulação de partículas. A literatura em leitos de jorro cone - cilíndricos (*LJC*) mostra que este movimento contínuo de partículas tem um efeito significativo no desempenho de leitos de jorro, em aplicações tais como secagem, gaseificação do carvão, granulação e recobrimento de partículas. Porém, *LJC*

são raramente usados na agroindústria por causa da dificuldade da manutenção do regime cíclico estável, ou jorro estável, em equipamentos de grande porte, tendo como consequência problemas operacionais.

A geometria de um leito de jorro bidimensional (*LJ2D*) foi proposta por MUJUMDAR (1984) como uma tentativa de superar algumas das limitações dos *LJC*. Um *LJ2D* tem paredes planas com uma base inclinada e uma abertura de entrada de ar no centro da largura do leito. A geometria retangular traz ao *LJ2D* maior facilidade de operação em escala piloto que o leito cilíndrico.

Rocha e Taranto (1992) realizaram um estudo da fluidodinâmica para o leito de jorro bidimensional, utilizando partículas não esféricas no formato de comprimidos. As equações 2.14 e 2.15 apresentam, respectivamente, correlações para o cálculo da queda de pressão máxima e a vazão de jorro mínimo estável, utilizando diâmetros equivalentes D_c e D_i .

$$\frac{\Delta P_M}{H \cdot \rho_A \cdot g} = 1 + 1,042 \cdot \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{-0,7381} \left[\left(\frac{D_c}{D_i} \right) - 1 \right]^{0,0235} \left(tg \frac{\hat{A}}{2} \right)^{0,4581} \quad (2.14)$$

$$Q_{JM} = 10^{-4} \cdot \left(\frac{d_p}{\phi \cdot D_c} \right)^{0,3559} \cdot \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{-3,1395} \cdot \sqrt{2gH \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (2.15)$$

A instalação de placas internas em ambos os lados da abertura de entrada de ar em um *LJ2D*, de uma maneira semelhante a um tubo interno no *LJC*, resulta em melhor circulação dos sólidos, embora diminua a mistura, pois diminui o fluxo de partículas ânulo - jorro (KALWAR et al., 1993). Quando as placas internas estão presentes em um leito de determinadas dimensões, a taxa de circulação de sólidos muda com a distância de separação para qualquer ângulo da base ou largura do jorro. A inserção de placas internas sobre a abertura de entrada de ar no leito, paralela ao comprimento, provê dois ânnulos independentes, um em cada lado do jorro.

KALWAR et al. (1993) apresentaram uma pesquisa para investigar os fatores que influenciam a circulação de grãos em *LJ2D* com placas internas. As variáveis que influenciaram a taxa de circulação de partículas foram a densidade dos grãos, a área da seção transversal, o

diâmetro do tubo, o diâmetro do orifício, o ângulo de inclinação, a velocidade superficial do ar e a altura do leito.

RAGHAVAN et al. (1998) mediram a pressão estática vertical em leito de jorro bidimensional, não aerado, para os grãos milho, trigo e soja. Usaram 36 combinações entre vazão de ar, ângulo de inclinação e altura do leito. A pressão estática foi significativamente influenciada pela largura da abertura da entrada de ar, ângulo de inclinação, tipo de grão, altura do leito e por interações desses fatores.

2.3- Secagem

2.3.1- Introdução

Os grãos e sementes recém colhidos podem apresentar um teor de umidade inadequado para serem armazenados com segurança, necessitando, portanto, serem secados. O alto teor de umidade pode afetar a qualidade da semente, causando perdas do poder germinativo e vigor, e problemas nas operações de beneficiamento.

A secagem apresenta-se como uma operação que permite a obtenção de sementes de melhor qualidade, dificultando ataques de insetos, fungos e outros microrganismos, e reduzindo a velocidade de deterioração.

A secagem artificial é um processo geralmente dispendioso em energia. Alguns métodos empregam ar forçado sem aquecimento, através das sementes, para remover a umidade. Outro método utiliza ar forçado aquecido, neste caso a semente sofre um certo aquecimento, que ocasiona a difusão da umidade interna para a superfície, resultando em um aumento na vaporização, conseguindo-se uma secagem mais rápida.

Os equipamentos secadores podem ser do tipo estacionário, onde certa quantidade de sementes é depositada em uma câmara e o ar quente forçado passa pelo meio destas. Um outro tipo é o secador contínuo, onde as sementes caminham em sentido contrário ao do ar aquecido insuflado (CARVALHO e NAKAGAWA, 1983).

2.3.2- Secagem em Leito de Jorro

A aplicabilidade da técnica de leito de jorro na secagem de produtos granulares, que são também grandes para serem adequadamente fluidizados, foi reconhecida no início de 1950. Secadores em leito de jorro (*SLJ*) mostram numerosas vantagens e algumas limitações sobre secadores convencionais. Por causa de um curto tempo de residência no jorro, esses secadores podem ser usados para secar sólidos sensíveis ao calor, tais como alimentos, produtos farmacêuticos e plásticos. Também, as operações de recobrimento, granulação, aglomeração, resfriamento, entre outras, podem ser conduzidas no mesmo equipamento para vários parâmetros de operação. O uso de sólidos inertes tem sido aplicado com sucesso na secagem de pastas e suspensões.

O material a ser seco é introduzido na câmara, junto com o gás, no fundo ou no topo do aparelho. O gás é introduzido no fundo através do distribuidor na seção cônica do leito. A combinação das duas diferentes regiões hidrodinâmicas, transporte pneumático na fase diluída central e o movimento descendente das partículas da fase densa, na região anular, causam a característica de circulação do material do equipamento de leito de jorro. Tais secadores têm as seguintes vantagens:

- Possibilidade de mudanças na velocidade do gás do fundo ao topo do leito, permitindo secagem simultânea de partículas sólidas de várias dimensões.
- Velocidade suficiente do agente de secagem na parte inferior do equipamento, permitindo a secagem das partículas sem que elas tenham um contato prolongado com o distribuidor.

No projeto de um secador de leito de jorro é necessário conhecer os parâmetros de operação, sendo que o leito passa da forma estática para um estado dinâmico. As condições de operação ótimas para a secagem de produtos agrícolas granulares são determinadas não somente por sua composição química e propriedades físicas, mas também por seu potencial de uso. No caso de milho e aveia, por exemplo, o valor dos nutrientes tem que ser mantidos; a temperatura do ar de secagem pode ser mais alta para grãos (entre 60 a 75 °C) que para o caso das sementes. Nesse último caso, para conservar o poder de germinação, a temperatura não pode exceder 40-45 °C; no caso de algumas sementes é requerida uma temperatura máxima de 30-35 °C (PALLAI et al., 1995). Tais características, portanto, dependem do tipo de semente e de seu tempo de

residência no secador. A qualidade do produto seco é determinada pela taxa de secagem, temperatura e fluxo do agente secante.

As vantagens econômicas para secadores de grãos de leito de jorro convencional (CSB) em relação aos secadores de cascata foram salientados por PETERSON (1962) e MASSARANI (1984). Porém, a limitação nas dimensões do leito tem dificultado a aplicação dos secadores de CSB em escala comercial.

Algumas modificações no desenho convencional (cone - cilíndrico) foram propostas na literatura para minimizar problemas em escala piloto. Um leito de jorro bidimensional (*LJ2D*), como mostrado por MUJUMDAR (1984), apresenta-se como solução para escala piloto e para problemas de fabricação com a vantagem de flexibilidade na operação, conforme já colocado em item anterior.

ANDERSON et al. (1984) apresentaram alguns dados aerodinâmicos obtidos em um *LJ2D*. Experimentos foram realizados com quatro grãos (trigo, cevada, aveia e milho). Resumidamente as conclusões foram: (1) as curvas de velocidade e queda de pressão exibem formas típicas de todo leito de jorro com alguma diferença das obtidas no *LJC*; (2) a queda de pressão de mínimo jorro para uma determinada altura do leito é mais alta para o trigo, seguido pelo milho, aveia e cevada.

LIMA (1995) analisou a secagem de feijão carioca em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado. O secador utilizado, em escala de laboratório, foi do tipo cone - cilíndrico e operava em batelada. As amostras utilizadas, com cargas de 1500 g e 3000 g, tinham 20 e 30% de teor de umidade inicial e o ar de secagem com temperaturas de 73 e 83 °C. O trabalho mostrou que os três secadores, operando nas mesmas condições, apresentaram comportamento muito semelhante com uma ligeira vantagem para o leito fixo. Embora operando com temperaturas mais altas que o recomendado, a análise sensorial comprovou que não houve alteração no nível de aceitação do produto, porém, é provável que no caso das sementes, o potencial germinativo seja fortemente prejudicado.

JUMAH, et al. (1996) apresentaram um modelo com predições e dados experimentais para o efeito de intermitência, na evolução do teor de umidade médio da partícula com o tempo.

Nenhuma estimativa de erro numérico foi apresentada, neste caso, para comparação entre os resultados teóricos e experimentais, por causa da dificuldade em se traçar uma curva adequada ao comportamento periódico desse processo de secagem. O comportamento geral do processo de aquecimento intermitente do jorro é caracterizado pelo desenvolvimento alternado e redução dos gradientes de umidade dentro da partícula. Isto significa perfis de umidade nivelados comparados ao processo de jorro contínuo. Assim o material é protegido contra secagem por tensões induzidas, encolhimento e quebras.

2.3.3- Secagem em Leito Fixo

Em um processo de secagem em leito fixo, o ar de secagem move do fundo para o topo do leito. Trocas de umidade, do grão para o ar, tomam lugar em uma profundidade finita ou região do grão. No início do processo, a região fica no fundo do leito. Em secagem contínua a região move-se para cima e, quando ela passa inteiramente através do grão, a massa inteira é seca por equilíbrio com o ar de secagem. Neste processo, a zona de secagem pode estabelecer-se em uma posição entre o fundo e o topo do leito de partículas.

O grão sob a zona de secagem tem essencialmente alcançado condições de equilíbrio com o ar que chega e tem um conteúdo de umidade X_{eq} . O grão sobre a zona ainda não começou a secar e tem um conteúdo de umidade X_o . O ar passando através do grão, sobre a zona de secagem, está em equilíbrio com a umidade inicial do grão. Passando através da zona de secagem, o ar toma a umidade do grão por evaporação e é resfriado pelo processo de evaporação.

Dois gradientes existem na zona de secagem: um gradiente do conteúdo de umidade de X_{eq} a X_o e um gradiente de temperatura entre a temperatura do ar e do grão. Em uma análise simplificada, o grão assume a mesma temperatura que o ar em qualquer local.

Se o leito de grãos for pouco espesso e/ou a velocidade do ar for alta, a zona de secagem pode estender-se completamente através do leito. A obtenção final da umidade média pode ser alcançada antes que a camada inferior de grãos tenha alcançado um equilíbrio com o ar de secagem (BROOKER et al., 1992).

Safras agrícolas podem exibir uma variação natural da umidade média das partículas. Entre as possíveis causas de tais variações de umidade estão a maturidade, localização física na planta e localização da planta no campo. A variação na umidade no fim da secagem reflete a variação de umidade da colheita, como também a variação de umidade devido ao projeto do secador e da operação. O problema da variação de umidade da colheita é importante: afeta o tempo de secagem exigido para trazer toda a colheita no secador até níveis de umidade requeridos para armazenamento seguro.

BRUSEWITZ (1974) mediu o conteúdo de umidade individual da vagem do amendoim antes e depois da secagem e verificou que a variação do conteúdo de umidade era grande, com coeficientes de variação na ordem de 0,5. Notou, também, que as distribuições do conteúdo de umidade foram melhor representados através da distribuição normal. WADSWORTH, et al. (1982) e CHAU e KUNZE (1982) verificaram que grãos de arroz da mesma planta variam em umidade inicial. BRUSEWITZ (1987) estudou os efeitos do método de secagem na variabilidade de umidade do milho e verificou que a distribuição de umidade final não seguiu uma distribuição normal. Medidas de campo em secadores de noz (RUMSEY, 1987) mostraram uma variação grande na umidade inicial média individual da noz, e esta variação do grão persiste até o fim da secagem. Foi determinada uma umidade inicial média independente da posição vertical dentro do recipiente de 1,2m x 1,2m x 1,2m, mas verificou-se um gradiente de umidade estatisticamente significativo do topo ao fundo do recipiente, ao término da secagem.

Revisões de trabalhos de secagem em leito fixo e modelos de secador de fluxo contínuo para colheitas foram feitas por PARRY (1985) e MOREY et al. (1978). Ambos classificaram os modelos de leito fixo em três tipos: logarítmico, de balanço de calor e massa, e modelos de equação diferencial parcial.

Um modelo de secador em leito fixo de equação diferencial parcial para nozes inglesas foi usado para investigar estratégias de secagem, com ar ambiente (RUMSEY e THOMPSON, 1984) e ar aquecido (RUMSEY, 1985). O modelo foi desenvolvido pela Universidade Estadual de Michigan com um programa de simulação de grão em secagem de leito fixo (BAKKER-ARKEMA et al., 1974), e foi verificado em vários laboratórios e testes de campo (RUMSEY, 1985).

2.4- Grãos e Sementes

2.4.1- Composição Química das Sementes

As sementes apresentam uma composição química bastante variável. Apesar da maior parte dos compostos químicos presentes nas sementes não diferir daqueles encontrados nos demais órgãos da planta, as proteínas podem diferir na composição química e propriedades. A quantidade de lipídios armazenada na semente de algumas espécies não se encontra em grande quantidade nos demais tecidos da planta.

Considerando-se o principal composto armazenado, as sementes podem ser divididas naquelas ricas em carboidratos, ricas em lipídios e, em algumas poucas espécies, ricas em proteínas.

A composição química de algumas espécies de feijão é apresentado na Tabela 2.1. O conhecimento da composição química é de interesse prático no armazenamento e no consumo de energia das plantas.

Tabela 2.1 - Composição química de sementes de feijão (WATT e MERRIL, 1963)

<i>Espécie</i> <i>De Feijão</i>	<i>Água</i> (%)	<i>Proteínas</i> (%)	<i>Lipídios</i> (%)	<i>Carboidratos</i> (%)	<i>Fibras</i> (%)	<i>Cinzas</i> (%)
Branco	10,9	22,3	1,6	57,0	4,3	3,9
Vermelho	10,4	22,5	1,5	57,7	4,2	3,7
Castanho	11,2	22,3	1,5	56,8	4,4	3,8

2.4.2- Conteúdo de Umidade de Equilíbrio

O conceito do conteúdo de umidade de equilíbrio (X_{eq}) é importante no estudo de secagem de grãos e sementes porque determina o mínimo conteúdo de umidade que pode ser obtido, para um dado conjunto de condições de secagem. A umidade de equilíbrio do grão é definida como o conteúdo de umidade do material após este ter sido exposto a um ambiente

particular por um longo período de tempo. Especificamente, o X_{eq} pode ser definido como o conteúdo de umidade ao qual a pressão de vapor interna do produto está em equilíbrio com a pressão de vapor do ambiente. O valor de X_{eq} depende das condições de temperatura e umidade do ambiente, como das espécies, variedade e maturidade do grão.

Cada grão mostra uma característica de pressão de vapor d'água a uma certa temperatura e conteúdo de umidade. Assim, a pressão de vapor d'água do grão de cereal à vários conteúdos de umidade e temperatura determina se ele desorve ou adsorve umidade quando exposto ao ar úmido (BROOKER et al., 1992).

Por ser um parâmetro na secagem de grãos, o conteúdo de umidade de equilíbrio tem sido determinado experimentalmente para muitas espécies. A Tabela 2.2 mostra o conteúdo de umidade de equilíbrio para algumas variedades de feijão à temperatura de 25 °C. A Tabela 2.3 mostra o conteúdo de umidade de equilíbrio para o feijão da variedade "carioca" em várias temperaturas.

Tabela. 2.2 - Conteúdo de umidade de equilíbrio (% em massa) base úmida (MCLEAN, 1989)

<i>Espécie</i>	<i>Umidade Relativa do Ar (%)</i>						
	<i>40</i>	<i>50</i>	<i>60</i>	<i>70</i>	<i>75</i>	<i>80</i>	<i>90</i>
Feijão marrom	9,1	11,1	13,1	15,8	18,0	20,4	28,0
Feijão anão Francês	9,1	11,2	13,3	15,8	17,6	20,3	-
Feijão trepadeira	8,8	11,2	12,8	16,0	18,0	20,8	29,9
Feijão soja	6,8	7,9	9,5	11,8	13,2	15,5	-
Feijão "tic"	9,8	11,3	12,7	14,6	15,9	17,5	23,0

Tabela 2.3 - Conteúdos de umidade de equilíbrio (% base seca), de sementes de feijão "carioca", obtidos por desorção (MATA, 1997).

<i>Umidade Relativa (%)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>					
	<i>10</i>	<i>20</i>	<i>30</i>	<i>40</i>	<i>50</i>	<i>60</i>
10	6,1	5,3	4,9	4,6	4,4	4,2
20	7,8	6,9	6,4	6,1	5,9	5,7
30	9,5	8,4	7,9	7,5	7,3	7,0
40	11,2	10,1	9,4	9,0	8,6	8,4
50	13,2	11,8	11,0	10,5	10,1	9,8
60	15,4	13,8	12,9	12,4	11,9	11,5
70	18,3	16,3	15,3	14,6	14,1	13,6
80	22,2	19,7	18,4	17,6	16,9	16,4
90	29,1	25,5	23,8	22,6	21,7	21,0

2.4.3- Fragilidade dos Grãos

Por sua constituição, os grãos são formados por materiais parcialmente elásticos, e quando chegam a baixos níveis de umidade tornam-se frágeis. Esta fragilidade é mais visível em grãos de milho duro ou trigo, que apresentam uma estrutura do tipo cristalino (vítreo). Tanto a secagem como os movimentos de manipulação, que se realizam indiscriminadamente, contribuem a depreciar de forma acumulativa a mercadoria.

Os sucessivos passos de manipulação, sejam em instalações de campo, armazenagem e através dos elementos convencionais de transporte, aos quais se somam os efeitos por ação das variações de temperatura durante a secagem, são as causas de que as mercadorias que saem para consumo apresentam um elevado nível de quebras (MARSANS, 1987).

A queda de grãos, de distintas alturas, e sobre diversas superfícies de impacto, dá como resultado diferentes proporções de grãos quebrados. Portanto, se a manipulação ocorre de forma indiscriminada, a deterioração pode chegar a ser total (MARSANS, 1987).

Então, conclui-se que à medida que o grão se encontra deteriorado pelo calor durante a etapa de secagem, as conseqüências podem ser desastrosas; chegando, inclusive, a provocar a inoperabilidade para o embarque, para mercadorias com perdas de identidade.

Um dos problemas que mais afetam os grãos, em sua qualidade comercial, é o dano provocado durante a operação de secagem. Este prejuízo aparece na forma de fissuras, grão opaco e danos na casca, o que determina uma fragilidade total do grão que não suporta a manipulação.

Estudando o comportamento do grão de milho submetido a secagem em várias temperaturas de ar, entre 70 e 135 °C, e combinado com aeração, com ar entre 8 e 24 °C, foram obtidos alguns resultados significativos sobre o grau de quebras que se produz no grão quando se seca (MARSANS, 1987).

Os grãos quando sofrem um tratamento térmico, com circulação de ar, cedem umidade em forma de vapor de água ao meio (atmosfera), que por ação do ar quente se torna altamente higroscópico. Esta resposta do grão obedece a um fenômeno físico, onde a água contida dentro de sua estrutura, aumenta sua pressão de vapor e começa a mover-se até os pontos de menor pressão, a periferia do grão.

As variações de umidade do grão alteram a sua estrutura, obrigando-o a uma recomposição estrutural em busca do equilíbrio de suas próprias tensões. A aeração posterior, para provocar o esfriamento, em um sistema de secagem convencional, tem provocado o aparecimento de um alto grau de fissuras na estrutura do grão. O aparecimento de fissuras não é um fenômeno imediato, manifesta-se com certa intensidade nas primeiras 2 horas da saída do secador, e continuando nas próximas 15 a 18 horas posteriores (MARSANS, 1987).

As fissuras de um grão são devidas a várias causas. Em primeiro lugar está o gradiente térmico entre a fase de aquecimento e esfriamento, bem como o tempo de exposição. Em segundo lugar, a velocidade de aquecimento e esfriamento. Em terceiro lugar, a fração de umidade a extrair, sendo que as primeiras frações não provocam maior deterioração.

Evitar o aparecimento de fissuras nos grãos ou reduzi-las a valores mínimos não é difícil nem custoso. A solução está em diminuir a temperatura de secagem, melhorar as condições e a tecnologia de secagem, incorporar ao processo a técnica de secagem com aeração, e tudo que possa melhorar a qualidade do grão (MARSANS, 1987).

2.4.4- O Feijão

2.4.4.1- Aspectos Socioeconômicos

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) destaca-se como uma importante fonte de proteína e calorias na dieta alimentar humana. No Brasil, a sua boa adaptação se deve às condições climáticas, sendo cultivado em todo território nacional, em três safras anuais. Cerca de 90% do produto comercializado é da variedade “carioca”.

O Brasil, segundo estatística da FAO (1993), é o segundo produtor mundial de feijão, perdendo apenas para a Índia. A produtividade média mundial é de 673 kg/ha e a brasileira 635 kg/ha. Segundo estimativas, baseadas na safra de 1994, a área plantada no Brasil é de 3,5 milhões de hectares e a produção de 2,6 milhões de toneladas. Analisando o período 1990-1994 a área cresceu 0,6%, a produção 6,0% e a produtividade 5,5%, ao ano. O consumo brasileiro nos últimos 25 anos apresentou uma média *per capita* de 17,5 kg/hab.ano.

2.4.4.2- Qualidade Nutricional

O feijão apresenta uma importante fonte de diversos nutrientes como proteínas, carboidratos, lípides, vitaminas, minerais e fibras, que tornam seu consumo vantajoso. A composição percentual varia de acordo com fatores ambientais, sendo que em média, o conteúdo de proteínas situa-se 22-26%, carboidratos 62-67%, cinzas 3,8-4,5%, lípides 1,0-2,0%, e fibra bruta 3,8-5,7% (ARAÚJO et al., 1996).

O feijão é uma fonte relativamente boa de vitaminas hidrossolúveis, especialmente tiamina, riboflavina, niacina e folacina. Em relação aos minerais, o feijão é rico principalmente em potássio (1%), fósforo (0,4%), ferro (0,007%) e em menores quantidades cálcio, cobre, zinco

e magnésio. Com relação a qualidade protéica, o alto teor de lisina do feijão deve ser complementado com dietas mistas como os aminoácidos sulfurados dos cereais. A semente tem cerca de 25% de proteínas sendo que as principais frações solúveis são as globulinas e albuminas. O teor de amido, em base seca, presente nas diversas cultivares do feijão, situa-se entre 45% e 60%, porém não é totalmente utilizável como fonte energética. As fibras presentes no feijão “carioca” são em torno de 17,9% de fibra insolúvel e 7,9% de fibra solúvel, em base seca (ARAÚJO et al., 1996).

2.4.4.3- Semente

A semente do feijoeiro é exalbuminosa, originada de um óvulo campilótropo. Compõe-se das seguintes partes externas (Figura 2.4):

- Testa (tegumento): corresponde à membrana secundina do óvulo, é a capa protetora da semente, onde se localizam os pigmentos.
- Rafe: sutura formada pela soldadura do funículo com os tegumentos externos do óvulo.
- Hilo: cicatriz deixada pelo funículo que conecta a semente com a placenta.
- Micrópila: abertura próxima ao hilo através da qual se realiza a absorção de água.

A parte interna da semente é formada por (Figura 2.5):

- Plúmula: pequena gema da qual procedem o caule e as folhas da planta.
- Hipocótilo: região de transição entre a plúmula e a radícula.
- Radícula: raiz do embrião que origina o sistema radicular
- Cotilédones: folha seminal ou embrionária que contém as reservas necessárias à germinação e ao desenvolvimento inicial da plântula.

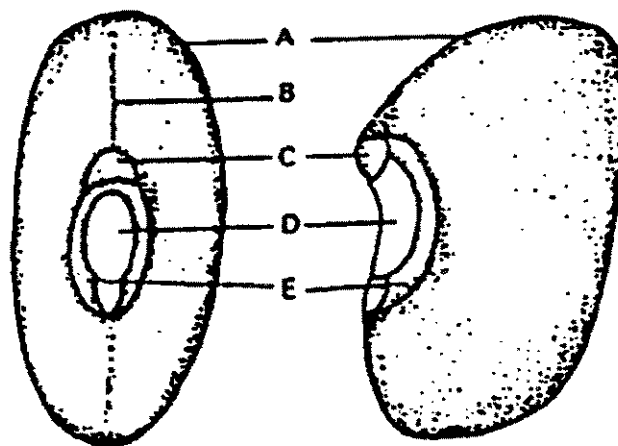


Figura 2.4 - Estrutura externa da semente de feijão: A- testa, B- rafe, C- micrópila, D- hilo, E- talo (ARAÚJO et al.,1996).

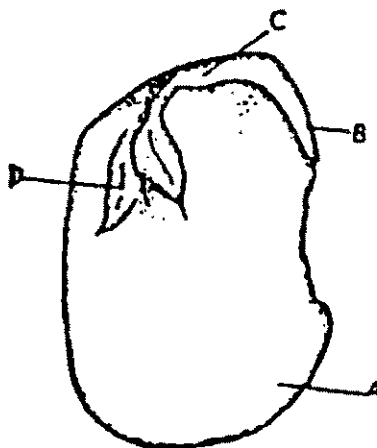


Figura 2.5 - Estrutura interna da semente de feijão: A- cotilédone, B- radícula, C- hipocótilo, D- plúmula (ARAÚJO et al.,1996).

Como características morfológicas da semente de feijão tem-se:

- **Tamanho:** o tamanho médio das sementes pode variar devido a fatores como temperatura, umidade, fertilidade do solo, espaçamento e época de plantio. Uma classificação, baseada no peso de 100 sementes, foi dada como: muito pequena, 20g, pequena 20 a 30 g, média 30 a 40 g, normal 40 a 50 g, e grande > 50g (ARAÚJO et al., 1996).
- **Forma:** a forma das sementes, de acordo com a relação comprimento/largura, pode ser esférica, elíptica ou oblonga, e com a relação espessura/largura, pode ser achatada, semi-cheia ou cheia.

- Cor: a cor dos diferentes tipos tem importância para aceitação no mercado e identificação botânica. Existe uma ampla variedade pelas diversas cultivares como alaranjada, bege, marrom-avermelhado, vermelha, rósea, roxa, branca, etc.
- Brilho: a intensidade do brilho apresentado pelas sementes pode ser classificado como opaco, intermediário e brilhoso.

Um dos fatores que mais contribuem para o baixo rendimento da cultura do feijoeiro é a utilização de grãos, ao invés de sementes, para o plantio. Esta prática contribui significativamente para a obtenção de baixos rendimentos da cultura no Brasil. A qualidade da semente é definida como o conjunto de atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários que influenciam na capacidade do lote originar uma lavoura uniforme, constituída de plantas vigorosas e representativas do cultivar, livres de plantas invasoras ou indesejáveis (ARAÚJO et al., 1996).

2.4.5- Vigor das Sementes

Algumas sementes, como lentilha, feijão e grão-de-bico, têm um período prolongado entre semeadura e surgimento da planta, freqüentemente com o estabelecimento de uma colheita pobre. Mais vigor nas sementes produziriam plantas mais uniformes e vigorosas e por conseguinte uma produção mais alta por hectare.

O vigor de sementes foi descrito como a propriedade das sementes que determina um potencial rápido, aparecimento uniforme e desenvolvimento de mudas normais sob um largo alcance de condições de campo (ISTA, 1976).

Entre os métodos investigados para melhorar o vigor das sementes estão aqueles que sujeitam as sementes a um processo de hidratação / desidratação. Tais métodos demonstraram ter sucesso em algumas espécies. Os trabalhos de FRETT et al. (1991) melhoraram a germinação de sementes, o aparecimento da muda e reduziram o tempo para alcançar a germinação em 50%.

O vigor também foi melhorado preparando sob um leito de sementes, condições adversas como baixa temperatura (PILL et al., 1981) e tensão da água (FERNANDEZ e JOHNSTON,

1987). Os efeitos benéficos da preparação são um aumento no tamanho do embrião de acordo com AUSTIN et al. (1969).

Medidas de vigor podem ser usadas para prever o potencial de desempenho da muda no campo. Foram propostos vários testes para medir vigor, mas não há ainda um teste eficaz para a avaliação em todas as diferentes espécies. Teste de germinação é a medida mais amplamente aceita de qualidade de sementes e a velocidade de germinação, um dos parâmetros mais antigos sugeridos, como indicador de vigor. Aumento de condutividade da lixívia da semente é tido como uma boa medida de deterioração da semente. O uso de estufa também foi sugerido como um teste de vigor para descobrir diferenças entre lotes de sementes (FERNANDEZ e JOHNSTON, 1995).

2.4.6- Testes de Germinação em Laboratório

As provas de germinação de sementes são projetadas para indicar, tão certamente quanto possível, a proporção que pode-se esperar que brote e se desenvolva para formar plantas fortes no campo, jardim e bosque.

