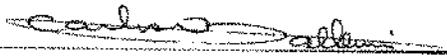


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA Tese de José Antonio
PORTELLA APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 04/04/91.


ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO FERROVIÁRIO**

TESE DE DOUTORADO

**TRANSPORTE UNITÁRIO DE GRÃOS AGRÍCOLAS
POR PROCESSO PNEUMÁTICO, EM DUTOS DE
PEQUENO DIÂMETRO**

Autor: José Antonio Portella

Orientador: Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi

05/91

Trabalho apresentado à Comissão
de Pós-Graduação da Faculdade de
Engenharia Mecânica como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica

05/91/016/038

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO FERROVIÁRIO

TESE DE DOUTORADO

TRANSPORTE UNITÁRIO DE GRÃOS AGRÍCOLAS
POR PROCESSO PNEUMÁTICO, EM DUTOS DE
PEQUENO DIÂMETRO

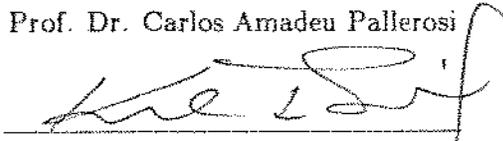
Autor: José Antonio Portella

Orientador: Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi

Aprovada por :



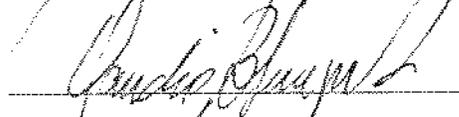
Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi



Prof. Dr. Kamal Abdel R. Ismail



Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro



Prof. Dr. Cláudio B. Sverzut



Dr. Evandro Chartuni Mantovani

Campinas, Abril de 1991

À minha Mãe, que lutou muito para
viver este momento.

À minha Esposa, incansável no
transcorrer desta jornada.

Às minhas Filhas, frutos de ins-
piração e alegrias.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof.Dr. Carlos Amadeu Pallerosi que, além de orientar, soube ser um bom amigo, habilidoso e atencioso, sempre disposto a colaborar e a ensinar;
- À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, pela oportunidade oferecida para o desenvolvimento desta pesquisa;
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio técnico - financeiro, indispensáveis para o sucesso deste trabalho;
- Aos Departamentos Ferroviário e Projeto Mecânico da Faculdade de Engenharia Mecânica - FEM - UNICAMP, por todas as facilidades colocadas à disposição;
- Ao Prof.Dr. Kamal Abdel R. Ismail pela ajuda inestimável em muitos momentos deste trabalho;
- Ao Prof.Dr. João Plaza, pelos conselhos na fase final desta Tese;
- Ao amigo Dr.Derli Chaves Machado da Silva, pelo incentivo nas horas difíceis;
- Aos amigos Luiz Roberto Xavier Ribeiro e Armando Arruda, pelo companheirismo demonstrado nestes anos;
- Ao colega Rubens Stungiski Jr. pela paciência no ensino das técnicas para a confecção deste manuscrito;
- Aos amigos Carlos, Ítalo, Roberto, Raquel, Claudete, Almiro e Nelson pelos bons momentos;
- Aos Técnicos do DPM, Luis, Ferreira, Tiago, José Luis, Daniel e Maurício, pelo auxílio na elaboração dos dispositivos mecânicos e eletrônicos empregados nesta pesquisa.

RESUMO

Esta pesquisa está fundamentalmente relacionada ao desenvolvimento básico de distribuidores fluidos de semente, nos quais grãos unitários são transportados através de dutos de pequeno diâmetro.

O modelo está baseado na teoria do transporte pneumático, envolvendo variáveis de interesse, tais como densidade, tamanho e forma do grão, velocidade e pressão do ar. Como era esperado, a análise é muito complexa.

Os resultados obtidos, envolvendo os efeitos das variáveis relevantes são extremamente importantes, identificando quantitativamente os parâmetros operacionais críticos tais como o diâmetro do duto, o fluxo de ar e a velocidade de deslocamento do grão e sua desaceleração final.

ABSTRACT

This research work is fundamentally related to the development of the basics of grain fluidic distributors in which single grains are pumped along small diameters tubes.

The model is based upon pneumatic transport theory involving variables of interest such density, size and form of grain, velocity an air pressure. As expected, the analysis is very complex.

The obtained results involving the effects of the relevant variables are extremelly important in quantitively identifying the critical operational parameters, such as tube diameter, air flow and translational velocity of the grain and its final deceleration.

Conteúdo

1 APRESENTAÇÃO	8
2 INTRODUÇÃO	10
2.1 Características Físicas e Aerodinâmicas do Grão	10
2.1.1 Teoria do transporte pneumático	10
2.1.2 Coeficiente de atrito grão/duto	19
2.1.3 Coeficiente de arrasto	20
2.1.4 Velocidade terminal	24
2.1.5 Área projetada da partícula	26
2.1.6 Esfericidade X Velocidade terminal e Coeficiente de arrasto.	28
2.1.7 Obtenção da Velocidade terminal através da relação Coeficiente de arrasto - Número de Reynolds	31
2.1.8 Variáveis envolvidas em uma análise dinâmica de transportadores pneumáticos.	35
2.2 Técnicas de Medida e Instrumentação	36
2.2.1 Sensoreamento do grão no duto	36
2.2.2 Técnicas de medição da velocidade da partícula	40
2.2.3 Técnicas de medida do volume e área superficial do grão	41
2.2.3.1 Teoria	41
2.2.4 Análise estatística dos resultados	44
2.3 Semeadoras Pneumáticas	46
2.3.1 Teoria	46
2.3.2 Sistemas de distribuição	50
2.3.2.1 Semeadoras pneumáticas por sucção de ar	50
2.3.2.2 Semeadoras pneumáticas por pressão de ar	51

3	MATERIAL E MÉTODOS	58
3.1	Generalidades	58
3.2	Produtos Testados	59
3.3	Características Físicas e Aerodinâmicas dos Produtos Testados	59
3.3.1	Massa Específica Aparente	59
3.3.1.1	Material e Métodos	59
3.3.2	Massa Específica Real	62
3.3.2.1	Material e Métodos	62
3.3.3	Teor de Umidade	63
3.3.3.1	Material e Métodos	63
3.3.4	Diâmetro Equivalente	63
3.3.4.1	Material e Métodos	63
3.3.5	Massa Unitária dos Produtos Testados	64
3.3.5.1	Material e Métodos	64
3.3.6	Volume dos Produtos Testados	64
3.3.6.1	Material e Métodos	64
3.3.7	Velocidade Terminal Experimental	64
3.3.7.1	Material e Métodos	64
3.3.8	Velocidade Terminal Teórica	66
3.4	A Placa de Orifício	66
3.4.1	Material e Métodos	66
3.4.1.1	Calibração da placa de orifício	67
3.4.1.2	Coefficientes de Vazão	68
3.4.1.3	Límites de Aplicação	71
3.4.1.4	Tolerâncias	71
3.5	Calibração do Ventilador Turbo Alimentador	71
3.5.1	Material e Métodos	71
3.6	Perda de carga no duto	72
3.6.1	Material e Métodos	73
3.7	Instrumentação	75
3.7.1	Sensores Óticos	75
3.7.2	Funcionamento do circuito eletrônico	80
3.7.3	Osciloscópio	80

3.8	Desaceleradores	81
3.8.1	Desacelerador tipo despressurizador na linha de pressão	82
3.8.2	Desacelerador tipo despressurizador, com fluxo de ar contrário.	82
3.8.3	Desacelerador tipo despressurizador, com curva 90° na vertical.	83
3.8.4	Desacelerador tipo despressurizador, com terminal helicoidal.	83
3.9	Análise Estatística dos Dados	84
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	87
4.1	Características Físicas e Aerodinâmicas dos Produtos Testados	87
4.1.1	Massa específica aparente	87
4.1.2	Massa específica real	88
4.1.3	Teor de umidade	88
4.1.4	Diâmetro equivalente	88
4.1.5	Massa unitária	88
4.1.6	Volume médio	88
4.1.7	Velocidade terminal experimental	89
4.1.8	Velocidade terminal teórica	89
4.2	Calibração da Placa de Orifício	96
4.3	Perda de Carga, Velocidade Média do Ar e Vazão de Ar.	97
4.4	O Transporte do grão e a variância dos resultados.	100
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES - Fase 1: Efeito do diâmetro e comprimento do duto sobre a velocidade e aceleração do grão.	105
5.1	Efeito do diâmetro e do comprimento do duto na velocidade de deslocamento do grão	106
5.1.1	Efeito do diâmetro e comprimento do duto na velocidade de bolas de madeira	106
5.1.1.1	Características do produto	106
5.1.1.2	Comportamento ao longo do duto	107
5.1.2	Efeito do diâmetro e comprimento do duto na velocidade de grãos de soja cultivar Foscarini	108
5.1.2.1	Características do produto	108
5.1.2.2	Comportamento ao longo do duto	108
5.1.3	Efeito do diâmetro e comprimento do duto na velocidade de grãos de feijão, cultivar Carioquinha	109

5.1.3.1	Características do produto	109
5.1.3.2	Comportamento ao longo do duto	109
5.1.4	Efeito do diâmetro e comprimento do duto na velocidade de grãos de milho, cultivar AG 162	110
5.1.4.1	Características do produto	110
5.1.4.2	Comportamento ao longo do duto	110
5.1.5	Efeito do diâmetro e comprimento do duto na velocidade de grãos de milho, cultivar AG 401	111
5.1.5.1	Características do produto	111
5.1.5.2	Comportamento ao longo do duto	111
5.1.6	Comentários	112
5.2	Efeito do diâmetro e do comprimento do duto na aceleração do grão	117
5.2.1	Comentários	119
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES - Fase 2 : Desaceleração do Grão	124
6.1	Introdução	124
6.2	Dispositivo experimental	125
6.3	Despressurizador com terminal horizontal	126
6.3.1	Comportamento da bola de madeira nas diferentes secções do duto.	126
6.3.2	Comportamento da soja nas diferentes secções do duto.	126
6.3.3	Comportamento do feijão nas diferentes secções do duto.	127
6.3.4	Comportamento do milho AG 162 nas diferentes secções do duto.	128
6.3.5	Comportamento do milho AG 401 nas diferentes secções do duto.	128
6.4	Despressurizador com terminal vertical	135
6.5	Despressurizador com terminal helicoidal	135
6.5.1	Comportamento da bola de madeira nas diferentes secções do duto.	135
6.5.2	Comportamento da soja nas diferentes secções do duto.	137
6.5.3	Comportamento do feijão nas diferentes secções do duto	137
6.5.4	Comportamento do milho AG 162 nas diferentes secções do duto.	139
6.5.5	Comportamento do milho AG 401 nas diferentes secções do duto.	140
7	DISCUSSÕES	146
7.6	Efeitos do tipo de desacelerador	147
7.7	Efeitos do contrafluxo de ar	149

8 CONCLUSÕES	151
9 TRABALHOS FUTUROS	152
10 Bibliografia	153

Lista de Tabelas

2.1	Varição das propriedades físicas e aerodinâmicas para 4 diferentes formas de corpos. - FONTE: MOHSENIN, 1968	27
3.1	Coefficientes de vazão para tubos de pequeno diâmetro. - FONTE: DELMEÉ, Manual de Medição de Vazã	70
4.1	Massa Específica Aparente dos Produtos Testados, em g/cm^3	87
4.2	Massa Específica Real dos Produtos Testados, em g/cm^3	88
4.3	Teor de Umidade dos Produtos Testados, em %	90
4.4	Diâmetro Equivalente dos Produtos Testados, em cm	90
4.5	Massa Unitária dos Produtos Testados, em g	91
4.6	Volume Médio dos Produtos Testados, em cm^3	91
4.7	Velocidade Terminal Experimental, em m/s	92
4.8	Relações entre CRe^2 , Re e C para corpos esféricos.	92
4.9	Calibração de uma Placa de Orifício com as seguintes especificações: $d = 2,54$ cm ; $\beta = 0,5$; conexões $p_1 = 1d$ e $p_2 = 0,5d$	97
4.10	Perda de carga, em cm H_2O por metro linear de tubulação, para dutos de vidro com diâmetros internos de 15mm, 20mm e 25mm.	99
4.11	Velocidade média do fluxo de ar no interior da tubulação, em m/s	100
4.12	Vazão de ar no interior da tubulação, em m^3/h	101
4.13	Variância do tempo de distribuição (VAR(t) x 10^3s), dos produtos testados, no duto de 15mm de diâmetro interno.	102
4.14	Variância do tempo de distribuição (VAR(t) x 10^3s), dos produtos testados, no duto de 20 mm de diâmetro interno.	103

4.15	Variância do tempo de distribuição ($\text{VAR}(t) \times 10^3 \text{s}$), dos produtos testados, no duto de 25 mm de diâmetro interno.	104
5.1	Velocidade Média de Transporte de Bolas de Madeira ao Longo do Duto, com uma Velocidade de Ar Equivalente a 30 m/s	107
5.2	Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Soja ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.	108
5.3	Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Feijão ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s	110
5.4	Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Milho AG 162 ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s	111
5.5	Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Milho AG 401 ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s	112
5.6	Velocidade de Transporte de Grãos Unitários de Produtos Agrícolas, em m/s, em Relação a uma Velocidade Média do Ar Igual a 30 m/s.	112
5.7	Aceleração de Bolas de Madeira ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.	117
5.8	Aceleração de Grãos Unitários de Soja ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.	118
5.9	Aceleração de Grãos Unitários de Feijão ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.	118
5.10	Aceleração de Grãos Unitários de Milho AG 162 ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.	118
5.11	Aceleração de Grãos Unitários de Milho AG 401 ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.	119
5.12	Aceleração de Grãos Unitários de Produtos Agrícolas em m/s^2 , em relação a uma Velocidade Média de Ar igual a 30 m/s.	119
5.13	Velocidade de ar necessária para imprimir uma aceleração aos produtos testados a um nível de 10 m/s^2	120
7.1	Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Produtos Agrícolas, em m/s, na Zona de Aceleração de Três Diferentes Sistemas Desaceleradores.	148
7.2	Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Produtos Agrícolas, em m/s, no Desacelerador de Três Diferentes Sistemas Desaceleradores.	148

7.3 Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Produtos Agrícolas, em m/s, na Zona de Desaceleração de Três Diferentes Sistemas Desaceleradores. . . 149

Lista de Figuras

2.1	Diagrama de corpo livre de uma partícula singularizada - FONTE: CRANE & CARLETON, 1957	11
2.2	Fluxo ao redor de corpos imersos. - FONTE: MOHSENIN, 1968	22
2.3	Efeito do formato, tamanho e orientação inicial no coeficiente aerodinâmico de grãos agrícolas. - FONTE: GARRET & BROOKER, 1965	29
2.4	Coefficiente de arrasto para formas geométricas e irregulares. - FONTE: MOHSENIN, 1968	30
2.5	Número de Reynolds (Re) versus CRe^2 para esferas. - FONTE: MOHSENIN, 1968	32
2.6	Número de Reynolds (Re) versus CRe^2 para placas, cubos e corpos arredondados. - FONTE: MOHSENIN, 1968	33
2.7	Número de Reynolds (Re) versus CRe^2 para placas redondas. - FONTE: MOHSENIN, 1968	34
2.8	Diagrama esquemático mostrando o método de coleta de dados. - FONTE: KIM & ROHRBACH, 1972	37
2.9	Funções $f_1(Re)$ e $f_2(Re)$. - FONTE: KIM & ROHRBACH, 1972	39
2.10	Modelo elipsoidal mostrando dois perfis obtidos após a rotação da elipse através do eixo de simetria. - FONTE: OKI, WALAWENDER & FAN, 1977	42
2.11	Células de semente. - FONTE: ROHRBACH & HOLMES, 1972	48
2.12	Receptáculos de semente montados num cilindro rotativo. - FONTE: ROHRBACH & HOLMES, 1972	53
2.13	Equilíbrio da semente no bico de sucção. - FONTE: SHORT & HUBER, 1970 . .	54
2.14	Esquema de funcionamento de uma semeadora pneumática por sucção. - FONTE: CATÁLOGO BECKER	55

2.15 Sistema de distribuição de sementes à vácuo. - FONTE: CATÁLOGO JOHN DEERE	56
2.16 Sistema de distribuição pneumática de sementes por pressão de ar. - FONTE: EWING, 1980	57
3.1 Produtos Testados	60
3.2 Equipamento para determinação da massa específica aparente. FONTE: Leitão, 1983 apud BENEDETTI, 1987	61
3.3 Área Projetada e Volume de um grão de Milho AG 401.	65
3.4 Velocidade Terminal Experimental. FONTE: Leitão, 1983 apud BENEDETTI, 1987	67
3.5 Placa de Orifício	68
3.6 Laminador de Fluxo para calibração da placa de orifício.	69
3.7 Conjunto Ventilador - Variador de Velocidade - Tacômetro Digital	72
3.8 Manômetro tipo tubo em U	73
3.9 Linha de transporte - Dutos de vidro.	74
3.10 Sensor de Sementes	77
3.11 Diodo Emissor LD 271 - FONTE: CATÁLOGO SIEMENS	78
3.12 Diodo Receptor SFH 206 - FONTE: CATÁLOGO SIEMENS	79
3.13 Circuito Eletrônico	81
3.14 Osciloscópio com memória.	82
3.15 Desacelerador tipo despressurizador.	83
3.16 Desacelerador tipo despressurizador, com fluxo de ar contrário.	84
3.17 Esquema de funcionamento.	85
3.18 Desacelerador com caída na vertical.	86
3.19 Desacelerador com terminal helicoidal.	86
4.1 Leitura de perda de carga ao longo do duto.	98
5.1 Comportamento do transporte de bolas de madeira ao longo de dutos de diferentes diâmetros e em diferentes comprimentos.	114
5.2 Comportamento do transporte de grãos unitários de soja ao longo de dutos de diferentes diâmetros e em diferentes comprimentos.	114

5.3	Comportamento do transporte de grãos unitários de feijão ao longo de dutos de diferentes diâmetros e em diferentes comprimentos.	115
5.4	Comportamento do transporte de grãos unitários de milho AG 162 ao longo de dutos de diferentes diâmetros e em diferentes comprimentos.	115
5.5	Comportamento do transporte de grãos unitários de milho AG 401 ao longo de dutos de diferentes diâmetros e em diferentes comprimentos.	116
5.6	Aceleração de Bolas de Madeira ao longo de dutos de diferentes diâmetros e comprimentos.	121
5.7	Aceleração de grãos unitários de soja ao longo de dutos de diferentes diâmetros e comprimentos.	121
5.8	Aceleração de grãos unitários de feijão ao longo de dutos de diferentes diâmetros e comprimentos.	122
5.9	Aceleração de grãos unitários de milho AG 162 ao longo de dutos de diferentes diâmetros e comprimentos.	122
5.10	Aceleração de grãos unitários de milho AG 401 ao longo de dutos de diferentes diâmetros e comprimentos.	123
6.1	Dispositivo Experimental para Desaceleração dos Produtos Testados.	130
6.2	Dispositivo auxiliar com injeção de uma corrente de ar contrária.	131
6.3	Comportamento de bolas de madeira nas três secções do Despressurizador com Terminal Horizontal, com e sem o jato auxiliar de ar.	132
6.4	Comportamento de grãos unitários de soja nas três secções do Despressurizador com Terminal Horizontal, com e sem o jato auxiliar de ar.	132
6.5	Comportamento de grãos unitários de feijão nas três secções do Despressurizador com Terminal Horizontal, com e sem o jato auxiliar de ar.	133
6.6	Comportamento de grãos unitários de milho AG 162 nas três secções do Despressurizador com Terminal Horizontal, com e sem o jato auxiliar de ar.	133
6.7	Comportamento de grãos unitários de milho AG 401 nas três secções do Despressurizador com Terminal Horizontal, com e sem o jato auxiliar de ar.	134
6.8	Comportamento de bolas de madeira nas três secções do Despressurizador com Terminal Vertical, com e sem o jato auxiliar de ar.	136
6.9	Comportamento de grãos unitários de soja nas três secções do Despressurizador com Terminal Vertical, com e sem o jato auxiliar de ar.	137

6.10	Comportamento de grãos unitários de feijão nas três secções do Despressurizador com Terminal Vertical, com e sem o jato auxiliar de ar.	138
6.11	Comportamento de grãos unitários de milho AG 162 nas três secções do Despressurizador com Terminal Vertical, com e sem o jato auxiliar de ar.	139
6.12	Comportamento de grãos unitários de milho AG 401 nas três secções do Despressurizador com Terminal Vertical, com e sem o jato auxiliar de ar.	140
6.13	Comportamento das bolas de madeira nas três secções do Despressurizador com Terminal Helicoidal, com e sem o jato auxiliar de ar.	141
6.14	Comportamento de grãos unitários de soja nas três secções do Despressurizador com Terminal Helicoidal, com e sem o jato auxiliar de ar.	142
6.15	Comportamento de grãos unitários de feijão nas três secções do Despressurizador com Terminal Helicoidal, com e sem o jato auxiliar de ar.	143
6.16	Comportamento de grãos unitários de milho AG 162 nas três secções do Despressurizador com Terminal Helicoidal, com e sem o jato auxiliar de ar.	144
6.17	Comportamento de grãos unitários de milho AG 401 nas três secções do Despressurizador com Terminal Helicoidal, com e sem o jato auxiliar de ar.	145

LISTA DE SÍMBOLOS

- a = aceleração da partícula, $[m/s^2]$;
- A_p = área projetada da partícula, $[m^2]$;
- C = coeficiente de arrasto, [adimensional];
- C_L = coeficiente de sustentação, [adimensional];
- CE = coeficiente de vazão combinado, [adimensional];
- d = diâmetro da partícula, $[m]$;
- D = diâmetro do duto, $[m]$;
- D_{eq} = diâmetro equivalente da partícula, $[m]$;
- F_d = força de arrasto, $[kgf]$;
- F_R = força de resistência ao arrasto, $[kgf]$;
- F_L = força de sustentação, $[kgf]$;
- f = fator de fricção do duto, [adimensional];
- f_s = fator de fricção dos sólidos, [adimensional];
- f_o = fator de fricção de Darcy-Weisback, [adimensional];
- g = aceleração da gravidade, $[m/s^2]$;
- G_s = fluxo mássico de sólidos, $[kg/m^2.s]$;
- L = comprimento do duto, $[m]$;
- m = massa da partícula, $[kg]$;
- m_a = massa da água, $[kg]$;
- M = taxa de fluxo mássico do material, $[kg/s]$;
- M_a = taxa de fluxo mássico do ar, $[kg/s]$;

- N = número de partículas, [adimensional];
- P_a = pressão absoluta do ar, $[kgf/m^2]$;
- P_n = pressão média do ar na saída do orifício, $[kgf/m^2]$;
- $(p_1 - p_2)$ = diferencial de pressão, $[kgf/m^2]$;
- Re = número de Reynolds, [adimensional];
- r = raio do duto, [m];
- t = tempo, [s];
- V_d = volume deslocado, $[m^3]$;
- V_r = volume do recipiente, $[m^3]$;
- V_t = velocidade terminal da partícula, $[m/s]$;
- W = peso da partícula, [kgf];
- β = coeficiente de obstrução, [adimensional];
- ρ = densidade da água, $[kg/m^3]$;
- ρ_a = densidade do fluido, $[kg/m^3]$;
- ρ_p = densidade da partícula, $[kg/m^3]$;
- ρ_{ap} = massa específica aparente, $[kg/m^3]$;
- ρ_r = massa específica real, $[kg/m^3]$;
- ΔH = perda de carga por fricção das partículas, $[kgf/m^2]$;
- ΔP_f = diferencial de pressão quando apenas o ar está fluindo, $[kgf/m^2]$;
- ΔP_m = diferencial de pressão quando o material está sendo transportado, $[kgf/m^2]$;
- ϑ_a = velocidade do fluido, $[m/s]$;
- ϑ_p = velocidade da partícula, $[m/s]$;

- μ = viscosidade do fluido, [kgf/m.s];

- θ = ângulo de inclinação do duto em relação a horizontal, [graus].

Capítulo 1

APRESENTAÇÃO

O Brasil é um País reconhecidamente agrícola. A cada ano são semeados mais de 30 milhões de hectares de terra, produzindo cerca de 60 milhões de toneladas de grãos. Destes, destacam-se a soja, o milho e o feijão, pela importância na balança econômica do País. A área agrícola ocupada anualmente por estas culturas equivale a 40% do total semeado, razão pela qual a atenção sobre o seu sistema de produção deva ser maior. É conhecido o fato de que as semeadoras mecânicas hoje empregadas no plantio destas culturas, causam sérios danos mecânicos às sementes, através dos mecanismos dosadores (rotor acanalado reto, pratos perfurados ou mesmo dedos prensores). Para solucionar este problema propôs-se a utilização de semeadoras que possuam dosadores pneumáticos ou sistemas pneumáticos de transporte de grãos em dutos, os quais não afetam os grãos e nem alteram suas características.

O trabalho de pesquisa apresentado a seguir diz respeito ao desenvolvimento de princípios básicos para o projeto de um distribuidor fluido de sementes. Foi estudada a singularização do grão, empregando-se um fluxo de ar através de dutos de pequeno diâmetro, desde o ponto de alimentação até a sua colocação no solo, em espaçamentos bem definidos. A base de todo o trabalho foi dirigida para o controle e monitoramento deste grão dentro da tubulação.

Os grãos agrícolas mais tradicionais como trigo, soja, milho, feijão e sorgo, não possuem um formato regular e suas superfícies frequentemente são rugosas, razão pela qual é fundamental caracterizar as dimensões dos grãos, seu volume e área projetada.

No transporte pneumático de grãos em dutos, ocorrem forças aerodinâmicas durante o movimento relativo entre o ar e o grão, sendo essencial conhecer a pressão e a quantidade de ar necessárias para transportar uma dada taxa de material, bem como conhecer a velocidade do

grão à medida que ele se desloca através do duto.

A teoria foi aplicada numa tentativa para encontrar fórmulas matemáticas que descrevam o processo físico. Os resultados obtidos comprovam a dificuldade em transferir as formulações teóricas para o que realmente acontece na prática. As muitas variáveis {densidade, tamanho, forma e peso do grão, arranjo da tubulação, densidade do ar, pressão e velocidade, etc...}, todas elas combinadas, fazem com que o problema torne-se complexo.

Complementando este trabalho, procuramos focalizar a detecção da velocidade do grão no duto, monitorando seu transporte por meio de sensores óticos e analisando a aceleração e desaceleração através de um dispositivo pneumático especialmente projetado para esta finalidade.

Os objetivos desta pesquisa foram:

- Analisar o comportamento do transporte unitário de grãos agrícolas sob diferentes vazões de ar e em três diâmetros de duto, verificando o efeito de sua aceleração nas variadas situações.
- Desenvolver e descrever o desempenho dos mecanismos de transporte e de desaceleração do grão.
- Fornecer dados técnicos para que outros dispositivos pneumáticos possam vir a ser projetados.

Assim sendo, esta pesquisa por si só não pretende dar a solução para a variação do espaçamento entre sementes numa semeadora pneumática. Ela vai servir como um estudo quantitativo das variáveis envolvidas, sendo orientada para a identificação dos parâmetros críticos tais como o diâmetro do duto, a vazão de ar e a velocidade de deslocamento da semente e sua desaceleração ao final do duto.

Capítulo 2

INTRODUÇÃO

No estudo do transporte pneumático de grãos, em dutos de pequeno diâmetro, com a finalidade de adaptar esta técnica à uma semeadora de precisão, três áreas distintas foram abordadas:

- a) Características Físicas e Aerodinâmicas do Grão
- b) Técnicas de Medida e Instrumentação
- c) Semeadoras Pneumáticas - Sistemas

2.1 Características Físicas e Aerodinâmicas do Grão

2.1.1 Teoria do transporte pneumático

No final da década de 40 surgiram os primeiros estudos sobre o transporte pneumático de grãos em dutos. VOGT & WHITE [46], estudaram o fluxo de sólidos granulares em tubulações. Seus estudos apontaram a necessidade de se conhecer o efeito de algumas variáveis, tais como, o diâmetro do duto, o volume de fluido e a massa de partículas no fluido, bem como suas propriedades e as do sólido, e seus efeitos na perda de carga por atrito (fricção). FARBAR [16], estudando as características do fluxo de misturas gás-sólidos, encontrou relações críticas entre o fluxo de sólidos e o diâmetro do duto.

CRANE & CARLETON [13], apresentaram uma análise teórica, fornecendo equações que podem ser usadas para prever a perda de pressão numa tubulação. Levaram em conta fatores como:

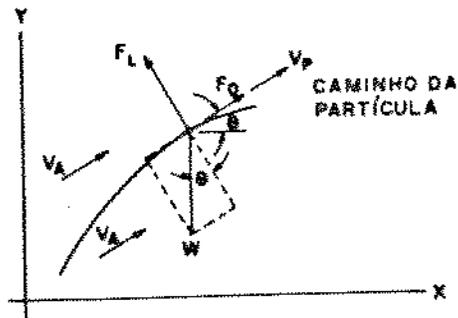


Figura 2.1: Diagrama de corpo livre de uma partícula singularizada - FONTE: CRANE & CARLETON, 1957

- a) material a ser transportado;
- b) taxa de fluxo de sólidos;
- c) velocidade do ar;
- d) diâmetro do duto;
- e) comprimento da tubulação;
- f) inclinação da tubulação.

A análise teórica de CRANE & CARLETON [13] é uma das mais completas e que mais se aproxima ao estudo aqui desenvolvido, servindo como ponto referencial para futuros estudos.

A equação do movimento é desenvolvida a partir do diagrama de corpo livre de uma partícula singularizada, como mostra a Figura 2.1.

Aplicando a Lei de Newton ($\sum F = m.a$) ao sistema, e supondo as forças na direção tangencial, obtemos:

$$\sum F = F_d - W \cdot \frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p} \cdot \text{sen}\theta = m.a \quad (2.1)$$

onde:

- F_d = força de arrasto;
- W = peso da partícula;
- m = massa da partícula;
- A_p = área frontal da partícula;
- ρ_p = densidade da partícula;
- ρ_a = densidade do fluido;
- θ = ângulo de inclinação do duto em relação a horizontal.

A força de arrasto para esferas em queda livre é dada por:

$$F_d = \frac{\rho_p \cdot A_p \cdot v_s^2 \cdot C}{2 \cdot g}$$

Deste modo, a equação (2.1) fica:

$$\frac{\rho_a \cdot (v_a - v_s)^2}{2 \cdot g} \cdot C \cdot A_p - m \cdot g \cdot \frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p} \cdot \text{sen} \theta = m \cdot \frac{dv_s}{dt} \quad (2.2)$$

onde:

- C = coeficiente de arrasto;
- g = aceleração da gravidade;
- v_a = velocidade do fluido;
- v_s = velocidade da partícula;
- A_p = área projetada da partícula;
- t = tempo.

Esta equação serve para uma partícula numa corrente de ar. Mas se as partículas estiverem confinadas numa tubulação, um termo adicional deve descrever as perdas devido ao deslizamento na parede do duto. Seguindo as sugestões de outros pesquisadores, a equação de fricção de Darcy-Weisback será incluída para descrever estas perdas extras, encontradas nos sistemas de transporte pneumático. Assim,

$$H = \frac{f_s \cdot L \cdot v_s^2}{2 \cdot D \cdot g}$$

Reconhecendo que $(L \cdot \rho_s \cdot A_p) = W$ e que $(\Delta P) \cdot A_p = F$ a equação acima pode ser reescrita como:

$$F = \frac{f_s \cdot v_s^2 \cdot m}{2 \cdot D}$$

Subtraindo-se este termo àquele da equação (2.2), obtem-se a equação diferencial do movimento para a partícula no duto:

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{\rho_a \cdot (v_a - v_s)^2}{2 \cdot mg} \cdot C \cdot A_p - g \cdot \frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p} \cdot \text{sen} \theta - \frac{f_s \cdot v_s^2}{2D} \quad (2.3)$$

onde, D = diâmetro do duto.

Quando as condições de estado estacionário prevalecem ($\frac{dv_s}{dt} = 0$), a equação (2.3) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\rho_a \cdot (v_a - v_s)^2}{2 \cdot g} \cdot C \cdot A_p = m \cdot g \cdot \frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p} \cdot \text{sen} \theta + \frac{f_s \cdot v_s^2 \cdot m}{2D} \quad (2.4)$$

Para grãos, no entanto, o termo $(\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p})$ é muito próximo da unidade, de modo que ele será desprezado nos cálculos da perda de pressão.

Convertendo cada um dos termos de força da equação (2.4) em expressões equivalentes para perda de pressão por unidade de fluxo de massa, pelo uso de $G_s = \rho_s \cdot v_s$ obtém-se as seguintes expressões:

1) Para o impacto entre as partículas e a parede do duto,

$$\frac{\Delta H \cdot f_s}{L \cdot G_s} = \frac{f_s \cdot v_s}{2 \cdot D \cdot g \cdot \rho}$$

2) Para a queda estática,

$$\frac{\Delta H \cdot S_h}{L \cdot G_s} = \frac{\text{sen} \theta}{\rho \cdot v_s}$$

3) Para o arrasto da partícula,

$$F(\text{por partícula}) = \frac{\rho_a \cdot C \cdot A_p \cdot (\vartheta_a - \vartheta_s)^2}{2g}$$

O número de partículas presentes em L metros de duto, será:

$$N = \frac{G_s \cdot A_d \cdot L}{\vartheta_s \cdot V_p \cdot \rho_p}$$

onde:

- ΔH = perda de carga por fricção das partículas;
- G_s = fluxo mássico de sólidos;
- L = comprimento do duto;
- f_s = fator de fricção dos sólidos;
- S_h = pressão estática;
- N = número de partículas;
- ρ = densidade da água.

Deste modo, a força total exercida nos sólidos, em L metros de duto será: F (total) = F (por partícula) x N.

Mudando a perda por unidade de fluxo de massa para:

$$\frac{\Delta H}{L \cdot G_s} = \frac{\rho_a \cdot C \cdot A_p \cdot (\vartheta_a - \vartheta_s)^2}{\rho \cdot 2 \cdot g \cdot \vartheta_s \cdot V_p \cdot \rho_p}$$

e substituindo estas três expressões equivalentes na equação de força (2.4), obtemos a seguinte equação:

$$\frac{\rho_a \cdot C \cdot A_p \cdot (\vartheta_a - \vartheta_s)^2}{\rho \cdot 2 \cdot g \cdot \vartheta_s \cdot V_p \cdot \rho_p} = \frac{\text{sen}\theta}{\rho \cdot \vartheta_s} + \frac{f_s \cdot \vartheta_s}{2 \cdot D \cdot g \cdot \rho}$$

Resolvendo esta equação para f_s , resulta:

$$f_s = \frac{D \cdot [\rho_a \cdot C \cdot A_p \cdot (\vartheta_a - \vartheta_s)^2 - 2 \cdot g \cdot V_p \cdot \rho_p \cdot \text{sen}\theta]}{V_p \cdot \rho_p \cdot \vartheta_s^2} \quad (2.5)$$

Esta expressão pode ser usada para determinar f_s experimentalmente, através dos dados a serem coletados. A perda de carga total para um dado comprimento de duto é composta de três fatores:

$$\Delta H = \Delta H_{sf} + \Delta H_{sh} + \Delta H_a$$

Se a condição de estado estacionário não for atendida, outro termo deve ser adicionado para descrever as perdas de pressão durante o período de aceleração. A expressão completa para a perda de pressão com fluxo em regime estacionário é:

$$\Delta H = \frac{f_s \cdot \vartheta_s \cdot L \cdot G_s}{2 \cdot D \cdot g \cdot \rho} + \frac{G_s \cdot L}{\vartheta_s \cdot \rho} \cdot \text{sen} \theta + \frac{f_a \cdot L \cdot \vartheta_s^2 \cdot \rho_a}{2 \cdot D \cdot g \cdot \rho} \quad (2.6)$$

onde f_a é o fator de fricção de Darcy - Weisback para o fluxo de ar através da tubulação.

Supondo que o fator de fricção dos sólidos (f_s) pode ser determinado experimentalmente, a única variável desconhecida na equação (2.6) é a velocidade dos sólidos. A equação diferencial do movimento pode ser agora resolvida para ϑ_s em termos das outras variáveis. A equação (2.3) é simplificada usando:

$$r = \frac{A_p \cdot \rho_a}{2 \cdot m \cdot g}$$

$$g = \frac{f_s}{2 \cdot D}$$

$$z = g \cdot \text{sen} \theta$$

$$C = 0,4 + \frac{40}{R_e}$$

Substituindo na equação (2.3) e fatorando a variável ϑ_s , vamos obter:

$$\frac{d\vartheta_s}{dt} = \vartheta_s^2 \cdot [0,4r - y] + \vartheta_s \cdot [-0,8r \cdot \vartheta_a - \frac{r}{x} \cdot 40] + 0,4r \cdot \vartheta_a^2 + \frac{r}{x} \cdot 40\vartheta_a - z$$

Reconhecendo que as únicas variáveis na equação acima são ϑ_s e t , ela pode ser reduzida para uma equação diferencial de primeira ordem na qual as variáveis são separáveis. Isto é evidente fazendo a seguinte substituição:

$$C_1 = 0,4r - y$$

$$C_2 = -0,8r \cdot \vartheta_a - 40 \frac{r}{x}$$

$$C_3 = 0,4r \cdot \vartheta_a^2 + 40 \frac{r}{x} \cdot \vartheta_a - z$$

Assim,

$$dt = \frac{d\vartheta_s}{C_1 \cdot \vartheta_s^2 + C_2 \cdot \vartheta_s + C_3}$$

A solução desta equação é:

$$t = \frac{1}{\sqrt{Q}} \cdot \ln \frac{2 \cdot C_1 \cdot \vartheta_s + C_2 - \sqrt{Q}}{2 \cdot C_1 \cdot \vartheta_s + C_2 + \sqrt{Q}}$$

onde

$$Q = C_2^2 - 4 \cdot C_3 \cdot C_1$$

Desde que as equações iniciais são $\vartheta_s = 0$ quando $t = 0$, a constante de integração C é igual a :

$$C = \frac{1}{\sqrt{Q}} \cdot \ln \frac{C_2 - \sqrt{Q}}{C_2 + \sqrt{Q}}$$

Substituindo na equação para t e resolvendo para ϑ_s , obtemos:

$$\vartheta_s = \frac{Q - C_2^2 + C_2^2 \cdot e^{-t \cdot \sqrt{Q}} - Q \cdot e^{-t \cdot \sqrt{Q}} + 4 \cdot C_1 \cdot \vartheta_s \cdot \sqrt{Q} \cdot e^{-t \cdot \sqrt{Q}}}{2 \cdot C_1 \cdot C_2 - 2 \cdot C_1 \cdot \sqrt{Q}}$$

A velocidade das partículas pode ser agora determinada fazendo-se t tendendo ao infinito. Isto produz a equação resultante:

$$\vartheta_s = \frac{-2 C_3}{C_2 - \sqrt{C_2^2 - 4 \cdot C_1 \cdot C_3}} \quad (2.7)$$

As constantes C_1, C_2 e C_3 são :

$$C_1 = \frac{0,2.A_p.\rho a}{m.g} - \frac{f_s}{2.D}$$

$$C_2 = \frac{-0,4.A_p.\rho a.v_a}{m.g} - \frac{20.A_p.\mu}{m.g.d}$$

$$C_3 = \frac{0,2.A_p.\rho a.v_a^2}{m.g} + \frac{20.A_p.\mu.v_a}{m.g.d} - g.\text{sen}\theta$$

onde:

- d = diâmetro da partícula;
- D = diâmetro do duto;
- Re = número de Reynolds;
- P = pressão;
- μ = viscosidade absoluta.

Agora, conhecendo apenas f_s e f_a e as especificações de projeto e utilizando as equações (2.6) e (2.7), é possível calcular a perda de pressão em qualquer seção reta do duto, quando as condições de estado estacionário prevalecem.

Os dados experimentais obtidos por CRANE & CARLETON [13], utilizando grãos de trigo como material de transporte, indicaram que a análise teórica é válida. Grãos agrícolas, que normalmente possuem propriedades físicas constantes, podem ser transportados satisfatoriamente em dutos, com o auxílio de uma corrente de ar.

Também SHEED [41], estudando a resistência de grãos agrícolas ao fluxo de ar, concluiu que é fundamental conhecer ou estimar as forças envolvidas, principalmente a força de arrasto.

Em sua pesquisa, obteve diversas curvas relacionando a perda de pressão ao fluxo de ar e o tipo de produto empregado.

Na mesma época, após compilarem os estudos teóricos de vários pesquisadores, HITCHCOCK & JONES [24] apresentaram um estudo do transporte de esferas de plástico com 7mm de diâmetro movendo-se em dutos lisos, retos, horizontais e de seção transversal circular. Segundo sua pesquisa, duas relações são exigidas: uma para dar o gradiente de pressão ao longo do

duto, e a outra para dar a velocidade do sólido quando uma dada quantidade de ar transporta uma massa ou um determinado número de partículas.

Estes pesquisadores aplicaram o Teorema de Buckingham Pi para a análise dimensional de vários parâmetros do sistema que afetam as perdas de pressão.

A equação adimensional resultante foi a seguinte:

$$\frac{\Delta P_m}{\rho_a \cdot V_a^2} = f \cdot \left[\frac{R}{D}, \frac{M}{\rho_a \cdot V_a \cdot D^2}, \frac{D}{d}, \frac{\rho_p}{\rho_a}, \frac{\rho_a \cdot V \cdot D}{\mu} \right] \quad (2.8)$$

onde:

- R = o raio de curvatura.

As conclusões de HITCHCOCK & JONES [24] tornaram a técnica bem sucedida para o estudo do transporte pneumático. Para dutos retos, lisos e horizontais, o gradiente de pressão e a velocidade do sólido são dados por:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_f} \cdot f = 0,012 \cdot \left(\frac{M}{M_a} \right)^{0,9} \cdot \left(\frac{v_s^2}{g \cdot D} \right)^{-0,5} \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{-0,9} \quad (2.9)$$

$$\frac{v_s}{v_a} = 6,2 \left(\frac{M}{M_a} \right)^{-0,2} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_a} \right)^{-0,3} \quad (2.10)$$

onde:

- ΔP_m = diferencial de pressão quando o material está sendo transportado;
- ΔP_f = diferencial de pressão quando apenas ar está fluindo;
- f = fator de fricção do duto (adimensional);
- M = taxa de fluxo mássico do material;
- M_a = taxa de fluxo mássico do ar ;

Também concluíram que ocorre um aumento no gradiente de pressão quando o material é adicionado à corrente de ar. Este aumento é proporcional ao fluxo de material e a seu tamanho, sendo inversamente proporcional ao quadrado do diâmetro do duto.

