



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA**



# **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO E DA FORMA DA  
SECÇÃO DA COLUNA DE QUEDA SOBRE OS  
PARÂMETROS AERODINÂMICOS DE GRÃOS**

**HELEN LIRA HENRIQUES TORRES**

**CAMPINA GRANDE  
PARAÍBA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

*Dissertação Apresentada pela Área de Armazenamento e  
Processamento de Produtos Agrícolas*

*INFLUÊNCIA DO TAMANHO E DA FORMA DA  
SECÇÃO DA COLUNA DE QUEDA SOBRE OS  
PARÂMETROS AERODINÂMICOS DE GRÃOS*

*Helen Lira Henriques Torres*

ORIENTADORA: *Profa. Dra. Maria Elita Martins Duarte*

ORIENTADOR: *Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira  
Cavalcanti Mata*

CAMPINA GRANDE-PB  
(Setembro/2003)

**DIGITALIZAÇÃO:**  
**SISTEMOTECA - UFCG**



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA UFCG

T 693 i  
2003

Torres, Helen Lira Henriques  
Influência do tamanho e da forma da secção da coluna de queda sobre os parâmetros aerodinâmicos de grãos / Helen Lira Henriques Torres. – Campina Grande: UFCG, 2003.  
90 p.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). UFCG / CCT  
Inclui bibliografia

1. Velocidade terminal 2. Características físicas 3. Características aerodinâmicas  
I. Título

CDU: 664.723

---

*Helen Lira Henriques Torres*

*INFLUÊNCIA DO TAMANHO E DA FORMA DA  
SECÇÃO DA COLUNA DE QUEDA SOBRE OS  
PARÂMETROS AERODINÂMICOS DE GRÃOS*

---

Dissertação apresentada ao Curso de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola da Universidade Federal de  
Campina Grande, em cumprimento  
às exigências para obtenção do grau  
de Mestre.

**CAMPINA GRANDE-PB**  
(Setembro/2003)



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

**HELEN LIRA HENRIQUES TORRES**

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO E FORMA DA SEÇÃO DA COLUNA  
DE QUEDA SOBRE OS PARÂMETROS AERODINÂMICOS DE  
GRÃOS**

**BANCA EXAMINADORA**

**PARECER**

Maria Elita Martins Duarte  
**Dra. Maria Elita Martins Duarte-Orientadora**

M. Elita (Aprovada)

Mário Eduardo R.M. Cavalcanti Mata  
**Dr. Mário Eduardo R.M. Cavalcanti Mata-Orientador**

APROVADA

Alexandre S. Melo Queiroz  
**Dr. Alexandre José de Melo Queiroz-Examinador**

APROVADA

Antônio Gilson Barbosa de Lima  
**Dr. Antônio Gilson Barbosa de Lima-Examinador**

Aprovada

**Campina Grande, 15 de setembro de 2003**

## AGRADECIMENTOS

*A Deus e a Nossa Senhora agradeço não só esse trabalho, mas a vida. "... Nossa Senhora me dê a mão, cuida do meu coração, da minha vida, do meu destino, do meu caminho, cuida de mim..." Roberto Carlos.*

*Ao sentimento mais bonito, que é o amor que sinto por papai. "Há tempos que estou tão sozinha, carente, sem você aqui. Olhando o vazio em minha vida e bem dentro de mim. Te amar foi um sonho vivido por mim que ninguém viveu, você foi a melhor de mil coisas que me aconteceu. Eu tenho você como parte de mim e da minha alma, você veio a mim como um conto de fadas. Estar sozinha sem você é viajar na contra mão, é magoar demais, torturar demais o meu coração. É riacho sem água procurando um caminho, pássaro ferido, voando perdido buscando seu ninho." Rita de Cássia*

*"Maria, Maria é um dom, uma certa magia, uma força que nos alerta, uma Mulher que merece viver e amar como outra qualquer do planeta. Maria, Maria é a força, é a cor, é o suor, é a dose mais forte e lenta de uma gente que rir quando deve chorar e não sofre, apenas agüenta. Mas é preciso ter força, é preciso ter raça, é preciso ter sonhos sempre quem não possui esta marca, possui a estranha mania de ter fé na vida..."*

*Milton Nascimento*

*A minha mãe Maria Lenita, agradeço tudo o que sou e que tenho na vida. Mãinha, obrigada por ter sido PAE para mim, a Sra. foi muito mais que uma mãe, foi pai e mãe ao mesmo tempo e fez isso muito dignamente; gostaria de agradecer os momentos que passou estudando comigo, quando pequena e por isso nem preciso dizer que está aqui hoje é nada mais nada menos que mérito seu. Obrigada! "...Que a família comece e termine sabendo aonde vai e que o homem carregue nos ombros a graça de um pai, que a mulher seja um céu de ternura aconchego e calor e que os filhos conheçam a força que brota do amor, abençoa senhor as famílias amem, abençoa senhor a minha também..." Pe Zezinho*

*Ao amor que a vida me deu de presente, Herlen por todos os momentos felizes e tristes que vivemos. Se hoje estou aqui, é porque uma parcela muito grande de tudo isso devo a você meu irmãozinho. "... Eu acredito e sempre acreditei na vida. De uma maneira muito forte, muito intensa. É que é difícil a gente ouvir do nosso próprio coração. Que ele só pulsa, bate, chora, mas não pensa..." Fábio Jr.*

*A Valsi Roberto de Lira, que foi o pai que conheci e a quem devo muito do que sou. Taty, obrigada pelo amor e carinho que teve comigo quando eu nem sabia que não tinha pai e até achava que você era ele. De certo modo, até posso dizer que é, você esteve presente como tal em todos os momentos da minha vida. "...Pai, você foi meu herói, meu bandido. Hoje é mais, muito mais que um amigo. Nem você nem ninguém está sozinho. Você faz parte deste caminho. Que hoje eu sigo em paz." Fábio Jr.*

*A minha mãe (tecnológica), professora, amiga e também orientadora Maria Elita Martins Duarte, agradeço pelo carinho e dedicação do tipo que só uma mãe sabe dar e ao irmão tecnológico Dinart pelo carinho de me sentir como verdadeira irmã. "... Ando devagar porque já tive pressa e levo esse sorriso, porque já chorei demais. Hoje me sinto mais forte, mais feliz quem sabe. Eu só levo a certeza de que muito pouco eu sei, eu nada sei. Conhecer as manhas e as manhas, o sabor das massas e das maçãs. É preciso amor pra poder pulsar, é preciso paz pra poder sorrir, é preciso chuva para florir..." Almir Sater.*

*Ao meu pai (tecnológico) Mario Eduardo agradeço pelas lições de vida que me ensinou. Por todos os momentos de conversa, paciência e impaciência que teve comigo. "... guerreiros são pessoas, são fortes, são frágeis, guerreiros são meninos no fundo do peito. Precisam de um descanso, precisam de um remanso, precisam de um sonho que os tornem perfeitos... seu sonho é sua vida e a vida é o trabalho, sem seu trabalho, um homem não tem honra e sem a sua honra, se morre, se mata..." Gonzaguinha*

*Ao professor Dr. Antônio Gilson pela participação e colaboração neste trabalho. "... nunca se entregue, nasça sempre com as manhãs. Deixe a luz brilhar no céu do seu olhar. Fé na vida, fé no homem, fé no que vira. Nós podemos tudo, nós podemos mais, vamos lá fazer o que será..." Nando Cordel*

*Às amigas que fiz aqui, Edênia Diniz e Taciana Walesca pela participação não só nesse trabalho, mas na minha vida. Por todos os momentos que tivemos aqui, sabemos que quando se é verdadeiro uma amizade não se acaba assim; pelo contrario ela fortalece, pois na vida nada acontece por acaso. "... amigas para sempre é o que nos iremos ser na primavera ou em qualquer das estações nas horas tristes nos momentos de lazer. Amigas para sempre..." EJC*

*A Rossana Maria Feitosa e Alexandre José Queiroz que além de professores, também foram amigos que fiz aqui, gostaria de agradecer pela paciência e carinho com que me trataram e muito mais pela amizade. "Espero algum dia te encontrar de novo, pra gente conversar o que passou na nossa vida e juntos relembrarmos... De hoje em diante vou lembrar de vocês, espero breve vê-los outra vez" EJC.*

*Aos poucos amigos que fiz aqui; Claudécia Leite, Edimir Andrade, Hofsky Vieira (Sckaymenn), José Rildo, Lucicléia Barros, Luciene, Luizinho, Marinaldo Elias, Ozênia Carvalho, Pablicia Oliveira, Raimundo Nonato, Ranilda Neves, Renato Fonseca, Robert Kross e Severino Carlos (Cessa). "... amigo é coisa pra se guardar. Do lado esquerdo do peito. Mesmo que o tempo e a distancia digam não. Mesmo esquecendo a canção. O que importa é ouvir. A voz que vem do coração..." Milton Nascimento.*

*A Rivanilda Diniz e Aparecida pela paciência de todos os dias. "... Já está chegando a hora de ir, venho aqui me despedir e dizer. Que em qualquer lugar por onde eu andar, vou lembrar de você. Só me resta agora dizer Adeus e depois o meu caminho seguir..." Roberto Carlos.*

*À Universidade Federal de Campina Grande, pela realização desse trabalho. "...o tempo passa, e com ele caminhamos todos juntos, sem parar. Nossos passos pelo chão vão ficar. Marcas do que se foi, sonhos que vamos ter, como todo dia nasce novo em cada amanhecer."*

*"Eu fico com a pureza das respostas das crianças, é a vida, é bonita e é bonita. Viver e não ter a vergonha de ser feliz, cantar e cantar e cantar, a beleza de ser um eterno aprendiz..." Gonzaguinha.*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>x</b>
<b>RESUMO</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xiv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>4</b>
2.1 Conteúdo de Água	4
2.2 Características Físicas	5
2.2.1 Tamanho e forma das sementes	5
2.2.1.1 Medida dos diâmetros e diâmetro da esfera equivalente	5
2.2.1.2 Volume	6
2.2.1.3 Massa específica	7
2.2.1.4 Esfericidade	7
2.2.1.5 Área projetada	10
2.2.1.6 Porosidade	11
2.3 Propriedades Aerodinâmicas	12
2.3.1 Transporte Aerodinâmico	12
2.3.2 Coeficiente de Arraste	12
2.3.3 Transporte de partículas esféricas	15
2.3.4 Fluidos Newtonianos e partículas não esféricas	17
2.3.5 Velocidade Terminal	19
2.3.6 Velocidade Terminal para partículas não esféricas	23
2.3.7 Velocidade Terminal por tempo e deslocamento	25
2.3.8 Efeito de parede	30
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>35</b>
3.1 Conteúdo de água	35
3.2 Características Físicas	35
3.2.1 Tamanho e forma das sementes	36
3.2.1.1 Medida dos diâmetros e diâmetro da esfera equivalente	36
3.2.1.2 Volume	36
3.2.1.3 Massa específica real	37
3.2.1.4 Esfericidade	37
3.2.1.5 Área projetada	37
3.2.1.6 Porosidade	37
3.3 Propriedades Aerodinâmicas	39
3.3.1 Velocidade Terminal	39

3.3.1.1	Análise Teórica	40
3.4	Efeito de parede	42
3.5	Análise Estatística	42
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>43</b>
4.1	Conteúdo de água	43
4.2	Características físicas	43
4.2.1	Tamanho e forma das sementes	43
4.3	Parâmetros Aerodinâmicos	45
4.3.1	Velocidade Terminal	45
4.3.1.1	Velocidade Terminal calculada	45
4.3.1.2	Velocidade Terminal experimental	48
4.3.1.2.1	Velocidade Terminal - feijão	50
4.3.1.2.2	Velocidade Terminal - milho	52
4.3.1.2.3	Velocidade Terminal - soja	55
4.3.1.2.4	Efeito da forma e tamanho do grão	57
4.3.2	Coefficiente de arraste	58
4.3.2.1	Coefficiente de arraste calculado	58
4.3.2.2	Coefficiente de arraste experimental	59
4.3.2.2.1	Coefficiente de arraste na secção de 60 mm	62
4.3.2.2.2	Coefficiente de arraste na secção de 50 mm	63
4.3.2.2.3	Coefficiente de arraste na secção de 40 mm	65
4.3.2.2.4	Coefficiente de arraste na secção de 30 mm	66
4.3.2.2.5	Coefficiente de arraste na secção de 20 mm	67
4.3.3	Efeito de parede	68
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>72</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXO A</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXO B</b>	<b>82</b>
	<b>ANEXO C</b>	<b>87</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURAS		PÁGINA
Figura 1	Paquímetro digital	5
Figura 2	Métodos de determinação da esfericidade definida para grãos.	10
Figura 3	Coefficiente de arraste para partículas com formas geométricas regulares. Reproduzidas a partir de VENNARD, 1961.	15
Figura 4	Curvas tempo-deslocamento para grãos esféricos e sementes agrícolas (BILLANSKI et al., 1962).	28
Figura 5	Método do deslocamento de massa de água para o cálculo do volume e da massa específica.	36
Figura 6	Picnômetro de comparação a ar.	38
Figura 7	Equipamento utilizado para medir a velocidade terminal dos grãos: a) aparelho equipado com coluna de secção circular b) aparelho equipado com coluna de secção quadrada.	39
Figura 8	Número de Reynolds, $N_R$ em função de $CN_R^2$ para esferas.	41
Figura 9	Grãos de feijão, milho e soja utilizados nas determinações das características físicas e aerodinâmicas.	44
Figura 10	Representação gráfica da velocidade terminal calculada para feijão, milho e soja segundo MOHSENIN (1978), PETTY JOHN & CHISTIANSSEN (1948), MASSARANI (1986) e velocidade terminal experimental destes grãos.	47
Figura 11	Posição adotada pelo grão de milho durante a determinação da velocidade terminal: a) em colunas com <i>diâmetros*</i> maiores do que 20 mm e b) em colunas com <i>diâmetro*</i> igual a 20 mm.	54
Figura 12	Curvas de tendência dos coeficientes de arraste de feijão, milho e soja, em colunas de quedas de secção circular com diâmetros de 20, 30, 40, 50 e 60mm.	60
Figura 13	Curvas de tendência dos coeficientes de arraste em função do <i>diâmetro*</i> da secção de feijão, milho e soja, em colunas de quedas de secção quadrada com lados de 20, 30, 40, 50 e 60mm.	61
Figura 14	Velocidade terminal em função da relação $D_P/D_C$ ( $\beta$ ) para feijão.	69
Figura 15	Velocidade terminal em função da relação $D_P/D_C$ ( $\beta$ ) para milho.	70
Figura 16	Velocidade terminal em função da relação $D_P/D_C$ ( $\beta$ ) para soja	71

## LISTA DE TABELAS

TABELAS	PAGINA
Tabela 1	Resumo comparativo de equações de movimento de esfera, discos e cilindros circulares. 23
Tabela 2	Propriedades aerodinâmicas de sementes e grãos (BILANSKI <i>et al.</i> , 1962) 30
Tabela 3	Efeito de parede na queda livre de uma esfera de diâmetro $D_p$ ao longo do eixo de um tubo da coluna $D_c$ (MASSARANI, 1990). 31
Tabela 4	Resultados da inclinação dos gráficos de $k_p$ em função de $\frac{D_p}{D_c}$ para a geometria esférica. 33
Tabela 5	Características físicas (tamanho e forma) dos grãos de feijão milho e soja 43
Tabela 6	Velocidade terminal calculada com base nas características físicas do produto e do fluido (ar), por três diferentes formas: $V_{t1}$ (considerando o produto como esférico segundo MOHSEIN, 1978); $V_{t2}$ (corrigindo o $C_D$ pela equação dada por PETTY JOHN & CHRISTIANSEN, 1948) e $V_{t3}$ (corrigindo $C_D$ pela Equação dada por MASSARANI, 1986) 46
Tabela 7	Velocidade terminal ( $m.s^{-1}$ ) de grãos de feijão, milho e soja obtidas em colunas de secção circular e também, quadrada com diâmetros* 60, 50, 40, 30 e 20mm, respectivamente. 49
Tabela 8	Análise de variância da velocidade terminal de feijão no ar, em coluna de queda com diferentes formas (F1) e diferentes tamanhos da secção (F2) 50
Tabela 9	Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do feijão, para as diferentes formas e diferentes tamanhos da secção. 51
Tabela 10	Valores médios da velocidade terminal no ar de grãos de feijão, para a interação entre a forma da coluna de queda e tamanho da secção. 51
Tabela 11	Análise de variância da velocidade terminal no ar de milho, em coluna de queda com diferentes formas (F1) e diferentes tamanhos da secção (F2). 52
Tabela 12	Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do milho, para as diferentes formas e diferentes tamanhos da secção. 53
Tabela 13	Valores médios da velocidade terminal no ar de grãos de milho, para a interação entre a forma da coluna de queda e tamanho da secção. 54
Tabela 14	Análise de variância da velocidade terminal no ar de soja, em coluna de queda com diferentes formas (F1) e diferentes tamanhos

	da secção (F2).	55
Tabela 15	Comparação entre os valores médios da velocidade terminal de soja, para as diferentes formas e diferentes tamanhos da secção.	56
Tabela 16	Valores médios da velocidade terminal no ar de grãos de soja, para a interação entre a forma da coluna de queda e tamanho da secção.	57
Tabela 17	Coefficientes de arraste para feijão milho e soja, obtidos por três diferentes formas: retirado da curva clássica $CN_R^2 \times N_R$ para corpos esféricos; $C_D = K_2$ , calculado pela equação dada por PETTYJOHN E CHRISTIANSEN (1948) e $C_D = C_{DM}$ , calculado pela Equação dada por MASSARANI (1986).	58
Tabela 18	Coefficiente de arraste de grãos de feijão, milho e soja, observado em colunas de secção circular e também quadrada, com <i>diâmetros*</i> de 60, 50, 40, 30 e 20mm, respectivamente.	59
Tabela 19	Análise de variância do coeficiente de arraste no ar, em coluna de queda para os três produtos (F1) e diferentes formas da secção (F2), observadas com a utilização da coluna de 60 mm de <i>diâmetro*</i> .	62
Tabela 20	Comparação entre os valores médios do coeficiente de arraste para os três produtos e para as diferentes formas da coluna com secção de 60 mm de <i>diâmetro*</i> .	63
Tabela 21	Análise de variância do coeficiente de arraste no ar, em coluna de queda para os três produtos (F1) e diferentes formas da secção (F2), observadas com a utilização da coluna de 50 mm de <i>diâmetro*</i> .	64
Tabela 22	Comparação entre os valores médios do coeficiente de arraste para os três produtos e para as diferentes formas da coluna com secção de 50 mm de <i>diâmetro*</i> .	64
Tabela 23	Valores médios do coeficiente de arraste para a interação entre o fator produto (F1) e o fator forma da secção (F2) para a secção de 50 mm de <i>diâmetro*</i> .	64
Tabela 24	Análise de variância do coeficiente de arraste no ar, em coluna de queda para os três produtos (F1) e diferentes formas da secção (F2), observadas com a utilização da coluna de 40 mm de <i>diâmetro*</i> .	65
Tabela 25	Comparação entre os valores médios do coeficiente de arraste para os três produtos e para as diferentes formas da coluna com secção de 40 mm de <i>diâmetro*</i> .	65
Tabela 26	Valores médios do coeficiente de arraste para a interação entre o fator produto (F1) e o fator forma da secção (F2) para a secção de 40 mm de <i>diâmetro*</i> .	65
Tabela 27	Análise de variância do coeficiente de arraste no ar, em coluna de queda para os três produtos (F1) e diferentes formas da secção (F2), observadas com a utilização da coluna de 30 mm de <i>diâmetro*</i> .	66
Tabela 28	Comparação entre os valores médios do coeficiente de arraste para os três produtos e para as diferentes formas da coluna com	

	secção de 30 mm de <i>diâmetro</i> *.	66
Tabela 29	Valores médios do coeficiente de arraste para a interação entre o fator produto (F1) e o fator forma da secção (F2) para a secção de 30 mm de <i>diâmetro</i> *.	66
Tabela 30	Análise de variância do coeficiente de arraste no ar, em coluna de queda para os três produtos (F1) e diferentes formas da secção (F2), observadas com a utilização da coluna de 20 mm de <i>diâmetro</i> *.	67
Tabela 31	Comparação entre os valores médios do coeficiente de arraste para os três produtos e para as diferentes formas da coluna com secção de 20 mm de <i>diâmetro</i> *.	67
Tabela 32	Valores médios do coeficiente de arraste para a interação entre o fator produto (F1) e o fator forma da secção (F2) para a secção de 20 mm de <i>diâmetro</i> *.	67
Tabela 33	Velocidades terminais e coeficientes de arraste em função da relação $D_p/D_c$ dos grãos de feijão para secção circular e para secção quadrada.	69
Tabela 34	Velocidades terminais e coeficientes de arraste em função da relação $D_p/D_c$ dos grãos de milho para secção circular e para secção quadrada.	70
Tabela 35	Velocidades terminais e coeficientes de arraste em função da relação $D_p/D_c$ dos grãos de soja para secção circular e para secção quadrada.	71

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivos: 1) determinar as características físicas (tamanho, forma, volume, massa específica, porosidade, esfericidade e área projetada) dos grãos de feijão variedade “carioquinha”, milho variedade “pé-de-boi” e soja variedade “Foscarini” e 2) determinar os parâmetros aerodinâmicos: velocidade terminal, coeficiente de arraste e efeito de parede dos grãos quando submetidos à queda em coluna vertical de secção cilíndrica com diâmetros de 20, 30, 40, 50 e 60 mm e também de secção quadrada com lados de iguais dimensões. Para determinação das características físicas foram utilizados os métodos descritos por MOHSENIN (1978) e para determinação dos parâmetros aerodinâmicos foi construído um equipamento composto por ventilador de ciclo contínuo, com potência de 1 hp; 3.600 rpm e um terminal para substituição das colunas de queda verticais, todas com 1m de altura em que a velocidade terminal era medida com o auxílio de um anemômetro. Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que: a) nenhuma das equações citadas na literatura oferece boa aproximação aos dados experimentais da velocidade terminal obtidas para feijão e milho; b) a equação citada por Mohsenin oferece uma boa aproximação dos dados experimentais de velocidade terminal para soja; c) a equação dada por Massarani é a que mais se aproxima dos valores experimentais de feijão e milho, mas reduz muito as diferenças relativas entre as velocidades dos diferentes tipos de grãos e por isto seu uso é inadequado para fins de seleção e demais fases de processamento que solicitem precisão; d) a velocidade terminal em queda livre foi conseguida apenas na coluna de secção quadrada de 60 mm de diâmetro para feijão e soja; e) para os parâmetros estudados não se pode afirmar que tenha se obtido velocidade terminal do milho em queda livre sendo evidenciado o efeito de parede, inclusive para a determinação da velocidade terminal na coluna de secção quadrada de 60 mm; f) entre todas as colunas testadas, para todos o tamanhos e tipos de grãos, obteve-se maior velocidade terminal com a coluna de secção quadrada; g) existe uma tendência à estabilização do coeficiente de arraste de todos os produtos a partir da dimensão de 50 mm, principalmente na secção quadrada e mais particularmente para a soja; h) apenas para soja obteve-se coeficiente de arraste (0,42) típico do regime de Newton, muito próximo do  $C_D$  para esfera (0,44) nessa região de transporte; i) o grão de milho, quando submetido a fluxo de ar em colunas cuja relação  $\beta$  ( $D_T/D_C$ )  $\geq 0,3520$ , muda sua orientação, passando a adotar uma posição cuja menor área projetada permanece perpendicular à direção do fluxo; j) para se obter a velocidade terminal em queda livre de produtos com fator de esfericidade na faixa estudada (0,60 a 0,9) o valor de  $\beta$  deve ser menor do que 0,1173; k) as cartas existentes na literatura para o cálculo do coeficiente de arraste feito com base nas características físicas, atribuem coeficientes de arraste típicos da região transiente com alguns deles na região de Stokes. Porém, tem-se para esses produtos valores de velocidades bem superiores a  $1\text{ m s}^{-1}$ ; l) as equações e cartas existentes na literatura para expressar o transporte de partículas não são adequadas ao estudo de transporte e seleção de grãos.

