

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**MESTRADO**

**SEPARAÇÃO E SELEÇÃO DE AMENDOIM UTILIZANDO  
O PRINCÍPIO DA VELOCIDADE TERMINAL**

**DISSERTAÇÃO**

**MARISTELA DE FÁTIMA SIMPLICIO DE SANTANA**

**Campina Grande – Paraíba**  
**Julho – 1999**

---



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

*Separação e Seleção de Amendoim  
Utilizando o Princípio de Velocidade Terminal*

*Maristela de Fátima Simplicio de Santana*

Campina Grande, PB  
1999

*Separação e Seleção de Amendoim*

*Utilizando o Princípio de Velocidade Terminal*

*Maristela de Fátima Simplicio de Santana*

*Separação e Seleção de Amendoim  
Utilizando o Princípio de Velocidade Terminal*

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

**Orientadora: Maria Elita Duarte Braga**

Campina Grande, PB  
1999

*Separação e Seleção de Amendoim  
Utilizando o Princípio de Velocidade Terminal*

*Maristela de Fátima Simplicio de Santana*

Dissertação aprovada em 02 de julho de 1999

*M. Elita*

---

**Prof. Dra. Maria Elita Duarte Braga**  
Orientadora

*Mário Eduarda*

---

**Prof. Dr. Mário Eduardo Moreira Cavalcanti Mata**  
Examinador

*Odilon*

---

**Dr. Odilon Remy Ribeiro Ferreira da Silva**  
Examinador

Campina Grande, PB  
1999

*A minha mãe, Inácia Simplicio de Santana.*

*e ao meu esposo Max César de Araújo.*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

*A Deus, pelas inúmeras possibilidades de caminhos oferecidos na vida.*

*À minha mãe, Inácia Simplicio de Santana e aos meus familiares,  
pelo apoio incondicional nos caminhos escolhidos.*

*Ao meu esposo, Max César de Araújo, por caminhar comigo.*

*À minha orientadora, Maria Elita Duarte Braga,  
por me incentivar no caminho profissional e pessoal.*

*À CAPES, pelo apoio financeiro.*

*À Embrapa Algodão, especialmente a pessoa de Odilon Reny Ribeiro Ferreira da Silva,  
pela amizade e apoio na realização desta pesquisa.*

*Ao professor Mário Eduardo R.M. Cavalcanti Mata, pelo apoio,  
ensinamentos e pela contribuição à viabilização deste trabalho.*

*Aos professores, que direta ou indiretamente contribuíram para o aprendizado aplicado  
neste trabalho.*

*Aos amigos, que caminharam comigo nesta jornada, em especial ao amigo Benedito  
Paiva e Alessandra Almeida.*

*À Universidade Estadual do Piauí, em especial aos alunos de biologia,  
pela compreensão e apoio.*

## Sumário

<b>Resumo</b> .....	i
<b>Summary</b> .....	ii
<b>Lista de figuras</b> .....	iii
<b>Lista de tabelas</b> .....	v
<b>Nomenclatura</b> .....	vi
<b>Capítulo I – Introdução</b> .....	1
1.1. Generalidades .....	1
1.1.1. Objetivos .....	3
<b>Capítulo II - Características físicas do amendoim</b> .....	4
2.1. Introdução .....	4
2.1.1. Objetivo .....	4
2.2. Revisão Bibliográfica .....	5
2.2.1. Teor de umidade .....	5
2.2.2. Forma e tamanho .....	5
2.2.3. Volume .....	8
2.2.4. Massa específica .....	9
2.2.5. Circularidade .....	10
2.2.6. Esfericidade .....	11
2.2.7. Área superficial .....	14
2.2.8. Porosidade .....	15
2.2.9. Ângulo de repouso .....	17
2.3. Materiais e Métodos .....	18
2.3.1. Obtenção do material de estudo .....	18
2.3.2. Teor de umidade .....	23
2.3.3. Tamanho .....	24
2.3.4. Massa .....	24
2.3.5. Volume .....	24
2.3.6. Massa específica .....	25
2.3.7. Área superficial .....	25
2.3.8. Esfericidade .....	26
2.3.9. Circularidade .....	26
2.3.10. Porosidade .....	26
2.3.11. Ângulo de repouso .....	28
2.4. Resultados e Discussão .....	29
2.4.1. Teor de umidade .....	29
2.4.2. Tamanho .....	29
2.4.3. Massa, volume e massa específica .....	31
2.4.4. Área projetada .....	33
2.4.5. Porosidade .....	34
2.4.6. Ângulo de repouso .....	34
2.5. Conclusões .....	35