Foi também comprovada que a velocidade da partícula, depois de completamente acelerada, varia basicamente em função do diâmetro do duto, tendo o tamanho, a densidade e o fluxo de material pouco ou nenhum efeito na velocidade.

Na mesma linha de trabalho, BEVERLOO; LENINGER & VAN DE VELDE [5] encontraram bons resultados experimentais com sementes pequenas (linho, espinafre, colza, couve, rabanete, etc...), chegando a uma equação para a taxa de fluxo por unidade de tempo, para orifícios circulares, dada por:

$$M = 35 \cdot \rho_p \cdot \sqrt{g} \cdot (D - 1,4d)^{2,5} \quad (2.11)$$

Como veremos a seguir, em detalhes, a velocidade terminal e o coeficiente de arrasto estão, com frequência, entre os parâmetros que aparecem nas expressões matemáticas, para a correlação entre o movimento de ar e as partículas sólidas.

2.1.2 Coeficiente de atrito grão/duto

O coeficiente de atrito é definido pela relação entre a força de atrito (força resultante das tensões tangenciais) e a força resultante das tensões normais.

De acordo com MOHSENIN [30], as leis básicas que descrevem o fenômeno de atrito foram primeiramente enunciadas por Amontons, apud MOHSENIN [30], sendo posteriormente verificadas e confirmadas por Coulomb, apud MOHSENIN [30].

Dois coeficientes de atrito são considerados para os produtos agrícolas: o primeiro é o coeficiente de atrito estático, determinado pela força que é capaz de vencer a oposição ao movimento entre corpos em contato; o segundo é o coeficiente de atrito dinâmico, determinado pela força que se manifesta na superfície de contato quando há movimento relativo entre os corpos.

Vários métodos foram utilizados para determinar os coeficientes de atrito. Um deles é baseado no ângulo formado por um plano inclinado quando inicia-se o movimento do produto em contato com este plano. Foi utilizado por KRAMER [28], em trabalhos com arroz.

Outro método consiste em montar a superfície em estudo numa base rígida, colocando-se sobre a mesma um recipiente com a amostra. Aplica-se uma força horizontal ao recipiente e

quando ocorre um movimento entre o recipiente que contém as amostras e a base obtemos a medida da força de atrito estático. Este método foi utilizado por RITCHER [38].

BRUBAKER & POS [10]; BICKTER & BUELOW [6] e SNYDER et al [43], utilizaram um método que consiste em mover, com o auxílio de um motor, a superfície que está em contato com a matéria prima, sendo que um registrador de força está ligado à estrutura que contém a matéria prima. A medida das forças de atrito é feita através de extensômetros.

CLARK & McFARLAND [12], propuseram a utilização do equipamento INSTRON UNIVERSAL para a determinação de coeficientes de atrito, sendo que um recipiente contendo as amostras é movimentado sobre a superfície em estudo, que permanece rígida.

2.1.3 Coeficiente de arrasto

Segundo HENDERSON & PERRY [23] quando uma partícula move-se em relação ao fluido no qual está contida, forças gravitacionais, inerciais e friccionais atuam sobre si. A importância relativa destas forças depende do regime de fluxo, o qual normalmente é caracterizado pela aplicação do número de Reynolds, definido por $Re = \frac{\vartheta_s \cdot L \cdot \rho_a}{\mu}$ onde ϑ_s é a velocidade da partícula e μ é a viscosidade cinemática do fluido. Quando a partícula não tem um formato regular, a dimensão L deve ser tomada como a de secção transversal de maior comprimento.

A força gravitacional é simplesmente o peso W da partícula no ar. A força inercial é o produto massa-aceleração, que é igual ao peso da partícula inicialmente caindo assintoticamente a zero, à medida que aproxima-se da velocidade terminal. As forças friccionais na partícula são de dois tipos: em baixos números de Reynolds a inércia do ar deslocado é desprezível e o arrasto é devido apenas à viscosidade, sendo a força de arrasto proporcional à velocidade; em altos números de Reynolds (turbulento), o arrasto resulta da formação de redemoinhos, sendo que este turbilhonamento do ar absorve a energia e seu efeito sobre o arraste da partícula é desprezível. Assim, a força de arrasto será proporcional à velocidade ao quadrado. Isto implica num coeficiente de arrasto, C constante, definido por:

$$F_d = C \cdot A_p \cdot \rho_a \cdot \frac{\vartheta^2}{2} \quad (2.12)$$

onde,

- ϑ = velocidade relativa partícula/fluido.

Sob estas condições, a equação diferencial do movimento pode ser escrita como uma equação de força,

$$m.x + k.x^2 - m.g = 0 \quad (2.13)$$

Comparando a força de arrasto $k.x^2$ na equação anterior, pode-se ver que:

$$k = 0,5 C . A_p . \rho_a \quad (2.14)$$

Se as condições iniciais forem $x = 0$, $t = 0$, então a equação diferencial do movimento integrada duas vezes, resulta em:

$$x = \frac{V_t^2}{g} . \ln . \left[\cos\left(\frac{g}{V_t}\right) \right] . t \quad (2.15)$$

Deste modo, o valor da velocidade terminal V_t é dado por:

$$V_t = \left[\frac{2.m.g}{C.A_p.\rho_a} \right]^{0,5} \quad (2.16)$$

Isto permite o cálculo do coeficiente de arrasto a partir da velocidade terminal, sendo conhecida a área transversal da partícula.

BILANSKI; COLLINS & CHU [7] e BILANSKI & LAL [8], investigaram as propriedades aerodinâmicas de sementes e grãos agrícolas tais como milho, soja, trigo, cevada, aveia, centeio e alfafa. Eles verificaram que todos os materiais encontram-se numa região onde o coeficiente de arrasto é quase constante e onde a resistência será proporcional ao quadrado da velocidade. O valor médio de 0,425 para o coeficiente de arrasto está em concordância com outros autores que usam em seus cálculos a área frontal da partícula como sendo igual a $\left(\frac{\pi}{4}\right).L_1.L_2$, onde L_1 e L_2 são as maiores dimensões dos grãos.

MOHSENIN [30] estudou as características aero e hidrodinâmicas dos produtos agrícolas. Segundo ele, quando um fluxo fluido ocorre ao redor de objetos imersos, a ação das forças

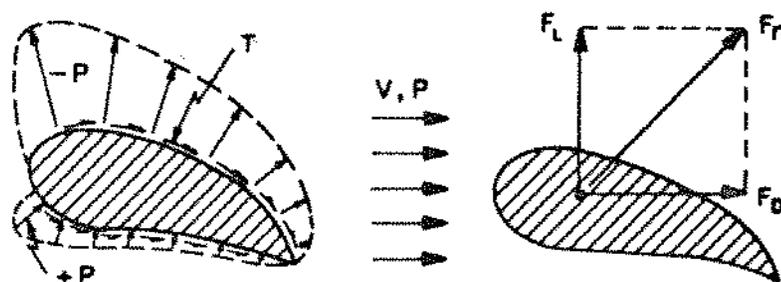


Figura 2.2: Fluxo ao redor de corpos imersos. - FONTE: MOHSENIN, 1968

envolvidas pode ser ilustrada como na Figura 2.2. A pressão no lado superior do objeto é menor do que a pressão P , enquanto que no lado inferior é maior do que P . Isto resulta num decréscimo desta pressão ($-P$) no lado superior, indicada por flexas saindo da superfície, bem como um acréscimo desta pressão ($+P$) na parte inferior, indicada por flexas em direção ao objeto. Adicionalmente a estas forças normais à superfície do objeto, existem tensões de cisalhamento (τ) atuando tangencialmente à superfície do objeto, na direção do fluxo, como resultado de efeitos friccionais.

A força resultante F_R pode ser resolvida em componentes, onde F_d é o arrasto e F_L a sustentação. As equações para o cálculo do arrasto e da sustentação tem sido obtidas por análise dimensional, supondo um objeto liso, com uma área projetada A_p , movendo-se através de um fluido de densidade ρ_a , viscosidade μ módulo de elasticidade E e com velocidade V . Assim,

$$F_d = f_1 (A_p, \rho_a, \mu, E, V)$$

$$F_L = f_2 (A_p, \rho_a, \mu, E, V)$$

Empregando-se então os métodos de análise dimensional pode-se estabelecer as seguintes equações para o arrasto e para a sustentação:

$$F_d = C \cdot A_p \cdot \frac{\rho_a \cdot V^2}{2} \quad (2.17)$$

$$F_L = C_L \cdot A_p \cdot \frac{\rho_a \cdot V^2}{2} \quad (2.18)$$

onde C e C_L são os coeficientes de arrasto e de sustentação, respectivamente.

No entanto, na maioria das aplicações de engenharia agrícola o objeto em movimento está livre para assumir sua própria e aleatória orientação. Por esta razão, a força resistiva real F_R deve ser dada em termos de um coeficiente de arrasto total C , conforme a seguinte equação:

$$F_R = 0,5 \cdot C \cdot A_p \cdot \rho_a \cdot V^2 \quad (2.19)$$

onde F_R é a força de resistência ao arrasto = peso da partícula na velocidade terminal.

Finalmente FLEMMER & BANKS [17] propuseram uma aproximação matemática dos dados experimentais até então obtidos sobre o coeficiente de arrasto de uma esfera. A expressão proposta é:

$$C = \frac{24}{Re} \cdot 10^E \quad (2.20)$$

onde,

$$E = 0,261 Re^{0,369} - 0,105 Re^{0,431} - \frac{0,124}{1 + (\log_{10} Re)^2}$$

Segundo os autores, esta equação proporciona uma precisão muito boa para números de Reynolds de até $Re < 3 \cdot 10^5$

2.1.4 Velocidade terminal

HAWK ; BROOKER & CASSIDY [22] estudaram as características aerodinâmicas de trigo, soja e milho. Seu principal enfoque foi a velocidade terminal do grão, utilizando o seguinte método: um grão é colocado num fluxo de ar vertical e a velocidade do ar é ajustada até que o grão esteja suspenso, com pequeno ou nenhum movimento vertical. Desde que as forças atuantes no corpo estão em equilíbrio, a velocidade do ar é igual à velocidade terminal da partícula.

Os autores observaram que durante os testes da velocidade terminal os grãos não tiveram a tendência de aderir-se à parede do duto. Devido ao seu formato irregular, os grãos vez por outra batem na parede e giram sobre si, voltando para o centro do duto.

Os grãos de trigo e soja, em sua maioria, assumiram uma posição com a maior dimensão perpendicular à corrente de ar. Já o milho assumiu uma posição com seu eixo mais longo perpendicular à corrente de ar, mas com um turbilhonamento maior do que aquele notado com trigo e soja.

Neste estudo as faixas das velocidades terminais foram:

Trigo - 6,49 a 7,96 m/s

Soja - 12,07 a 13,50 m/s

Milho - 8,17 a 9,91 m/s

BENEDETTI [4] apresenta um estudo da influência do teor de umidade sobre as propriedades físicas de grãos agrícolas, concluindo que a velocidade terminal de milho, soja e feijão, aumenta com o aumento do teor de umidade, até umidades ao redor de 18 a 22%, diminuindo com umidades acima deste valor.

Muitos pesquisadores aceitam que a velocidade das partículas é um fator importante para determinar o tipo de fluxo e para encontrar a perda de pressão que ocorre durante o transporte pneumático. PREM CHAND & GHOSH [37] reconheceram a importância da velocidade da partícula e desenvolveram um método de prever esta velocidade baseado nas propriedades físicas do sistema. Após uma minuciosa análise teórica do movimento da partícula, chegaram à seguinte equação:

$$V_p = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot f_c \cdot \frac{\rho_p}{\rho_a} \cdot \frac{d}{C} \cdot g} + S \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{f_c}{C} \cdot \frac{d}{D} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_a}} \right] \quad (2.21)$$

Eles concluíram que, além do formato, tamanho e densidade das partículas, o coeficiente de fricção e o de restauração acabaram por afetar a velocidade terminal. Sua equação final foi comprovada experimentalmente e é válida para o transporte pneumático em estado estacionário num duto horizontal.

Segundo MOHSENIN [30], em queda livre o objeto alcançará uma velocidade terminal constante, na qual a força gravitacional, adicionada à força de sustentação, é igual à força de arrasto.

Para obter-se uma expressão geral para a velocidade terminal façamos a força gravitacional ser igual à força de resistência ao arrasto, e a velocidade igual à velocidade terminal ou seja, $F_g = F_d$ quando $V = V_t$. Substituindo-se por F_g e F_d , na expressão para a velocidade terminal, resulta:

$$m \cdot g \cdot \left[\frac{(\rho_p - \rho_a)}{\rho_p} \right] = 0,5 C A_p \rho_a V_t^2$$

ou seja:

$$V_t = \left[\frac{2 \cdot m \cdot (\rho_p - \rho_a)}{\rho_p \cdot \rho_a \cdot A_p \cdot C} \right]^{0,5} \quad (2.22)$$

$$C = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_a)}{V_t^2 \cdot A_p \cdot \rho_p \cdot \rho_a} \quad (2.23)$$

Ainda segundo MOHSENIN [30], para uma esfera de diâmetro d , a substituição para $A_p = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot d^2$ e $m = \left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot \rho_p \cdot g \cdot d^3$ produz a seguinte expressão para a velocidade terminal:

$$V_t = \left[\frac{4 \cdot g \cdot d \cdot (\rho_p - \rho_a)}{3 \cdot \rho_a \cdot C} \right]^{0,5} \quad (2.24)$$

Para condições de fluxo turbulento, na região onde encontra-se $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$, C é igual a aproximadamente 0,44 e a seguinte equação tem representado a velocidade terminal:

$$V_t = 1,74 \cdot \left[g \cdot d \cdot \frac{(\rho_p - \rho_a)}{\rho_a} \right]^{0,5} \quad (2.25)$$

TURTON & CLARK [45] preocuparam-se quanto à velocidade terminal das partículas, chegando à seguinte equação:

$$V_{ta} = \left[\frac{1}{\left(\frac{18^2}{d_a}\right)^{0,824} + \left(\frac{0,321}{d_a}\right)^{1,214}} \right]^{1,214} \quad (2.26)$$

onde, V_{ta} é a velocidade terminal adimensional, definida por:

$$V_{ta} = \left[\left(\frac{4}{3}\right) \cdot \left(\frac{Re}{C}\right) \right]^{1/3} = V_t \cdot \left[\frac{\rho_a^2}{g \cdot \mu \cdot (\rho_p - \rho_a)} \right]^{1/3} \quad (2.27)$$

e d_a é o diâmetro adimensional da esfera, dado por:

$$d_a = \left[\frac{3}{4} \cdot C \cdot Re^2 \right]^{1/3} = d \cdot \left[\frac{g \cdot \rho_a \cdot (\rho_p - \rho_a)}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (2.28)$$

2.1.5 Área projetada da partícula

Procurando caracterizar grãos agrícolas, GARRET & BROOKER [18] afirmam a importância da área projetada do grão. Foi sugerido o uso da média geométrica das três dimensões axiais para determinar a área projetada da partícula. Para qualquer orientação dada, a determinação das dimensões axiais é complicada, pelo formato irregular dos grãos. Mas o peso real e o peso específico de cada grão podem ser determinados. Desde que o volume de cada partícula é $\frac{W}{\rho_p}$, o diâmetro de uma esfera tendo igual volume daquela partícula é:

$$d = \left(\frac{6W}{\pi \cdot \rho_p} \right)^{2/3} \quad (2.29)$$

A área da secção transversal da esfera de igual volume é:

$$A_p = \frac{\pi}{4} \cdot \left[\frac{6W}{\pi \cdot \rho_p} \right]^{2/3} \quad (2.30)$$

Tabela 2.1: Variação das propriedades físicas e aerodinâmicas para 4 diferentes formas de corpos. - FONTE: MOHSENIN, 1968

PARÂMETROS	ESFERA	DISCO FINO	DISCO FINO	CILINDRO INFINITO
Número de Reynolds (Re)	$\frac{d.V.\rho_a}{\mu}$	$\frac{d.V.\rho_a}{\mu}$	$\frac{2L.V.\rho_a}{\mu}$	$\frac{d.V.\rho_a}{\mu}$
Área frontal (A_p)	$\frac{\pi}{4}.d^2$	$\frac{\pi}{4}.d$	$d.L$	$d.L$
Arrasto : Fluxo Laminar $Re < 0,2 : F_d =$ $C \times Re =$	$3\pi.\mu.V.d$ 24	$8\mu.V.d$ $\frac{64}{\pi}$	$5,3\mu.V.d$ $\frac{64}{3}$	$(\frac{4\pi}{K}).\mu.V.L$ $\frac{8\pi}{K}$
Arrasto : Fluxo Turbulento Re(médio) C(médio)	1.10^3 2.10^5 0,44	 > 100 1,12		1.10^2 2.10^5 1,20

onde:

- ρ_p = massa específica da partícula

A área frontal de formatos geométricos não esféricos é definida na Tabela 2.1.

No regime laminar, uma partícula irá reter sua orientação inicial enquanto estiver se ajustando. Alguns pesquisadores tomam a área de menor secção transversal como área frontal para o fluxo laminar.

No fluxo turbulento, a partícula teoricamente irá assumir uma posição de máxima resistência. No entanto, nos estudos aerodinâmicos de grãos agrícolas, BILANSKI et al. [7], descobriram que grãos de trigo possuem uma orientação aleatória em qualquer instante e na verdade giram ao redor de um eixo vertical com sua dimensão mais longa tendendo a estar no plano horizontal. Esta rotação e inclinação foi explicada ser devida ao fato de que a força aerodinâmica num grão assimétrico nunca irá passar através do centro de gravidade, nem será paralelo à velocidade do ar. Esta força pode ser considerada como o somatório da força vertical através do centro de gravidade, uma força horizontal que tende a girar o grão ao redor de um eixo vertical, e um momento no plano vertical, o qual tende a mudar a inclinação do eixo mais longo do grão. Foi observado que a rotação causa um maior arrasto e uma menor velocidade terminal.

A Figura 2.3 mostra o efeito do formato, tamanho e orientação inicial no coeficiente de arrasto de grãos de milho caindo num duto. O diâmetro da esfera de igual volume foi usado no cálculo do número de Reynolds e na área frontal. As variações nas três curvas foram devidas a mudanças na orientação de grãos durante a queda. Como a área projetada varia de maneira contínua, a área característica usada nos cálculos não pode ser suposta ter o mesmo coeficiente de arrasto, necessitando de um grande número de testes para estabelecer este valor.

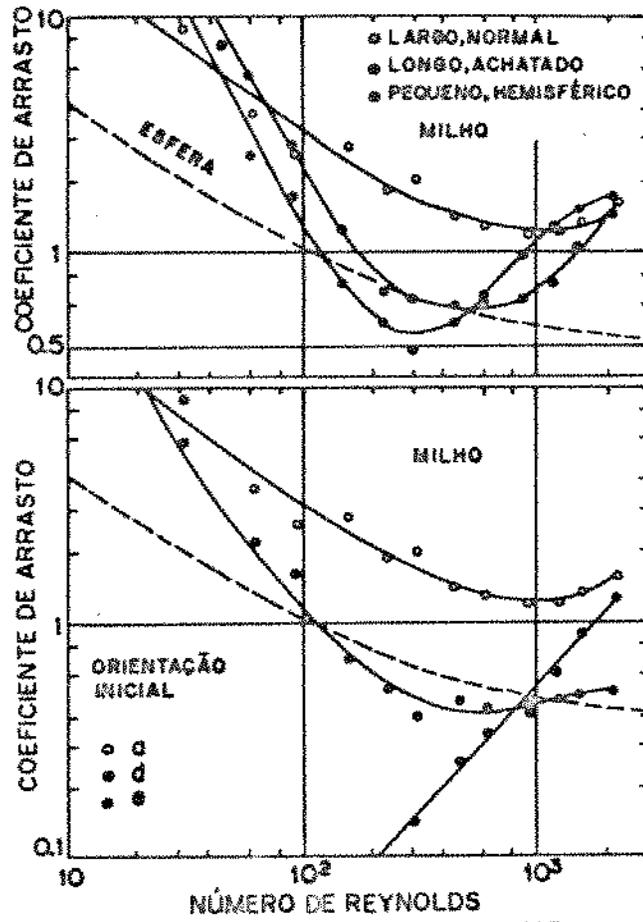
2.1.6 Esfericidade X Velocidade terminal e Coeficiente de arrasto.

Cada pesquisador tem liberdade para escolher o comprimento típico e área frontal no cálculo do número de Reynolds e coeficiente de arrasto. HAWK et al. [22] sugeriram o uso de um método padronizado que tornasse os dados facilmente comparáveis. Foi recomendado o uso de uma esfera de geometria equivalente para tal padronização.

Muito pouco trabalho tem sido feito com formatos irregulares, os quais são particularmente complicados, por sua orientação aleatória e a variedade de métodos para expressar seu tamanho e dimensões a serem usados no cálculo da área frontal. Um dos primeiros trabalhos a serem feitos foi o de SHEED [41] que apresentou dados do coeficiente de arrasto em termos do número de Reynolds, para algumas partículas irregulares. A representação gráfica mostrada na Fig.2.4 é baseada no trabalho de muitos pesquisadores, usando materiais como grãos de areia, cascalho, quartzo, com formatos não bem definidos geometricamente, tanto quanto as de formato geométrico definido como esferas e cubos.

Após muitos anos de estudo sobre transporte pneumático, os mais notáveis e que podem ser provados teoricamente, estão na região laminar. No entanto, a maior parte destes trabalhos foram feitos com modelos simplificados e com partículas de formato bem definido, como esferas ou elipsóides.

PETTYJOHN & CHRISTIANSEN [34] fizeram uma grande pesquisa para obter a correção do formato da partícula. Eles suporam que a força resistiva atuante na partícula era proporcional à sua área superficial. Seus resultados experimentais foram para partículas isométricas, na região laminar, usando um termo denominado "esfericidade" para fazer a correção do formato da partícula. A definição da esfericidade bi-dimensional é a área de uma esfera dividida pela área de uma partícula tendo o mesmo volume que a esfera. As equações de Navier-Stokes descrevem o movimento de elementos fluidos devido às forças viscosas. Estas equações no entanto, contém mais variáveis desconhecidas do que conhecidas, podendo apenas serem resolvidas por sistemas



LETRA	GRÃOS		
	MILHO	TRIGO	AVEIA
a			
b			
c			
d			
e			

Figura 2.3: Efeito do formato, tamanho e orientação inicial no coeficiente aerodinâmico de grãos agrícolas. - FONTE: GARRET & BROOKER, 1965

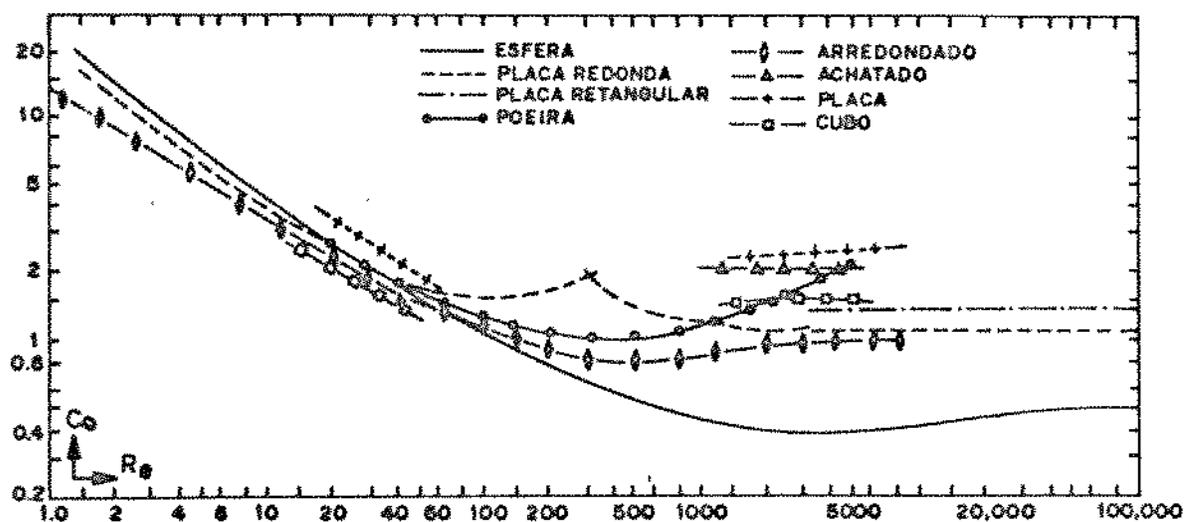


Figura 2.4: Coeficiente de arrasto para formas geométricas e irregulares. -
 FONTE:MOHSENIN, 1968

complexos.

AH CHIN et al. [1] descreveram um método alternativo de usar as equações que tem sido desenvolvidas para esferas e corrigi-las em função do formato irregular, usando um apropriado modificador de forma.

A técnica de análise morfológica desenvolvida na University of Iowa, EUA, utiliza um sistema denominado Particle Image Analyzing System, para converter o perfil de uma partícula em um conjunto de descritores (sinais) matemáticos, que são formulados através de coeficientes de Fourier. Este método usa o contraste entre a partícula e o plano de fundo para definir o perfil. Após as coordenadas x-y terem sido encontradas, elas são transformadas em coordenadas polares. Estas então são analisadas para formar as equações de Fourier.

A maior vantagem da técnica do formato modificado sobre a esfericidade é que ela permite que todos os dados experimentais sejam correlacionados por uma curva de coeficiente de arrasto, isto é, a curva do coeficiente de arrasto para esferas perfeitas. O uso do parâmetro esfericidade, por outro lado, exige uma curva separada do coeficiente de arrasto para cada valor da esfericidade.

2.1.7 Obtenção da Velocidade terminal através da relação Coeficiente de arrasto - Número de Reynolds

Desde que, tanto o coeficiente de arrasto quanto o número de Reynolds incluem um termo velocidade, o cálculo da velocidade terminal através da relação coeficiente de arrasto - número de Reynolds exigirá uma solução por tentativa e erro. Para eliminar este tipo de solução primeiro calculamos os termos CRe^2 ou $\frac{C}{Re}$ e então plota-se contra Re . Desde que estes dois termos não incluem a velocidade terminal e diâmetro da partícula, respectivamente, o valor de CRe^2 ou $\frac{C}{Re}$ pode ser calculado pelas informações dadas e, com uma plotagem adequada o valor correspondente de Re pode ser obtido.

Para partículas esféricas os termos são obtidos por uma combinação de equações, de onde tiramos:

$$CRe^2 = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot D_{eq}^2 \cdot \rho_a \cdot (\rho_p - \rho_a)}{\mu^2 \cdot A_p \cdot \rho_p} \quad (2.31)$$

O gráfico de CRe^2 versus Re para objetos de diferentes formatos foi estudado por vários pesquisadores, sendo que através destes estudos foram plotadas as Figuras 2.5, 2.6 e 2.7, mostradas a seguir:

Para uma melhor compreensão do uso desta metodologia, um exemplo prático utilizando os dados de um estudo das propriedades aerodinâmicas de grãos de feijão é mostrado a seguir:

Para um único feijão:

Maior diâmetro: 1,483 cm

Menor diâmetro: 0,640 cm

Diâmetro intermediário: 0,795 cm

Média geométrica dos diâmetros: $(1,483 \cdot 0,640 \cdot 0,795)^{1/3} = 0,910$ cm

Área frontal: $\frac{\pi}{4} \cdot (0,910)^2 = 0,650 \text{ cm}^2 = 0,000065 \text{ m}^2$

Massa: $0,51 \cdot 10^{-3}$ kg

Volume: $4,3 \times 10^{-7} \text{ m}^3$

Diâmetro da esfera equivalente: 0,945 cm

Densidade volumétrica do feijão: $1180,56 \text{ kg/m}^3$

Densidade volumétrica do ar (ρ_a): $1,293 \text{ kg/m}^3$

Viscosidade cinemática do ar (μ): $0,0000181 \text{ kg/m.s}$

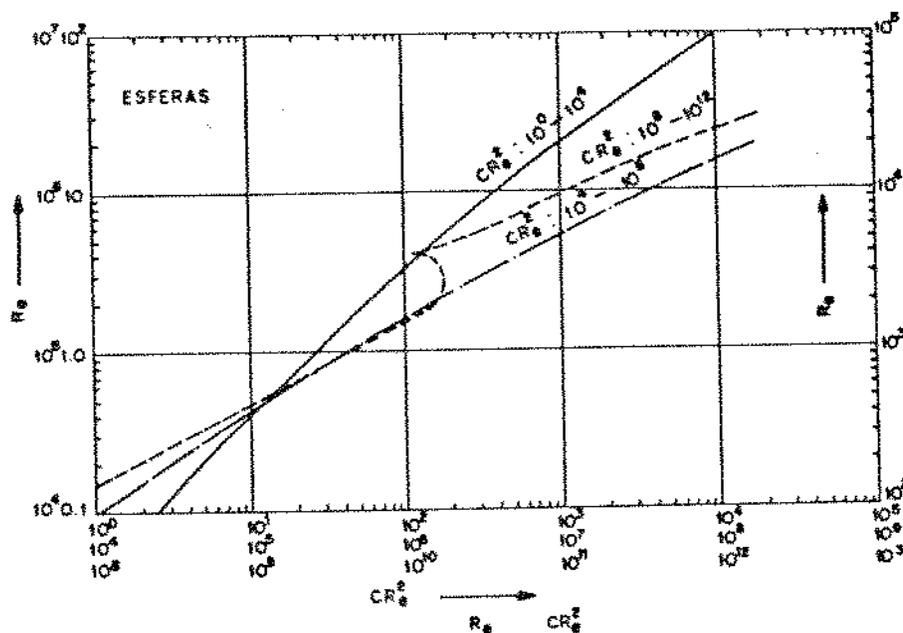


Figura 2.5: Número de Reynolds (Re) versus CR_e^2 para esferas. - FONTE: MOHSEIN, 1968

Supondo um formato esférico para o feijão, com a média geométrica de seus três diâmetros igual ao diâmetro da esfera equivalente, pela equação (2.31) tem-se:

$$CR_e^2 = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot D_{cg}^2 \cdot \rho_a \cdot (\rho_p - \rho_a)}{\mu^2 \cdot A_p \cdot \rho_p}$$

$$CR_e^2 = \frac{2 \cdot 0,51 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot (0,0091)^2 \cdot 1,293 \cdot (1180,56 - 1,293)}{(0,0000181)^2 \cdot 0,000065 \cdot 1180,56}$$

$$CR_e^2 = 60,70 \cdot 10^6$$

Graficando-se $CR_e^2 \times Re$, encontra-se $Re = 11.400$. Através deste valor obtém-se o valor da velocidade terminal, com o auxílio da equação (2.32):

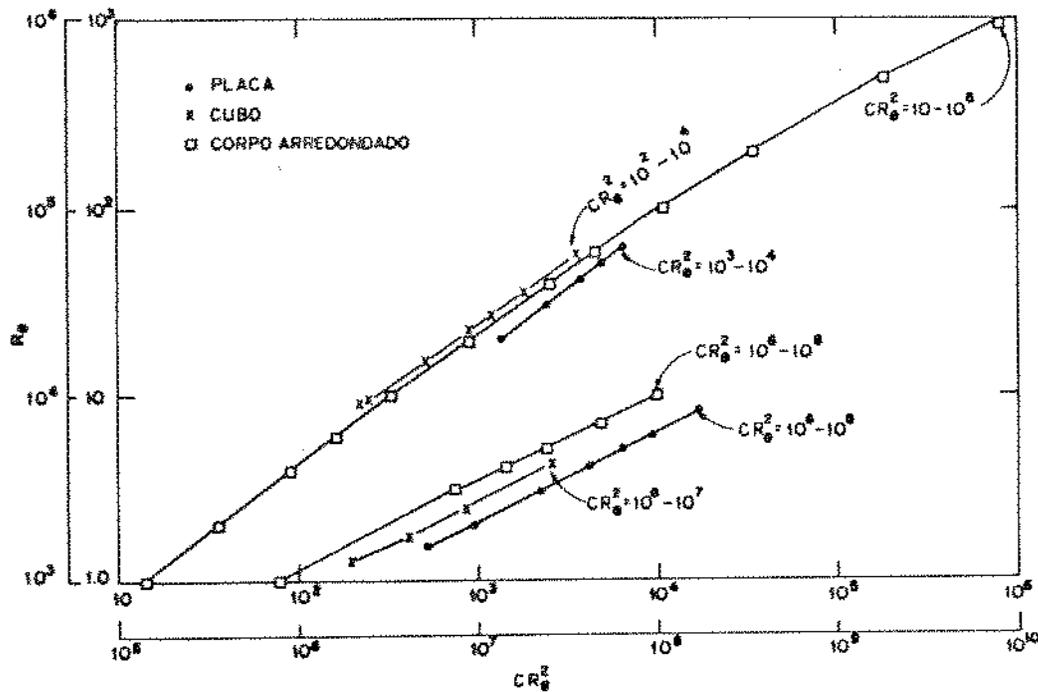


Figura 2.6: Número de Reynolds (Re) versus CR_0^2 para placas, cubos e corpos arredondados.
- FONTE: MOHSEIN, 1968

$$Re = \frac{V_t \cdot d \cdot \rho_a}{\mu} \quad (2.32)$$

$$11.400 = \frac{V_t \cdot 0,91 \cdot 1,293}{0,0000181}$$

$$V_t = 17,54 \text{ m/s}$$

Experimentalmente, num separador pneumático, foi obtida a velocidade terminal real deste feijão. Ela foi cerca de 14,57 m/s. Usando-se este valor da velocidade terminal experimental podemos agora encontrar o coeficiente de arrasto, através da equação (2.23).

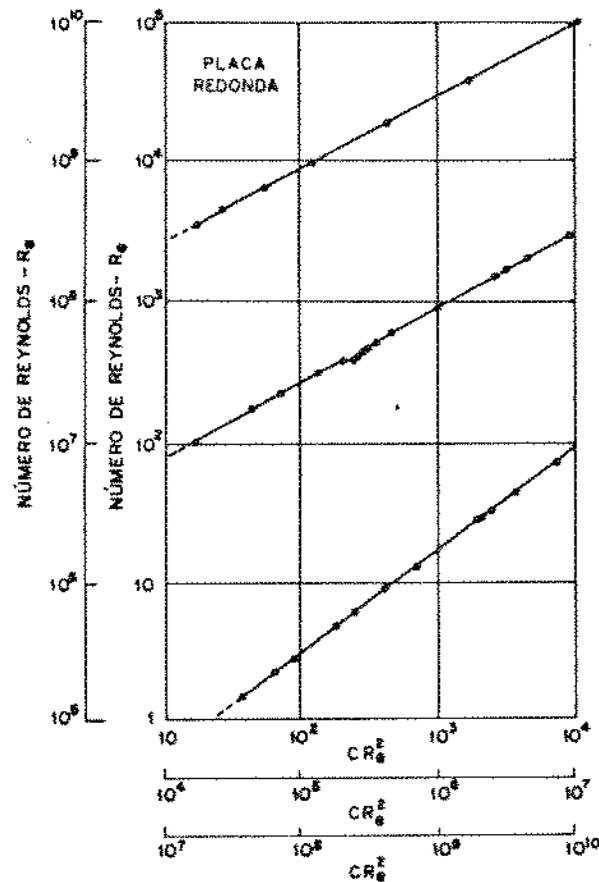


Figura 2.7: Número de Reynolds (Re) versus CR_e^2 para placas redondas. - FONTE: MOHSENIN, 1968

$$C = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_a)}{V_t^2 \cdot A_p \cdot \rho_p \cdot \rho_a}$$

$$C = \frac{2 \cdot 0,51 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot (1180,56 - 1,293)}{(14,57)^2 \cdot 0,000065 \cdot 1180,56 \cdot 1,293}$$

$$C = 0,56$$

Assim, o número de Reynolds baseado na velocidade terminal real será:

$$Re_{real} = Re_{calculado} \cdot \frac{V_t(real)}{V_t(calculado)}$$

$$Re_{real} = 11.400 \frac{14,57}{17,54}$$

$$Re_{real} = 9.470$$

De acordo com a Figura 2.4, o formato de um corpo com $C = 0,56$ e $Re = 9.470$ está entre uma esfera e um corpo arredondado. Esta nova orientação de formato deste feijão em particular, em relação àquela de uma esfera pode ser numericamente avaliada usando a seguinte expressão:

$$Esfericidade = \left[\frac{D_{inter} \cdot D_{menor}}{(D_{maior})^2} \right]^{1/3} \quad (2.33)$$

Deste modo, este feijão teria uma esfericidade de 61%. Considerando este desvio de formato do objeto, em relação a suposta forma esférica, a concordância entre as velocidades terminais experimental e calculada, bem como o número de Reynolds, parecem muito melhor do que se poderia supor.

2.1.8 Variáveis envolvidas em uma análise dinâmica de transportadores pneumáticos.

Segundo BRAUNBECK [9], a maior parte das pesquisas nesta área procuraram focalizar a velocidade terminal das partículas ou a queda de pressão nos dutos, que são importantes fatores quando projetamos um transportador. Mas este não é o caso de uma semeadora, onde uma única semente de cada vez deve ser liberada.

Como já foi exposto anteriormente, as partículas sob transporte pneumático são submetidas a um certo número de resistências, tais como:

- a) Impacto;
- b) Fricção;

- c) Efeito da gravidade.

O impacto, para uma partícula em alta velocidade, significa perda de uma considerável quantidade de energia cinética, onde a velocidade da partícula diminui e o tempo de distribuição aumenta.

Quando uma semente tem um impacto na superfície do duto, o coeficiente de restituição para o impacto normal, tanto quanto o coeficiente de fricção entre o duto e a semente são responsáveis pela perda de energia durante o impacto.

PREM CHAND e GHOSH [36] obtiveram uma fórmula para avaliar esta energia:

$$E = 0,5.m.V^2.(1 - \cos^2\phi(e_1^2 + [\operatorname{tg}\phi - \mu_1(1 - e_1)]^2))$$

onde,

- μ_1 = coeficiente de fricção entre o duto e a semente;
- e_1 = coeficiente de restituição = velocidade antes do impacto/velocidade depois do impacto;
- ϕ = ângulo entre a trajetória das partículas e a linha normal do duto no ponto de impacto.

O ângulo ϕ deverá ser próximo de 90° durante a liberação das sementes em alta velocidade.

BRAUNBECK [9] notou uma redução da variabilidade do tempo de distribuição quando, em seus experimentos, aumentou a pressão de ar de 41,22 para 74,17 kgf/m^2 . Isto parece indicar que uma maior transferência de energia do ar para a semente é capaz de restaurar a energia perdida pelo impacto, mantendo a semente com menor variabilidade no tempo de distribuição.

2.2 Técnicas de Medida e Instrumentação

2.2.1 Sensoreamento do grão no duto

O transporte pneumático, embora sendo a mais eficaz de todas as maneiras de transportar materiais, apresenta muitos problemas nos projetos de sistemas. Na área de semeadoras e plantadoras pneumáticas alguns trabalhos tem sido feitos, principalmente quanto à detecção de sementes e grãos em dutos confinados, monitoramento do transporte e controle fluido da distribuição.

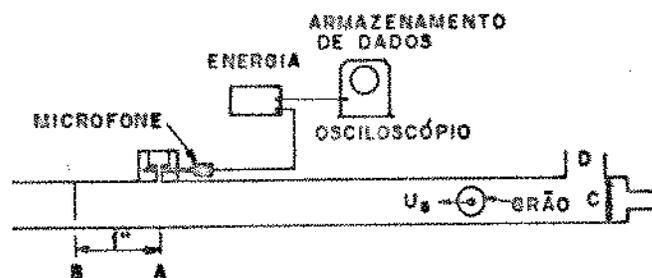


Figura 2.8: Diagrama esquemático mostrando o método de coleta de dados. - FONTE: KIM & ROHRBACH, 1972

KIM & ROHRBACH [27] descreveram suas investigações a respeito dos distúrbios do campo de fluxo induzidos por grandes partículas e desenvolveram sistemas de monitoramento para melhorar a precisão dos distribuidores fluidos.

Em suas pesquisas eles usaram um esquema como o da Figura 2.8, incluindo um tubo de plexiglas de 4m de comprimento, com um diâmetro interno de $3/4''$, bolas de plástico de $5/8''$, $9/16''$ e $1/2''$, um microfone condensador, uma fonte de potência, um manômetro diferencial e um osciloscópio registrador.

Foram feitas duas medições básicas:

- a pressão estática nos pontos A e B para uma condição de fluxo completamente desenvolvido, P_A e P_B , respectivamente.
- a perda de pressão do fluxo devido à presença da bola de plástico no campo de fluxo.

A primeira medida foi obtida com um manômetro diferencial e a última com um microfone condensador. Para determinar a velocidade V da bola de plástico, foi gravado no osciloscópio o tempo gasto para ir do ponto A até o ponto B. Isto na verdade dá a velocidade média da bola entre os dois pontos. Este procedimento foi repetido para várias pressões e para bolas de diferentes tamanhos.

Segundo os autores, o gradiente de pressão $\frac{P_A - P_B}{L}$ para um fluxo turbulento completamente desenvolvido, através de um duto liso, pode ser escrito na forma:

$$\frac{P_A - P_B}{L} = \frac{\lambda}{D} \cdot 0,5 \cdot \rho_a \cdot V_a^2 \quad (2.34)$$

onde, D é o diâmetro do duto, ρ_a é a densidade do fluido, V_a é a velocidade média do fluido e λ é o coeficiente de resistência, que pode ser obtido pela fórmula de Blasius.

$$\lambda = 0,3164 \cdot (Re)^{-1/4} \quad (2.35)$$

Substituindo (2.35) e (2.32) em (2.34), obtém-se:

$$V_a = \left[\frac{(P_A - P_B) \cdot 2 \cdot D^{5/4}}{0,3164 \cdot L \cdot \rho_a \cdot \mu^{1/4}} \right]^{4/7} \quad (2.36)$$

onde μ é a viscosidade absoluta do fluido.

Uma análise dimensional indica que a relação de pressão $\frac{P_S}{P_A}$ (onde P_S é a pressão estática quando a bola passa através do ponto A), depende da relação de diâmetros entre a bola e o duto, bem como o número de Reynolds.

$$\frac{P_S}{P_A} = f\left(\frac{d}{D}, Re\right) \quad (2.37)$$

onde d é o diâmetro da bola de plástico.