**PALAVRAS-CHAVE:** velocidade terminal, características físicas, características aerodinâmicas.

## SUMMARY

The present work had as objectives: 1) to determine the physical characteristics (size, form, volume, density, porosity, sphericity and projected area) of the grains of bean variety "carioquinha", corn variety "pé-de-boi" and soybean variety "Foscarini" and 2) to determine the aerodynamic parameters: terminal speed, drag coefficient and effect of wall of the grains submitted to the fall in vertical column of cylindrical section with diameter of 20, 30, 40, 50 and 60 mm and also of square section with sides of same dimensions. For determination of the physical characteristics the methods described by MOHSENIN (1978) were used and for determination of the aerodynamic parameters an equipment was built composed by fan of continuous cycle, motor with 1 hp of potency, 3600 rpm and a terminal for substitution of the vertical fall columns, all with 1m of height, where the terminal speed was measured with an anemometer. According the results obtained it was concluded that: a) none of the equations mentioned in the literature offers good approach to the experimental data of the terminal speed obtained for bean and corn; b) the equation mentioned by Mohsenin offers a good approach of the experimental data of terminal speed for soybean; c) the equation given by Massarani is the one that more approaches of the experimental values of bean and corn, but it reduces the relative differences among the speeds of the different types of grains and for this reason to use it is inadequate for selection finality and other processing phases that request precision; d) the terminal speed in free fall was obtained in the column of square section of 60 mm of diameter for bean and soybean; e) for the studied parameters it cannot affirm that the terminal speed of the corn in free fall was reached, being evidenced the wall effect, including for the determination of the terminal speed in the column of square section of 60 mm; f) among all the tested columns, for all the sizes and types of grains, it was obtained larger terminal speed with the column of square section; g) there is a stabilization tendency of the drag coefficient of all the products starting from the dimensions of 50 mm, mainly in the square section and more particularly for the soybean; h) only for soybean it was obtained drag coefficient (0.42) typical of Newton's regime, very close of the  $C_D$  for sphere (0.44) in that transport area; i) the corn grain, when submitted to flow of air in columns whose relationship  $(D_p/D_c) \geq 0.3520$ , it changes your orientation, starting to adopt a position whose smaller projected area remains perpendicular to the direction of the flow; j) to obtain the terminal speed in fall free from products with sphericity factor in the studied range (0.60 to 0.90) the  $\beta$  value it should be smaller than 0.1173; k) the diagrams in the literature for the calculation of the drag coefficient done base on the physical characteristics, attribute coefficients typical of the transient region, some of them in the Stokes' region. However, for those products there are values very superior to  $1 \text{ m s}^{-1}$ ; l) the equations and existent diagrams in the literature, to express the transport of particles are not appropriate to the transport and selection of grains studies.

**KEYWORDS:** terminal velocity, physical characteristics, aerodynamic characteristics.

## **1. INTRODUÇÃO**

O Brasil, embora tenha evoluído nas últimas décadas de um País essencialmente agrícola para um País com grande ênfase na industrialização, nunca deixou, nesses anos, de desenvolver a sua grande vocação que é de ser um grande produtor e exportador de grãos. Este fato obrigou o País a partir da década de 60, a acompanhar o desenvolvimento tecnológico de modernização da agricultura, ocorrida em todo o mundo, devido a crescente migração da mão de obra do campo para as grandes cidades.

Nessa década iniciou-se a modernização da agricultura com operações unitárias simples como o transporte hidráulico do café, aonde era possível incluir processos de lavagem dos frutos e separação de impurezas. Com a expansão das fronteiras agrícolas na década de 70 e 80, o Brasil saiu de praticamente um grande produtor de café para um País produtor de grãos, onde houve a expansão da produção de grãos de milho, arroz, feijão e soja, chegando, nessa década, a produção de 70 milhões de toneladas, o que implicou na necessidade de operações mais rápidas de transporte e de avanços nos processos de separação e seleção de materiais.

Embora as primeiras pesquisas com transporte pneumático de grãos, segundo VOGT e WHITE (1948), tenham se iniciado no final da década de 40, só na década de 70 esses equipamentos foram colocados no mercado como uma forma moderna de operação de transporte. Nesse mesmo período foram desenvolvidas máquinas operatrizes de seleção de grãos e sementes, utilizando o princípio da velocidade terminal dos grãos.

A velocidade terminal de um produto pode ser determinada experimentalmente, colocando os grãos para flutuar em uma corrente ascendente de ar. A velocidade necessária para o equilíbrio do material no fluxo de ar constante é igual à da velocidade terminal do produto. Os fatores que afetam a velocidade terminal são a massa da partícula e o coeficiente de arrasto, sendo este uma função da forma da partícula.

Para o desenvolvimento dessas máquinas foram necessários exaustivos estudos das propriedades físicas e aerodinâmicas de produtos agrícolas (grãos) e, segundo MOHSENIN (1978), esses estudos tomam como base às equações fundamentais dos fenômenos de transporte, sendo essas equações, adaptadas para formas irregulares com estabelecimento de novas correlações.

De acordo com BRAGA (1997), muitas pesquisas ainda devem ser realizadas para os diferentes produtos ou para as novas variedades que surgem no mercado, uma vez que a aerodinâmica de formas irregulares tem comportamentos particulares, que nem sempre podem ser previstos pelas equações tradicionais de fenômenos de transporte, mesmo com determinados ajustes. Segundo MOHSENIN (1978), estudos aerodinâmicos de grãos agrícolas têm mostrado que esses assumem, a todo instante, orientações aleatórias, giram em torno do eixo vertical e, ainda, que existe tendência de sua maior dimensão movimentar-se na direção do plano horizontal. Esta rotação e inclinação têm sido explicadas como resultado da falta de simetria do grão e, neste caso, a força aerodinâmica que atua no corpo não passa pelo seu centro de gravidade e a sua direção não é paralela à da velocidade do ar. Esta força pode ser considerada equivalente à soma de uma força vertical passando pelo centro de gravidade, uma força horizontal que tende a girar o grão em torno do eixo vertical, e um binário, no plano vertical, que tende a mudar a inclinação do eixo mais longo do grão. De acordo com o mesmo autor, tem-se observado, experimentalmente que, quando os grãos começam a girar em um túnel de vento, eles começam, também, a subir, indo para uma região de menor velocidade; em outras palavras, a rotação causa maior arraste e menor velocidade terminal.

Portanto, dentre as propriedades aerodinâmicas dos produtos, a velocidade terminal da partícula, o coeficiente de arraste e o efeito de parede, onde estão envolvidas as variáveis tais como: diâmetro do duto e o volume do fluido, são estudos de real importância para o bom dimensionamento de máquinas transportadoras. De acordo com (FOX & McDONALD, 1998), o acréscimo de elementos de rugosidade à superfície de um corpo pode suprimir oscilações locais na transição entre o escoamento laminar e o turbulento na camada limite. Essas oscilações podem conduzir a variações de arrasto e a flutuações aleatórias da sustentação de uma partícula.

Portanto diante de tantas variações e complexidade que implicam os sistemas de transporte, torna-se necessário otimizar a Engenharia para empregá-la na produção agrícola. Esta otimização se dá através das novas informações das propriedades físicas e aerodinâmicas que surgem da evolução das ciências agrárias, possibilitando a formulação e a evolução de novos projetos de máquinas e equipamentos, evitando, desta maneira, desperdício do produto desejado.

Contudo, o comportamento de determinados tipos de grãos em sistemas de transporte, bem como o dimensionamento adequado e a sua otimização, ainda são respostas a serem dadas pelos pesquisadores, sendo ainda necessário conhecer em profundidade o comportamento dinâmico desses produtos em sistemas de transporte aerodinâmicos.

Desta forma, o estudo deste trabalho constituiu-se em determinar as propriedades aerodinâmicas dos grãos de feijão variedade “carioquinha”, milho variedade “pé de boi” e soja “Foscarini”, tendo como objetivos:

### **1.1 Objetivos**

- ❖ Determinar as características físicas (tamanho, forma, volume, massa específica, porosidade, esfericidade e área projetada) dos grãos de feijão, milho e soja;
- ❖ Determinar os parâmetros aerodinâmicos: velocidade terminal, coeficiente de arraste e efeito de parede dos grãos quando submetidos à queda em coluna vertical de secção cilíndrica com diâmetro de 20, 30, 40, 50 e 60mm e também de secção quadrada com lados de iguais dimensões.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

O estudo das propriedades físicas de materiais biológicos é um fator de suma importância para o desenvolvimento de projetos de máquinas e equipamentos. Tem-se constatado inúmeras variações que ocorrem nos produtos biológicos, em particular grãos e sementes, devido a estes dependerem de parâmetros variáveis na sua formação, tais como, variedades dos grãos e sementes, clima, fertilidade do solo e práticas agrícolas empregadas, além de outros fatores (CAVALCANTI MATA & FERNANDES FILHO, 1984).

Segundo CAVALCANTI MATA et al. (1986), o conhecimento da forma e tamanho dos grãos são algumas características físicas que devem ser estudadas, pois muitos dos problemas estão associados a este conhecimento, principalmente quando se deseja realizar o projeto de uma máquina específica ou na análise do comportamento de um determinado produto e seu manejo.

Como se sabe, os equipamentos básicos do beneficiamento de sementes são as máquinas de ar e peneiras, utilizadas na limpeza e classificação do produto. Nessa operação é feito o aprimoramento do lote de sementes e a quantidade do trabalho realizado nessa etapa é função da ação de um maior número de máquinas, cujo princípio de funcionamento baseia-se na utilização do maior número possível de características físicas (Wormsbeker et al. citados por VIEIRA et al., (1985)).

### **2.1 Conteúdo de Água**

O conteúdo de água é das características físicas que mais tem influencia nos processos de beneficiamento.

CAVALCANTI MATA e FERNANDES FILHO (1984) verificaram que a influencia de teores de umidade no comprimento, largura e espessura de feijão mulatinho e feijão macassar, obtiveram crescimento linear com o aumento do teor de umidade.

SILVA et al. (2002) estudaram a velocidade terminal de grãos de sorgo e milho em função do seu conteúdo de água observando o aumento da velocidade terminal com a elevação da quantidade de água da massa de grãos verificando que os valores desta propriedade física para os grãos de sorgo foram superiores aos encontrados para o milho e, ainda, que o modelo linear ajustou-se adequadamente aos dados experimentais.

## **2.2 Características Físicas**

### **2.2.1 Tamanho e forma dos grãos**

A agricultura moderna utiliza no processamento de produtos vários métodos mecânicos, térmicos, elétricos, óticos e até mesmo as sonoras. Apesar da aplicação sempre crescente das propriedades desses materiais, pouco se conhece sobre as características físicas básicas. Um conhecimento dessas propriedades pode contribuir com dados importantes e essenciais para a Engenharia, no projeto de máquinas, estruturas, processos e controles na análise e determinação da eficiência de uma máquina ou na sua operação, no desenvolvimento de novos produtos de origem vegetal e na avaliação e retenção da qualidade do produto final (MOHSENIN, 1978).

#### **2.2.1.1 Medida dos diâmetros**

As medidas do comprimento, largura e espessura podem ser determinadas de duas maneiras distintas: com o auxílio de um paquímetro ou fazendo as projeções dos grãos nas três direções.



**Figura 1** – Paquímetro digital

Para projeção dos grãos nas três dimensões é utilizado um retroprojektor, em que o grão a ser estudado é projetado em um papel milimetrado, fazendo uma escala milimétrica com o auxílio de uma régua. Inicialmente com o grão em repouso, obtém-se o diâmetro maior, comprimento (a), em seguida girando-se horizontalmente o grão num ângulo de 90°, obtém-se o diâmetro mínimo, espessura (c) e por fim, girando-se o produto verticalmente num ângulo de 90°, faz-se a projeção da largura (b).

Com as três projeções e conhecendo-se a escala de ampliação, obtém-se os três diâmetros máximos dos grãos da seguinte forma:

$$\text{Diâmetro} = L \times E \quad (1.0)$$

em que,

L = leitura da dimensão feita, m.

E = fator de correção da escala da projeção, adimensional.

### 2.2.1.2 Volume

O volume pode ser determinado pelo método de deslocamento de água descrito pelo MOHSENIN (1978), onde inicialmente o produto é pesado e em seguida mergulhado em um recipiente graduado com água. Desta última pesagem é retirado o peso do recipiente mais a água, restando o peso da água deslocada, o cálculo do volume é dado pela Equação 1.1. O uso do recipiente graduado permite a verificação da variação de volume, possibilitando fazer uma comparação com o resultado obtido através da medida da massa de água deslocada.

$$\text{Volume} = \frac{\text{massa de água deslocada (g)}}{\text{massa específica da água (gcm}^{-3}\text{)}} \quad (1.1)$$

### 2.2.1.3 Massa específica

SASSERON (1980) relata que a massa específica aparente é definida como a relação entre uma certa massa do produto e o volume por ele ocupado, podendo variar conforme seu conteúdo de água, porcentagem de impurezas e porcentagem de sementes quebradas.

O método utilizado para determinar a massa específica é o utilizado para determinar o volume, sendo este determinado pela relação entre a massa do grão no ar e seu volume.

$$\text{massa específica} = \frac{\text{massa do grão}}{\text{volume do grão}} \quad (1.2)$$

Sasseron citado por CORRÊA (2001) observou, dentre as diversas propriedades físicas de produtos agrícolas, que a massa específica aparente e a porosidade sofrem notada influência do percentual e do tamanho de impurezas presentes na massa de grãos, enquanto JAYAS et al. (1991) avaliaram a resistência ao fluxo de ar em camadas de sementes de linho, com diferentes tamanhos e percentuais de impurezas, verificando que o acréscimo de impurezas finas, em um nível de até 5%, resultou em um aumento gradual da massa específica aparente; entretanto, as variações correspondentes à porosidade foram pequenas.

### 2.2.1.4 Esfericidade

CURRAY (1951) conceituou a esfericidade como sendo a proximidade que um material está de uma esfera e propôs duas maneiras para sua determinação, baseado na definição expressa pela seguinte fórmula:

$$\varphi = \frac{d_e}{d_c} 100 \quad (1.3)$$

em que,

$\varphi$  = esfericidade, em porcentagem.

$d_e$  = diâmetro de uma esfera de volume igual ao objeto, m.

$d_c$  = diâmetro de menor circunferência que circunscribe a projeção do objeto em repouso, m.

MOHSENIN (1978), baseado neste conceito teórico propôs dois métodos para determinar a esfericidade:

### Método 1

Considerando o objeto como um elipsóide e sendo o seu volume igual a  $V_{\text{elip}} = 4/3 \cdot \pi \cdot (r_1 \cdot r_2 \cdot r_3)$ , em que  $r_1$  é o maior raio,  $r_2$  é o raio médio e  $r_3$  o menor raio e ainda levando em consideração que  $a = 2 \cdot r_1$ ,  $b = 2 \cdot r_2$  e  $c = 2 \cdot r_3$  tem-se:

$$\varphi = \left[ \frac{\text{Volume do s o lido}}{\text{Volume da esfera circunscrita}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1.4)$$

$$\varphi = \left[ \frac{4/3 \cdot \pi \cdot \left( \frac{a}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{c}{2} \right)}{4/3 \cdot \pi \cdot \left( \frac{a}{2} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}} = \frac{(a \cdot b \cdot c)^{\frac{1}{3}}}{a} \quad (1.5)$$

### Método 2

$$\varphi = \frac{d_i}{d_c} \cdot 100 \quad (1.6)$$

em que

$d_i$  = diâmetro da maior circunferência inscrita na projeção do objeto em repouso, m.

QUENOVILLE (1952) determinou o volume (V) de uma mistura de variedade de milho por meio de uma equação de regressão múltipla, baseado nas determinações de **a**, **b** e **c**, tendo chegado à seguinte expressão:

$$\ln(V) = -6,18 + 0,8 \cdot \ln(a) + 0,71 \cdot \ln(b) + 0,68 \cdot \ln(c) \quad (1.7)$$

Os valores de **a**, **b** e **c** são dados em milímetros (mm). Entretanto, a variação deste volume com o teor de umidade, bem como as dimensões **a**, **b** e **c** correspondente ao comprimento largura e espessura do milho, não foram estudadas pelo autor.

Sabendo-se o volume do produto e sua esfericidade é possível fazer uma consideração sobre que esfericidade pode ser assumida pelo produto e, desta forma, realizar análises como se o produto fosse uma esfera. Um desses empregos pode ser feito nos fenômenos físicos de transferência de calor e massa. Outros autores, entre os quais Almeida e Soares citados por CAVALCANTI MATA (1997), têm preferido para estudar a transferência de calor e massa no processo de secagem o emprego do conceito de transformar o produto estudado em uma esfera equivalente a este produto. Para isso MOHSENIN (1978) sugere que o raio da esfera equivalente em volume ao grão ou semente seja calculado pela equação:

$$r = \frac{\sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}}{2} \quad (1.8)$$

em que

**r**= raio da esfera equivalente de volume igual ao do produto, m.

**a**, **b**, **c**= eixos axiais do produto, m.

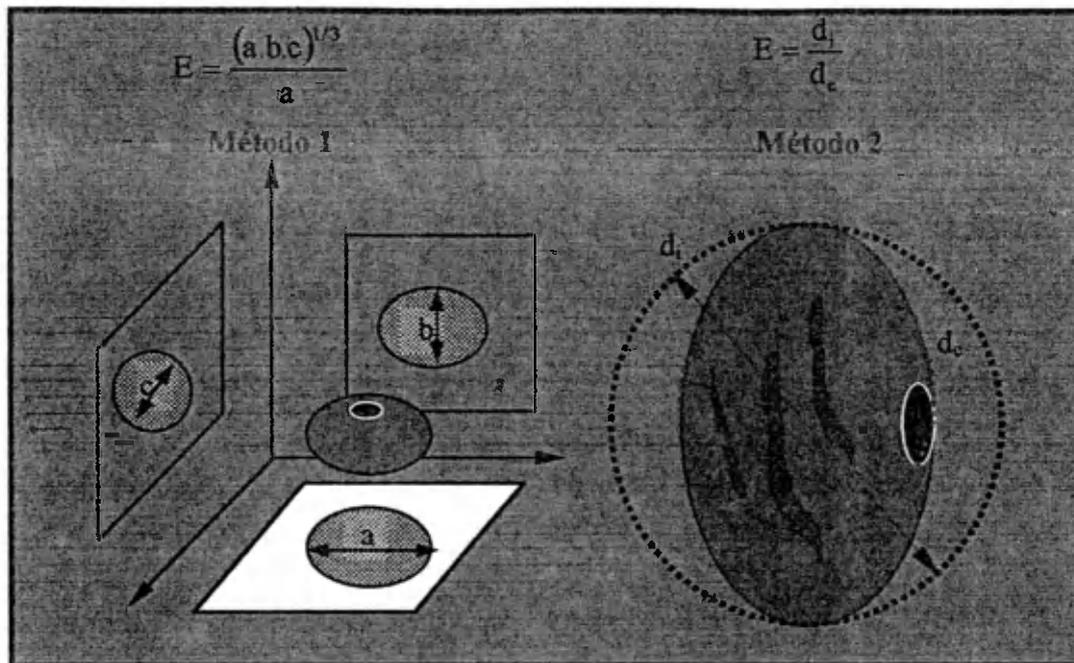


Figura 2 - Métodos de determinação da esfericidade definida para grãos.

### 2.2.1.5 Área Projetada

A área projetada é determinada segundo MOHSENIN (1978) da mesma forma que a medida dos diâmetros.

PORTELLA (2000) determinou a área projetada de grãos de feijão (carioquinha), milho (AG 401) e soja (Foscarini) utilizando um projetor de perfil (NIKON-6C) para transferir e ampliar (10x) o perfil dos grãos testados, para uma tela, de modo que a área pudesse ser calculada com precisão. Onde encontrou valores iguais a 0,299; 0,438 e 0,287 para os grãos de feijão, milho e soja respectivamente; observando que quanto menor a área projetada de uma partícula, menor a velocidade de transporte, uma vez que a velocidade dos grãos de soja foi a menor dentre os grãos testados.

### 2.2.1.6 Porosidade

Segundo SASSERON (1980) a porosidade é definida como a quantidade de espaços vazios, ocupados pelo ar, existente em uma massa de grãos, podendo variar de 30 a 50%, sendo determinada por métodos diretos, volume de líquido acrescentado à massa de grãos e por métodos indiretos, como o uso do picnômetro de comparação a ar. Esta característica é influenciada pelo seu conteúdo de água, pela porcentagem de quebra e de impurezas contidas no lote.

A porosidade também tem importância no estudo da hidrodinâmica, aerodinâmica e transferência de calor, na determinação da capacidade estática, dimensionamento de ventiladores, resistência à passagem de ar, entre outras.

Segundo FRANCISCO (2002) a determinação da porosidade exerce grande influência sobre a pressão do ar que atravessa a massa de grãos, bem como no dimensionamento dos ventiladores dos sistemas de secagem e aeração e na potência dos motores empregados nesses sistemas. A porosidade aumenta principalmente em função do tamanho e forma, em seguida pela umidade e impurezas. Quanto mais esses espaços são preenchido, há uma tendência do peso específico aparente aumentar.

PÊ et al (2003) determinando as características físicas (massa, os três diâmetros mutuamente perpendiculares, volume, massa específica real, diâmetro da esfera equivalente e esfericidade) para grãos de feijão macassar (*Vigna unguiculata* L.) com seis diferentes teores de umidade (63,50%, 55,10%, 28,70, 26,50, 9,96 e 6,10% b.u.), observou que existe uma diminuição dos diâmetros mutuamente perpendiculares (a, b e c) com a diminuição do teor de umidade e que o mesmo acontece com o volume, enquanto que a massa específica não obedece a um comportamento padrão. Os autores consideraram também que não existiu grande alteração da forma do feijão com a diminuição do conteúdo de água, exceto para conteúdo de água de (6,10% b.u.).

TORRES et al. (2003) estudando massa, os três diâmetros mutuamente perpendiculares, volume e massa específica real para sementes de milho retirados de diferentes regiões da espiga verificou que existem diferenças nos tamanhos dos diâmetros

da semente de milho, retirados de diferentes regiões de uma mesma espiga e com mesmo teor de umidade; que não existe diferença de massa específica entre as sementes e o valor médio foi de  $1,29 \text{ g.cm}^{-3}$  e que os fatores de esfericidade das sementes de milho variaram de 0,63 a 0,72, sendo a maior esfericidade obtida para sementes da porção final e a menor para grãos da região intermediária.

## **2.3 Propriedades aerodinâmicas**

### **2.3.1 Transporte aerodinâmico**

O Transporte pneumático refere-se ao movimento de sólidos suspensos em (ou forçado por) um fluxo de gás através de tubos horizontais e/ou verticais. A utilização do fluxo de ar para a movimentação de materiais representa vantagens a este processo se comparado à movimentação mecânica (elevadores, redler, transportador helicoidal, etc.), pois oferece maior segurança ao produto, uma vez que o mesmo é transportado por meio de tubulações, onde o ar como fluido possibilita o seu escoamento até o local desejado.

Por muitos anos, os gases foram usados satisfatoriamente na indústria para transportar uma grande diversidade de sólidos particulados - de farinha a grãos de trigo, e de plástico granulado a carvão. Até bem recentemente, a maioria do transporte pneumático era feita em suspensão diluída usando grandes volumes de ar a alta velocidade.

### **2.3.2 Coeficiente de Arraste**

Sempre que um fluido se move em relação à fronteiras sólidas, ele exerce uma força sobre tais fronteiras, causadas pela distribuição de tensões que se origina da massa fluida e pela influencia de eventuais campos de forças externos que possam estar agindo sobre ela.