Se uma semente absorve água, incha-se e se formam umas pequenas raízes, não é garantia que continuará crescendo e formará uma planta. Pode ser que tenha suficiente vigor para formar uma raiz ou pode formar um broto e logo morrer. Ainda pode chegar a crescer como plântula, mas uma plântula tão débil que não pode se estabelecer em um solo e continuar seu desenvolvimento.

As sementes são analisadas antes de serem colocadas no mercado. Não se pode esperar resultados de germinação uniformes a não ser que se sigam procedimentos precisos, tais como subdivisão da amostra, seleção imparcial das sementes, uso de um número padrão de sementes para a prova, espaçamento adequado das sementes, correta regulação da umidade do substrato, ou seja, do meio em que se colocam as sementes.

O equipamento e o substrato devem proporcionar e manter durante o período de prova, as condições de umidade, aeração e luz. O tipo mais usual é uma câmara isolada, equipada com

prateleiras móveis, onde se colocam as provas; a temperatura é controlada por um termostato, a luz penetra pelas paredes ou por meio de lâmpadas.

A maior parte dos testes são feitos em substratos não tóxicos, tais como papel secante, toalhas de papel e papel filtro, os quais são colocados em caixas. A areia ou terra deve ser esterilizada para destruir fungos, bactérias e outras sementes. Segundo JUSTICE (1972), os diferentes substratos, comumente recomendados, variam entre si em composição, toxicidade às sementes, associação com patógenos, aeração e capacidade de retenção de umidade. Assim, deve haver critérios na escolha do substrato mais adequado levando em consideração a facilidade que o mesmo oferece para o perfeito desenvolvimento e avaliação das plântulas, e realização das contagens.

Durante todo o período do teste deve-se proporcionar às sementes uma umidade adequada. A umidade excessiva pode ocasionar uma restrição na respiração e deter a germinação ou produzir anomalias como plântulas transparentes.

A temperatura deverá ser controlada com precisão; algumas sementes germinam em uma escala ampla de temperaturas, porém outras em certos limites estreitos. Geralmente as sementes germinam nas temperaturas a que foram aclimatadas em seu lugar de produção. A maioria delas à temperaturas que variam entre 15 e 30 °C.

É necessário luz por algumas horas diárias às sementes, devido ao efeito estimulante que a luz tem sobre a germinação de muitas classes de sementes. As plântulas de sementes germinadas expostas à luz são mais fáceis de se avaliar.

A maior parte das classes de sementes pode ser removida da prova de germinação de 7 a 14 dias depois de semeadas. Outros grupos, requerem períodos mais longos como 28 ou até 35 dias. Se a semente estiver na forma latente, o tempo requerido para os tratamentos prévios para superar a latência aumentam o período de prova.

A análise de germinação trata como normais somente as plântulas que continuarem a se desenvolver formando plantas fortes em condições favoráveis do campo. Todas as plântulas

rotas, débeis e mal formadas, são consideradas anormais e não se incluem na porcentagem de germinação. Na Figura 2.6 são mostradas plântulas de feijão com 8 dias de idade.

As plântulas anormais podem ser devidas a várias causas. Talvez as anormalidades mais sérias sejam aquelas causadas por lesões mecânicas, infestação de insetos, apodrecimento causado por certos organismos patogênicos, lesões por substâncias químicas e geadas.

Para que se tenha um real conhecimento da qualidade das sementes, é necessária a disponibilidade de métodos que permitam obter resultados uniformes e comparáveis entre diferentes análises. A fim de se alcançar este objetivo é imprescindível a disponibilidade de instalações adequadas, pessoal convenientemente treinado e métodos uniformes, bem como um programa de pesquisa em análise de sementes que procure desenvolver novos métodos e aprimorar os já existentes (COLBRY et al., 1986).

CARVALHO e NAKAGAWA (1983) afirmaram que o processo de germinação consiste de uma seqüência complexa de reações bioquímicas, pelas quais substâncias de reservas armazenadas no tecido de sustentação são desdobradas, transformadas e ressintetizadas no eixo embrionário.

WEIKERT e FRAGA (1994) realizaram teste padrão de germinação em sementes de café, temperaturas de 30 e 35 °C e com os substratos “Rolo de Pano”, “Rolo de papel” e “Entre Areia”. No entanto, o substrato “pano” possibilita alguns inconvenientes como o desenvolvimento do sistema radicular entre os fios de tecido, comprometendo seriamente a avaliação das plântulas pela danificação causada na abertura dos rolos. Devido a esse fato, na prática, observa-se uma preferência pelo uso do substrato “papel”, mas devido ao longo tempo e condições a que é submetido, perde muito de suas propriedades e, aliado à predisposição ao ataque de patógenos, dificulta bastante a avaliação das plântulas. Resultados obtidos com outras espécies têm evidenciado interações entre as temperaturas de germinação e os substratos utilizados (CARNEIRO e PIRES, 1983, MACEDO, 1985).

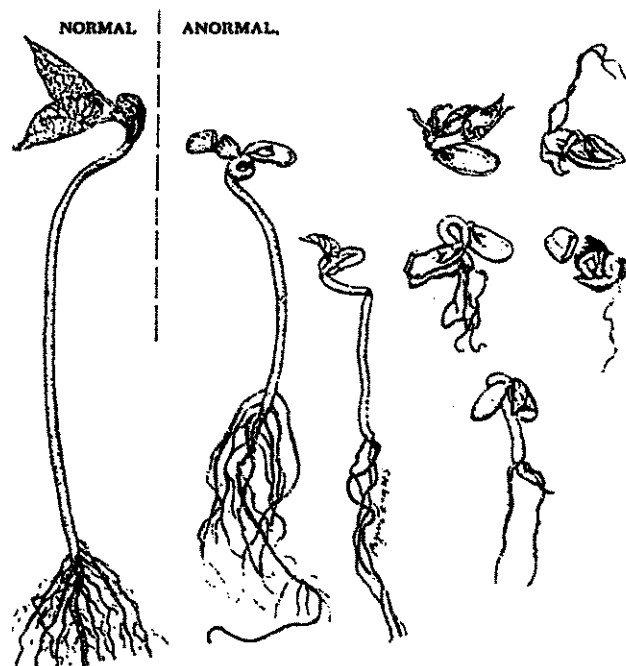


Figura. 2.6 – Classificação das plântulas de feijão com 8 dias de idade (COLBRY, SWOFFORD e MOORE, 1986).

2.4.7- Métodos para Determinar a Umidade de Grãos e Sementes

A umidade das sementes tem uma grande influência sobre o tempo em que a semente permanece viável. Em níveis altos de umidade, as sementes podem germinar ou é possível que se desenvolvam fungos e elas percam sua viabilidade em alguns dias.

Os métodos básicos para a determinação da umidade nas sementes são aqueles em que a amostra é pesada e aquecida em uma estufa à temperatura especificada e um tempo determinado, até que chegue a peso constante.

As sementes grandes como cereais e feijões, devem ser moídas antes de fazer a determinação pelo método descrito, para proporcionar uma penetração mais rápida do calor e escape mais fácil da umidade. Ordinariamente, as sementes com alto conteúdo de óleo não devem ser moídas para determinações de umidade em estufas, devido a oxidação do óleo que causa aumento de peso.

Para o feijão comum é especificado o método de secagem em forno de ar à temperatura de 103 °C por 72 horas contínuas, método este que não requer a moagem das sementes. Calcula-se o conteúdo de umidade pela perda de peso das sementes (COLBRY et al., 1986).

2.5- Danos em Sementes Durante a Secagem

2.5.1- Efeitos da Temperatura

Devido a uma colheita tardia, as sementes são muitas vezes úmidas e precisam ser secas antes do armazenamento. Usualmente uma secagem multi-estágio por batelada é usada. Feijão, como outras sementes, são vulneráveis a danos durante a secagem. A umidade inicial das sementes, temperatura de secagem e taxa de secagem são importantes parâmetros que afetam o número de danos nas sementes. Propriedades físicas como tamanho das sementes, formato, propriedades mecânicas e taxa de transferência de água influenciam na quantidade dos danos. Atenção deve ser prestada à microestrutura da semente como algumas propriedades acima mencionadas. Estudos têm concluído que é preferível a secagem de estágio único, melhorando a eficiência de plantas de secagem (FORNAL et al., 1993).

Soja (para semente ou propósitos comerciais) colhidos a conteúdos de umidade que variam de 15 a 25 % devem ser secos antes que possam ser armazenados seguramente. Podem ser usados ar seco natural para este propósito se conteúdos de umidade de colheita estão abaixo do alcance superior; porém, a secagem satisfatória depende das condições do tempo. Podem ser usados ar seco aquecido, mas podendo resultar em dano físico na forma de casca da semente e trincas do cotilédone (WALKER e BERRE, 1972; OVERHULTS et al., 1973; PFOST, 1975). Pode ser esperado que tal dano aumente a quebra durante o manuseio (CHANCHAI et al., 1976) e possivelmente abaixa a qualidade de mercado da soja. Fungos e outros microorganismos desenvolvidos em soja, proporcionaram um nível elevado de dano na casca da semente em comparação a amostras semelhantes, onde observou-se poucos danos (WHITE et al., 1976).

Seria vantajoso se pudessem ser projetados secadores de ar aquecidos para serem operados de modo a reduzir ou minimizar danos de secagem para soja. Este procedimento requer o

conhecimento do desenvolvimento de danos na secagem em soja, como relacioná-los às características da soja, às condições de secagem e a taxa ou fluxo do ar secante.

FORNAL et al. (1993) utilizaram em seus testes, sementes de feijão fava das variedades Nadwislanski e Tibo, da safra de 1990, com umidade inicial de 21,2 %. Elas foram secas em um secador de laboratório a batelada de fluxo cruzado à temperaturas de 25 °C a 55 °C, em fluxo de ar de 0,1-2,0 m/s através de uma camada de 5 cm de sementes por 2, 6, 7 e 8 horas no mesmo secador. Os seguintes valores foram determinados em sementes de feijão fava cru e secas:

- valor de penetração (mm) tomadas como uma dureza standard no penetrômetro de Hoenppler com cargas de 60, 90, 100, 105, 110 e 120 N durante 1 min.;
- força de compressão [N] em um teste de máquina ZD 10.90. Medidas são repetidas 50 vezes para sementes selecionadas ao acaso as quais são comprimidas ao longo de seu eixo espesso;
- resistência à divisão, expressa como porcentagem de sementes partidas sob o esforço de determinada força com o penetrômetro de Hoenppler à temperatura ambiente usando haste cônica;
- dimensões linear, comprimento, largura e espessura com 0,02 mm de precisão para 100 sementes selecionadas aleatoriamente;
- capacidade de retenção da água durante 24 horas encharcando as sementes com amostras coletadas a cada hora;
- danos na casca de sementes através da estimativa visual na superfície das sementes investigadas, que podem ser observados na Figura. 2.7;
- danos de cotilédone usando a câmera Practica LTM 5 com a unidade para determinação do dano, conforme Figura. 2.8;
- microestrutura das sementes determinada com o microscópio eletrônico Tesla BS-300.

O número de sementes danificadas durante a secagem simples estágio depende das condições de secagem e propriedades mecânicas das sementes. Foi observado que o eixo embrionário desempenha um especial papel nos danos da semente durante a secagem. Ele trabalha como uma cunha arrebatando o cotilédone e a casca da semente.

A maior parte das sementes foram danificadas durante as primeiras 2 horas, ou seja, até que 54-65% do total da quantidade de água evaporada na secagem fosse removida. Ainda, cuidados

no tratamento de sementes durante o estágio inicial de secagem são necessários. A temperatura de secagem e o fluxo de ar não excedendo, respectivamente, 40 °C e 0,5 m/s são recomendados para conservar uma apropriada qualidade tecnológica das sementes de feijão fava.

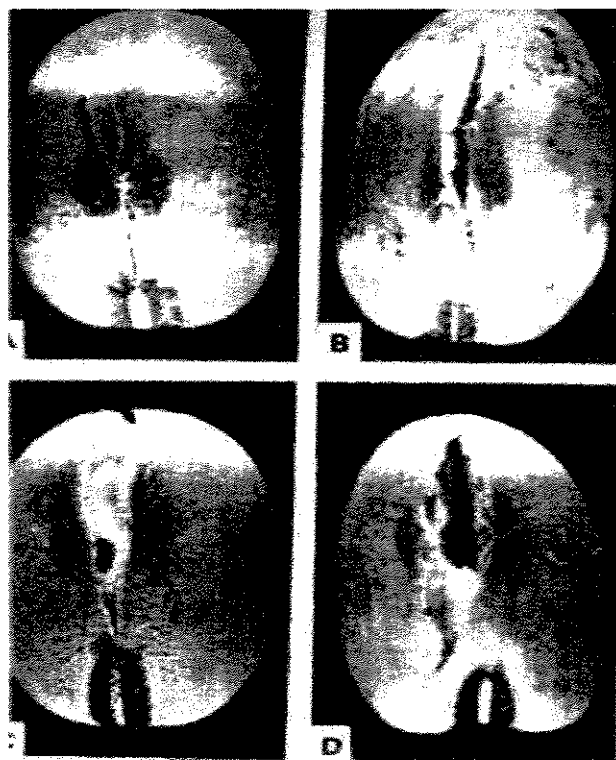


Figura 2.7 - Danos na casca de sementes de feijão
(FORNAL et al., 1993)

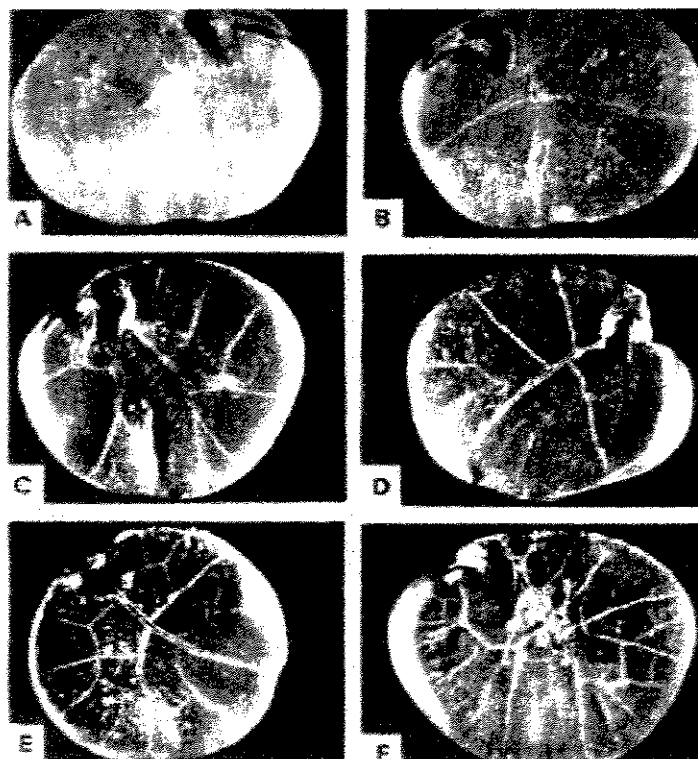


Figura 2.8 - Danos no cotilédone de sementes de feijão (FORNAL et al., 1993)

WHITE et al. (1980) realizaram pesquisa com objetivo de prover informações da variedade de soja, tipo Williams. O objetivo principal era estabelecer um entendimento mais claro das relações que existem entre vários parâmetros de secagem e o desenvolvimento da casca de semente e cotilédone danificado quando seco com ar aquecido. Com exceção de diferenças no grau de dano, as relações desenvolvidas poderiam, também, ser aplicadas a outras variedades do mesmo produto.

OVERHULTS et al. (1973) secaram soja de 20 a 33 % de umidade (base úmida) para 10 %, com temperatura de ar secante de 38 a 104 °C. Danos físicos severos na forma da casca da semente e rachaduras do cotilédone foram observados. Embora a extensão dos danos não fosse quantificada, verificou-se que foram mais pronunciados em temperaturas altas e conteúdos de umidade iniciais altos.

WALKER e BARRE (1972) realizaram testes de secagem para duas variedades de soja, com temperaturas de 32 a 66 °C e umidades relativas que variam de 20% a 60 %. Os conteúdos

de umidade iniciais eram 16 a 20 %. Observaram-se trincas consideráveis da casca da semente em feijões secos a temperaturas altas e/ou baixas umidades relativas. Houve diferenças significativas entre variedades, mas nenhuma explicação foi obtida para estas diferenças. Foram observadas pequena ou nenhuma rachadura de cascas em qualquer variedade quando a umidade relativa do ar de secagem era 40 % ou mais. O conteúdo de umidade inicial não teve nenhum efeito significativo no número de rachaduras de cascas de semente.

PFOST (1975) estudou o efeito ambiental e diferentes variedades em quebras de soja secas a temperaturas que variam de 32 a 66 °C. Foram incluídas 17 variedades de soja crescidas a 2 localizações, nestes testes. Observou-se o efeito de variedades sendo significativos ao nível 0,1%. Para uma determinada variedade, foi obtido que a umidade relativa do ar de secagem foi o fator mais significativo quanto ao nível de rachaduras da casca de sementes. Em geral, as quebras aumentaram com um aumento na temperatura do ar secante, conteúdo de umidade inicial e taxa de secagem e diminuíram com o conteúdo de umidade final aumentado e umidade relativa do ar secante. A maioria das rachaduras observadas se formaram durante os primeiros minutos de secagem.

2.5.2- Efeitos Mecânicos

A qualidade do feijão é muito afetada pelos métodos utilizados para colher e manusear. Nestas operações, o feijão é sujeitado repetidamente a muitos impactos em superfícies de metal e contra outros feijões. Impactos podem ser o resultado de bater contra o cilindro ou movimento de rotor, o movimento de baldes em elevadores verticais, descarregamento centrífugo, o recheio e o descarregamento de transportadores de parafuso, jorrando, e caindo em queda livre. Em quase todas as operações de manipulação, os grãos são acelerados e então descarregados sobre objetos estacionários ou outros grãos. A causa comum de dano encontrada em todos os estudos de manipulação de grãos é a velocidade da partícula antes de um impacto e a rigidez da superfície contra a qual o impacto acontece.

FISCUS et al. (1971) observaram velocidades de 6,7 m/s e 18,4 m/s para soja atravessando um orifício de 203 mm, caindo de 3 m e 26 m de altura, respectivamente. Verificaram que a quebra (porcentagem que passam através dos orifícios de 4 mm por 13 mm da

tela retangular) aumentou consideravelmente com o aumento da altura de queda. Por exemplo, soja a 11,0% de umidade (base úmida) e a 0 °C derrubado sobre concreto de alturas de 12 m, 22 m, e 31 m teve porcentagens de quebra de 1,7, 3,0 e 5,6, respectivamente. Os autores também quantificaram a quebra a várias temperaturas de grão e conteúdos de umidade. Em geral, a quebra aumentou com a temperatura do grão e umidades menores. Eles também mediram as velocidades de soja que descarregaram de elevadores de caneca. Com uma velocidade de correia de 0,96 m/s, a velocidade de descarga era 6,7 m/s, equivalente a uma queda de 3 m. Concluíram que a quebra em soja e milho aumentou como uma função exponencial de velocidade.

CAIN E HOLES (1977) prensaram soja variedade Williams com um dispositivo de braço rotatório a velocidades de 12,2 a 36,6 m/s. Observaram que a taxa de respiração das sementes, porcentagem de divisões e porcentagem de feijões esmagados aumentaram com o aumento da velocidade de impacto. A porcentagem de germinação diminuiu com o aumento da velocidade de impacto.

ROJANASAROJ et al. (1976) usaram um dispositivo centrífugo para prensar soja variedade Kent a 21 e 24 m/s. Antes os feijões foram secos de um conteúdo de umidade de 18% a 10% com temperaturas de ar de secagem de cerca de 24, 41, 57 e 74 °C. Amostras secas eram então reumidificadas a conteúdos de umidade de 12% e 17% antes que eles fossem prensados. Dano total, inclusive divisões, feijões rachados e rachaduras de pele aumentaram com o aumento das temperaturas do ar de secagem. Dano total também aumentou com o aumento da velocidade de impacto e com a diminuição do conteúdo de umidade.

BARTSCH (1979) prensou duas variedades de soja a velocidades de 5, 10 e 15 m/s para cinco orientações do produto. Observou que soja prensados perto da radícula tiveram a maior redução em índice de vigor de tetrazólio; aumentos significativos em danos descoberto por testes de tetrazólio, ocorreram com o aumento da velocidade de impacto acima de 10 m/s.

COOKE e DICKENS (1971) construíram uma máquina centrífuga para prensar sementes e apresentaram uma análise matemática de suas características de desempenho. Observaram que a velocidade de descarga para partículas esféricas como soja com fricção desprezível, era igual a 2,5 vezes a velocidade do tubo giratório e que o ângulo de descarga aproximado é de 45 ° à frente do ponto de descarga.

Informações adicionais, que relacionam os efeitos da velocidade de impacto em dano de semente de soja, como porcentagens de bons, divisões, suscetibilidade de quebra, rachadura da casca da semente, germinação e variação da umidade, foram usadas para ajudar a prever as perdas de qualidade devido a colheita e manuseio (PAULSEN et al., 1981).

O feijão é suscetível a danos mecânicos e o desenvolvimento de resistência a dano mecânico (*RDM*) foi um dos objetivos do programa desenvolvido por TAYLOR e BOURNE (1995). Duas linhas isogênicas próximas, NY537-Dark e NY537-White diferem só com respeito ao gene *p*, para a cor de casca da semente, e foi selecionado para melhorar a resistência de dano mecânico deles.

Suscetibilidade para danos mecânicos foi associada com a cor, genética e morfologia das sementes. O cultivo mais resistente é o de colorido mais escuro, e o mais suscetível são sementes brancas (ATKIN, 1958; KANNENBERG e ALLARD, 1964; DICKSON e BOETTGER, 1976). ATKIN (1958) observou que o cultivo resistente para dano mecânico teve grande aderência da casca das sementes aos cotilédones, comparado a cultivos suscetíveis. DUCZMAL (1981) atribuiu a *RDM* em feijões ao grau de adesão do embrião à casca da semente e a ligação do cotilédone ao eixo do embrião.

O conteúdo de umidade de sementes geralmente é considerado um fator principal que determina suscetibilidade para *RDM*. BILANSKI (1966) postulou que o conteúdo de umidade influencia na quantidade de energia necessária para causar danos em soja, e que, a energia exigida para causar esses danos, aumenta com o acréscimo do conteúdo de umidade, visto que, as sementes são mais plásticas a níveis de umidade mais altos. HOKI e PICKET (1973) verificaram que sementes de feijão com umidade de 10% ou abaixo, tiveram um espaço maior entre os cotilédones que sementes a umidades mais altas, o que aumentou a suscetibilidade para danos. WIJANDI e COPELAND (1974) verificaram que o nível de dano em sementes de feijão diminuiu com umidades abaixo de 15%.

A casca da semente providencia uma barreira física que cerca o embrião e a sua composição pode afetar a integridade da semente. Cascas de sementes de feijão são ricas em polissacarídeos estruturais como celulose e hemicelulose (77%) e contém pouca proteína (5%) e pectina (14%) (PENA-VALDIVIA e ORTEGA-DELGADO, 1986). Estes resultados foram

também obtidos por SRISUMA et al. (1991), que concluíram que as paredes das células da casca do feijão são ricas em polissacarídeo celulose estrutural (58 a 65%) e têm pouca lignina (1,4 a 1,9%). Lignina é uma combinação fenólica encontrada em cascas de semente e aumenta a rigidez e coesão das paredes da célula (ANDERSON e BEARDALL, 1991). SRISUMA et al. (1991) também concluíram que a celulose e o conteúdo de lignina da parede de célula contribuem para a força da casca da semente que apoia sua função biológica, consequentemente como um tecido protetor.

O teste de queda foi usado para examinar cultivos e estudar problemas de danos mecânicos em sementes de feijão (DICKSON e BOETTGER, 1976). O objetivo do estudo era usar a técnica acima para comparar as duas linhas isogênicas com um cultivo comercial a níveis diferentes de atividade de água, determinar a quantidade de dano que cada genótipo pode sustentar e ainda poder prover germinação aceitável. A conclusão foi que o conteúdo de umidade da semente foi o maior fator responsável para o grau de suscetibilidade a dano mecânico, enquanto foram medidas, para cada atividade de água, as diferenças genotípicas testadas ao dano de impacto.

DEVAHASTIN et al. (1998), baseando-se em uma técnica colorimétrica, relataram o percentual de absorbância de um corante adequado para o percentual de danos mecânicos em núcleos de grãos de trigo durante o jorro, em leito de jorro de jato rotativo, em várias condições de operação. Esse método provou ser confiável para determinar a quantificação de danos mecânicos internos. Foram avaliados os efeitos do tempo de duração do jorro, da velocidade do distribuidor rotacional e da velocidade superficial do ar, à temperatura de 57 °C e conteúdo de umidade inicial de 16,4% em base seca. Com relação ao tempo de jorro, verificou-se que a partir de 45 min o percentual de grãos danificados permaneceu estável, aumentando a partir de 120 min. Com uma maior velocidade de rotação do distribuidor, aumentou-se o percentual de danos. Também, uma maior velocidade superficial do ar na entrada, aumentou, consideravelmente, o percentual de danos.

Capítulo 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1- Material Utilizado

Alguns testes preliminares foram realizados com grãos de feijão comum da variedade “carioca”, de procedência da “Broto Legal”, safra de 1998. Inicialmente, foi dado ao feijão um tratamento como grão mas, ao ser submetido a testes como semente, este deixou a desejar, em virtude de seu poder de germinação não atingir o mínimo recomendado para esta classificação (80%). Posteriormente, foram utilizadas sementes de feijão variedade “carioca”, fornecidas pelo “IAC” (Instituto Agrônomo de Campinas), safra de 1998 e procedência de Pindorama. Os feijões foram selecionados e todas impurezas e partículas estranhas foram removidas. Para manter suas características inalteradas as sementes foram armazenadas em sacos de polietileno, em câmara fria, à temperatura média de 18 °C.

Algumas características físicas das sementes de feijão carioca “IAC”, apresentadas na Tabela 3.1, foram determinadas pelos métodos a seguir:

- Massa específica aparente (ρ_A): pesa-se um balão volumétrico de 100 mL dessecado e vazio. Coloca-se as sementes com auxílio de um funil, de forma que o escoamento seja constante e livre, sem interferências. Pesa-se o recipiente com as sementes e calcula-se a massa do material por diferença. Calcula-se a massa específica aparente em g/mL, dividindo-se a diferença das massas por 100.
- Massa específica real (ρ_R): coloca-se 150 mL de água em uma proveta graduada de 250 mL. Pesa-se 75 g de sementes de feijão colocando-a dentro da proveta. Em seguida mede-se o volume deslocado. Calcula-se a massa específica real em g/mL dividindo-se a massa das sementes pelo volume deslocado.
- Diâmetro equivalente (d_{eq}): calcula-se a massa média (m) e o volume médio (V) das sementes dividindo-se o volume deslocado no teste anterior pelo número de sementes contidas na massa de 75 g. O diâmetro equivalente das sementes é calculado usando-se este volume na expressão de cálculo do volume da esfera:

$$V = \frac{\pi \cdot d_{eq}^3}{6} \quad (3.1)$$

- Porosidade do leito fixo (ε): a porosidade do material pode ser determinada pela relação:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_R} \right) \cdot 100 \quad (3.2)$$

- Esfericidade (ϕ): Projeta-se, usando-se retroprojektor, 20 sementes de feijão e sobre a projeção do contorno das partículas traça-se um círculo inscrito e outro circunscrito. Calcula-se a esfericidade pela média das razões de diâmetros dos círculos (PEÇANHA e MASSARANI, 1986):

$$\phi = \frac{d_{IN}}{d_{CR}} \quad (3.3)$$

Tabela 3.1 - Propriedades físicas do feijão

<i>Xo</i>	ρ_A (g/mL)	ρ_R (g/mL)	<i>m</i> (g)	d_{eq} (cm)	ε (%)	ϕ
13,8	0,82	1,28	0,1785	0,64	35,59	0,62
9,3	0,83	1,28	0,1736	0,64	34,81	0,62

3.2- Equipamento Experimental

O equipamento básico utilizado está esquematizado na Figura 3.1 e consiste em soprador (1), aquecedor (2) e resfriador (3) de ar, tubulações e válvula globo para regulagem da vazão de ar (4), tomada (5) e transdutor (10) de pressão estática, placa de orifício (6) com tomada e transdutor (11) de pressão diferencial para medir a velocidade do ar, um leito cone-cilíndrico de acrílico (8) com placa distribuidora (7), medidor da temperatura do ar (9) com termopar, todos acoplados a um sistema de aquisição de dados (12) e um computador (13) para o processamento dos dados obtidos. A Figura 3.2 exibe uma fotografia geral do equipamento e seus acessórios.