Assumindo a forma funcional de $\frac{P_S}{P_A}$ como:

$$\frac{P_S}{P_A} = 1 + f_1(Re) \cdot \frac{d}{D} + f_2(Re) \cdot \ln\left[1 - \sqrt{\frac{d}{D}}\right] \quad (2.38)$$

onde $f_1(Re)$ e $f_2(Re)$ são coeficientes variáveis a serem determinados. As funções $f_1(Re)$ e $f_2(Re)$ são obtidas através dos resultados experimentais e estão plotadas na Figura 2.9 para quatro diferentes valores do número de Reynolds.

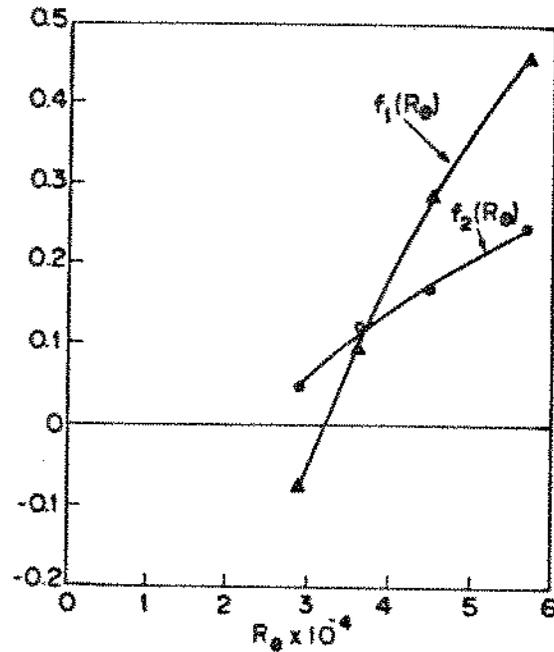


Figura 2.9: Funções $f_1(Re)$ e $f_2(Re)$. - FONTE: KIM & ROHRBACH, 1972

Estas duas curvas $f_1(Re)$ e $f_2(Re)$ são aproximadamente polinômios de terceira ordem e estão apresentados nas equações (2.39) e (2.40).

$$f_1(Re) = -0,541608 + 0,317474 \cdot \frac{Re}{10^5} + 0,638553 \cdot \frac{Re^2}{10^9} - 0,667365 \cdot \frac{Re^3}{10^{14}} \quad (2.39)$$

$$f_2(Re) = -0,903013 + 0,610711 \cdot \frac{Re}{10^4} - 0,123750 \cdot \frac{Re^2}{10^8} + 0,913971 \cdot \frac{Re^3}{10^{14}} \quad (2.40)$$

LE PORI, PORTERFIELD & FITCH JR. [29] complementaram o trabalho de KIM & ROHRBACH [27], apresentando um método para sintetizar equações de lógica fluida e para ilustrar o uso de um sensor fluido. Os autores tiveram como propósito estabelecer a distribuição unitária de sementes numa taxa de fluxo de pelo menos 135 sementes por segundo, o que corresponde a uma velocidade de plantio de 12,5 km/h, com espaçamento de 25mm entre sementes. Empregando a técnica clássica da Lógica Fluida eles desenvolveram um circuito lógico de controle para

realimentação de sementes no caso de falhas ocasionais. Conseguiram a distribuição precisa de 120 sementes por segundo, onde pelo menos 25% das sementes vieram da fonte secundária de realimentação.

Mas foi somente após a metade da década de 80 que POTTER [35] fez um trabalho esclarecedor sobre o uso de sensores eletrônicos ou fluidos em máquinas agrícolas, pois as indústrias estavam preocupadas com "sistemas de monitoramento", os quais iriam proporcionar informações ao operador de máquinas.

2.2.2 Técnicas de medição da velocidade da partícula

OKI, WALAWENDER & FAN [32] descreveram alguns métodos para medir a velocidade real de uma partícula dentro de um duto. Segundo eles, no projeto e desenvolvimento de equipamentos industriais que manuseiam partículas sólidas como grãos, pós, frutas, etc..., frequentemente nos deparamos com a necessidade de medir o perfil de velocidade dentro do equipamento, para determinar suas características operacionais.

As técnicas de medição disponíveis podem ser classificadas em quatro categorias:

- Método baseado na medida da força de arrasto: este método é baseado na medição da força exercida sobre um pequeno obstáculo inserido na trajetória do fluxo. A velocidade pode ser relacionada com a força de arrasto medida.
- Método da transferência de calor: utiliza um anemômetro de fio quente para medir a velocidade local de um fluido.
- Método de traços: neste método uma partícula é marcada com um isótopo radioativo e depois é colocada no fluxo, sendo a velocidade determinada pelo movimento da partícula. A vantagem deste método é que a velocidade pode ser medida sem obstrução do fluxo.
- Método de correlação: partículas individuais movendo-se em um duto são detectadas opticamente em dois locais alinhados na direção do fluxo de partículas. Também conhecido como Método Laser Doppler.

A velocidade é determinada computando-se a seguinte função de correlação $C(\tau)$:

$$C(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t X(t - \tau) \cdot y(t) \cdot dt \quad (2.41)$$

onde, $x(t)$ e $y(t)$ são, respectivamente, sinais detectados nos pontos ao longo do duto.

O tempo exigido para a partícula percorrer os dois pontos é o tempo de transição τ_m , onde a função de correlação é máxima.

A velocidade da partícula V_p , no entanto, pode ser calculada como segue:

$$V_p = \frac{l}{\tau_m} \quad (2.42)$$

onde l é a distância conhecida entre os dois pontos.

2.2.3 Técnicas de medida do volume e área superficial do grão

Outra área de técnicas de medida é a parte física das sementes, ou seja, medidas do tamanho, área superficial e volume.

O formato assimétrico e o tamanho de alguns grãos ou sementes envolvem métodos complexos de medição, bem como o uso de matemática computacional para estas determinações.

2.2.3.1 Teoria

Um objeto elíptico, em coordenadas cartesianas pode ser representado pela equação de Kreyszing.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2.43)$$

Considere uma secção da elipse mostrada na Figura 2.10, onde $GEBG'$ e $GF CG'$ são os perfis adjacentes quando a elipse é girada através de seu eixo de simetria, com um ângulo θ .

Os pontos $ABCA$ devem, no entanto, formar um setor onde:

$$AB = AC = \frac{a}{b} \cdot \sqrt{a^2 - x^2} \quad (2.44)$$

sendo sua área igual a:

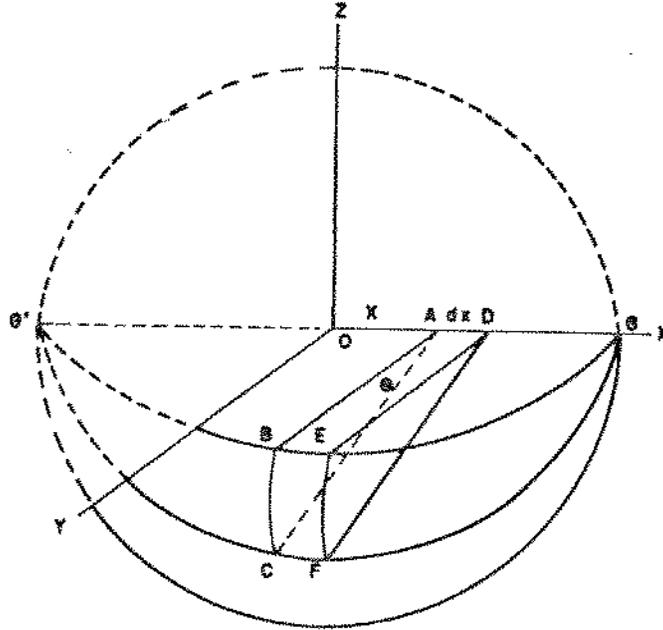


Figura 2.10: Modelo elipsoidal mostrando dois perfis obtidos após a rotação da elipse através do eixo de simetria. - FONTE: OKI; WALAWENDER & FAN, 1977

$$\Delta S = 0,5 \cdot \frac{b^2}{a^2} \cdot (a^2 - x^2) \cdot \theta \quad (2.45)$$

O volume ocupado por ABCADEFD é:

$$\Delta V = \Delta S \cdot dx \quad (2.46)$$

Assim, o volume total formado pelos dois perfis e o eixo de simetria é dado por:

$$V = \int_0^a \frac{b^2 \cdot \theta}{a^2} \cdot (a^2 - x^2) \cdot dx \quad (2.47)$$

A área superficial formada por BCEF é BC x BE, onde:

$$BC = \frac{b}{a} \cdot \sqrt{a^2 - x^2} \cdot \theta \quad (2.48)$$

$$BE = \sqrt{1 - y^2} \cdot \Delta x \quad (2.49)$$

$$BE = \frac{1}{a} \cdot \sqrt{\frac{a^4 + (b^2 - a^2) \cdot x^2}{a^2 - b^2}} \cdot \Delta x \quad (2.50)$$

Através das equações (2.48) e (2.50), a área superficial total da superfície formada entre os dois perfis é:

$$S = \frac{2b}{a^2} \cdot \int_0^a \cdot \sqrt{a^2 + (b^2 - a^2) \cdot x^2} \cdot dx \quad (2.51)$$

Embora materiais como trigo, arroz e soja possam ser supostos de forma elíptica, a irregularidade de seus perfis deve ser levada em conta para uma estimativa precisa de suas áreas superficiais e volumes.

Para obter o perfil do grão foi empregado um Traçador de Perfil NIKON 6CT2. A técnica do traçador de perfil consiste em posicionar o grão no aparelho e usar o perfil projetado na tela, com aumento de 10 vezes, para obter a área superficial em vistas superior e lateral.

CHUMA, UCHIDA & SHEMSANGA [11] desenvolveram trabalhos com esta técnica de medida. Segundo eles, as dimensões, volume e área superficial de trigo, arroz e soja foram determinadas com precisão através da criação de um modelo elíptico, cujas coordenadas foram trasladadas e rotacionadas em intervalos fixos para criar a configuração geométrica exigida. Pelos objetos de formato específico testados, o método pode ser usado com alta precisão na determinação do volume e área superficial de materiais agrícolas. O volume dos grãos pode ser usado para prever a área superficial destes materiais conforme indicam os altos coeficientes de correlação entre volume e área superficial.

2.2.4 Análise estatística dos resultados

O principal fator de um mecanismo de colocação de sementes por meios pneumáticos é o processo de distribuição das sementes, o qual requer atenção especial para o sucesso da operação.

Segundo BRAUNBECK [9], a variabilidade do espaçamento entre sementes na linha de plantio é uma função da variabilidade do tempo de distribuição de sementes. Isto pode ser provado usando algumas das variáveis aleatórias de estatística.

O uso do tempo de distribuição como meio de avaliar a variabilidade do espaçamento entre sementes é devido ao fato de que o tempo de distribuição pode ser medido mais rápido e mais facilmente do que o espaçamento entre sementes no sulco formado no solo.

O espaçamento entre sementes na saída do tubo de descarga pode ser expresso por:

$$ES = \frac{1000.V.TS}{36} \quad (2.52)$$

onde,

- ES = espaçamento entre sementes, cm;
- V = velocidade de deslocamento da semeadora, km/h;
- TS = tempo entre duas sementes consecutivas na saída do tubo de descarga, s.

Esta equação é útil para mostrar como a variabilidade do tempo de distribuição afeta a uniformidade do espaçamento entre sementes. Tanto o espaçamento, quanto o tempo entre sementes são variáveis aleatoriamente distribuídas. Pela equação 2.52 pode-se provar que:

$$VAR(ES) = V^2.VAR(TS).\left(\frac{1000}{36}\right)^2 \quad (2.53)$$

A medida de TS é muito difícil de se obter porque é muito pequena, principalmente em altas taxas de semeadura. Optou-se então por trabalhar com o tempo de distribuição de sementes ao invés do tempo entre sementes. Ambos tempos são relacionados na equação 2.54, para a qual é suposto que as sementes não passam umas pelas outras durante o processo de distribuição. Assim:

$$TS_1 = (t_{i+1} + DT) - t_i \quad (2.54)$$

onde,

- t_i = tempo de distribuição de uma semente desde o ponto de lançamento até o ponto de descarga;
- DT = intervalo de tempo entre sucessivas sementes no ponto de descarga.

Portanto temos:

$$VAR(TS) = VAR(t_{i+1}) + 0 + VAR(t_i) - 2Cov(t_i, t_{i+1})$$

onde, t_i e t_{i+1} são valores sucessivos da variável t .

Assim,

$$VAR(t_i) = VAR(t_{i+1}) = VAR(t)$$

$$VAR(TS) = 2.[VAR(t) - Cov(t_i, t_{i+1})] \quad (2.55)$$

O termo $Cov(t_i, t_{i+1})$, representa a interação entre valores sucessivos do tempo de distribuição. Se uma variação no tempo de distribuição de uma semente não afeta a variação de outra, elas podem ser consideradas independentes e, deste modo, $Cov(t_i, t_{i+1}) = 0$.

Para modelar TS na equação 2.54, as sementes são supostas não passando umas pelas outras. Para sobrepujar esta hipótese, pode-se supor que, quando uma semente encontra outra à sua frente, a anterior transfere sua velocidade à seguinte e assim sucessivamente. Sob esta hipótese as sementes permanecerão em sua ordem original e o fenômeno da mudança de velocidade justifica a dependência entre os tempos de distribuição para pequenos valores de DT .

Pelas equações 2.53 e 2.55, a variância do espaçamento entre sementes é:

$$VAR(ES) = 1543,2V^2.VAR(t) \quad (2.56)$$

Pode-se observar nesta equação que a variância do espaçamento entre sementes aumenta como uma função de segundo grau da velocidade de deslocamento da semeadora.

Existe um valor de $VAR(t)$ para cada duto em particular, dependendo do material, diâmetro, comprimento e curvatura a ser empregada. Grande atenção deve ser dada a estes pontos quando projeta-se uma semeadora pneumática, de modo a permitir a mesma qualidade de distribuição nas diferentes linhas da semeadora.

2.3 Semeadoras Pneumáticas

2.3.1 Teoria

Há anos, pesquisadores da área de máquinas agrícolas vem procurando encontrar uma semeadora de precisão que deposite sementes individuais no solo, a espaçamentos idênticos. Esta necessidade de igual espaçamento na colheita mecânica tem forçado a indústria de máquinas a reavaliar e reprojeter seus equipamentos de semeadura ou plantio.

Mas, apesar de todos os esforços, apenas recentemente a arte de distribuir sementes unitariamente teve uma mudança significativa. No Brasil, sem exceção, todos os distribuidores de sementes em uso atualmente, operam sem nenhum meio interno de monitorar sua própria performance. Mudanças na velocidade de deslocamento, por exemplo, podem causar erros na distribuição, sem que haja qualquer chance de compensação para esta situação.

Foi no final da década de 50 que SWEETMAN [44] desenvolveu uma semeadora de precisão operada por sucção. Esta sucção foi obtida através do conduto de admissão de ar do trator. Nestes testes preliminares descobriu que em algumas vezes, duas ou mais sementes ficavam presas no mesmo orifício. Segundo sua pesquisa, os fatores de maior influência na performance da semeadora foram:

- Tamanho do orifício de sucção;
- Grau de vácuo aplicado;
- Tamanho e peso da semente em relação a (a) ou (b).

Seguindo a mesma linha de pesquisa, HARMOND [21] desenvolveu um cabeçote giratório conectado à uma bomba de vácuo. O cabeçote foi montado com bicos radiais e era acionado por correntes e engrenagens. À medida que o cabeçote gira, os bicos passam pela camada de

sementes onde o vácuo succiona-as, prendendo-as. A densidade de semeadura, no entanto, era comandada pela instalação de caixas de engrenagens para seleccionar a rotação do cabeçote em relação ao deslocamento do trator. Em seu desenvolvimento observou que um vácuo de 12" de H_2O era suficiente para captar pequenas sementes como couve, cenoura, alface, etc... Para milho e feijão foram necessários 60" de H_2O .

GIANNINI, CHANCELLOR & GARRET [19] prosseguiram na mesma linha de pesquisa, desenvolvendo o conceito do mecanismo pressão - vácuo, onde cada orifício era conectado diretamente à seu próprio cilindro de pressão na bomba à vácuo. Mesmo assim eles obtiveram apenas 77% de sementes unitárias em seus experimentos.

Três anos mais tarde, ROHRBACH & HOLMES [39] apresentaram um novo conceito em distribuição de sementes baseado na utilização de jatos de ar.

Descobriram que um jato de ar de alta velocidade e baixo volume poderia reter uma semente unitária em uma cavidade cilíndrica. Uma semente poderia ser ejetada desta cavidade pela introdução de um segundo jato de ar na lateral da cavidade, como mostra a Figura 2.11.

Um sistema de distribuição de sementes utilizando este conceito de jatos de ar foi projetado, sendo montados uma série de receptáculos de sementes ao redor da periferia de um reservatório de sementes rotativo, como mostra a Figura 2.12.

Os receptáculos de semente são cheios na região inferior pela ação da gravidade e pela força de sucção do jato de ar. Se mais de uma semente inicialmente preenchem o reservatório, todas, exceto uma, caem ou são expulsas à medida que os reservatórios chegam na posição superior. Uma semente unitária é então retida e vai ser descarregada pela injeção de um segundo jato de ar na lateral do reservatório de sementes, através de um furo existente na lateral da roda giratória.

Os testes mostraram que objetos esféricos, elipsoidais e chatos, de várias densidades, puderam ser retidos e distribuídos. Numerosos testes foram conduzidos com esferas de plástico e metal e com sementes aproximadamente esféricas como soja, que demonstrou ser o conceito do jato de ar um meio válido de distribuição de sementes.

Na mesma época, SHORT & HUBER [42] desenvolveram um outro dispositivo de distribuição de sementes à vácuo. Baseados no trabalho de HARMOND [21], eles procuraram estabelecer qual seria a máxima altura na qual o bico poderia captar uma semente e qual a mínima velocidade de ar no bico, necessária para segurar uma semente. Supondo que a semente preenche completamente o bico, como mostra a Figura 2.13, a equação de equilíbrio da semente é:

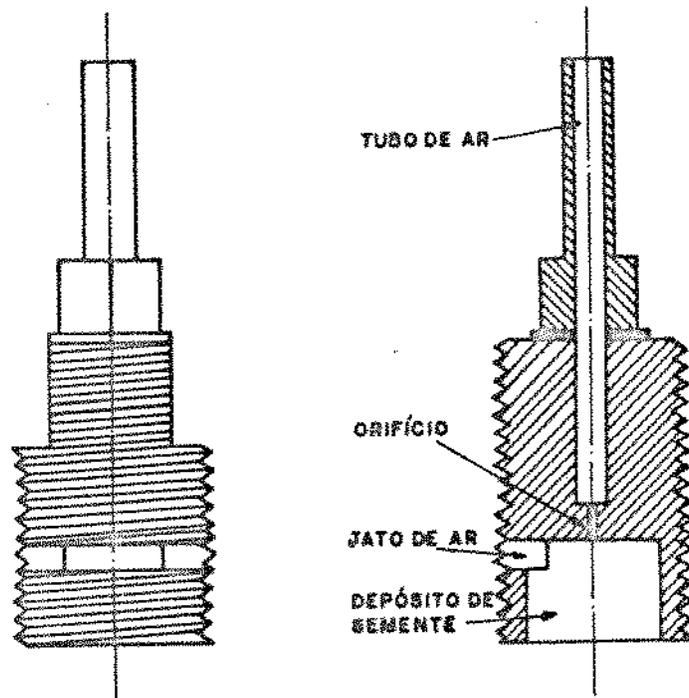


Figura 2.11: Células de semente. - FONTE: ROHRBACH & HOLMES, 1972

$$m \cdot g = \pi \cdot r^2 \cdot (P_a - P_n) \quad (2.57)$$

Mas, para um fluxo incompressível, tem-se:

$$P_a - P_n = \frac{0,5 \cdot \rho_a \cdot V_a^2}{g} \quad (2.58)$$

Combinando-se as duas equações tem-se:

$$V_a = \frac{g}{r} \cdot \sqrt{\frac{2m}{\pi \rho_a}} \quad (2.59)$$

onde,

- P_a = pressão absoluta do ar;
- P_n = pressão média saindo do orifício do bico;
- r = raio do orifício do bico;
- ρ_a = densidade do ar.

Foi descoberto que a velocidade do ar no orifício foi muito crítica na coleta de apenas uma semente por bico. Com velocidades do ar superiores a 23 m/s o bico poderia pegar apenas uma semente se o orifício permanecesse acoplado à parte plana da semente. Se duas ou três cabeças de sementes estivessem direcionadas para o orifício, ele irá captar todas elas. De modo a coletar apenas uma semente, cada bico tem de ser operado na mínima velocidade do ar ou pouco acima desta. Nos testes experimentais, com sementes de pepino, eles conseguiram uma distribuição unitária de apenas 80% das sementes.

ROHRBACH & KIM [40] continuaram com seu desenvolvimento em sistemas de distribuição fluida com jatos de ar. A significativa vantagem deste sistema sobre os outros existentes é o fato de não haver partes mecânicas envolvidas pois ele é inteiramente operado por jatos de ar e dispositivos fluidos. A lógica fluida que controla o jato de ar deve ser capaz de aceitar informações e regular a velocidade do distribuidor de modo que qualquer taxa de distribuição pré-estabelecida poderá ser obtida, indiferente dos distúrbios causados no sistema de distribuição.

Foram testados apenas corpos esféricos de plástico. No entanto a singularização e retenção tem sido bem evidenciadas em sementes lisas. À medida que as partículas tornam-se menos esféricas, a probabilidade de não haver a retenção aumenta. Assim, a exigência para uma performance regulada e auto-monitorada aumenta.

Foram usados apenas jatos de ar com pressão positiva. Todas as funções lógicas foram feitas por elementos fluidos impulsionados pelo mesmo fornecedor de pressão.

GOMES & BALASTREIRE [20] desenvolveram e testaram um dosador pneumático de sementes. Foram realizados ensaios com sementes de soja, milho e feijão, sendo que os níveis de vácuo aplicado variaram entre 150 e 800mm de coluna de água, com rotações entre 20 e 50 rpm.

Observaram que, à medida que aumentavam a rotação do dispositivo, diminuía a percentagem de enchimento, embora à medida que aumentavam o vácuo, melhorava o preenchimento.

Na mesma época, MONTEIRO & BRAUNBECK [31] desenvolveram e avaliaram uma semeadora pneumática com alimentação externa, visando complementar as vantagens dos dosadores

pneumáticos convencionais , com melhores características de transporte e de deposição de sementes.

2.3.2 Sistemas de distribuição

Somente no final da década de 70 é que ocorreu um real incremento no uso de semeadoras e plantadoras pneumáticas comerciais, embora já estivessem disponíveis na Europa desde meados da década anterior, principalmente na Alemanha, França e Itália.

No mercado agrícola encontramos basicamente dois sistemas:

- por sucção
- por pressão

2.3.2.1 Semeadoras pneumáticas por sucção de ar

As semeadoras pneumáticas por sucção foram as primeiras a serem desenvolvidas e também são as mais encontradas. Resumidamente, elas funcionam da seguinte maneira: o grão, proveniente da caixa de sementes, montado sobre o corpo (6) como mostra a Fig.2.14, passa através dos discos e fica exposto à ação das aletas que ativam a alimentação e regulam o fluxo de sementes, assegurando a retenção de uma ou mais sementes no disco, por efeito da sucção atuante nos orifícios (2).

Quando os grãos alcançam a zona de alimentação (5) do limitador (3), este os obriga a alinhar-se, ao mesmo tempo que os orienta para o centro, de onde somente o primeiro da série cai, submetido pela ação da depressão do orifício interior. Na verdade esta ação é possível uma vez que no setor (11) compreendido entre o ingresso do grão e a placa de transferência, o efeito do ar atua tão somente nas perfurações externas.

Uma vez passada a zona de retenção (12) o grão se desprende e cai (13), sendo retido pela respectiva aleta, de onde se realiza o transporte da semente até a descarga. O corpo possui, por detrás do orifício de sucção (7) um volante com perfurações de diferentes diâmetros (8) para poder regular a corrente de ar aspirado, em função do tamanho e peso das sementes.

Outro sistema mais moderno, é o de distribuição com discos perfurados, conforme mostra a Figura 2.15.

A semente, vinda da caixa de sementes, cai, por gravidade, dentro de uma pequena câmara localizada na base do disco de sementes, um disco de plástico, vertical, giratório, com furos

na circunferência externa para alojar as sementes. Sementes individuais são presas nos furos pelo efeito da sucção do ar. A velocidade na qual o disco de semente gira, é determinada pela velocidade de deslocamento e uma adequada seleção de engrenagens.

Este e outros modelos muito semelhantes foram desenvolvidos a partir de meados de 60, derivados do protótipo original desenvolvido pela BECKER, na Alemanha apresentado na Figura 2.14.

Na mesma época, também na Alemanha, foi desenvolvida a plantadora FAHSE MINIAIR. Estes sistemas pneumáticos rapidamente espalharam-se pela Europa, surgindo na Itália as plantadoras GASPARDO e CALLIGNANI. Na França os modelos mais conhecidos são a NODET-GOUGIS e a MONOSEM.

No mercado norte-americano também houve uma boa aceitação, principalmente para culturas como milho, soja e girassol. Seus modelos mais conhecidos são : ALLIS-CHALMERS, INTERNATIONAL, WHITE e JOHN DEERE.

No Brasil, onde os avanços da tecnologia estão associados com problemas de mercado financeiro e de incentivo ao desenvolvimento agrícola, existe apenas um modelo de plantadora pneumática de precisão. É a semeadora TURBO-MAX, produzida pelos Irmãos Thonnings e Cia Ltda, em Carazinho,RS. Seu princípio de funcionamento é muito semelhante à WHITE ou JOHN DEERE.

2.3.2.2 Semeadoras pneumáticas por pressão de ar

Também projetada na Alemanha, a ACCORD foi a primeira semeadora pneumática a usar um fluxo positivo de ar para distribuir sementes. O fluxo de ar, obtido através de um potente ventilador, passa por um duto principal, no qual um dosador central descarrega o fluxo de sementes, conforme pode ser visto na Figura 2.16.

Estas sementes são transportadas para um cabeçote, na parte superior da semeadora e deste cabeçote elas são transportadas para os dutos secundários e daí, por gravidade, para o solo.

Rapidamente este sistema foi aprovado, principalmente nos Estados Unidos e Canadá, pela possibilidade de semeadura de muitas linhas ao mesmo tempo. Os principais modelos comerciais hoje existentes são: ACCORD, FRIGGSTAD, PRASCO, WIL-RICH, FLEXI-COIL, JOHN DEERE, MORRIS e INTERNATIONAL. Todas estas indústrias possuem um ou mais modelos de semeadoras ou plantadoras pneumáticas que utilizam o princípio da distribuição por pressão positiva de ar.

EWING [15] apresentou um trabalho descrevendo o avanço dos sistemas pneumáticos no

início da década de 80, nos Estados Unidos. Segundo suas estimativas, no final da década de 70 as semeadoras pneumáticas já tomavam 10% do mercado e a previsão para o final desta década era de 65% do mercado.

ALLAN & WIENS [2] testaram três semeadoras pneumáticas recentemente lançadas no Canadá. Segundo suas observações, mesmo em altas velocidades de deslocamento (8 a 10 km/h), a distribuição de sementes foi aceitável para densidades abaixo de 135 kg/ha, onde o coeficiente de variação esteve ao redor de 15%. Entretanto, a uniformidade tende a deteriorar-se rapidamente em altas densidades, devido ao aumento da taxa de fluxo (kg/ha) do material entrante, com o mesmo e constante fluxo de ar vindo do ventilador. Também mudanças na velocidade de avanço alteraram a uniformidade de distribuição.

Preocupando-se com estas mudanças na uniformidade de distribuição, em relação à velocidade de deslocamento da semeadora, POTTER [35] apresenta um estudo sobre a disponibilidade de sensores especiais e microprocessadores que formam sistemas de monitoramento, proporcionando informações aos operadores, ou ainda sistemas de controle, os quais controlam parâmetros de operação dentro de limites pré-selecionados pelo operador.

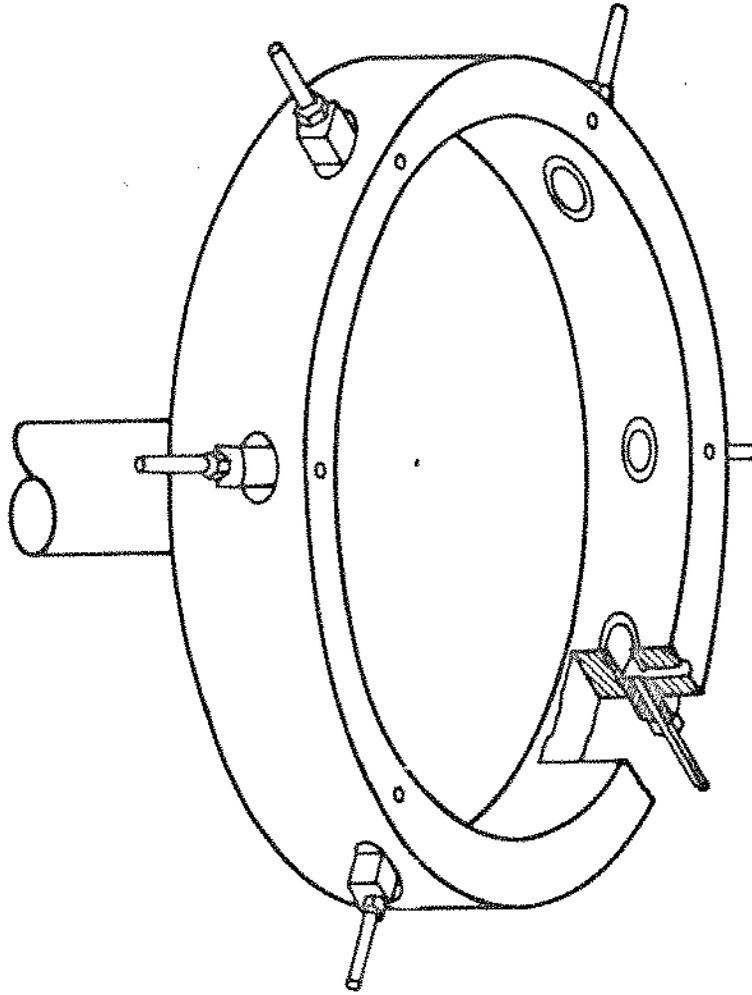


Figura 2.12: Receptáculos de semente montados num cilindro rotativo. - FONTE: ROHRBACH & HOLMES, 1972

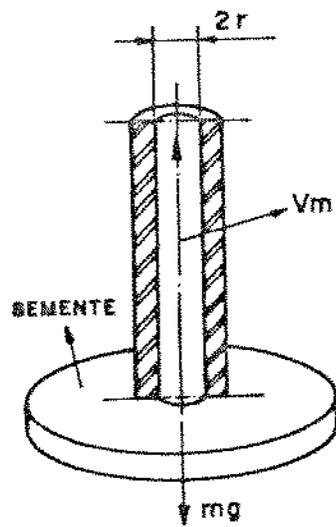


Figura 2.13: Equilíbrio da semente no bico de sucção. - FONTE: SHORT & HUBER, 1970

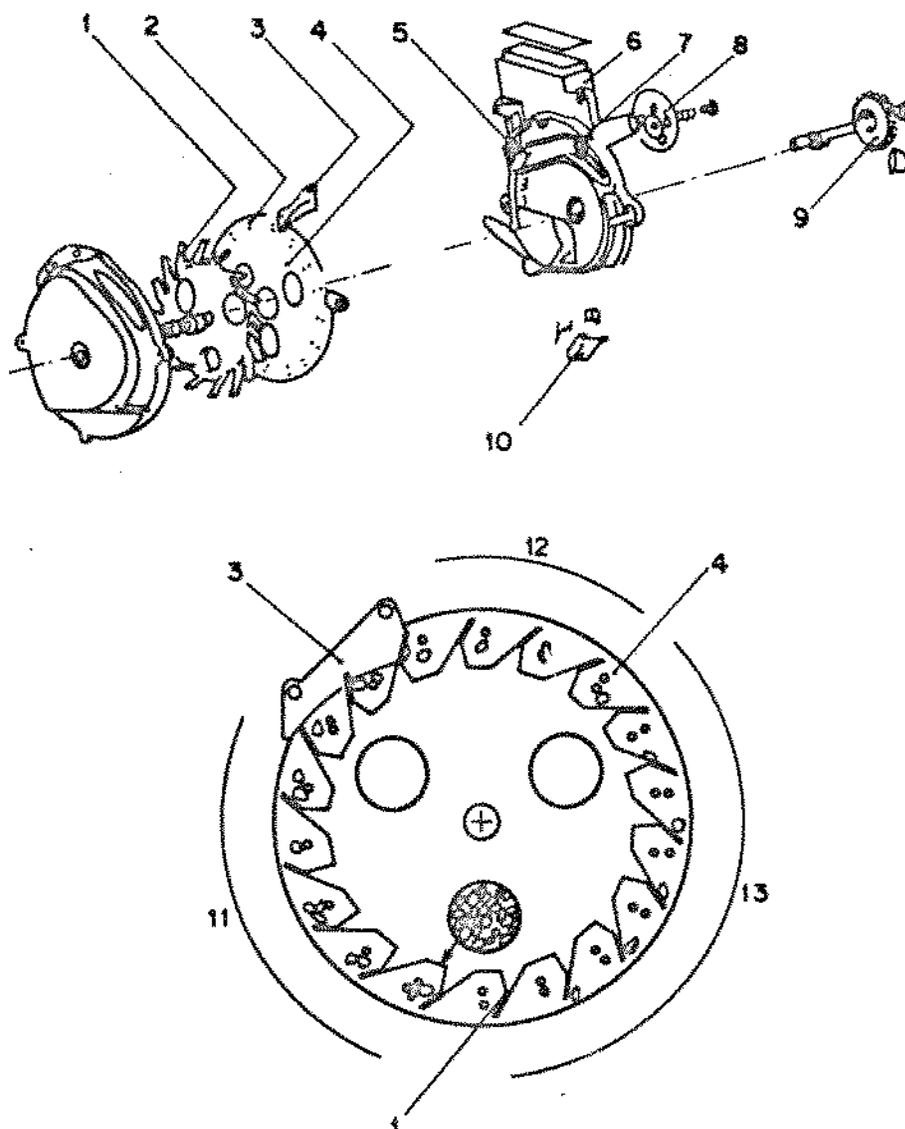


Figura 2.14: Esquema de funcionamento de uma semeadora pneumática por sucção. - FONTE: CATÁLOGO BECKER

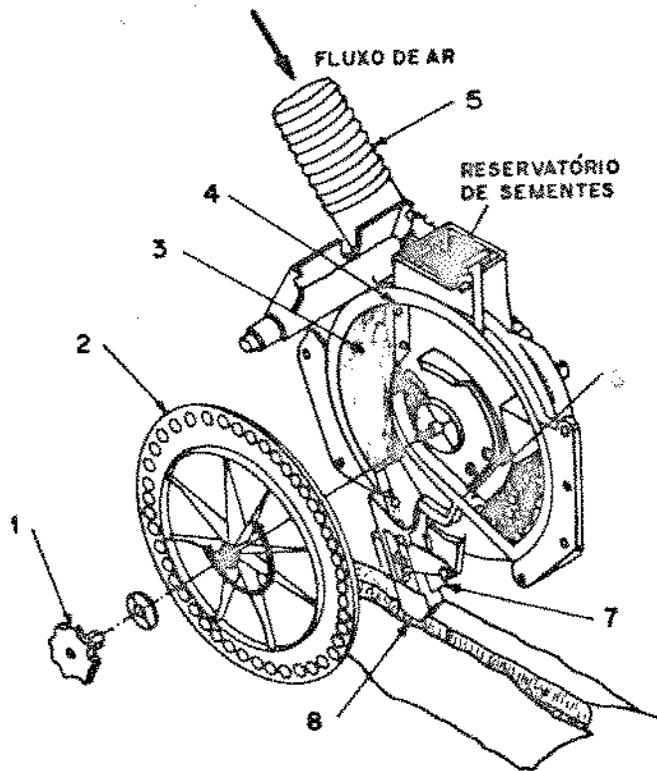


Figura 2.15: Sistema de distribuição de sementes à vácuo. - FONTE: CATÁLOGO JOHN DEERE

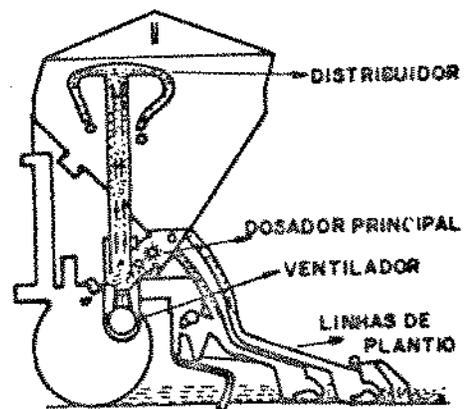


Figura 2.16: Sistema de distribuição pneumática de sementes por pressão de ar. - FONTE: EWING, 1980

Capítulo 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Generalidades

O transporte pneumático de produtos agrícolas vem sendo estudado desde a década de 40. Muitos autores pesquisaram, sob óticas diversas, meios de transportar uma massa de grãos, farelo ou farinhas, de um ponto a outro, com um mínimo de perdas e um máximo de eficiência.

Fundamentalmente estes estudos referiam-se ao transporte de volumes sólidos em elevada taxa de carga mássica. Mas tanto estas pesquisas, quanto a aqui desenvolvida, enfocaram primordialmente as propriedades físicas dos produtos transportados, o diâmetro dos dutos a serem empregados, o fluxo de ar, a vazão mássica, a velocidade do fluido e a velocidade do produto transportado, entre outros parâmetros. Nesta pesquisa, procurou-se transformar a teoria existente para uma condição de contorno onde as taxas de volume de grãos/volume de fluido fossem extremamente baixas, uma vez que estamos objetivando o transporte unitário de grãos.

O trabalho foi dividido em duas fases. A primeira consistiu em investigar o comportamento dos diferentes produtos agrícolas sendo transportados em dutos de pequeno diâmetro, sob vários níveis de vazão de ar. A segunda fase consistiu em encontrar meios de desacelerar o grão visando sua deposição final.

Os parâmetros empregados foram:

a) Produtos Testados :

Bolas de Madeira (Testemunha);
Soja - cultivar Foscarini;

Feijão - cultivar Carioquinha;

Milho - cultivar AG 162;

Milho - cultivar AG 401.

b) Dutos de Transporte :

15 mm de diâmetro interno;

20 mm de diâmetro interno;

25 mm de diâmetro interno.

c) Vazões de Ar :

11 vazões, geradas por um ventilador turbo alimentador.

d) Repetições :

cada ponto analisado representa a média de 15 repetições.

3.2 Produtos Testados

Para definir os parâmetros técnicos do transporte de grãos em dutos de pequeno diâmetro, foram testados cinco produtos com diferentes características físicas e aerodinâmicas. Foram selecionadas as cultivares de milho AG 162 e AG 401, (o primeiro por ter um formato curto e arredondado, enquanto que o segundo possui formato comprido e fino), soja Foscarini, feijão Carioquinha e, como testemunha, Bolas de Madeira com diâmetros muito uniformes. Na Figura 3.1 estão apresentadas amostras dos produtos testados.

3.3 Características Físicas e Aerodinâmicas dos Produtos Testados

3.3.1 Massa Específica Aparente

3.3.1.1 Material e Métodos

O aparelho utilizado para a determinação da massa específica aparente (Fig. 3.2), nada mais é do que um funil de 19,5cm de diâmetro superior, por 12,5cm de altura, com uma abertura central de 3,3cm para o escoamento do produto.

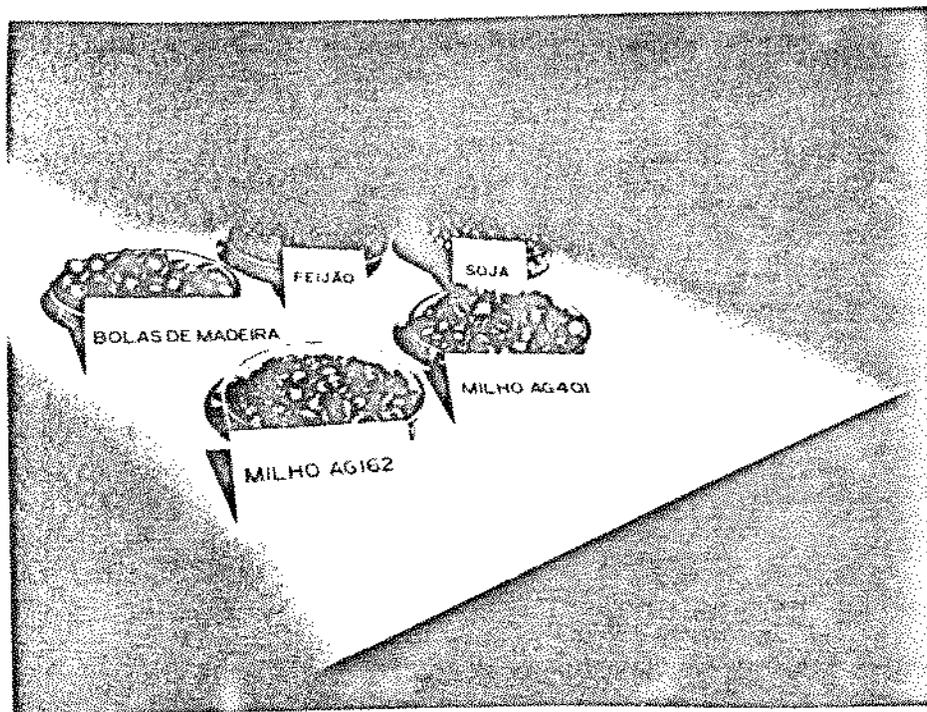


Figura 3.1: Produtos Testados

Abaixo da abertura do funil, a uma altura de 7,6cm, encontra-se um recipiente de volume aproximadamente igual a um litro, de secção circular, com 11,3cm de diâmetro por 10,6cm de altura.