Deve-se entender perfeitamente que a força total não é apenas resultante de tensões sobre a superfície sólida do corpo, mas também a resultante dos esforços sobre todas as partículas da massa fluida em escoamento. Por exemplo, num escoamento de deformação originada pelo movimento de um corpo a valores muito baixos do número de Reynolds, a força sobre o corpo é considerada como a reação à força necessária para manter o movimento e esta decorre também de ações que se desenvolvem “bem longe” do corpo (SCHIOZER, 1996).

A força total para manter o escoamento depende de muitos fatores inerentes ao corpo sólido, ao fluido e ao seu estado de movimento, como também da influência de fatores ligados à existência de campos de forças externos. Assim, tamanho, forma, e estado de acabamento entre as fronteiras, viscosidade, massa específica, compressibilidade, gradiente de velocidade, tensão superficial, proximidade de interfaces de separação de fluidos e aceleração da gravidade são fatores que podem interferir no valor daquela força, com maior ou menor intensidade.

No caso de o peso do grão ser igual à força de arraste, em queda livre, a velocidade do grão será constante, adotando o grão sua própria orientação.

As equações para se calcular o arraste são função da área projetada  $A_p$ , normal à direção do movimento, da massa específica do fluido em que a partícula se movimenta  $\rho_f$ , viscosidade  $\mu$ , módulo de elasticidade  $E$  e velocidade  $V$ , considerando-se que o objeto em movimento seja homogêneo.

$$F_D = f(A_p, \rho_f, \mu, E, V) \quad (1.10)$$

ou

$$F_r = \frac{1}{2} C_D A_p \rho_f V^2 \quad (1.11)$$

em que:

$F_r$  = resistência ao arraste;

$C_D$  = coeficiente de arraste total, adimensional.

$A_p$  = área projetada normal à direção do movimento,  $m^2$ .

$\rho_f$  = massa específica do fluido,  $kg.m^{-3}$ .

$V$  = velocidade terminal,  $m.s^{-1}$ .

As equações seguintes foram obtidas para coeficiente de arraste por atrito para placa plana com escoamento laminar e turbulento respectivamente.

$$C_D = C_f = \frac{1,328}{(N_R)^{0,5}} \quad (1.12)$$

$$C_f = \frac{0,455}{[\log(N_R)]^{2,58}} \quad (1.13)$$

em que,

$N_R$  = número de Reynolds, adimensional.

$$N_R = \frac{VD_p\rho_f}{\mu} \quad (1.14)$$

em que,

$D_p$  = diâmetro da partícula, m.

$\mu$  = viscosidade absoluta do fluido,  $kg.m^{-1}.s^{-1}$ .

$\mu_{H_2O} = 0,001 kg m^{-1}.s^{-1}$ .

$\rho_f$  = massa específica do fluido,  $kg.m^{-3}$ .

A equação para a região de transição onde o escoamento laminar passa a turbulento é dada por:

$$C_f = \frac{0,455}{[\log(N_R)]^{2,58}} - \frac{1700}{N_R} \quad (1.15)$$

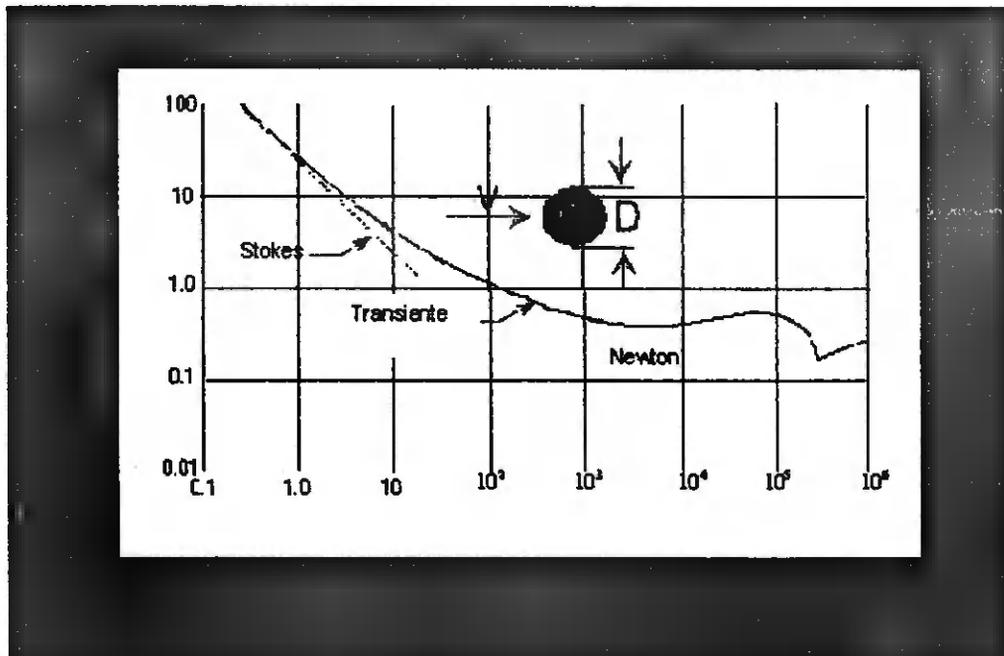


Figura 3 – Coeficiente de arraste para partículas com formas geométricas regulares. Reproduzidas a partir de VENNARD, 1961.

### 2.3.3 Transporte de partículas esféricas

O arraste por atrito, geralmente pode ser desprezado no caso de um objeto esférico ser colocado em um fluido em movimento por causa da pequena área da superfície sobre a qual os efeitos do atrito podem agir, mas isso não vale quando o escoamento ocorre com números de Reynolds muito baixo, onde é aplicada a lei de Navier Stokes. Esse provou que para  $N_R < 1$ , quando as forças inerciais podem ser desprezadas, considerando-se apenas forças viscosas, o escoamento se fecha atrás do objeto esférico e o arraste é composto principalmente do arraste por atrito. Para uma esfera de diâmetro  $D_p$ , movendo-se numa velocidade  $V$  através de um fluido de viscosidade  $\mu$ , a Lei de Stokes da força de arraste é dada por:

$$F_D = 3 \pi \mu V d_p \quad (1.16)$$

e o coeficiente de arraste, levando-se em consideração a área da máxima seção normal ao escoamento, dada por:

$$C_D = \frac{24}{N_R} \quad (1.17)$$

Com o número de Reynolds definido em relação ao diâmetro da esfera.

O método de resolução de Stokes é considerado correto ao se compararem seus resultados com os ensaios experimentais, até valores de número de Reynolds menores que a unidade. Para valores maiores, não existe concordância; isso se atribui ao fato de as equações de distribuição de velocidade não serem válidas para grandes distâncias da esfera. Conclui-se, daí, que os termos inerciais não-lineares das equações do movimento não podem ser desprezados em tais circunstâncias.

Um método mais preciso, desenvolvido por Ossen, citado por SCHIOZER (1996), levou em consideração os efeitos inerciais e, nesse caso, o coeficiente de arraste fica definido como:

$$C_D = \frac{24}{N_R} \left( 1 + \frac{3}{16} N_R \right) \quad (1.18)$$

Quando  $N_R$  é muito pequeno, a equação 1.17 se reduz à equação de Stokes (Equação 1.16). A solução de Ossen conduz a valores mais próximos dos resultados experimentais, e é válida para  $N_R \leq 2$ . Acima deste valor, nenhum dos dois métodos conduz a resultados satisfatórios.

Várias soluções empíricas para explicar os efeitos viscosos e inerciais surgiram posteriormente.

Allen citado por GOVIER (1972)

$$C_D = \frac{30}{N_R^{0,625}}, \text{ válida para } 1 < N_R < 10^3 \quad (1.19)$$

e

$$C_D = \frac{18,5}{N_R^{0,6}}, \text{ válida para } 2 < N_R < 500 \quad (1.20)$$

O coeficiente de arraste é aproximadamente constante na faixa onde há predominância de efeitos inerciais onde a força de resistência que atua sobre a esfera é aproximadamente proporcional ao quadrado da velocidade do fluido que escoar em torno da esfera. Esse passa a ser dado por:

$$C_D \cong 0,44, \text{ valida para } 5 \times 10^2 < N_R < 2 \times 10^5 \quad (1.21)$$

### 2.3.4 Fluidos Newtonianos e partículas não esféricas

As relações obtidas para partículas esféricas foram modificadas para não esféricas correlacionando fatores como esfericidade. Deste modo a velocidade terminal de uma partícula esférica isométrica isolada, em regime de Stokes, é dada pela equação seguinte:

$$V_t = \frac{k_1 g (\rho_s - \rho) D_p^2}{18 \mu} \quad (1.22)$$

em que,

$k_1$  = função empírica da esfericidade  $\varphi$ , e é dada por:

$$k_1 = 0,843 \log \left[ \frac{\varphi}{0,065} \right] \quad (1.23)$$

onde a esfericidade  $\varphi$  é dada por:

$$\varphi = \frac{\pi D_p}{\text{área superficial da partícula}} \quad (1.24)$$

Em escoamentos turbulentos, onde há predominância de efeitos inerciais ( $N_R > 10^3$ ), a velocidade terminal é dada por:

$$V_t = \left[ \frac{4 g (\rho_p - \rho_f) D_p}{3 \rho_f k_2} \right] \quad (1.25)$$

em que,

$$k_2 = 5,31 - 4,88\varphi \quad (1.26)$$

Existem ainda, as seguintes equações para o coeficiente de arraste:

$$C_D = \frac{24}{k_1 N_R}, \text{ válida para } N_R < 0,1 \quad (1.27)$$

e

$$C_D = k_2, \text{ válida para } N_R > 10^3 \quad (1.28)$$

Alguns autores apresentaram resultados para partículas não esféricas. Segundo MOHSENIN (1978), na Tabela 1 encontram-se as equações comparativas para esferas e outros objetos de geometria regulares.

Massarani citado por BRAGA (1997) relata que utilizando os resultados experimentais obtidos por Petty John e Christiansen e o método proposto por Churchill, para correlacionar dados experimentais, obteve uma correlação válida em todos os regimes de escoamento. Tal correlação é dada por:

$$C_D = \left[ \left( \frac{24}{k_1 N_R} \right)^m + k_2^m \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.29)$$

onde,  $k_1$  e  $k_2$  são funções da esfericidade desenvolvidas por PETTY JOHN e CHRISTIANSEN (1948) e que também é função de  $\phi$ , foi ajustado com partículas na faixa de  $0,6 \leq \phi \leq 1,0$  sendo:

$$m = 0,9 \quad \text{para} \quad 0,6 \leq \phi \leq 0,9$$

$$m = 3,15 - 2,50\phi \quad \text{para} \quad 0,9 \leq \phi \leq 1,0$$

### 2.3.5 Velocidade Terminal

Segundo SRIVASTAVA et al. (1993), o tamanho e a massa do grão são os parâmetros mais importantes na limpeza, sendo o fluxo de ar intimamente influenciado pela massa. Para o desenvolvimento adequado das máquinas de limpeza, é importante conhecer as características aerodinâmicas, como velocidade terminal e coeficiente de arraste, dos produtos a serem separados.

Na separação dos grãos dos materiais estranhos contidos em um lote, é fundamental o conhecimento da velocidade terminal de cada um dos constituintes da mistura. De acordo com MOHSENIN (1978), uma partícula em queda livre, em um fluxo de ar ascendente, atingirá a velocidade terminal quando a força gravitacional ( $F_g$ ), sendo  $F_g = \text{peso} - \text{força de empuxo}$ , se igualar à força de resistência de arraste ( $F_r$ ). A velocidade terminal pode ser, então, calculada por meio da expressão:

$$m_p g \left[ \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} \right] = \frac{1}{2} C A_p \rho_f V_t^2 \quad (\text{I.30})$$

ou

$$V_t = \left[ \frac{2W(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p \rho_f A_p C} \right]^{0,5} \quad (1.31)$$

e

$$C_D = \frac{2W(\rho_p - \rho_f)}{V_t^2 A_p \rho_p \rho_f} \quad (1.32)$$

em que:

 $V_t$  = velocidade terminal,  $\text{ms}^{-1}$ . $m_p$  = massa da partícula, kg. $g$  = aceleração gravitacional,  $\text{ms}^{-2}$ . $W_p$  = peso da partícula, N. $\rho_p$  = massa específica da partícula,  $\text{kgm}^{-3}$ . $\rho_f$  = massa específica do ar,  $\text{kgm}^{-3}$ . $C$  = coeficiente de arrasto, adimensional. $A_p$  = área projetada da partícula, normal ao seu movimento em direção ao fluido,  $\text{m}^2$ .

Através do conhecimento de velocidade terminal, Tiwari, citado por MOHSENIN (1978), empregou os princípios aerodinâmicos para investigar as possibilidades de separação pneumática de feijões de amostras de debulhas que continham materiais indesejáveis, como feijões danificados, pedras, folhas, talos, raízes, etc. Materiais como

folhas, talos e raízes foram completamente separados com aplicação de um fluxo de ar com velocidade em torno de 6,4 m/s. Para as separações de feijões bons e pedras, foram necessárias velocidades na faixa de 7,9 a 24,4 m/s. Essa variação foi considerada insatisfatória para a separação, sendo sugerido um separador baseado em uma combinação de princípios pneumáticos e outros mecanismos de separação.

A velocidade terminal de um produto pode ser determinada experimentalmente, colocando os materiais (grãos ou impurezas) para flutuar em uma corrente ascendente de ar. A velocidade necessária para o equilíbrio do material no fluxo de ar constante é igual à velocidade terminal do produto. Os fatores que afetam a velocidade terminal são a massa da partícula e o coeficiente de arraste, sendo esse uma função da forma da partícula.

Conforme Bilanski e Fortes, citados por PINHEIRO (1975), as principais fontes de erro na determinação experimental da velocidade terminal são: a rotação da partícula em torno do seu eixo, a forma irregular do corpo, o processo inadequado de medição e leitura da velocidade do fluxo e o escoamento turbulento do ar. DE BAERDEMAEKER e SEGERLIND (1974), determinando as propriedades aerodinâmicas de morangos (em diferentes estágios de maturidade), mencionaram também que as principais dificuldades observadas durante os testes foram à rotação do morango em torno dele mesmo e a sua forma irregular, que dificultaram a manutenção da flutuação estável.

Para corpos esféricos, de diâmetro  $D_p$ , substituindo  $A_p = \frac{\pi}{4} D_p^2$  e  $W = \frac{\pi}{6} \rho_p g D_p^3$ , podemos expressar a velocidade terminal como sendo:

$$V_t = \left[ \frac{4 g D_p (\rho_p - \rho_f)}{3 \rho_f C_D} \right]^{0.5} \quad (1.33)$$

Para condições de corrente laminar, os coeficientes de arraste são calculados como na Equação 1.17 e utilizando-se essa equação na Equação 1.33, tem-se:

$$V_t = \frac{g D_p^2 (\rho_p - \rho_f)}{18\mu} \quad (1.34)$$

Segundo Lapple, citado por MOHSENIN (1978), para  $N_R = 2$ , a equação 1.17 nos dá uma boa aproximação do coeficiente de arraste. Para Reynolds maiores que 2 os valores dos coeficientes de arraste podem ser encontrados na Figura 5 - Coeficientes de arraste para partículas com formas geométricas retangulares.

Para condições de corrente turbulenta, numa região onde  $10^3 < N_R < 2 \times 10^5$  o coeficiente de arraste é aproximadamente igual a 0,44 e através da seguinte equação pode-se calcular a velocidade terminal (LAPLLE, 1956).

$$V_t = 1,74 \left[ \frac{g D_p (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0,5} \quad (1.35)$$

Numa região intermediária, em que  $10^2 < N_R < 10^3$ , o coeficiente de arraste é dado por:

$$C_D = \frac{18,5}{(N_R)^{0,6}} \quad (1.36)$$

e a velocidade terminal é dada por:

$$V_t = \frac{0,153 g^{0,714} D_p^{0,142} (\rho_p - \rho_f)^{0,714}}{\rho_f^{0,286} \mu^{0,428}} \quad (1.37)$$

### 2.3.6 Velocidade terminal para partículas não esféricas

Na Tabela 1 encontram-se as equações de movimento de esfera, disco e cilindros circulares.

Tabela 1 – Resumo comparativo de equações de movimento de esfera, discos e cilindros circulares.

	Esfera (direção do escoamento)	Disco fino (normal à superfície)	Disco fino (paralelo à face)	Cilindro circular infinito (normal ao eixo)
N. de Reynolds	$\frac{D_p v \rho_f}{\mu}$	$\frac{D_p v \rho_f}{\mu}$	$\frac{2L v \rho_f}{\mu}$	$\frac{D_p v \rho_f}{\mu}$
Área frontal	$\left(\frac{\pi}{4}\right) D_p^2$	$\left(\frac{\pi}{4}\right) D_p^2$	$(D_p)L$	$(D_p)L$
Massa $m_p$	$\rho_p \left(\frac{\pi}{6}\right) D_p^3$	$\rho_p \left(\frac{\pi}{4}\right) D_p^2 L$	$\rho_p \left(\frac{\pi}{4}\right) D_p^2 L$	$\rho_p \left(\frac{\pi}{4}\right) D_p^2 L$
<b>Arraste laminar</b>				
$N_R \leq 0,2$	$3\pi \mu v D_p$	$8 \mu v D_p$	$\left(\frac{16}{3}\right) \mu v D_p$	$\left(\frac{4\pi}{K}\right) \mu v L$
$F_D = C_D N_R$	24	$\frac{64}{\pi}$	$\frac{64}{3}$	$\frac{8\pi}{K}$
<b>Esc. Turbulento</b>				
$C_D$ (médio)	0,44	1,12	-	1,2
$N_R$ (intervalo)	$10^3 - 2 \times 10^5$	$> 1000$	-	$10^2 - 2 \times 10^5$
Vel. Terminal $V_t$	$\frac{4gD_p(\rho_p - \rho_f)}{3C_{Df}}$	$\frac{2gL(\rho_p - \rho_f)}{C_{Df}}$	$\frac{gD_p\pi(\rho_p - \rho_f)}{2C_{Df}}$	$\frac{gD_p\pi(\rho_p - \rho_f)}{2C_{Df}}$

L = Espessura de disco, altura do cilindro ou altura do prato plano ao longo da direção do escoamento ou movimento.

$$K = 2,002 \ln(N_R)$$

Poucos trabalhos apresentam resultados satisfatórios para partículas de formas irregulares, as quais são particularmente complicados, pelo fato de suas orientações serem aleatórias e pela variedade de métodos para expressar seus tamanhos e dimensões serem usados no cálculo do número de Reynolds, e área frontal. Schiller citado por MOHSENIN (1978), apresentou dados sobre coeficientes de arraste em termos de número de Reynolds, para algumas partículas irregulares. Sua apresentação gráfica é baseada em trabalhos de muitos pesquisadores, usando materiais como grãos de areia, cascalho e carvão de pedra com formas não bem definidas geometricamente como esferas e cubos.

Os coeficientes de arraste e o número de Reynolds foram obtidos pela determinação da velocidade de sustentação da partícula experimental sob queda livre ao ar, parafina líquida e água.

Para numero de Reynolds maior que 50 o coeficiente de arraste resultará num erro considerável. Por isto, uma tentativa deveria ser feita para obter uma estimativa mais segura do numero de Reynolds, assumindo formas diferentes de esfera e determinando o coeficiente de arraste e a velocidade terminal.

O cálculo da velocidade terminal através do número de Reynolds e do coeficiente de arraste nos dá uma solução incorreta à tentativa. Para eliminar a solução desta maneira, os termos  $CN_R^2$  ou  $\frac{C}{N_R}$  são calculados e plotados em oposição a  $N_R$ .

Para partículas esféricas, tem-se as equações:

$$CN_R^2 = \frac{4g\rho_f D_p^2 (\rho_p - \rho_f)}{3\mu^2} \quad (1.38)$$

e

$$\frac{C_D}{N_R} = \frac{4g\mu(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f^2 V_t^3} \quad (1.39)$$

que são obtidas pela combinação das Equações 1.14 e 1.33. Se as Equações 1.32 e 1.14 são combinadas, o termo  $CN_R^2$  não incluirá  $D_p$ , mas necessitará do conhecimento do peso e da massa específica do objeto.

$$CN_R^2 = \frac{8 W \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{\pi \mu^2 \rho_p} \quad (1.40)$$

Foram feitos gráficos de  $CN_R^2$  em função de  $Re$  para objetos esféricos e seus valores foram tabeladas por LAPPLE (1956) e HENDERSON e PERRY (1952).

### 2.3.7 Velocidade Terminal por tempo e deslocamento

Da relação entre tempo e deslocamento de uma partícula, podemos obter sua velocidade terminal pela resolução de uma equação diferencial do movimento mostrada a seguir.

Na queda livre de um objeto em ar parado, a força sobre o mesmo é a diferença entre a força da gravidade,  $m \cdot g$  e a força de arraste  $kV^2$  dada pela Equação 1.11. esta força também é igual a  $m \frac{dV}{dt}$ . Deste princípio básico a equação de movimento é obtida através da seguinte equação diferencial:

$$m \frac{dV}{dt} = mg - kV^2 \quad (1.41)$$

ou

$$\frac{dV}{dt} = g \left( 1 - \frac{k}{mg} V^2 \right) \quad (1.42)$$

onde  $k = \frac{1}{2} C_D A \rho_f$  e  $\frac{k}{mg} = a^2$

Integrando, temos:

$$\int \frac{dV}{(1-a^2V^2)} = g \int dt \quad (1.43)$$

onde,

$$\frac{1}{2a} \ln \frac{1+aV}{1-aV} = gt + c \quad (1.44)$$

Para as condições iniciais  $t = 0$ ,  $V = 0$ ,  $c = 0$ , a expressão integrada simplifica então para:

$$\frac{1+aV}{1-aV} = e^{2agt} \quad (1.45)$$

ou

$$V = \left( \frac{1}{a} \right) \left( \frac{e^{2agt} - 1}{e^{2agt} + 1} \right) \quad (1.46)$$

ou

$$V = \frac{ds}{dt} = \frac{1}{a} \left( \frac{e^{agt} - e^{-agt}}{e^{agt} + e^{-agt}} \right) = \frac{1}{a} (\tanh(h) agt) \quad (1.47)$$

ou

$$ds = \frac{1}{a(ag)} \tanh agt (ag dt) \quad (1.48)$$

onde  $s$  e  $t$  são respectivamente deslocamento e tempo. Integrando a equação 1.48, temos:

$$s = \frac{1}{a^2g} \ln \cosh agt + c_2 \quad (1.49)$$

com as condições iniciais,  $t = 0$ ,  $s = 0$  e, então,  $c_2 = 0$ .

Em aplicações aerodinâmicas, onde o fluido usado é o ar e a densidade do ar,  $\rho_f$  é bastante pequena em relação a densidade do produto, a massa específica do ar pode ser considerada nula e a Equação 1.29 pode ser escrita de forma simplificada como:

$$V_t = \left[ \frac{2W}{\rho_f A C} \right]^{0.5} \quad (1.50)$$

Combinando a Equação 1.30 com a expressão  $k = \frac{1}{2} C A \rho_f a^2$  na Equação 1.49 pode ser avaliado da seguinte forma:

$$V_t = \left[ \frac{W}{\frac{1}{2} C A \rho_f} \right]^{0.5} = \left[ \frac{W}{k} \right]^{0.5} \quad (1.51)$$

ou

$$k = \frac{W}{V_t^2} \quad (1.52)$$

então

$$a^2 = \frac{k}{mg} = \frac{\frac{W}{V_t^2}}{mg} = \frac{1}{V_t^2} \quad (1.53)$$

Substituindo os valores de  $a^2$  na Equação 1.49, a relação entre deslocamento, tempo, e velocidade terminal para objetos consideravelmente mais pesados que ar será como segue:

$$s = \frac{V_t^2}{g} \ln \cosh \frac{g}{V_t} t \quad (1.54)$$

Para determinar velocidade terminal,  $V_t$ , dados experimentais no tempo certo contra a distância de queda livre do objeto foi plotada para obter uma curva de tempo-deslocamento. Se a altura de queda for suficiente para o objeto alcançar sua velocidade terminal, a curva de tempo-deslocamento fica linear quando tal velocidade é atingida. Nesses casos, a inclinação da porção reta da curva pode ser tida como a velocidade terminal e a Equação 1.54 pode ser usada para calcular a velocidade terminal em dada curva tempo-deslocamento.