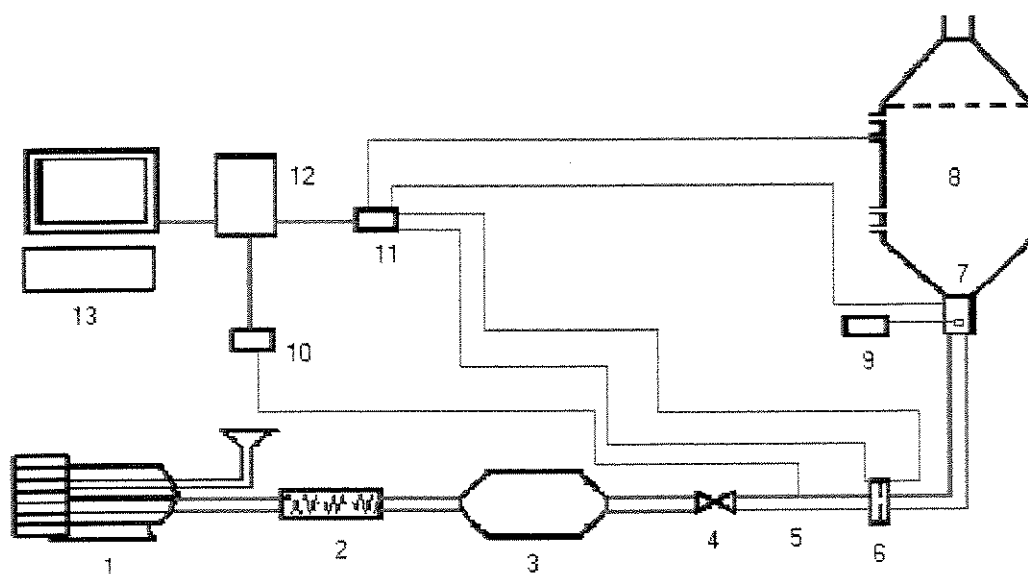


Figura 3.1 - Esquema do equipamento experimental

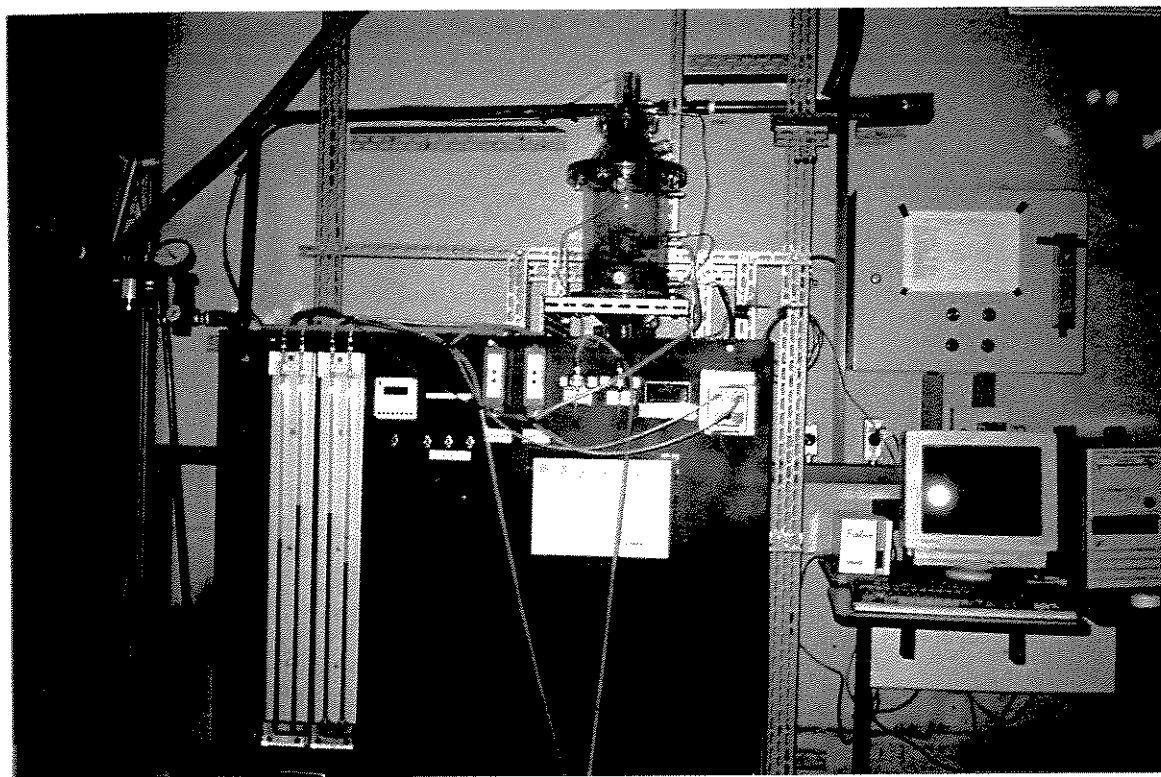


Figura 3.2 - Fotografia do equipamento

Para a aquisição dos dados de queda de pressão no leito particulado e velocidade do ar, utilizou-se o programa “Labtech” versão 9.0, que permite medidas de pressão com transdutores absoluto e diferencial, além de leitura e interpretação dos sinais enviados, realização de operações matemáticas e gerenciamento de arquivos. A temperatura de entrada do ar no leito foi medida com termopar cobre-constantan.

As dimensões do leito cone-cilíndrico, mostradas na Figura 3.3 são: altura do cone 13 cm, altura do cilindro 30 cm, diâmetro do cilindro 20 cm, diâmetro da entrada de ar 5 cm. O leito foi utilizado com os ângulos de inclinação do cone de 60° e 45° , bastando para isso, inverter sua posição. As dimensões do leito estão de acordo com as especificadas na literatura para obter uma adequada circulação de sólidos e evitar zonas mortas. As dimensões utilizadas favorecem o estabelecimento de jorro estável para partículas do grupo “D” de GELDART, 1986. A relação entre os diâmetros do orifício e do cilindro $D_i / D_c = 0,25$, abaixo portanto do limite crítico de 0,33 estabelecido pela literatura.. A Figura 3.4 apresenta uma fotografia do leito de jorro com uma carga de sementes de feijão.

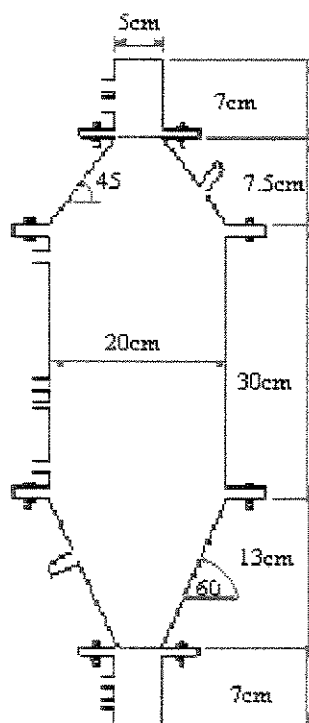


Figura 3.3 - Dimensões do leito cone - cilíndrico

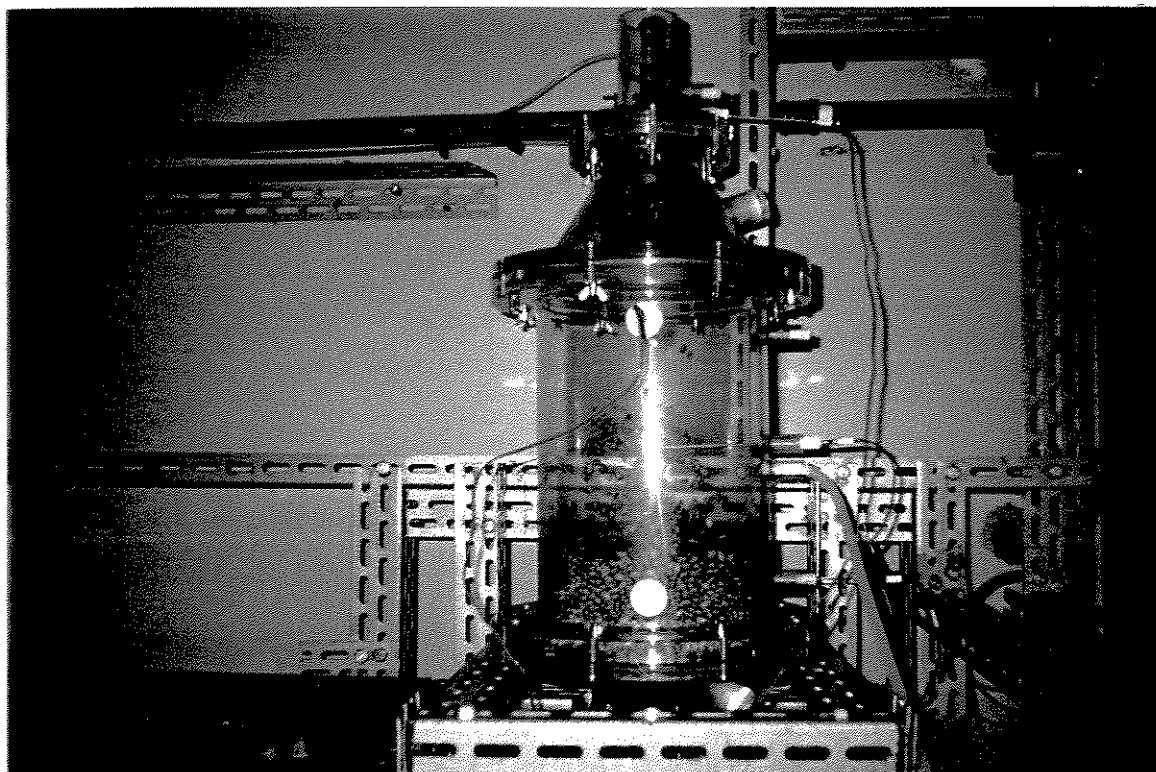


Figura 3.4 - Fotografia do leito cone - cilíndrico

3.3- Procedimento Experimental

A carga de feijão utilizada no leito foi definida por testes preliminares e chegou-se ao valor ótimo de 3.000 g. Para o ângulo de inclinação de 45° , a altura de partículas atingiu 15,0 cm, sendo 7,5 cm na parte cônica e 7,5 cm na parte cilíndrica; com ângulo de 60° uma altura de 19,0 cm foi distribuída em 13,0 cm no cone e 6,0 cm no cilindro. Essa carga forneceu altura inferior à altura máxima de jorro estável para as duas geometrias estudadas (45° e 60° de ângulo do cone). Dessa maneira, foi possível operar o leito em regime de jorro estável.

A temperatura de operação para o ar foi definida em torno de 30°C nos testes de avaliação de danos mecânicos, valor este estabelecido por ser próximo à temperatura ambiente e estar dentro dos limites operacionais do resfriador de ar. Para obtenção de sementes com conteúdo de umidade inferior ao original, foram realizados testes de secagem a 60°C . A secagem das

sementes foi realizada a 60 °C para evitar danos térmicos e em leito fixo para garantir que não ocorram danos devido a atrito. Como a compressão do ar aquece o mesmo a temperaturas superiores a 60 °C, foi utilizado um resfriador que opera com água fria para atingir os 30 °C. Nos experimentos de secagem um aquecedor operando com resistências elétricas e reostato eleva a temperatura do ar ao valor desejado.

Para a medida da vazão mássica de ar na tubulação, utilizou-se de medidas de pressão estática na linha e queda de pressão em uma placa de orifício. Estas medidas, obtidas através de transdutores, e da temperatura do ar medida por termopar, permitiram o cálculo da vazão (em kg/min) pela expressão (OWER e PANKHURST, 1977):

$$Q = 13,4255 \left(\frac{\Delta P}{T + 273,15} \right)^{0,5} - \left[\frac{5,1781}{P} \frac{(\Delta P)^{1,5}}{(T + 273,15)^{0,5}} \right] \quad (3.4)$$

Para satisfazer o planejamento experimental em dois níveis, foram utilizados os mesmos valores (níveis inferior e superior) de vazão de ar nas duas geometrias de leito. As vazões de ar a serem utilizadas na entrada do leito foram definidas como sendo um valor pouco acima da vazão de jorro mínimo estável e outro valor superior, mas que não promovesse o arraste das partículas. Para isso foram traçados os diagramas queda de pressão no leito versus vazão de ar para os leitos de inclinação 45 ° (Figura 3.5) e 60 ° (Figura 3.6). Os valores de vazão, observando-se os gráficos, foram definidos em 2,2 e 2,5 kg/min, em ambos os leitos.

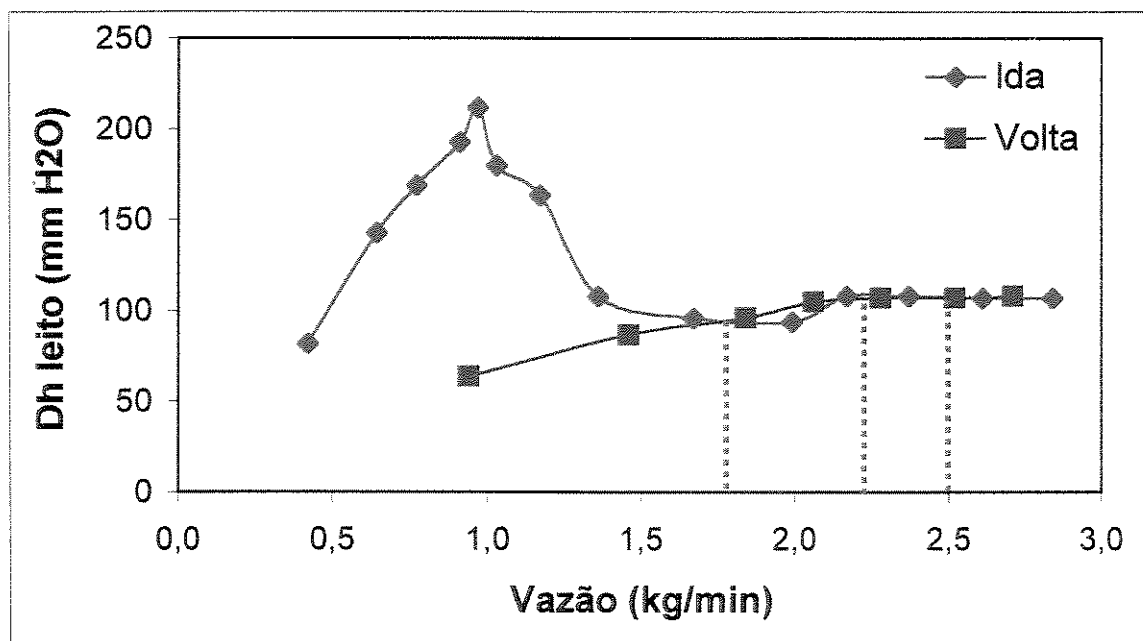


Figura 3.5 – Gráfico queda de pressão versus vazão de ar em leito de jorro 45 °

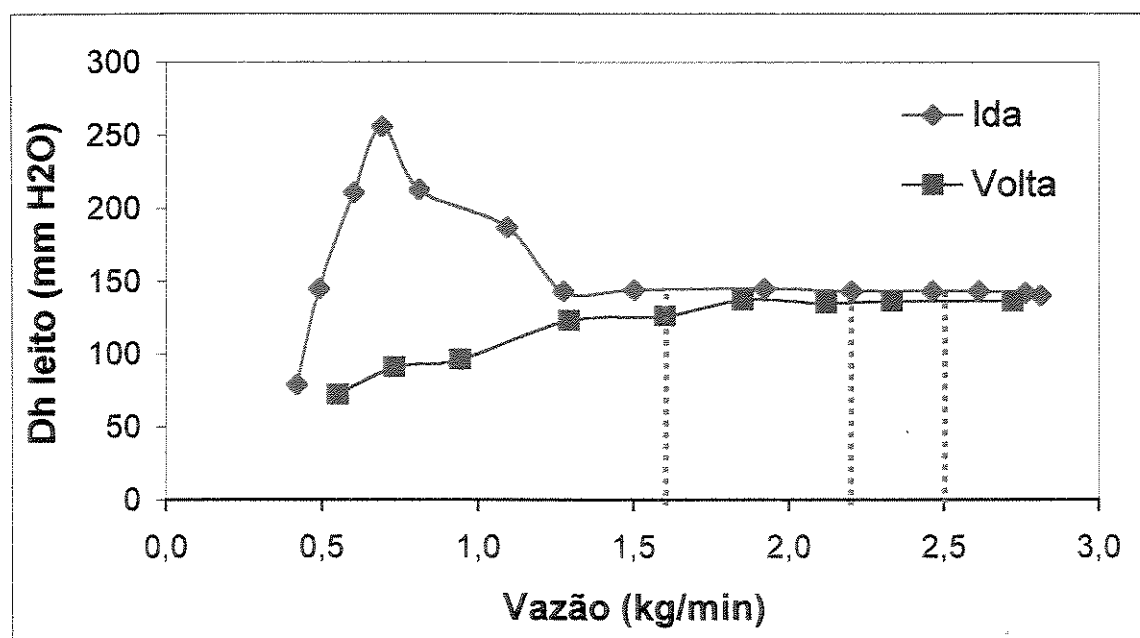


Figura 3.6 – Gráfico queda de pressão versus vazão de ar em leito de jorro 60 °

3.4- Planejamento Experimental

Para o presente estudo foi proposto um planejamento experimental fatorial 2^4 , que totalizou 16 experimentos, além das confirmações e dos experimentos preliminares. As variáveis independentes, cujos efeitos nos danos mecânicos foram investigados são: vazão de ar, geometria do leito através do ângulo de inclinação do cone, tempo de exposição ao jorro e conteúdo de umidade inicial das sementes. Uma maior vazão de ar promove um maior atrito gás-partícula entre as sementes, devido a um aumento na taxa de circulação no leito. O aumento da taxa de circulação para vazões maiores também proporcionará aumento nas interações partícula – partícula e partícula - parede. Além disso, a região de jorro é fluidodinamicamente semelhante ao transporte pneumático, onde as partículas são fortemente aceleradas pelo gás, ocorrendo um aumento do atrito nessa região para maiores velocidades do ar. Assim, o resultado esperado é um aumento nas fissuras e diminuição na germinação para os valores maiores da vazão de ar. Com relação ao tempo de exposição ao jorro, espera-se que seja diretamente proporcional aos danos. Um ângulo de inclinação maior, também promove uma maior taxa de circulação das partículas no leito e deve levar a maior possibilidade de danos. A literatura também prevê diferentes comportamentos em relação ao atrito para partículas com diferentes teores de umidade. Dessa forma, as considerações citadas definiram os critérios para a escolha das variáveis de processos estudados. Os valores superior e inferior de tempo de exposição foram definidos por serem usados, freqüentemente, em trabalhos de secagem, em escala laboratorial, citados na literatura (LIMA, 1995). Os conteúdos de umidade foram definidos como o valor máximo definido para comercialização (13,8%) e um valor mínimo aceitável para armazenamento (9,3%). Os ângulos de inclinação de cone entre 45 ° e 60 ° são indicados na literatura (MATHUR e EPSTEIN, 1974), pois promovem uma melhor taxa de circulação de partículas, além de proporcionar um jorro mais estável, sem zonas mortas. A Tabela 3.2 exhibe os valores superiores e inferiores das variáveis independentes reais e codificadas, utilizadas nos experimentos.

Cada carga de feijão colocada no leito cone-cilíndrico foi submetida a uma vazão de ar, à temperatura ambiente, em torno de 30 °C. Durante o jorro, o atrito gás-partícula, entre as próprias partículas e entre estas com as paredes internas do leito, podem causar danos nas sementes de feijão. As partículas, após serem retiradas do leito, foram submetidas aos testes para uma avaliação de suas qualidades como sementes, com relação aos danos mecânicos sofridos.

Foram consideradas como variáveis de resposta (dependentes), para o planejamento experimental, a capacidade de germinação, através do percentual de sementes normais, e a razão entre as porcentagens de sementes com danos, incluindo fissuras, perdas da casca ("peeling") e quebra em relação às originais. As sementes de feijão foram inicialmente submetidas a teste de germinação e teste de fissuras, as quais serviram de "testemunha", objeto de comparação com as sementes após o processo de jorro. Embora não faça parte do planejamento, para fins quantitativos, o conteúdo de umidade inicial e final de cada carga de sementes era medido em infravermelho para efeito de avaliação da perda de umidade durante o processo.

O programa "Statistica" versão 6.0 foi escolhido para avaliar os resultados com relação aos efeitos significativos, análise de variância, superfícies de respostas e obtenção de um modelo estatístico para as respostas em função das variáveis independentes. A Tabela 3.3 exibe a relação de experimentos realizados com as variáveis independentes codificadas. A ordem cronológica de realização dos experimentos foi determinada por sorteio, não coincidindo com a ordem de colocação na tabela.

Tabela 3.2 - Variáveis independentes

<i>Variáveis</i>	<i>Inferior (-1)</i>	<i>Superior (+1)</i>
Tempo de jorro (h)	1:30	3:00
Ângulo de inclinação (°)	45	60
Vazão de ar (kg/min.)	2,2	2,5
Conteúdo de umidade (%)	9,3	13,8

Tabela 3.3 – Experimentos realizados

<i>N.º. Experimento</i>	<i>\hat{A} (°)</i>	<i>t (h)</i>	<i>Q (kg/min)</i>	<i>Xo (%)</i>
01	-1	-1	-1	-1
02	+1	-1	-1	-1
03	-1	+1	-1	-1
04	+1	+1	-1	-1
05	-1	-1	+1	-1
06	+1	-1	+1	-1
07	-1	+1	+1	-1
08	+1	+1	+1	-1
09	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1

3.5 - Métodos Experimentais

3.5.1- Determinação de Danos Mecânicos (Fissuras) nas Sementes de Feijão

A quantificação das fissuras nas sementes estudadas foi realizada pelo método da imersão em hipoclorito de sódio (MARCOS FILHO et al., 1987). Coloca-se duas ou mais repetições de 100 sementes, aparentemente íntegras, por amostra em uma placa de Petri, e cobre-se com solução aquosa de hipoclorito de sódio a 5% durante 15 minutos. Em seguida, elimina-se o excesso de solução, distribui-se cada repetição sobre folhas de papel toalha e procede-se a contagem do número de sementes intumescidas (danificadas). Expressa-se os resultados em porcentagem média por amostra. A taxa de absorção de água pela semente é maior para aquelas que tenham fissuras, no entanto tempos superiores a 15 minutos podem causar intumescimento

até de sementes não danificadas. A adição à solução de azul de metileno cora as fissuras, que podem ser observadas com auxílio de uma lupa comum ou a olho nu.

Para uma melhor visualização das fissuras e perdas de parte da casca das sementes de feijão foi utilizado um microscópio óptico com câmera fotográfica polaroid e câmera de vídeo acopladas. Algumas sementes entumecidas que apresentaram danos foram colocadas no microscópio, com iluminação adequada, e submetidas a aumentos de 10 e 15 vezes. Em seguida, foram fotografadas para posterior demonstração das fissuras.

3.5.2- Determinação do Percentual de Germinação nas Sementes de Feijão

A determinação do percentual de germinação foi de acordo com as Regras para Análise de Sementes do Ministério da Agricultura (Brasil, 1992). As sementes devem ser tomadas, ao acaso, da porção semente pura obtida de uma amostra de trabalho. Devem ser colocadas em um substrato com espaçamento uniforme para minimizar a competição e contaminação entre sementes em desenvolvimento, para isso utiliza-se contadores de sementes do tipo placa perfurada com capacidade para 50. O substrato utilizado foi o papel toalha “germitest” (28 x 38 cm) embebido de 2,5 vezes sua massa com água destilada. As sementes são colocadas sobre duas folhas do papel e cobertas com mais uma, são embrulhadas na forma de rolo e colocadas em posição vertical em germinador do tipo câmara.

Uma porção de 200 sementes divididas em quatro porções de 50 em cada rolo são colocadas no germinador, onde são mantidas umidade relativa de 90%, temperatura de 25 °C e iluminação permanente. As sementes são deixadas por 5 dias e então, a sua germinação é avaliada, as sementes que não germinarem por completo retornam à câmara por mais 4 dias e sofrem nova avaliação.

Para a determinação do percentual de sementes germinadas, devem ser contadas todas aquelas que apresentarem desenvolvimento de plântulas normais ou mesmo pequenos defeitos em suas estruturas, desde que mostrem um desenvolvimento satisfatório. As plântulas anormais não mostram potencial para continuar seu desenvolvimento, podem ser dos tipos danificadas (estruturas essenciais ausentes), deformadas (desenvolvimento fraco) e deterioradas (estruturas

essenciais doentes). Algumas sementes não chegam a germinar ou seja, não desenvolvem plântulas, são classificadas como duras (não absorvem água), dormentes ou mortas.

3.5.3- Determinação do Conteúdo de Umidade das Sementes de Feijão

Para a determinação do conteúdo de umidade das sementes foi utilizado um equipamento de absorção de infravermelho com balança acoplada. Testes comparativos foram feitos com estufa, onde as sementes são colocadas durante 24 horas à temperatura de 105 °C, e demonstraram valores de conteúdo de umidade, obtidos por diferença de massa, bem próximos aos obtidos no infravermelho, com diferenças que não ultrapassaram 0,3 ponto percentual. No aparelho de infravermelho, então, é selecionada a temperatura de 105 °C e o tempo de 4 min, valores estes que foram considerados ótimos no teste comparativo com estufa. As sementes de feijão devem ser moídas em moinho manual até se transformar em pó fino. Faz-se o pré aquecimento do aparelho e tara-se a balança com um prato padrão de alumínio vazio. Toma-se uma quantidade de aproximadamente 5 g de semente moída, coloca-se no prato e aciona-se o aparelho. Ao final do tempo, faz-se a leitura do conteúdo de umidade base úmida no "display" do equipamento, repete-se o teste por mais duas vezes.

3.5.4- Secagem de Feijão em Leito Fixo

Como o lote de feijão possuía, originalmente, um conteúdo de umidade de 13,8 % e como foram planejados experimentos com um conteúdo de umidade inferior, foi necessário realizar a secagem das sementes. O processo foi realizado em leito fixo, para não provocar danos mecânicos às sementes.

O método consiste em colocar em leito cone-cilíndrico a carga de 3000 g de sementes de feijão, operando com uma vazão máxima de ar ao redor de 1,2 kg/min, mantendo fixo o leito e recirculando as partículas a cada 30 min. A temperatura do ar na entrada foi controlada para não ultrapassar o valor de 60 °C, valor este que garante um aquecimento nas sementes de até 43 °C, o que evita danos devido à temperatura (CARVALHO e NAKAGAWA, 1983). O tempo de secagem foi de 3:00 h e a umidade final obtida foi de 9,3 %. Esse valor foi considerado

satisfatório, pois apesar das sementes serem comercializadas com umidade em torno de 13% (Padrões de Sementes, Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, 1998), 9,3% está de acordo com o conteúdo de umidade de equilíbrio para umidade relativa de 40% e temperatura de 30 °C, conforme mostra a Tabela 2.3.

3.5.5- Secagem de Feijão em Leito de Jorro Cone - Cilíndrico

Após a avaliação dos danos mecânicos, quando as sementes foram submetidas ao regime de jorro à temperatura ambiente, foi realizada uma avaliação dos danos utilizando temperaturas mais altas para o ar na entrada do leito, permitindo uma avaliação conjunta de danos mecânicos e danos causados pela temperatura. Uma carga de 3000 g de sementes de feijão com umidade inicial de 12,1 % foi submetida a secagem em leito de jorro utilizando temperaturas do ar de 60 e 80 °C, obtidas com resistências elétricas. Para a escolha desses valores levou-se em consideração os resultados da primeira etapa do trabalho, ou seja, uma condição mais branda com vazão de ar e tempo de exposição inferiores e outra mais extrema com valores superiores, ambas com temperatura de 60 °C. Em um terceiro experimento utilizou-se, para as condições mais brandas de atrito mecânico, a temperatura de 80 °C, valor este considerado elevado para secagem de sementes (CARVALHO e NAKAGAWA, 1983). A Tabela 3.4 resume as condições dos experimentos realizados.

Tabela 3.4 – Secagem em leito de jorro

<i>N° Experimento</i>	<i>Â (°)</i>	<i>t (h)</i>	<i>Q (kg/min)</i>	<i>T (°C)</i>
01	60	3:00	2,5	60
02	45	1:30	2,2	60
03	45	1:30	2,2	80

3.6- Leito de Jorro Bidimensional

Um lote de sementes de feijão comum da variedade carioca, fornecido pelo "IAC" (Instituto Agrônomo de Campinas), safra de 1999, foi submetido a um leito de jorro bidimensional para uma avaliação de danos mecânicos sofridos e comparações com o leito cone - cilíndrico.

As dimensões do leito bidimensional, mostradas na Figura 3.7 são: altura da parte retangular (h) de 42 cm, largura (c) de 30 cm, espessura (d) de 4 cm, ângulo de inclinação (α) de 55° , largura da entrada de ar (a) de 4 cm e espessura da entrada de ar (b) de 4 cm. A figura 3.8 exibe uma foto do leito bidimensional. O leito, cujo material é acrílico, foi conectado ao mesmo equipamento experimental mostrado pela Figura 3.1.