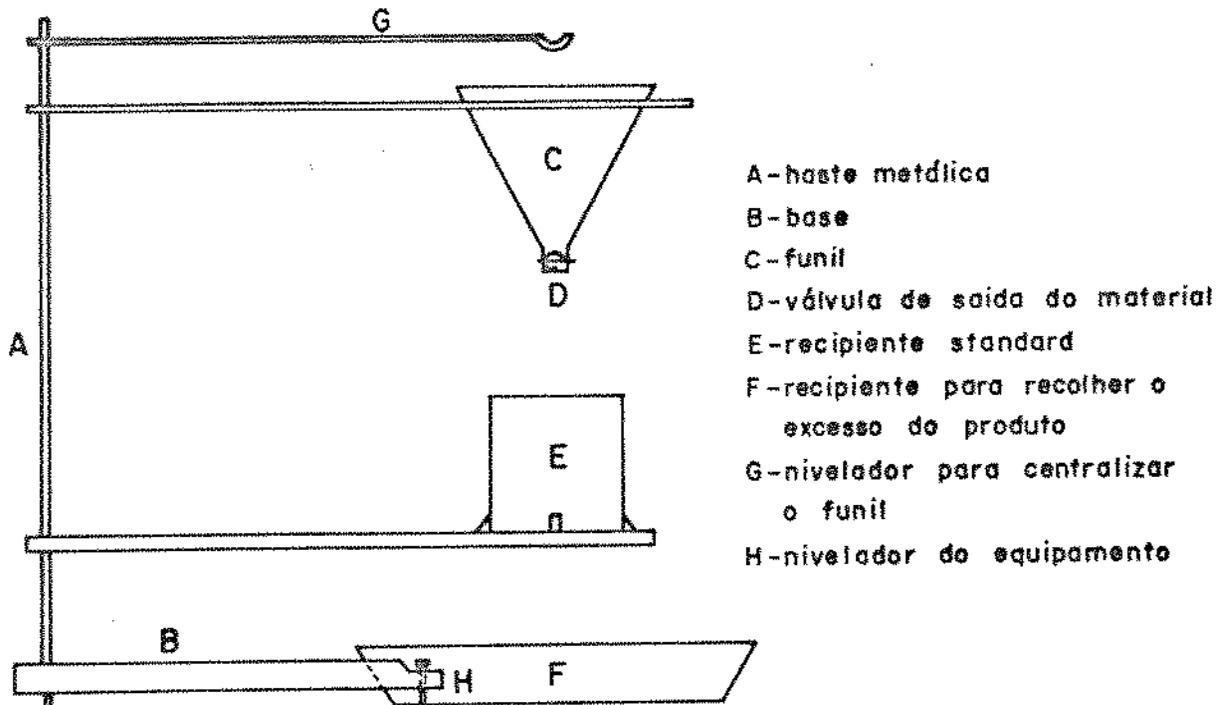
Para a pesagem do produto foi usada uma balança de precisão, com divisões de 0,1 gramas.

Calibração do Recipiente O recipiente foi pesado na balança de precisão. Seu volume foi preenchido cuidadosamente com água. O peso da água e sua temperatura foram anotados, ajustando-se a densidade da mesma. O volume do recipiente foi calculado através da seguinte equação:

$$V_r = \frac{m_a}{\rho}$$

onde,

- V_r = volume do recipiente;



Equipamento para determinação do peso específico aparente.

Figura 3.2: Equipamento para determinação da massa específica aparente. FONTE: Leitão, 1983 apud BENEDETTI, 1987

- m_a = massa da água;
- ρ = densidade da água.

A calibração do recipiente foi repetida cinco vezes, apresentando um volume médio de 1039 cm^3 .

Determinação da Massa Específica Aparente Após conferir-se a distância entre o funil e o recipiente, coloca-se o produto no funil e abre-se a válvula borboleta. O escoamento deve ser constante e livre. Para retirar o excesso de produto passa-se uma espátula pela borda do recipiente. Pesa-se o produto contido no recipiente e encontra-se a massa específica aparente através da relação:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_r}$$

onde,

- ρ_{ap} = massa específica aparente;
- m = massa do produto;
- V_r = volume do recipiente.

Foram realizadas cinco repetições para cada produto testado.

3.3.2 Massa Específica Real

3.3.2.1 Material e Métodos

Na determinação da massa específica real foram utilizadas provetas graduadas de 500 ml. Para a pesagem do produto foi empregada uma balança semi-analítica com precisão de 0,01 gramas.

Foi utilizado o Princípio de Arquimedes para determinar a massa específica real, ou seja, 100 gramas de produto foram colocados nas provetas graduadas contendo 300 ml de água. Pelo volume de água deslocado calcula-se a massa específica real através da relação:

$$\rho_r = \frac{m}{V_d}$$

onde,

- ρ_r = massa específica real;
- m = massa do produto;
- V_d = volume deslocado.

Foram realizadas três repetições para cada produto testado.

3.3.3 Teor de Umidade

O teor de umidade existente nos grãos é muito importante no transporte pneumático, como foi detectado por BENEDETTI [4], pois determina o comportamento dos grãos em relação às variáveis massa, dimensões, rugosidade, etc....

3.3.3.1 Material e Métodos

O teor de umidade foi obtido empregando-se um aparelho de leitura direta marca CERA-TESTER, modelo 107.10, fabricado por N.FOSS ELECTRIC (Denmark).

O aparelho possui escalas graduadas para diferentes grãos (trigo, soja, milho, arroz, feijão, etc...). Acoplada ao aparelho encontra-se uma pequena balança que serve para pesar as quantidades corretas de produto a serem colocadas no interior do aparelho para a determinação do teor de umidade. As determinações foram realizadas conforme indicações no manual do aparelho.

Foram realizadas cinco repetições para cada produto testado.

3.3.4 Diâmetro Equivalente

Na aplicação de princípios aerodinâmicos aos produtos agrícolas, foi escolhido um método para expressar a área projetada ou a área frontal de uma partícula. Na maioria dos casos, o objeto tem sido suposto esférico em formato, com área projetada igual a $\frac{\pi}{4} \cdot D_{eq}^2$ onde D_{eq} é o diâmetro equivalente de uma esfera de mesmo volume do objeto. O diâmetro equivalente dos produtos testados foi obtido através da relação:

$$D_{eq} = (L_1 \cdot L_2 \cdot L_3)^{1/3}$$

onde, L_1 , L_2 e L_3 são as três dimensões características do grão.

3.3.4.1 Material e Métodos

Para medir as três dimensões características dos produtos (comprimento, largura e espessura) foi usado um micrometro marca Mitutoyo, com precisão de centésimo de milímetro.

As três dimensões características foram medidas nos pontos médios da largura e espessura e no comprimento total. Para cada produto foram feitas 100 repetições.

3.3.5 Massa Unitária dos Produtos Testados

3.3.5.1 Material e Métodos

Foram escolhidos, ao acaso, 100 grãos de cada produto testado, sendo pesados numa balança analítica STANTON, modelo D42T, com precisão de 0,01g. Foram realizadas cinco repetições para cada produto.

3.3.6 Volume dos Produtos Testados

O conhecimento exato do volume médio de cada grão é importante no dimensionamento da velocidade terminal e na obtenção do coeficiente de arrasto.

3.3.6.1 Material e Métodos

Para obtermos, com precisão, o volume do grão de cada produto, utilizamos os recursos de um projetor de perfil, marca NIKON, modelo 6C, existente no Departamento de Projeto Mecânico da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. A área superficial obtida na projeção dos perfis foi medida com um planímetro, marca MITUTOYO.

O projetor de perfil é um aparelho que, em resumo, transfere o perfil de um objeto para uma tela, em tamanho ampliado. Usou-se aumentos de 10 vezes para obter-se um detalhamento suficientemente bom, de tal modo a avaliar a área superficial, conforme nos apresenta a Figura 3.3.

Cada grão foi projetado em suas vistas superior e lateral. Com a vista superior foi obtida a área superficial do grão; com a vista lateral foi obtida a área lateral, que por sua vez, dividida pelo comprimento do grão, resultou na espessura média. Multiplicando os valores da área superficial pela espessura média, obtém-se o volume médio do grão.

Para cada produto foram selecionados 10 grãos, ao acaso.

3.3.7 Velocidade Terminal Experimental

3.3.7.1 Material e Métodos

Para determinar a velocidade terminal dos grãos testados, foi utilizado um dispositivo experimental existente no Laboratório de Pré-Processamento de Produtos Agropecuários da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, o qual está apresentado na Figura 3.4.

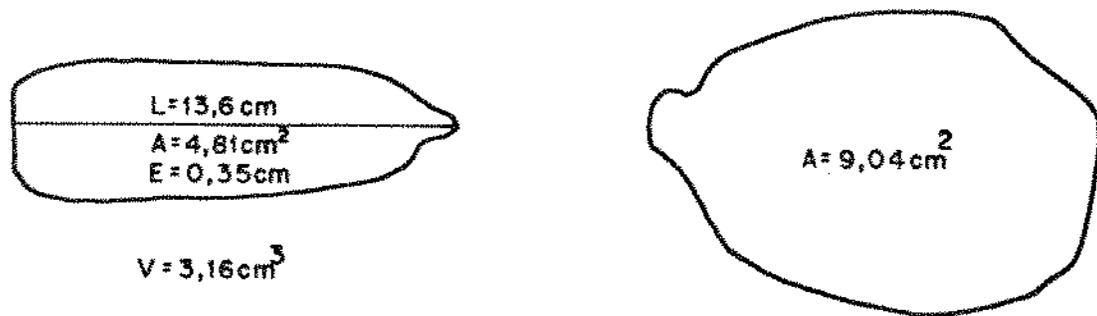


Figura 3.3: Área Projetada e Volume de um grão de Milho AG 401.

Ele é composto por uma coluna de seções retangulares, construída de acrílico, para permitir a observação do fenômeno. Nesta coluna é injetado um fluxo de ar através de um ventilador centrífugo (marca JOMAR, modelo FT2, 1CV de potência e 3600 rpm). O fluxo de ar pode ser regulado pela variação da abertura da tomada de ar do ventilador.

A alimentação de grãos é feita pela parte inferior da coluna, sendo o fluxo regulado manualmente por um sistema de pás rotativas que impedem o escape de ar pelo tubo de alimentação.

Na parte intermediária da coluna vertical está inserido um "pitot" da F.W.Dwyer Manufacturing.

Liga-se o ventilador com a tomada de ar quase totalmente fechada. Aos poucos vai alimentando-se a coluna com uma massa de grãos, ao mesmo tempo que a tomada de ar vai sendo aberta. Procura-se, na coluna de acrílico, o ponto de equilíbrio médio dos grãos. No momento em que o equilíbrio foi alcançado, a velocidade do ar é calculada com base na leitura do "pitot". Foram feitas cinco repetições para cada produto.

3.3.8 Velocidade Terminal Teórica

A velocidade terminal teórica foi obtida com base nas características físicas dos produtos e nas características do ar.

Baseando-se nas dimensões dos grãos foi obtido o diâmetro equivalente; pela média do peso de 100 grãos temos o peso ou massa característica de cada grão; pela relação $A_p = \frac{\pi \cdot D_{eq}^2}{4}$ foi obtida a área projetada do grão; o peso específico real foi coletado experimentalmente; de Tabelas foram obtidas a densidade e a viscosidade do ar; a aceleração da gravidade é conhecida. Assim, pela equação 2.31, encontra-se os valores do número de Reynolds(Re) e do coeficiente de arrasto(C), com o auxílio da Tabela 4.8 . Uma vez obtidos estes valores, faz-se o cálculo da Velocidade Terminal Teórica pela equação 2.32.

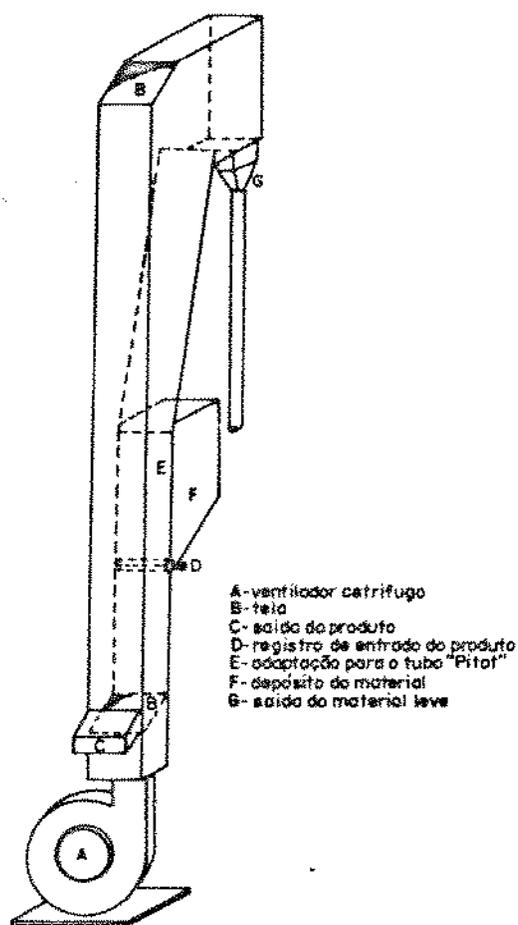
3.4 A Placa de Orifício

Segundo a ASME [3], a placa de orifício provavelmente é um dos mais antigos dispositivos para medir e regular o fluxo de fluidos. A placa de orifícios concêntricos nada mais é do que uma fina placa, presa entre duas flanges na tubulação, recebendo em seu centro um furo concêntrico com a tubulação. Conexões para acoplar os dispositivos de pressão diferencial são feitos em ambos os lados da placa, na flange ou no tubo, dependendo do método, de tal modo que a diferença de pressão do fluido, em ambos os lados do orifício possa ser medida (Figura 3.5.).

3.4.1 Material e Métodos

Foi utilizado apenas PVC na construção da placa de orifício, tanto na tubulação, nas flanges, quanto na própria placa.

A placa de orifício possui um diâmetro de 25mm, com 4mm de espessura e um furo concêntrico de 12,5mm. A tubulação de PVC possui um diâmetro interno de 25,4mm e foi montada, segundo os padrões internacionais, com 40 diâmetros à montante e 60 diâmetros à jusante da placa. As flanges possuem encaixes internos de 25mm e externos de 25,4mm, com rosca para fixação da tubulação, conforme é apresentado na Figura 3.5 . Todos os pontos de união foram vedados com silicone.



Esquema da coluna pneumática para separação e determinação da velocidade terminal.

Figura 3.4: Velocidade Terminal Experimental. FONTE: Leitão, 1983 apud BENEDETTI, 1987

3.4.1.1 Calibração da placa de orifício

Para calibrar-se a placa de orifício empregou-se, como padrão, um laminador de fluxo (Laminar Flow Element, modelo 50 MH 10 - 4NT, do Laboratório de Armazenadores Térmicos e Tubos de Calor, FEM - UNICAMP), conforme mostra a Figura 3.6.

Acoplado ao laminador de fluxo, como fonte de suprimento de ar, foi instalado um ventilador



Figura 3.5: Placa de Orifício

centrífugo progressivo, marca Ibram, com 3,0 CV de potência e 5700 rpm, para uma vazão máxima de $23\text{m}^3/\text{min}$.

A perda de carga na placa de orifício foi medida com um manômetro diferencial de tubo em U, tendo água como líquido selante. A perda de carga do laminador de fluxo foi medida com um manômetro inclinado, modelo 942K50 da Meriam Instrument.

A temperatura do fluxo de ar foi medida com um termopar ligado a um mostrador digital. A pressão barométrica foi lida em um barômetro.

Entre uma leitura e outra na calibração foi deixado um intervalo de 20 minutos para que ocorresse a estabilização do fluxo de ar.

3.4.1.2 Coeficientes de Vazão

Segundo DELMÉE [14], o coeficiente de vazão combinado, representando o produto do coeficiente de descarga C pelo fator de velocidade de aproximação E , é dado pela seguinte fórmula empírica:

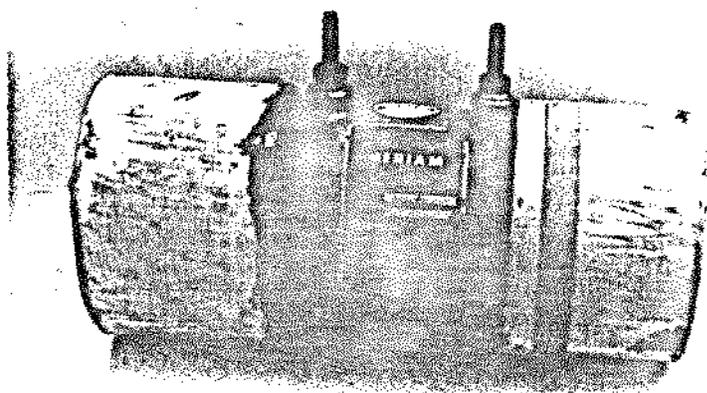


Figura 3.6: Laminador de Fluxo para calibração da placa de orifício.

$$CE = C'E + B_m \cdot \sqrt{\frac{10^6}{R_D}}$$

$$C'E = 0,5991 + \frac{0,1118}{D} + (0,3155 + \frac{0,4445}{D}) \cdot (\beta^4 + 2 \cdot \beta^{16})$$

$$B_m = \frac{0,0132}{D} - 0,000192 + (0,01648 - \frac{0,02946}{D}) \cdot (\beta^4 + 4 \cdot \beta^{16})$$

onde, D deve ser expresso em mm.

- CE = coeficiente de vazão combinado;
- β = coeficiente de obstrução.

A fim de facilitar os cálculos da vazão e permitir o uso das equações de trabalho, foram tabelados os valores combinados $C'E \cdot \beta^2$ e A_m , calculados a partir das fórmulas acima, referentes a diâmetros de 15, 20, 25 e 30mm. Estes valores estão apresentados na Tabela 3.1.

O coeficiente A_m é igual a $1000 \frac{B_m}{C'E}$, de tal modo que o valor de $CE \cdot \beta^2$ é calculado pela seguinte equação:

$$CE \cdot \beta^2 = C'E \cdot \beta^2 \cdot [1 + \frac{A_m}{\sqrt{R_D}}]$$

β	COEFICIENTES DE VAZÃO ($C'E - \beta'$)								β
	$D = 15 \text{ mm}$		$D = 20 \text{ mm}$		$D = 25 \text{ mm}$		$D = 30 \text{ mm}$		
	$C'E \cdot \beta'$	$A_m = \frac{1000 B_m}{C'E}$	$C'E \cdot \beta'$	$A_m = \frac{1000 B_m}{C'E}$	$C'E \cdot \beta'$	$A_m = \frac{1000 B_m}{C'E}$	$C'E \cdot \beta'$	$A_m = \frac{1000 B_m}{C'E}$	
0,10	0,006066	1,1366	0,006047	0,7764	0,006036	0,5592	0,006029	0,4139	0,10
0,11	0,007340	1,1377	0,007317	0,7775	0,007304	0,5604	0,007295	0,4151	0,11
0,12	0,008735	1,1391	0,008709	0,7790	0,008692	0,5619	0,008682	0,4167	0,12
0,13	0,010257	1,1409	0,010221	0,7809	0,010202	0,5638	0,010189	0,4187	0,13
0,14	0,011891	1,1432	0,011854	0,7833	0,011833	0,5663	0,011818	0,4212	0,14
0,15	0,013651	1,1461	0,013609	0,7863	0,013584	0,5694	0,013567	0,4243	0,15
0,16	0,015534	1,1495	0,015486	0,7899	0,015457	0,5731	0,015438	0,4281	0,16
0,17	0,017538	1,1537	0,017484	0,7943	0,017451	0,5776	0,017430	0,4327	0,17
0,18	0,019664	1,1587	0,019603	0,7995	0,019567	0,5830	0,019543	0,4381	0,18
0,19	0,021913	1,1646	0,021845	0,8057	0,021805	0,5893	0,021778	0,4446	0,19
0,20	0,024284	1,1715	0,024209	0,8129	0,024164	0,5967	0,024134	0,4521	0,20
0,21	0,026779	1,1795	0,026696	0,8213	0,026646	0,6053	0,026613	0,4609	0,21
0,22	0,029396	1,1888	0,029305	0,8310	0,029251	0,6153	0,029214	0,4710	0,22
0,23	0,032138	1,1993	0,032038	0,8421	0,031978	0,6267	0,031938	0,4826	0,23
0,24	0,035003	1,2114	0,034895	0,8547	0,034829	0,6396	0,034786	0,4958	0,24
0,25	0,037994	1,2250	0,037876	0,8690	0,037805	0,6543	0,037757	0,5107	0,25
0,26	0,041110	1,2404	0,040981	0,8851	0,040904	0,6708	0,040853	0,5276	0,26
0,27	0,044351	1,2577	0,044213	0,9032	0,044130	0,6894	0,044074	0,5464	0,27
0,28	0,047720	1,2769	0,047570	0,9233	0,047481	0,7101	0,047421	0,5673	0,28
0,29	0,051216	1,2983	0,051055	0,9457	0,050939	0,7331	0,050894	0,5909	0,29
0,30	0,054841	1,3220	0,054668	0,9706	0,054564	0,7586	0,054495	0,6169	0,30
0,31	0,058596	1,3482	0,058410	0,9980	0,058299	0,7868	0,058225	0,6456	0,31
0,32	0,062482	1,3770	0,062283	1,0282	0,062164	0,8178	0,062084	0,6771	0,32
0,33	0,066499	1,4086	0,066287	1,0612	0,066159	0,8518	0,066074	0,7117	0,33
0,34	0,070651	1,4431	0,070424	1,0974	0,070288	0,8889	0,070197	0,7495	0,34
0,35	0,074937	1,4808	0,074695	1,1368	0,074550	0,9294	0,074453	0,7907	0,35
0,36	0,079361	1,5217	0,079103	1,1797	0,078948	0,9735	0,078845	0,8355	0,36
0,37	0,083923	1,5661	0,083649	1,2262	0,083484	1,0213	0,083374	0,8842	0,37
0,38	0,088625	1,6142	0,088334	1,2766	0,088159	1,0730	0,088043	0,9368	0,38
0,39	0,093471	1,6660	0,093162	1,3309	0,092976	1,1288	0,092852	0,9936	0,39
0,40	0,098462	1,7219	0,098134	1,3895	0,097937	1,1889	0,097805	1,0548	0,40
0,41	0,103601	1,7819	0,103253	1,4524	0,103044	1,2536	0,102904	1,1206	0,41
0,42	0,108891	1,8464	0,108521	1,5199	0,108308	1,3229	0,108152	1,1912	0,42
0,43	0,114334	1,9153	0,113942	1,5921	0,113707	1,3972	0,113551	1,2667	0,43
0,44	0,119933	1,9890	0,119519	1,6694	0,119270	1,4765	0,119104	1,3475	0,44
0,45	0,125693	2,0677	0,125255	1,7518	0,124991	1,5612	0,124816	1,4337	0,45
0,46	0,131617	2,1514	0,131153	1,8395	0,130874	1,6514	0,130688	1,5255	0,46
0,47	0,137709	2,2404	0,137217	1,9328	0,136922	1,7473	0,136726	1,6231	0,47
0,48	0,143972	2,3349	0,143452	2,0319	0,143140	1,8491	0,142932	1,7267	0,48
0,49	0,150412	2,4351	0,149862	2,1369	0,149532	1,9570	0,149312	1,8366	0,49
0,50	0,157034	2,5411	0,156452	2,2481	0,156103	2,0712	0,155878	1,9529	0,50
0,51	0,163841	2,6531	0,163226	2,3656	0,162837	2,1920	0,162611	2,0758	0,51
0,52	0,170841	2,7714	0,170190	2,4894	0,169800	2,3195	0,169540	2,2056	0,52
0,53	0,178038	2,8962	0,177350	2,6204	0,176938	2,4540	0,176662	2,3426	0,53
0,54	0,185439	3,0276	0,184712	2,7582	0,184275	2,5956	0,183984	2,4868	0,54
0,55	0,193051	3,1658	0,192281	2,9033	0,191820	2,7447	0,191512	2,6386	0,55
0,56	0,200880	3,3112	0,200066	3,0558	0,199578	2,9015	0,199253	2,7981	0,56
0,57	0,208934	3,4639	0,208074	3,2160	0,207558	3,0663	0,207214	2,9660	0,57
0,58	0,217221	3,6242	0,216312	3,3842	0,215766	3,2392	0,215402	3,1422	0,58
0,59	0,225751	3,7924	0,224789	3,5608	0,224211	3,4208	0,223826	3,3271	0,59
0,60	0,234532	3,9689	0,233514	3,7460	0,232903	3,6113	0,232496	3,5211	0,60
0,61	0,243574	4,1540	0,242497	3,9403	0,241851	3,8112	0,241420	3,7247	0,61
0,62	0,252889	4,3482	0,251749	4,1442	0,251066	4,0209	0,250610	3,9383	0,62
0,63	0,262489	4,5520	0,261282	4,3582	0,260558	4,2410	0,260076	4,1625	0,63
0,64	0,272386	4,7660	0,271109	4,5828	0,270342	4,4721	0,269831	4,3980	0,64
0,65	0,282594	4,9908	0,281242	4,8190	0,280431	4,7151	0,279890	4,6455	0,65
0,66	0,293131	5,2273	0,291699	5,0674	0,290839	4,9707	0,290266	4,9059	0,66
0,67	0,304013	5,4765	0,302495	5,3281	0,301585	5,2400	0,300978	5,1802	0,67
0,68	0,315260	5,7394	0,313651	5,6053	0,312686	5,5242	0,312043	5,4699	0,68
0,69	0,326894	6,0175	0,325189	5,8975	0,324145	5,8249	0,323483	5,7762	0,69
0,70	0,338940	6,3122	0,337131	6,2072	0,336046	6,1436	0,335322	6,1010	0,70
0,71	0,351426	6,6255	0,349507	6,5364	0,348355	6,4824	0,347587	6,4462	0,71
0,72	0,364386	6,9595	0,362347	6,8873	0,361125	6,8436	0,360309	6,8143	0,72
0,73	0,377855	7,3167	0,375690	7,2627	0,374390	7,2300	0,373524	7,2081	0,73
0,74	0,391878	7,7000	0,389576	7,6655	0,388194	7,6447	0,387273	7,6307	0,74
0,75	0,406504	8,1128	0,404054	8,0994	0,402584	8,0913	0,401604	8,0858	0,75
0,76	0,421792	8,5590	0,419182	8,5684	0,417616	8,5740	0,416572	8,5779	0,76
0,77	0,437809	9,0429	0,435026	9,0771	0,433356	9,0978	0,432243	9,1116	0,77
0,78	0,454634	9,5697	0,451663	9,6308	0,449880	9,6678	0,448692	9,6927	0,78
0,79	0,472336	10,1449	0,469186	10,2355	0,467280	10,2904	0,466010	10,3273	0,79
0,80	0,491104	10,7749	0,487702	10,8978	0,485661	10,9724	0,484301	11,0224	0,80

Tabela 3.1: Coeficientes de vazão para tubos de pequeno diâmetro. - FONTE: DELMEÉ, Manual de Medição de Vazã

3.4.1.3 Limites de Aplicação

Recomenda-se que as placas de orifício para tubulações de pequenos diâmetros não sejam usadas fora dos seguintes limites:

- $13\text{mm} < D < 40\text{mm}$
- Número de Reynolds superior a 1000
- D/K superior a 50000

3.4.1.4 Tolerâncias

O desvio padrão relativo ao coeficiente de descarga e , conseqüentemente, ao coeficiente de vazão, pode ser estimado como segue, já incluindo os desvios sobre D e d .

$$0,1 < \beta < 0,8$$

$$\text{Desvio Padrão Relativo a } C : = 2,50\%$$

3.5 Calibração do Ventilador Turbo Alimentador

3.5.1 Material e Métodos

Um conjunto ventilador turbo alimentador - variador de velocidade - tacômetro digital, foi empregado para gerar um fluxo de ar destinado a alimentar o duto de transporte de grãos.

Foi utilizado um ventilador turbo alimentador com elevada capacidade de rotação (30.000 rpm) e com baixo torque. Para transmitir aceleração ao ventilador foi utilizado um motor de corrente contínua, marca Kuper, modelo K-57-70, com 0,5 CV de potência e 10.000 rpm no eixo de saída, conforme é apresentado na Figura 3.7.

Para regular a aceleração do motor, empregamos um variador de velocidade marca Kuper, modelo 2T-M1, que possibilitou coletar mais informações da rotação do ventilador em intervalos de 500 rpm.

Para monitorar a rotação do ventilador empregamos um tacômetro de sensores óticos acoplado ao eixo do ventilador, monitorando o sinal com um mostrador digital, marca Euro Control, modelo TM-500, conforme também nos mostra a Figura 3.7.

Ao conjunto ventilador - variador de velocidade - tacômetro, foi acoplada a placa de orifício devidamente calibrada. Para obter-se o diferencial de pressão empregou-se um manômetro tipo

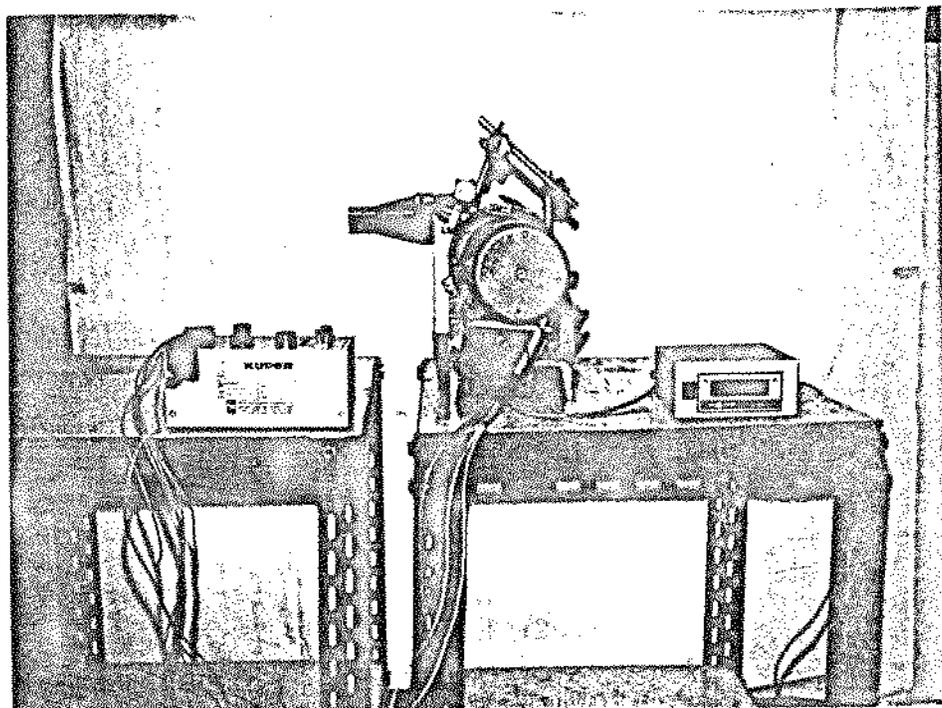


Figura 3.7: Conjunto Ventilador - Variador de Velocidade - Tacômetro Digital

tubo em U, com leituras de 1mm de coluna de água de precisão, apresentado na Figura 3.8.. A rotação do ventilador variou de 1000 a 10.000 rpm, em intervalos de 500 rpm.

Entre cada leitura houve um intervalo de 20 minutos para que o fluxo de fluido estivesse completamente estabilizado.

A temperatura e pressão barométrica ambientais foram registradas, para efetuar-se correções na densidade do ar.

3.6 Perda de carga no duto

Segundo HUGHES & BRIGHTON [26] e OWER & PANKHURST [33], o método de medição da diferença de pressão é baseado na Lei da Continuidade e na Equação Energética de Bernoulli.

De acordo com a Lei da Continuidade, a vazão de um fluido em movimento, dentro de uma tubulação, é igual em todos os seus pontos. Quando se diminui a seção transversal em um dos pontos da tubulação, a velocidade de escoamento naquele ponto aumenta. De acordo com a Equação Energética de Bernoulli, a energia contida em um fluido em movimento compõe-se

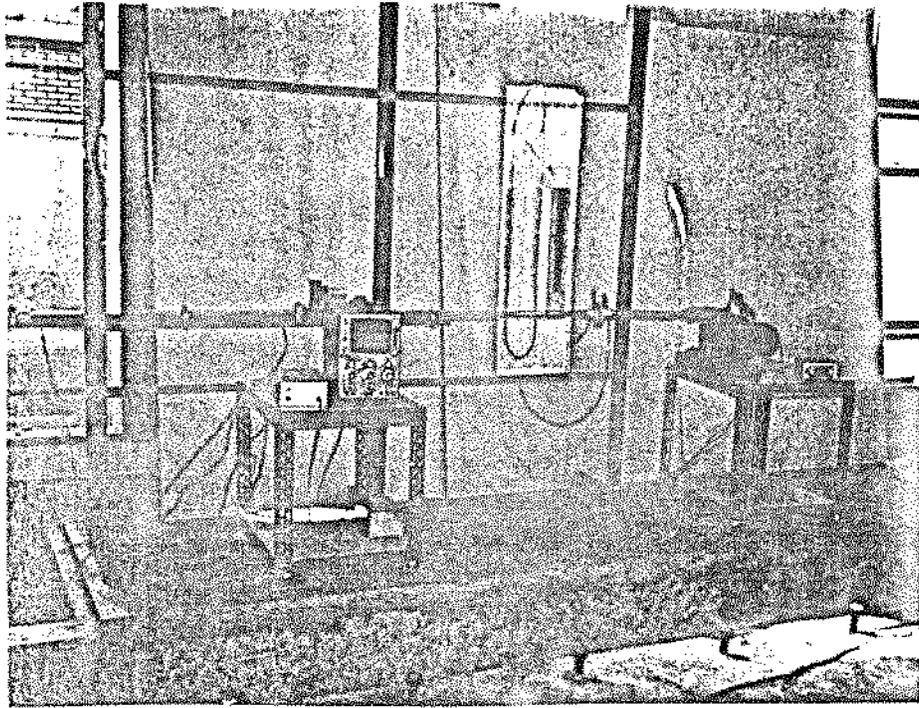


Figura 3.8: Manômetro tipo tubo em U

da soma das energias cinética (baseada na velocidade) e potencial (da pressão e posição). Um aumento da velocidade, portanto, leva à diminuição da pressão estática. Essa queda de pressão, a chamada pressão diferencial ΔP , é uma medida base para a vazão Q (contanto que a energia potencial da posição não se altere, ou se altere apenas um mínimo).

Na prática, ΔP , é produzida num dispositivo de estrangulamento instalado dentro de uma tubulação, o elemento de pressão diferencial, e pode ser medida sob a forma de diferença entre as pressões estáticas existentes antes do dispositivo de estrangulamento e no estreitamento, com o auxílio de um medidor de pressão diferencial. Com frequência, para realizar a medida de pressão diferencial entre dois pontos de uma tubulação, são empregados manômetros do tipo tubo em U, conforme apresentado na Figura 3.8.

3.6.1 Material e Métodos

Foram executados alguns testes preliminares, de modo a serem obtidos parâmetros técnicos da necessidade de fluxo de ar e velocidade deste fluxo. Optou-se pelo uso de dutos de mangueira cristal, um material plástico, flexível, transparente, de fácil manuseio e de baixo custo.

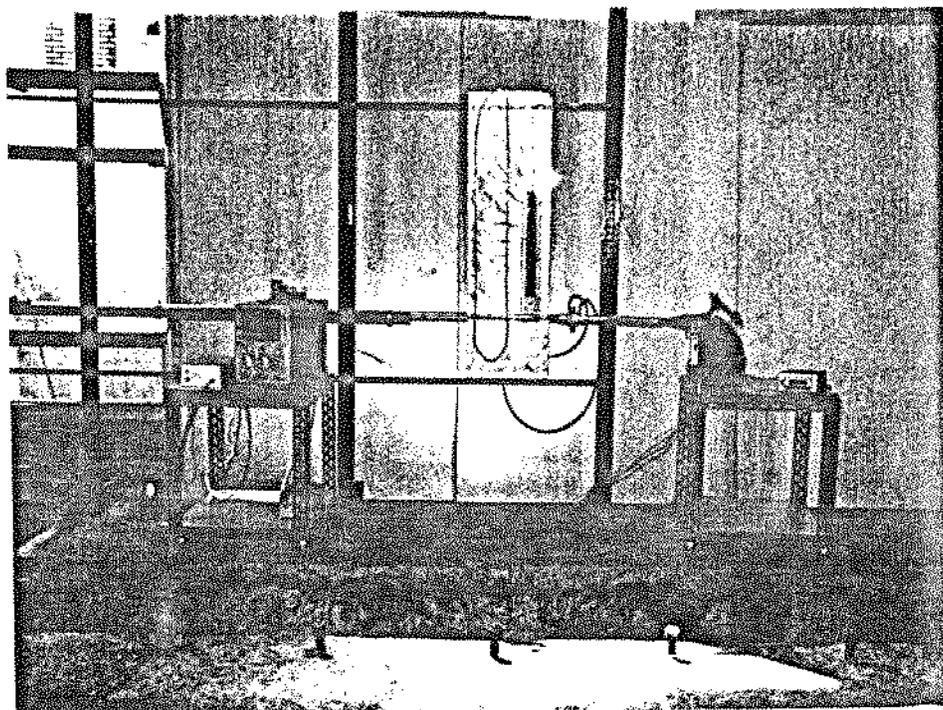


Figura 3.9: Linha de transporte - Dutos de vidro.

Concluída a fase preliminar, foi montada a linha definitiva de transporte de grãos, com dutos de vidro transparente, três diferentes diâmetros, montados sobre uma estrutura horizontal, conforme mostra a Figura 3.9.

Na fase preliminar os dutos de mangueira cristal foram de $1/2''$, $3/4''$ e $1''$ de diâmetro interno, respectivamente. Na fase definitiva foram testados dutos de vidro com diâmetros internos de 15mm, 20mm e 25mm.

As tomadas de pressão diferencial, em cada duto testado, foram colocadas, segundo o padrão técnico internacional, a 40 diâmetros após a placa de orifício e 10 diâmetros antes da saída do duto para o ambiente, para evitar perturbações da pressão ambiental sobre a leitura.

Variou-se a rotação do ventilador em intervalos de 500 rpm, entre 5000 e 10000 rpm, obtendo-se curvas da perda de carga (cmH_2O) em função da rotação do ventilador.

3.7 Instrumentação

3.7.1 Sensores Óticos

O conjunto que detecta a passagem dos grãos ao longo do duto é denominado de Sensor Ótico ou Sensor de Sementes, por consistir da união de um diodo foto-emissor(LED), montado em uma metade de um alojamento, com um diodo foto-sensível montado na outra metade deste alojamento conforme está apresentado na Figura 3.10.