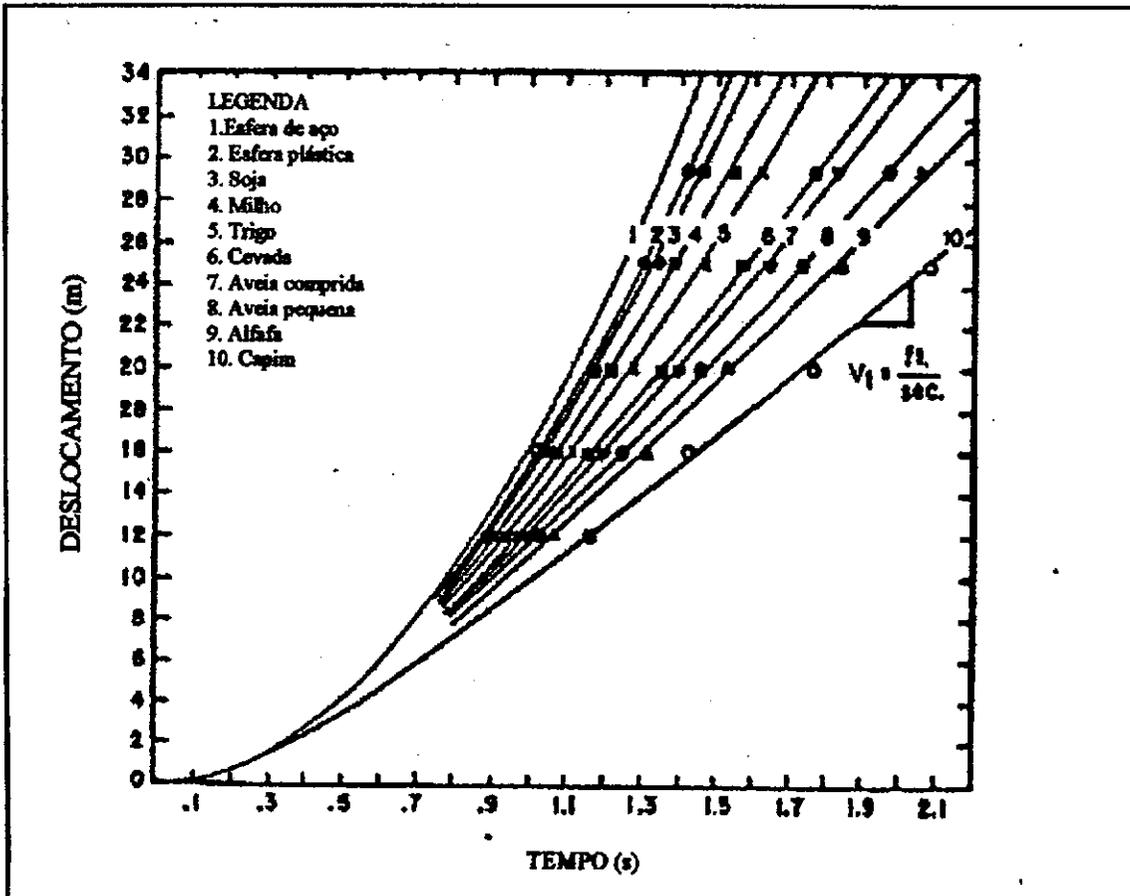


Figura 4 – Curvas tempo-deslocamento para grãos esféricos e sementes agrícolas (BILANSKI et al., 1962).

Para validar a Equação 1.53 BILANSKI et al. (1962), mediu o tempo de queda de vários grãos através do ar parado de velocidade 0. Os dados encontrados para os diversos grãos são mostrados na Tabela 2 e como se pode observar, os dados obtidos experimentalmente de cada curva tempo-deslocamento mostrados na (Figura 4 – Curvas tempo-deslocamento para grãos esféricos e sementes agrícolas (BILANSKI et al., 1962.) acompanham de forma muito aproximada da curva teórica obtida pela Equação 1.53. A velocidade terminal atual para cada grão era obtida do declive da porção linear da curva plotada para os grãos. Quando esta velocidade terminal era inserida na Equação 1.53, uma função da velocidade era produzida quase sem erros.

Para mostrar a validade da Equação 1.53 BILANSKI *et al.*, (1962), mediu o tempo de queda de vários grãos agrícolas através do ar parado de velocidade zero. O aparelho consistia de um tubo de armazenamento de 2 pés de diâmetro, um tubo de vidro graduado,

um circuito com uma foto-célula “timer-starter”, um prato de disparo e um microfone como um regulador de parada, e um cronômetro eletrônico. Os dados produzidos para os diversos grãos são mostrados na Tabela 2. Como se pode ver, os dados obtidos experimentalmente de cada curva tempo-deslocamento acompanham de forma muito aproximada a curva teórica obtida com Equação 1.53. A velocidade terminal atual para cada grão era obtida do declive da porção linear da curva plotada para aquele grão. Quando esta velocidade terminal era inserida na Equação 1.28, uma função da velocidade era produzida quase sem erros. Nenhuma parada brusca foi observada no comportamento, bem como, nenhuma queda de sua velocidade terminal para o peso de incidência (baixa) avaliado. Daí o número de Reynolds e o coeficiente de atrito eram calculados pelas Equações 1.50 e

$$N_R = \frac{V D_p \rho_f}{\mu} \text{ e } C_D = \frac{2 W (\rho_p - \rho_f)}{V_t^2 A_p \rho_f \rho_p} \text{ respectivamente.}$$

As áreas para o cálculo do coeficiente de atrito eram as duas dimensões máximas  $L_1$  e  $L_2$  usada na expressão:

$$A_p = \frac{\pi}{4} L_1 L_2 \quad (1.55)$$

O diâmetro utilizado para o cálculo do número de Reynolds, era a média de três dimensões lineares mutuamente perpendiculares. A Tabela 2 apresenta as medidas físicas e características aerodinâmicas dos grãos testados.

Tabela 2 - Propriedades aerodinâmicas de sementes e grãos (BILANSKI et al., 1962)

	Comprimento (x 10 <sup>2</sup> pés)	Diâmetro (x 10 <sup>2</sup> pés)	Peso (x 10 <sup>4</sup> lb)	Velocidade terminal (pés/s)	CA <sub>p</sub> (x 10 <sup>2</sup> pés <sup>2</sup> )	C	N <sub>R</sub> N <sub>R</sub> x 10 <sup>-2</sup>
Alfafa	0,77	0,47	0,053	17,9	0,141	0,50	6,01
Capim	1,42	0,74	0,118	15,3	0,432	0,52	8,36
Trigo	2,28	1,10	1,00	29,5	0,99	0,50	27,2
Cevada	2,89	1,05	0,73	23,0	1,18	0,50	22,8
Aveia pequena	3,15	0,8	0,40	19,3	0,93	0,47	19,0
Aveia comprida	4,01	0,92	0,74	20,8	1,47	0,51	24,8
Milho	3,82	2,63	6,30	34,9	4,44	0,56	57,7
Soja	2,55	2,22	4,54	44,3	1,98	0,45	62,8
Esferas plásticas	3,12	3,12	11,6	55,0	3,30	0,43	108,5

### 2.3.8 Efeito de parede

A equação de Faxen e Emerslebem, para queda livre de esfera ao longo do eixo de um tubo de diâmetro  $D_t$ , foi indicada por MASSARANI (1986), para uso quando a velocidade terminal de partículas esféricas, em regime de Stokes, é afetada por fronteiras rígidas.

$$k_p = \frac{v_t}{v_{t\infty}} = \frac{1}{1 + 2,10\beta} \quad (1.56)$$

em que:

$k_p$  = critério que analisa o efeito de parede, adimensional.

$\beta$  = relação  $\frac{d_p}{d_e}$  (diâmetro da partícula, diâmetro do tubo), adimensional.

A Equação 1.56 só é válida se  $\beta < 0,05$ . A velocidade terminal da partícula isolada  $V_{t\infty}$  encontrada na Equação 1.56 é dada por:

$$V_{t\infty} = \frac{g(\rho_p - \rho_f)D_p^2}{18\mu} \quad (1.57)$$

Para situações fora do regime de Stokes e condições em que  $\beta > 0,05$ , Massarani apresentou correlações empíricas que se encontram na Tabela 3.

Segundo o autor a relação entre diâmetro do tubo e diâmetro da partícula, para que o efeito de parede não se faça sentir, dentro do critério  $K_p \geq 0,99$ , deve ser superior a 200 no regime de Stokes (condições em que  $N_R < 1$  e apenas 4 no regime de Newton, ou seja condições em que  $N_R > 1000$ ). Sendo assim, a influencia da parede, afirma o autor, se faz sentir de modo particular agudo quando prevalece o regime de Stokes.

Tabela 3 – Efeito de parede na queda livre de uma esfera de diâmetro  $D_p$  ao longo do eixo de um tubo da coluna  $D_c$  (MASSARANI, 1990).

Validade		Efeito de Parede
$N_R \infty$	$\beta = \frac{D_p}{D_c}$	$K_p = \frac{v_t}{v_{t\infty}}$
$< 0,5$	$< 0,8$	$K_{p1} = \frac{1,25}{[1 + 0,25 \exp(6,51\beta)]}$
$> 10^3$	-	$K_{p2} = \frac{(1 - \beta^2)}{(1 + \beta^4)^{\frac{1}{2}}}$
-	$< 0,8$	$K_{p3} = \frac{\left\{ \left[ K_{p1} \frac{C_D N_R^2}{24} \right]^{\frac{6}{5}} + \left[ K_{p2} \left( \frac{C_D N_R^2}{0,44} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{6}{5}} \right\}^{\frac{5}{6}}}{20,52 \left\{ \left[ 1 + 0,0921 (C_D N_R^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}^2}$

O efeito de esferas em tubos cilíndricos, a altos números de Reynolds, foi estudado por UHLHERR e CHHABRA (1995). Para este estudo eles usaram esferas de PVC, aço, nylon, poliestireno, chumbo e vidro com massa específica variando de 1,049 a 11,913 kg/m<sup>3</sup> e diâmetro de 1,59 a 19,05 mm, onde mediu velocidade terminal, coeficiente de arraste e número de Reynolds. O efeito de parede foi medido em termos de  $K_p$ , definido como a razão entre as velocidades terminais:

$$k_p = \frac{v_t}{v_{t\infty}} \quad (1.58)$$

Onde  $v_t$  é a velocidade terminal de uma esfera de diâmetro  $D_p$ , em um meio infinito e  $v_m$  é a velocidade terminal da mesma esfera, medida no eixo de uma coluna cilíndrica de diâmetro  $D_c$ . Na Tabela 3, encontram-se as expressões utilizadas pelos autores para o cálculo do efeito de parede.

ATAÍDE et al. (1996), investigaram a influencia da parede de um duto cilíndrico na velocidade terminal de partículas esféricas. Para este estudo eles confeccionaram esferas de aço, PVC, teflon e latão e utilizaram um fluido não-Newtoniano. As determinações experimentais foram conduzidas em quatro tubos cilíndricos, com diâmetros internos distintos, onde as partículas eram abandonadas no centro do tubo e o tempo de queda era determinado através de quatro cronômetros digitais acionados por fotocélulas (Muccillo – 8800), com precisão de 1 milésimo de segundo. Os autores concluíram que o efeito de parede do duto cilíndrico influencia bastante na velocidade terminal de queda dos sólidos, na solução estudada.

A influencia do diâmetro característico da partícula e do diâmetro intero do duto no efeito de parede foi determinado através da seguinte equação:

$$k_p = \frac{v_t}{v_{t\infty}} = 1 - a \left( \frac{D_p}{D_c} \right) \quad (1.59)$$

Os valores da inclinação ( $\alpha$ ) da Equação 1.59, obtidas dos ajustes dos dados experimentais encontram-se de forma sumária na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da inclinação dos gráficos de  $k_p$  em função de  $\frac{D_p}{D_c}$  para a geometria esférica.

Forma do Sólido	Valor da inclinação ( $\alpha$ )	Faixa de $D^* = \frac{D_p}{D}$	Da literatura e Referenci
esfera	0,6916	$0,12 \leq D^* \leq 0,26$	0,93 SHRAMA E CHHABRA (1991)

Fonte: ATAIDE (1996)

BENEDETTI (1992), determinando a influência do teor umidade sobre a velocidade terminal dos produtos: amendoim (cv. Tatú), arroz casca (cv. IAC-47), feijão (cv. Aysó), milho (cv. Maya XX), soja (cv. Paraná) e trigo (cv. IAC-25), utilizando níveis de umidade, aproximados, de 10, 15, 20 e 25%, base úmida, verificou que: a velocidade terminal do arroz em casca, feijão, milho, soja e trigo, aumentam com o acréscimo do teor de umidade até 18-22% e, diminui com umidade acima desse valor. No amendoim houve decréscimo da velocidade terminal com o aumento da umidade. O fluxo de ar corresponde às velocidades terminais encontravam-se no regime turbulento. O coeficiente aerodinâmico de arraste  $C$  teve uma variação de 0,391 a 0,410 considerando-se todos os produtos e níveis de conteúdo de água. Aos dados experimentais o modelo  $V_t = a_0 + a_1U + a_2U^2 + a_3U^3$ , foi ajustado tendo-se constatado ótimas correlações e nível de significância de 0,5%, para todos os produtos pesquisados.

SANTANA (1999), determinando as propriedades aerodinâmicas de vagens e sementes de amendoim, variedade L7; desenvolveu e avaliou um protótipo de separação e seleção de amendoim, utilizando o princípio de velocidade terminal; e determinou a velocidade terminal teórica e experimental de amendoim, variedade L7. Verificou também que o coeficiente de arraste, considerando-se todos os tamanhos de partículas do amendoim variedade L7, varia entre 0,17 e 0,48 com exceção de vagens com 2 sementes, que

apresentou 3,91. Os números de Reynolds encontrados para amendoim, variaram entre 6000 e 26000 nos diversos comprimentos de partículas encontrados para a variedade em estudo. A velocidade terminal experimental encontrada para sementes inteiras foi de 12,39 a 13,80 m.s<sup>-1</sup>; para sementes chocas de 9,31 a 10,87 m.s<sup>-1</sup>; para sementes danificadas de 6,6 a 10,30 m.s<sup>-1</sup> e de vagens de 9,30 a 9,40 m.s<sup>-1</sup>.

PORTELA (2000), avaliando o transporte de grãos de feijão “carioquinha”, milho “AG 401” e soja “Foscarini” sob pressão em dutos de pequeno diâmetro, verificou que a velocidade de saída dos grãos no final da tubulação varia diretamente com seu comprimento e inversamente com seu diâmetro. Quanto maior a distância de transporte, maior é a velocidade média dos grãos, dentro do mesmo duto, indicando estarem os mesmos em aceleração.

SOUSA (2001), estudou duas variedades de girassol: Cargill C-11 (brasileira) e Morgam 734 (argentina) com teores de umidade aproximados de 3 a 21% e pode observar que a velocidade terminal experimental aumentou, com o aumento do teor de umidade sendo maior para variedade argentina - 0,98 a 1,10 m/s em relação à brasileira - 0,96 a 1,06 m/s.

SILVA (2003), avaliando o comportamento da velocidade terminal dos grãos de sorgo e milho em função do teor de umidade, na faixa de 9,05 a 31,06% b.s. e 8,58 a 32,45% b.s., verificou que o comportamento da velocidade terminal, em relação ao teor de umidade, para ambos produtos estudados, apresentou tendência semelhante à observada para a maioria dos grãos agrícolas, ou seja, para a faixa de umidade analisada, a velocidade terminal aumenta com a elevação do teor de umidade dos grãos. Os valores desta propriedade física para os grãos de sorgo foram superiores aos encontrados para os grãos de milho e, ainda, o modelo linear ajustou-se adequadamente aos dados experimentais, apresentando coeficientes de correlação ( $R^2$ ) superiores a 0,83 e valores de erro médio (P) inferiores a 5%.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande. Os produtos utilizados nesta pesquisa experimental foram grãos de feijão (variedade carioquinha), milho (variedade pé de boi) e soja (variedade Foscarini).

#### **3.1 Conteúdo de água**

O conteúdo de água dos grãos foi determinado pelo método padrão de estufa (BRASIL, 1992), antes e após as determinações das velocidades terminais.

Inicialmente, as amostras foram pesadas em balança com precisão de 0,001 g e colocadas na estufa a 105°C durante 24 horas. Essas amostras foram novamente pesadas e obteve-se a umidade, em base úmida, por meio da Equação 1.60.

$$\%U = \frac{P_i - P_f}{P_f} \times 100 \quad (1.60)$$

em que:

$P_i$  = peso inicial, g.

$P_f$  = peso final, g.

#### **3.2 Características físicas**

As características físicas determinadas foram: comprimento, largura, espessura, massa específica, porosidade e esfericidades dos grãos.

### 3.2.1 Tamanho e forma das sementes

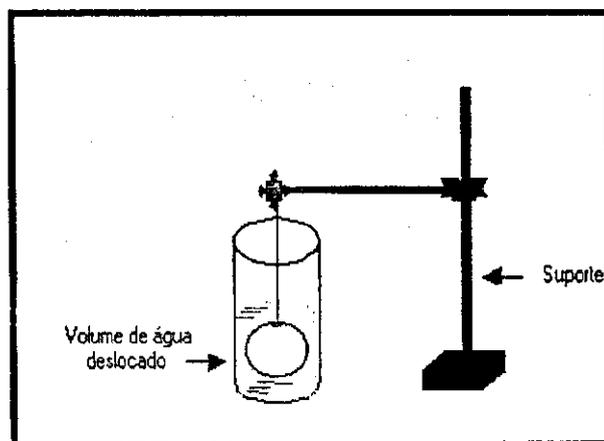
#### 3.2.1.1 Medida dos diâmetros e diâmetro da esfera equivalente

As dimensões comprimento, largura e espessura foram determinadas com um paquímetro digital, com precisão de 0,01mm (Anexo 1-A). E o diâmetro da esfera equivalente foi obtido pela média geométrica dos três diâmetros.

#### 3.2.1.2 Volume

O volume foi determinado pelo método do deslocamento de massa de água, descrito por MOHSENIN (1978). O procedimento tem como base três pesagens: a) massa do grão no ar, b) massa de um Becker contendo água e c) pesagem do Becker + água + grão submerso, conforme Figura 7. Calcula-se o volume pela expressão:

$$V(\text{cm}^3) = \frac{\text{massa de água deslocada (g)}}{\text{massa específica da água (g.cm}^{-3}\text{)}} = \frac{(\text{massa do becker+ água + grão submerso})}{(\text{massa específica da água})} \quad (1.61)$$



**Figura 5** – Método do deslocamento de massa de água para o cálculo do volume e da massa específica.

### **3.2.1.3 Massa específica real**

As pesagens obtidas pelo método do deslocamento de massa foram, também, utilizadas para determinar a massa específica, ou seja, pela simples relação entre a massa do produto e seu volume, expressa em  $\text{g.cm}^{-3}$ .

### **3.2.1.4 Esfericidade**

A esfericidade foi calculada pela relação entre a média geométrica dos diâmetros mutuamente perpendiculares e o maior diâmetro, conforme Equação (1.5).

### **3.2.1.5 Área projetada**

A área projetada foi obtida por meio da projeção das sementes na posição de repouso, utilizando um retroprojetor, conforme descrito por MOHSENIN (1978).

### **3.2.1.6 Porosidade**

Para determinação da porosidade de sementes e grãos, utilizou-se um picnômetro de comparação a ar, como mostrado na Figura 6. Esse aparelho é constituído basicamente por 2 cilindros idênticos de volumes conhecidos, intercomunicáveis através de tubulação acoplada em uma placa de vedação dos dois cilindros. Colocam-se sementes em um dos cilindros, até seu completo preenchimento com a válvula de intercomunicação fechada, coloca-se, então, a placa de vedação sobre os dois cilindros, pressionando-se através de um mecanismo de prensa para que a vedação seja perfeita. Em seguida, com o auxílio de um compressor, aplica-se uma pressão  $P_1$  no cilindro número 1 (vazio). Abre-se em seguida a válvula de intercomunicação e faz-se a leitura da pressão  $P_2$ .

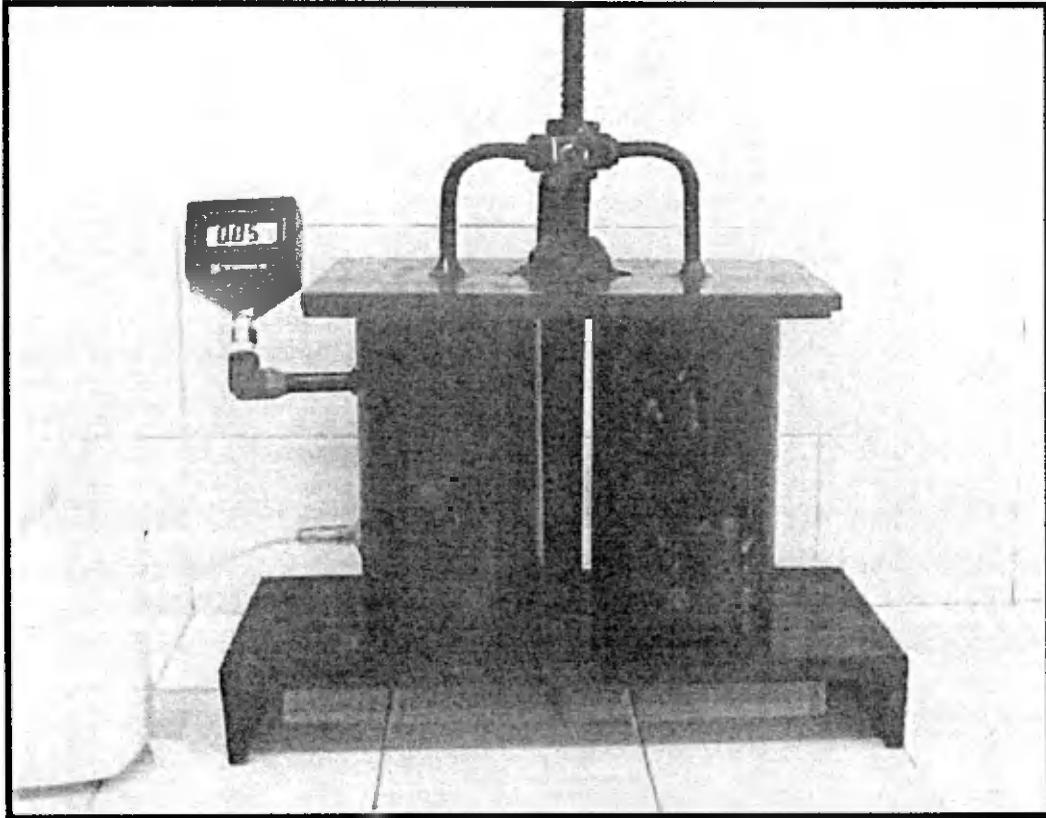


Figura 6.- Picnômetro de comparação a ar.