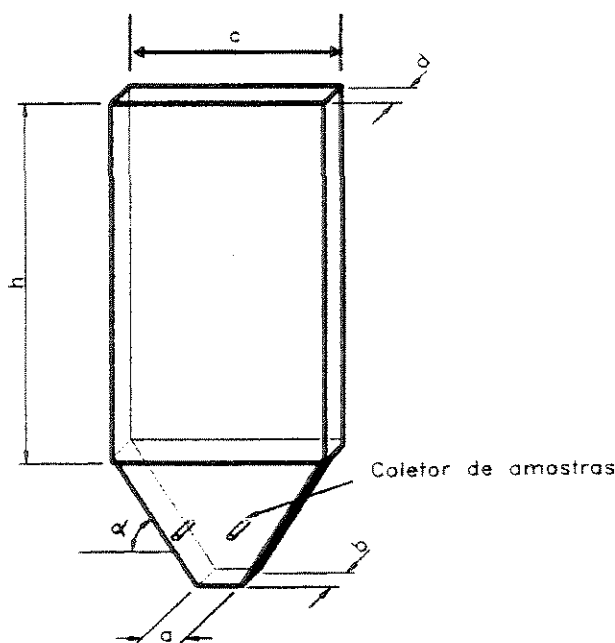


Figura 3.7 - Dimensões do leito bidimensional

Testes preliminares realizados no leito bidimensional, definiram como valor ótimo, uma carga de 1.800 g de sementes de feijão. A temperatura de operação para o ar foi novamente definida em 30°C . Os valores da vazão de ar na entrada do leito, analisando-se o gráfico vazão versus queda de pressão (Figura 3.9), ficaram em 1,8 kg/min e 2,1 kg/min. Os tempos de exposição das sementes ao jorro foram mantidos em 1:30 h e 3:00 h. O conteúdo de umidade inicial das sementes era de 12,1% e, para obter-se um segundo nível de umidade, as sementes

foram secas em leito fixo, seguindo o mesmo procedimento já descrito, até o conteúdo de umidade atingir 9,5%.

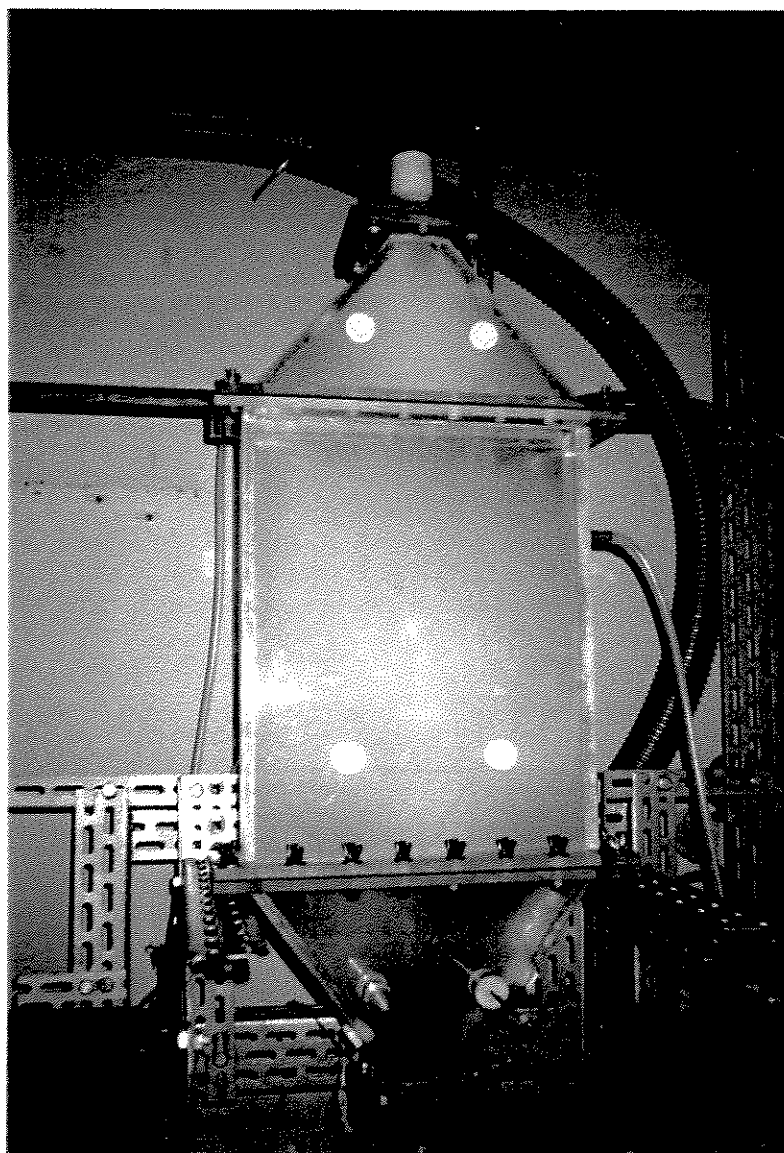


Figura 3.8 - Fotografia do leito de jorro bidimensional

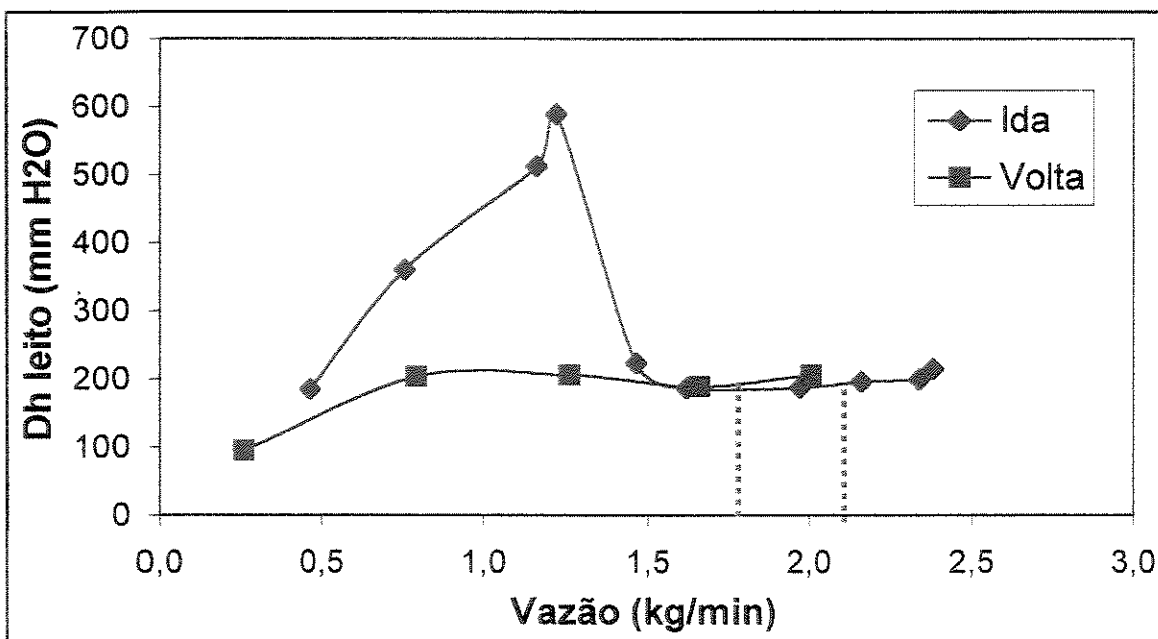


Figura 3.9 - Gráfico queda de pressão versus vazão de ar em leito de jorro bidimensional.

Para esse estudo foi proposto um planejamento experimental fatorial em dois níveis 2^3 , que totalizou 8 experimentos, além dos preliminares e confirmações. As variáveis independentes em dois níveis (Tabela 3.5), cujos efeitos nos danos mecânicos foram avaliados, são: vazão de ar, tempo de exposição ao jorro e conteúdo de umidade inicial das sementes. A Tabela 3.6 exhibe a relação de experimentos realizados com as variáveis independentes codificadas.

Tabela 3.5 - Variáveis independentes

<i>Variáveis</i>	<i>Nível Inferior (-1)</i>	<i>Nível Superior (+1)</i>
Tempo de jorro (h)	1:30	3:00
Vazão de ar (kg/min)	1,8	2,1
Conteúdo de umidade (%)	9,5	12,1

Tabela 3.6 – Experimentos realizados

<i>N.º. Exp.</i>	<i>t (h)</i>	<i>Q (kg/min)</i>	<i>Xo (%)</i>
01	-1	-1	-1
02	+1	-1	-1
03	-1	+1	-1
04	+1	+1	-1
05	-1	-1	+1
06	+1	-1	+1
07	-1	+1	+1
08	+1	+1	+1

Foram consideradas como variáveis de resposta, para o planejamento experimental, o percentual de sementes com germinação normal (GN) e a razão entre as percentagens de sementes com danos em relação às originais (RF). Os resultados foram avaliados em relação aos efeitos significativos utilizando-se o programa "Statística" versão 6.0.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1- Obtenção dos Dados Experimentais

Os dados de fissuras e germinação, obtidos com feijão de procedência da "Broto Legal", mostraram ser pouco significativos. Cargas de 3,0 kg de feijão de alta e baixa umidade (Tabela 4.1) foram submetidas a um leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 45° e temperatura do ar na entrada do leito de aproximadamente 30 °C. A umidade inicial dos grãos estava acima do máximo recomendado e testes de germinação, com amostras originais, mostraram que o percentual de sementes normais estava abaixo do mínimo recomendado de 80% (Padrões de Sementes, Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, 1988).

Tabela 4.1- Características originais dos grãos

<i>Amostra n °</i>	<i>Xo (%)</i>	<i>Fo (%)</i>	<i>GNo (%)</i>
01	14,5	20,3	63,0
02	11,5	13,0	66,5

As referidas amostras, então, não puderam ser tratadas como sementes, mas apenas como grãos. A Tabela 4.2 exhibe as variáveis independentes tempo de exposição, vazão de ar e conteúdo de umidade com as variáveis de resposta fissuras e germinação. Uma análise destes dados permitiu concluir que as fissuras dos grãos pouco variaram quando estes foram submetidos ao leito de jorro, nas diversas condições apresentadas. Com relação a germinação nada pôde ser afirmado, o que confirmou o comportamento inadequado desse lote de feijão para atingir os objetivos propostos neste trabalho, embora possa apresentar uma qualidade satisfatória para consumo.

Tabela 4.2- Resultados obtidos para os grãos submetidos a leito de jorro

<i>N ° Exp.</i>	<i>t (h)</i>	<i>Q (kg/min)</i>	<i>Xo (%)</i>	<i>GN (%)</i>	<i>F (%)</i>
01	3:00	2,5	14,5	63,0	20,5
02	1:30	2,5	11,5	63,5	22,0
03	1:30	3,0	11,5	65,5	22,5
04	3:00	3,0	14,5	68,0	23,5
05	1:30	2,5	14,5	57,5	21,7
06	3:00	3,0	11,5	56,0	27,5
07	3:00	2,5	11,5	54,0	21,5
08	1:30	3,0	14,5	56,0	21,0

Para uma avaliação eficaz dos danos causados nas sementes de feijão, foi adquirido um lote de procedência do "IAC" (Instituto Agrônômico de Campinas), safra de 1998. Para atender ao planejamento experimental, onde se previa dois níveis de conteúdo de umidade, foi feita uma secagem em leito fixo com parte das sementes. A Tabela 4.3 exhibe as características das sementes, nos dois níveis de umidade, antes de serem submetidas ao leito de jorro (testemunhas). A percentagem de fissuras para as sementes de menor conteúdo de umidade era menor, o que, provavelmente, é explicado pelo seu endurecimento e conseqüente resistência ao entumescimento em solução de hipoclorito de sódio.

Tabela 4.3- Fissuras originais das sementes

<i>Amostra n °</i>	<i>Xo(%)</i>	<i>Fo (%)</i>
01	13,8	45,3
02	9,3	26,7

4.1.1- Fissuras nas Sementes de Feijão

As sementes, então, foram submetidas ao leito de jorro, utilizando-se uma carga de 3000 g e controlando-se a temperatura do ar em 30 °C. Através do estudo da fluidodinâmica, verificou-

se, para o leito com ângulo de inclinação do cone de 45° , que a vazão de jorro mínimo estabeleceu-se em 1,8 Kg/min com uma queda de pressão de jorro estável de 108 mm H₂O, e a queda de pressão máxima atingida para esse leito foi de 212 mm H₂O. Com o leito de ângulo de inclinação 60° obteve-se uma vazão de jorro mínimo de 1,6 Kg/min, com uma queda de pressão correspondente a 139 mm H₂O, sendo a queda de pressão máxima 256 mm H₂O. As vazões de trabalho foram definidas nos valores 2,2 e 2,5 Kg/min. Essas vazões correspondem à operação do leito em jorro estável, a $Q/Q_{JM} = 1,22$ e 1,39, no caso do leito de 45° e $Q/Q_{JM} = 1,37$ e 1,56 para o leito de maior inclinação.

Os danos mecânicos foram avaliados através das fissuras, perda da casca (peeling) e quebra da semente com separação de seus cotilédones. Devido ao pequeno número de sementes com perda da casca e quebra, estas, quando ocorreram, foram incluídas no percentual de fissuras (F). Para se ter uma idéia melhor de influências nas fissuras, fez-se uma comparação com o valor original (Fo), através da razão RF, sendo $RF = F/Fo$ (Tabela 4.4).

Uma análise da fluidodinâmica do leito em relação aos ângulos de inclinação do cone, determinou que, em todas as situações, o ângulo de 60° mostrou um leito de jorro menos estável e com uma taxa de circulação de partículas maior que o ângulo de 45° . Uma avaliação das fissuras, causadas pelo atrito gás - partícula, partícula - partícula e entre partículas e paredes do leito, mostrou que o leito com ângulo de 60° provocou mais trincas, na maioria dos experimentos, estando de acordo com a verificação da fluidodinâmica.

A influência do tempo de exposição das sementes ao leito de jorro, como já era de se esperar, demonstrou que ao nível de 1:30 h, a ocorrência de fissuras é menor que ao nível de 3:00 h. Este fato foi notado na totalidade dos experimentos.

A vazão de ar no nível superior de 2,5 Kg/min, provocou uma maior ocorrência de fissuras nas sementes, na maioria dos experimentos. No entanto, notou-se que em alguns casos, esta situação foi revertida ou atenuada. Isto foi observado nos experimentos onde foram utilizadas sementes com o conteúdo de umidade maior.

Tabela 4.4 – Fissuras em sementes de feijão submetidas ao leito de jorro

<i>N.º Exp.</i>	<i>Á (°)</i>	<i>t (h)</i>	<i>Q (kg/min)</i>	<i>Xo (%)</i>	<i>F (%)</i>	<i>RF</i>
01	45	1:30	2,2	9,3	40,5	1,51
02	60	1:30	2,2	9,3	35,2	1,32
03	45	3:00	2,2	9,3	46,3	1,73
04	60	3:00	2,2	9,3	48,0	1,80
05	45	1:30	2,5	9,3	46,0	1,72
06	60	1:30	2,5	9,3	51,7	1,94
07	45	3:00	2,5	9,3	53,5	2,00
08	60	3:00	2,5	9,3	56,5	2,12
09	45	1:30	2,2	13,8	52,2	1,15
10	60	1:30	2,2	13,8	53,5	1,18
11	45	3:00	2,2	13,8	60,0	1,32
12	60	3:00	2,2	13,8	61,8	1,36
13	45	1:30	2,5	13,8	55,0	1,21
14	60	1:30	2,5	13,8	49,5	1,09
15	45	3:00	2,5	13,8	55,2	1,22
16	60	3:00	2,5	13,8	61,7	1,36

As sementes com o conteúdo de umidade inicial de 13,8% apresentaram um percentual de fissuras inicial elevado, no entanto, ao serem submetidas ao leito de jorro, não foi verificado, analisando-se as razões de fissuras, um aumento tão pronunciado. As sementes que foram secas apresentando um conteúdo de umidade inicial de 9,3% e um percentual de fissuras relativamente baixo mas, ao serem expostas ao leito de jorro, comprovou-se que sementes muito secas estão mais sujeitas a fissuras por atrito mecânico. As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram os comportamentos verificados nos experimentos, da razão de fissuras, em função das variáveis de processo estudadas, para os dois níveis de umidade das sementes.

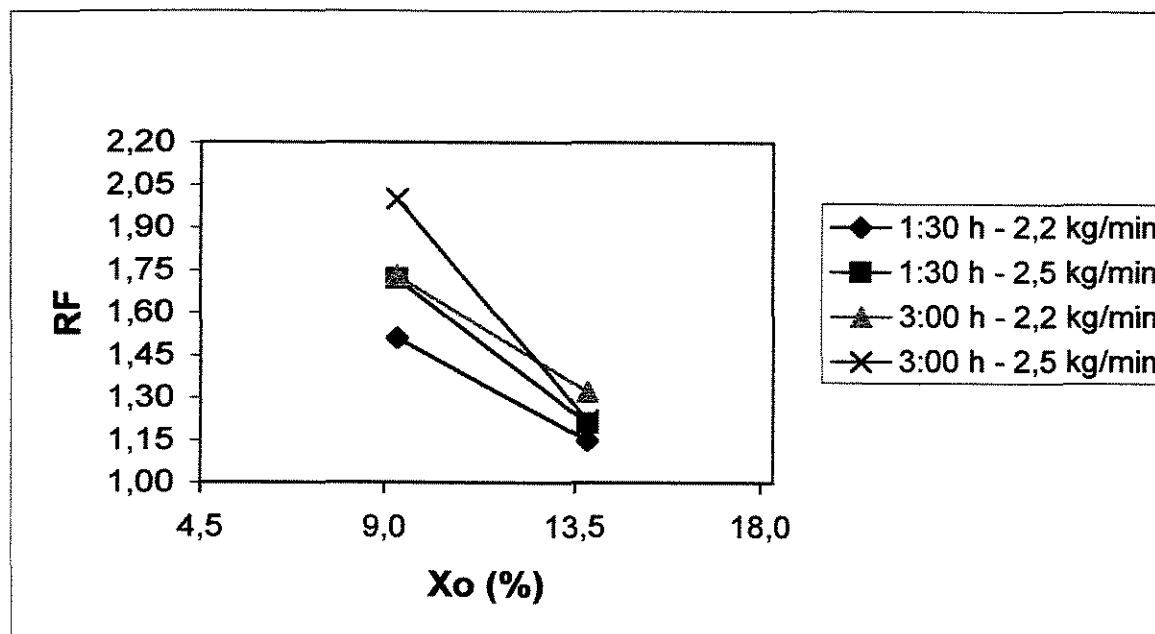


Figura 4.1 – Razão de fissuras em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 45 °.

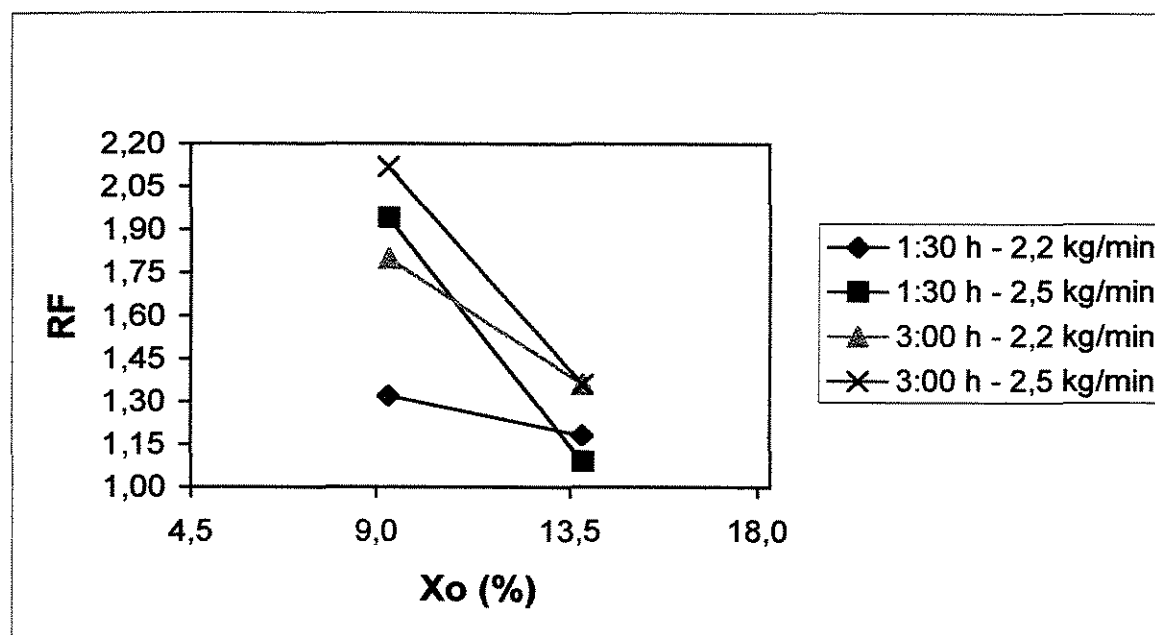


Figura 4.2 – Razão de fissuras em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 60 °.

Após serem expostas a leito de jorro com a temperatura do ar controlada a 30 °C, as sementes, com o conteúdo de umidade de 13,8% não demonstraram uma perda significativa de

sua umidade. Isto comprova que temperaturas nesse nível não são suficientes para secar grãos ou sementes. No entanto, ao serem analisadas as sementes com conteúdo de umidade de 9,3%, verificou-se que houve um pequeno aumento em sua umidade (Tabela 4.5). Este fato ocorreu, provavelmente, porque as sementes com conteúdo de umidade muito baixo acabam absorvendo um pouco da umidade do ar, principalmente quando os experimentos são realizados em dias com umidade relativa do ar mais elevada.

Tabela 4.5 – Alteração no conteúdo de umidade das sementes.

<i>N.º Exp.</i>	<i>X₀ (%)</i>	<i>X (%)</i>
01	9,3	9,5
02	9,3	9,7
03	9,3	9,6
04	9,3	9,7
05	9,3	9,5
06	9,3	9,6
07	9,3	9,6
08	9,3	9,6
09	13,8	13,1
10	13,8	12,1
11	13,8	12,5
12	13,8	13,0
13	13,8	12,9
14	13,8	11,8
15	13,8	12,8
16	13,8	12,9

4.1.2- Germinação das Sementes de Feijão

Testes de germinação foram feitos com as sementes de feijão expostas ao leito de jorro, referente aos mesmos experimentos em que se avaliou os danos mecânicos. A Tabela 4.6 exhibe a

germinação normal, danificadas e mortas, da amostra inicial dessas sementes. Os resultados dos testes de germinação, após serem submetidas ao leito de jorro, em normais, danificadas ou mortas são mostrados na Tabela 4.7. Não foi verificado, em nenhum caso, a ocorrência de sementes infeccionadas.

Tabela 4.6 – Germinação das sementes sem tratamento

<i>Amostra n °</i>	<i>Xo (%)</i>	<i>GNo (%)</i>	<i>GDo (%)</i>	<i>GMo (%)</i>
01	13,8	86,7	7,0	6,3
02	9,3	85,0	7,7	7,3

Tabela 4.7 – Germinação de sementes de feijão expostas ao leito de jorro

<i>N °. Exp.</i>	<i>Â (°)</i>	<i>t (h)</i>	<i>Q (kg/min)</i>	<i>Xo (%)</i>	<i>GN (%)</i>	<i>GD (%)</i>	<i>GM (%)</i>
01	45	1:30	2,2	9,3	86,5	6,5	7,0
02	60	1:30	2,2	9,3	85,5	6,0	8,5
03	45	3:00	2,2	9,3	86,5	4,0	9,5
04	60	3:00	2,2	9,3	87,5	5,5	7,0
05	45	1:30	2,5	9,3	80,5	11,5	8,0
06	60	1:30	2,5	9,3	88,0	2,5	9,5
07	45	3:00	2,5	9,3	81,5	7,5	11,0
08	60	3:00	2,5	9,3	92,0	2,5	5,5
09	45	1:30	2,2	13,8	86,0	7,0	7,0
10	60	1:30	2,2	13,8	88,5	5,0	6,5
11	45	3:00	2,2	13,8	89,5	5,0	5,5
12	60	3:00	2,2	13,8	88,0	4,0	8,0
13	45	1:30	2,5	13,8	88,0	7,0	5,0
14	60	1:30	2,5	13,8	85,0	5,5	9,5
15	45	3:00	2,5	13,8	86,5	7,5	6,0
16	60	3:00	2,5	13,8	90,5	3,5	6,0

A análise dos resultados dos testes de germinação mostrou que nenhuma das variáveis independentes influenciou, significativamente, no percentual de sementes germinadas, consideradas normais (GN). Mesmo as condições mais severas como ângulo de inclinação de 60 °, vazão de 2,5 kg/min e o tempo de exposição de 3:00 h, não afetaram a germinação das sementes. Na maioria dos experimentos, as sementes com conteúdo de umidade 9,3 % exibiram um poder germinativo um pouco inferior às aquelas com umidade de 13,8 %. Com relação às sementes danificadas e as sementes mortas, também, não houve influência significativa, e os valores apenas oscilaram nos experimentos realizados.

Uma análise das tendências, exibida pela Figuras 4.3, demonstra que para leito com ângulo de inclinação de 45 ° as sementes com conteúdo de umidade mais elevado apresentaram um percentual de germinação superior. Já com o ângulo de 60° (Figura 4.4), não foi verificada nenhuma tendência na totalidade dos experimentos. Verifica-se, também, que embora fosse esperado que um tempo de exposição maior e uma vazão de ar mais elevada causasse maior queda na germinação, esse resultado não foi verificado em todos os experimentos. Utilizando a variável diferença de germinação normal, $DGN = GN - GNo$, uma vez que os valores iniciais de germinação são diferentes para os dois conteúdos de umidade, obtém-se as Figuras 4.5 e 4.6, onde verifica-se a não influência do leito de jorro na germinação das sementes de feijão, para os dois ângulos de inclinação.

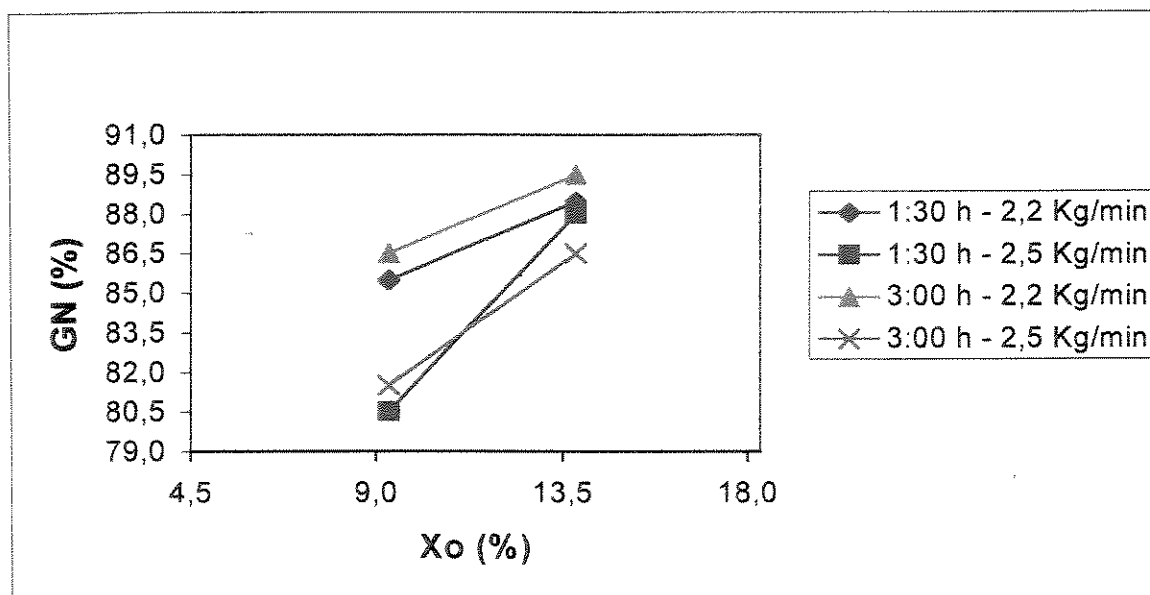


Figura 4.3 – Germinação normal em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 45 °.

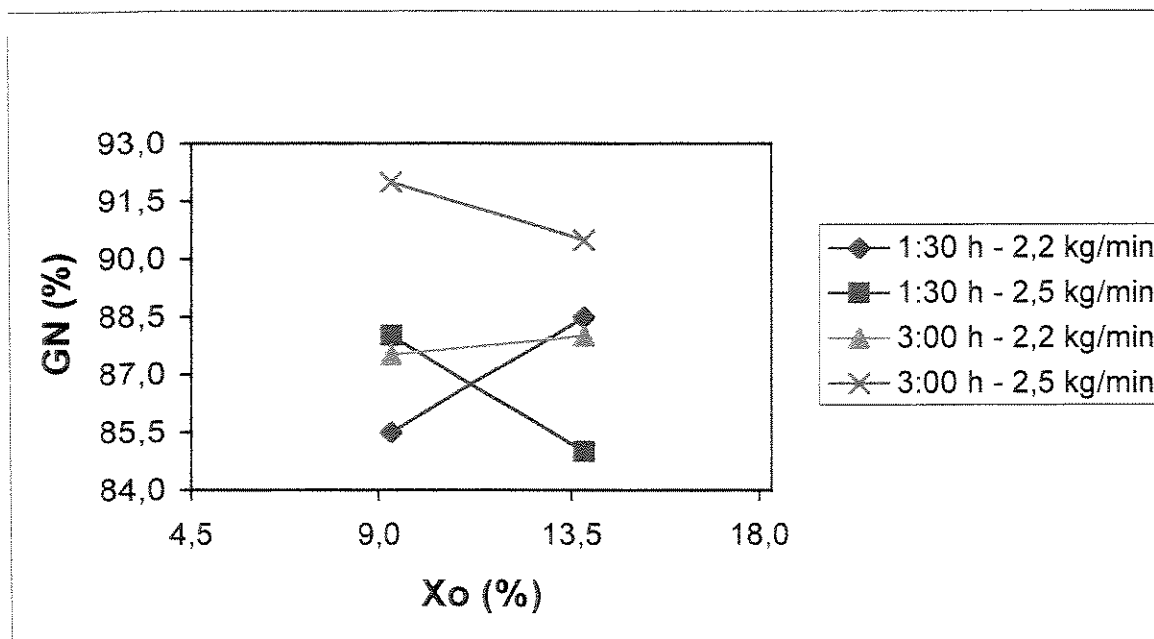


Figura 4.4 – Germinação normal em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 60 °.