Nesta montagem foram empregados os foto-emissores LD 271 e os diodos foto-sensíveis SFH 206 da marca SIEMENS, cujas principais características são apresentadas a seguir nas Figuras 3.11 e 3.12, respectivamente:

DIODO EMISSOR - LD 271

Tensão Reversa(U_R) : 4V
 Corrente Direta Máxima(I_F) : 130 mA
 Comprimento de Onda(λ) : 950 nm
 Intensidade de Radiação($I_F = 100$ mA) : ≈ 10 mW/s
 Meio Ângulo(φ) : 25 graus
 Tensão Direta ($I_F = 100$ mA) : 1,35V
 Encapsulamento : Standard

DIODO RECEPTOR - SFH 206

Tensão Reversa(U_R) : 20V
 Tensão de Circuito Aberto($\lambda = 950$ nm) : 327mV
 Sensibilidade Espectral($\mu A.cm^2/mW$) : 50
 Comprimento de Onda(λ) : 950 nm
 Área Sensível Receptora : 7,34 mm²
 Corrente Típica($V_R = 10$ V) : < 30nA
 Corrente em Curto Circuito($E = 0,5$ mW/cm²) : 25 μ A
 Limite de Detecção(cm. \sqrt{HZ}/W) : 7,3 x 10¹²
 Encapsulamento : Plástico Fumê

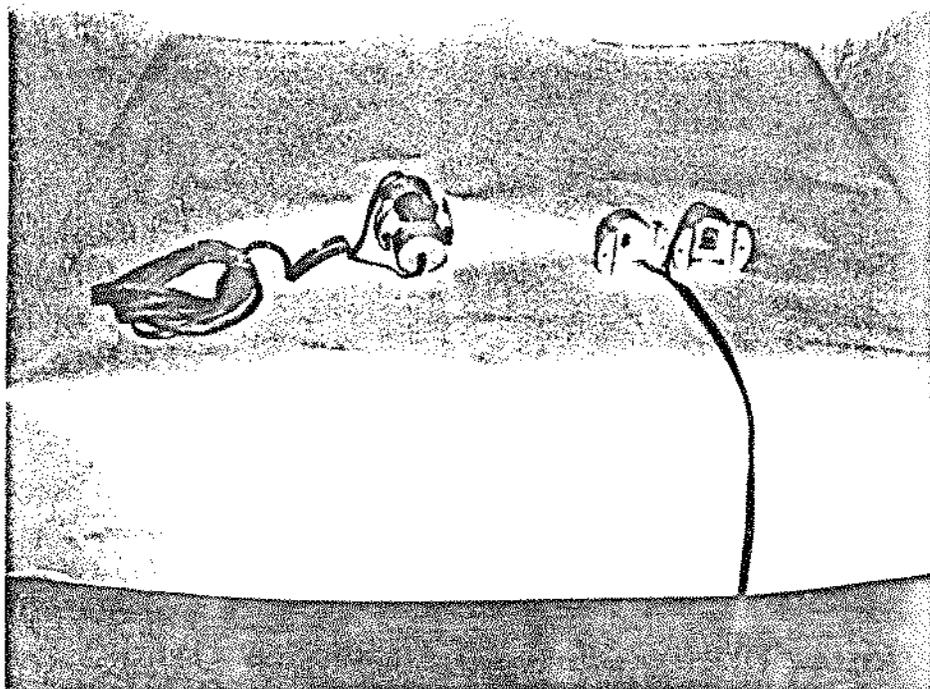


Figura 3.10: Sensor de Sementes

LD 271

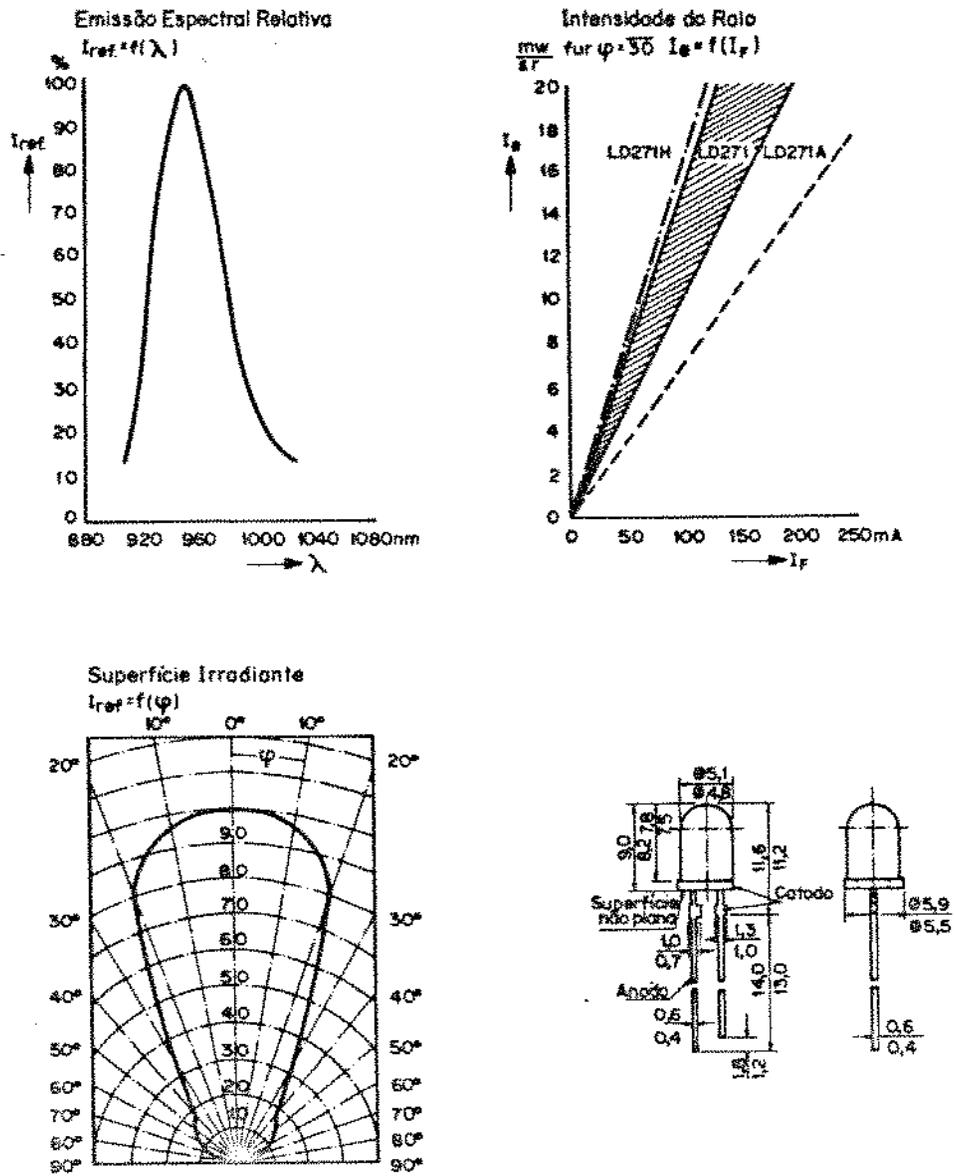


Figura 3.11: Diodo Emissor LD 271 - FONTE: CATÁLOGO SIEMENS

SFH 206

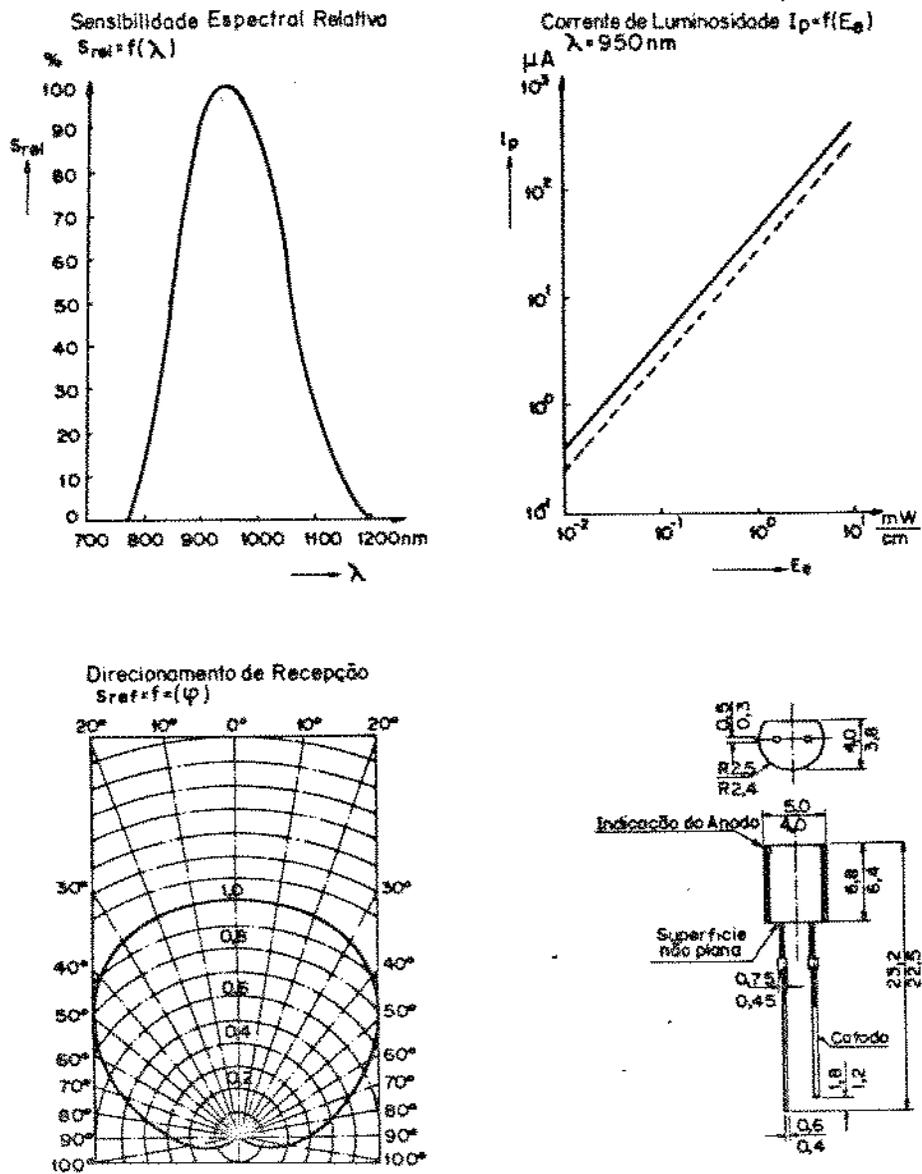


Figura 3.12: Diodo Receptor SFH 206 - FONTE: CATÁLOGO SIEMENS

3.7.2 Funcionamento do circuito eletrônico

O circuito eletrônico projetado e desenvolvido para o presente trabalho, está apresentado, de maneira esquemática na Figura 3.13.

Consiste basicamente do conjunto de sensores de sementes encapsulados em receptáculos de PVC, de tal modo a estarem em estreito contato com a superfície do duto de vidro, dentro do qual as sementes são transportadas.

Em funcionamento, quando o feixe de luz gerado pelo diodo emissor é interrompido pela passagem do grão, um pulso é formado. A seguir o pulso elétrico produzido é amplificado. A saída da largura de pulso do circuito é constante, independentemente da largura de pulso do sinal de entrada. A saída de pulso do amplificador é enviada para um circuito integrador linear que compreende: potenciômetro, resistor e amplificador operacional, com seus componentes associados. O circuito integrador linear produz uma voltagem de saída, que é proporcional à taxa de pulso recebida do circuito. A saída do circuito integrador é então alimentada a um circuito comparador de voltagem.

Após esta fase do circuito, os sinais dos quatro canais entram em um comando lógico que faz uma conversão paralelo/serial. Estando o sinal completamente convertido, é finalmente enviado para um osciloscópio com memória onde, aparece na tela, sob a forma de sinais luminosos. De acordo com uma escala definida na base de tempo, são obtidos os tempos reais gastos pelo objeto para percorrer distâncias fixas e predeterminadas.

3.7.3 Osciloscópio

Para coletar os sinais do circuito eletrônico, foi empregado um Osciloscópio Com Memória, modelo 1201A da Hewlett - Packard Company, apresentado na Figura 3.14.

Os testes foram conduzidos empregando-se o osciloscópio nas seguintes especificações:

- Deflexão Vertical : $1V/div$;
- Escala de Tempo : $0,5s/div$;
- Persistência : CONV.;
- Armazenamento : STD.

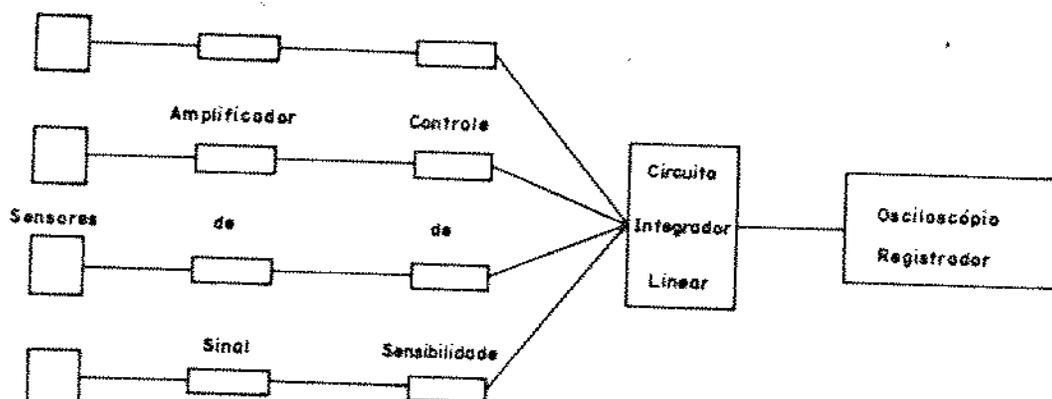


Figura 3.13: Circuito Eletrônico

3.8 Desaceleradores

Toda a pesquisa feita até o presente momento diz respeito ao transporte de produtos agrícolas, sob diferentes métodos experimentais. Nada foi reportado sobre a necessidade de se frear o produto ao final da tubulação. Como este trabalho visa dar subsídios para o desenvolvimento de uma semeadora pneumática por pressão de ar, é necessário um mecanismo que desacelere o grão, evitando que o mesmo venha a sofrer rebotes ou repiques ao atingir o solo, em função do modo acelerado como é transportado.

Deste modo, foram criados alguns sistemas visando obter esta desaceleração do grão, os quais serão descritos a seguir:

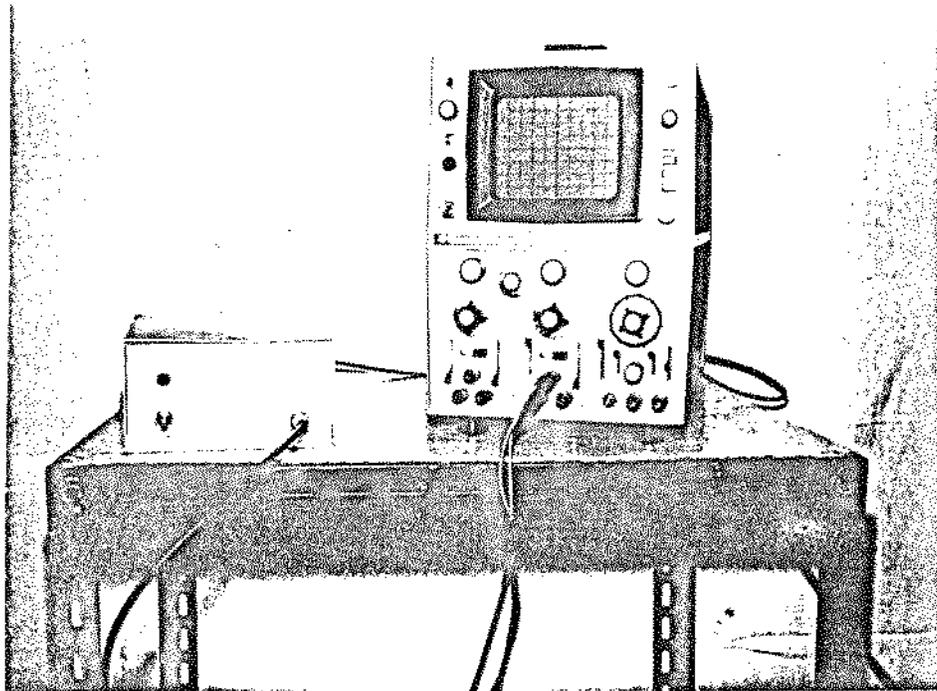


Figura 3.14: Osciloscópio com memória.

3.8.1 Desacelerador tipo despressurizador na linha de pressão

Este sistema de desacelerar o grão é composto por um dispositivo que contém única e exclusivamente um cilindro metálico confeccionado com tela malha 3mm, com 70mm de comprimento e 15mm de diâmetro interno, engastado entre dois suportes que, por sua vez, conectam com partes adjacentes do duto de vidro, conforme apresenta a Figura 3.15.

Para medir a desaceleração do grão, sensores óticos foram colocados nas extremidades do desacelerador, bem como na saída da tubulação.

3.8.2 Desacelerador tipo despressurizador, com fluxo de ar contrário.

As Figuras 3.16 e 3.17 mostram este desacelerador que emprega, como dispositivo auxiliar, um fluxo de ar contrário.

Ao desacelerador anterior foi acoplado um dispositivo para gerar, com o auxílio de uma linha de pressão, um fluxo de ar no sentido contrário ao do deslocamento do grão. Foram empregados fluxos contrários de até $3,0 \text{ kgf/cm}^2$ de pressão de ar.

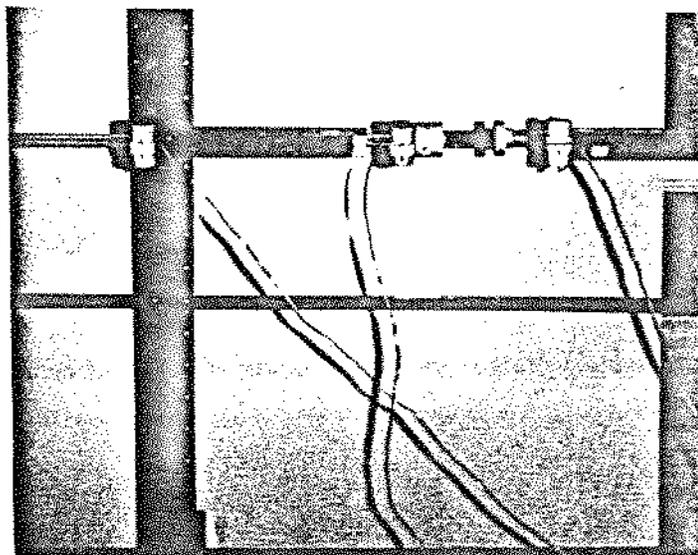


Figura 3.15: Desacelerador tipo despressurizador.

Teoricamente esperava-se que a corrente de ar no sentido contrário criasse uma espécie de colchão de ar com características de amortecimento da aceleração do grão, sem que houvesse desvio significativo na trajetória do mesmo.

3.8.3 Desacelerador tipo despressurizador, com curva 90° na vertical.

Outra tentativa para desacelerar o grão foi empregar, além do despressurizador, uma curva de 90° para caída dos grãos na vertical, conforme apresenta a Figura 3.18.

3.8.4 Desacelerador tipo despressurizador, com terminal helicoidal.

Também foi investigada a possibilidade de se desacelerar o grão empregando, na porção final da tubulação, um terminal helicoidal conforme mostra a Figura 3.19.

A idéia deste dispositivo é frear o grão ao longo da helicóide, de tal modo que o mesmo chegue ao solo com velocidade bastante reduzida, da ordem de 1,0 a 2,0 m/s.

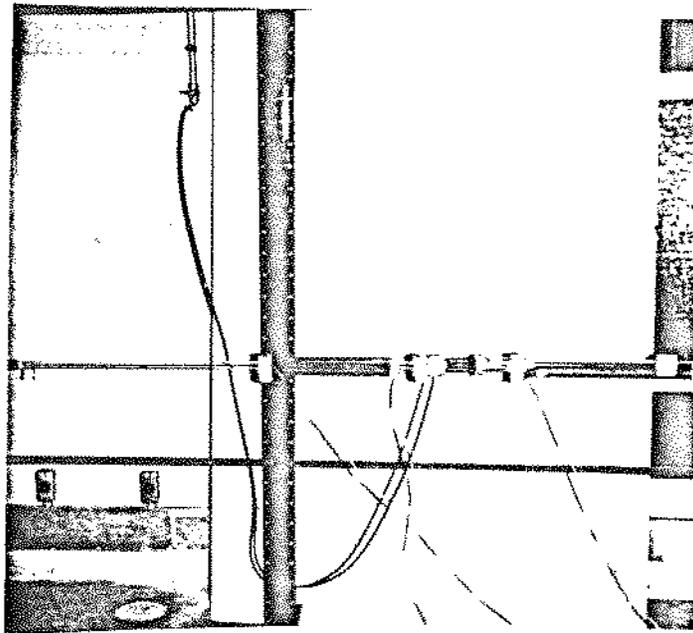


Figura 3.16: Desacelerador tipo despressurizador, com fluxo de ar contrário.

3.9 Análise Estatística dos Dados

A análise estatística dos resultados obtidos diz respeito aos métodos de organização, apresentação e análise dos dados, da mesma maneira em que busca obter conclusões válidas para a tomada de decisões corretas, baseadas em tais análises.

Para obter-se um grau mais confiável e criterioso na escolha dos melhores resultados, todos os dados foram submetidos a um "menu estatístico", cuja função básica é analisar estatisticamente os resultados e apresentá-los sob a forma de curvas ou gráficos.

Foram analisados estatisticamente os seguintes parâmetros: Vazão de Ar, Velocidade Média do Ar, Velocidade Média do Grão, Aceleração do Grão e Variabilidade do tempo de distribuição.

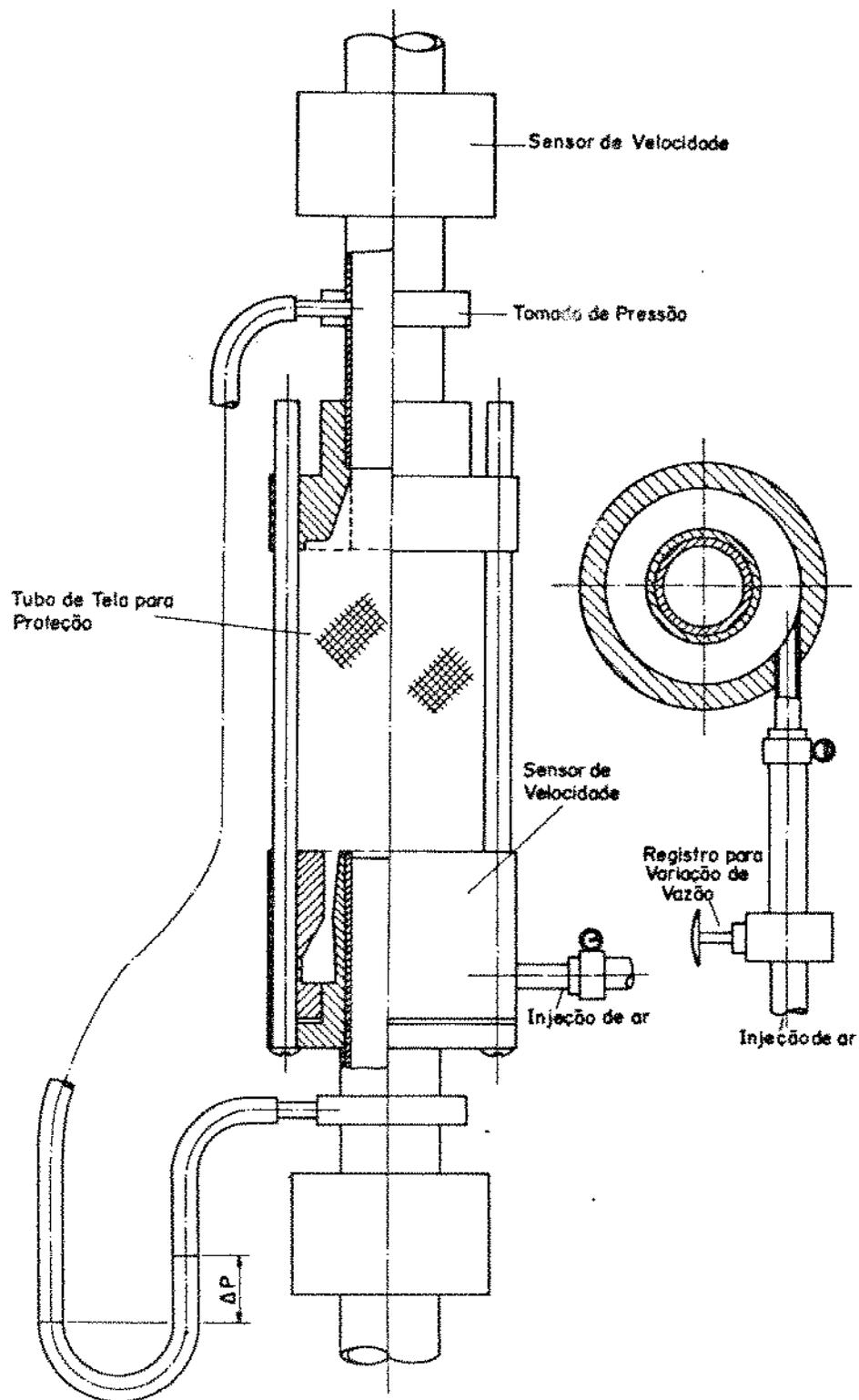


Figura 3.17: Esquema de funcionamento.

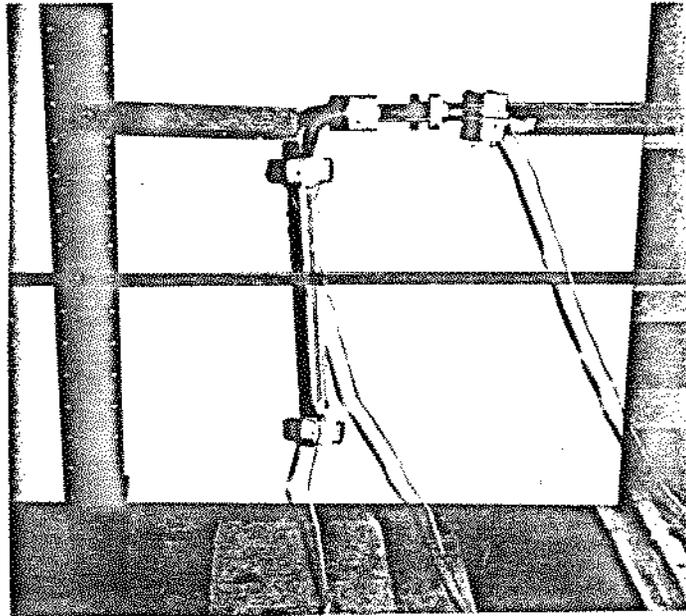


Figura 3.18: Desacelerador com caída na vertical.

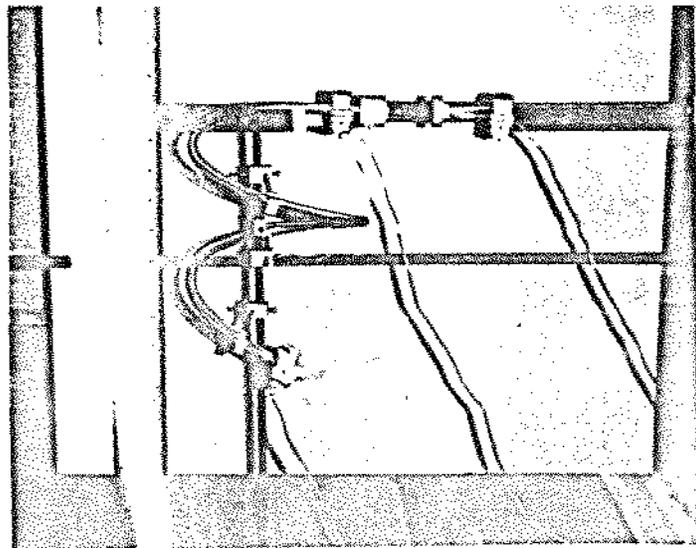


Figura 3.19: Desacelerador com terminal helicoidal.

Capítulo 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Características Físicas e Aerodinâmicas dos Produtos Testados

4.1.1 Massa específica aparente

A Tabela 4.1. apresenta os resultados dos ensaios realizados para a obtenção da massa específica dos produtos testados.

Tabela 4.1: Massa Específica Aparente dos Produtos Testados, em g/cm^3

PRODUTOS TESTADOS					
Repetições	Bolas de Madeira	Soja	Feijão	Milho AG 162	Milho AG 401
1	0,375	0,641	0,794	0,749	0,773
2	0,380	0,642	0,785	0,750	0,762
3	0,375	0,636	0,786	0,764	0,769
4	0,375	0,638	0,791	0,757	0,768
5	0,382	0,639	0,786	0,754	0,766
X	0,377	0,639	0,788	0,755	0,768
α	0,003	0,002	0,004	0,006	0,004

4.1.2 Massa específica real

A Tabela 4.2. apresenta a massa específica real dos produtos testados.

Tabela 4.2: Massa Específica Real dos Produtos Testados, em g/cm^3

PRODUTOS TESTADOS					
Repetições	Bolas de Madeira	Soja	Feijão	Milho AG 162	Milho AG 401
1	0,769	1,064	1,250	1,176	1,205
2	0,800	1,090	1,200	1,176	1,220
3	0,782	1,111	1,111	1,205	1,220
X	0,784	1,088	1,187	1,186	1,215
α	0,016	0,024	0,070	0,017	0,009

4.1.3 Teor de umidade

A Tabela 4.3. apresenta os resultados do teor de umidade dos produtos testados, com exceção das bolas de madeira.

4.1.4 Diâmetro equivalente

A Tabela 4.4. apresenta os resultados médios do diâmetro equivalente de 100 amostras de cada produto testado.

4.1.5 Massa unitária

Na Tabela 4.5. são apresentados os resultados obtidos da pesagem de 100 grãos de cada produto testado.

4.1.6 Volume médio

Na Tabela 4.6. são apresentados os dados médios do volume dos produtos, obtidos com auxílio do projetor de perfil.

4.1.7 Velocidade terminal experimental

Na Tabela 4.7. encontram-se os resultados coletados experimentalmente da velocidade terminal dos produtos testados.

4.1.8 Velocidade terminal teórica

Uma partícula em queda livre numa corrente de ar ascendente, está sujeita às forças gravitacionais devido ao empuxo e à de resistência. Estas forças atuam da seguinte maneira sobre o grão: o peso do grão atua para baixo, enquanto o empuxo e a força resistente atuam para cima. Quando estas forças estiverem em equilíbrio ($\sum F = 0$), a velocidade do grão será constante, sendo então denominada de velocidade terminal.

Segundo MOHSENIN [30] a força resistente é dada por:

$$F_r = \frac{1}{2} \cdot C \cdot A_p \cdot \rho_a \cdot V_t^2$$

Portanto,

$$m \cdot g - \rho_a \cdot g \cdot V_p = \frac{1}{2} \cdot C \cdot A_p \cdot V_t^2$$

Assim, a velocidade terminal pode ser determinada por:

$$V_t = \left[\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_a)}{\rho_p \cdot \rho_a \cdot C \cdot A_p} \right]^{1/2}$$

Podemos então calcular teoricamente a velocidade terminal de uma partícula desde que se conheçam os parâmetros envolvidos. Tanto o coeficiente aerodinâmico de arraste (C), quanto a velocidade terminal (V_t) são funções da forma da partícula e do número de Reynolds (Re).

Segundo MOHSENIN [30],

$$Re = \frac{D_{eq} \cdot V_t \cdot \rho_a}{\mu}$$

Deste modo,

$$V_t = \frac{Re \cdot \mu}{D_{eq} \cdot \rho_a}$$

Combinando as duas equações acima, vamos encontrar:

$$C Re^2 = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot D_{eq}^2 \cdot \rho_a \cdot (\rho_p - \rho_a)}{\mu^2 \cdot A_p \cdot \rho_p}$$

Uma vez conhecido o valor de $C Re^2$ e com o auxílio da Tabela 4.8, é possível a determinação de C e de Re e, através deles, a velocidade terminal teórica.

Tabela 4.3: Teor de Umidade dos Produtos Testados, em %

PRODUTOS TESTADOS					
Repetições	Bolas de Madeira	Soja	Feijão	Milho AG 162	Milho AG 401
1	-	12,1	14,0	12,7	13,3
2	-	12,3	13,8	12,5	13,4
3	-	12,2	13,8	12,7	13,4
4	-	12,0	13,9	12,1	13,7
5	-	12,1	13,8	12,6	13,6
X	-	12,1	13,9	12,5	13,5
α	-	0,11	0,09	0,25	0,16

Tabela 4.4: Diâmetro Equivalente dos Produtos Testados, em cm

PRODUTOS TESTADOS					
Repetições	Bolas de Madeira	Soja	Feijão	Milho AG 162	Milho AG 401
Média ₁₀₀ Dados	1,095	0,605	0,617	0,680	0,747
α	0,024	0,060	0,051	0,038	0,038

Tabela 4.5: Massa Unitária dos Produtos Testados, em g

PRODUTOS TESTADOS					
Repetições	Bolas de Madeira	Soja	Feijão	Milho AG 162	Milho AG 401
1	0,618	0,150	0,181	0,259	0,316
2	0,630	0,149	0,171	0,254	0,326
3	0,600	0,141	0,179	0,257	0,320
4	0,645	0,146	0,174	0,254	0,339
5	0,597	0,146	0,191	0,257	0,339
X	0,618	0,146	0,179	0,256	0,326
α	0,020	0,004	0,008	0,002	0,009

Tabela 4.6: Volume Médio dos Produtos Testados, em cm^3

PRODUTOS TESTADOS					
Repetições	Bolas de Madeira	Soja	Feijão	Milho AG 162	Milho AG 401
1	0,256	0,105	0,148	0,218	0,236
2	0,270	0,112	0,167	0,238	0,256
3	0,271	0,123	0,175	0,215	0,316
4	0,264	0,103	0,154	0,211	0,259
5	0,260	0,108	0,163	0,244	0,281
X	0,264	0,110	0,161	0,225	0,270
α	0,007	0,008	0,010	0,015	0,030

Tabela 4.7: Velocidade Terminal Experimental, em m/s

PRODUTOS TESTADOS					
Repetições	Bolas de Madeira	Soja	Feijão	Milho AG 162	Milho AG 401
1	12,19	10,67	10,65	10,16	10,92
2	12,45	10,67	10,67	9,91	10,18
3	12,70	10,92	9,91	10,67	10,18
4	12,70	10,67	10,65	10,16	10,43
5	12,19	10,67	10,16	10,41	10,20
X	12,45	10,72	10,41	10,26	10,38
α	0,26	0,11	0,33	0,29	0,32

Tabela 4.8: Relações entre CRe^2 , Re e C para corpos esféricos.

Re	C	CRe^2
1	26,5	26,5
2	14,4	57,6
5	6,9	173
10	4,1	410
20	2,55	$1,02 \times 10^2$
50	1,50	$3,75 \times 10^2$
100	1,07	$1,07 \times 10^3$
1000	0,46	$4,60 \times 10^4$
2000	0,42	$1,68 \times 10^6$
3000	0,40	$3,60 \times 10^6$
5000	0,385	$9,60 \times 10^6$
7000	0,390	$1,91 \times 10^7$
10000	0,405	$4,05 \times 10^7$
20000	0,450	$1,80 \times 10^8$

Para exemplificar, far-se-à o desenvolvimento passo a passo da velocidade terminal teórica dos produtos testados nesta experimentação.

Dados de Projeto:

1) Diâmetro Equivalente : $D_{eq} = (L_1 \cdot L_2 \cdot L_3)^{1/3}$, em cm.

$$D_{eq} \text{ Bolas} = 1,095$$

$$D_{eq} \text{ Soja} = 0,605$$

$$D_{eq} \text{ Feijão} = 0,617$$

$$D_{eq} \text{ AG162} = 0,680$$

$$D_{eq} \text{ AG401} = 0,747$$

2) Massa Característica do Grão

Média de 100 grãos, em gramas

$$m \text{ Bolas} = 0,618$$

$$m \text{ Soja} = 0,146$$

$$m \text{ Feijão} = 0,179$$

$$m \text{ AG162} = 0,256$$

$$m \text{ AG401} = 0,326$$

3) Área Projetada : $A_p = \frac{\pi \cdot D_{eq}^2}{4}$, em cm^2

$$A_p \text{ Bolas} = 0,942$$

$$A_p \text{ Soja} = 0,287$$

$$A_p \text{ Feijão} = 0,299$$

$$A_p \text{ AG162} = 0,363$$

$$A_p \text{ AG401} = 0,438$$

4) Massa Específica Real, em g/cm^3

$$\rho_{Bolas} = 0,784$$

$$\rho_{Soja} = 1,088$$

$$\rho_{Feijao} = 1,187$$

$$\rho_{AG162} = 1,186$$

$$\rho_{AG401} = 1,215$$

5) Determinar

$$(CRe^2) = \frac{2.m.g.D_{eq}^2(\rho_p - \rho_a) \cdot \rho_a}{\mu^2 \cdot A_p \cdot \rho_p}$$

onde,

$$\rho_a = \text{densidade do ar} = 0,001293 \text{ g/cm}^3;$$

$$\mu = \text{viscosidade do ar} = 0,000181 \text{ g/cm.s};$$

$$g = \text{aceleração da gravidade} = 981 \text{ cm/s}^2.$$

$$(CRe^2)_{Bolas} = 60,812 \times 10^6$$

$$(CRe^2)_{Soja} = 14,401 \times 10^6$$

$$(CRe^2)_{Feijão} = 17,629 \times 10^6$$

$$(CRe^2)_{AG162} = 25,224 \times 10^6$$

$$(CRe^2)_{AG401} = 32,090 \times 10^6$$

6) A partir de (CRe^2) e com o auxílio da Tabela 4.8., encontram-se os valores do Número de Reynolds (Re) e do Coeficiente de Arraste (C).

$Re_{Bolas} = 11.450$	$C_{Bolas} = 0,410$
$Re_{Soja} = 6.100$	$C_{Soja} = 0,387$
$Re_{Feijao} = 6.700$	$C_{Feijao} = 0,388$
$Re_{AG162} = 7.850$	$C_{AG162} = 0,395$
$Re_{AG401} = 8.850$	$C_{AG401} = 0,398$

7) Cálculo da Velocidade Terminal Teórica, em cm/s

Empregando-se a equação 2.32., obtêm-se:

$$V_t_{Bolas} = \frac{11450 \cdot 0,000181}{1,095 \cdot 0,001293} = 1463,8 \text{ cm/s} = 14,64 \text{ m/s}$$

$$V_t Soja = \frac{6100.0,000181}{0,605.0,001293} = 1411,4cm/s = 14,11m/s$$

$$V_t Feijão = \frac{6700.0,000181}{0,617.0,001293} = 1520,1cm/s = 15,20m/s$$

$$V_t AG162 = \frac{7850.0,000181}{0,680.0,001293} = 1616,0cm/s = 16,16m/s$$

$$V_t AG401 = \frac{8850.0,000181}{0,747.0,001293} = 1658,4cm/s = 16,58m/s$$

8) Cálculo do Coeficiente de Arraste Real, C .

Observa-se, pelo cálculo da velocidade terminal teórica, que existe uma grande discrepância entre os dados teóricos e os experimentais. Existem meios de explicar e corrigir tais desvios. O primeiro método é corrigindo o valor do coeficiente de arrasto. Usando a equação proposta por FLEMMER e BANKS [17] é possível encontrar-se o valor real deste coeficiente.

$$C = \frac{24}{Re} \cdot 10^E$$

$$E = 0,261 \cdot Re^{0,369} - 0,105 \cdot Re^{0,431} - \frac{0,124}{1 + (\log Re)^2}$$

Assim,

Produtos	C_{Real}	$C_{Teorico}$
Bolas	0,430	0,410
Soja	0,399	0,387
Feijão	0,402	0,388
AG162	0,407	0,395
AG401	0,412	0,398

O segundo método para explicar o desvio que existe entre os valores reais e teóricos da velocidade terminal é usando o conceito da esfericidade dos produtos testados, uma vez que a velocidade terminal teórica é baseada em corpos esféricos perfeitos. Usando:

$$Esfericidade = \left[\frac{D_{interm.} \cdot D_{menor}}{D_{maior}^2} \right]^{1/3}$$

vamos encontrar os seguintes valores para a esfericidade dos produtos testados:

$$\text{Bolas} = 0,977 = 98 \%$$

$$\text{Soja} = 0,902 = 90 \%$$

$$\text{Feijão} = 0,693 = 69 \%$$

$$\text{AG162} = 0,712 = 71 \%$$

$$\text{AG401} = 0,647 = 65 \%$$

Fazendo-se uma comparação entre velocidade terminal teórica e experimental x esfericidade chega-se a conclusão da importância da forma do objeto que está sendo transportado em um fluxo de ar.

Produtos	V_t Teórica	V_t Experim.	Esfericidade	Dif %
Bolas	14,64	12,45	98 %	17,6
Soja	14,11	10,72	90 %	31,6
Feijão	15,20	10,41	69 %	46,0
AG162	16,16	10,26	71 %	57,5
AG401	16,58	10,38	65 %	60,0

4.2 Calibração da Placa de Orifício

Utilizou-se, como elemento padrão de calibração, um laminador de fluxo. Durante a realização dos testes, a pressão barométrica era de 952 mbar e a temperatura média ambiental foi de 21°C.

Na Tabela 4.9. são apresentados os dados coletados durante os testes, bem como o cálculo do número de Reynolds e coeficiente de arrasto obtidos através das equações 2.32 e 2.20, respectivamente.

Tabela 4.9: Calibração de uma Placa de Orifício com as seguintes especificações: $d = 2,54$ cm ; $\beta = 0,5$; conexões $p_1 = 1d$ e $p_2 = 0,5d$

ΔP laminador (cmH_2O)	$Q_{laminador}^*$ (m^3/h)	ΔP placa (cmH_2O)	V duto (m/s)	Re duto	Cd
0,20	2,618	2,8	1,38	2247	0,650
0,56	7,922	8,2	4,14	6741	0,635
0,61	8,279	9,0	4,54	7392	0,630
0,74	10,183	15,8	5,53	9004	0,629
0,96	12,869	18,2	7,10	11560	0,627
1,17	15,130	22,4	8,29	13498	0,626
1,19	16,184	26,8	8,88	14458	0,625
1,45	18,394	39,2	10,46	17031	0,623
1,52	20,400	48,8	11,25	18317	0,621

4.3 Perda de Carga, Velocidade Média do Ar e Vazão de Ar.

Na Figura 4.1. de maneira esquemática apresenta-se o método de leitura da perda de carga ao longo da tubulação. Quando a diferença de pressão (ΔP) é medida com um tubo em U, preenchido com um líquido selante qualquer (mercúrio, álcool ou água), deve-se fazer algumas correções, considerando:

Pressão em A : $P_1 + \Delta \cdot \rho \cdot g$

Pressão em B : $P_2 + (\Delta - \Delta h) \cdot \rho \cdot g + \Delta h \cdot \rho_m \cdot g$

Como, pela hidrostática, a pressão em A é igual a pressão em B, tem-se:

$$P_1 - P_2 = \Delta h \cdot (\rho_m - \rho_1) \cdot g$$

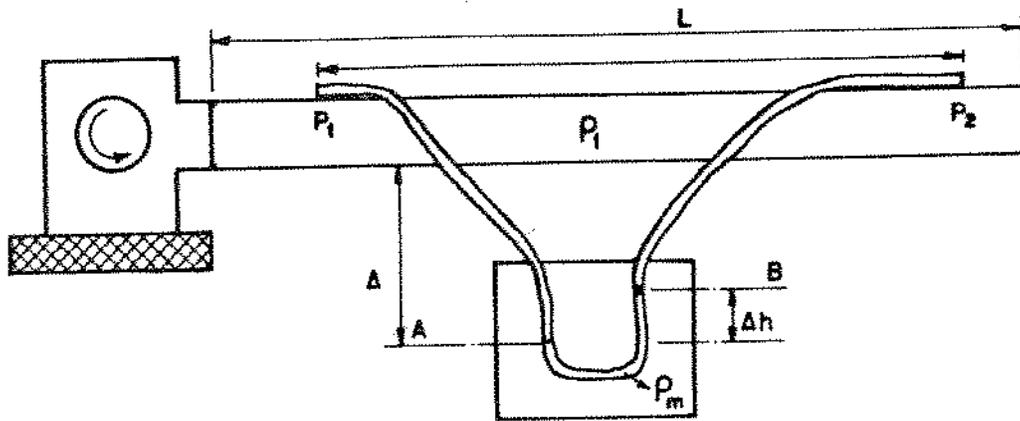


Figura 4.1: Leitura de perda de carga ao longo do duto.

Tabela 4.10: Perda de carga, em cm H_2O por metro linear de tubulação, para dutos de vidro com diâmetros internos de 15mm, 20mm e 25mm.

RPM DO TURBO	PERDA DE CARGA		
	DUTO DE VIDRO		
	15 mm	20 mm	25 mm
5000	0,28	0,17	0,14
5500	0,36	0,22	0,19
6000	0,44	0,28	0,25
6500	0,53	0,33	0,30
7000	0,61	0,39	0,33
7500	0,72	0,47	0,39
8000	0,83	0,56	0,47
8500	0,94	0,67	0,56
9000	1,06	0,75	0,64
9500	1,17	0,83	0,72
10000	1,30	0,92	0,80

Na Tabela 4.10 são apresentados os valores medidos da perda de carga por metro linear de tubulação.

Ao mesmo tempo que mediu-se a perda de carga ao longo da tubulação, calculou-se a velocidade média do ar (m/s) e a vazão de ar (m^3/h) nos dutos, empregando-se o seguinte equacionamento:

$$V = \sqrt{\frac{2.g.(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

$$A = \frac{\pi.d_t^2}{4}$$

$$Q = V.A$$

Nas Tabelas 4.11 e 4.12 encontram-se os valores tabulados da velocidade média do ar e da vazão do ar nos três dutos de vidro testados.

Tabela 4.11: Velocidade média do fluxo de ar no interior da tubulação, em *m/s*.

RPM DO TURBO	VELOCIDADE MÉDIA		
	DUTO DE VIDRO		
	15 mm	20 mm	25 mm
5000	12,86	9,96	9,09
5500	14,66	11,50	10,76
6000	16,27	12,86	12,20
6500	17,73	14,66	13,49
7000	19,08	15,22	14,66
7500	20,74	16,77	15,22
8000	22,28	18,19	16,77
8500	23,72	19,92	18,19
9000	25,07	21,13	19,50
9500	26,36	22,28	20,74
10000	27,88	23,36	21,90

4.4 O Transporte do grão e a variância dos resultados.

Quando um transportador de grãos está sendo projetado, não apenas a avaliação da velocidade terminal das partículas ou a queda de pressão nos dutos são suficientes para definir o seu desempenho operacional. Além destes dois importantes parâmetros, devemos levar em consideração que a distribuição unitária do grão é o objetivo final. Assim, é necessário lembrar que partículas sob transporte pneumático recebem um certo grau de resistências tais como impactos, fricção contra as paredes do duto e até mesmo efeitos da gravidade.