Determina-se, então a porosidade ( $\epsilon$ ) pela expressão:

$$\epsilon(\%) = \frac{(P_1 - P_2)}{P_2} \times 100 \quad (1.62)$$

### **3.3 Propriedades aerodinâmicas**

#### **3.3.1 Velocidade terminal**

Para determinação da velocidade terminal construiu-se um equipamento composto das seguintes partes:

- ❖ Cinco colunas verticais de seções transversais quadradas e 5 colunas circulares de 20, 30, 40, 50 e 60mm de diâmetro (medida efetiva) e 1m de altura;
- ❖ 1 motor – ventilador de ciclo contínuo, potência de 1HP. 3600rpm;
- ❖ Base de madeira;
- ❖ Conjunto de telas para homogeneização do fluxo de ar (na saída do motor);
- ❖ Tela de suporte para grãos na coluna de medição;
- ❖ 1 multímetro, para determinação regular a velocidade do ar;
- ❖ 1 anemômetro de palhetas, digital, para medir a velocidade terminal.



**Figura 7** - Equipamento utilizado para medir a velocidade terminal dos grãos: a) aparelho equipado com coluna de secção circular b) aparelho equipado com coluna de secção quadrada.

### Procedimento

Para determinação da velocidade terminal foram utilizados 10 grãos de cada tipo (feijão, milho e soja) com teores de umidades de 13; 12 e 11%, respectivamente. Foram feitas medidas de velocidade terminal para cada tipo de grão individualmente (com dez repetições). Iniciaram-se as medidas com a coluna de secção circular de maior diâmetro (60 mm) e substituíam-se pela coluna de diâmetro imediatamente inferior, de mesma secção, até atingir a coluna de menor diâmetro (20 mm). O mesmo procedimento foi utilizado para obtenção da velocidade nas colunas de secção quadrada. Para se efetuar a medida da velocidade terminal, colocava-se o grão na tela superior, regulava-se o fluxo de ar através do multímetro até que o grão flutuasse, apresentando apenas movimentos horizontais e assim media-se a velocidade terminal do grão, utilizando-se um anemômetro de palheta.

#### 3.3.1.1 Análise teórica

Na análise teórica, foi utilizado o método de cálculo de velocidade terminal, partindo do pressuposto que a velocidade terminal constante de uma partícula em queda depende das características físicas da partícula e do fluido de queda a que a partícula está sendo submetida e da aceleração da gravidade.

O cálculo do  $CN_R^2$ , foi obtido pela Equação 1.63:

$$CN_R^2 = \frac{8 W \rho (\rho_p - \rho_f)}{\pi \mu^2 \rho_p} \quad (1.63)$$

em que,

$W$  = peso dos grãos, N.

$\rho_f$  = massa específica do fluido,  $kg.m^{-3}$ .

$\rho_p$  = massa específica da partícula,  $kg.m^{-3}$ .

$\mu$  = viscosidade dinâmica do ar,  $N.s.m^{-2}$ .

Considerou-se  $CN_R^2 = \frac{8W\rho_f}{\pi\mu^2}$ , pois  $\rho_f$  é muito pequeno em relação a  $\rho_p$ , assim,  $\rho_p - \rho_f \approx \rho_p$ . Com os valores calculados de  $CN_R^2$ , encontrou-se os valores do número de Reynolds na curva  $N_R$  em função de  $CN_R^2$ , dada por MOHSENIN (1978) e calculou-se a velocidade terminal de acordo com a Equação 1.64.

$$V_t = \frac{N_R \mu}{D_p \rho_f} \tag{1.64}$$

em que,

$N_R$  = número de Reynolds, adimensional.

$\mu$  = viscosidade dinâmica do ar, N.s.m<sup>-3</sup>.

$D_p$  = diâmetro da partícula da esfera equivalente, m.

$\rho$  = massa específica do fluido, kg.m<sup>-3</sup>.

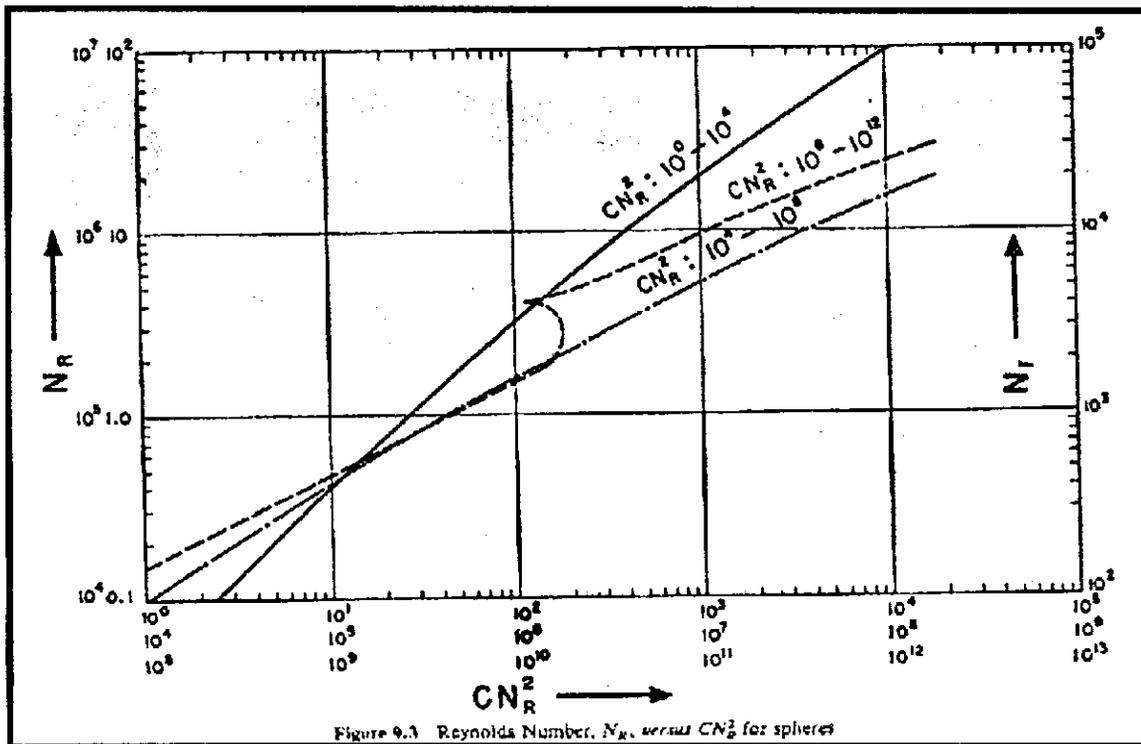


Figura 8 – Número de Reynolds,  $N_R$  em função de  $CN_R^2$  para esferas.

Levando-se em consideração a esfericidade,  $\varphi$ , de cada partícula, utilizou-se a Equação 1.65, de Pettyjonh e Christiansen e o modelo de MASSARANI (1986) para correção do coeficiente de arraste, em seguida utilizou-se a Equação 1.64 para o cálculo da velocidade terminal.

$$C_D = 5,31 - 4,88(\varphi) \quad (1.65)$$

em que  $\varphi$  é a esfericidade da partícula, em decimal

### **3.4 Efeito de parede.**

O efeito do atrito exercido pelas paredes das colunas na velocidade terminal de cada produto, bem como seu efeito no coeficiente de arraste, foi relacionado a cada grão pela relação  $D_p/D_c$ .

em que,

$D_p$  = diâmetro da partícula

$D_c$  = diâmetro efetivo da coluna

### **3.5 Análise estatística**

Para verificar o efeito da forma da coluna de queda nas propriedades aerodinâmicas de cada produto, foi utilizado o esquema fatorial 3 (tipos de grão) X 2 (formas da secção da coluna de queda), com 10 repetições enquanto que, para analisar o efeito da forma e do tamanho do diâmetro (dimensão efetiva), nessas mesmas propriedades, foi utilizado o delineamento fatorial 2 (formas secção da coluna) X 5 (dimensão efetiva da coluna de queda), também com 10 repetições. O programa utilizado para tal fim foi o ASSISTAT versão 6.6 beta, SILVA (2002).

As análises de regressão utilizadas para descrever o comportamento das características aerodinâmicas de cada produto, em função do tamanho e forma das colunas de queda do equipamento foram realizadas utilizando-se o programa computacional Microcal Origin 5.0.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Conteúdo de água

O conteúdo de água dos grãos de feijão, milho e soja, determinados no início do experimento, foram 13,80, 11,58 e 10,90% b.u, respectivamente.

### 4.2 Características físicas

#### 4.2.1 Tamanho e forma das sementes

Na Tabela 5 são mostradas as médias do diâmetro da esfera equivalente, massa, volume, massa específica, esfericidade, área projetada e porosidade  $\pm$  desvio padrão para os grãos de feijão, milho e soja.

Tabela 5 – Características físicas (tamanho e forma) dos grãos de feijão milho e soja

Características Físicas	Feijão	Milho	Soja
Diâmetro da esfera equivalente (cm)	0,70 $\pm$ 0,29	0,75 $\pm$ 0,20	0,66 $\pm$ 0,24
Massa (g)	0,26 $\pm$ 0,03	0,32 $\pm$ 0,02	0,18 $\pm$ 0,02
Volume (cm <sup>3</sup> )	0,20 $\pm$ 0,03	0,25 $\pm$ 0,016	0,16 $\pm$ 0,02
Massa específica (g.cm <sup>-3</sup> )	1,26 $\pm$ 0,01	1,27 $\pm$ 0,02	1,17 $\pm$ 0,016
Esfericidade (%)	69,94 $\pm$ 3,57	60,77 $\pm$ 2,27	89,68 $\pm$ 1,32
Área projetada da partícula (cm <sup>2</sup> )	0,50 $\pm$ 0,05	0,73 $\pm$ 0,04	0,34 $\pm$ 0,02
Porosidade (%)	36,56 $\pm$ 1,01	44,47 $\pm$ 1,02	38,32 $\pm$ 1,16

Os grãos utilizados nesta pesquisa estavam com conteúdo de água com o qual, geralmente, são comercializados. Analisando as características físicas obtidas para as três espécies em estudo, verifica-se claramente que existem diferenças quanto ao

tamanho, sendo o milho o maior grão, seguido pelo feijão e soja. Constatam-se, também, diferenças quanto a forma, como pode ser constatado pelo fator de esfericidade na Tabela 5, ficando a soja, o feijão e o milho com esfericidades próximas de 90, 70 e 60%, respectivamente. A escolha desses grãos foi proposital, visando verificar a dimensão da influência dessas características físicas sobre os parâmetros aerodinâmicos de grãos, uma vez que as equações de que tratam a literatura não contemplam formas irregulares. Na Figura 9 são apresentados os grãos de feijão (carioquinha), milho (pé de boi) e soja (Santa Inês) utilizados nesta pesquisa, onde se pode constatar as diferenças no tamanho e na forma desses produtos.

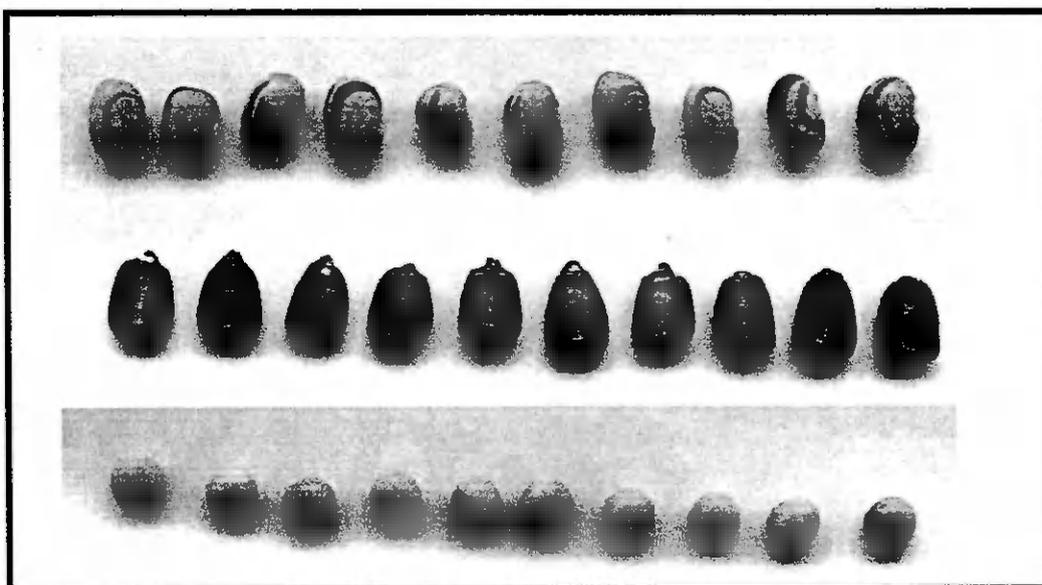


Figura 9 – Grãos de feijão, milho e soja utilizados nas determinações das características físicas e aerodinâmicas

Os valores do diâmetro da esfera equivalente, massa, volume, massa específica, esfericidade e área projetada de grãos de feijão foram maiores do que aqueles obtidos por PORTELA (2000) para mesma variedade e na mesma faixa de conteúdo de água.

As medidas de diâmetro da esfera equivalente, massa, volume, massa específica, esfericidade e área projetada, obtidos para grãos de milho e soja estão de acordo com os resultados obtidos por PORTELA (2000), para estes mesmos grãos, na mesma faixa de

umidade. PORTELA (2000) trabalhou com milho da variedade AG 401 e soja variedade Foscarini.

Entre os produtos utilizados nesta pesquisa, o de maior massa específica, maior diâmetro da esfera equivalente e maior massa foi o milho assim como nos resultados obtidos por PORTELA (2000), que encontrou para o milho, variedade AG 401 com conteúdo de água de 13,5%, valores de massa específica  $1,215 \text{ g.cm}^{-3}$ , diâmetro da esfera equivalente 0,747cm, massa 0,326g, volume médio de  $0,270 \text{ cm}^3$  e esfericidade de 64,7%.

### **4.3 Parâmetros aerodinâmicos**

#### **4.3.1 Velocidade terminal**

##### **4.3.1.1 Velocidade terminal calculada**

Os resultados de velocidade terminal de feijão, milho e soja, calculados pelas equações propostas por (MOHSEIN, (1978); PETTY JOHN & CHISTIANSEN, (1948) e MASSARANI, (1986) estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Velocidade terminal calculada com base nas características físicas do produto e do fluido (ar), por três diferentes formas:  $V_{t1}$  (considerando o produto como esférico segundo MOHSENIN, 1978);  $V_{t2}$  (corrigindo o  $C_D$  pela equação dada por PETTY JOHN & CHRISTIANSEN, 1948) e  $V_{t3}$  (corrigindo  $C_D$  pela Equação dada por MASSARANI, 1986)

	$V_{t1}$ (m/s) (Considerando o produto como sendo esférico)	$V_{t2}$ (m/s) ( Petty John e Christiansen)	$V_{t3}$ (m/s) (Massarani)
	$C_D$ retirado da curva clássica ( $C_{NR}^2 \times N_R$ ) p/corpos esféricos.	$V_t = \left[ \frac{4g(\rho_s - \rho)D_p}{3\rho K_2} \right]^{1/2}$  $C_D = K_2 = 5,31 - 4,88\phi$	$V_t = \left[ \frac{4g(\rho_s - \rho)D_p}{3\rho C_{DM}} \right]^{1/2}$  $C_{DM} = \left[ \left( \frac{24}{k_1 R_c} \right)^m + k_2^m \right]^{1/2}$
Feijão	16,736	7,6062	9,082
Milho	18,051	7,2072	9,067
Soja	14,760	9,8182	9,547

Na Figura 10 encontram-se as curvas de velocidades terminais calculadas para feijão, milho e soja pelas três equações sugeridas (MOHSENIN, 1978; PETTY JOHN & CHISTIANSEN, 1948; MASSARANI, 1986), bem como a velocidade experimental obtida com a coluna de secção quadrada de 60mm de lado. Percebe-se por esta figura que os dados experimentais estão colocados entre os valores calculados, havendo coincidência, apenas para velocidade terminal da soja, entre os valores obtidos experimentalmente e o calculado segundo a equação proposta por MOHSENIN (1970), que considera o produto como uma esfera, isso porque a soja, além de ser o menor grão entre os produtos estudados, é aquele que, também, apresenta uma maior esfericidade.

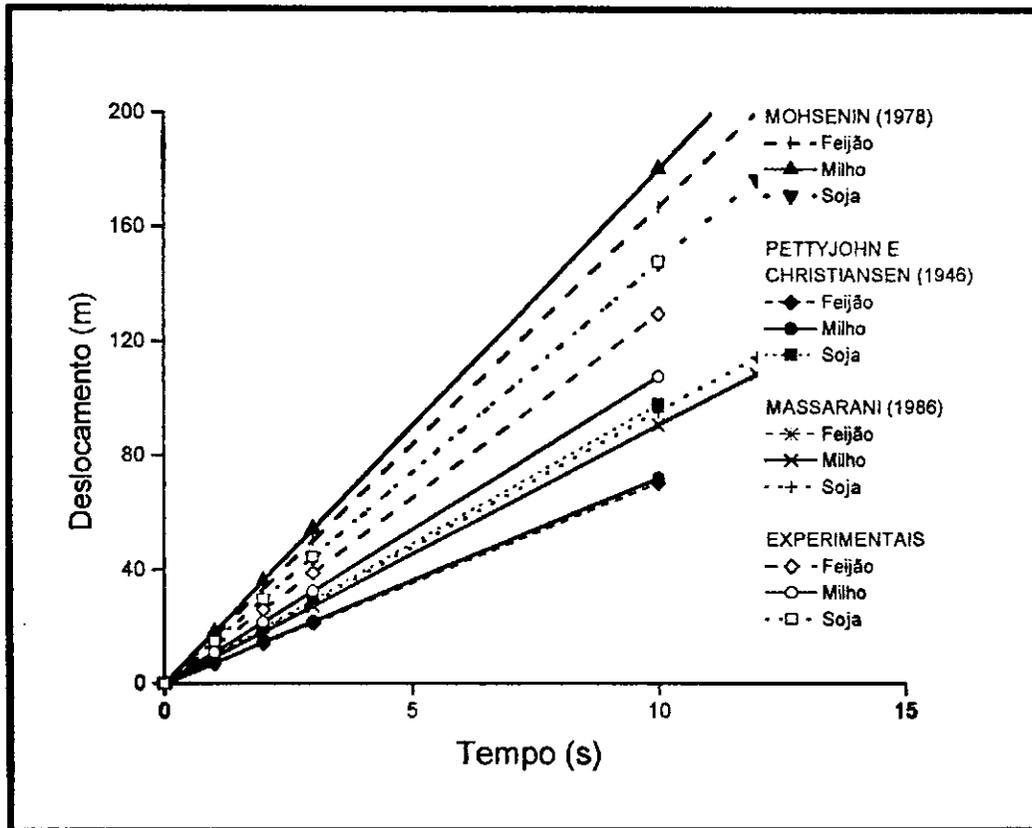


Figura 10 – Representação gráfica da velocidade terminal calculada para feijão, milho e soja segundo MOHSENIN (1978), PETTY JOHN & CHISTIENSEN (1948), MASSARANI (1986) e velocidade terminal experimental destes grãos.

Ao se comparar os dados calculados por três diferentes formas com os resultados experimentais (12,99; 10,77 e 14,81  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  para feijão milho e soja, respectivamente) obtidos com a coluna de secção quadrada de 60mm de lado (Tabela 7), percebe-se que nenhuma das equações citadas na literatura oferece boa aproximação da velocidade terminal obtidas para feijão milho e soja. A equação citada por MOHSENIN (1978) confere valores muito superiores aos experimentais além de provocar uma inversão desses valores; a correção sugerida por PETTY JOHN & CHISTIENSEN (1948) fornece valores muito aquém dos reais, conferindo à soja o maior valor de velocidade, seguida do feijão e do milho. A correção sugerida por MASSARANI (1986) oferece uma maior aproximação dos dados experimentais, no entanto, por considerar um coeficiente fixo (m) por faixa de esfericidade, acaba por colocar todos os produtos no mesmo patamar de velocidade terminal, ou seja, valores muito próximos. Esses fatos são muito graves

quando se busca encontrar parâmetros refinados de seleção de grãos dentro de uma mesma categoria (separar grãos de uma mesma espécie por tamanho, por exemplo). Todo esse estudo conduz, mais uma vez, a reforçar o fato de que existe uma enorme carência de estudos que forneçam suporte ao cálculo preciso de parâmetros aerodinâmicos de produtos de maior granulometria (particulado macro) e ainda, que os estudos ora existentes não têm sido devidamente aplicados aos produtos agrícolas.

Sobre estes comentários, é importante ressaltar que todas essas equações são propostas para estimar a velocidade terminal em queda livre da partícula, ou seja, longe de fronteiras rígidas, daí o fato de se estar comparando os valores estimados pelas equações propostas com aqueles obtidos na coluna de secção quadrada de 60mm de lado, que, no estudo em questão, é a condição que mais se aproxima desta realidade. No tópico referente ao Efeito de Parede será fornecido um estudo mais detalhado sobre este assunto.

#### **4.3.1.2 Velocidade terminal experimental**

Os resultados obtidos experimentalmente para velocidade terminal de feijão, milho e soja, nos diversos tamanhos e formas da secção da coluna de queda, encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Velocidade terminal ( $m.s^{-1}$ ) de grãos de feijão, milho e soja obtidas em colunas de secção circular e também, quadrada com *diâmetros\** 60, 50, 40, 30 e 20mm, respectivamente.

Produto	Velocidades obtidas com a secção circular com diâmetros de 60-20 mm				
	60 mm	50 mm	40 mm	30 mm	20 mm
Feijão	12,75 ± 0,472	8,74 ± 0,375	4,88 ± 0,199	2,64 ± 0,255	1,77 ± 0,313
Milho	10,42 ± 0,577	7,28 ± 0,312	3,77 ± 0,226	2,19 ± 0,145	1,29 ± 0,223
Soja	14,65 ± 0,443	10,1 ± 0,258	5,79 ± 0,409	3,39 ± 0,247	2,70 ± 0,371

Produto	Velocidades obtidas com a secção quadrada com lados de 60-20 mm				
	60 mm	50 mm	40 mm	30 mm	20 mm
Feijão	12,99 ± 0,433	10,4 ± 0,414	6,72 ± 0,248	4,91 ± 0,431	2,09 ± 0,366
Milho	10,77 ± 0,408	8,96 ± 0,417	5,8 ± 0,330	4,16 ± 0,206	1,75 ± 0,143
Soja	14,81 ± 0,448	11,94 ± 0,259	8,26 ± 0,291	6,08 ± 0,230	2,9 ± 0,182

Percebe-se pela Tabela 7 que os valores obtidos para velocidade terminal apresentam uma dependência do tamanho da secção, diminuindo com a diminuição do tamanho desta. Observa-se também, que esta diminuição é mais acentuada para a coluna de secção circular do que para a quadrada.

É de conhecimento geral que a velocidade terminal deve ser medida em queda livre, ou seja, sem que haja influência das paredes que limitam a coluna de queda e, para que isto ocorra quando o movimento se dá na região de Newton (Figura 3), o *diâmetro\** da coluna ( $D_c$ ) deve ser quatro vezes maior do que diâmetro da partícula (forma esférica).

Analisando a velocidade terminal entre os produtos, percebe-se que em todas as secções, independentes da forma e do tamanho, obteve-se maiores valores para a soja, seguida do feijão e finalmente, o milho.

Para melhor verificar estes efeitos (tamanho e forma da secção da coluna de queda) na velocidade terminal desses grãos, foram feitas análises estatísticas utilizando o Programa Computacional Assistat 6.6 beta, segundo o modelo Fatorial 2 (formas da

coluna) X 5 (tamanhos da secção) X 10 (repetições) para cada grão, isoladamente. Estas análises serão apresentadas nos tópicos que se seguem.