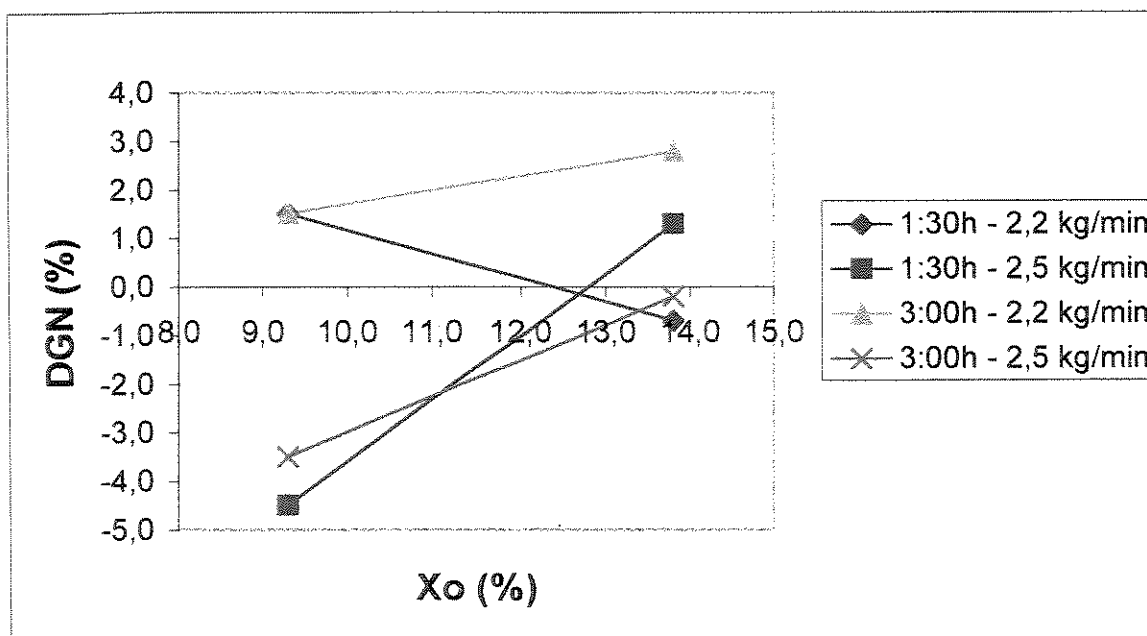


Figura 4.5 - Diferença de germinação normal em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 45 °.

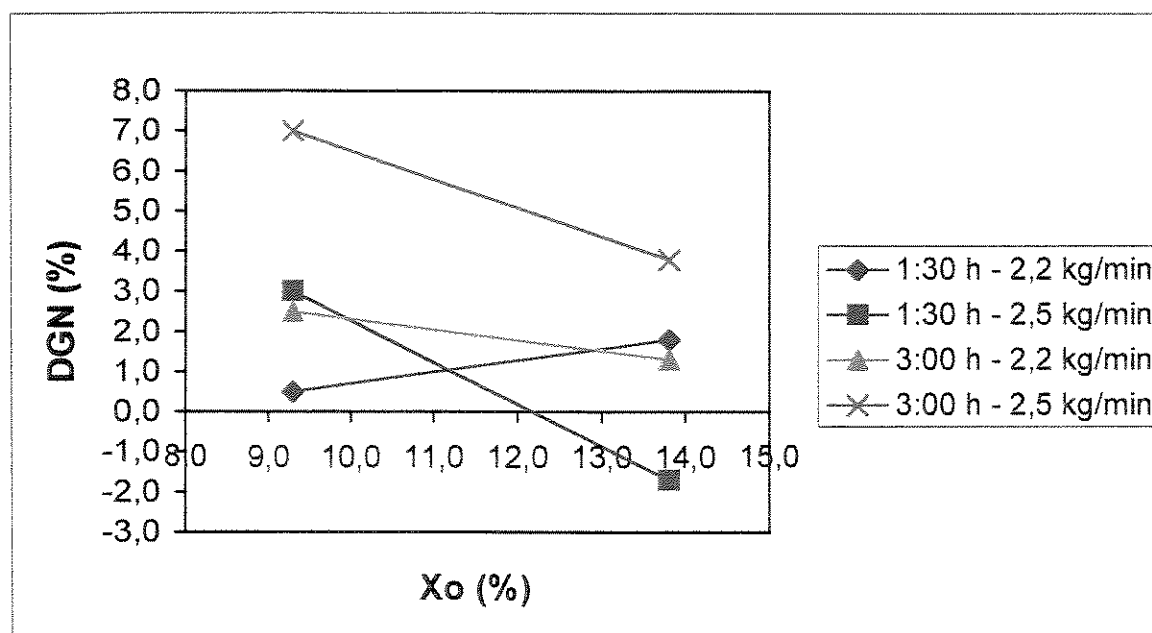


Figura 4.6 - Diferença de germinação normal em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro com ângulo de inclinação do cone de 60 °.

Uma análise comparativa entre o percentual de sementes germinadas normais (GN) e o percentual de fissuras (F) conforme exibido pela Figura 4.7, mostrou que não existe uma relação importante entre essas duas variáveis. No entanto, em alguns dos experimentos, as sementes com maior percentual de fissuras apresentaram um poder germinativo maior, como é o caso dos experimentos números 8, 11, 12 e 16.

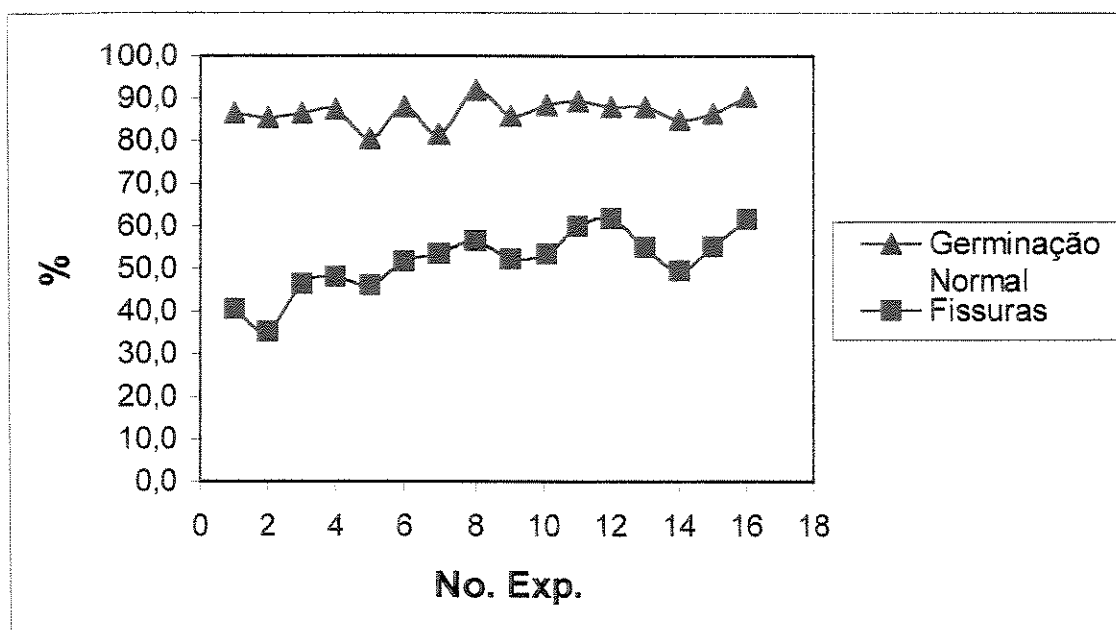


Figura 4.7 – Gráfico percentual de fissuras e germinação normal para sementes de feijão em leito de jorro.

4.1.3- Danos em Sementes de Feijão por Atrito Mecânico e Temperatura

Um segundo lote de sementes de feijão da variedade carioca "IAC" safra 1999, cujas características originais estão na Tabela 4.8, foi submetido ao leito de jorro com ângulos de inclinação do cone de 45 e 60 °, vazões de ar de 2,2 e 2,5 kg/min, tempos de exposição de 1:30 e 3:00 h e temperatura do ar na entrada de 60 e 80 °C. Foram feitos, então, testes de fissuras (Tabela 4.9) e testes de germinação (Tabela 4.10) com as amostras recolhidas.

Tabela 4.8 – Características originais das sementes de feijão

<i>Xo</i> (%)	<i>Fo</i> (%)	<i>GNo</i> (%)	<i>GDo</i> (%)	<i>GMo</i> (%)
12,1	33,5	72,0	8,0	20,0

Utilizando-se temperatura do ar de 60 °C, o experimento n.º. 01 representou as condições mais drásticas do que as verificadas nos experimentos realizados a 30 °C, e o experimento n.º. 2, as condições mais brandas. Analisando-se as fissuras (Tabela 4.9), notou-se que estas ocorreram

com maior intensidade no primeiro caso, como já era de se esperar. Mantendo-se os níveis inferiores de ângulo de inclinação, tempo e vazão de ar, mas operando o leito com temperatura do ar de 80 °C, considerada alta para secagem de sementes, verificou-se que o percentual de fissuras não foi elevado. Como verificado em alguns casos anteriores, é provável que devido às sementes ficarem com seu conteúdo de umidade muito baixo, (Tabela 4.11) ofereceram maior resistência ao entumescimento nos testes de fissura.

Comparações com os percentuais de fissuras do primeiro lote de sementes cuja temperatura do ar foi controlada a 30 °C, mostrou que o fato de se utilizar uma temperatura maior (60 °C), não causou um aumento nas fissuras das sementes. Isso demonstra que o atrito mecânico é o maior responsável por fissuras.

Tabela 4.9 – Fissuras em sementes expostas ao leito de jorro

<i>N.º Exp.</i>	<i>Â (°)</i>	<i>t (h)</i>	<i>Q (kg/min)</i>	<i>T (°C)</i>	<i>F (%)</i>	<i>RF</i>
01	60	3:00	2,5	60	44,0	1,31
02	45	1:30	2,2	60	37,0	1,10
03	45	1:30	2,2	80	38,5	1,15

Uma avaliação do percentual de sementes com germinação normal (Tabela 4.10), demonstrou que nas condições mais brandas do experimento n.º 02, houve uma queda muito pequena no poder germinativo, enquanto que no experimento n.º. 01, devido às condições mais extremas das variáveis independentes, verificou-se uma diminuição significativa na germinação. No experimento n.º. 03, a temperatura do ar mantida a 80 °C, provocou uma queda acentuada no poder germinativo das sementes, mostrando, mais uma vez, que esta temperatura é inadequada para a secagem de sementes e que a temperatura influenciou mais a germinação que o atrito mecânico.

Tabela 4.10 – Germinação em sementes expostas ao leito de jorro

<i>N.º. Exp.</i>	$\hat{A} (^{\circ})$	<i>t (h)</i>	<i>Q (kg/min)</i>	<i>T (°C)</i>	<i>GN (%)</i>	<i>GD (%)</i>	<i>GM (%)</i>
01	60	3:00	2,5	60	61,5	10,0	28,5
02	45	1:30	2,2	60	69,5	7,0	23,5
03	45	1:30	2,2	80	55,5	10,5	34,0

Tabela 4.11 – Comparação entre os conteúdos de umidade.

<i>N.º. Exp.</i>	<i>Xo (%)</i>	<i>X (%)</i>
01	12,1	9,0
02	12,1	9,8
03	12,1	8,1

Uma comparação entre os testes de fissuras feitos à temperatura ambiente de 30 °C com o primeiro lote de sementes, e à temperatura de 60 °C e 80 °C com o segundo lote, está demonstrada na Figura 4.8. As razões de fissuras (RF) ocorreram com maior intensidade nas sementes submetidas a leito de jorro com temperatura do ar de 30 °C ou 80 °C do que 60 °C. As condições de operação mais drásticas como tempo de exposição de 3:00 h, vazão de 2,5 Kg/min e ângulo de inclinação de 60 °, provocaram mais fissuras, para as duas temperaturas utilizadas.

Embora as sementes fossem do mesmo tipo, os lotes diferentes forneceram percentuais de germinação normal iniciais (GNo) diferentes, 86,7 % e 72,0 %, respectivamente. Operando-se com a temperatura de 30 °C, verificou-se que não houve praticamente alterações na diferença de germinação normal (DGN). Para a temperatura do ar de 60 °C, no entanto, ocorreu queda na germinação, a 80 °C, então, a queda foi mais acentuada (Figura 4.9). Embora o número de experimentos realizados com temperatura elevada tenha sido pequeno, pôde-se verificar que a influência da temperatura na queda do poder de germinação das sementes foi maior que o atrito mecânico no leito de jorro.

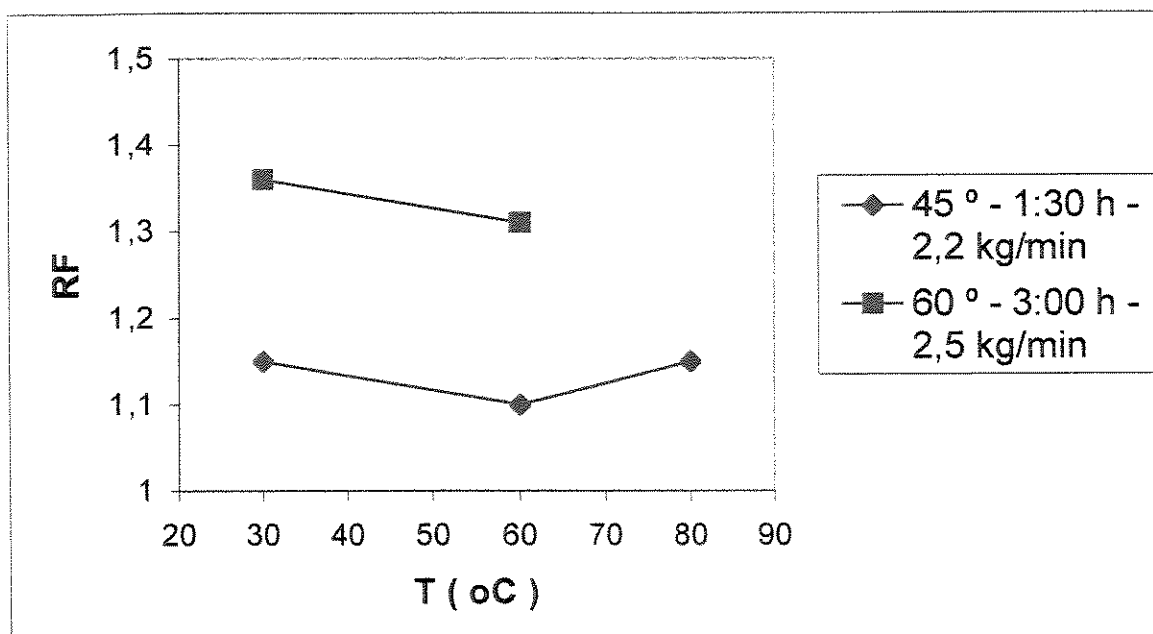


Figura 4.8 – Gráfico razão de fissuras para sementes de feijão em leito de jorro nas temperaturas de 30 °C , 60 °C e 80 °C.

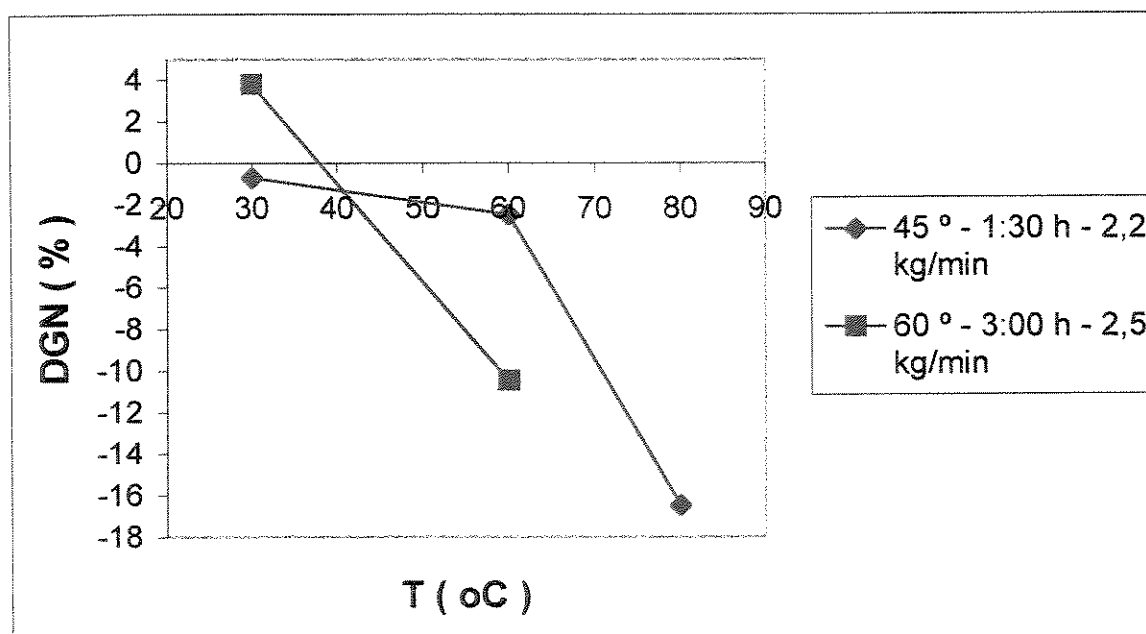


Figura 4.9 – Gráfico diferença de germinação normal para sementes de feijão em leito de jorro nas temperaturas de 30 °C , 60 °C e 80 °C.

4.2- Análise Estatística dos Resultados

Uma análise dos resultados através de métodos estatísticos foi feita utilizando-se o programa "Statistica". A Tabela 4.12 relaciona as variáveis independentes, na forma codificada, para ângulo de inclinação do cone, tempo de exposição, vazão mássica do ar e conteúdo de umidade inicial das sementes com as variáveis de resposta, razão de fissuras e germinação normal.

Tabela 4.12 - Variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta do planejamento.

<i>Exp. N.º</i>	<i>A</i>	<i>t</i>	<i>Q</i>	<i>Xo</i>	<i>RF (%)</i>	<i>GN (%)</i>
01	-1	-1	-1	-1	1,51	86,5
02	1	-1	-1	-1	1,32	85,5
03	-1	1	-1	-1	1,73	86,5
04	1	1	-1	-1	1,80	87,5
05	-1	-1	1	-1	1,72	80,5
06	1	-1	1	-1	1,94	88,0
07	-1	1	1	-1	2,00	81,5
08	1	1	1	-1	2,12	92,0
09	-1	-1	-1	1	1,15	86,0
10	1	-1	-1	1	1,18	88,5
11	-1	1	-1	1	1,32	89,5
12	1	1	-1	1	1,36	88,0
13	-1	-1	1	1	1,21	88,0
14	1	-1	1	1	1,09	85,0
15	-1	1	1	1	1,22	86,5
16	1	1	1	1	1,36	90,5

4.2.1 - Variável de Resposta Razão de Fissuras

A análise da variável de resposta razão de fissuras (RF) mostrou que, dentro do limite de confiança de 95%, foram significativos o tempo de exposição ao jorro (t), a vazão mássica do ar

(Q) e o conteúdo de umidade inicial das sementes (X_o). Também, foi significativa a interação entre a vazão e o conteúdo de umidade. Esses resultados são mostrados na Tabela 4.13. Os efeitos são considerados estatisticamente significativos quando seu valor for superior ao desvio do efeito em relação a banda do limite de confiança. Verifica-se também na Tabela 4.13, que os efeitos tempo e vazão são positivos, ou seja, um maior tempo de exposição ou uma maior vazão causam mais fissuras nas sementes de feijão. Da mesma forma, o conteúdo de umidade e a interação vazão e umidade são negativos, por isso valores maiores dessas variáveis causam menos fissuras nas sementes. O Diagrama de "Pareto" mostrado na Figura 4.10 permitiu uma melhor visualização dos efeitos significativos para a variável razão de fissuras.

Tabela 4.13 - Efeitos das variáveis independentes e suas interações para a variável resposta razão de fissuras.

<i>Fator</i>	<i>Efeitos</i>	<i>Limite de Confiança</i>	
		<i>(-95%)</i>	<i>(+95%)</i>
Média	1,5019	1,4424	1,5613
(1) Â	0,3875	-0,0802	0,1577
(2) t	0,2237	0,1048	0,3427
(3) Q	0,1612	0,0423	0,2802
(4) X_o	-0,5312	-0,6502	-0,4123
1/2	0,0537	-0,0652	0,1727
1/3	0,0512	-0,0677	0,1702
1/4	-0,0162	-0,1352	0,1027
2/3	-0,0387	-0,1577	0,0802
2/4	-0,0662	-0,1852	0,0527
3/4	-0,1937	-0,3127	-0,0748

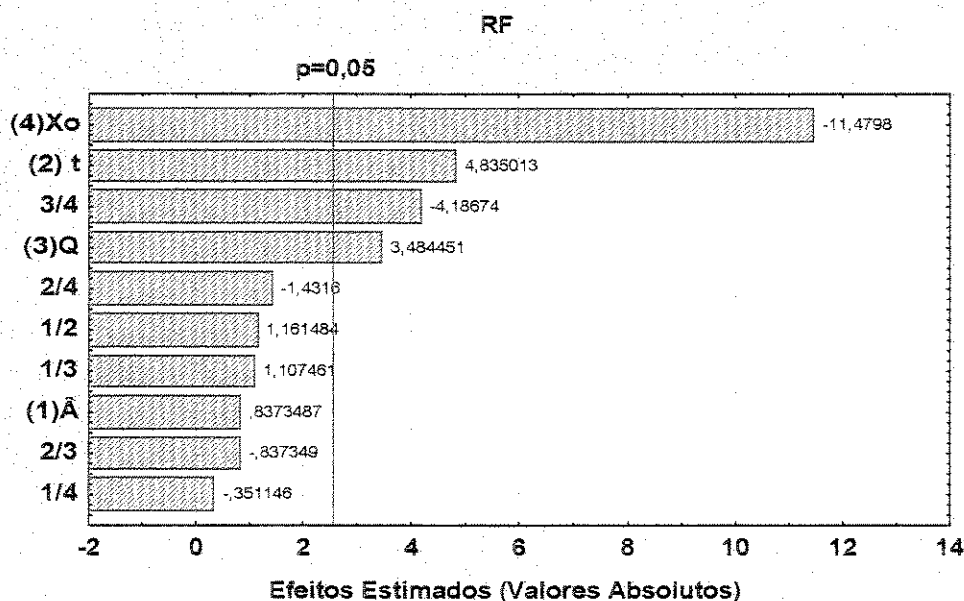


Figura 4.10 - Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável razão de fissuras.

O modelo estatístico, dentro do limite de confiança de 95%, é representado pela equação 4.1 sendo os coeficientes de regressão, para as variáveis independentes, mostrados na Tabela 4.14. O modelo adotado foi completo, de primeira ordem com interações, o coeficiente de correlação foi de 0,9745 e o erro residual 0,0086. Esses valores demonstram que o modelo é satisfatório, pois os valores do ajuste e coeficiente de correlação obtidos estão próximos de 1,0000 e o erro residual é considerado pequeno. Uma comparação entre os valores previstos e os observados para a variável razão de fissuras esta demonstrada na Figura 4.11, onde se confirma que o modelo foi adequado. A equação 4.1 relacionou a variável resposta razão de fissuras com as variáveis independentes codificadas e suas interações. A relação mostrada na equação 4.2 elimina os coeficientes de regressão que não foram significativos para o modelo. Essa simplificação não foi utilizada nas análises dos resultados através das superfícies de resposta.

Tabela 4.14 - Coeficientes de regressão das variáveis independentes e suas interações para a variável resposta razão de fissuras.

Fator	Coeficiente	Limite de Confiança	
		(-95%)	(+95%)
Média	1,5019	1,4424	1,5613
(1) Â	0,0194	-0,0401	0,0788
(2) t	0,1119	0,0524	0,1713
(3) Q	0,0806	0,0211	0,1401
(4) Xo	-0,2656	-0,3251	-0,2061
1/2	0,0269	-0,0326	0,0863
1/3	0,0256	-0,0338	0,0851
1/4	-0,0081	-0,0676	0,0513
2/3	-0,0194	-0,0788	0,0401
2/4	-0,0331	-0,0926	0,0263
3/4	-0,0969	-0,1563	-0,0374

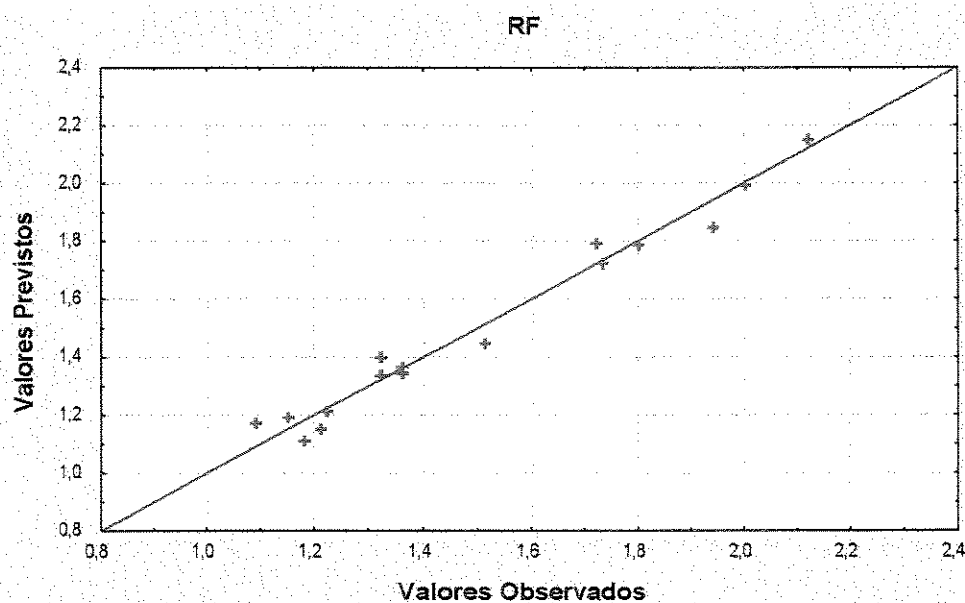


Figura 4.11 - Gráfico valores previstos versus observados para a variável razão de fissuras.

$$RF = 1,5019 + 0,0194.\hat{A} + 0,1119.t + 0,0806.Q - 0,2656.X_o + 0,0269.\hat{A}.t + 0,0256.\hat{A}.Q - 0,0081.\hat{A}.X_o - 0,0194.t.Q - 0,0331.t.X_o - 0,0969.Q.X_o \quad (4.1)$$

$$RF = 1,5019 + 0,119.t + 0,0806.Q - 0,2656.X_o - 0,0969.Q.X_o \quad (4.2)$$

A metodologia de superfícies de resposta é uma técnica de otimização baseada no emprego de planejamentos fatoriais, introduzida por G.E.P. BOX na década de 1950, e que desde então tem sido usada com grande sucesso na modelagem de diversos processos industriais (BRUNS et al., 1996). Essa metodologia é constituída das etapas distintas modelagem (ajuste de modelos a resultados experimentais) e deslocamento (máxima inclinação de um modelo), com o objetivo de atingir uma região ótima (máxima ou mínima).

Para a variável de resposta razão de fissuras foram montadas seis superfícies de resposta, combinando-se as quatro variáveis independentes, duas a duas. Devido a baixa influência da variável \hat{A} , verifica-se nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 uma pequena inclinação com um valor levemente superior de RF para o valor de \hat{A} maior. As variáveis t e Q , cuja influência foi classificada como significativa, apresentaram um maior valor para RF com valores superiores dessas variáveis (Figuras 4.12 e 4.13). Já a variável X_o , também significativa, apresentou uma superfície com elevada inclinação, indicando o valor máximo de RF para o valor inferior de X_o (Figura 4.14). Combinando-se as variáveis Q e t , o ponto máximo para RF foi obtido para os valores superiores dessas variáveis (Figura 4.15). Para as variáveis X_o e t , a superfície mostrou a tendência para o ponto máximo de RF nos valores inferior de X_o e superior de t (Figura 4.16). A superfície com as variáveis X_o e Q , também apresentou ponto máximo para RF nos valores inferior de X_o e superior de Q (Figura 4.17).