O impacto, para uma partícula em alta velocidade, significa uma enorme perda de energia, aumentando e variando o tempo de distribuição. Quando uma semente tem um impacto na superfície do duto, o coeficiente de restituição (relação entre a velocidade após o impacto/velocidade antes do impacto), tanto quanto o coeficiente de fricção entre o duto e a semente, são responsáveis pela perda de energia durante o impacto.

A solução encontrada por muitos projetistas de sistemas pneumáticos foi aumentar a pressão de ar fornecida ao transporte. Um aumento na pressão do ar aumenta a velocidade da semente,

Tabela 4.12: Vazão de ar no interior da tubulação, em m^3/h .

RPM DO TURBO	VAZÃO DE AR		
	DUTO DE VIDRO		
	15 mm	20 mm	25 mm
5000	8,18	11,26	16,07
5500	9,33	13,01	19,02
6000	10,35	14,54	21,56
6500	11,28	16,58	23,84
7000	12,14	17,21	25,91
7500	13,19	18,97	26,90
8000	14,17	20,57	29,64
8500	15,09	22,53	32,15
9000	15,95	23,90	34,47
9500	16,77	25,20	36,66
10000	17,74	26,42	38,71

diminuindo o número de impactos na superfície do duto. Entretanto, a velocidade final da semente aumenta significativamente, indicando claramente que ela está em aceleração durante o processo de distribuição.

Também é importante e bem conhecido o fato de que a velocidade média da semente irá variar com o comprimento do duto empregado, ou seja, quanto maior a distância, maior será a velocidade média da semente, outro indicativo de que ela está em aceleração enquanto percorre o duto.

Para definir até que ponto a variabilidade dos resultados é importante no desempenho do mecanismo proposto, foi analisada a variabilidade dos resultados do transporte dos diferentes produtos, em três diâmetros de duto e em cinco velocidades do ar. Nas Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15 são apresentados estes valores.

Tabela 4.13: Variância do tempo de distribuição ($\text{VAR}(t) \times 10^3 s$), dos produtos testados, no duto de 15mm de diâmetro interno.

PRODUTOS TESTADOS	DIST. (m)	VELOCIDADE DO AR (m/s)				
		19	22	24	26	29
BOLAS DE MADEIRA	1,0	0,32	0,40	0,17	0,12	-
	2,0	0,88	0,88	0,87	0,75	-
	3,0	2,28	1,63	1,58	1,52	-
SOJA	1,0	14,64	10,00	3,48	1,09	-
	2,0	67,01	46,41	18,33	6,69	-
	3,0	146,55	93,80	33,90	15,01	-
FEIJÃO	1,0	9,02	2,29	1,60	1,16	-
	2,0	17,42	4,98	5,28	4,28	-
	3,0	38,26	14,98	8,30	6,31	-
MILHO AG 162	1,0	5,62	0,90	2,12	0,62	-
	2,0	12,93	2,45	2,75	2,22	-
	3,0	26,44	5,71	3,80	4,80	-
MILHO AG 401	1,0	1,68	1,16	1,30	0,78	-
	2,0	6,32	3,40	3,79	1,88	-
	3,0	13,18	7,15	5,97	2,45	-

Tabela 4.14: Variância do tempo de distribuição ($\text{VAR}(t) \times 10^3 \text{s}$), dos produtos testados, no duto de 20 mm de diâmetro interno.

PRODUTOS TESTADOS	DIST. (m)	VELOCIDADE DO AR (m/s)				
		19	22	24	26	29
BOLAS DE MADEIRA	1,0	0,72	0,48	0,96	0,68	0,22
	2,0	2,00	1,35	1,71	1,33	0,38
	3,0	7,25	2,58	3,10	1,45	0,90
SOJA	1,0	14,44	5,93	21,61	6,08	3,60
	2,0	64,50	19,74	51,06	29,69	16,01
	3,0	161,47	48,70	123,98	58,33	37,41
FEIJÃO	1,0	12,10	8,65	4,76	3,25	2,50
	2,0	40,80	44,01	14,80	12,54	7,09
	3,0	114,42	107,72	37,46	27,14	12,53
MILHO AG 162	1,0	-	4,76	4,36	1,85	3,36
	2,0	-	25,58	14,46	12,16	9,81
	3,0	-	83,74	31,77	30,50	20,82
MILHO AG 401	1,0	18,50	8,65	4,10	6,89	2,92
	2,0	34,31	31,39	15,65	30,46	14,35
	3,0	86,01	71,69	31,90	60,94	27,32

Tabela 4.15: Variância do tempo de distribuição ($\text{VAR}(t) \times 10^3 \text{s}$), dos produtos testados, no duto de 25 mm de diâmetro interno.

PRODUTOS TESTADOS	DIST. (m)	VELOCIDADE DO AR (m/s)				
		19	22	24	26	29
BOLAS DE MADEIRA	1,0	0,68	0,32	0,44	0,32	0,48
	2,0	1,81	0,84	0,83	0,86	0,82
	3,0	3,29	2,52	1,26	1,09	1,35
SOJA	1,0	7,40	12,35	4,90	2,60	0,84
	2,0	64,39	23,69	18,66	16,82	3,85
	3,0	145,21	40,69	40,28	49,48	13,66
FEIJÃO	1,0	12,77	9,41	6,08	1,37	3,60
	2,0	57,20	27,86	27,22	3,49	5,28
	3,0	185,97	77,52	38,58	7,59	9,10
MILHO AG 162	1,0	4,62	8,65	3,02	2,40	1,44
	2,0	24,62	28,70	22,01	9,93	4,18
	3,0	55,82	52,53	35,25	23,05	8,44
MILHO AG 401	1,0	7,06	2,70	1,02	1,44	1,94
	2,0	19,75	9,69	2,97	2,80	6,50
	3,0	38,01	23,92	9,13	5,76	10,88

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES - Fase 1: Efeito do diâmetro e comprimento do duto sobre a velocidade e aceleração do grão.

Em todos os testes realizados, foram padronizados pontos para a observação do comportamento dos produtos ao longo do duto. Estes pontos foram programados para receber os sensores óticos responsáveis pela leitura da passagem do grão, sendo colocados:

- no tubo de lançamento do produto;
- a 1,0 m de distância;
- a 2,0 m de distância;
- a 3,0 m de distância.

Os sensores óticos colocados nestes pontos de observação, por sua vez, enviaram sinais elétricos ao osciloscópio, a cada passagem de um grão. Na tela do osciloscópio ficaram registrados os quatro pontos referentes ao tempo que cada grão necessitou para percorrer o duto. A posição, ou o tempo que cada produto gastou para percorrer determinada distância, foi anotada em uma planilha de dados para a posterior execução dos cálculos da velocidade de deslocamento do grão ao longo do duto. Cada um destes pontos experimentais foi repetido 15 vezes em todos os ensaios realizados, de modo a obter-se uma velocidade média a mais próxima possível da real.

A seguir, detalhadamente, serão descritos os efeitos do diâmetro do duto, da velocidade do ar e do comprimento do duto, na velocidade e aceleração do grão.

5.1 Efeito do diâmetro e do comprimento do duto na velocidade de deslocamento do grão

Todos os produtos testados comportaram-se de maneira semelhante nos diferentes diâmetros de duto. À medida que o diâmetro aumentou, menor foi a velocidade do grão para uma mesma velocidade do ar. No duto de 25mm, para se manter o transporte do grão dentro dos limites aceitáveis, foi necessária a utilização de um fluxo muito maior de ar. Também pode-se observar que os produtos de maior área projetada apresentaram mudanças mais acentuadas no comportamento da velocidade, demonstrando claramente a influência do diâmetro do duto no transporte dos grãos.

Com relação ao comprimento do duto, observa-se que sempre houve aumento de velocidade com o aumento da distância, sinal de que existe aceleração da partícula ao longo da tubulação. Entretanto, à medida que o diâmetro aumenta este efeito diminui e tende a inverter, ou seja, em diâmetros superiores a 25mm deverá ocorrer um processo de arrasto do grão pelas paredes do duto, em função da falta de sustentação do grão no fluxo de ar.

5.1.1 Efeito do diâmetro e comprimento do duto na velocidade de bolas de madeira

5.1.1.1 Características do produto

Massa Específica Aparente	0,377 g/cm ³
Diâmetro Equivalente	1,095 cm
Massa Unitária	0,618 g
Volume Médio	0,264 cm ³
d/D (diâm. equiv/diâm. duto)	$d/D_1 = 0,730$
	$d/D_2 = 0,547$
	$d/D_3 = 0,438$

Tabela 5.1: Velocidade Média de Transporte de Bolas de Madeira ao Longo do Duto, com uma Velocidade de Ar Equivalente a 30 m/s

	15mm	20mm	25mm
1,0m comprimento	4,5	1,8	0,9
2,0m comprimento	5,2	2,3	1,2
3,0m comprimento	5,6	2,6	1,3

5.1.1.2 Comportamento ao longo do duto

Para definir-se alguns pontos de discussão, foi fixada a velocidade de deslocamento do ar no interior do duto no nível de 30 m/s, (Tabela 5.1) estudando-se então o comportamento dos diferentes produtos em relação ao diâmetro e ao comprimento do duto.

Pode-se dizer que, no duto de 15mm é possível efetuar o transporte dos grãos em maiores velocidades, empregando-se a mesma velocidade de ar. Como o transporte de partículas depende da energia que o ar transmite, quanto maior o duto, menor a transferência de energia e, conseqüentemente, menor velocidade final.

Em relação ao comprimento do duto, o comportamento das bolas de madeira foi aquele esperado para todas as partículas testadas, ou seja, em dutos de maior comprimento a velocidade sempre foi maior, independentemente do diâmetro.

Na figura 5.1. encontram-se as curvas representativas de cada duto, bem como as equações que regem o seu comportamento.

Tabela 5.2: Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Soja ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.

	15mm	20mm	25mm
1,0m comprimento	2,8	1,3	1,3
2,0m comprimento	3,2	1,5	1,5
3,0m comprimento	3,3	1,6	1,6

5.1.2 Efeito do diâmetro e comprimento do duto na velocidade de grãos de soja cultivar Foscarini

5.1.2.1 Características do produto

Massa Específica Aparente	0,639 g/cm ³
Diâmetro Equivalente	0,605 cm
Massa Unitária	0,146 g
Volume Médio	0,110 cm ³
d/D (diâm.equiv/diâm. duto)	$d/D_1 = 0,403$
	$d/D_2 = 0,302$
	$d/D_3 = 0,242$

5.1.2.2 Comportamento ao longo do duto

A soja, apesar de ser o produto de menor área projetada, menor peso unitário e maior esfericidade do que os demais produtos agrícolas testados, não teve um comportamento normal, ou seja, seus resultados não foram progressivos a cada diâmetro de duto, conforme nos apresenta a Tabela 5.2.

De acordo com literatura consultada, quanto menor a área projetada de uma partícula, menor a velocidade de transporte. Nesta experimentação pode-se notar que a afirmativa é real, uma vez que a velocidade dos grãos de soja foi a menor de todos os produtos testados. Também pode-se constatar que não houve redução da velocidade entre os dutos de 20mm e 25mm, indicando ser esta a velocidade mínima que os grãos de soja adquirem estando o fluxo de ar com velocidade

média de 30 m/s.

Curioso também é o fato de quase não haver aceleração à medida que aumenta-se o comprimento do duto. Explica-se pelo fato do grão de soja ocupar pouco espaço dentro do duto, de tal modo a não sofrer efeitos de transferência de energia da massa de ar.

Na figura 5.2. encontram-se as curvas representativas de cada duto, bem como as equações que regem o seu comportamento.

5.1.3 Efeito do diâmetro e comprimento do duto na velocidade de grãos de feijão, cultivar Carioquinha

5.1.3.1 Características do produto

Massa Específica Aparente	0,788 g/cm ³
Diâmetro Equivalente	0,617 cm
Massa Unitária	0,179 g
Volume Médio	0,161 cm ³
d/D (diâm.equiv/diâm. duto)	$d/D_1 = 0,411$
	$d/D_2 = 0,308$
	$d/D_3 = 0,247$

5.1.3.2 Comportamento ao longo do duto

Os grãos de feijão não apresentam as características de esfericidade das bolas de madeira (testemunha) ou da soja, mas tanto o diâmetro equivalente, quanto o peso e a relação d/D são semelhantes à soja. Deste modo, é possível concluir que as variações apresentadas são decorrentes do fator de forma.

Na Tabela 5.3 observa-se uma redução acentuada da velocidade à medida que o duto aumenta. Do mesmo modo, à medida que aumenta-se o comprimento do duto, aumenta a velocidade de transporte do grão. Este acréscimo é notado no duto de menor diâmetro, ficando quase estacionário no de maior diâmetro.

Na figura 5.3 encontram-se as curvas representativas de cada duto, bem como as equações que regem o seu comportamento.

Tabela 5.3: Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Feijão ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s

	15mm	20mm	25mm
1,0m comprimento	3,2	1,5	1,1
2,0m comprimento	3,8	1,8	1,2
3,0m comprimento	4,3	2,0	1,3

5.1.4 Efeito do diâmetro e comprimento do duto na velocidade de grãos de milho, cultivar AG 162

5.1.4.1 Características do produto

Massa Específica Aparente	0,755 g/cm ³
Diâmetro Equivalente	0,680 cm
Massa Unitária	0,256 g
Volume Médio	0,225 cm ³
d/D (diâm. equiv/diâm. duto)	$d/D_1 = 0,453$
	$d/D_2 = 0,340$
	$d/D_3 = 0,272$

5.1.4.2 Comportamento ao longo do duto

O comportamento de grãos de milho cultivar AG 162 foi idêntico ao dos demais produtos. No entanto, mais uma vez encontramos o fator de forma regendo o comportamento da velocidade do grão ao longo do duto. Conforme nos apresenta a Tabela 5.4, no duto de menor diâmetro, onde os efeitos são mais acentuados, a velocidade aumentou com o aumento do comprimento do duto, indicando a aceleração que a partícula está tendo. Já no duto de maior diâmetro, onde os efeitos da camada limite não tem tanta influência, os aumentos de velocidade são mínimos e tendem a desaparecer.

Na figura 5.4. encontram-se as curvas representativas de cada duto, bem como as equações que regem o seu comportamento.

Tabela 5.4: Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Milho AG 162 ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s

	15mm	20mm	25mm
1,0m comprimento	3,4	1,6	1,0
2,0m comprimento	4,0	1,9	1,2
3,0m comprimento	4,3	2,1	1,2

5.1.5 Efeito do diâmetro e comprimento do duto na velocidade de grãos de milho, cultivar AG 401

5.1.5.1 Características do produto

Massa Específica Aparente	0,768 g/cm ³
Diâmetro Equivalente	0,747 cm
Massa Unitária	0,326 g
Volume Médio	0,270 cm ³
d/D (diâm. equiv/diâm. duto)	$d/D_1 = 0,498$
	$d/D_2 = 0,373$
	$d/D_3 = 0,299$

5.1.5.2 Comportamento ao longo do duto

De todos os produtos, o milho Ag 401 é o de maior peso específico aparente, maior diâmetro equivalente, maior peso e maior relação d/D . Isto explica o fato dos resultados obtidos serem tão próximos aos das bolas de madeira utilizadas como testemunha no experimento. Devido às suas maiores dimensões, a energia que recebe da massa de ar é transferida sob a forma de velocidade. Na Tabela 5.5 observa-se que, como nos demais produtos, quanto maior o diâmetro, menor foi o valor da velocidade, embora em níveis superiores aos demais produtos. Também o comprimento teve efeito nos dutos de 15mm e 20mm, embora tenha permanecido praticamente estável no duto de 25mm.

Na figura 5.5. encontram-se as curvas representativas de cada duto, bem como as equações

Tabela 5.5: Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Milho AG 401 ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s

	15mm	20mm	25mm
1,0m comprimento	3,7	1,7	1,3
2,0m comprimento	4,4	2,1	1,4
3,0m comprimento	4,8	2,3	1,4

que regem o seu comportamento.

5.1.6 Comentários

Para definir-se alguns pontos de discussão sobre o comportamento do transporte de grãos unitários em dutos de pequeno diâmetro, apresenta-se na Tabela 5.6 um resumo dos dados referentes à velocidade de transporte dos produtos testados em relação a uma velocidade média do ar igual a 30 m/s.

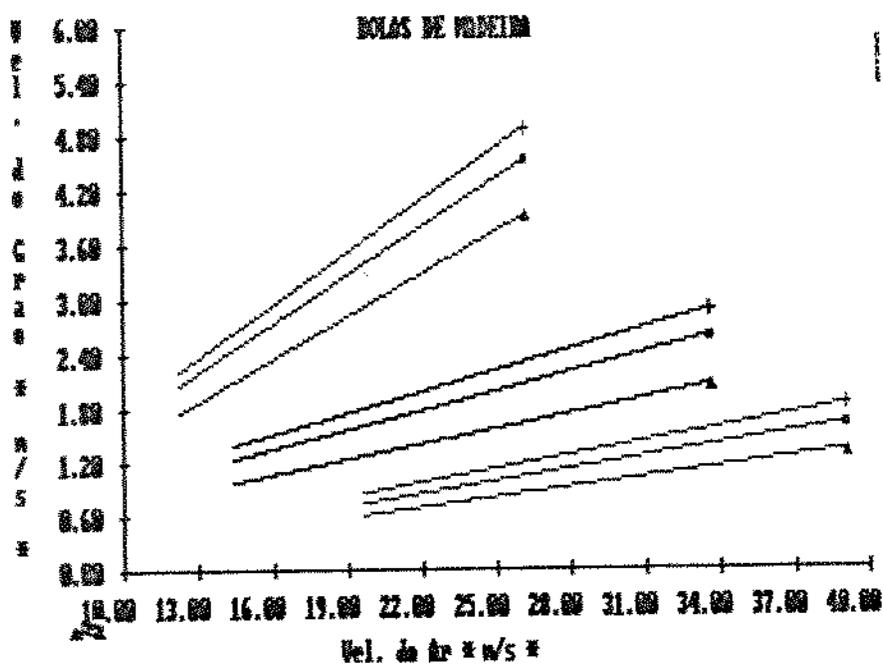
Tabela 5.6: Velocidade de Transporte de Grãos Unitários de Produtos Agrícolas, em m/s, em Relação a uma Velocidade Média do Ar Igual a 30 m/s.

PRODUTOS	15 mm			20 mm			25 mm		
	1,0 m	2,0 m	3,0 m	1,0 m	2,0 m	3,0 m	1,0 m	2,0 m	3,0 m
BOLAS	4,5	5,2	5,6	1,8	2,3	3,0	0,9	1,2	1,3
AG 401	3,7	4,4	4,8	1,7	2,1	2,3	1,3	1,4	1,4
AG 162	3,4	4,0	4,3	1,6	1,9	2,1	1,0	1,2	1,2
FEIJÃO	3,2	3,8	4,3	1,5	1,8	2,0	1,1	1,2	1,3
SOJA	2,8	3,2	3,3	1,3	1,5	1,6	1,3	1,5	1,6

De acordo com os resultados apresentados acima pode-se concluir que existem três propriedades físico-aerodinâmicas que influenciam o transporte dos produtos testados. São elas:

- a) Área Projetada da Partícula
- b) Massa Unitária da Partícula
- c) Fator de Forma

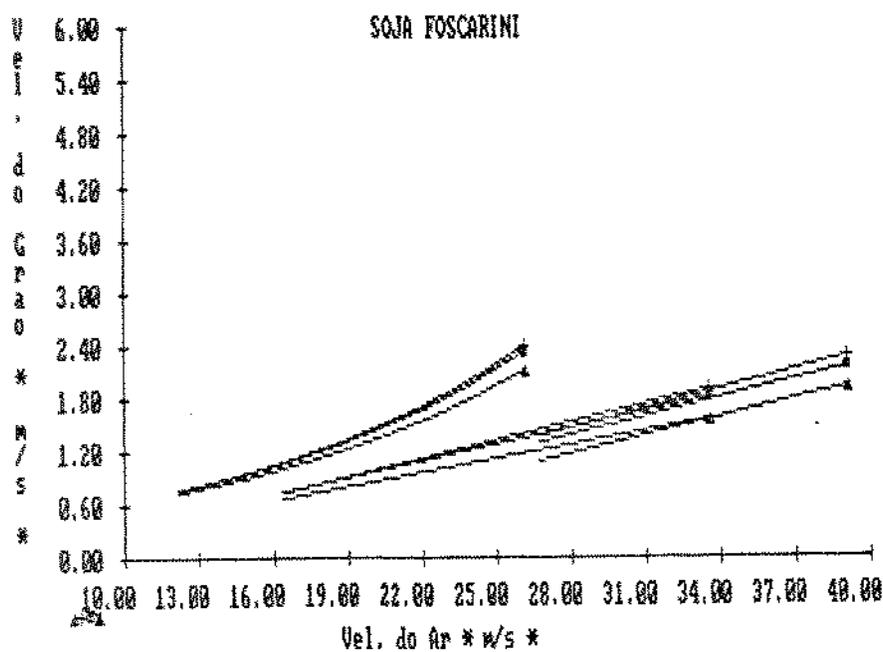
Estes três parâmetros regem completamente o desempenho do transporte dos produtos. Observa-se que, quanto maior a área projetada da partícula, maior é a velocidade de transporte, principalmente nos dutos de menor diâmetro. No duto de 25mm nota-se que todos os produtos perdem velocidade drasticamente e ocorre uma interação entre fator de forma x massa unitária. Por exemplo, as bolas de madeira e os grãos de soja são os produtos de maior esfericidade, mas estão colocados nos extremos da tabela em função da massa unitária. As bolas são muito pesadas perdendo velocidade à medida que o duto aumenta, enquanto que a soja, por ser o produto mais leve, não sofre alteração alguma na velocidade entre os dutos de 20 e 25mm.



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s151	0,1565	-0,1928	0
V_s152	0,1783	-0,1507	0
V_s153	0,1935	-0,1898	0
V_s201	0,0503	0,1112	0
V_s202	0,0712	0,1746	0
V_s203	0,0786	0,2204	0
V_s251	0,0369	-0,1534	0
V_s252	0,0457	-0,1926	0
V_s253	0,0509	-0,1832	0

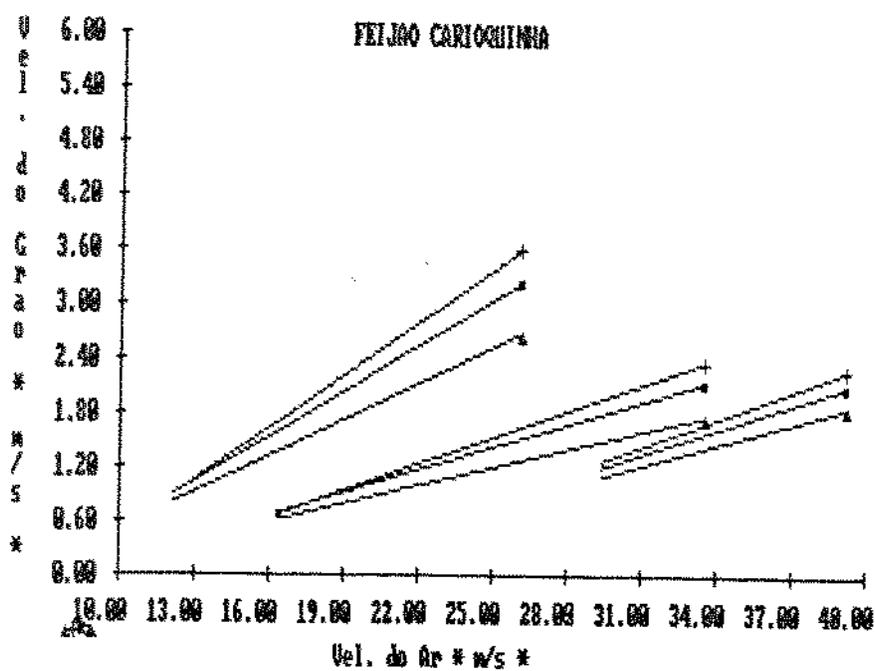
Figura 5.1: Comportamento do transporte de bolas de madeira ao longo de dutos de diferentes diâmetros e em diferentes comprimentos.



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s151	0	0,2712	0,0783
V_s152	0	0,2692	0,0823
V_s153	0	0,2642	0,0842
V_s201	0,0525	-0,2270	0
V_s202	0,0626	-0,3196	0
V_s203	0,0689	-0,4309	0
V_s251	0,0690	-0,7947	0
V_s252	0,0707	-0,6298	0
V_s253	0,0740	-0,6426	0

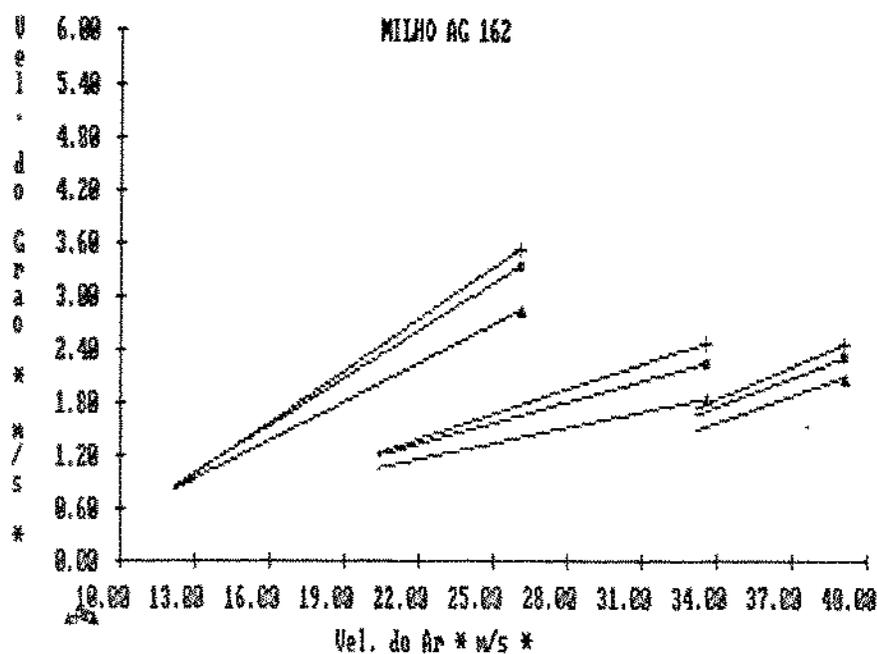
Figura 5.2: Comportamento do transporte de grãos unitários de soja ao longo de dutos de diferentes diâmetros e em diferentes comprimentos.



$$V_g = a.V_a + b.e^{c.V_a}$$

V_g	a	b	c
$V_{g,151}$	0,1348	-0,8746	0
$V_{g,152}$	0,1680	-1,1907	0
$V_{g,153}$	0,1939	-1,5105	0
$V_{g,201}$	0,0674	-0,5192	0
$V_{g,202}$	0,0848	-0,7294	0
$V_{g,203}$	0,0908	-0,9805	0
$V_{g,251}$	0,0786	-1,2358	0
$V_{g,252}$	0,0927	-1,5458	0
$V_{g,253}$	0,1036	1,7996	0

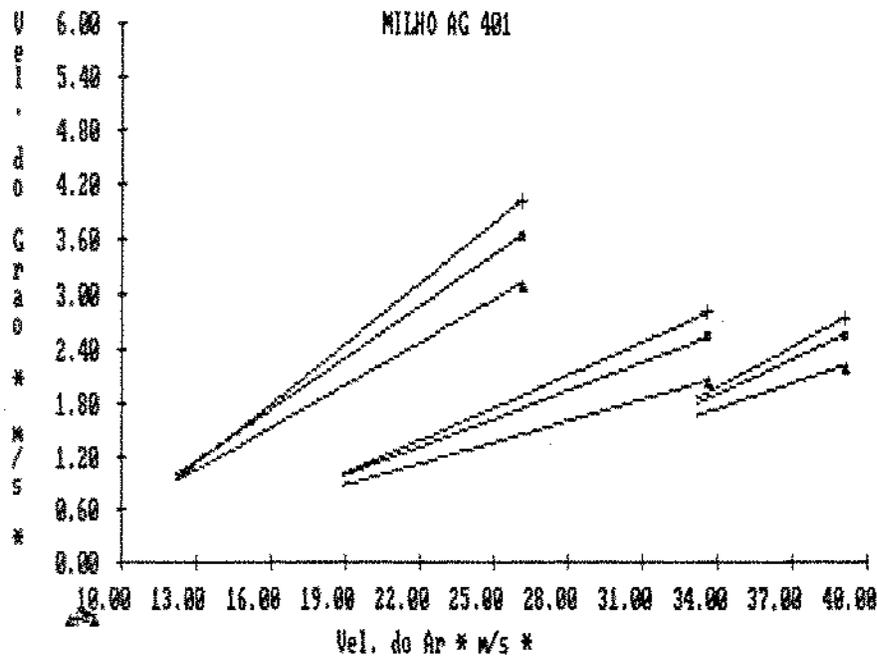
Figura 5.3: Comportamento do transporte de grãos unitários de feijão ao longo de dutos de diferentes diâmetros e em diferentes comprimentos.



$$V_g = a.V_a + b.e^{c.V_a}$$

V_g	a	b	c
$V_{g,151}$	0,1458	-0,9998	0
$V_{g,152}$	0,1788	-1,3610	0
$V_{g,153}$	0,1951	-1,5920	0
$V_{g,201}$	0,0603	-0,2047	0
$V_{g,202}$	0,0798	-0,4631	0
$V_{g,203}$	0,0954	-0,7529	0
$V_{g,251}$	0,1016	-1,9055	0
$V_{g,252}$	0,1090	-1,9779	0
$V_{g,253}$	0,1222	-2,3411	0

Figura 5.4: Comportamento do transporte de grãos unitários de milho AG 162 ao longo de dutos de diferentes diâmetros e em diferentes comprimentos.



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s151	0,1580	-1,0370	0
V_s152	0,1903	-1,3525	0
V_s153	0,2215	-1,7913	0
V_s201	0,0807	-0,6919	0
V_s202	0,1056	-1,0507	0
V_s203	0,1220	-1,3371	0
V_s251	0,0944	-1,5012	0
V_s252	0,1287	-2,5034	0
V_s253	0,1486	-3,1023	0

Figura 5.5: Comportamento do transporte de grãos unitários de milho AG 401 ao longo de dutos de diferentes diâmetros e em diferentes comprimentos.

Tabela 5.7: Aceleração de Bolas de Madeira ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.

	15mm	20mm	25mm
1,0m comprimento	25,6	4,2	2,5
2,0m comprimento	34,3	7,5	4,1
3,0m comprimento	42,6	9,9	6,0

5.2 Efeito do diâmetro e do comprimento do duto na aceleração do grão

Em relação à aceleração do grão, com exceção do produto testemunha (Bolas de Madeira), houve um padrão de comportamento muito bem definido. No duto de 15mm ocorreram as maiores acelerações como era de se supor. Entretanto não era esperada uma queda tão brusca no nível de aceleração para os outros dois dutos. Em média, a redução entre o duto de 15mm e o de 25mm foi da ordem de 6 vezes. Confirmando os dados da velocidade do grão, pode-se observar que os produtos de maior área projetada são mais sensíveis a mudanças de padrão em função do diâmetro do duto.

Verifica-se que o grão acelera mais nos dutos de maior comprimento. Também foi possível notar que no duto de 25mm a aceleração não era suficiente para manter o grão no centro do duto, havendo constantes quedas e rebotes nas paredes, razão pela qual a variabilidade do tempo de distribuição tem valores significativamente altos nesta tubulação.

Foi utilizado o mesmo parâmetro da velocidade do grão, fixando-se uma velocidade de deslocamento do ar ao nível de 30m/s e estudando-se então o comportamento dos diferentes produtos em relação ao diâmetro e comprimento do duto.

Nas Tabelas 5.7 a 5.5.11 estão apresentadas informações a respeito da aceleração dos produtos testados para uma velocidade do ar equivalente a 30 m/s. Do mesmo modo, nas Figuras 5.6 a 5.10 encontram-se as curvas representativas da aceleração dos produtos testados e as equações que regem seu comportamento.

Tabela 5.8: Aceleração de Grãos Unitários de Soja ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.

	15mm	20mm	25mm
1,0m comprimento	6,4	3,8	2,4
2,0m comprimento	8,7	4,9	3,2
3,0m comprimento	9,6	6,2	3,5

Tabela 5.9: Aceleração de Grãos Unitários de Feijão ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.

	15mm	20mm	25mm
1,0m comprimento	17,4	4,8	2,8
2,0m comprimento	23,4	6,9	4,4
3,0m comprimento	34,2	8,8	5,4

Tabela 5.10: Aceleração de Grãos Unitários de Milho AG 162 ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.

	15mm	20mm	25mm
1,0m comprimento	20,5	5,2	3,2
2,0m comprimento	26,7	7,0	4,8
3,0m comprimento	31,4	9,4	6,0

Tabela 5.11: Aceleração de Grãos Unitários de Milho AG 401 ao longo do duto, com uma Velocidade de Ar equivalente a 30 m/s.

	15mm	20mm	25mm
1,0m comprimento	24,5	6,2	3,7
2,0m comprimento	29,9	8,8	5,9
3,0m comprimento	45,2	11,8	7,3

5.2.1 Comentários

Na Tabela 5.12. apresenta-se um resumo dos dados experimentais referentes a aceleração dos produtos testados nos diferentes dutos.

Tabela 5.12: Aceleração de Grãos Unitários de Produtos Agrícolas em m/s^2 , em relação a uma Velocidade Média de Ar igual a 30 m/s.

PRODUTOS	15 mm			20 mm			25 mm		
	1,0 m	2,0 m	3,0 m	1,0 m	2,0 m	3,0 m	1,0 m	2,0 m	3,0 m
BOLAS	25,6	34,4	42,6	4,2	7,5	9,9	2,5	4,1	6,0
AG 401	24,5	29,9	45,2	6,2	8,8	11,8	3,7	5,9	7,3
AG 162	20,5	26,7	31,4	5,2	7,0	9,4	3,2	4,8	6,0
FEIJÃO	17,4	23,4	34,2	4,8	6,9	8,8	2,8	4,4	5,4
SOJA	6,4	8,7	9,6	3,8	4,9	6,2	2,4	3,2	3,5

A aceleração dos produtos testados possui uma correlação significativa com a área projetada das partículas e o comprimento do duto. O peso da partícula e o fator de forma interagem à semelhança com o que ocorre na velocidade do grão. Bolas de madeira e soja, apesar da esfericidade próxima a 1, estão nos extremos da Tabela em função principalmente da densidade da partícula (peso). As bolas, por serem mais pesadas, tendem a desacelerar rapidamente nos dutos de maior diâmetro, enquanto que a soja não tem influências tão significativas, embora

também reduza a aceleração nos dutos maiores.

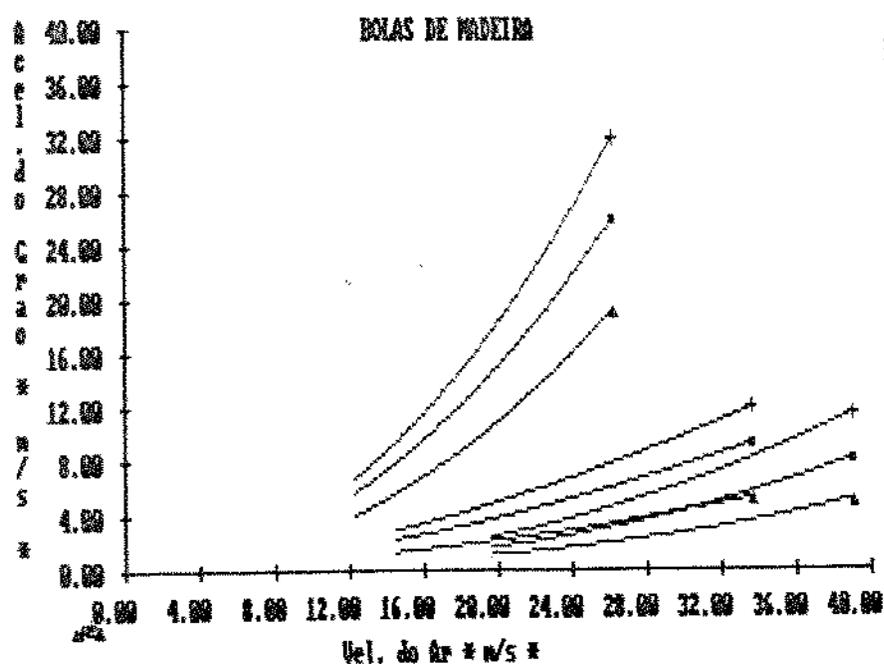
Analisando-se apenas o duto de 15 mm verifica-se que, quanto maior a área projetada e maior o peso da partícula, maior é a aceleração, razão pela qual acredita-se serem estes os parâmetros que definem o comportamento dos produtos testados. Também é verdadeiro afirmar que, quanto maior o diâmetro do duto, mais brusca é a perda de aceleração, sendo que esta perda diminui à medida que o produto seja menor e mais leve.

Para melhor entender o efeito do diâmetro e comprimento do duto sobre a aceleração e velocidade dos produtos testados foi montada a Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Velocidade de ar necessária para imprimir uma aceleração aos produtos testados a um nível de 10 m/s^2 .

PRODUTOS TESTADOS	15 mm			20 mm			25 mm		
	1,0 m	2,0 m	3,0 m	1,0 m	2,0 m	3,0 m	1,0 m	2,0 m	3,0 m
BOLAS	19,3	16,5	15,0	39,5	33,6	30,2	52,4	43,0	37,1
AG 401	22,6	22,0	20,8	34,8	31,1	28,7	41,3	34,9	32,5
AG 162	24,1	23,0	22,5	36,6	33,0	30,4	45,0	39,5	35,2
FEIJÃO	25,1	23,4	21,8	36,5	32,9	30,9	46,1	38,7	35,6
SOJA	36,4	31,4	30,4	39,7	36,8	33,8	56,1	47,6	44,4

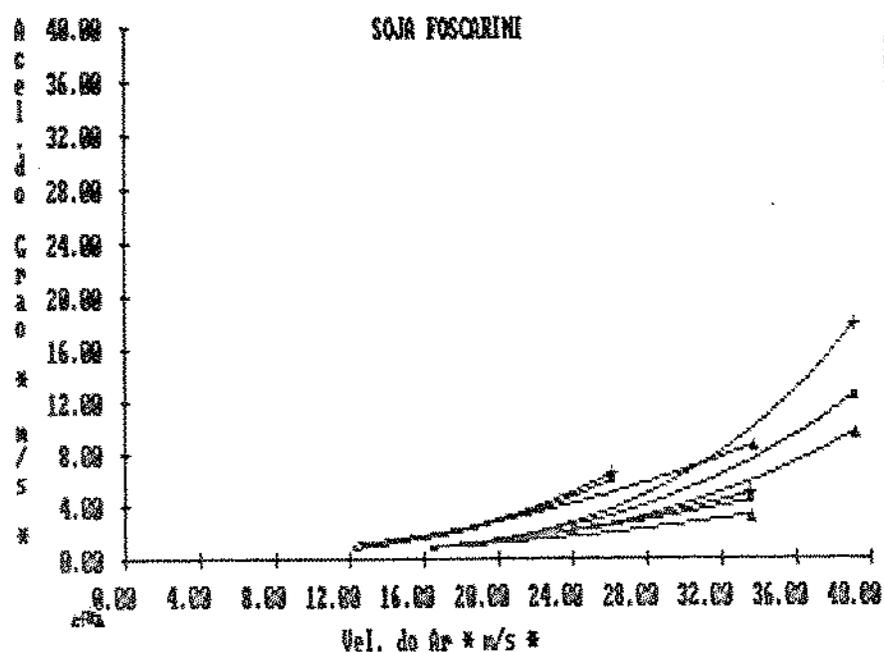
Observa-se que, todos os produtos comportaram-se identicamente, isto é, quanto maior o diâmetro do duto mais velocidade de ar era necessária para atingir a aceleração predeterminada; quanto maior o comprimento do duto, menor a velocidade de ar, indicando assim que quanto mais longo o duto, maior a aceleração.



$$A_s = a.V_a^b$$

A_s	a	b
$A_s,151$	0,0176	2,1412
$A_s,152$	0,0311	2,0600
$A_s,153$	0,0337	2,1000
$A_s,201$	0,0087	1,8082
$A_s,202$	0,0185	1,7626
$A_s,203$	0,0262	1,7382
$A_s,251$	0,0005	2,4908
$A_s,252$	0,0008	2,4911
$A_s,253$	0,0019	2,3737

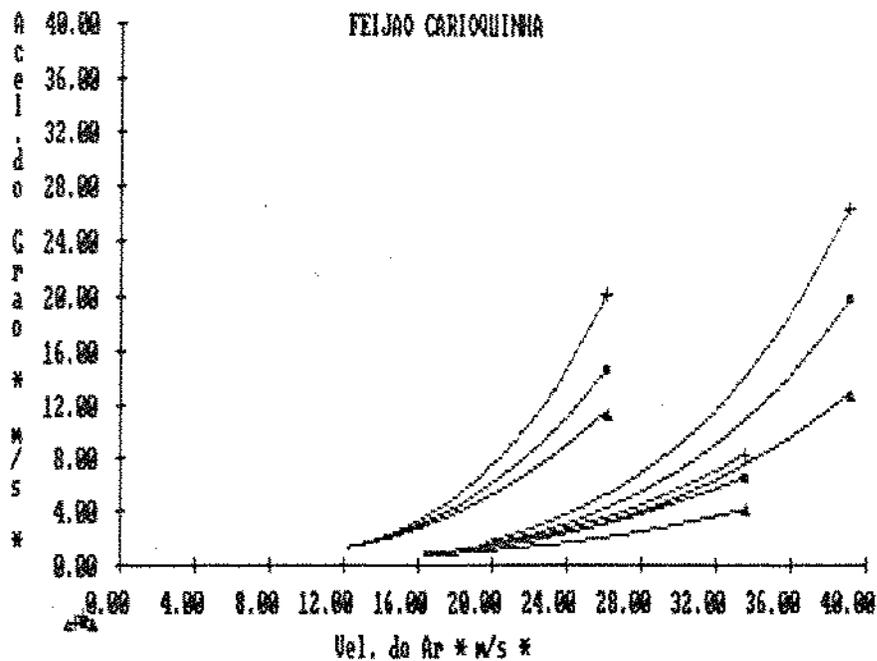
Figura 5.6: Aceleração de Bolas de Madeira ao longo de dutos de diferentes diâmetros e comprimentos.



$$A_s = a.V_a^b$$

A_s	a	b
$A_s,151$	0,0028	2,2725
$A_s,152$	0,0003	3,0588
$A_s,153$	0,0002	3,1576
$A_s,201$	0,0009	2,3006
$A_s,202$	0,0006	2,4937
$A_s,203$	0,0003	2,7171
$A_s,251$	0,00004	3,3907
$A_s,252$	0,00004	3,4699
$A_s,253$	0,00008	4,0012

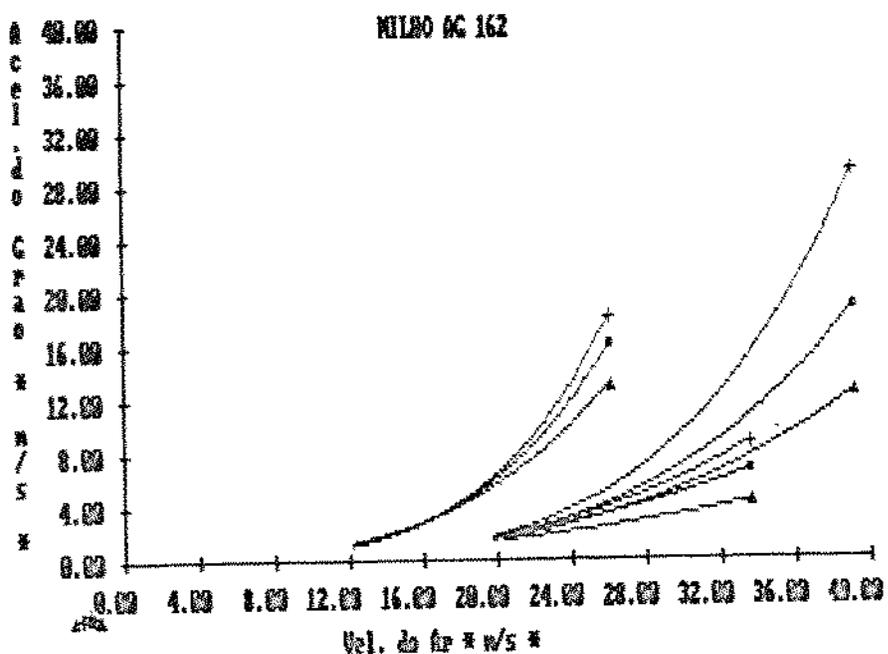
Figura 5.7: Aceleração de grãos unitários de soja ao longo de dutos de diferentes diâmetros e comprimentos.



$$A_s = a.V_a^b$$

A_s	a	b
A_s151	0,00046	3,0994
A_s152	0,00020	3,4314
A_s153	0,00007	3,8572
A_s201	0,00011	2,9798
A_s202	0,00008	3,2050
A_s203	0,00003	3,5743
A_s251	0,00002	3,6863
A_s252	0,000009	3,9745
A_s253	0,000007	4,1256

Figura 5.8: Aceleração de grãos unitários de feijão ao longo de dutos de diferentes diâmetros e comprimentos.



$$A_s = a.V_a^b$$

A_s	a	b
A_s151	0,00030	3,2764
A_s152	0,00008	3,7233
A_s153	0,00004	4,0001
A_s201	0,0011	2,3433
A_s202	0,00046	2,7168
A_s203	0,00010	3,2385
A_s251	0,00008	3,2713
A_s252	0,00002	3,7435
A_s253	0,000005	4,2589

Figura 5.9: Aceleração de grãos unitários de milho AG 162 ao longo de dutos de diferentes diâmetros e comprimentos.