#### 4.3.1.2.1 Velocidade terminal - feijão

Na Tabela 8 encontra-se o quadro da análise de variância para velocidade terminal dos grãos de feijão, onde F1 representa as diferentes formas das colunas e F2 os diferentes tamanhos. Nessa tabela constata-se que existem diferenças significativas em nível de 1% de probabilidade para o fator forma da coluna, para o fator tamanho da secção e também para interação entre esses dois fatores.

Tabela 8- Análise de variância da velocidade terminal de feijão no ar, em coluna de queda com diferentes formas (F1) e diferentes tamanhos da secção (F2)

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		F
		S. Q.	Q. M.	
Forma da coluna (F 1)	1	40,06834	40,06834	306,8222**
Tamanho da secção (F 2)	4	1567,69324	391,92331	3001,1423**
Int. F 1 x F 2	4	17,20200	4,30050	32,9310**
Resíduo	90	11,75322	0,13059	
<b>Total</b>	<b>99</b>	<b>1636,71680</b>		

\*\* = significativo em nível de 1% de probabilidade

\* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

A Tabela 9 contém os valores médios da velocidade terminal obtidas para feijão nas diferentes formas e nos diferentes tamanhos da secção. Percebe-se por esta tabela que existe diferença significativa para a velocidade terminal quando determinada em colunas de formas diferentes, sendo esses valores maiores quando determinados com a coluna de queda de secção quadrada. Ainda analisando a mesma tabela, com relação ao tamanho da secção, verificam-se diferenças significativas entre todos os valores de velocidade terminal e que estes valores aumentam com o aumento do tamanho da secção.

Tabela 9 - Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do feijão, para as diferentes formas e diferentes tamanhos da secção.

Forma da secção	Vt (m/s)
Circular	6,156 b
Quadrada	7,422a

Tamanho da secção (mm)	Vt (m/s)
60	12,870 a
50	9,570 b
40	5,800 c
30	3,775 d
20	1,930 e

DMS - Forma da secção = 0,14361      DMS - Tamanho da secção = 0,31837

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey em nível de 1% de probabilidade.

Os valores médios da velocidade terminal para a interação entre a forma da coluna de queda e tamanho de secção para grãos de feijão, estão na Tabela 10. Verifica-se, nessa tabela, que não mais existe dependência da forma da secção quando o tamanho da secção é muito maior do que o diâmetro do grão. Segundo BRAGA (1997), no caso em que há uma distância razoável entre tamanhos de diâmetros (*diâmetro\** da coluna 4 vezes maior do que o diâmetro de uma partícula, em se tratando de esfera), não existe interferência das paredes na determinação da velocidade terminal. Analisando-se para o extremo oposto ( $D_c = 20\text{mm}$ ), verifica-se que também não existe diferença significativa, ou seja, quando existe uma proximidade muito grande entre estes dois *diâmetros\**, há uma igual contribuição (interferência) na determinação da velocidade terminal.

Tabela 10 – Valores médios da velocidade terminal no ar de grãos de feijão, para a interação entre a forma da coluna de queda e tamanho da secção.

Forma secção	Tamanho da secção (mm)				
	60	50	40	30	20
Secção circular	12,7500aA	8,7400bB	4,8800bC	2,6400bD	1,7700aE
Secção quadrada	12,9900aA	10,4000aB	6,7200aC	4,9100aD	2,0900aE

DMS para colunas = 0,3211

Classificação c/ letras minúsculas

MG = 6,78900

DMS para linhas = 0,4502

Classificação c/ letras maiúsculas

CV% = 5,32294

Obs: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey em nível de 1% de probabilidade.

## 4.3.1.2.2 Velocidade terminal - milho

Na Tabela 11 encontra-se o resultado da análise de variância para a velocidade terminal dos grãos de milho, quando se utiliza colunas de secções de diferentes formas (tratamento F1) e diferentes *diâmetros\** (tratamento F2). Assim como para os valores encontrados para feijão, foram encontradas diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade para o fator forma da coluna, para o fator tamanho da secção e também para a interação entre esses dois fatores.

Tabela 11- Análise de variância da velocidade terminal no ar de milho, em coluna de queda com diferentes formas (F1) e diferentes tamanhos da secção (F2).

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Forma da coluna (F 1)	1	42,11960	42,11960	395,4706**
Tamanho da secção (F 2)	4	1089,68103	272,42026	2557,8169**
Int. F 1 x F 2	4	13,67178	3,41795	32,0919**
Resíduo	90	9,58545	0,10650	
<b>Total</b>	<b>99</b>	<b>1155,05786</b>		

Significativo em nível de 1% de probabilidade

Significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

A Tabela 12 contém os valores médios da velocidade terminal do milho nas diferentes formas e nos diferentes tamanhos da secção. Percebe-se por esta tabela que a velocidade terminal é influenciada significativamente pela forma da secção, a exemplo do que ocorreu com o feijão, o milho também teve valores de velocidade terminal quando esta é determinada em uma coluna de queda de secção quadrada. Comportamento semelhante ao feijão, também foi verificado para o milho com relação ao tamanho da secção, onde verificam-se diferenças significativas entre todos os valores de velocidade terminal e que estes valores aumentam com o aumento do tamanho da secção.

Tabela 12- Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do milho, para as diferentes formas e diferentes tamanhos da secção.

Forma da secção	Vt (m/s)
Circular	4,990 b
Quadrada	6,288 a

Tamanho da secção (mm)	Vt (m/s)
60	10,595 a
50	8,120 b
40	4,785 c
30	3,175 d
20	1,520 e

DMS - Forma da secção = 0,12969    DMS - Tamanho da secção = 0,28752

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey em nível de 1% de probabilidade.

Observa-se na Tabela 13, os valores médios da velocidade terminal de grãos de milho para a interação entre a forma da coluna de queda e o tamanho de secção. Verifica-se que os valores de velocidade terminal dependem do tamanho da secção de queda e da forma, em todos os casos, porém desconfia-se que, em nenhum dos casos analisados obteve-se, para milho, a velocidade terminal em queda livre, ou seja, em todos os casos houve influência das fronteiras em sua determinação. Este fato fica evidenciado ao se comparar os valores experimentais com os valores teóricos de velocidade terminal, calculados com base nas características físicas de cada produto e do fluido de transporte (Tabela 7).

Esperava-se que os valores de velocidade terminal de milho obtidos com a coluna de queda de 20mm (quadrada e circular) fossem significativamente iguais devido a grande proximidade deste ao diâmetro da esfera de igual volume do milho, ( $D_e$  – diâmetro da esfera equivalente). O grão de milho apresentou comportamento diferente dos demais experimentos realizados com as colunas de maiores *diâmetros\**, deveria adotar a posição de máxima resistência (posição de repouso), ou seja, com a maior área orientada de forma perpendicular à direção do fluxo (Figura 11.a), porém este permanecia com a sua menor projeção normal ao fluxo (Figura 11.b). Esse comportamento faz com que a distância entre o grão e a parede da coluna seja maior. Sendo assim, mesmo o grão de milho possuindo dimensão efetiva maior do que a do

feijão, o efeito é mais sentido pelo grão de feijão do que o grão de milho, na coluna de 20 mm de *diâmetro\**.

Tabela 13- Valores médios da velocidade terminal no ar de grãos de milho, para a interação entre a forma da coluna de queda e tamanho da secção.

Forma da coluna de queda	Medida efetiva das colunas de queda (mm)				
	60	50	40	30	20
Secção circular	10,4200bA	7,2800bB	3,7700bC	2,1900bD	1,2900bE
Secção quadrada	10,7700aA	8,9600aB	5,8000aC	4,1600aD	1,7500aE

DMS para colunas = 0,2900

DMS para linhas = 0,4066

Classificação c/ letras minúsculas

Classificação c/ letras maiúsculas

MG = 5,63900

CV% = 5,78739

Obs: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey em nível de 1% de probabilidade.

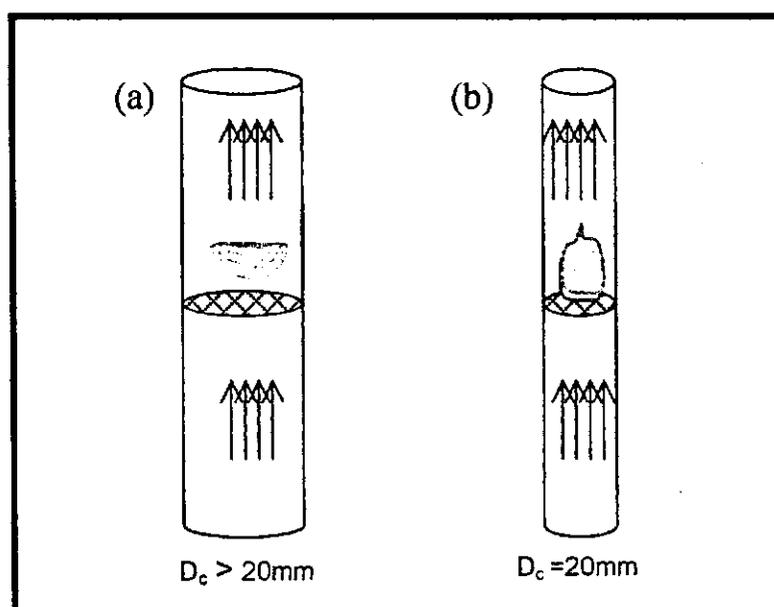


Figura 11 – Posição adotada pelo grão de milho durante a determinação da velocidade terminal: a) em colunas com *diâmetros\** maiores do que 20 mm e b) em colunas com *diâmetro\** igual a 20 mm.

É importante ressaltar que todas as equações existentes na literatura são para o cálculo da velocidade terminal, em queda livre, de partículas de formas regulares e minúsculas ( $D_p < 1\text{mm}$ ). Alguns autores (PETTYJOHN & CHRISTIANSEN, 1948; MASSARANI, 1986) propuseram correções no cálculo da velocidade terminal de

partículas de formas irregulares a partir da correção do coeficiente de arraste ( $C_D$ ), considerando, nestas correções o fator de forma esfericidade ( $\phi$ ), no entanto, nada foi feito ainda, no sentido de estender essas equações para partículas de maiores dimensões. Portanto, ao se fazer comparações de dados experimentais com teóricos deve-se ter o cuidado de analisar as restrições desses modelos bem como da sua aplicabilidade.

#### 4.3.1.2.3 Velocidade terminal - soja

A Tabela 14 contém o resultado da análise de variância para velocidade terminal dos grãos de soja, obtidos em colunas com secções de diferentes formas (tratamento F1) e diferentes tamanhos (tratamento F2). Nessa tabela são encontradas diferenças significativas em nível de 1% de probabilidade para o fator forma da coluna, para o fator tamanho da secção e também para interação entre esses dois fatores.

Tabela 14- Análise de variância da velocidade terminal no ar de soja, em coluna de queda com diferentes formas (F1) e diferentes tamanhos da secção (F2).

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Forma da coluna (F 1)	1	54,16900	54,16900	506,9474**
Tamanho da secção (F 2)	4	1860,89929	465,22482	4353,8652**
Int. F 1 x F 2	4	29,77243	7,44311	69,6573**
Resíduo	90	9,61680	0,10685	
<b>Total</b>	<b>99</b>	<b>1954,45752</b>		

\*\* = significativo em nível de 1% de probabilidade

\* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

A Tabela 15 contém os valores médios de velocidade terminal da soja quando se utiliza diferentes formas e diferentes tamanhos da secção da coluna de queda. Percebe-se por esta tabela que existe diferença significativa entre os valores de velocidade terminal quando obtidos em colunas de formas diferentes, sendo esses valores maiores quando determinados com a coluna de queda de secção quadrada, como observados também para os grãos de feijão e de milho. Quanto ao tamanho da secção, outra vez se verificou o mesmo comportamento obtido para feijão e milho, ou seja,

existem diferenças significativas entre todos os valores de velocidade terminal e estes valores aumentam com o aumento do tamanho da secção.

Tabela 15 - Comparação entre os valores médios da velocidade terminal de soja, para as diferentes formas e diferentes tamanhos da secção.

Forma da secção	Vt (m/s)
Circular	7,3260 b
Quadrada	8,7980 a

Tamanho da secção (mm)	Vt (m/s)
60	14,730 a
50	11,020 b
40	7,025 c
30	4,735 d
20	2,800 e

DMS - Forma da secção = 0,12990

DMS - Tamanho da secção = 0,28799

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey em nível de 1% de probabilidade.

Pelos resultados da interação feita entre a forma da coluna de queda e o tamanho de secção, Tabela 16, verifica-se que os valores de velocidade terminal dependem do tamanho da secção de queda, como já verificado anteriormente, para o outro produto. Quanto à forma, assim como observado para feijão, não existem diferenças significativas entre as velocidades terminais obtidas para os extremos dos *diâmetros\** estudados (de 20mm e 60mm). Reforçando o que já foi dito quando se analisou os grãos de feijão, de que para um *diâmetros\** grande da coluna de queda em relação ao diâmetro da partícula, a existência de fronteira já não mais é sentida, portanto não importa se a secção é quadrada ou circular. No caso de *diâmetros\** muito próximos do diâmetro da partícula existe igual interferência em ambas às formas de secção.

Tabela 16 - Valores médios da velocidade terminal no ar de grãos de soja, para a interação entre a forma da coluna de queda e tamanho da secção.

Forma da coluna de queda	Medida efetiva da coluna de queda (mm)				
	60	50	40	30	20
Secção circular	14,6500aA	10,1000bB	5,7900bC	3,3900bD	2,7000aE
Secção quadrada	14,8100aA	11,9400aB	8,2600aC	6,0800aD	2,9000aE

DMS para colunas = 0,2905

DMS para linhas = 0,4073

Classificação c/ letras minúsculas

Classificação c/ letras maiúsculas

MG = 8,06200

CV% = 4,05463

Obs: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey em nível de 1% de probabilidade.

#### 4.3.1.2.4- Efeito da forma e tamanho do grão

Para analisar a influência da forma e tamanho do grão na determinação da velocidade terminal foi feita uma análise estatística, modelo fatorial 3 X 2 onde o fator 1 é composto pelos 3 tipos de grãos e o fator 2 pela forma da coluna, para cada tamanho de secção. Os detalhes dessa análise estão apresentados no Anexo B. Numa breve referência a essa análise, verificou-se que existe diferença significativa nos valores de velocidade terminal entre os grãos de feijão milho e soja. Em todos os casos, a menor velocidade terminal é alcançada para o milho, seguido do feijão e da soja. Essas diferenças são atribuídas principalmente à forma, ao tamanho e a massa específica da partícula. No caso específico deste estudo, pode-se atribuir uma menor parcela de contribuição à massa específica já que estes grãos possuem valores de massa específica muito próximas (Tabela 5).

Quanto à forma da coluna, não existe diferença significativa quando o *diâmetro\** (medida efetiva) da secção é igual a 60 mm, nos demais tamanhos a diferença é significativa, e passa a causar maior efeito na determinação da velocidade terminal à medida que esse tamanho diminui, sendo que a velocidade terminal é muito mais afetada pela secção cilíndrica do que pela secção quadrada.

Em resumo, de todas essas análises feitas para o cálculo de velocidade terminal, conclui-se que, dependendo do objetivo, deve-se dar atenção especial à escolha da forma e da secção e também ao tamanho da secção, ou à combinação dessas duas na determinação da velocidade terminal experimental.

### 4.3.2 Coeficiente de arraste

#### 4.3.2.1 Coeficiente de arraste calculado

Na Tabela 17 encontram-se os coeficientes de arraste calculados para feijão, milho e soja, por três diferentes equações (MOHSEIN, 1978; PETTYJOHN & CHRISTIANSEN, 1948; MASSARANI, 1986). Observando a Tabela 17 e comparando os dados obtidos por cada autor com a Figura 3, percebe-se que apenas os dados obtidos pela Equação citada por MOHSEIN (1978) fornecem valores de  $C_D$  na faixa correspondente à região de Newton, inclusive com o valor do  $C_D$  calculado para soja (0,41) ficando bem próximo do  $C_D$  dado para uma esfera na região de Newton (0,44 - para  $N_R > 1000$ ). Os demais autores, ao sugerirem correções de  $C_D$  para partículas não esféricas, colocam estes grãos com coeficientes de arraste entre 0,926 a 2,35, ou seja, coeficientes de arraste típicos da região transiente ( $1 < N_R < 1000$ ), o que causa uma inconsistência, dado ao fato de que obteve-se, para estes grãos, valores de Reynolds variando de 6 277 a 7 726. Isto, mais uma vez prova a inadequação dessas equações para particulado grande.

Tabela 17 – Coeficientes de arraste para feijão milho e soja, obtidos por três diferentes formas: retirado da curva clássica  $C_{NR}^2 \times N_R$  para corpos esféricos;  $C_D = K_2$ , calculado pela equação dada por PETTYJOHN E CHRISTIANSEN (1948) e  $C_D = C_{DM}$ , calculado pela Equação dada por MASSARANI (1986).

	$N_R$ (Adim.)	$C_D$ (adimensional) (Considerando o produto como sendo esférico)	$K_2$ (adimensional) (Coeficiente de arraste dado por PettyJohn e Christiansen)	$C_{DM}$ (adimensional) (Coeficiente de arraste dado por Massarani)
		$C_D$ retirado da curva clássica $C_{NR}^2 \times N_R$ p/corpos esféricos.	$C_D = K_2 = 5,31 - 4,88\phi$	$C_{DM} = \left[ \left( \frac{24}{k_1 R_c} \right)^m + k_2^m \right]^{\frac{1}{m}}$
Feijão	7 726	0,391	1,896	1,321
Milho	8 718	0,373	2,350	1,472
Soja	6 277	0,410	0,926	0,976

### 4.3.2.2 Coeficiente de arraste experimental

A Tabela 18 contém os valores de coeficiente de arraste obtidos nas diversas condições em que o experimento foi realizado (6 *diâmetros\** da seção X duas formas de seção) para grãos de feijão, milho e soja.

Percebe-se pela Tabela 18 que, em todas as seções o coeficiente de arraste é maior para milho, como era de se esperar devido a este possuir maior diâmetro ( $D_e$ ) e maior área projetada, fatores diretamente ligados à resistência ao arraste. Nota-se também um aumento do coeficiente de arraste com a diminuição do *diâmetro\** da coluna e estes valores são maiores para a coluna circular. Outro fato importante observado nesta tabela é que se obteve para soja, no *diâmetro\** de 60 mm, um coeficiente de arraste próximo ao que é dado para uma esfera na região de escoamento de Newton ( $C_D = 0,44$ ). Isto devido ao fato de a soja possuir fator de esfericidade muito elevado (próximo a 90%) e, também, porque com esta dimensão da coluna, praticamente, tem-se a velocidade terminal em queda livre do grão de soja.

Tabela 18 – Coeficiente de arraste de grãos de feijão, milho e soja, observado em colunas de seção circular e também quadrada, com *diâmetros\** de 60, 50, 40, 30 e 20mm, respectivamente.

Produto Testado	Coeficientes de arraste obtidos em colunas de seção circular nos diâmetros de 60 a 20 mm				
	60 mm	50 mm	40 mm	30 mm	20 mm
Feijão	0,521 ± 0,038	1,112 ± 0,095	3,583 ± 0,454	12,540 ± 3,052	29,297 ± 10,516
Milho	0,685 ± 0,042	1,402 ± 0,083	5,243 ± 0,407	15,565 ± 1,412	48,305 ± 16,712
Soja	0,430 ± 0,207	0,906 ± 0,061	2,784 ± 0,375	8,130 ± 1,168	13,337 ± 3,691
Produto Testado	Coeficientes de arraste obtidos com a seção quadrada nos lados de 60-20 mm				
	60 mm	50 mm	40 mm	30 mm	20 mm
Feijão	0,575 ± 0,049	0,787 ± 0,084	1,878 ± 0,116	3,566 ± 0,516	20,962 ± 7,327
Milho	0,640 ± 0,032	0,929 ± 0,099	2,221 ± 0,241	4,314 ± 0,492	24,679 ± 4,355
Soja	0,422 ± 0,035	0,647 ± 0,035	1,357 ± 0,127	2,503 ± 0,196	11,108 ± 1,669

Nas Figuras 12 e 13 são mostradas as curvas de tendência dos coeficientes de arraste obtidos experimentalmente para feijão, milho e soja, em colunas de *diâmetros\** de 20 a 60mm para seção circular e quadrada, respectivamente. Observa-se por estas

Figuras que existe uma tendência à estabilização do coeficiente de arraste de todos os produtos a partir do *diâmetro\** de 50 mm, principalmente na secção quadrada e mais particularmente para a soja. Acredita-se, no entanto, que apenas para a soja se tenha obtido a velocidade terminal em queda livre, quando medida com a coluna de secção quadrada de 60 mm de lado, onde se obtém um valor do coeficiente de arraste igual a 0,42, ou seja, típico do regime de Newton e muito próximo do  $C_D$  para esfera (0,44).

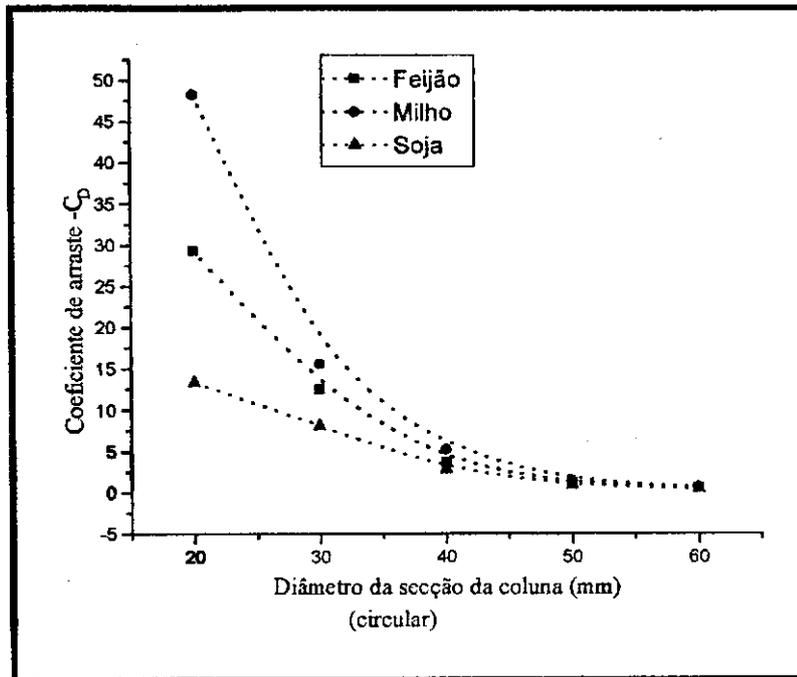


Figura 12- Curvas de tendência dos coeficientes de arraste de feijão, milho e soja, em colunas de quedas de secção circular com diâmetros de 20, 30, 40, 50 e 60mm.

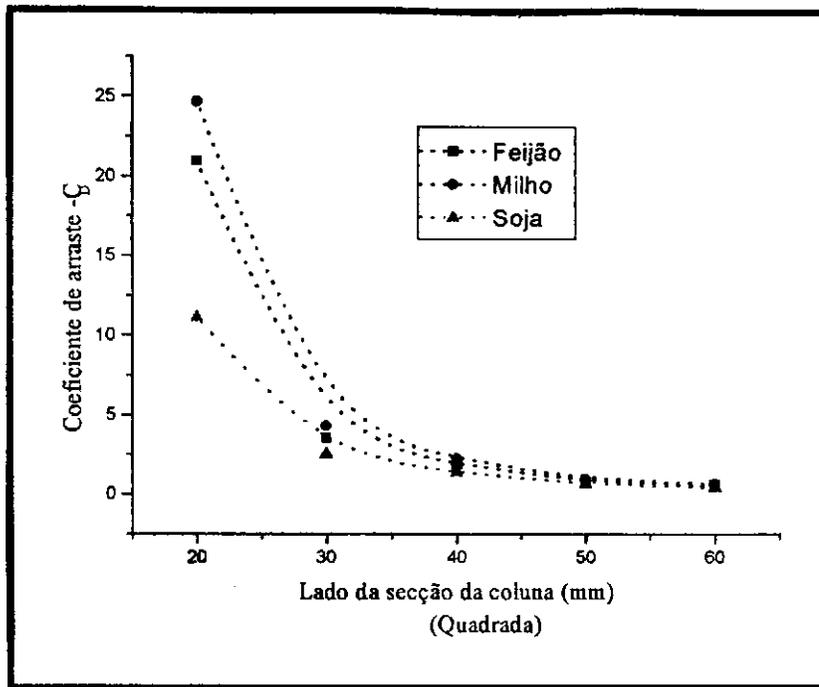


Figura 13- Curvas de tendência dos coeficientes de arraste em função do *diâmetro\** da seção de feijão, milho e soja, em colunas de quedas de seção quadrada com lados de 20, 30, 40, 50 e 60mm.