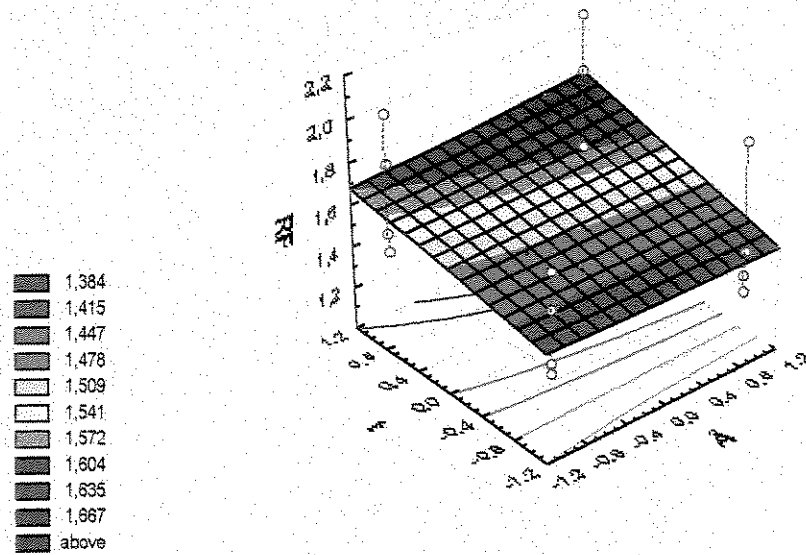


Figura 4.12 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus ângulo e tempo.

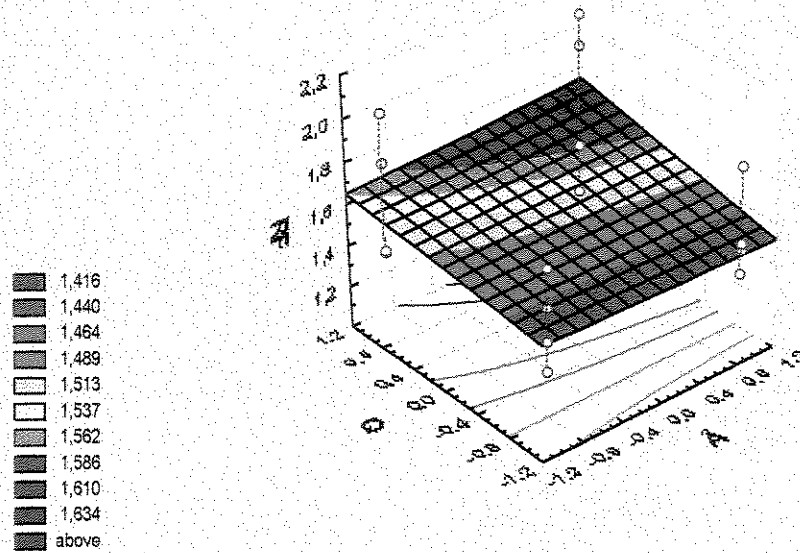


Figura 4.13 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus ângulo e razão.

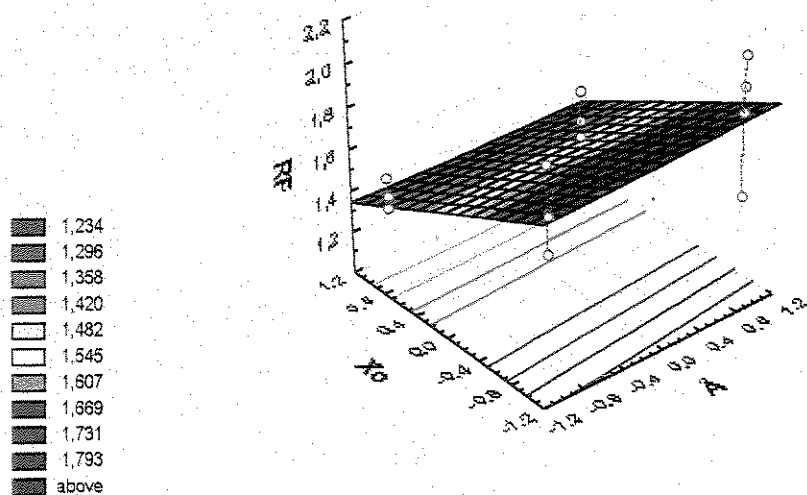


Figura 4.14 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus conteúdo de umidade e ângulo.

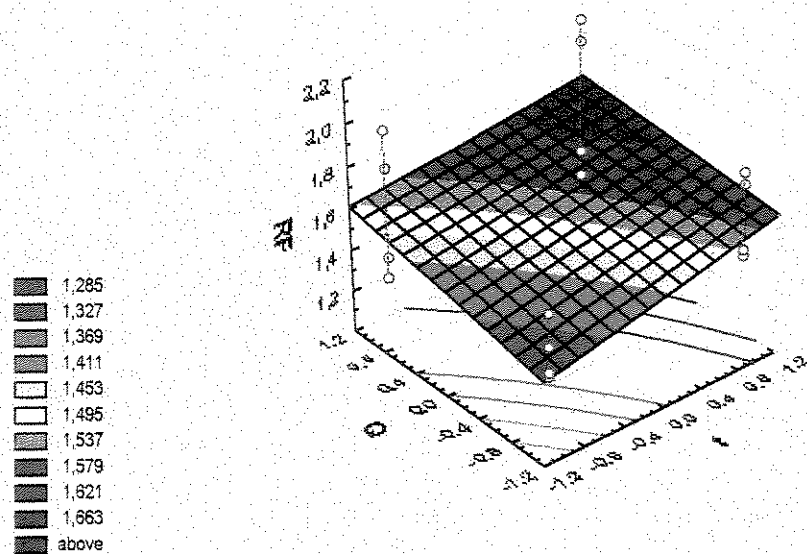


Figura 4.15 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus vazão e tempo.

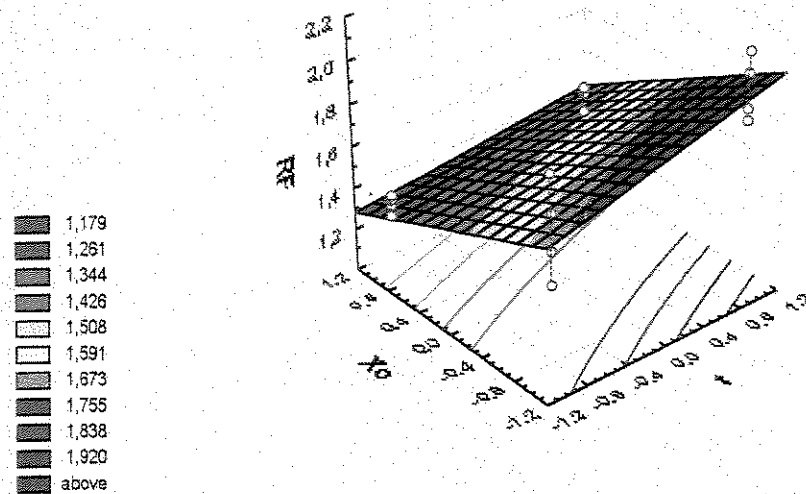


Figura 4.16 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus conteúdo de umidade e tempo.

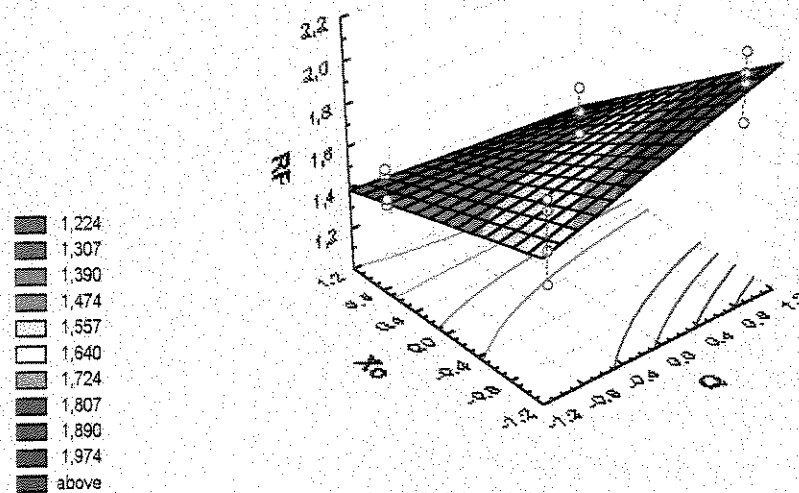


Figura 4.17 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus conteúdo de umidade e vazão.

A análise de variância para a variável razão de fissuras é apresentada na Tabela 4.15 e confirma que o modelo foi satisfatório. O valor dos resíduos foi de apenas 2,55% do total da soma quadrática. O teste da distribuição "F" (nível de 95% de confiança) mostrou que o valor calculado foi cerca de 4 vezes o valor tabelado dos pontos de percentagem ($F_{10,5} = 4,74$),

conforme demonstrado na equação 4.3. Para que uma regressão seja estatisticamente significativa e também útil para fins preditivos, o valor calculado de "F" deve ser no mínimo de 4 vezes o valor tabelado (BRUNS et al., 1996).

$$F = \frac{MQ_{\text{regressão}}}{MQ_{\text{resíduo}}} = \frac{0,1636}{0,0086} = 19,0232 \quad (4.3)$$

Tabela 4.15 - Análise de variância para a variável resposta razão de fissuras.

<i>Fonte de Variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>
Regressão	1,6360	10	0,1636
Resíduo	0,0428	5	0,0086
Total	1,6788	15	-

O leito de jorro cone - cilíndrico, operando com uma carga de sementes de feijão e um fluxo ar a temperatura ambiente, apresentou um aumento nas fissuras das sementes em todas as situações. No entanto, as variáveis independentes, cujos efeitos foram considerados significativos, podem ser ajustadas a valores que minimizem esses danos. Para ter-se, então, uma redução nas fissuras, a vazão de ar deverá ter um valor praticamente igual à vazão de jorro mínimo estável, e o tempo de exposição das partículas ao jorro deverá ser o mínimo possível. Sementes com conteúdo de umidade inicial superior sofrerão menos fissuras, indicando que não se deve proceder à secagem excessiva.

4.2.2 - Variável de Resposta Germinação Normal

A análise da variável de resposta germinação normal (GN), para o limite de confiança de 95%, demonstrou que nenhuma das variáveis independentes foi significativa. Esse resultado pode ser verificado na Tabela 4.16, pois os valores foram superiores ao desvio do efeito em relação a banda do limite de confiança. O Diagrama de "Pareto" da Figura 4.18 confirmou que as variáveis ângulo de inclinação (\hat{A}), vazão de ar (Q), tempo de exposição (t), conteúdo de umidade (X_o) e todas as interações não foram estatisticamente significativas. A variável que mais influenciou no

percentual de germinação normal foi o ângulo de inclinação do cone, embora esse resultado é somente numérico e não tem significado físico.

Tabela 4.16 - Efeitos das variáveis independentes e suas interações para a variável resposta germinação normal.

Fator	Efeitos	Limite de Confiança	Limite de confiança
		(-95%)	(+95%)
Média	86,8750	85,1506	88,5994
(1) Â	2,5000	-0,9488	5,9488
(2) t	1,7500	-1,6988	5,1988
(3) Q	-0,7500	-4,1988	2,6988
(4)Xo	1,7500	-1,6988	5,1988
1/2	1,0000	-2,4488	4,4488
1/3	2,2500	-1,1988	5,6988
1/4	-2,0000	-5,5488	1,4488
2/3	-0,5000	-2,9488	3,9488
2/4	0,0000	-3,4488	3,4488
3/4	0,2500	-3,1988	3,6988

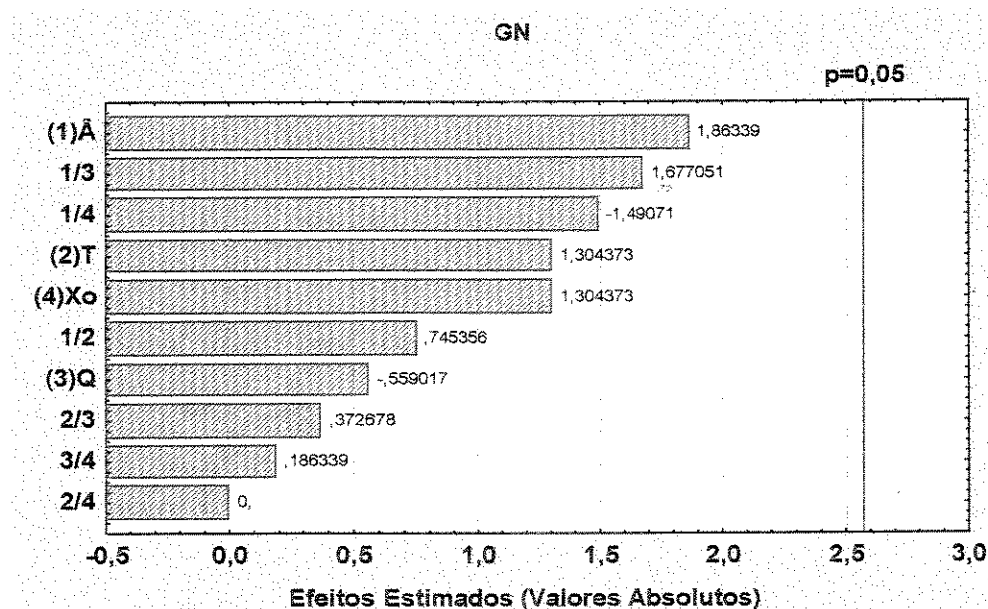


Figura 4.18 - Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável germinação normal.

O modelo estatístico, no limite de confiança de 95%, com os coeficientes de regressão da variável resposta germinação normal (GN) para as variáveis independentes é mostrado na Tabela 4.17. O modelo adotado nesse caso, também, foi de primeira ordem com interações, o ajuste conseguido foi de 0,1644, o coeficiente de correlação foi de 0,7215 e o erro residual 7,2000. Esses valores demonstram que o modelo não é satisfatório, pois os valores do ajuste e coeficiente de correlação estão distantes de 1,0000 e o erro residual é muito grande. Uma comparação entre os valores previstos e os observados para a variável germinação normal estão demonstrados na Figura 4.19, onde se observa um desvio grande entre os valores, comprovando que o modelo foi inadequado. Não foi conseguido um bom ajuste, pois os resultados aleatórios dos testes de germinação, não apresentaram tendências específicas.

Tabela 4.17 - Coeficientes de regressão das variáveis independentes e suas interações para a variável resposta germinação normal.

<i>Fator</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Limite de Confiança</i>	
		<i>(-95%)</i>	<i>(+95%)</i>
Média	86,8750	85,1506	88,5994
(1) Â	1,2500	-0,4744	2,9744
(2) t	0,8750	-0,8494	2,5994
(3) Q	-0,3750	-2,0994	1,3494
(4)Xo	0,8750	-0,8494	2,5994
1/2	0,5000	-1,2244	2,2244
1/3	1,1250	-0,5994	2,8494
1/4	-1,0000	-2,7244	0,7244
2/3	0,2500	-1,4744	1,9744
2/4	0,0000	-1,7244	1,7244
3/4	0,1250	-1,5994	1,8494

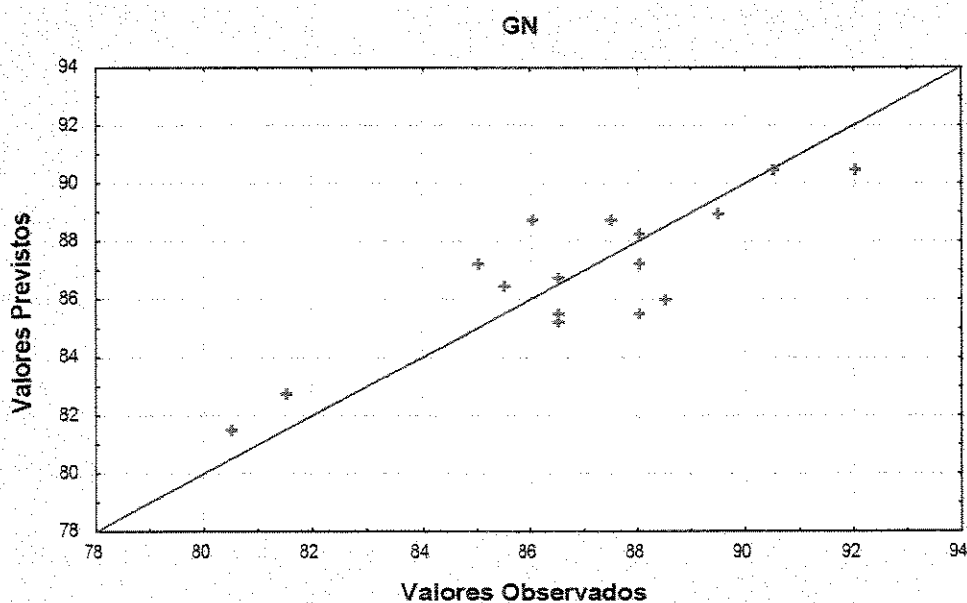


Figura 4.19 - Gráfico valores previstos versus valores observados para a variável germinação normal.

Para a análise das superfícies de resposta da variável germinação normal foram montadas, também, seis superfícies com as variáveis independentes combinadas duas a duas. Como o modelo não foi satisfatório, com as variáveis estudadas que se mostraram não significativas, as superfícies apresentaram pouca tendência a exibir pontos máximos e mínimos para germinação normal. No entanto, devido a maior tendência a influenciar a germinação da variável ângulo de inclinação, as superfícies das Figuras 4.20, 4.21 e 4.22, apresentaram a tendência de um percentual de germinação maior para o valor superior do ângulo. As demais superfícies (Figuras 4.23, 4.24 e 4.25) não apresentaram nenhuma tendência significativa.

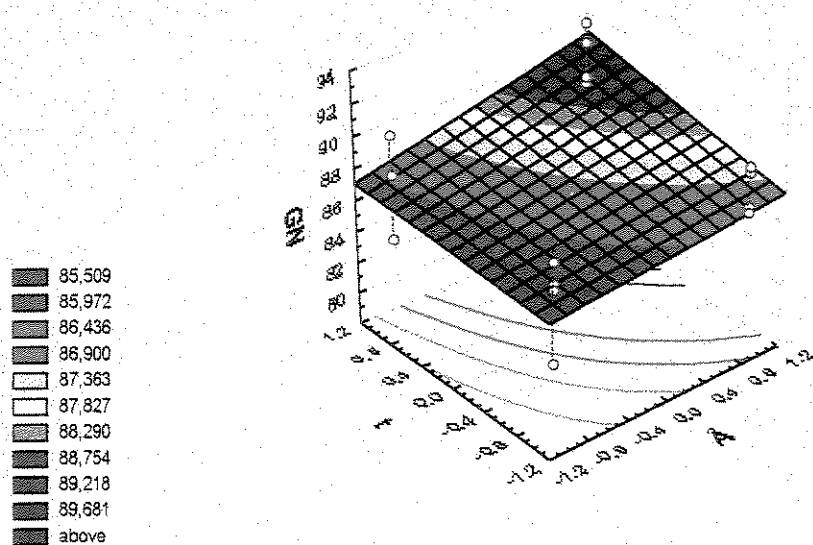


Figura 4.20 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus tempo e ângulo.

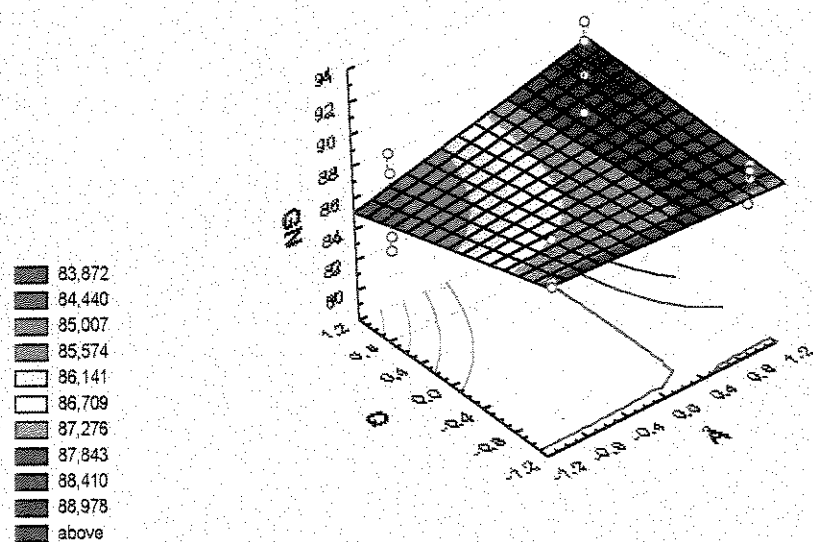


Figura 4.21 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus vazão e ângulo.

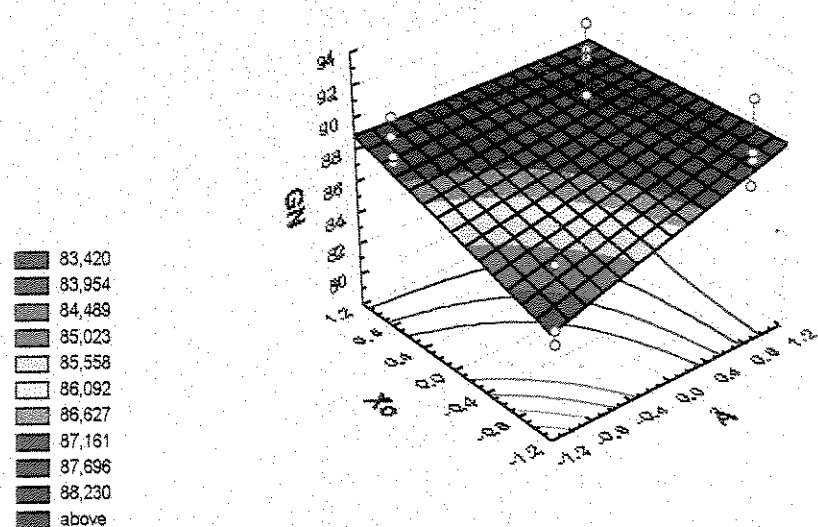


Figura 4.22 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus conteúdo de umidade e ângulo.

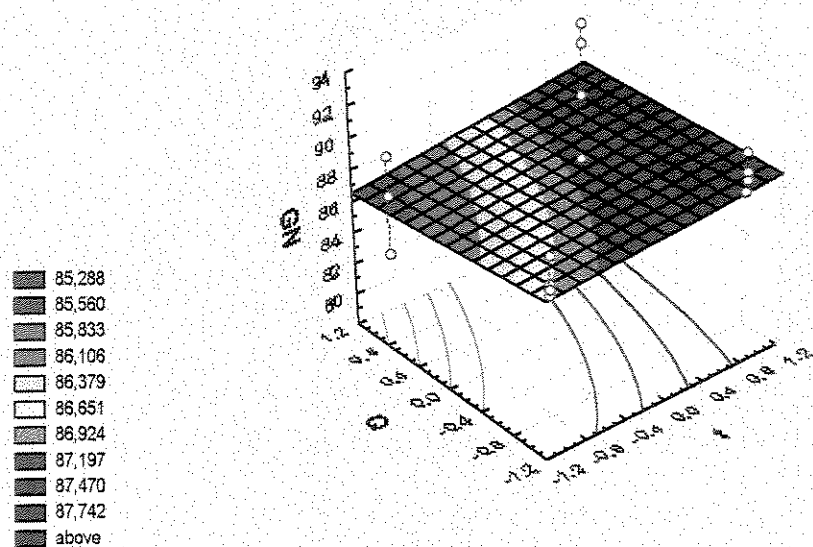


Figura 4.23 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus vazão e tempo.

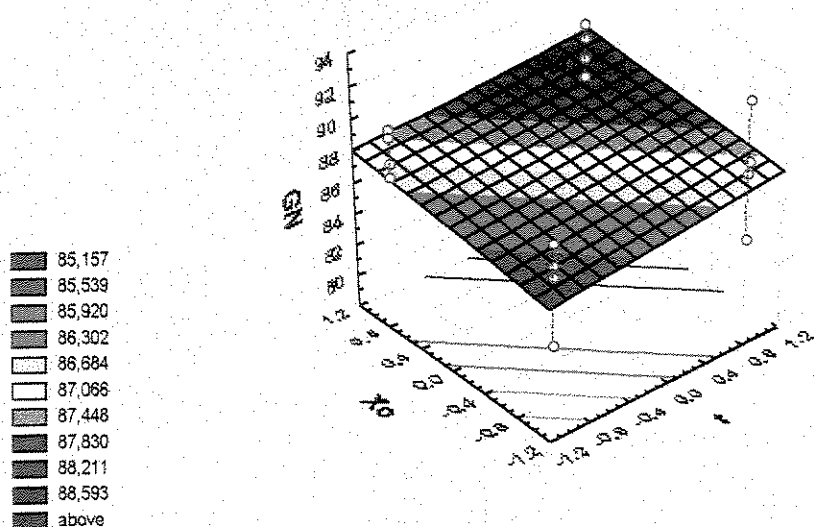


Figura 4.24 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus conteúdo de umidade e tempo.

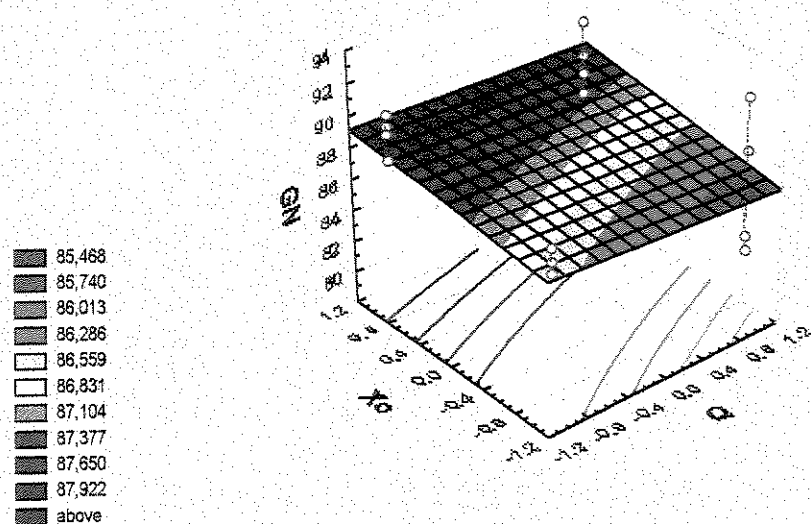


Figura 4.25 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus conteúdo de umidade e vazão.

A análise de variância para a variável germinação normal (Tabela 4.18) também demonstrou que o percentual de germinação normal não pode ser ajustado em função das variáveis ângulo de inclinação, vazão de ar, tempo de exposição e conteúdo de umidade das sementes. O resíduo da soma quadrática foi de 27,85% do total, valor considerado muito alto. O

teste da distribuição "F" (nível de 95% de confiança) demonstrou que o valor calculado foi menor que o valor tabelado dos pontos de percentagem ($F_{10,5} = 4,74$), conforme demonstrado na equação 4.4, o que significa que não tem sentido um ajuste matemático do percentual de germinação em função das variáveis estudadas no processo, pois a germinação não é função dessas variáveis.

$$F = \frac{MQ_{\text{Regressão}}}{MQ_{\text{Resíduo}}} = \frac{9,3250}{7,2000} = 1,2951 \quad (4.4)$$

Tabela 4.18 - Análise de variância para a variável resposta germinação normal.

<i>Fonte de Variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>
Regressão	93,2500	10	9,3250
Resíduo	36,0000	5	7,2000
Total	129,2500	15	-

Devido a não alteração do potencial de germinação das sementes de feijão submetidas ao leito de jorro cone - cilíndrico, pode-se concluir que uma secagem em leito de jorro apresenta viabilidade potencial. Nesse caso, então, as sementes ficariam sujeitas apenas a danos causados pela temperatura. Esse resultado é passível de ser aplicado para as faixas de valores experimentais utilizadas neste trabalho.

4.3- Leito de Jorro Bidimensional

Um terceiro lote de sementes de feijão da variedade carioca de procedência do "IAC" (Instituto Agrônomo de Campinas), safra de 1999, cujas características estão exibidas na Tabela 4.19, foram submetidos ao leito de jorro bidimensional. O leito bidimensional apresenta uma melhor manutenção da taxa de circulação de partículas, quando se procede à ampliação de escala, se comparado ao leito cone - cilíndrico.

Uma carga de 1800 g foi submetida ao leito de jorro bidimensional com um fluxo de ar à temperatura controlada de 30 °C. O estudo da fluidodinâmica do leito estabeleceu uma vazão de jorro mínimo de 1,5 kg/min, com uma queda de pressão de 189 mm H₂O. As vazões de trabalho foram definidas em 1,8 kg/min e 2,1 kg/min, o que corresponde a razão $Q/Q_{JM} = 1,2$ e 1,4 respectivamente.

Tabela 4.19 – Características originais das sementes

<i>Amostra n.º</i>	<i>Xo (%)</i>	<i>Fo (%)</i>	<i>GNo (%)</i>
01	12,1	16,5	84,0
02	9,5	19,5	75,0

Os danos mecânicos foram avaliados através das fissuras (F) causadas nas sementes em relação às fissuras iniciais (Fo) pela variável razão de fissuras ($RF = F/Fo$) conforme mostrado na Tabela 4.20. Foram avaliadas as influências das variáveis independentes em dois níveis para vazão de ar, tempo de exposição ao jorro e conteúdo de umidade inicial das sementes.