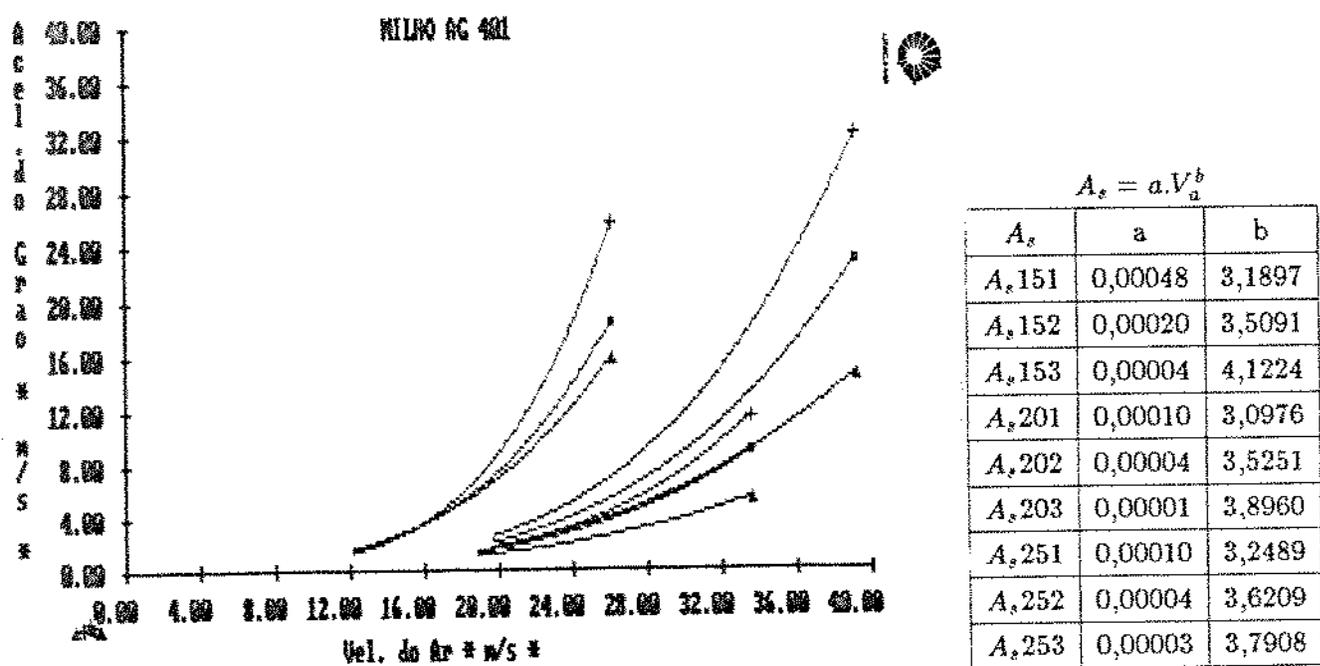


Figura 5.10: Aceleração de grãos unitários de milho AG 401 ao longo de dutos de diferentes diâmetros e comprimentos.

Capítulo 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES - Fase 2 : Desaceleração do Grão

6.1 Introdução

Concluída a primeira fase da pesquisa, optou-se pelo uso do duto de 15mm de diâmetro interno, por ter sido aquele onde os produtos testados obtiveram melhores desempenhos. Em relação aos demais dutos testados, com um mesmo fluxo de ar, obtiveram-se maiores acelerações, maiores velocidades e, como consequência, menor variabilidade no tempo de distribuição. Assim sendo, iniciaram-se os estudos sobre os métodos de desaceleração dos produtos na porção terminal deste duto.

A principal motivação para efetuar tal estudo é adaptar os resultados aqui obtidos a um projeto de semeadora pneumática por pressão de ar. Neste tipo de semeadora pneumática, tão importante quanto acelerar o grão na maior parte do duto, é vital que o mesmo venha a ser desacelerado rápida e eficientemente na porção terminal, de modo a conseguir uma velocidade de queda a mais próxima possível da velocidade de avanço da semeadora, geralmente ao redor de 2,0 m/s.

Procurou-se estudar o comportamento de três diferentes sistemas de desaceleração, modificando basicamente a porção terminal do duto de transporte.

6.2 Dispositivo experimental

Na Figura 6.1 são apresentados os dispositivos experimentais utilizados para desacelerar os produtos testados. Nesta figura pode-se notar que existem duas zonas comuns, ou seja:

- a) Uma região do duto de 15mm, com 1700mm de comprimento, utilizada para lançamento e aceleração do grão, aqui denominada de "Zona de Aceleração" (ZA).
- b) Um dispositivo denominado "Desacelerador" (D), composto por um cilindro metálico confeccionado em tela malha 3mm, com 70mm de comprimento e 15mm de diâmetro interno, engastado em dois suportes, que por sua vez, conectam com partes adjacentes do duto de vidro.

A partir do desacelerador foram montados três diferentes dispositivos empregados para complementar a frenagem do grão, denominados por "Zona de Desaceleração" (ZD). São eles:

- 1) Despressurizador com Terminal Horizontal - consiste basicamente na continuação da tubulação após o desacelerador, no nível horizontal e na mesma cota utilizada para o transporte, não levando em conta o efeito da gravidade no momento da deposição do produto no solo.
- 2) Despressurizador com Terminal Vertical - é constituído de uma curva de 90 graus logo após a saída do desacelerador, fazendo com que o grão caia em queda livre após ter sido desacelerado.
- 3) Despressurizador com Terminal Helicoidal - consiste da utilização de uma helicóide após o desacelerador, fazendo com que o grão venha perdendo velocidade à medida que circula pelo seu interior.

Além deste grupo de dispositivos empregados para frear a aceleração do grão, fez-se uma composição alternativa, como mostra a Figura 6.2., adaptando-se um acessório que permite a injeção de um fluxo de ar na direção contrária a da corrente de ar que transporta o grão. Este fluxo de ar, atuando como um freio pneumático, auxilia na desaceleração dos produtos testados.

6.3 Despressurizador com terminal horizontal

6.3.1 Comportamento da bola de madeira nas diferentes secções do duto.

Na Figura 6.3. estão plotadas as curvas do comportamento de bolas de madeira ao longo do duto, nas três secções de teste, com e sem o jato auxiliar de ar.

Na Zona de Aceleração, como era esperado, a velocidade do produto aumenta significativamente à medida que aumenta a velocidade do ar que o transporta. Nesta secção foi possível observar-se algum efeito do jato de ar contrário, embora apenas no limite superior do teste, indicando que produtos muito acelerados sofreriam certo retardamento na porção terminal da Zona de Aceleração, em decorrência da contrapressão ali existente.

No Desacelerador ocorre uma brusca expansão do fluxo de ar, fazendo com que o produto perca parte de sua energia cinética enquanto cruza os limites do cilindro desacelerador. Para as bolas de madeira verificou-se haver uma redução média de 35% entre os valores da velocidade do grão na Zona de Aceleração e no Desacelerador. Não houve efeito significativo na desaceleração do produto, dentro dos limites do Desacelerador, em função do fluxo de ar contrário.

Na Zona de Desaceleração é que fica visível o efeito do dispositivo desacelerador, bem como do fluxo de ar contrário empregado. Observa-se na Figura 6.3. que quando não é utilizado o fluxo de ar contrário, apesar de haver uma redução significativa no valor da velocidade do produto, ainda existe uma leve tendência a continuar em suave aceleração. Entretanto, ao utilizarmos o fluxo de ar contrário no desacelerador, houve uma perda significativa da energia cinética da bola de madeira, fazendo com que ela fosse drasticamente reduzida na Zona de Desaceleração. Em média houveram reduções de 61% e 30% na velocidade do produto, em relação a Zona de Aceleração e ao Desacelerador, respectivamente.

6.3.2 Comportamento da soja nas diferentes secções do duto.

Na Figura 6.4. estão plotadas as curvas do comportamento de grãos unitários de soja ao longo do duto, nas três secções de teste, com e sem o jato auxiliar de ar.

A soja, por ser o grão de menor diâmetro equivalente e menor peso, apresentou o desempenho mais típico de todos os produtos testados. É possível verificar-se na Figura 6.4. que existe uma interação muito significativa tanto entre as três secções de teste, quanto pela injeção do fluxo de ar contrário.

Na Zona de Aceleração a velocidade do grão unitário de soja aumentou em decorrência dos acréscimos na velocidade do ar. Também foi observada uma acentuada influência do contrafluxo

de ar, comprovando o fato de que grãos menores e mais leves sofreriam um retardo proveniente desta contrapressão, mesmo na ZA.

No Desacelerador ocorreu uma considerável perda de energia e os níveis de velocidade foram bastante reduzidos, embora mantivessem a tendência de continuar aumentando a velocidade, caso houvessem sido testadas maiores vazões de ar. A existência do contrafluxo de ar no cilindro desacelerador foi importante para reduzir ainda mais a velocidade do grão de soja, contribuindo com 12% desta desaceleração. Em média, os grãos de soja perderam cerca de 58% da sua velocidade ao cruzarem o cilindro desacelerador.

Entretanto, os reais efeitos do Desacelerador foram verificados na Zona de Desaceleração. Nota-se, na Figura 6.4. que os grãos de soja, sem o contrafluxo de ar, possuem uma leve tendência a retomar a velocidade, embora na média ela tenha decrescido cerca de 7%. Porém, ao se fazer uso do contrafluxo de ar, ocorre uma redução da velocidade, da ordem de 15% em relação ao Desacelerador e de 67% em relação à Zona de Aceleração. Assim sendo, o uso do contrafluxo de ar em grãos de pequeno peso e volume, é extremamente eficaz.

6.3.3 Comportamento do feijão nas diferentes secções do duto.

Na Figura 6.5. estão plotadas as curvas do comportamento de grãos unitários de feijão.

O grão de feijão possui características físicas como o diâmetro equivalente e o peso unitário semelhantes ao do grão de soja. Entretanto o volume médio é cerca de 45% maior que o da soja. Isto explica, em parte, as diferenças que existem no comportamento dos dois produtos, quando submetidos às mesmas condições de teste. Novamente o fator de forma pode estar sendo importante no momento da desaceleração do grão.

Na Zona de Aceleração a velocidade tende sempre a aumentar de forma gradual, tendendo assintoticamente a estabilizar-se a uma velocidade do ar da ordem de 30 m/s. Não houve efeito significativo no retardo da velocidade do grão em função do contrafluxo de ar.

No Desacelerador ocorre uma redução na velocidade do grão, ao nível de 42%, não tão significativo quanto a soja. Observa-se também não haver efeito algum para a existência do contrafluxo de ar.

No entanto, na Zona de Desaceleração é que algumas modificações são notadas. A principal alteração de comportamento está no fato de que, com o contrafluxo de ar atuando no Desacelerador, na Zona de Desaceleração muitos grãos de feijão não tiveram energia suficiente para o transporte até o final da tubulação. Com velocidades do ar inferiores a 15,0 m/s não houve transporte do grão. Na ZD a desaceleração foi da ordem de de 82% e 69%, respectivamente em

relação à ZA e D. O contrafluxo de ar contribuiu com reduções de 15% na velocidade final do grão.

6.3.4 Comportamento do milho AG 162 nas diferentes secções do duto.

Na Figura 6.6. estão plotadas as curvas do comportamento de grãos unitários de milho AG 162 ao longo do duto. Os grãos de milho diferem dos demais produtos principalmente pelo fator de forma. Entretanto, a cultivar AG 162 foi escolhida por possuir uma forma mais cheia, mais arredondada, um pouco semelhante ao feijão.

Na Zona de Aceleração o grão aumentou constantemente de velocidade, quase de maneira linear com a velocidade do ar. Não houve interação alguma com o contrafluxo de ar, o que mais uma vez demonstra a não perturbação de corpos mais pesados e de formas irregulares, pela existência de uma corrente de ar no sentido contrário.

Também no Desacelerador não houve influência do contrafluxo de ar. Pode-se observar pelas curvas da Figura 6.6. que existe uma tendência da retomada de velocidade no Desacelerador na presença de maiores vazões de ar. Pelas equações que geraram as curvas encontramos uma velocidade do ar igual a 27,0 m/s onde novamente o grão teria a mesma velocidade como se tivesse a presença do Desacelerador.

Porém, apesar de não registrar enquanto percorre o pequeno trecho do cilindro desacelerador, existe uma perda de energia cinética e isto fica bem comprovado na Zona de Desaceleração. Os grãos de milho AG 162 perdem quase toda a sua aceleração ao cruzar o Desacelerador em velocidades inferiores a 18,0 m/s. Mas, do mesmo modo como nas demais regiões, ele tende a retomar a aceleração à medida que aumenta-se a velocidade do ar, embora em níveis extremamente baixos. Na ZD a redução da velocidade, em média foi de 79% e 70% em relação a ZA e D, respectivamente.

6.3.5 Comportamento do milho AG 401 nas diferentes secções do duto.

Na Figura 6.7. estão plotadas as curvas do comportamento de grãos unitários de milho AG 401 ao longo do duto.

Os grãos de milho AG 401 são de forma chata e longa, tendo sido escolhidos para verificar-se a influência deste fator de forma sobre as condições de teste.

Comprovou-se que o desempenho do milho AG 401 é semelhante ao feijão e ao milho AG 162 na Zona de Aceleração e no Desacelerador. Nestas duas regiões ele tende a acelerar cada vez

mais, na presença de maior velocidade de ar, não sendo afetado nem pelo desacelerador, nem pelo contrafluxo de ar.

No entanto, é na Zona de Desaceleração que a grande diferença torna-se clara. Observa-se na Figura 6.7. que, na presença do contrafluxo de ar, o grão de milho AG 401 sofre uma pequena frenagem positiva, fazendo com que o grão não torne a acelerar, mesmo na presença de maiores fluxos de ar. Na ZD a redução da velocidade em média foi de 79% e 58% em relação a ZA e D, respectivamente.

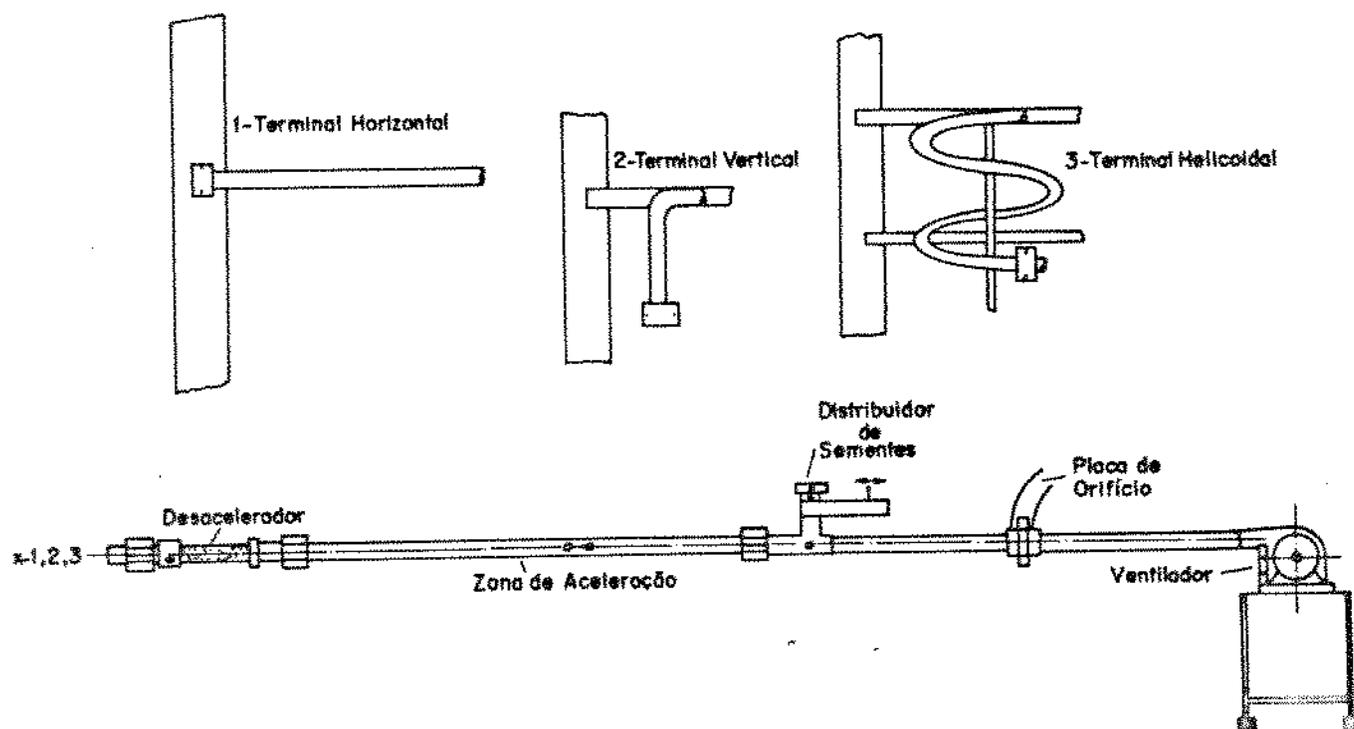


Figura 6.1: Dispositivo Experimental para Desaceleração dos Produtos Testados.

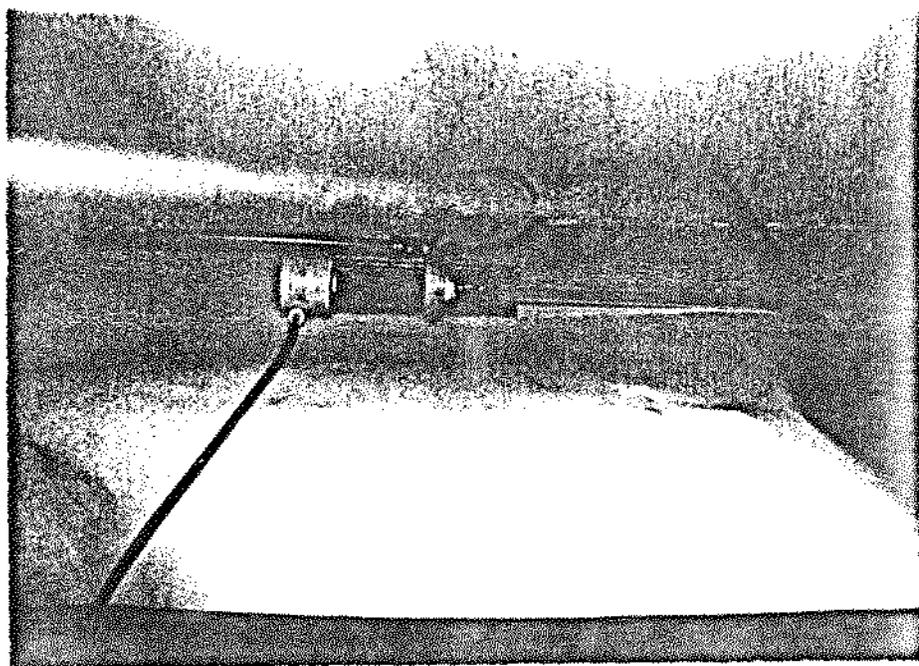
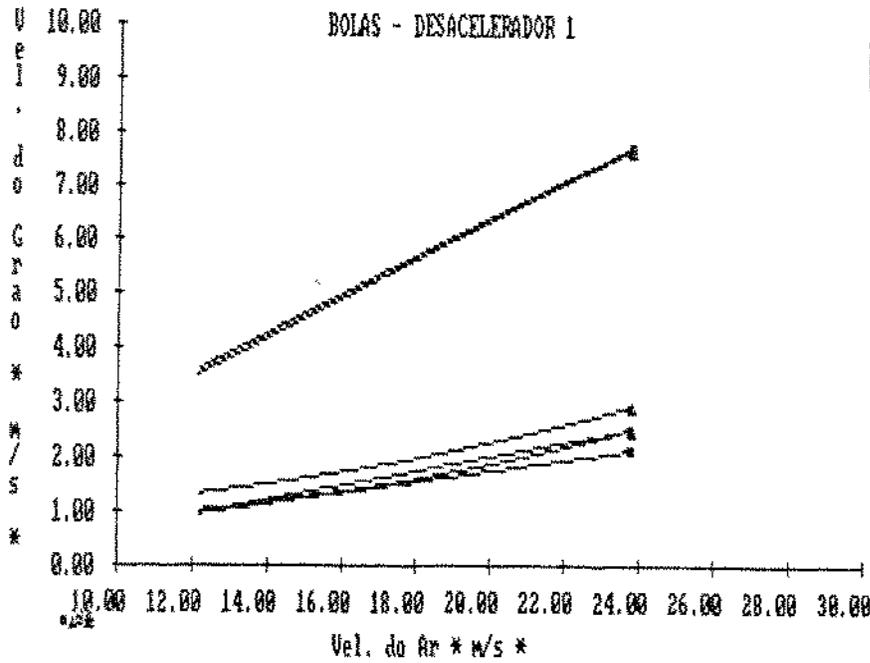


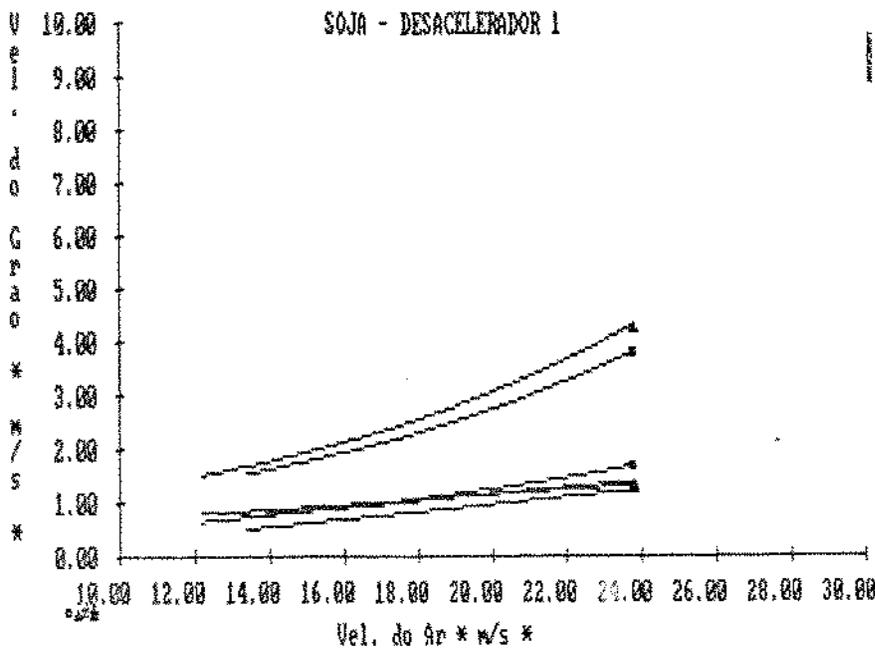
Figura 6.2: Dispositivo auxiliar com injeção de uma corrente de ar contrária.



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s	0,3615	-0,9453	0
V_s	0,3563	-0,7758	0
V_s	0	0,3602	0,0806
V_s	0,1000	-0,3215	0
V_s	0	0,5410	0,0701
V_s	0,1310	-0,6788	0

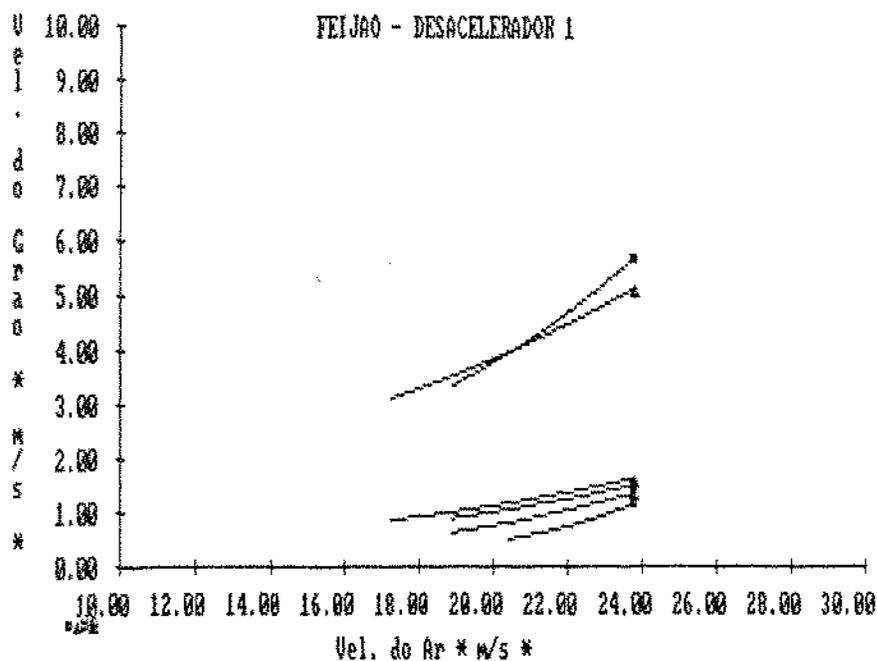
Figura 6.3: Comportamento de bolas de madeira nas três secções do Despressurizador com Terminal Horizontal, com e sem o jato auxiliar de ar.



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s	0	0,4693	0,0927
V_s	0	0,4526	0,0889
V_s	0,0464	0,1557	0
V_s	0	0,2287	0,0825
V_s	0,0652	-0,2063	0
V_s	0,0689	-0,4767	0

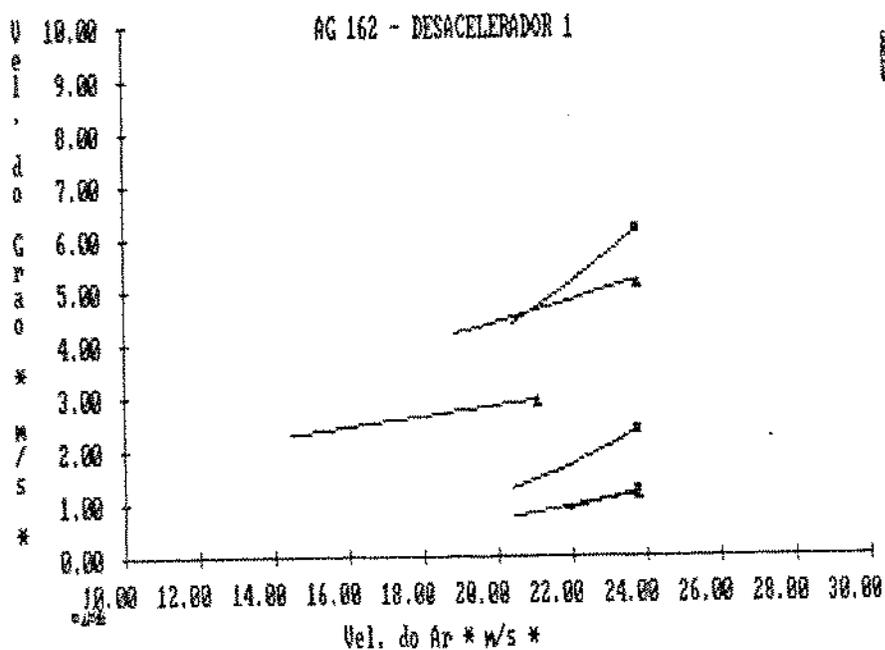
Figura 6.4: Comportamento de grãos unitários de soja nas três secções do Despressurizador com Terminal Horizontal, com e sem o jato auxiliar de ar.



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s	0	0,8070	0,0774
V_s	0	0,4233	0,1088
V_s	0	0,1300	0,1054
V_s	0	0,0953	0,1150
V_s	0	0,0244	0,1680
V_s	0	0,0019	0,2676

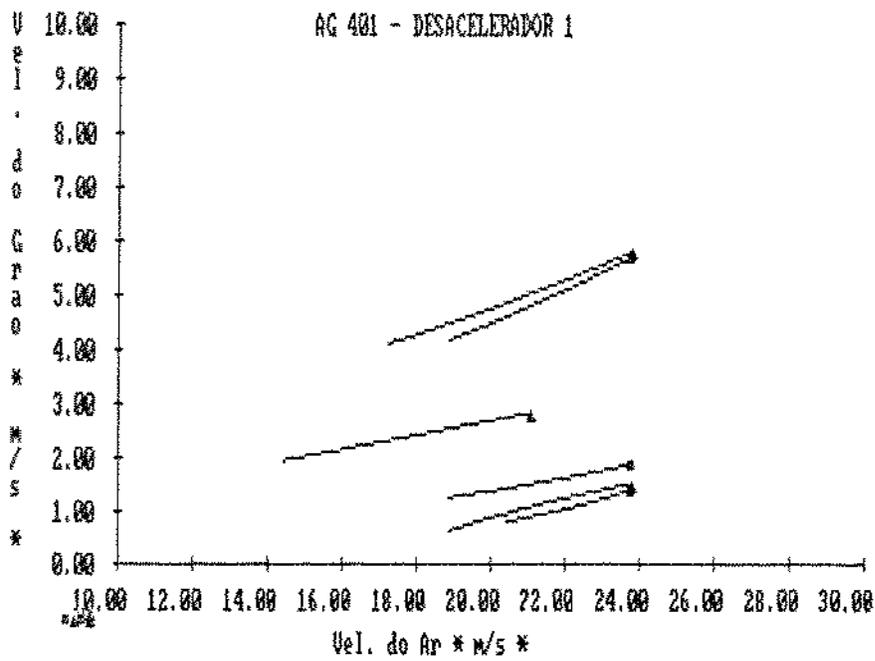
Figura 6.5: Comportamento de grãos unitários de feijão nas três seções do Despressurizador com Terminal Horizontal, com e sem o jato auxiliar de ar.



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s	0	1,7400	0,0458
V_s	0	0,5017	0,1053
V_s	0,0971	0,8242	0
V_s	0	0,0234	0,1963
V_s	0,1283	-1,9450	0
V_s	0	0,0117	0,1937

Figura 6.6: Comportamento de grãos unitários de milho AG 162 nas três seções do Despressurizador com Terminal Horizontal, com e sem o jato auxiliar de ar.



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s	0	1,6358	0,0528
V_s	0	1,2402	0,0637
V_s	0,1328	-0,0197	0
V_s	0	0,0204	0,0854
V_s	0,1826	-2,8466	0
V_s	0	0,0188	0,1796

Figura 6.7: Comportamento de grãos unitários de milho AG 401 nas três seções do Despresurizador com Terminal Horizontal, com e sem o jato auxiliar de ar.

6.4 Despressurizador com terminal vertical

O despressurizador com terminal vertical foi uma alternativa testada apenas com o intuito de comprovar-se que o efeito da aceleração da gravidade sobre os produtos em queda livre teria uma interação significativa nos resultados obtidos.

A única razão para se fazer este tipo de teste é que esta tem sido uma situação normal na maioria das semeadoras de precisão existentes no mercado nacional, ou seja, o grão é distribuído com mecanismos de precisão (discos perfurados, dedos prensos ou placas pneumáticas), mas é lançado por um tubo condutor de alturas sempre superiores a 0,50 m, ficando sujeito aos efeitos da aceleração da gravidade e, por isso mesmo, perdendo a precisão almejada pelo mecanismo distribuidor.

Verificou-se, com maior ou menor grau de significância, um comportamento semelhante para todos os produtos testados. Nas Figuras 6.8 a 6.12 observa-se que os grãos unitários dos produtos agrícolas, mesmo após passarem pelo Desacelerador e perderem parte da sua velocidade, tendem a retomar sua velocidade ao caírem em queda livre no Terminal Vertical, chegando a níveis próximos àqueles que tinham na Zona de Aceleração.

Em relação ao contrafluxo de ar, é possível verificar-se que apenas nos dois tipos de milho houve uma leve redução de velocidade, evidenciando que existe a interação velocidade do grão x fator de forma.

6.5 Despressurizador com terminal helicoidal

O despressurizador com terminal helicoidal foi proposto para servir como referência àquelas pesquisas futuras que venham a encontrar o mesmo grau de dificuldade, ou seja: em dutos completamente horizontais é necessário que toda a tubulação seja montada a mais próxima possível do solo, para evitar os problemas de retomada de aceleração.

Tentando solucionar este problema é que foi proposto o terminal helicoidal, como uma forma de transportar o grão de uma cota elevada até o solo, mantendo-o em desaceleração ao longo do duto. Foi também verificada a influência do contrafluxo de ar neste dispositivo.

6.5.1 Comportamento da bola de madeira nas diferentes secções do duto.

Na Figura 6.13 estão plotadas as curvas do comportamento de bolas de madeira ao longo do duto.

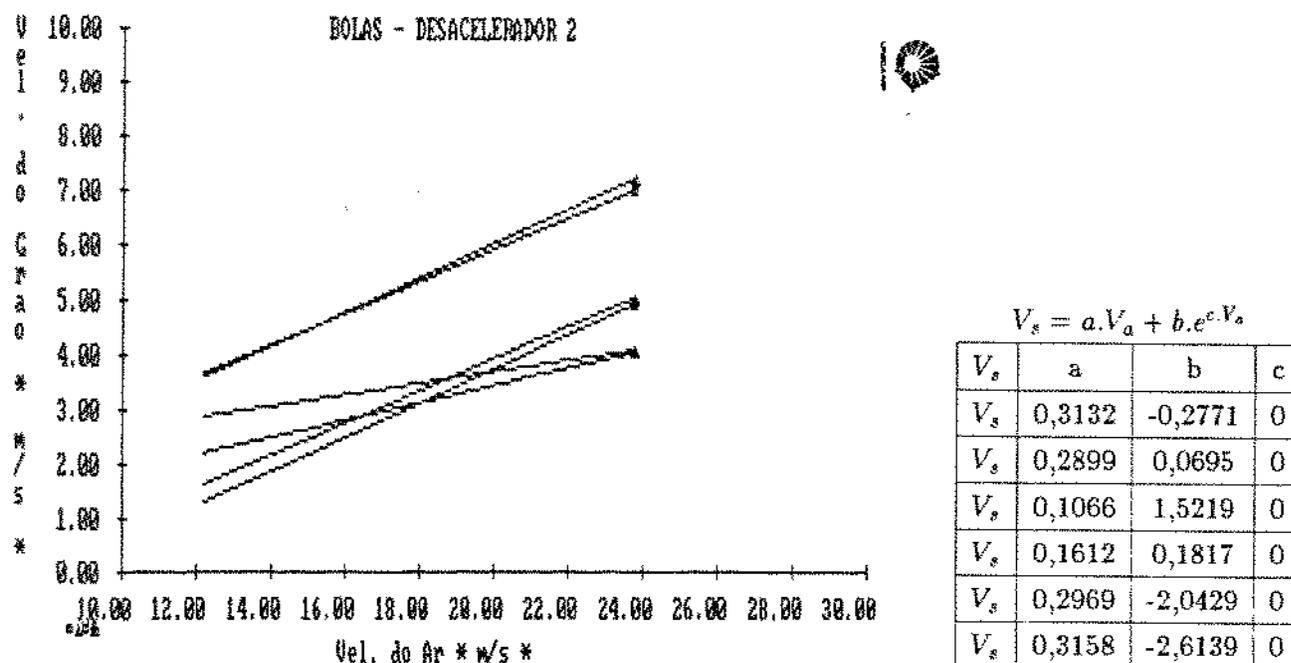


Figura 6.8: Comportamento de bolas de madeira nas três secções do Despressurizador com Terminal Vertical, com e sem o jato auxiliar de ar.

Como nos demais testes, na Zona de Aceleração a velocidade do produto aumenta em função do fluxo de ar que o transporta. Houve uma moderada influência (7%) do contrafluxo de ar na desaceleração de bolas de madeira nesta secção de teste.

Foi, porém, no dispositivo Desacelerador que notou-se uma desaceleração efetiva das bolas de madeira. Entre a Zona de Aceleração e o Desacelerador houve uma redução de 35% na velocidade do produto. As bolas por serem os produtos mais pesados e de maior área superficial, também são mais susceptíveis à ação do contrafluxo de ar. Neste teste o contrafluxo de ar diminuiu a velocidade das bolas de madeira em 17% ou seja, foi responsável por quase 50 % do efeito total de desaceleração.

Ao percorrer o terminal helicoidal, as bolas de madeira continuam perdendo velocidade, reduzindo-a 23% e 48% em relação ao Desacelerador e à Zona de Aceleração, respectivamente. O efeito do contrafluxo de ar na ZD foi de 11%, ou seja, quase 50% do total.

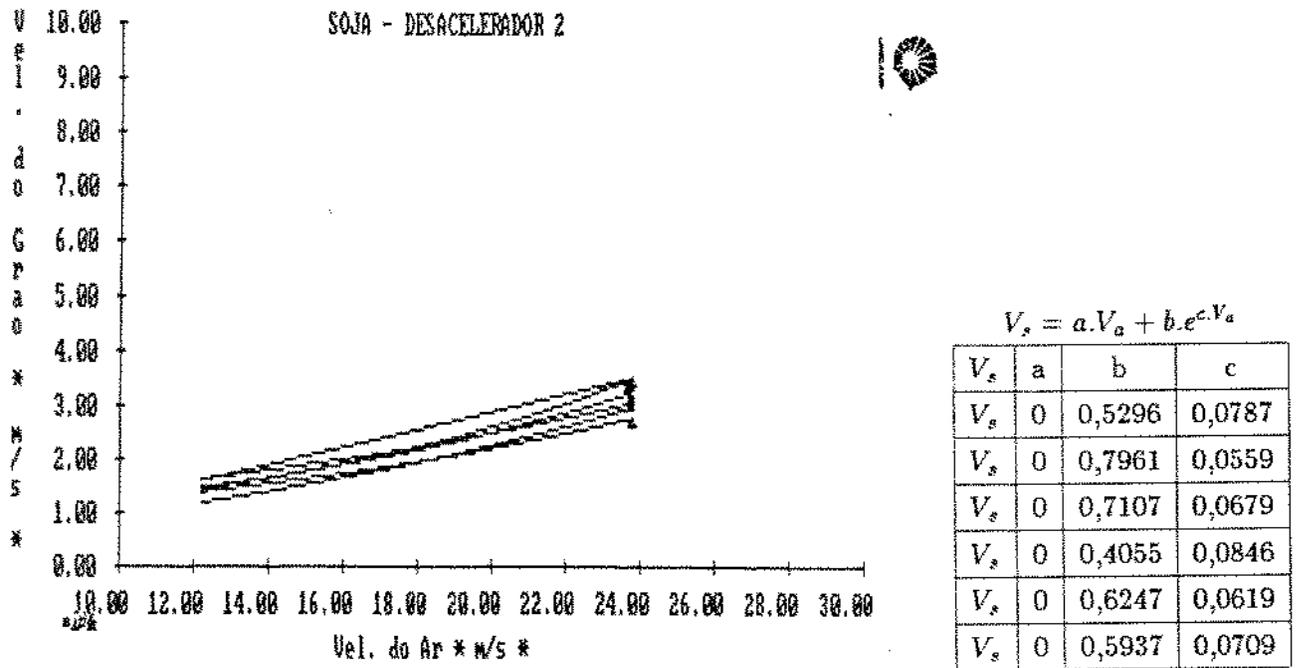


Figura 6.9: Comportamento de grãos unitários de soja nas três seções do Despressurizador com Terminal Vertical, com e sem o jato auxiliar de ar.