Análises estatísticas semelhantes às aquelas que foram feitas para velocidade terminal também foram feitas para coeficiente de arraste, segundo o modelo Fatorial 3 (formas da coluna) X 5 (tamanhos da seção) X 10 (repetições) para cada grão, isoladamente. Observou-se com essas análises que, de forma geral, existiram diferenças significativas para coeficiente de arraste quanto à forma da seção, e que esses valores são maiores quando determinados com a coluna de queda de seção circular. Quanto ao tamanho da seção, até a coluna de tamanho 40 mm esses valores são significativamente iguais e acima desse são estatisticamente diferentes. Uma observação importante deve ser colocada nesse sentido a qual refere-se ao fato de que, particularmente, nesse estudo uma pequena diferença na medida do coeficiente de arraste conduz a uma mudança no regime de transporte. Analisando do ponto de vista estatístico, o fato de termos dados muito heterogêneos levam a um DMS muito elevado e daí a essas conclusões que não refletem o comportamento físico do fenômeno. Estes resultados podem ser conferidos no Anexo C.

Seguiu-se fazendo, para estudo do coeficiente de arraste, análises estatísticas utilizando o Programa Computacional Assistat 6.6 beta, segundo o modelo Fatorial 3 (tipos de grãos) X 2 (formas da seção) X 10 (repetições) para cada tamanho da seção

da coluna de queda (60, 50, 40, 30 e 20mm) respectivamente.. Estas análises serão apresentadas nos tópicos que se seguem.

#### 4.3.2.2.1 Coeficiente de arraste na secção de 60 mm

Na Tabela 19 constam os resultados da análise de variância do coeficiente de arraste dos grãos de feijão, milho e soja para as diferentes formas de secção com 60mm de *diâmetro\**. Percebe-se por esta análise que existe diferença significativa em nível de 5% de probabilidade para o fator produto F1 (feijão, milho e soja) e diferença ao nível de 1% de probabilidade para o fator forma do duto. Não houve diferença significativa para interação entre esses dois fatores.

Pela Tabela 20, onde se encontram os valores médios de coeficiente de arraste para o fator produto e para o fator forma da secção obtidos com a coluna de 60 mm de *diâmetro\**, percebe-se que o maior coeficiente de arraste, entre os produtos, foi obtido para o milho e quanto à forma da coluna, a secção cilíndrica oferece maior resistência.

Tabela 19- Análise de variância do coeficiente de arraste no ar, em coluna de queda para os três produtos (F1) e diferentes formas da secção (F2), observadas com a utilização da coluna de 60 mm de *diâmetro\**.

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Produto (F 1)	2	0,59364	0,28682	207,5681 **
Forma da coluna (F 2)	1	0,00866	0,00866	6,2658 *
Int. F 1 x F 2	2	0,00359	0,00180	1,2996 ns
Resíduo	54	0,07462	0,00138	
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>0,66051</b>		

\*\* = significativo em nível de 1% de probabilidade

\* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela 20 – Comparação entre os valores médios do coeficiente de arraste para os três produtos e para as diferentes formas da coluna com secção de 60 mm de *diâmetro\**.

Médias de coeficiente de arraste para o fator Produto	
Feijão	0,51286 b
Milho	0,66274 a
Soja	0,42602 c
Médias de coeficiente de arraste para o fator Forma da Coluna	
Circular	0,54589 a
Quadrada	0,52186 b
DMS1 = 0,02833	DMS2 = 0,01925
MG = 0,53387	CV% = 6,96283

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey em nível de 1% de probabilidade.

#### 4.3.2.2.2 Coeficiente de arraste na secção de 50 mm

Na Tabela 21 constam os resultados da análise de variância do coeficiente de arraste dos grãos de feijão, milho e soja para as diferentes formas de secção com 50mm de *diâmetro\**. Percebe-se por esta análise que existe diferença significativa em nível de 5% de probabilidade para o fator produto F1 (feijão, milho e soja) e diferença em nível de 5% de probabilidade para o fator forma da coluna. Não houve diferença significativa para interação entre esses dois fatores.

Pela Tabela 22, onde se encontram os resultados da comparação entre as médias de coeficiente de arraste para o fator produto e o fator forma da coluna obtidos no *diâmetro\** de 50mm, percebe-se comportamento semelhante ao já comentado para a coluna de secção de 60mm de *diâmetro\**. Estes mesmos comentários se aplicam às análises estatísticas realizadas para os valores de coeficiente de arraste obtidos para as colunas de 40mm, 30mm e 20mm. A única exceção é feita ao fato de que para os *diâmetros\** inferiores a 40mm, a interação entre os fatores produto (F1) e o fator forma da secção (F2) são significativamente diferentes. Estes resultados podem ser observados nas Tabelas de 23 a 32 que contêm o mesmo tipo de análise estatística.

Tabela 21- Análise de variância do coeficiente de arraste no ar, em coluna de queda para os três produtos (F1) e diferentes formas da secção (F2), observadas com a utilização da coluna de 50 mm de *diâmetro*\*.

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Produto (F 1)	2	1,52193	0,76096	120,0146 **
Forma da coluna (F 2)	1	1,86044	1,86044	293,4175 **
Int. F 1 x F 2	2	0,12050	0,06025	9,5026
Resíduo	54	0,34239	0,00634	
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>3,84526</b>		

\*\* = significativo em nível de 1% de probabilidade

\* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Obs: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 22 – Comparação entre os valores médios do coeficiente de arraste para os três produtos e para as diferentes formas da coluna com secção de 50 mm de *diâmetro*\*.

Médias de coeficiente de arraste para o fator Produto	
Feijão	0,94965 b
Milho	1,16589 a
Soja	0,77658 c
Médias de coeficiente de arraste para o fator Forma da Coluna	
Circular	1,14013 a
Quadrada	0,78795 b

DMS1 = 0,06070

DMS2 = 0,04121

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey em nível de 1% de probabilidade.

Tabela 23 – Valores médios do coeficiente de arraste para a interação entre o fator produto (F1) e o fator forma da secção (F2) para a secção de 50 mm de *diâmetro*\*.

Produto	Secção	
	Circular	Quadrada
Feijão	1,1124bA	0,7870bB
Milho	1,4023aA	0,9295aB
Soja	0,9057cA	0,6474cB

DMS para colunas = 0,0858

DMS para linhas = 0,0714

Classificação c/ letras minúsculas

Classificação c/ letras maiúsculas

MG = 0,96404

CV% = 8,25979

Obs: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey em nível de 1% de probabilidade.

## 4.3.2.2.3 Coeficiente de arraste na secção de 40 mm

Tabela 24- Análise de variância do coeficiente de arraste no ar, em coluna de queda para os três produtos (F1) e diferentes formas da secção (F2), observadas com a utilização da coluna de 40 mm de *diâmetro*\*.

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Produto (F 1)	2	27,99434	13,99717	139,9075 **
Forma da coluna (F 2)	1	63,12471	63,12471	630,9575 **
Int. F 1 x F 2	2	7,26895	3,63447	36,3281 **
Resíduo	54	5,40248	0,10005	
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>103,79047</b>		

\*\* = significativo em nível de 1% de probabilidade

\* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela 25 – Comparação entre os valores médios do coeficiente de arraste para os três produtos e para as diferentes formas da coluna com secção de 40 mm de *diâmetro*\*.

Médias de coeficiente de arraste para o fator Produto	
Feijão	2,73025 b
Milho	3,73222 a
Soja	2,07080 c
Médias de coeficiente de arraste para o fator Forma da Coluna	
Circular	3,87014 a
Quadrada	1,871872 b

DMS1 = 0,24110

DMS2 = 0,16381

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey em nível de 1% de probabilidade.

Tabela 26 – Valores médios do coeficiente de arraste para a interação entre o fator produto (F1) e o fator forma da secção (F2) para a secção de 40 mm de *diâmetro*\*.

Produto	Secção	
	Circular	Quadrada
Feijão	3,5827bA	1,8778bB
Milho	5,2436aA	2,2209aB
Soja	2,7841cA	1,3575cB

DMS para colunas = 0,3410

DMS para linhas = 0,2837

Classificação c/ letras minúsculas

Classificação c/ letras maiúsculas

MG = 2,84443

CV% = 11,12000

Obs: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey em nível de 1% de probabilidade.

## 4.3.2.2.4 Coeficiente de arraste na secção de 30 mm

Tabela 27- Análise de variância do coeficiente de arraste no ar, em coluna de queda para os três produtos (F1) e diferentes formas da secção (F2), observadas com a utilização da coluna de 30 mm de *diâmetro*\*.

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Produto (F 1)	2	216,19511	108,09756	49,0537 **
Forma da coluna (F 2)	1	1113,83289	1113,83289	505,4476 **
Int. F 1 x F 2	2	80,01946	40,00973	18,1561 **
Resíduo	54	118,99746	2,20366	
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>1529,04492</b>		

\*\* = significativo em nível de 1% de probabilidade

\* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela 28 – Comparação entre os valores médios do coeficiente de arraste para os três produtos e para as diferentes formas da coluna com secção de 30 mm de *diâmetro*\*.

Médias de coeficiente de arraste para o fator Produto	
Feijão	8,05349 b
Milho	9,94002 a
Soja	5,31634 c
Médias de coeficiente de arraste para o fator Forma da Coluna	
Circular	12,07854 a
Quadrada	3,46136 b
DMS1 = 1,13154	
DMS2 = 0,76881	

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey em nível de 1% de probabilidade.

Tabela 29 – Valores médios do coeficiente de arraste para a interação entre o fator produto (F1) e o fator forma da secção (F2) para a secção de 30 mm de *diâmetro*\*.

Produto	Secção	
	Circular	Quadrada
Feijão	12,5403bA	3,5666abB
Milho	15,5654aA	4,3147aB
Soja	8,1299cA	2,5028bB

DMS para colunas = 1,6002

Classificação c/ letras minúsculas

MG = 7,76995

DMS para linhas = 1,3316

Classificação c/ letras maiúsculas

CV% = 19,10529

Obs: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey em nível de 1% de probabilidade.

## 4.3.2.2.1 Coeficiente de arraste na secção de 20 mm

Tabela 30- Análise de variância do coeficiente de arraste no ar, em coluna de queda para os três produtos (F1) e diferentes formas da secção (F2), observadas com a utilização da coluna de 20 mm de *diâmetro*\*.

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Produto (F 1)	2	5897,96240	2948,98120	36,9437 **
Forma da coluna (F 2)	1	1948,13647	1948,13647	24,4055 **
Int. F 1 x F 2	2	1214,83862	607,41931	7,6095 **
Resíduo	54	4310,47266	79,82357	
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>13371,41016</b>		

\*\* = significativo em nível de 1% de probabilidade

\* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela 31 – Comparação entre os valores médios do coeficiente de arraste para os três produtos e para as diferentes formas da coluna com secção de 20 mm de *diâmetro*\*.

Médias de coeficiente de arraste para o fator Produto	
Feijão	25,12950 b
Milho	36,49220 a
Soja	12,22283 c
Médias de coeficiente de arraste para o fator Forma da Coluna	
Circular	30,31299 a
Quadrada	18,91669 b

DMS1 = 6,81026

DMS2 = 4,62715

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey em nível de 1% de probabilidade.

Tabela 32 – Valores médios do coeficiente de arraste para a interação entre o fator produto (F1) e o fator forma da secção (F2) para a secção de 20 mm de *diâmetro*\*.

Produto	Secção	
	Circular	Quadrada
Feijão	29,2970bA	20,9620aB
Milho	48,3048aA	24,6796aB
Soja	13,3371cA	11,1085bA

DMS para colunas = 9,6312

DMS para linhas = 8,0145

Classificação c/ letras minúsculas

Classificação c/ letras maiúsculas

MG = 24,61484

CV% = 36,29682

Obs: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey em nível de 1% de probabilidade.

### 4.3.2 Efeito de parede

O efeito de parede, também chamado de efeito devido à presença de fronteira rígida, está geralmente ligado à relação entre o diâmetro da partícula e o *diâmetro\** da coluna,  $D_p/D_C$  e é designado pelo adimensional  $\beta$ . Segundo a literatura, o efeito de parede se faz sentir, no regime de Stokes para valores de  $\beta$  menores do que 0,005, ou seja, *diâmetro\** da coluna 200 vezes maior do que o da partícula esférica, enquanto que no regime de Newton essa relação é bem menor, *diâmetro\** da coluna 4 vezes menor do que o diâmetro da partícula esférica ( $\beta < 0,25$ ). Considerando que, no estudo em questão, os grãos têm esfericidade inferior à unidade, esta relação deveria ser bem maior. Observando as Tabelas 33 a 35, constata-se que a velocidade terminal em queda livre foi alcançada apenas para a soja, com a coluna de secção quadrada de 60mm de *diâmetro\**, conclui-se também que, para se obter a velocidade terminal em queda livre desses produtos  $\beta$  deva ser menor do que 0,1173 para corpos não esféricos, podendo haver ainda uma relação diferente conforme a esfericidade do produto. Estudos relacionando a esses mesmos grãos necessitariam ser feitos com *diâmetros\** da coluna de queda maiores do que os estudados nesta pesquisa, para se poder definir, com precisão, o valor de  $\beta$  necessário para se eliminar o efeito de parede em cada caso.

Analisando ainda as mesmas tabelas, verifica-se que a partir de um valor  $\beta$  acima 0,18, para os três tipos de grãos, qualquer variação causa uma variação consideravelmente grande no coeficiente de arraste, com reflexo na velocidade terminal, que responde de forma inversa. Comparando-se os valores dos coeficientes de arraste obtidos com  $\beta > 0,18$  com a faixa de  $C_D$  correspondente na curva clássica (Figura 3) percebe-se que estes coeficientes de arraste são típicos da região transiente com alguns deles na região de Stokes. Porém tem-se para esses valores, velocidades bem superiores a  $1\text{m.s}^{-1}$ .

Nas Figuras 14, 15 e 16 encontram-se os valores de velocidade terminal experimental de feijão, milho e soja em função de  $\beta$ . Percebe-se por essas figuras que para o feijão e para a soja as velocidades obtidas com as duas colunas começam a se aproximar uma da outra a partir de  $\beta < 0,125$ , ou seja começa a desaparecer o efeito de

parede. Para o milho esta relação não chegou a ser estabelecida, mas percebe-se uma tendência para que isto ocorra a partir de  $\beta < 0,1$ .

Tabela 33 - Velocidades terminais e coeficientes de arraste em função da relação  $D_p/D_c$  dos grãos de feijão para secção circular e para secção quadrada.

<b>FEIJÃO - SECÇÃO CIRCULAR</b>		
$\beta$ (Adimensional)	$C_D$ obtido da curva clássica ( $CN_R^2 \times N_R$ )	$V_{experimental}$ (m/s)
$D_p/D_c$		
Queda livre	1,8968	16,736
0,1173	0,5220	12,75
0,1408	1,1124	8,74
0,1760	3,5830	4,88
0,2347	12,5404	2,64
0,3520	29,2970	1,77

<b>FEIJÃO - SECÇÃO QUADRADA</b>		
$\beta$ (Adimensional)	$C_D$ obtido da curva clássica ( $CN_R^2 \times N_R$ )	$V_{experimental}$ (m/s)
$D_p/D_c$		
Queda livre	1,8968	16,736
0,1173	0,5037	12,99
0,1408	0,7870	10,4
0,1760	1,8780	6,72
0,2347	3,5666	4,91
0,3520	20,9620	2,09

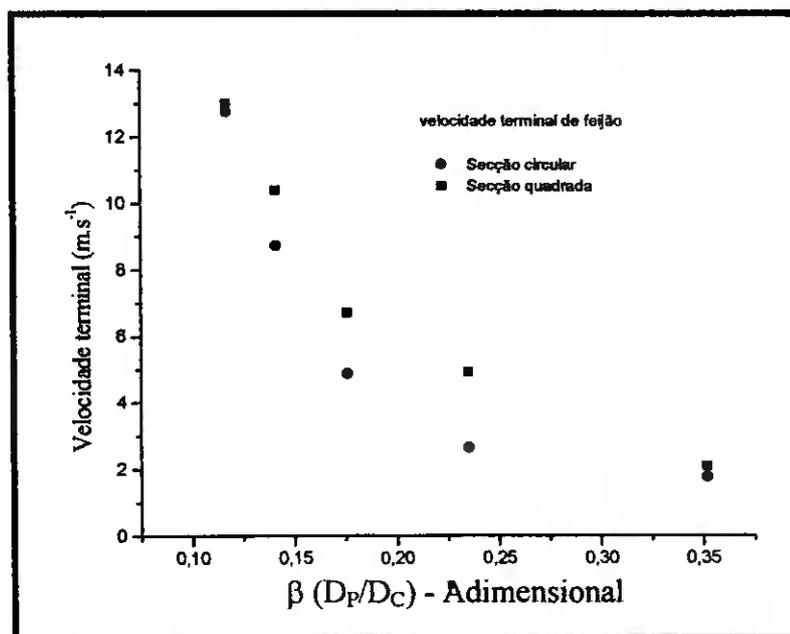


Figura 14- Velocidade terminal em função da relação  $D_p/D_c$  ( $\beta$ ) para feijão.

Tabela 34 - Velocidades terminais e coeficientes de arraste em função da relação  $D_p/D_c$  dos grãos de milho para secção circular e para secção quadrada.

<b>MILHO - SECÇÃO CIRCULAR</b>		
$\beta$ (Adimensional)	$C_D$ obtido da curva clássica ( $C_{N_R}^2 \times N_R$ )	$V_{experimental}$ (m/s)
Queda livre	2,3355	18,051
0,1173	0,6853	10,42
0,1408	1,4023	7,28
0,1760	5,2436	3,77
0,2347	15,5654	2,19
0,3520	48,3048	1,29

<b>MILHO - SECÇÃO QUADRADA</b>		
$\beta$ (Adimensional)	$C_D$ obtido da curva clássica ( $C_{N_R}^2 \times N_R$ )	$V_{experimental}$ (m/s)
Queda livre	2,3355	18,05
0,1173	0,6402	10,77
0,1408	0,9295	8,96
0,1760	2,2209	5,80
0,2347	4,3146	4,16
0,3520	24,6795	1,75

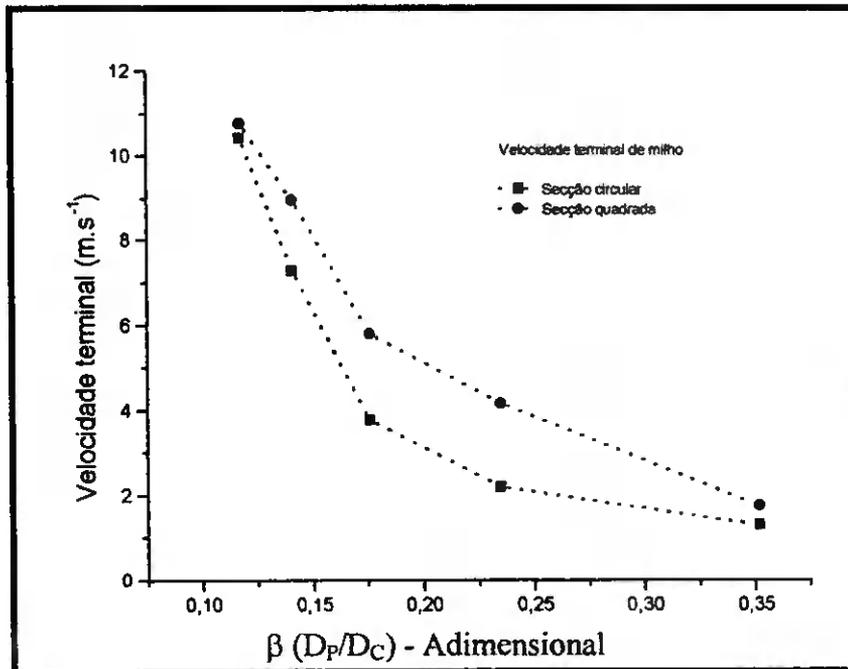


Figura 15- Velocidade terminal em função da relação  $D_p/D_c$  ( $\beta$ ) para milho.

Tabela 35 - Velocidades terminais e coeficientes de arraste em função da relação  $D_p/D_c$  dos grãos de soja para secção circular e para secção quadrada.

<b>SOJA - SECÇÃO CIRCULAR</b>		
$\beta$ (Adimensional)	$C_D$ obtido da curva clássica ( $CN_R^2 \times N_R$ )	$V_{experimental}$ (m/s)
$D_p/D_c$		
Queda livre	0,9262	14,76
0,1173	0,4301	14,65
0,1408	0,9057	10,1
0,1760	2,7841	5,79
0,2347	8,1299	3,39
0,3520	13,3371	2,7

<b>SOJA - SECÇÃO QUADRADA</b>		
$\beta$ (Adimensional)	$C_D$ obtido da curva clássica ( $CN_R^2 \times N_R$ )	$V_{experimental}$ (m/s)
$D_p/D_c$		
Queda livre	0,9262	14,76
0,1173	0,4217	14,81
0,1408	0,6475	11,94
0,1760	1,3574	8,26
0,2347	2,5028	6,08
0,3520	11,1085	2,9

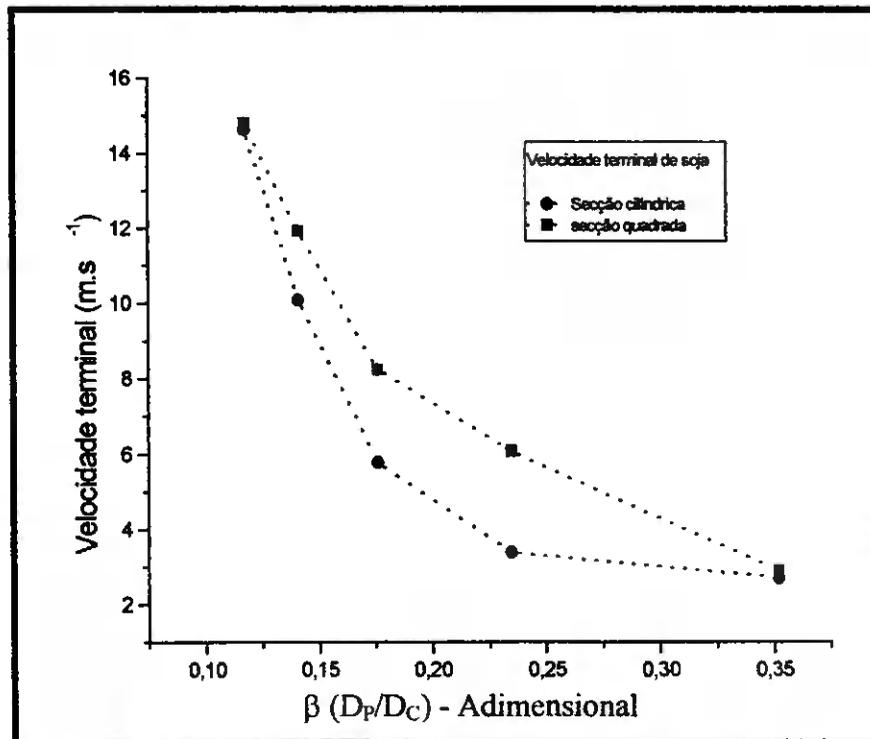


Figura 16- Velocidade terminal em função da relação  $D_p/D_c$  ( $\beta$ ) para soja

## 5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa experimental onde se estudou os parâmetros aerodinâmicos de feijão, milho e soja em função das suas características físicas de tamanho e forma, em dutos de ar de diferentes tamanhos (diâmetro/lado com 20, 30, 40, 50 e 60mm) e formas circular e também quadrada, concluiu-se que:

### Características físicas

- A esfericidade de feijão, milho e soja foram 0,7; 0,61 e 0,90, respectivamente.
- O milho, entre os três tipos de grãos, é o que possui as maiores dimensões (diâmetro equivalente, área projetada e volume) e a forma mais irregular.