Tabela 4.20 – Fissuras nas sementes de feijão submetidas ao leito de jorro bidimensional

<i>Exp. N.º</i>	<i>t (h)</i>	<i>Q (kg/min)</i>	<i>Xo (%)</i>	<i>F (%)</i>	<i>RF</i>
01	1:30	1,8	9,5	34,5	1,77
02	3:00	1,8	9,5	39,0	2,00
03	1:30	2,1	9,5	37,5	1,92
04	3:00	2,1	9,5	47,5	2,44
05	1:30	1,8	12,1	24,0	1,45
06	3:00	1,8	12,1	24,5	1,48
07	1:30	2,1	12,1	22,5	1,36
08	3:00	2,1	12,1	29,5	1,79

A análise das influências das variáveis independentes, conforme apresentadas na Figura 4.26, mostrou que as sementes com conteúdo de umidade superior apresentaram menos fissuras que aquelas de baixo conteúdo de umidade. O nível superior da vazão de ar de 2,1 Kg/min associado ao tempo de exposição de 3:00 h, foi o que mais causou fissuras nas sementes. No entanto, para o conteúdo de umidade elevado, a variável de resposta razão de fissuras apresentou seu menor valor em três combinações de vazão e tempo de exposição. As tendências verificadas foram as mesmas do leito de jorro cone - cilíndrico, já analisadas nas Figuras 4.1 e 4.2.

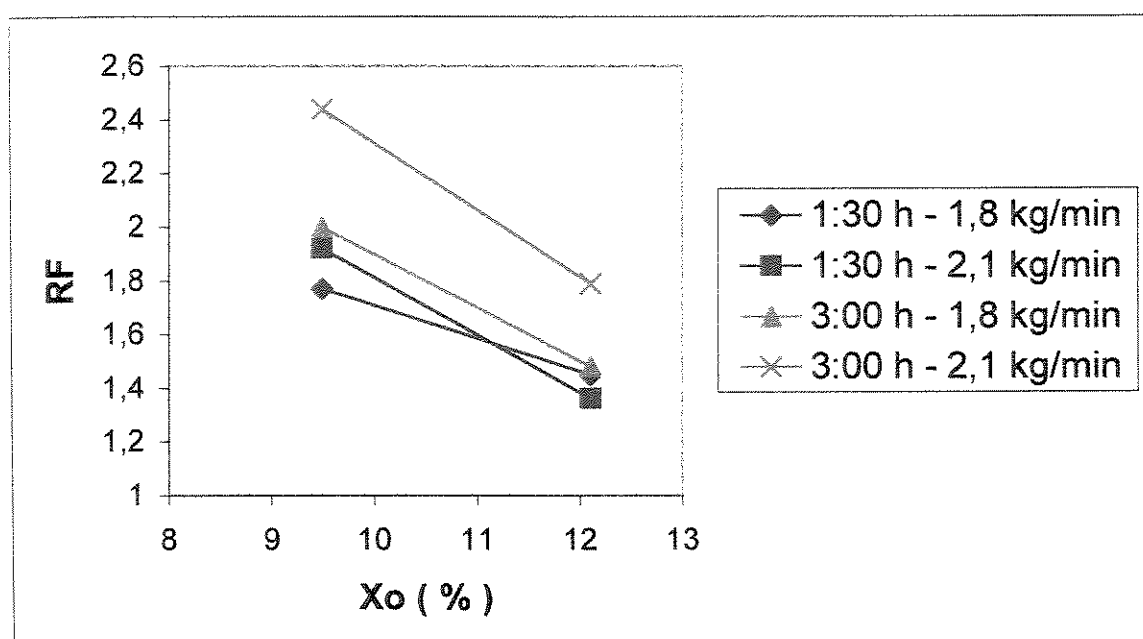


Figura 4.26 - Razão de fissuras em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro bidimensional.

Testes de germinação foram também realizados com as sementes expostas ao leito de jorro bidimensional. Foram avaliadas as influências das três variáveis independentes em dois níveis da mesma forma que no caso das fissuras. Os resultados dos testes estão exibidos na Tabela 4.21.

A análise das influências das variáveis independentes, conforme exibido na Figura 4.27, demonstra que sementes de maior conteúdo de umidade apresentam maior percentual de germinação normal. Verifica-se, também, que o nível superior do tempo de exposição reduz a

germinação das sementes. No entanto, a vazão de ar não apresentou tendências. Utilizando a variável diferença de germinação normal (DGN), conforme Figura 4.28, confirmou-se que um maior tempo de exposição, reduz a germinação das sementes.

Tabela 4.21- Germinação nas sementes de feijão expostas a leito de jorro bidimensional.

Exp. N°	t (h)	Q (kg/min)	X_o (%)	GN (%)	GD (%)	GI (%)	GM (%)
1	1:30	1,8	9,5	78,0	9,0	6,5	6,5
2	3:00	1,8	9,5	73,0	14,5	7,5	5,0
3	1:30	2,1	9,5	76,0	20,0	1,3	2,7
4	3:00	2,1	9,5	74,0	20,0	2,0	4,0
5	1:30	1,8	12,1	82,5	5,5	4,5	7,5
6	3:00	1,8	12,1	73,5	7,5	9,0	10,0
7	1:30	2,1	12,1	86,5	6,5	3,5	3,5
8	3:00	2,1	12,1	77,5	8,0	6,5	8,0

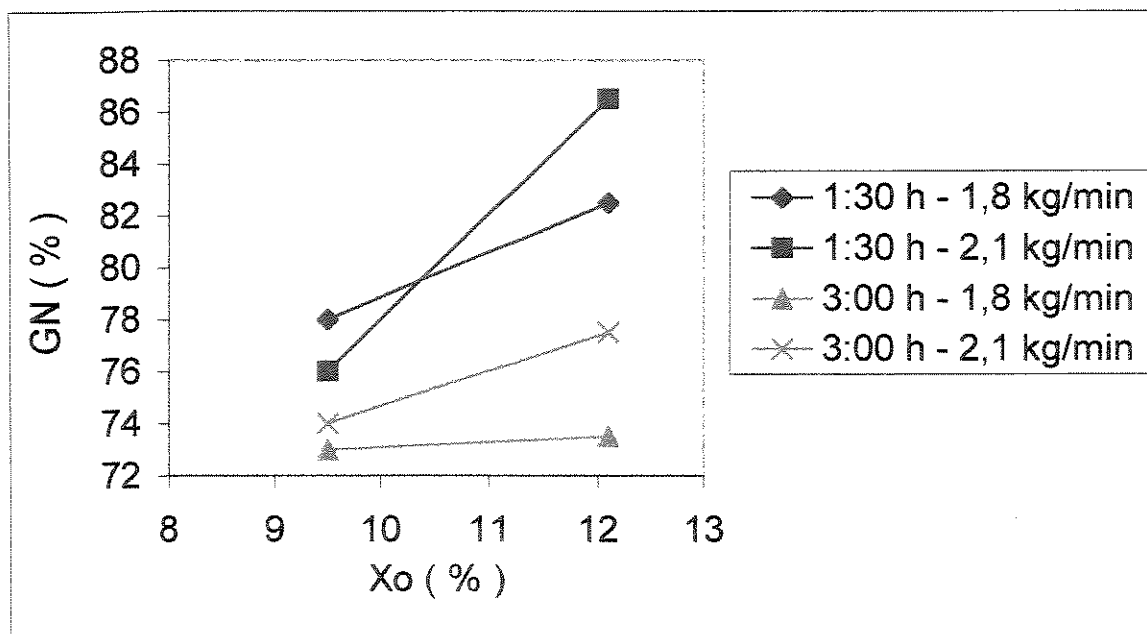


Figura 4.27 – Germinação normal em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro bidimensional.

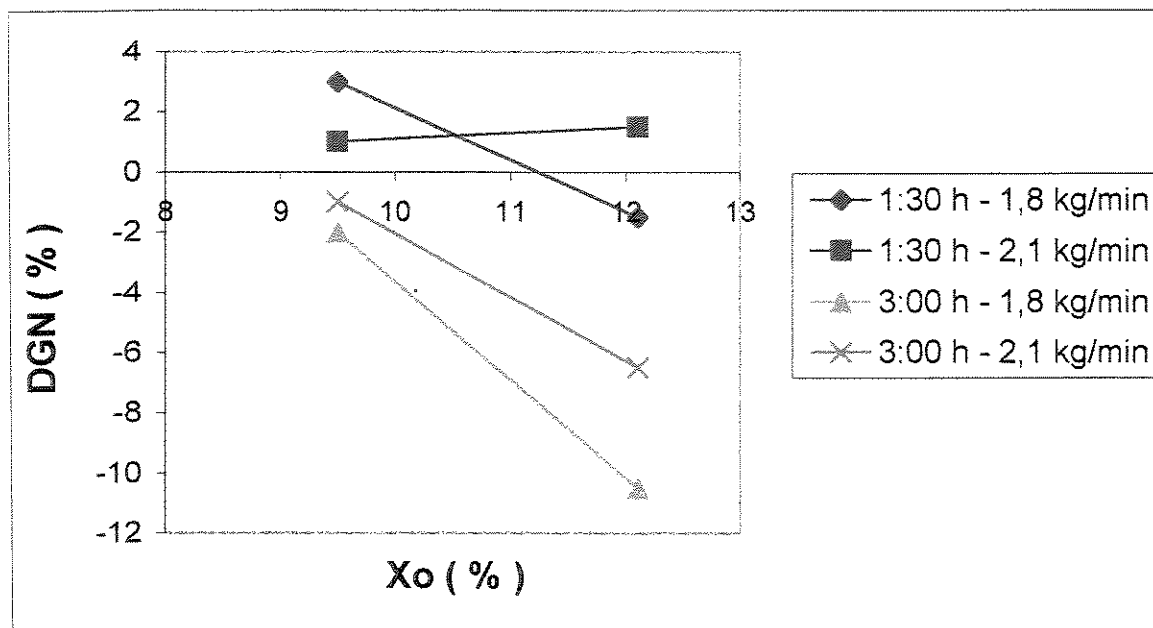


Figura 4.28 – Diferença de germinação normal em sementes para dois níveis de umidade em leito de jorro bidimensional.

Uma análise dos resultados através de métodos estatísticos, utilizando-se o programa “Statística”, relacionou as variáveis independentes, na forma codificada, para o tempo de exposição, vazão mássica do ar e conteúdo de umidade inicial das sementes com as variáveis de resposta, razão de fissuras e germinação normal, conforme Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta do planejamento para leito de jorro bidimensional.

Exp. N°	t	Q	Xo	RF (%)	GN (%)
01	-1	-1	-1	1,77	78,0
02	1	-1	-1	2,00	73,0
03	-1	1	-1	1,92	76,0
04	1	1	-1	2,44	74,0
05	-1	-1	1	1,45	82,5
06	1	-1	1	1,48	73,5
07	-1	1	1	1,36	86,5
08	1	1	1	1,79	77,5

Dentro do limite de confiança de 95%, para a variável de resposta razão de fissuras, foi significativo apenas o conteúdo de umidade inicial. O efeito dessa variável, exibido na Tabela 4.23, assume valor negativo o que demonstra que sementes com conteúdos de umidade superiores apresentam menos fissuras quando submetidas ao leito de jorro bidimensional. O diagrama de “Pareto”, mostrado na Figura 4.29, permite uma melhor visualização dos efeitos.

Tabela 4.23 – Efeitos das variáveis independentes e suas interações para a variável resposta razão de fissuras em leito de jorro bidimensional.

<i>Fator</i>	<i>Efeitos</i>	<i>Limite de confiança (- 95 %)</i>	<i>Limite de confiança (+ 95 %)</i>
Média	1,7762	1,6015	1,9510
(1) t	0,3025	-0,0469	0,6519
(2) Q	0,2025	-0,1469	0,5519
(3) Xo	-0,5125	-0,8619	-1,6308
1/2	0,1725	-0,1769	0,5219
1/3	0,0725	-0,4219	0,2769
2/3	0,0925	-0,4419	0,2569

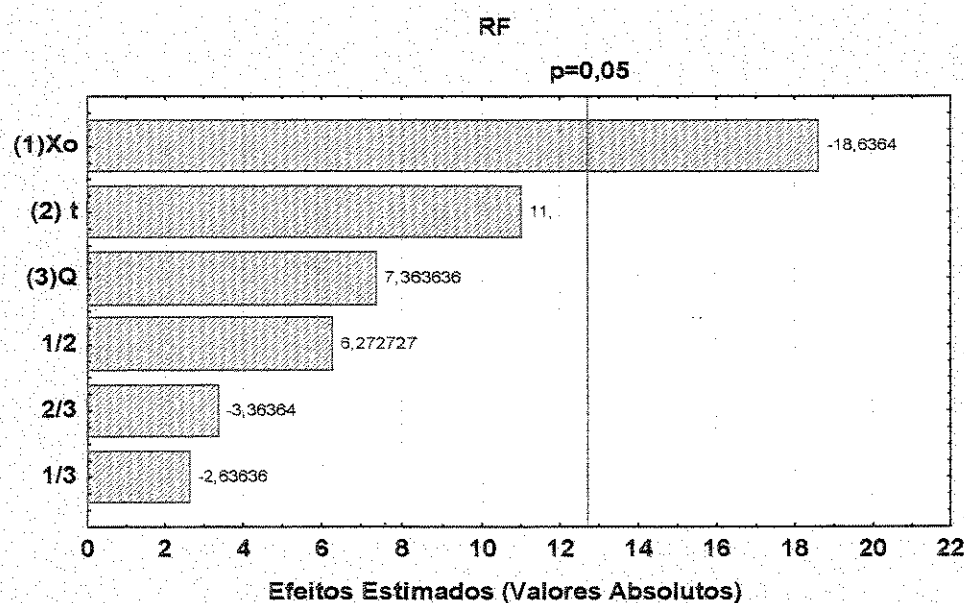


Figura 4.29 - Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável razão de fissuras em leito de jorro bidimensional.

O modelo estatístico é representado pela equação 4.5, sendo os coeficientes de regressão para as variáveis independentes, dentro do limite de confiança de 95%, mostrados na Tabela 4.24. O modelo adotado foi de primeira ordem com interações, o ajuste conseguido foi de 0,9879, o

coeficiente de correlação foi de 0,9983 e o erro residual de 0,0015. Isso demonstra que o modelo é satisfatório, sendo que uma comparação entre os valores previstos e observados estão demonstrados na Figura 4.30.

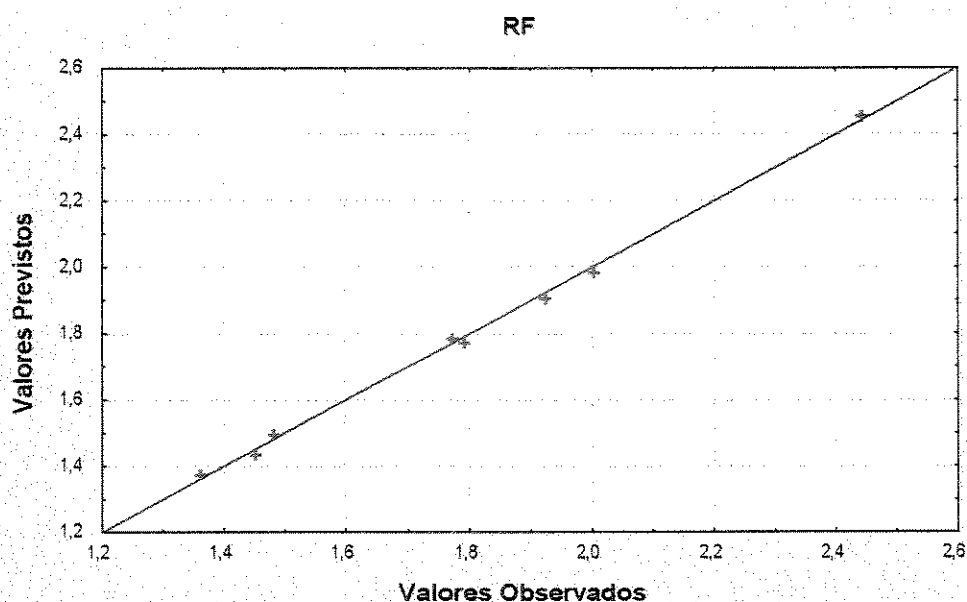


Figura 4.30 - Gráfico valores previstos versus valores observados para a variável razão de fissuras em leito de jorro bidimensional.

Tabela 4.24 – Coeficientes de regressão das variáveis independentes e suas interações para a variável resposta razão de fissuras em leito de jorro bidimensional.

<i>Fator</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Limite de confiança (- 95 %)</i>	<i>Limite de confiança (+ 95 %)</i>
Média	1,7762	1,6015	1,9510
(1) t	0,1512	-0,0235	0,3260
(2) Q	0,1012	-0,0735	0,2760
(3) Xo	-0,2562	-0,4310	-0,0815
1/2	0,0862	-0,0885	0,2610
1/3	-0,0362	-0,2110	0,1385
2/3	-0,0462	-0,2210	0,1285

$$RF = 1,7762 + 0,1512.t + 0,1012.Q - 0,2562Xo + 0,0862.t.Q - 0,0362.t.Xo - 0,0462.Q.Xo \quad (4.5)$$

Foram montadas três superfícies de resposta para a variável razão de fissuras, no caso do leito de jorro bidimensional. A análise da superfície tempo e vazão (Figura 4.31) mostrou que para valores superiores de vazão de ar e valores superiores de tempo de exposição, obteve-se um valor máximo de fissuras nas sementes de feijão. A superfície tempo de exposição e conteúdo de umidade inicial das sementes (Figura 4.32) mostra uma tendência de ocorrência maior de fissuras para tempo de exposição elevado e baixo conteúdo de umidade. Já a superfície vazão de ar e conteúdo de umidade inicial, exibida na Figura 4.33, apresenta valor máximo de fissuras para altas vazões e baixo conteúdo de umidade.

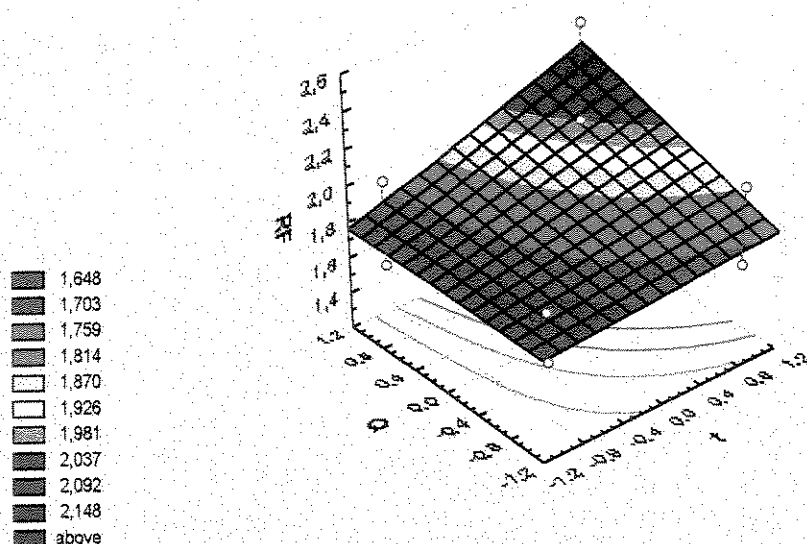


Figura 4.31 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus vazão e tempo em leito de jorro bidimensional.

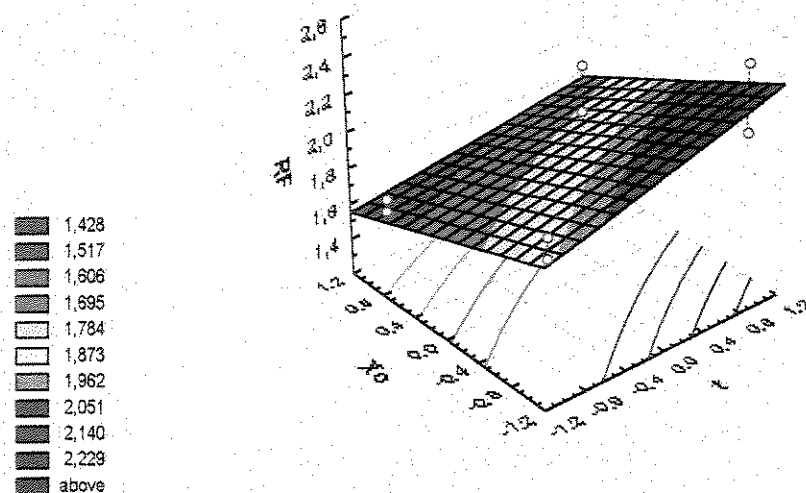


Figura 4.32 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus conteúdo de umidade e tempo em leito de jorro bidimensional.

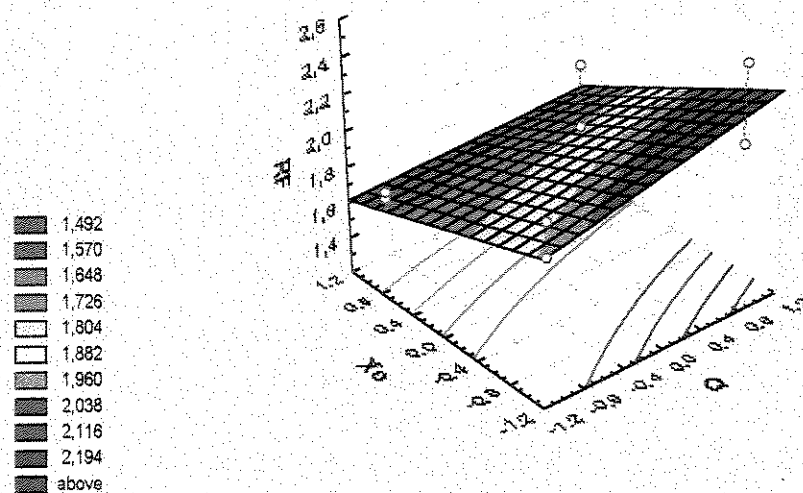


Figura 4.33 - Superfície de resposta para a variável razão de fissuras versus conteúdo de umidade e vazão em leito de jorro bidimensional.

A análise de variância para a variável razão de fissuras em leito de jorro bidimensional é apresentada na Tabela 4.25. O valor do resíduo é de 0,17% do total da soma quadrática, valor considerado pequeno e que confirma que o modelo foi satisfatório.

Tabela 4.25 - Análise de variância para variável resposta razão de fissuras em leito de jorro bidimensional.

<i>Fonte de Variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>
Regressão	0,8775	6	0,1462
Resíduo	0,0015	1	0,0015
Total	0,8790	7	-

Para a variável de resposta germinação normal, em sementes submetidas ao leito de jorro bidimensional, não houve nenhuma variável independente com efeito estatisticamente significativo. Os efeitos, para o limite de confiança de 95%, estão exibidos na Tabela 4.26 e podem ser melhor visualizados no diagrama de "Pareto" (Figura 4.34).

Tabela 4.26 – Efeitos das variáveis independentes e suas interações para a variável resposta germinação normal em leito de jorro bidimensional.

<i>Fator</i>	<i>Efeitos</i>	<i>Limite de confiança</i> <i>(- 95 %)</i>	<i>Limite de confiança</i> <i>(+ 95 %)</i>
Média	77,6250	72,8602	82,3898
(1) t	-6,2500	-15,7797	3,2796
(2) Q	1,7500	-7,7797	11,2796
(3) Xo	4,7500	-4,7797	14,2796
1/2	0,7500	-8,7797	10,2796
1/3	-2,7500	-12,2797	6,7796
2/3	2,2500	-7,2797	11,7796

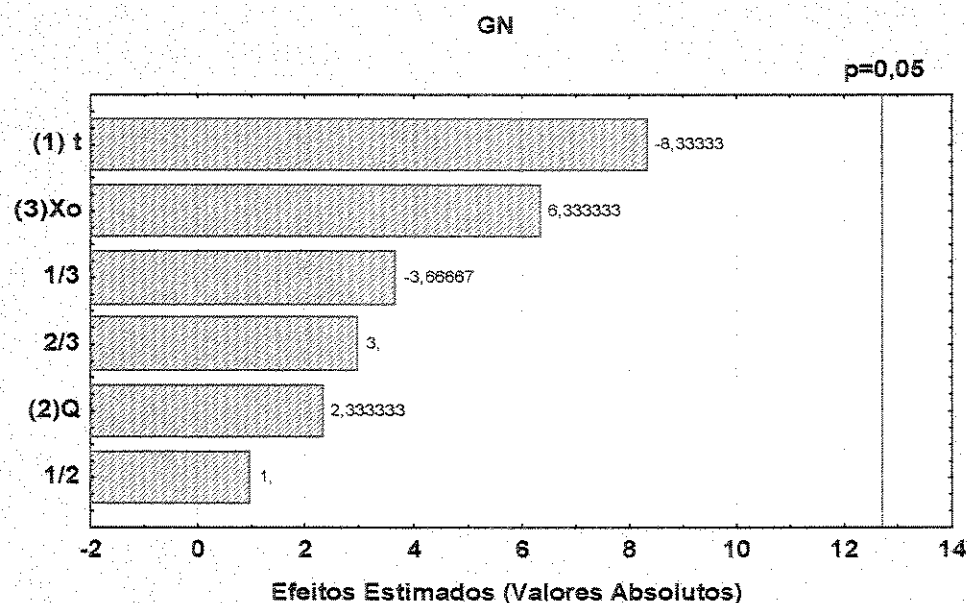


Figura 4.34 - Diagrama de Pareto dos efeitos para a variável germinação normal em leito de jorro bidimensional.

Apesar da análise estatística não apresentar variáveis significativas no limite de 95% de confiança, o modelo de primeira ordem com interações, apresentou o ajuste de 0,9498, o coeficiente de correlação de 0,9928 e o erro residual de 1,1250. Esses valores demonstram que pode ser ajustado um modelo satisfatório. O modelo estatístico é representado pela equação 4.6 e os coeficientes de regressão para as variáveis independentes estão mostrados na Tabela 4.27. A Figura 4.35 mostra uma comparação entre os valores previstos e observados, o que confirma o bom ajuste obtido.

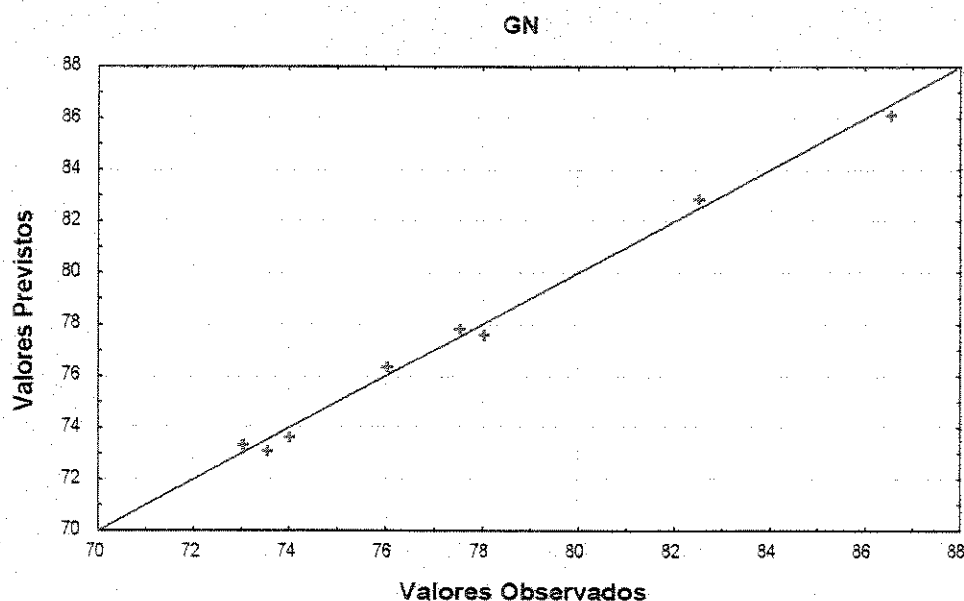


Figura 4.35 - Gráfico valores previstos versus valores observados para a variável germinação normal em leito de jorro bidimensional.

Tabela 4.27 – Coeficientes de regressão das variáveis independentes e suas interações para a variável resposta germinação normal em leito de jorro bidimensional.

<i>Fator</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Limite de confiança (- 95 %)</i>	<i>Limite de confiança (+ 95 %)</i>
Média	77,6250	72,8602	82,3898
(1) t	-3,1250	-7,8898	1,6398
(2) Q	0,8750	-3,8898	5,6398
(3) Xo	2,3750	-2,3898	7,1398
1/2	0,3750	-4,3898	5,1398
1/3	-1,3750	-6,1398	3,3898
2/3	1,1250	-3,6398	5,8898

$$GN = 77,6250 - 3,1250.t + 0,8750.Q + 2,3780.Xo + 0,3750.t.Q - 1,3750.t.Xo + 1,1250.Q.Xo \quad (4.6)$$

Foram construídas para a variável de resposta percentagem de germinação normal (GN), três superfícies de resposta. A Figura 4.36 relaciona as variáveis vazão de ar e tempo de exposição, a tendência da superfície para uma melhor germinação ocorre com menor tempo sem influência da vazão. A relação das variáveis tempo e conteúdo de umidade inicial (Figura 4.37) apresentaram valor máximo de germinação para umidade elevada e menor tempo. Já a superfície

de resposta exibida na Figura 4.38, relaciona vazão de ar e conteúdo de umidade inicial, o valor máximo de germinação ocorre para o nível superior de umidade .