6.5.2 Comportamento da soja nas diferentes seções do duto.

Na Figura 6.14. estão plotadas as curvas do comportamento da soja ao longo do duto.

Mais uma vez comprova-se o fato de que os grãos pequenos e leves como os da soja possuem características peculiares durante o transporte e a desaceleração.

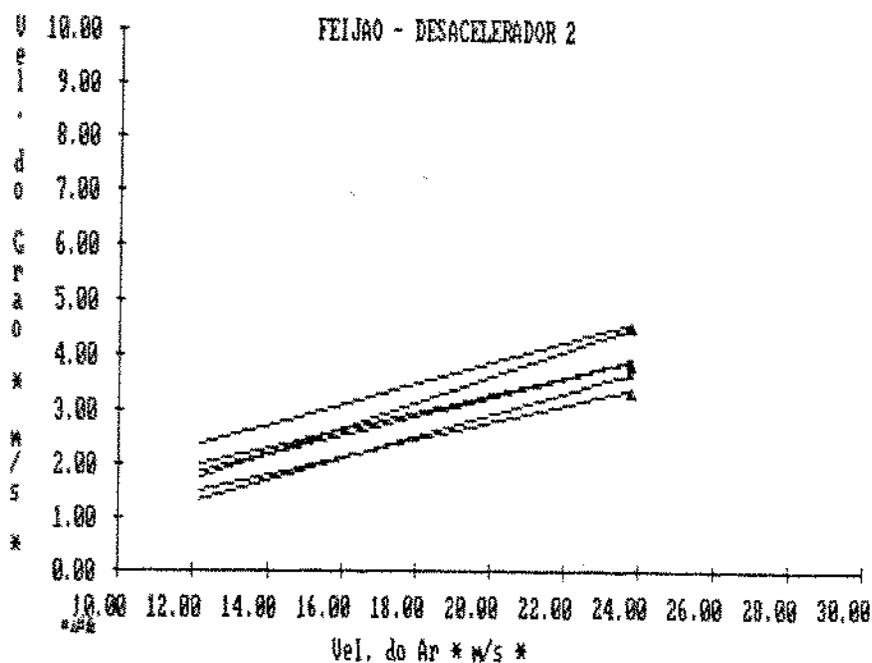
Na Figura 6.14. pode-se verificar que as curvas possuem o mesmo formato, estando apenas em patamares diferentes, em virtude da ação de cada uma das seções de teste.

Observa-se não haver influência alguma do contrafluxo de ar neste dispositivo, ao contrário do que ocorria nos outros dois desaceleradores.

As perdas de velocidade na Zona de Desaceleração foram, em média, 16% e 31% respectivamente em relação ao D e ZA.

6.5.3 Comportamento do feijão nas diferentes seções do duto

Na Figura 6.15. estão plotadas as curvas do comportamento do feijão ao longo do duto.



$$V_s = a.V_a + b.e^{c.V_a}$$

V_s	a	b	c
V_s	0,1915	-0,0228	0
V_s	0,2373	-1,2004	0
V_s	0,1625	-0,5365	0
V_s	0,2026	-1,1968	0
V_s	0,1748	-0,3246	0
V_s	0,1641	-0,0620	0

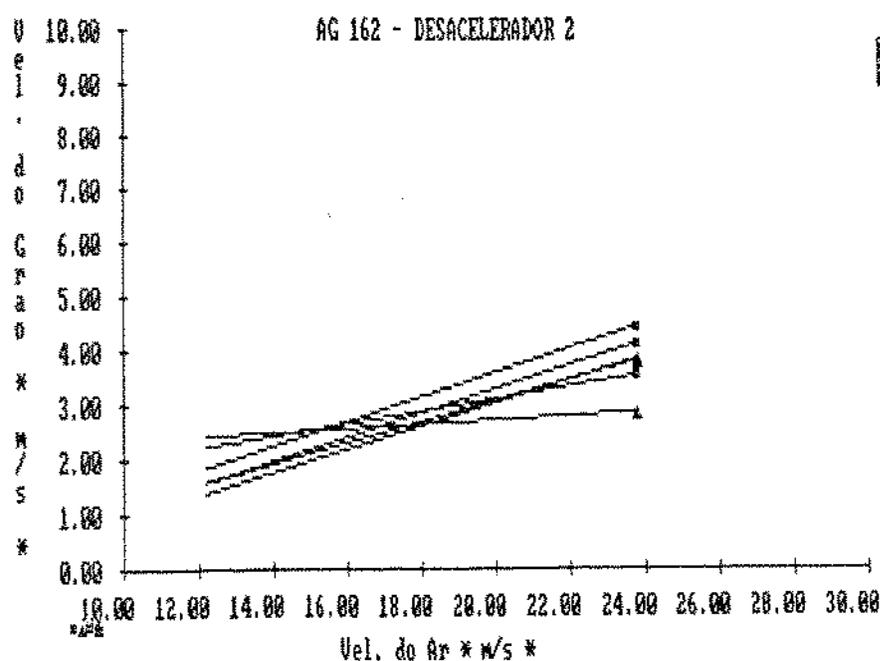
Figura 6.10: Comportamento de grãos unitários de feijão nas três secções do Despressurizador com Terminal Vertical, com e sem o jato auxiliar de ar.

Também neste desacelerador pode-se verificar a influência do fator de forma, volume e peso do grão sobre o seu comportamento nas diferentes secções do duto.

Na Zona de Aceleração o aumento da velocidade foi gradual, estabilizando-se a uma velocidade do ar igual a 28 m/s. Não houve redução de velocidade em função do contrafluxo de ar.

No Desacelerador a perda instantânea de velocidade também parece ser pequena, da ordem de 9%. No entanto, notou-se que, quando o contrafluxo de ar está presente, ocorre uma significativa redução na velocidade. Ao extrapolar as curvas para o nível de velocidade do ar igual a 30 m/s encontramos uma diferença de 67% ao empregarmos o jato de ar contrário. Isto significa que, em altas velocidades de transporte, grãos de forma irregular e de grande área superficial sofrem uma frenagem considerável na presença de um contrafluxo de ar.

Mas o maior efeito é observado na Zona de Desaceleração. Ocorrem reduções de 60% e 64% respectivamente em relação ao Desacelerador e à Zona de Aceleração. Aqui também ao extrapolar-se as curvas para uma velocidade do ar igual a 30 m/s, encontramos diferenças de



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s	0,1937	-0,8384	0
V_s	0,2258	-0,9673	0
V_s	0,0386	1,9015	0
V_s	0,1150	0,7667	0
V_s	0,2125	-1,2586	0
V_s	0,2210	-1,1721	0

Figura 6.11: Comportamento de grãos unitários de milho AG 162 nas três secções do Despressurizador com Terminal Vertical, com e sem o jato auxiliar de ar.

90% entre as curvas com e sem o jato auxiliar de ar.

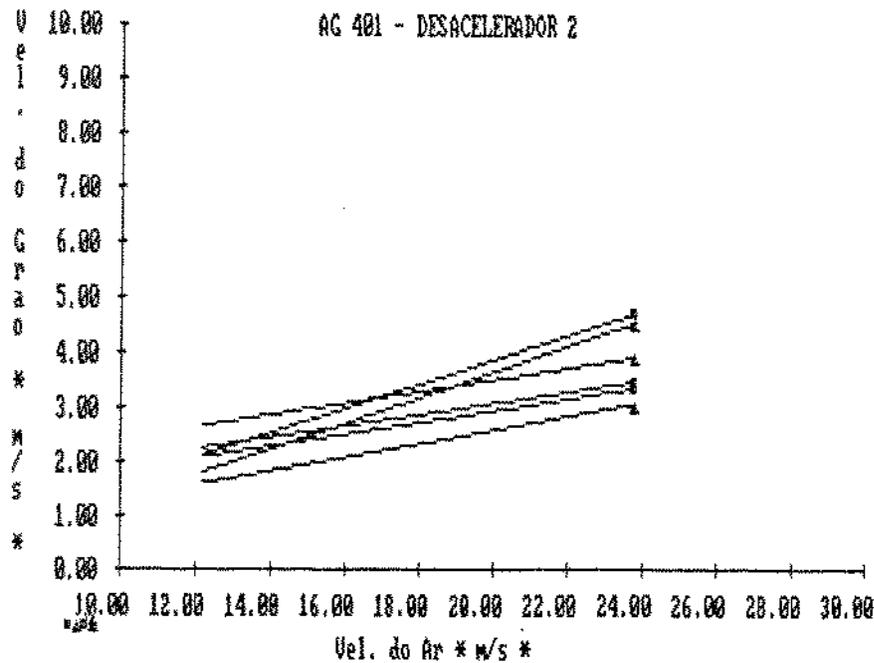
Deste modo pode-se dizer que, para grãos unitários de feijão existe uma interação significativa mostrando haver grandes influências tanto do desacelerador, quanto do contrafluxo de ar, principalmente deste último que contribui eficazmente na desaceleração final do produto.

6.5.4 Comportamento do milho AG 162 nas diferentes secções do duto.

Na Figura 6.16. estão plotadas as curvas do comportamento do milho AG 162 ao longo do duto.

Os grãos de milho AG 162, do mesmo modo que o feijão, por seu formato irregular e grande área superficial, apresentaram desempenhos típicos apenas na Zona de Desaceleração. Nesta secção do teste eles reduziram sua velocidade durante o transporte pelo Terminal Helicoidal em 66% ao atingir o final do duto. O efeito do contrafluxo de ar é significativo, reduzindo a velocidade em 24% na média dos dados, ou seja, correspondendo a cerca de 40% do efeito total.

No Desacelerador não houve nenhuma redução de velocidade em relação à Zona de Aceleração



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s	0,2371	-1,1394	0
V_s	0,2236	-0,6506	0
V_s	0,1084	1,2928	0
V_s	0,1059	0,9168	0
V_s	0,1290	-0,0358	0
V_s	0,1100	0,6963	0

Figura 6.12: Comportamento de grãos unitários de milho AG 401 nas três secções do Despressurizador com Terminal Vertical, com e sem o jato auxiliar de ar.

(3%). Tampouco o contrafluxo de ar foi significativo.

6.5.5 Comportamento do milho AG 401 nas diferentes secções do duto.

Na Figura 6.17. estão plotadas as curvas do comportamento do milho AG 401 ao longo do duto.

Os grãos de milho AG 401 são, dentre os produtos agrícolas aqui testados, os de maior área superficial, maior volume e maior peso. Estes são os três fatores que explicam o seu comportamento ao longo do duto.

Na Zona de Aceleração existe um efeito do contrafluxo de ar, fazendo com que o grão perca parte de sua velocidade.

No Desacelerador é que ocorre uma maior perda de energia cinética e a velocidade é reduzida em média 23%. O contrafluxo de ar contribuiu apenas para uma redução de 6% da velocidade, em média.

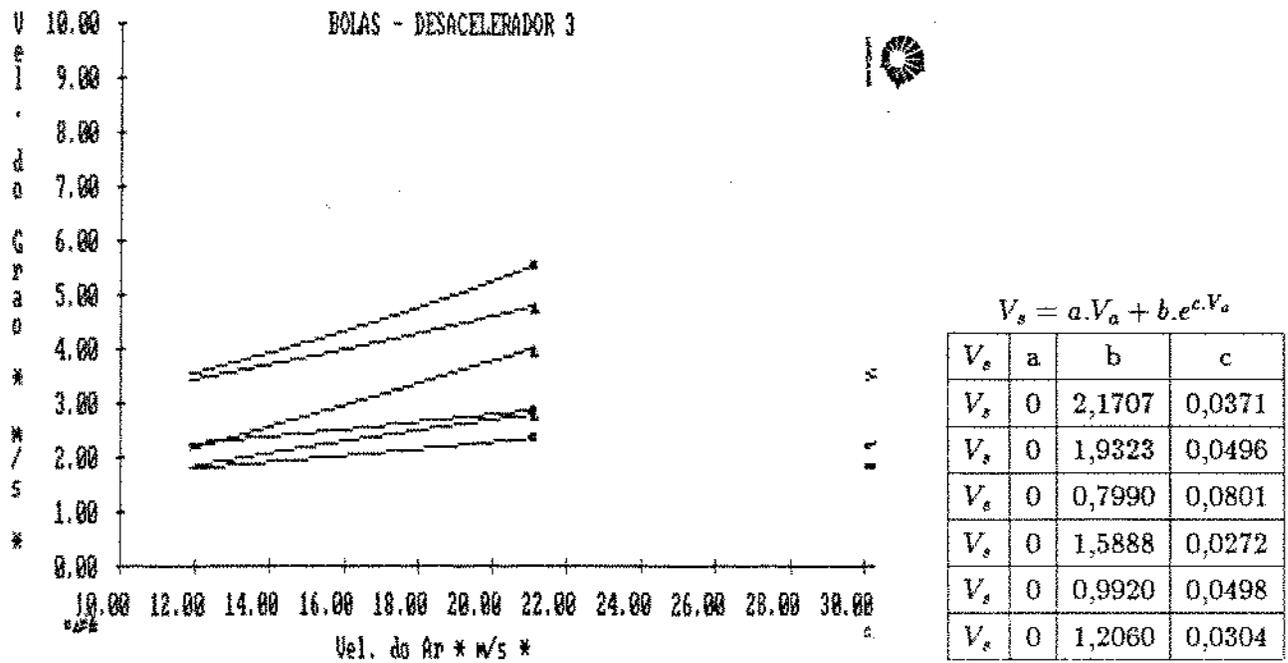
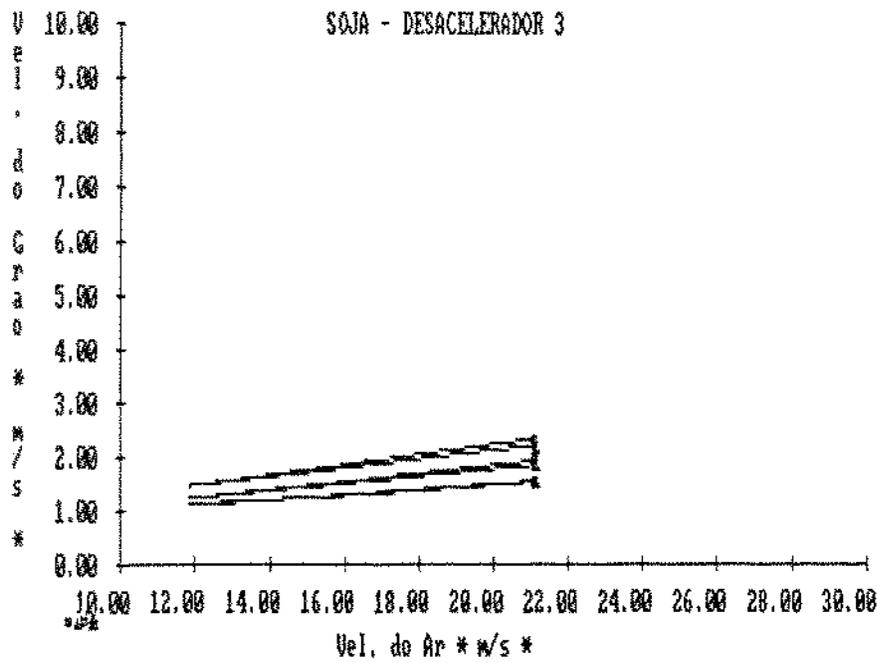


Figura 6.13: Comportamento das bolas de madeira nas três seções do Despressurizador com Terminal Helicoidal, com e sem o jato auxiliar de ar.

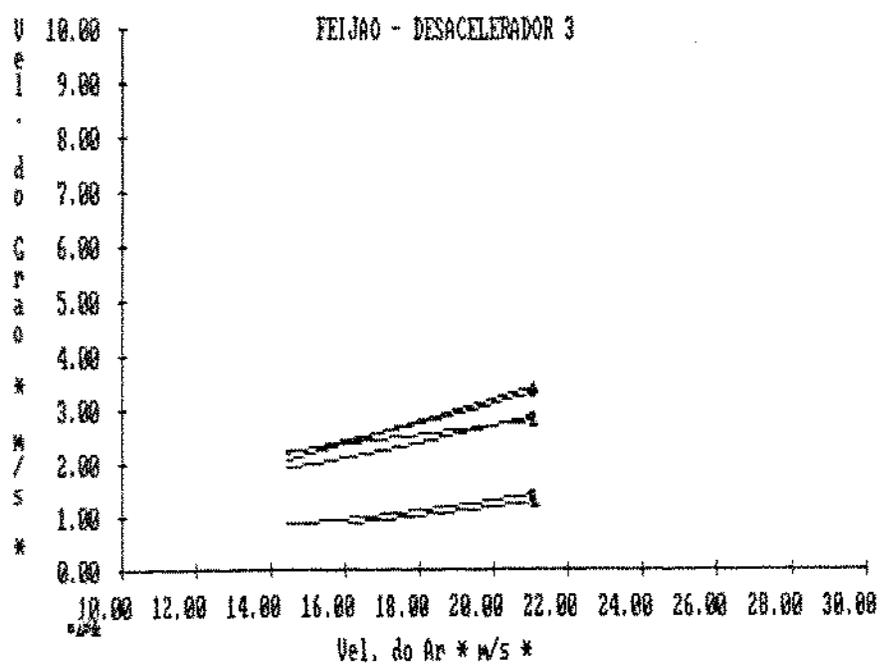
Mais uma vez na Zona de Desaceleração é que os efeitos são visíveis. Ocorre uma grande perda de velocidade, da ordem de 71% em relação ao Desacelerador e de 79% em relação à Zona de Aceleração. Sómente o contrafluxo de ar é responsável por 30% deste resultado.



$$V_g = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_g	a	b	c
V_g	0,0817	0,4303	0
V_g	0,0937	0,2925	0
V_g	0,0678	0,3612	0
V_g	0,0760	0,2676	0
V_g	0,0444	0,5322	0
V_g	0,0494	0,4484	0

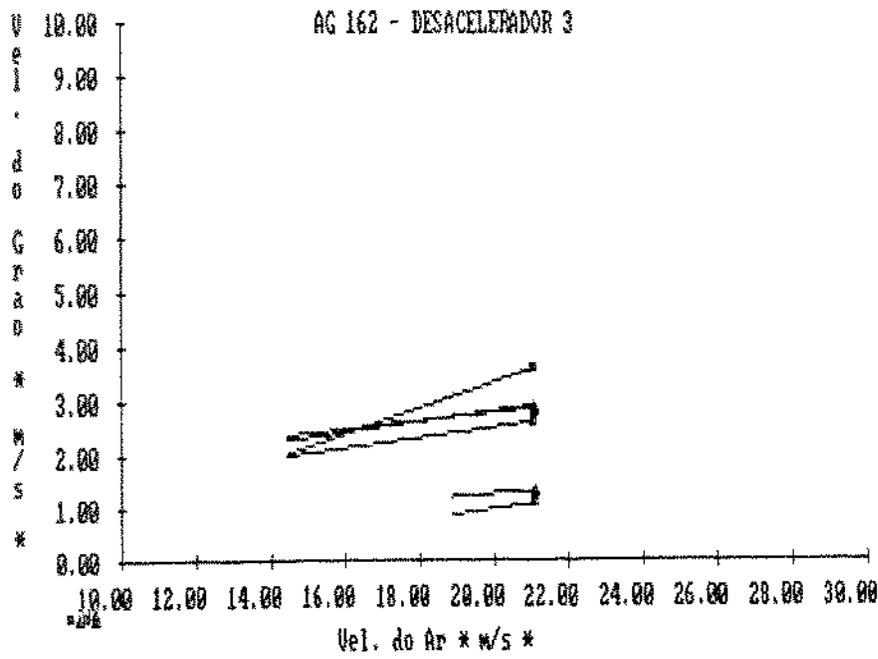
Figura 6.14: Comportamento de grãos unitários de soja nas três secções do Despressurizador com Terminal Helicoidal, com e sem o jato auxiliar de ar.



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s	0,2046	-0,9578	0
V_s	0	0,8574	0,0634
V_s	0,0848	0,9475	0
V_s	0	0,7470	0,0630
V_s	0	0,2136	0,0830
V_s	0	0,2358	0,0834

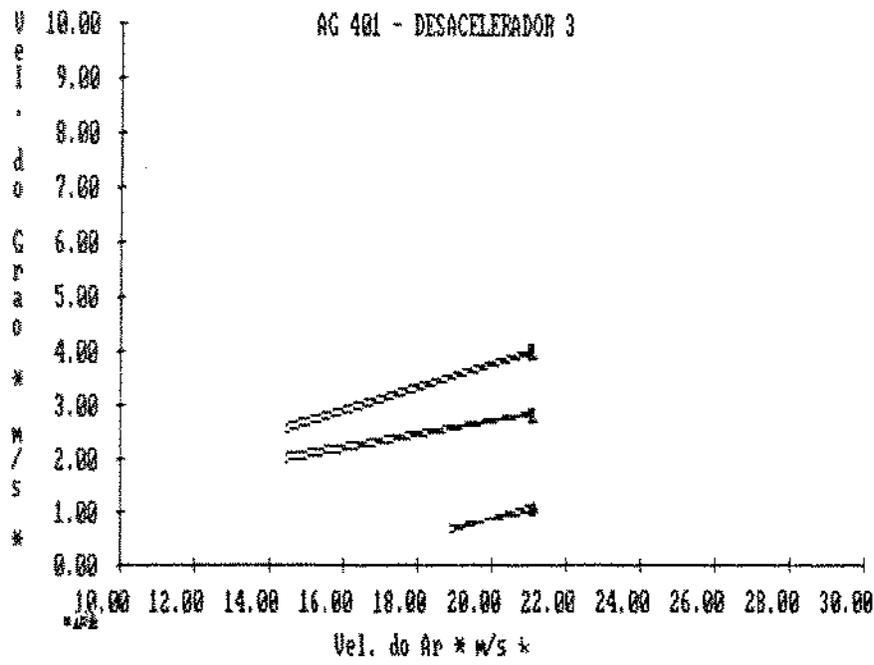
Figura 6.15: Comportamento de grãos unitários de feijão nas três secções do Despressurizador com Terminal Helicoidal, com e sem o jato auxiliar de ar.



$$V_s = a.V_a + b.e^c.V_a$$

V_s	a	b	c
V_s	0,0749	1,2374	0
V_s	0,2376	-1,4594	0
V_s	0,0971	0,8242	0
V_s	0,0952	0,5610	0
V_s	0,0590	0,0400	0
V_s	0,1022	-1,1216	0

Figura 6.16: Comportamento de grãos unitários de milho AG 162 nas três secções do Despresurizador com Terminal Helicoidal, com e sem o jato auxiliar de ar.



$$V_s = a.V_a + b.e^{c.V_a}$$

V_s	a	b	c
V_s	0,2211	-0,7451	0
V_s	0,2118	-0,4755	0
V_s	0,1328	-0,0197	0
V_s	0,1180	0,3261	0
V_s	0,2256	-3,6900	0
V_s	0,1216	-1,6271	0

Figura 6.17: Comportamento de grãos unitários de milho AG 401 nas três secções do Despressurizador com Terminal Helicoidal, com e sem o jato auxiliar de ar.

Capítulo 7

DISCUSSÕES

A idéia central e o objetivo desta pesquisa foram estudar quantitativamente as variáveis envolvidas no transporte unitário de grãos agrícolas, por processo pneumático, através de um fluxo positivo de ar no interior de dutos de pequeno diâmetro.

Poucas informações estão disponíveis, pois todo o trabalho a respeito de transporte pneumático foi direcionado para o fluxo mássico de produtos em dutos de grande diâmetro.

A pesquisa foi orientada para a identificação dos parâmetros críticos que pudessem vir a fornecer subsídios para que projetistas de máquinas agrícolas tivessem condições de projetar uma semeadora pneumática, por pressão de ar, fundamental para o nosso sistema intensivo de plantio das culturas de verão (milho, soja e feijão).

Assim sendo, na primeira fase de testes procurou-se verificar a influência do diâmetro e comprimento do duto sobre a velocidade e a aceleração dos produtos testados, analisando-se seu desempenho em termos da variabilidade do tempo de distribuição.

Concluiu-se que a velocidade de saída dos grãos no final da tubulação varia com o comprimento e diâmetro do duto. Quanto maior a distância, maior é a velocidade média dos grãos, indicando estarem os mesmos em aceleração no interior do duto.

Também foi verificado que a variabilidade no tempo de distribuição é significativamente afetada pelo comprimento e diâmetro do duto. Quanto maior e mais longo o duto, maior a variabilidade. Por esta razão, dutos muito longos são desaconselháveis, não apenas devido ao alto valor da variância no tempo de distribuição, mas também porque aumenta cada vez mais a velocidade média dos grãos, causando erros significativos no momento da deposição no solo.

Esta é uma das razões de terem sido desnvolidos nesta pesquisa os mecanismos de desace-

leração do grão, visando evitar prejuízos no desempenho final da semeadora.

Para traçarmos alguns pontos de consideração sobre o comportamento ou desempenho dos três dispositivos desaceleradores aqui testados, far-se-á uso das Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3, onde estão tabulados os dados médios da velocidade de transporte dos produtos testados, nas diferentes secções da tubulação.

Foram então analisados:

- a) Efeitos do tipo de desacelerador
- b) Efeitos do contrafluxo de ar.

Em cada uma das três secções, descritas como Zona de Aceleração, Desacelerador e Zona de Desaceleração, houveram desempenhos contrastantes que devem ser analisados separadamente.

Para obter-se um quadro conclusivo, optou-se inicialmente por analisar cada tipo de desacelerador em uma determinada zona de teste.

Nas Tabelas são apresentados alguns nomes resumidos, cujo significado é:

- Desacelerador 1: desacelerador tipo despressurizador, com terminal horizontal.
- Desacelerador 2: desacelerador tipo despressurizador, com terminal vertical.
- Desacelerador 3: desacelerador tipo despressurizador, com terminal helicoidal.
- S/Ar: sem fluxo de ar contrário.
- C/Ar: com fluxo de ar contrário igual a $2,0 \text{ kg/cm}^2$ de pressão.

7.6 Efeitos do tipo de desacelerador

Como forma de comparação, definiu-se o Desacelerador com Terminal Horizontal como sendo aquele que teria as mesmas condições do duto de 15mm, apenas com a colocação do despressurizador e do contrafluxo de ar. Portanto, aos seus dados médios deu-se o nível de 100%, comparando-se os outros dois em relação a este.

Na Zona de Aceleração, em virtude das diferenças construtivas dos terminais, ocorrem reduções na velocidade dos produtos testados, com exceção das bolas de madeira que apresentaram velocidades 9% superiores no Desacelerador 2.

A média de desaceleração dos produtos no Desacelerador 2 foi de 9,0%, enquanto que no Desacelerador 3 chegou a 28,2%. Este é um dado esperado, uma vez que as barreiras impostas ao

Tabela 7.1: Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Produtos Agrícolas, em m/s, na Zona de Aceleração de Três Diferentes Sistemas Desaceleradores.

PRODUTOS	DESACELERADOR 1			DESACELERADOR 2			DESACELERADOR 3		
	S/AR	C/AR	C-S	S/AR	S/AR	C-S	S/AR	C/AR	C-S
BOLAS	5,02	4,75	-6,1	5,35	5,37	-	3,98	4,29	+7,8
AG 401	4,39	4,12	-6,1	3,12	3,37	+8,0	2,89	2,76	-4,5
AG 162	3,13	3,14	-	2,64	3,07	+16,3	2,28	2,15	-5,7
FEIJÃO	3,48	3,49	-	3,42	2,98	-12,9	2,43	2,44	-
SOJA	2,67	2,53	-5,3	2,31	2,23	-3,5	1,75	1,80	+2,8

Tabela 7.2: Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Produtos Agrícolas, em m/s, no Desacelerador de Três Diferentes Sistemas Desaceleradores.

PRODUTOS	DESACELERADOR 1			DESACELERADOR 2			DESACELERADOR 3		
	S/AR	C/AR	C-S	S/AR	S/AR	C-S	S/AR	C/AR	C-S
BOLAS	3,31	3,32	-	3,44	3,08	-10,5	2,92	2,48	-15,1
AG 401	2,24	2,06	-8,0	3,24	2,82	-13,0	2,11	1,99	-5,7
AG 162	2,19	2,10	-4,1	2,60	2,83	+8,8	2,19	2,11	-3,7
FEIJÃO	2,01	1,90	-5,5	2,39	2,45	+2,5	2,30	2,15	-6,5
SOJA	0,99	1,05	+6,0	2,50	1,98	-20,8	1,45	1,49	+2,8

fluxo de ar na Zona de Aceleração são completamente diferentes entre os três sistemas. Quanto maior a obstrução ao fluxo (Desacelerador 3), menor a velocidade do grão.

No Desacelerador começam a ficar visíveis os reais desempenhos de cada dispositivo testado. Nesta secção o Desacelerador 1 reduziu a velocidade dos grãos 70,6% em relação ao 2 e apenas 6,2% em relação ao 3. Isto significa que houve um efeito muito significativo da curva de 90-o colocada logo após o Desacelerador, fazendo com que os grãos não desacelerassem totalmente ao cruzar o dispositivo despressurizador.

Na Zona de Desaceleração completa-se o quadro do desempenho de cada dispositivo. Como foi descrito anteriormente, em queda livre os grãos tendem a retomar a aceleração, aumentando

Tabela 7.3: Velocidade Média de Transporte de Grãos Unitários de Produtos Agrícolas, em m/s, na Zona de Desaceleração de Três Diferentes Sistemas Desaceleradores.

PRODUTOS	DESACELERADOR 1			DESACELERADOR 2			DESACELERADOR 3		
	S/AR	C/AR	C-S	S/AR	S/AR	C-S	S/AR	C/AR	C-S
BOLAS	1,99	1,68	-15,6	3,30	3,08	-6,7	2,19	1,96	-10,5
AG 401	0,93	0,82	-11,9	2,28	2,68	+17,5	0,67	0,53	-20,9
AG 162	0,67	0,61	-9,0	2,56	2,86	+11,7	0,84	0,64	-23,8
FEIJÃO	0,62	0,53	-14,5	2,82	2,89	+2,5	0,89	0,87	-2,3
SOJA	0,94	0,81	-13,9	1,98	2,22	+12,1	1,25	1,21	-3,2

rapidamente a velocidade. Comprovando esta afirmativa, verificou-se que no Desacelerador 2 os produtos aumentaram, em média, sua velocidade em 218,2%, com relação ao Desacelerador 1, enquanto que o Desacelerador 3 aumentava apenas 16,6%, ou seja, o terminal helicoidal possui condições semelhantes ao terminal horizontal para desacelerar os produtos agrícolas e colocá-los no solo a uma velocidade adequada e com a precisão desejada.

7.7 Efeitos do contrafluxo de ar

O contrafluxo de ar aparentemente não deveria ter influência na Zona de Aceleração dos produtos testados. No entanto, em todos os desaceleradores ele foi atuante no sentido de frear a velocidade. Ainda assim, quando o contrafluxo de ar estava atuando, no Desacelerador 2, os dois tipos de grãos de milho e, no Desacelerador 3, os dois produtos de formato redondo (bolas e soja) apresentaram velocidades superiores àquelas apresentadas quando não havia o contrafluxo.

No âmbito do Desacelerador esperava-se que alguma turbulência provocada pelo jato de ar contrário fizesse com que a velocidade do grão sofresse uma perda de energia e, por conseguinte, uma redução na velocidade. Realmente em 74% das situações foi isto que ocorreu.

Mais uma vez observa-se que os produtos de maior área superficial e maior peso (bolas de madeira e milho AG 401) são aqueles que respondem melhor ao contrafluxo de ar, ou seja, são os que realmente perdem energia cinética e reduzem sua velocidade final. Os demais produtos tendem a desacelerar, mas não obedecem a um comportamento padrão.

Na Zona de Desaceleração observam-se comportamentos mais conclusivos.

No Desacelerador 1 todos os produtos sofreram reduções significativas de velocidade em função do contrafluxo de ar, principalmente os produtos de formato esférico.

No Desacelerador 2, como era esperado em razão dos efeitos de retomada de aceleração, todos os produtos a exceção das bolas de madeira, aumentaram a velocidade, mesmo com o jato de ar auxiliando a frenagem.

No Desacelerador 3 obtiveram-se desacelerações significativas nos dois tipos de milho e ainda nas bolas de madeira. Os grãos de feijão e soja reduziram a velocidade mas com menor intensidade.

Pode-se concluir que, nos dispositivos projetados, seja horizontal ou helicoidal, existe uma interação positiva do fluxo de ar no sentido contrário, frenando a energia cinética do grão e auxiliando para que venha a perder velocidade na porção final do dispositivo, ou seja, na porção do duto que será encarregada de depositar o grão no solo.

Dispositivos como o Terminal Vertical tendem a fazer com que o grão retome a aceleração e perca as propriedades necessárias para a perfeita deposição. Sendo assim são desaconselhados para serem colocados em semeadoras de precisão.

Capítulo 8

CONCLUSÕES

Do conjunto de resultados obtidos nesta pesquisa é possível concluir-se que:

- A velocidade de saída dos grãos no final da tubulação varia com o comprimento e diâmetro do duto. Quanto maior a distância, maior é a velocidade média dos grãos, indicando estarem os mesmos em aceleração no interior do duto. Quanto maior o diâmetro do duto, menor a velocidade do grão.
- A aceleração dos grãos possui correlação positiva com a área projetada, a massa e o fator de forma.
- A variância no tempo de distribuição é afetada pelo comprimento e diâmetro do duto. Quanto maior e mais longo, maior a variabilidade, ou seja, menor a precisão de distribuição.
- O uso de dispositivos desaceleradores é eficaz como meio de frear a velocidade final do grão, evitando os rebotes contra o solo no momento da deposição.
- O desacelerador com terminal horizontal obteve os melhores desempenhos.
- O contrafluxo de ar auxilia na frenagem do grão.

Capítulo 9

TRABALHOS FUTUROS

Os resultados desta pesquisa abrem caminho para o projeto de distribuidores fluidos de grãos, por pressão de ar, para serem adaptados à semeadoras pneumáticas de precisão.

Os tópicos aqui abordados foram considerados essenciais para projeto mas, no entanto, para complementar o trabalho, seria necessário estudar:

- O mecanismo distribuidor de sementes;
- Efeitos da vibração do duto quando em regime de trabalho;
- Efeitos da posição do duto no projeto da semeadora;
- Novos dispositivos desaceleradores;
- Efeito da umidade do grão no transporte em dutos de pequeno diâmetro.

Capítulo 10

Bibliografia

- [1] AH CHIN, A.D. et alli. - *A shape-modified size correction for terminal settling velocity in the intermediate region*. Powder Technology, 48(1): 59 - 65, 1986.
- [2] ALLAM, R.K. & WIENS, E.H. - *Air seeder testing*. Canadian Agriculture Engineering, 24: 91 - 101, 1982.
- [3] ASME - American Society of Mechanical Engineers. - *Fluid Meters: Their theory and application*. Fifty Edition, 203 p., 1959.
- [4] BENEDETTI, B.C. - *Influência do Teor de Umidade sobre as Propriedades Físicas de Vários Grãos*. Tese de Mestrado, FEAGRI - UNICAMP, 125p., 1987.
- [5] BEVERLOO, W.A. ; LENIGER, H.A. & VAN DE VELDE, J. - *The flow of granular solids through orifices*. Chemical Engineering Science. V. 15, p. 260 - 69, 1961.
- [6] BICKERT, W.C. & BUELOW, F.W. - *Kinetic friction of grains on surfaces*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 9(1): 129 - 31, 1966.
- [7] BILANSKI, W.K. ; COLLINS, S.H. & CHU, P. - *Aerodynamics properties of seed grains*. Agricultural Engineering. 43(4): 216 - 19, 1962.
- [8] BILANSKI, W.K. & LAL, R. - *The behavior of threshed materials in a vertical wind tunnel*. ASAE Paper No 64 - 805, ASAE, St. Joseph, MI, 1964.
- [9] BRAUNBECK, O.A. - *Adaptation of a pneumatic row planter for precision drilling of wheat*. MSc Thesis. Michigan State University, 73p., 1973.

- [10] BRUBAKER, J.E. & POS, J. - *Determining static coefficient of friction of grains on structural surfaces*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 8(1): 53 - 5, 1965.
- [11] CHUMA, Y. ; UCHIDA, S. & SHEMSANGA, K.H.H. - *Simultaneous measurement of size, surface area and volume of grains and soybeans*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 25(6): 1752 - 56, 1982.
- [12] CLARK, R.L. & Mc FARLAND, H.A. - *Granular materials friction apparatus*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 16(6): 1198 - 9, 1973.
- [13] CRANE, J. & CARLETON, W. - *Predicting pressure drop in pneumatic conveying of grains*. Agriculture Engineering. 38(3): 168 - 71, 80, 1957.
- [14] DELMÉE, G.J. - *Manual de Medição de Vazão*. Editora Edgard Blucher Ltda., 1982, 476p.
- [15] EWING, C.G. - *Here comes the air seeder*. Implement & Tractor, 95(23): 16 - 18, 1980.
- [16] FARBAR, L. - *Flow characteristics of solid-gas mixture in a horizontal and vertical conduit*. Industrial Engineering Chemistry. 41(7): 1187 - 95, 1949.
- [17] FLEMMER, R.L.C. & BANKS, C.L. - *On the drag coefficient of a sphere*. Powder Technology, 48(6): 217 - 21, 1986.
- [18] GARRET, R.E. & BROOKER, D.B. - *Aerodynamics drag of farm grains*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 8(1): 49 - 52, 1965.
- [19] GIANNINI, G.R. ; CHANCELLOR, W.J. & GARRET, R.E. - *Precision planter using vacuum for seed pickup*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 10(3): 607 - 10, 14, 1967.
- [20] GOMES, E.S. & BALASTREIRE, L.A. - *Ensaio de um dosador de sementes pneumático à vácuo*. Maquinaria Agrícola, 4(1): 4 - 6, 1989.
- [21] HARMOND, J.E. - *Precision vacuum-type planter head*. United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service. ARS 42 - 115, 1965.
- [22] HAWK, A.L. ; BROOKER, D.B. & CASSIDY, J.J. - *Aerodynamic characteristics of selected farm grains*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 9(1): 48 - 51, 1966.
- [23] HENDERSON, S.M. & PERRY, R.L. - *Agricultural Process Engineering*. John Wiley & Sons, New York, 209p., 1955.

- [24] HITCHCOCK, J.A. & JONES, C. - *The pneumatic conveying of spheres through straight pipes*. British Journal of Applied Physics. Vol 9: 218 - 22, 1958.
- [25] HOLMAN, J.P. - *Metodos Experimentales para Ingenieros*. Editora McGraw - Hill, 445p., 1977.
- [26] HUGHES, W.F. & BRIGHTON, J.A. - *Fluid Dynamics - Schaum's Outline of Theory and Problems*. Schaum Publishing Company. 358p., 1967.
- [27] KIM, K.H. & ROHRBACH, R.P. - *Fluidic detection of large particles embeded in a confined turbulent flow field*. Journal of Agricultural Engineering Research. 17: 246 - 51, 1972.
- [28] KRAMER, H.A. - *Factors influencing the design of bulk storage bins for rough rice*. Agricultural Engineering, St. Joseph, MI, 25(12): 463 - 6, 1944.
- [29] Le PORI, W.A. ; PORTERFIELD, J.G. & FITCH, E.C. - *Fluidic control of seed metering*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 17(2): 463 - 7, 1974.
- [30] MOHSENI, N.N. - *Physical Properties Of Plant And Animal Materials. Part II, Vol. 1, Chapter 9: Aerodynamics and Hidrodynamics Characteristics*. p. 495 - 555, Pemsylvania State University, 1968.
- [31] MONTEIRO, L.R. & BRAUNBECK, O.A. - *Semeadora pneumática: Desenvolvimento e Avaliação*. Publicação CENEA - Centro Nacional de Engenharia Agrícola. 12p. 1985.
- [32] OKI, K. ; WALAWENDER, W.P. & FAN, L.T. - *The measurement of local velocity of solid particles*. Powder Technology. 18(2): 171 - 78, 1977.
- [33] OWER, E. & PANKHURST, R.C. - *The Measurement Of Air Flow*. Pergamon Press Ltd., London, 4th Edition, 367p., 1966.
- [34] PETTYJOHN, E.S. & CHRISTIANSEN, E.B. - *Effects of particle shape on free-settling rates of isometric particles*. Chemical Engineering Progress, 44: 157 - 172, 1948.
- [35] POTTER, M.R. - *Electronics on farm machinery: more productivity or more problems?* Agricultural Engineer. 41(2): 58 - 61, 1986.
- [36] PREM CHAND & GHOSH, D.P. - *Critical analysis of pressure drop under pneumatic conveyance of solids*. Journal of Agricultural Engineering Research. 13(1): 36 - 43, 1968.

- [37] PREM CHAND & GHOSH, D.P. - *Dynamics of particles under pneumatic conveyance*. Journal of Agricultural Engineering Research, 13(1): 27 - 35, 1968.
- [38] RICHTER, D.W. - *Friction coefficients of some agricultural material*. Agricultural Engineering, St. Joseph, MI, 35(6): 411 - 3, 1954.
- [39] ROHRBACH, R.P. & HOLMES, R.G. - *A new concept in seed metering*. ASAE Paper No 70-108, 15p., 1970.
- [40] ROHRBACH, R.P. & KIM, K.H. - *A fluidic seed meter?* Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 15(5): 1003 - 9, 1972.
- [41] SHEED, C.K. - *Resistance of grains and seeds to air flow*. Agricultural Engineering, St. Joseph, MI, 34(9): 616 - 19, 1953.
- [42] SHORT, T.H. & HUBER, S.G. - *The development of a planetary and vacuum seed metering device*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 13(6): 803 - 5, 1970.
- [43] SNYDER, L.H. et alli. - *Coefficients of kinetic friction of wheat on various metal surfaces*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 10(3): 411 - 3, 9, 1967.
- [44] SWEETMAN, I.C. - *A suction-operated precision seeder*. New Zealand Journal Science Technology, Section A(38): 577 - 82, 1957.
- [45] TURTON, R. & CLARK, N.N. - *An explicit relationship to predict spherical particle terminal velocity*. Powder Technology, 53(2): 127 - 9, 1987.
- [46] VOGT, E.G. & WHITE, R.R. - *Friction in the flow of suspensions granular solids in gases through pipe*. Industrial and Engineering Chemistry, 40(9): 1731 - 8, 1948.