### Parâmetros aerodinâmicos

- As equações de predição da velocidade terminal propostas por MOHSENIN, PETTY JOHN & CHISTIANSEN, e MASSARANI, não oferece uma boa aproximação aos dados experimentais, obtidas para feijão e milho.
- A equação citada por MOHSENIN prediz com boa aproximação a velocidade terminal da soja obtida experimentalmente.
- A equação proposta por MASSARANI para velocidade terminal é a que mais se aproxima dos valores experimentais de feijão e milho, mas reduzem muito as diferenças relativas entre as velocidades dos diferentes tipos de grãos e por isto seu uso é inadequado para fins de seleção e demais fases de processamento que solicitem precisão.
- A velocidade terminal em queda livre foi conseguida apenas na coluna de secção quadrada de 60mm de diâmetro para feijão e soja.
- Não se pode afirmar que se tenha obtido velocidade terminal em queda livre para o milho. Ficou evidenciado o efeito de parede, inclusive para a determinação da velocidade terminal na coluna de secção quadrada de 60 mm.

- Entre todos os tamanhos de colunas testadas, e tipos de grãos, obteve-se maior velocidade terminal com a coluna de secção quadrada.
- Existe uma tendência à estabilização do coeficiente de arraste de todos os produtos a partir do *diâmetro\** de 50 mm, principalmente na secção quadrada e mais particularmente para a soja.
- Apenas para soja obteve-se coeficiente de arraste (0,42) típico do regime de Newton, muito próximo do  $C_D$  para esfera (0,44) nessa região de transporte.
- O grão de milho, quando submetido a fluxo de ar em colunas cuja relação  $\beta$  ( $D_p/D_c$ )  $\geq 0,3520$ , muda sua orientação, passando a adotar uma posição cuja menor área projetada permanece perpendicular à direção do fluxo.
- Para se obter a velocidade terminal em queda livre de produtos com fator de esfericidade na faixa estudada (0,60 a 0,9) o valor de  $\beta$  deve ser menor do que 0,1173.
- As cartas existentes na literatura para o cálculo do coeficiente de arraste feito com base nas características físicas dos grãos (feijão, milho e soja) atribuem coeficientes de arraste típicos da região transiente com alguns deles na região de Stokes. Porém tem-se para esses produtos valores velocidades bem superiores a  $1\text{m.s}^{-1}$ .
- As equações e cartas existentes na literatura para expressar o transporte de partículas não foram adequadas ao estudo de transporte e seleção dos grãos.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATAÍDE, C. H., BARROZO, M.A.S., PEREIRA, F.A.R. Estudo do movimento de partículas em soluções de hidroxietilcelulose: Efeito de parede e coeficiente de arraste. In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, Anais... Uberlândia- MG, v1., p.29-34, 1996.

BENEDETTI, B. C.; JORGE, J. T. Influência da variação do teor de umidade sobre a velocidade terminal de vários grãos. *Revista de Engenharia Agrícola*, v.12, n. p.102-118, 1992.

BILANSKI, W. K.; COLINS, S. H.; CHU, P. Aerodynamic properties of seed grains. *Agricultural Engineering*. v. 43, n.4, p.216-219, 1962.

BILANSKI, W. K.; LSL, R. The behavior of threshed materials in vertical wind tunnel. *Transition of the ASAE*, p.411-413, 1965.

BRAGA, M. E. D. **Estudo Experimental dos fundamentos do transporte hidráulico de laranjas**. 1997. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária (Brasília, DF). **Regras para análises de sementes**, 365p. 1992.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; FERNANDES FILHO, J. G. Determinação da porosidade de sementes de mamona (*Ricinus communis* L.) e algaroba (*Prosopis juliflora* (SW) DC) *Revista Nordestina de Armazenagem*. Campina Grande, PB, v.1, n.1, p.55-64, 1984.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; ARAGÃO, R. F.; SANTANA, E. F.; SILVA, F. A. S. Estudo da morfologia geométrica em grãos. **Revista Nordestina de Armazenagem**, Campina Grande-PB. v. 3, n. 1, p. 3-30, 1986.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Efeitos da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada estacionaria, sobre a armazenabilidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade "carioca": Avaliação experimental, modelagem e simulação.** 1997. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

CORRÊA P. C.; GUIMARAES W. T.; AFONSO JÚNIOR P. C. Efeito do nível e do tamanho de impurezas nas propriedades físicas da massa granular de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p.97 2001.

CURRAY, J. K. **Analysis of sphericity and roundness of quartz grains.** 1951. 56 f. Thesis M.Sc. Pennsylvania State University, Pennsylvania.

DE BAERDEMAEKER, J. G.; SEGERLIND, L. J. Velocidade terminal. UFV. 1974. Disponível em: <<http://www.ufv.br/poscolheita/colheita/café/indice.htm>> Acesso em: 29 jul. 2003.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos.** LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1998. 662 p.

FRANCISCO, F. G.; USBERTI, R. Propriedades físicas de cultivares de feijão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., Salvador. **Anais...**, Salvador, BA: SBEA, CD - ROM, 2002.

GOVIER, G. W.; AZIZ, K. **The flow of complex. Mixture in pipes,** Liton Education publishing Inc., New York City, p. 4-13, 1972.

HENDERSON, S. M.; PERRY, R. L. **Agricultural Process Engineering**. Edwards Brothers, inc., Ann Arbor, Michigan, 1952.

JAYAS, D. S., ALAGUSUNDARAM, D.; IRVINE, D. A. Resistance to airflow through bulk flax seed as affected by moisture content, direction of airflow and foreign material. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v.32, n. 2, p. 279-285, 1991.

LAPLLE, C. E. **Fluid particle mechanics**. University of Delaware, Newark. 1956.

MASSARANI, G. **Alguns aspectos da Separação Sólido-Fluido; Tópicos especiais em sistemas particulados**. v. 2, cap. 1, 1986

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica da partícula sólida; Tópicos especiais em sistemas particulados**. v. 3, 1990.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York, Gordon and Breach Science, 1970. v. 1, 734 p.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1978 2<sup>nd</sup> ed. 742 p.

PETTYJOHN, E. S.; CHRISTIANSEN, E. B. **Effect of Particle Shape on Free-Settling Rates of Isometric Particles**. 1948, 44, 156.

PÊ P. R.; DUARTE M. E. M; CAVALCANTI MATA M. E. R. M. **Variação das características físicas de feijão macassar em função do teor de umidade**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32. Goiânia, GO, **Anais...**, Goiânia, GO: SBEA, CD - ROM, 2002.

PORTELA J. A. Transporte de grãos sob pressão em dutos de pequeno diâmetro: uma solução para semeadoras pneumáticas. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v. 8, n. 4. p. 219-231, 2000.

QUENOVILLE, M. H. *Associated Measurements*. Butter Worth Sprinter, Ltd. London, 1952.

SANTANA, M. de F. S. de *Separação e seleção de amendoim utilizando o princípio da velocidade terminal*. 1999. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

SASSERON, J. L. *Características dos grãos armazenados*. Viçosa, MG: CENTREINAR, 1980. 65 p.

SCHIOZER, D. *Mecânica dos fluidos*. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 629 p.

SILVA, F. de A. S. e.; Azevedo, C. A. V. de. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v. 4, n. 1, p 71-78, 2002.

SILVA F. S. da; CORRÊA, P. C.; ALMEIDA - RIGUEIRA.R. J.; VIEIRA, S. M. J. Análise da variação das propriedades físicas de diferentes variedades de arroz sequeiro e irrigado durante o processo de secagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., Salvador, BA, *Anais...*, Salvador, BA: SBEA, CD - ROM, 2002.

SILVA F. S. da; CORRÊA, P. C.; JÚNIOR, P. C. A.; GONELI, A. L. D. Análise da variação da velocidade terminal de grãos de sorgo e milheto em função do teor de umidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., Goiânia, GO, *Anais...*, UFG: SBEA, CD - ROM, 2003.

SOUSA L. V. S **Propriedades Físicas de grãos de girassol relacionadas à Armazenagem**. 2001. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP.

SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E. E ROHRBACH, R. P. **Engineering principles of agricultural machines**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers. 1993. 601p.

TORRES, D. L.; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Estudo comparativo das características físicas de milho retirado de diferentes partes da espiga**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., Goiânia, GO, Anais..., UFG: SBEA, CD - ROM, 2003.

UHLHERR, P. H. T.; CHHABRA, R. P. Wall Effect for the Fall of Spheres in Cylindrical Tubes at High Reynolds Number. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 73, p. 918-923, December, 1995.

VENNARD, J. K. – **Fluid mechanics**. 4<sup>th</sup> Ed. New York John Wiley and Sons, Inc.; 1961.

VIEIRA, C. **O feijão em cultivos consorciados**. Viçosa: Editora UFV. 1985. 134 p.

VOGT, E. G.; WHITE, R. R. Friction in the flow of suspensions granular solids in gases through pipe. **Industrial and Engineering Chemistry**. v. 40, n. 9, p. 1731-1738, 1948.

# ANEXO A

Tabela A1 – Diâmetros mutuamente perpendiculares de feijão.

Medidas para cálculos dos diâmetros da esfera equivalente para o Feijão					
Grãos	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Multiplicação das medidas	$\sqrt[3]{a \times b \times c}$
Grão 1	10,47	7,04	4,75	350,12	7,05
Grão 2	9,28	7,1	5,23	344,59	7,01
Grão 3	10,18	7,31	5,15	383,24	7,26
Grão 4	10,78	7,36	5,15	408,60	7,42
Grão 5	8,97	6,51	5,01	292,56	6,64
Grão 6	10,28	7,16	5,38	395,99	7,34
Grão 7	10,6	7,26	4,62	355,54	7,08
Grão 8	10,17	6,54	4,44	295,31	6,66
Grão 9	10,2	6,74	4,24	291,49	6,63
Grão 10	9,93	7,58	5,19	390,65	7,31
Média	10,08	7,06	4,92	350,81	7,04
Desvio Padrão	0,5656	0,3575	0,3810	44,81	0,3049

Tabela A2 – Diâmetros mutuamente perpendiculares de milho.

Medidas para cálculos dos diâmetros da esfera equivalente para o Milho					
Grãos	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Multiplicação das medidas	$\sqrt[3]{a \times b \times c}$
Grão 1	12,87	8,50	4,18	457,27	7,70
Grão 2	12,28	8,71	3,84	410,72	7,43
Grão 3	12,03	8,19	4,20	413,81	7,45
Grão 4	11,85	8,82	4,36	455,70	7,69
Grão 5	12,75	8,58	4,39	480,24	7,83
Grão 6	13,37	8,66	4,04	467,77	7,76
Grão 7	12,58	8,38	4,32	455,41	7,70
Grão 8	12,08	8,42	3,60	366,17	7,15
Grão 9	13	8,55	3,67	407,92	7,42
Grão 10	11,72	8,47	4,17	413,95	7,45
Média	12,45	8,53	4,08	432,90	7,56
Desvio Padrão	0,5444	0,1798	0,2833	35,54	0,2098

Tabela A3 – Diâmetros mutuamente perpendiculares da soja.

Medidas para cálculos dos diâmetros da esfera equivalente para a Soja					
Grãos	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Multiplicação das medidas	$\sqrt[3]{a \times b \times c}$
Grão 1	7,50	6,81	5,84	298,28	6,68
Grão 2	7,11	6,64	5,65	266,74	6,44
Grão 3	7,51	6,98	5,97	312,94	6,80
Grão 4	7,44	6,7	5,71	284,63	6,58
Grão 5	7,63	6,6	5,73	288,55	6,61
Grão 6	8,17	7,35	6,50	390,32	7,30
Grão 7	7,36	6,87	5,89	297,82	6,68
Grão 8	7,03	6,66	5,67	265,47	6,43
Grão 9	7,23	6,60	5,72	272,95	6,48
Grão 10	7,27	6,85	5,71	284,35	6,57
Média	7,42	6,80	5,84	296,20	6,66
Desvio Padrão	0,3217	0,2303	0,2540	36,26	0,2553

# ANEXO B

Tabela B1 – Análise de variância da velocidade terminal em coluna de queda de 60mm de tamanho, para diferentes produtos (F1) e em colunas de queda com diferentes formas.

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Produto (F 1)	2	172,12285	86,06142	41,2122 **
Forma da coluna (F 2)	1	5,10332	5,10332	2,4438 ns
Int. F 1 x F 2	2	3,32559	1,66279	0,7963 ns
Resíduo	54	112,76563	2,08825	
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>293,31738</b>		

\*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela B2 - Valores médios das velocidades terminais, em coluna de queda de 60mm de tamanho, para diferentes produtos e diferentes formas de colunas de queda.

Produto	Vt (m/s)
Feijão	12,37000 b
Milho	10,59500 c
Soja	14,73000a

Tipo de secção (mm)	Vt (m/s)
Circular	12,27333a
Quadrada	12,85667a

DMS - Forma da secção = 1,10151 DMS - Tamanho da secção = 0,74841

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

MG = 12,56500

CV% = 11,50082

Tabela B3 - Análise de variância da velocidade terminal em coluna de queda de 50mm de tamanho, para diferentes produtos (F1) e em colunas de queda com diferentes formas.

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Produto (F 1)	2	84,09951	42,04976	352,1404 **
Forma da coluna (F 2)	1	44,71930	44,71930	374,4962 **
Int. F 1 x F 2	2	0,09867	0,04933	0,4131 ns
Resíduo	54	6,44824	0,11941	
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>135,36572</b>		

\*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela B4 - Valores médios das velocidades terminais, em coluna de queda de 50mm de tamanho, para diferentes produtos e diferentes formas de colunas de queda.

Produto	Vt (m/s)
Feijão	9,57000 b
Milho	8,12000 c
Soja	11,02000a

Tipo de secção (mm)	Vt (m/s)
Circular	8,70667 b
Quadrada	10,43333a

DMS - Forma da secção = 0,26340 DMS - Tamanho da secção = 0,17897

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

MG = 9,57000

CV% = 3,61087

Tabela B5 - Análise de variância da velocidade terminal em coluna de queda de 40mm de tamanho, para diferentes produtos (F1) e em colunas de queda com diferentes formas.

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Produto (F 1)	2	50,32256	25,16128	293,7067 **
Forma da coluna (F 2)	1	66,99183	66,99183	781,9932 **
Int. F 1 x F 2	2	1,04489	0,52244	6,0985 **
Resíduo	54	4,62607	0,08567	
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>122,98535</b>		

\*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela B6 - Valores médios das velocidades terminais, em coluna de queda de 40mm de tamanho, para diferentes produtos e diferentes formas de colunas de queda.

Produto	Vt (m/s)
Feijão	5,80000 b
Milho	4,78500 c
Soja	7,02500a

Tipo de secção (mm)	Vt (m/s)
Circular	4,81333 b
Quadrada	6,92667a

DMS - Forma da secção = 0,22310 DMS - Tamanho da secção = 0,15159

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela B7 - Valores médios da velocidade terminal em coluna de queda de 40mm de tamanho para a interação entre os diferentes produtos e as diferentes formas de coluna de queda.

Produto	Secção	
	Circular	Quadrada
Feijão	4,8800bB	6,7200bA
Milho	3,7700cB	5,8000cA
Soja	5,7900aB	8,2600aA

DMS para colunas = 0,3155      DMS para linhas = 0,2626  
 Classificação c/ letras minúsculas      Classificação c/ letras maiúsculas  
 MG = 5,87000      CV% = 4,989622

Tabela B8 - Análise de variância da velocidade terminal em coluna de queda de 30mm de tamanho, para diferentes produtos (F1) e em colunas de queda com diferentes formas.

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Produto (F 1)	2	24,76799	12,38400	173,6481 **
Forma da coluna (F 2)	1	80,04160	80,04160	1122,3412 **
Int. F 1 x F 2	2	1,30784	0,65391	9,1691 **
Resíduo	54	3,85110	0,07132	
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>109,96851</b>		

\*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela B9 - Valores médios das velocidades terminais, em coluna de queda de 30mm de tamanho, para diferentes produtos e diferentes formas de colunas de queda.

Produto	Vt (m/s)
Feijão	3,775000 b
Milho	3,17500 c
Soja	4,73500a

Tipo de secção (mm)	Vt (m/s)
Circular	2,74000 b
Quadrada	5,05000a

DMS - Forma da secção = 0,20356      DMS - Tamanho da secção = 0,13831

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela B10 - Valores médios da velocidade terminal em coluna de queda de 30mm de tamanho para a interação entre os diferentes produtos e as diferentes formas de coluna de queda.

Produto	Secção	
	Circular	Quadrada
Feijão	2,6500bB	4,9100bA
Milho	2,1900cB	4,1600cA
Soja	3,3900aB	6,0800aA

DMS para colunas = 0,2879      DMS para linhas = 0,2396  
 Classificação c/ letras minúsculas      Classificação c/ letras maiúsculas  
 MG = 3,89500      CV% = 6,85627

Tabela B11 - Análise de variância da velocidade terminal em coluna de queda de 20mm de tamanho, para diferentes produtos (F1) e em colunas de queda com diferentes formas.

Fonte de Variação	Análise de Variância			
	G. L.	S. Q.	Q. M.	F
Produto (F 1)	2	17,08932	8,54466	108,2123 **
Forma da coluna (F 2)	1	1,60063	1,60063	20,2709 **
Int. F 1 x F 2	2	0,16936	0,08468	1,0724 ns
Resíduo	54	4,26395	0,07896	
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>23,12326</b>		

\*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela B12 - Valores médios das velocidades terminais, em coluna de queda de 20mm de tamanho, para diferentes produtos e diferentes formas de colunas de queda.

Produto	Vt (m/s)
Feijão	1,93000 b
Milho	1,52000 c
Soja	2,80000a

Tipo de secção (mm)	Vt (m/s)
Circular	1,92000 b
Quadrada	2,24667a

DMS - Forma da secção = 0,21419      DMS - Tamanho da secção = 0,14553

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

MG = 2,08333

CV% = 13,48808

# ANEXO C

Tabela 1 C - Análise de variância do coeficiente de arraste de feijão, em coluna de queda com diferentes formas (F1) e diferentes tamanhos da secção (F2).

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Forma da coluna (F 1)	1	374,73752	374,73752	21,5240**
Tamanho da secção (F 2)	4	8511,61816	2127,90454	122,2215**
Int. F 1 x F 2	4	390,39401	97,59850	5,6058**
Resíduo	90	1566,92017	17,41022	
<b>Total</b>	<b>99</b>	<b>10843,66992</b>		

\*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela 2 C - Valores médios dos coeficientes de arraste do feijão, para as diferentes formas e diferentes tamanhos da secção.

Forma da secção	$C_D$ - Feijão
Circular	9,41103a
Quadrada	5,53941 b

Tamanho da secção (mm)	$C_D$ - Feijão
60	0,51282 c
50	0,94966 c
40	2,73027 c
30	8,05385 b
20	25,12950a

DMS - Forma da secção = 1,65815    DMS - Tamanho da secção = 3,67607

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 3 C - Valores médios do coeficiente de arraste para a interação entre a forma de coluna de queda e o tamanho da coluna de queda para grãos de feijão.

Forma da coluna de queda	Tamanho da secção (mm)				
	60	50	40	30	20
Secção circular	0,5220 aC	1,1124 aC	3,5827 aC	12,5411 aB	29,2970 aA
Secção quadrada	0,5037 aB	0,7869 aB	1,8778 aB	3,5666 bB	20,9620 bA

DMS para colunas = 3,7077

DMS para linhas = 5,1987

Classificação c/ letras minúsculas

Classificação c/ letras maiúsculas

MG = 7,47522

CV% = 55,81853

Obs: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 4 C - Análise de variância do coeficiente de arraste de milho, em coluna de queda com diferentes formas (F1) e diferentes tamanhos da secção (F2).

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Forma da coluna (F 1)	1	1475,84180	1475,84180	49,0752**
Tamanho da secção (F 2)	4	18111,13672	4527,78418	150,5593**
Int. F 1 x F 2	4	1994,62329	498,65582	16,5815**
Resíduo	90	2706,57788	30,07309	
<b>Total</b>	<b>99</b>	<b>24288,17969</b>		

\*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela 5 C - Valores médios dos coeficientes de arraste do milho, para as diferentes formas e diferentes tamanhos da secção.

Forma da secção	C <sub>D</sub> - Milho
Circular	14,24029 a
Quadrada	6,55696 b

Tamanho da secção (mm)	C <sub>D</sub> - Milho
60	0,66274 c
50	1,16589 c
40	3,73222 c
30	9,94007 b
20	36,49220a

DMS - Forma da secção = 2,17927    DMS - Tamanho da secção = 4,83137

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 6 C - Valores médios do coeficiente de arraste para a interação entre a forma de coluna de queda e o tamanho da coluna de queda para grãos de milho.

Forma da coluna de queda	Medida efetiva da coluna de queda (mm)				
	60	50	40	30	20
Secção circular	0,6853aC	1,4023aC	5,2436aC	15,5654aB	48,3048aA
Secção quadrada	0,6402aB	0,9294aB	2,2209aB	4,3148bB	24,6796bA

DMS para colunas = 4,8730

Classificação c/ letras minúsculas

MG = 10,39862

DMS para linhas = 6,8326

Classificação c/ letras maiúsculas

CV% = 52,73672

Obs: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 7 C - Análise de variância do coeficiente de arraste de soja, em coluna de queda com diferentes formas (F1) e diferentes tamanhos da secção (F2).

Fonte de Variação	G. L.	Análise de Variância		
		S. Q.	Q. M.	F
Forma da coluna (F 1)	1	91,63711	91,63711	51,0480 **
Tamanho da secção (F 2)	4	1921,04224	480,26056	267,5373 **
Int. F 1 x F 2	4	102,36519	25,59130	14,2561 **
Resíduo	90	161,56046	1,79512	
<b>Total</b>	<b>99</b>	<b>2276,60498</b>		

\*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Tabela 8 C - Valores médios dos coeficientes de arraste da soja, para as diferentes formas e diferentes tamanhos da secção.

Forma da secção	C <sub>D</sub> - Soja
Circular	5,12213a
Quadrada	3,20759 b

Tamanho da secção (mm)	C <sub>D</sub> - Soja
60	0,42592 d
50	0,77673 d
40	2,08248 c
30	5,31633 b
20	12,22283 a

DMS - Forma da secção = 0,53244    DMS - Tamanho da secção = 1,18040

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 9 C - Valores médios do coeficiente de arraste para a interação entre a forma de coluna de queda e o tamanho da coluna de queda para grãos de soja.

Forma da coluna de queda	Medida efetiva da coluna de queda (mm)				
	60	50	40	30	20
Secção circular	0,4301aD	0,9060aD	2,8075aC	8,1299aB	13,3371aA
Secção quadrada	0,4217aC	0,6475aC	1,3574bBC	2,5028bB	11,1085bA

DMS para colunas = 1,1906    DMS para linhas = 1,6693  
Classificação c/ letras minúsculas    Classificação c/ letras maiúsculas  
MG = 4,16486    CV% = 32,16964