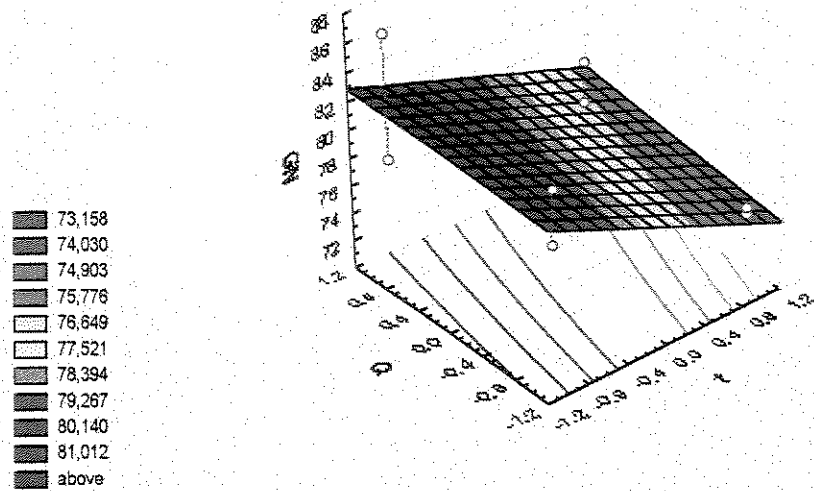


Figura 4.36 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus vazão e tempo em leito de jorro bidimensional.

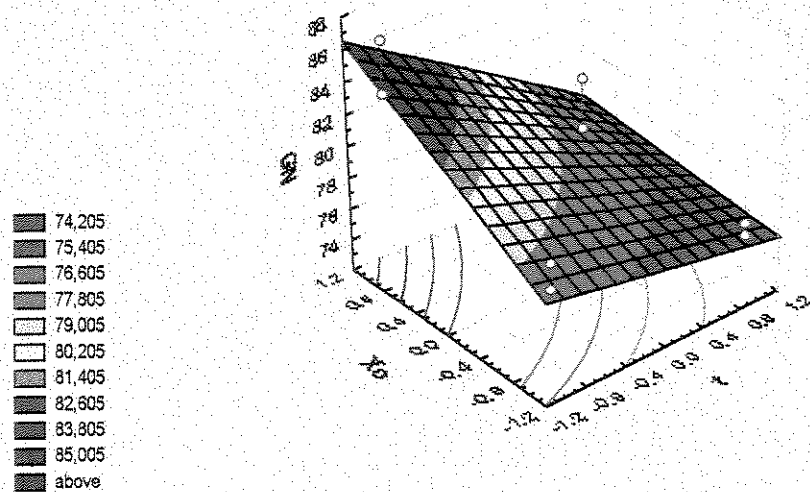


Figura 4.37 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus conteúdo de umidade e tempo em leito de jorro bidimensional.

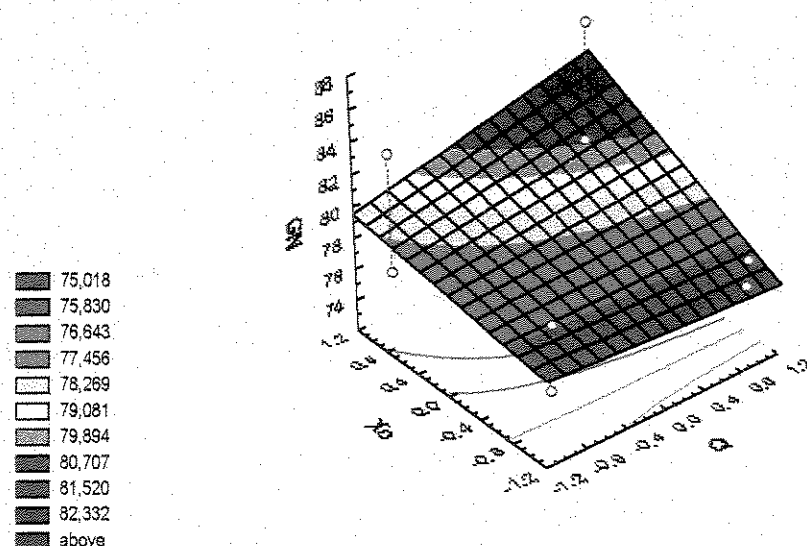


Figura 4.38 - Superfície de resposta para a variável germinação normal versus conteúdo de umidade e vazão em leito de jorro bidimensional.

A análise de variância para a variável de resposta germinação normal, exibida na Tabela 4.28, confirma que o modelo foi satisfatório, embora os efeitos das variáveis independentes não tenham se mostrado significativos no nível de confiança estabelecido de 95%. O resíduo da soma quadrática apresentou o valor de 0,72% do total, valor considerado baixo.

Tabela 4.28 - Análise de variância para a variável resposta germinação normal em leito de jorro bidimensional.

<i>Fonte de Variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>
Regressão	155,7500	6	25,9583
Resíduo	1,1250	1	1,1250
Total	156,8750	7	-

Uma comparação entre os efeitos nas sementes de feijão expostas ao leito de jorro cone - cilíndrico e o leito de jorro bidimensional, demonstra que para a variável razão de fissuras (RF), o conteúdo de umidade inicial foi significativo nos dois casos, já o tempo de exposição e a vazão de ar só tiveram influência significativa nos experimentos com leito cone - cilíndrico. Para a

variável de resposta germinação normal (GN), em ambos os leitos as variáveis não apresentaram efeitos significativos.

4.4 - Fotografias das Sementes Danificadas

Foram tiradas fotografias de algumas sementes de feijão após serem submetidas ao leito de jorro e ao entumescimento, conforme o método descrito para verificação das fissuras. Para isso, utilizou-se microscópio com câmera acoplada. Na Figura 4.39 observa-se uma semente sem nenhum dano, o mesmo ocorre na Figura 4.40, porém com aumento 50% superior. Nas Figuras 4.41, 4.42 e 4.43 aparecem sementes com fissuras. As Figuras 4.44 e 4.45 apresentam sementes com perda de parte da casca ("peeling").



Figura 4.39 - Fotografia de semente sem nenhum dano

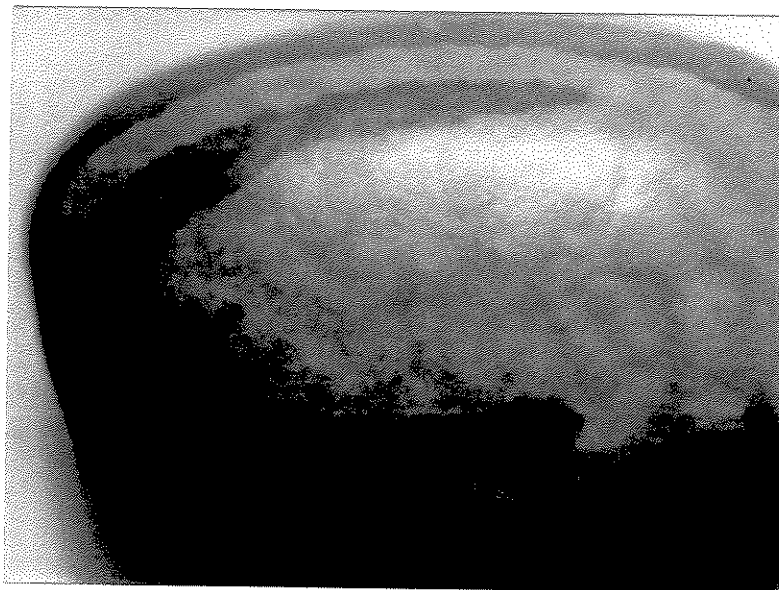


Figura 4.40 - Fotografia de semente sem nenhum dano

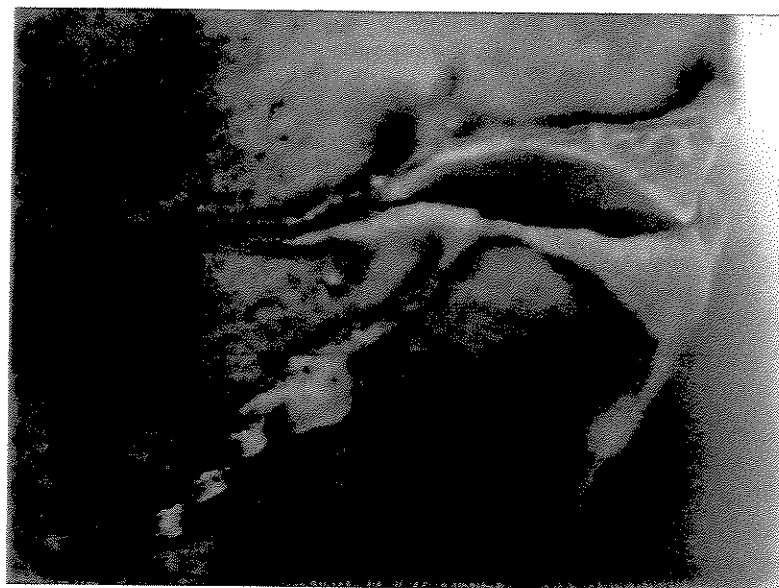


Figura 4.41 - Fotografia de semente com fissura



Figura 4.42 - Fotografia de semente com fissura

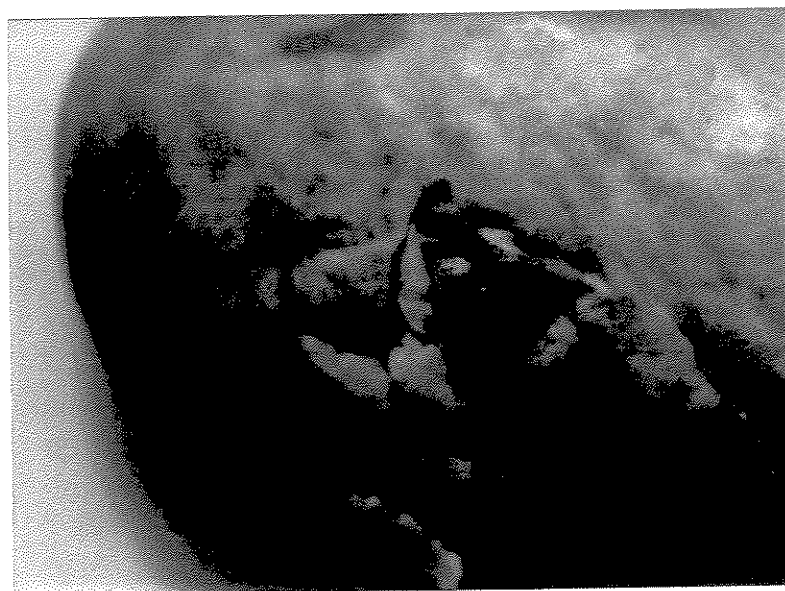


Figura 4.43 - Fotografia de semente com fissura



Figura 4.44 - Fotografia de semente com perda parcial da casca.

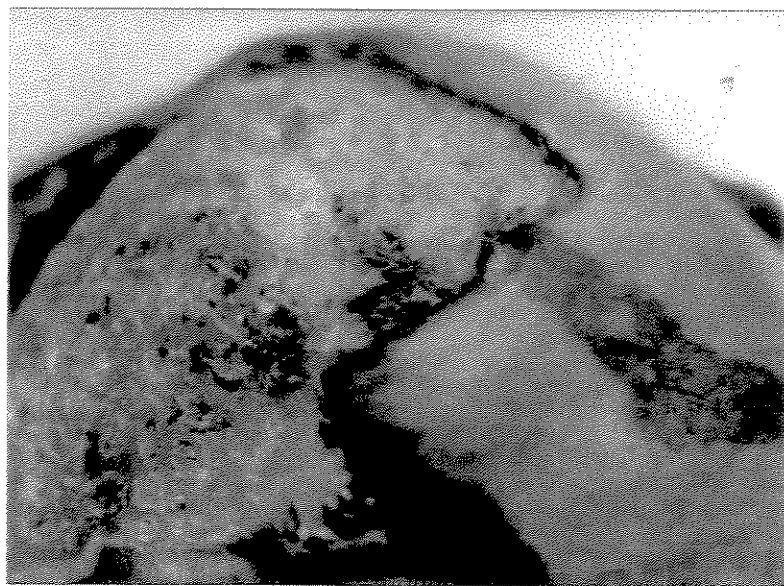


Figura 4.45 - Fotografia de semente com perda parcial da casca.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - Conclusões

A técnica do planejamento experimental fatorial e a posterior análise estatística dos resultados, utilizando o programa "Statistica", mostrou ser uma ferramenta muito útil. A avaliação dos efeitos causados pelas variáveis independentes e inclusive nas interações entre duas variáveis, pôde confirmar a tendência dos resultados das variáveis de resposta razão de fissuras e percentual de germinação normal das sementes.

Os experimentos foram realizados com sementes de feijão com fissuras iniciais causadas devido ao manuseio de colheita, processamento e armazenamento. Ao serem submetidas à fluidodinâmica do leito de jorro, houve um aumento nas fissuras das sementes, principalmente nas condições do nível superior de tempo de exposição (3:00 h) e vazão de ar (2,5 kg/min no leito cone - cilíndrico e 2,1 kg/min no leito bidimensional). A variável razão de fissuras (RF) permitiu uma melhor comparação com os valores iniciais (F_0). As sementes com baixo conteúdo de umidade inicial (X_0) apresentaram maior incidência de fissuras, após serem expostas ao leito de jorro. O ângulo de inclinação do cone não apresentou influência significativa nas fissuras das sementes, embora o leito com ângulo de 60 ° apresentou uma maior taxa de circulação de partículas. No caso do leito de jorro bidimensional as influências das variáveis independentes foram semelhantes ao do leito cone - cilíndrico, embora foi considerada significativa apenas a umidade inicial das sementes.

Com relação ao potencial de germinação das sementes, verificou-se que tanto para o leito de jorro cone - cilíndrico, com ângulo de inclinação de 45 ou 60 °, como para o leito de jorro bidimensional, nenhuma das variáveis independentes teve influência significativa. O percentual de germinação normal das sementes submetidas ao leito de jorro, sofreu pequena alteração em relação ao seu valor original, ainda dentro dos valores mínimos especificados na literatura para o

feijão, embora isto não tenha ocorrido em todos os experimentos do leito bidimensional e naqueles utilizando temperaturas mais elevadas.

Para uma avaliação de danos causados devido à temperatura do ar, foram realizados experimentos com temperaturas de 60 e 80 °C, mantendo-se as variáveis independentes utilizadas no leito de jorro cone - cilíndrico. Não houve alterações significantes na variável razão de fissuras comparando-se a temperatura do ar de 30 °C com 60 ou 80 °C. No entanto, houve uma queda no percentual de germinação normal, principalmente na temperatura de 80 °C.

Uma avaliação geral do trabalho, mostra que o leito de jorro, tanto cone - cilíndrico como bidimensional, operando com vazão de ar à temperatura de 30 °C, apresentou um aumento nas fissuras das sementes de feijão, embora, poucas sementes apresentaram quebras com separação dos cotilédones ou perdas da casca. A germinação das sementes foi pouco afetada pela fluidodinâmica do leito. Somente temperaturas do ar mais elevadas que 60 °C podem causar uma perda no potencial de germinação das sementes. Esses resultados mostram a viabilidade da utilização do leito de jorro em secagem de grãos ou sementes de feijão, desde que as vazões de ar sejam em torno da vazão de jorro mínimo estável, sua temperatura não seja superior a 60 °C e a secagem seja realizada até valores de umidade de 12 a 14 %.

5.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros

A análise de danos mecânicos em sementes de feijão, realizada neste trabalho, também poderá ser feita em escala piloto, tanto para o leito cone - cilíndrico como para o bidimensional, variando-se também proporções e ângulo de inclinação. A importância dos experimentos realizados em leito de jorro bidimensional, está relacionada com a maior possibilidade de se reproduzir tais experimentos a nível de laboratório para escala piloto ou industrial.

Um trabalho semelhante ao aqui realizado com sementes de feijão, poderá utilizar sementes de outras variedades agrícolas. Sementes como soja, milho, arroz, trigo e outras, seriam submetidas ao leito de jorro com ou sem aquecimento de ar, posteriormente seriam avaliadas fissuras e percentual de germinação normal.

Avaliar os danos em experimentos de secagem em leitos de jorro para identificar e quantificar a influência da temperatura do ar.

Realizar estudo de danos em sementes submetidas a leito de jorro com intermitência no regime fluidodinâmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, K., RAGHAVAN, G.S.V., MUJUMDAR, A.S., *Drying* 84, Hemisphere, New York, 1984, 205 p.
- ARAÚJO, RICARDO S., RAVA, CARLOS A., STONE, LUIS F., ZIMMERMANN, MARIA J. O., , *Cultura do Feijoeiro Comum no Brasil*, Potafos, Piracicaba, 1996, 786 p.
- ATKIN, J.D., Relative Susceptibility of Snap Bean Varieties to Mechanical Injury of Seed, *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, n. 72, p. 370-373, 1958.
- AUSTIN, R.B., LONGDEN, P.C., HUTCHINSON, J., Some Effects of Hardening Carrot Seed, *Annals of Botany*, n. 33, p.883-896, 1969.
- BAKKER-ARKEMA, F.W., LEREW, L.E., DEBOER, S.F., ROTH, M.G., Grain Dryer Simulation, *Michigan State University Agricultural Experiment Station Research Report*, n. 224, 1974.
- BAY, A. P. M., TAYLOR, A. G., BOURNE, M. C., , The Influence of Water Activity on Three Genotypes of Snap Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Relation to Mechanical Damage Resistance, *Seed Science and Technology*, n.23, p. 583-593, 1995.
- BILANSKI, W.K., Damage Resistance of Seed Grains, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, n. 9, p. 360-363, 1966.
- BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, Laboratório Nacional de Referência Vegetal, *Regras para Análise de Sementes*, Brasília, 1992, 365 p.
- BROOKER, DONALD B., BAKKER-ARKEMA, FRED W., HALL, CARL W., *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992, 450 p.

- BRUNS, R.E., BARROS NETO, B., SCARMINIO, I.S., *Planejamento e Otimização de Experimentos*, Editora da Unicamp, Campinas, 1996, 299p.
- BRUSEWITZ, G.H., Drying Temperature Effects on Peanut Pod Moisture Variation, *Transations of the ASAE*, n. 17(1), p. 85-87, 1974.
- BRUSEWITZ, G.H., Corn Moisture Variability During Drying, Mixing and Storage, *J. Agric. Engr. Res.*, n. 37, p. 281-288, 1987.
- CAIN, D.F., HOLMES, R.G., Evaluation of Soybean Seed Impact Damage, *ASAE Paper*, n.77-1552, 1977.
- CARNEIRO, J.W.P., PIRES, J.C., Influência da Temperatura e do Substrato na Germinação de Sementes de Mamona, *Revista Brasileira de Sementes*, v. 5, n. 3, p.127-131, 1983.
- CARVALHO, NELSON MOREIRA DE, NAKAGAWA, JOÃO, *Sementes, Ciência, Tecnologia e Produção*, Fundação Cargill, Campinas, 1983, 429 p.
- CHANCHAI, R., WHITE, G.M., LOEWER, O.J., EGLI, D.B., Influence of Heated Air Drying on Soybean Impact Damage, *Transactions of the ASAE*, n. 19(2), p. 372-376, 1976.
- CHAU, N.N., KUNZE, O.R., Moisture Content Variation among Rice Grains, *Transations of the ASAE*, n. 25(4), p. 1037-1040, 1982.
- COLBRY, VERA L., SWOFFORD, THOMAS F., MOORE, ROBERT P., Pruebas de Germinacion en el Laboratorio, Semillas, *Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de America*, Compañia Editorial Continental, México, p. 771-786, 1986.
- COMISSÃO ESTADUAL DE SEMENTES E MUDAS, *Padrões de Sementes*, São Paulo, 1998 / 1999.
- COOKE, J.R., DICKENS, J.W., A Centrifugal Gun for Impaction Testing of Seeds, *Transations of the ASAE*, n. 14(1), p.147-155, 1971.

- DEVAHASTIN, S., BASSILA, S., MUJUMDAR, A. S., A Colorimetric Technique to Quantify Wheat Grain Damage During Drying, *Drying Technology*, vol. 16, n. 1 e 2, p. 341 – 349, 1998.
- DICKSON, M.H., BOETTGER, M.A., Factors Associated with Resistance to Mechanical Damage in Beans, *Journal of American Society for Horticultural Science*, n. 101, p. 541-544, 1976.
- DUCZMAL, K., Mechanical Injury in Seeds, *Acta Horticulturae*, n. 111, p. 235-238, 1981.
- FERNANDEZ, GLADYS, JOHNSTON, MIRNA, Seed Vigour Testing in Lentil, Bean, and Chickpea, *Seed Science and Technology*, n.23, p. 617-627, 1995.
- FISCUS, D.E., FOSTER, G.H., KAUFMANN, H.H., Grainstream Velocity Measurements, *Transactions of the ASAE*, n. 14(1), p.162-166, 1971
- FORNAL, J., SADOWSKA J., KACZYNSKA, B., Damage of Faba Bean Seeds During Drying, *Drying Technology*, v.11, n.6, p. 1293-1309, 1993.
- FRETT, J.J., PILL, W.G., MORNEAU, D.C., A Comparison of Priming Agents for Tomato and Asparagus Seeds, *HortScience*, n. 26, p. 1158-1159, 1991.
- GELDART, D., *Gas Fluidization Technology*, Ed. Geldart, D., John Willy and Sons, 1986.
- HOKI, M., PICKET, L.K., Factors Affecting Mechanical Damage of Navy Beans, *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, n. 16, p.1054-1057, 1973.
- INSTITUTO BRASILEIRA DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, *Anuário Estatístico do Brasil*, vol. 57, Rio de Janeiro, 1997.
- JUMAH, R. Y., MUJUMDAR, A. S., RAGHAVAN, G. S. V., A Mathematical Model for Constant and Intermittent Batch Drying of Grains in a Novel Rotating Jet Spouted Bed., *Drying Technology*, v.14, n.3/4, p. 765-802, 1996.

- JUSTICE, O.L., Essentials of Seed Testing, in KOZLOWSKI, *Seed Biology*, v.3, p.301, 1972.
- KALWAR, M. I., RAGHAVAN, G. S. V., MUJUMDAR, A. S., Circulation of Particles in Two-Dimensional Spouted Beds with Draft Plates, *Powder Technology*, n.77, p. 233-242, 1993.
- KANNENBERG, L.W., ALLARD, R.W., Na Association Between Pigment and Lignin Formation in the Seed Coat of Lima Bean, *Crop Science*, n. 4, p. 621-622, 1964.
- LIMA, ANA CLÁUDIA C. DE, *Análise Experimental da Secagem de Feijão em Leito Fixo, Leito de Jorro e Leito de Jorro Fluidizado*, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1995, 151 p., Dissertação de Mestrado.
- MACEDO, R.L.G., *Influência da Temperatura, Substrato e Luminosidade na Germinação e Avaliação da Qualidade Fisiológica das Sementes de Seringueira*, Lavras: Esal, 1985, 77 p.
- MARCOS F., JÚLIO, CÍCERO, SÍLVIO M., SILVA, WALTER R. DA, *Avaliação da Qualidade das Sementes*, Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1987, 230 p.
- MARSANS, GUILHERMO JORGE, *Manejo y Conservación de Granos*, Editorial Hemisfério Sur S.A., Buenos Aires, 1987, 266 p.
- MATA, MARIO E. R. M. C., *Efeitos de Secagem em Altas Temperaturas por Curtos Períodos de Tempo, em Camada Estacionária, sobre a Armazenabilidade de Sementes e Feijão, Variedade Carioca: Avaliação experimental, Modelagem e Simulação*, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 1997, Tese de Doutorado.
- MATHUR, KISHAN B., EPSTEIN, NORMAN, *Spouted Beds*, Academic Press, New York, 1974, 304 p.
- MCCABE, WARREN L., SMITH, JULIAN C., *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*, volume 1, Editorial Reverté S.A., Barcelona, 1978, 498p.

- MCLEAN, KEN A., *Drying and Storing Combinable Crops*, Farming Press Limited, Ipswich, 1989, 257 p.
- MOREY, R.V., KEENER H.M., THOMPSON T.L., WHITE, G.M., BAKKER-ARKEMA, F.W., The Present Status of Grain Drying Simulation, *ASAE Paper*, n. 78, 1978.
- MUJUMDAR, ARUN S., *Handbook of Industrial Drying*, Marcel Dekker Inc., New York, 1995, 742 p.
- OVERHULTS, D.G., WHITE, G.M., HAMILTON, H.E., ROSS, I.J., Drying Soybean with Heated Air, *Transactions of the ASAE*, n. 16(1), p. 112-113, 1973.
- OWER, E., PANKHURST, R. C., The Measurement of Air Flow, *Pergamon Press*, p. 148 – 183, 1997.
- PARRY, J.L., Mathematical Modelling and Computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying, *J. Agric. Engr.*, n. 32, p.1-29, 1985.
- PASSOS, M. L., MUJUMDAR, A. S., RAGHAVAN, G. S. V., Pressure Drop in Slotted Spouted Beds of Grains: Comparison of Data with Models, *Powder Technology*, n.52, p. 131-137, 1987.
- PAULSEN, M.R., NAVE, W.R., GRAY, L.E., Soybean Seed Quality as Affected by Impact Damage, *Transactions of the ASAE*, n. 24(6), p. 1577-1589, 1981.
- PEÇANHA, R. P., MASSARANI, G., Dimensão, Característica e Forma de Partículas, *Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos*, p. 302 – 312, 1986.
- PENA-VALDIVIA, C.B., ORTEGA-DELGADO, M.L., Partial Chemical Composition Free Soluble Sugars and Unavailable Carbohydrates in the Embryonic Axis and Seed Coats of *Phaseolus vulgaris* Canario Group, *Qualitas Plantarum Plant Foods for Human Nutrition*, n. 36, p. 27-34, 1986.

- PFOST, D., Environmental and Varietal Factors Affetings Damage to Seed Soybean During Drying, *Ohio State University*, 1975, Tese de Doutorado.
- PILL, W.G., FRETT, J.J., MORNEAU, D.C., Germination and Seedling Emergence of Prime Tomato and Asparagus Seeds under Adverse Conditions, *HortScience*, n. 26, p. 1160-1162, 1981.
- PULSEN, M. R., NAVE, W. R., GRAY, L. E., Soybean Seed Quality as Affected by Impact Damage, *Transation of the ASAE*, v.24, n.6, p. 1577-1589, 1981.
- RAGHAVAN, G. S. V., KALWAR, M. I., MUJUMDAR, A. S., Static Vertical Pressure of Grains on Air Inlets of Two – Dimensional Non – Aerated Spouted Beds, *Powder Handling & Processing*, vol. 10, n. 1, p. 21 – 26, 1998.
- ROJANASAROJ, C., WHITE, G.M., LOEWER, O.J., ENGLER,D.B., Influence of Heated Air Drying on Soybean Impact Damage, *Transations of the ASAE*, n. 19(2), p.372-377, 1976.
- ROCHA, S.C.S., TARANTO, O.P., Fluidodinâmica do Leito de Jorro Bidimensional para Partículas não Esféricas, *IX Cobeq*, v. 1, p. 117-126, 1992.
- RUMSEY, T.R., Optimum Air Flow Rates for Walnut Drying, *ASAE Paper*, n.85, 1985.
- RUMSEY, T.R., Walnut Moisture Content Variability During Fixed Bed Drying, *ASAE Paper*, n. 87, 1987.
- SECRETARIA DA AGRICULTURA DO ESTADO DE SÃO PAULO, *Padrões de Sementes*, São Paulo, 1998.
- SRISUMA, N., RUENGSAKULRACH, S., UEBERSAX, M.^a, BENNINK, M.R., HAMMERSCHMIDT, R., Cell wall Polysaccharides of Navy Benas, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, n. 39, p. 855-858, 1991.

- STRUMILLO, CZESLAW, KUDRA, TADEUSZ, *Drying: Principles, Applications and Design*, Gordon and Breach Science Publishers S.A., Montreux, 1986, 448 p.
- TUMSEY, TOM, Modeling Moisture Variability in a Fixed-Bed Dryer, *Drying Technology*, v.9, n.1, p. 61-78, 1991.
- WADSWORTH, J.I., MATTHEWS, J., SPADARO, J.J., Moisture Content Variation in Freshly Harvested Rice Associated with Kernel Thickness, *Transation of the ASAE*, n. 25(4), p. 1127-1130, 1982.
- WALKER, R.J., BARRE, H.J., The Effects of Drying on Soybean Germination and Crackage. *ASAE Paper*, n. 72, 1972.
- WEIKERT, MÁRIO J. B., FRAGA, ANTÔNIO C., Teste de Germinação em Sementes de Café, *Ciência e Prática*, v.18, n.3, p. 292-294, 1994.
- WHITE, G.M., LOEWER, O.J., ROSS, I.J., EGLI, D.B., Storage Characteristics of Soybeans Dried with Heated Air, *Transactions of the ASAE*, n. 19(2), p. 306-310, 1976.
- WHITE, G. M., BRIDGES, T. C., LOEWER, O. J., ROSS I. J., Seed Coat Damage in Thin-Layer of Soybeans, *Transations of the ASAE*, v.23, n.2, p. 224-227, 1980.
- WIJANDI, S., COPELAND, L.º, Effect of Origin, Moisture Content, Maturity and Mechanical Damage on Seed and Seedling Vigour of Beans, *Agronomy Journal*, n. 66, p. 546-548, 1974
- ZELENY, LAWRENCE, Medios para Determinar la Humedad de las Semillas, Semillas, *Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de America*, Compañia Editorial Continental, México, p. 787-794, 1986.