<b>Capítulo III - Característica aerodinâmica do amendoim</b>	<b>36</b>
3.1. Introdução .....	36
3.1.1. Objetivo .....	36
3.2. Revisão Bibliográfica .....	37
3.2.1. Equações de governam o sistema .....	37
3.2.2. Coeficiente de arraste .....	39
3.2.3. Fluidos Newtonianos .....	41
3.2.3.1. Fluidos Newtonianos e partículas esféricas .....	44
3.2.3.2. Fluidos Newtonianos e não partículas esféricas ..	46
3.2.4. Velocidade terminal .....	47
3.2.4.1. Velocidade terminal para corpos não esféricos.....	50
3.2.5. Aplicações a produtos agrícolas .....	54
3.3. Materiais e Métodos .....	60
3.3.1. Análise experimental .....	60
3.3.1.1. Construção do equipamento .....	60
3.3.1.2. Procedimento .....	62
3.3.1.2. Análise teórica .....	62
3.4. Resultados e Discussão .....	65
3.4.1. Velocidade terminal experimental e calculada .....	65
3.5. Conclusões .....	70
<b>Capítulo IV - Avaliação da separação utilizando o princípio de velocidade terminal</b>	<b>71</b>
4.1. Introdução .....	71
4.1.1. Objetivo .....	71
4.2. Revisão Bibliográfica .....	72
4.2.1. Separação por velocidade terminal .....	72
4.3. Materiais e Métodos .....	75
4.4. Resultados e Discussão .....	76
4.4.1. Avaliação da separação .....	76
4.4.2. Comportamento do amendoim em fluxo ascendente .....	78
4.5. Conclusões .....	81
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>82</b>
<b>Apêndice A</b> .....	<b>89</b>

## Resumo

Este trabalho teve como objetivo geral, a determinação das propriedades físicas e aerodinâmicas de vagens e sementes de amendoim, variedade L7, para futuros projetos de máquinas e equipamentos, a serem utilizados nos processos de beneficiamento; desenvolver e avaliar um protótipo de separação e seleção de amendoim, utilizando o princípio de velocidade terminal e determinar a velocidade terminal teórica e experimental de amendoim, variedade L7. Os resultados médios obtidos para as características físicas, dos diversos tamanhos desse amendoim, foram: para *vagens*, a maior frequência de comprimento, foi observada nas classes de 30 a 40mm, com 75,8% da amostra, e 79,2% com diâmetro de 12 a 14mm; a massa variou de 0,7377 a 0,8847g; o volume médio ficou entre 11,159 e 15,181 mm<sup>3</sup>, a área projetada apresentou-se valores entre 93,0465 e 135,0885mm<sup>2</sup>, a circularidade de 64,74 a 40,70% e a esfericidade de 65,9952 a 88,1155%. Para *sementes inteiras*, observou-se uma maior frequência de comprimento, de 48,03% entre 13 a 15mm e 77,02% de 8 a 10mm, para o diâmetro, a massa obtida ficou entre 0,3672 e 0,7468g, o volume entre 3,394 a 7,0mm<sup>3</sup>, a área projetada entre 12,4313 a 71,124mm<sup>2</sup>, a circularidade entre 51,75 e 71,55% e a esfericidade entre 53,07 e 72,92%. As *sementes chochas*, apresentaram maior frequência de comprimento entre 12 e 14mm (48,38%), diâmetro entre 5 e 7mm(65,80%), a massa entre 0,2028 e 0,3787g, o volume médio entre 1,950 e 3,391 mm<sup>3</sup>, a área projetada de 12,43 a 71,12mm<sup>2</sup>, a circularidade de 22,61 a 53,01% e a esfericidade entre 53,93 e 48,95%. As *sementes danificadas*, obtiveram massa entre 0,0907 e 0,3552g, volume médio entre 0,846 e 3,336 mm<sup>3</sup>, área projetada entre 43,78 a 67,84mm<sup>2</sup>, a circularidade verificada foi de 39,50 a 83,50% e a esfericidade entre 37,64 e 80,64%. A porosidade para o amendoim, variedade L7, foi de 44,0% e o ângulo de repouso determinado foi de 18°. O coeficiente de arraste, considerando-se todos os tamanhos de partículas do amendoim variedade L7, variaram 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 chochas 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 e 9,40m.s<sup>-1</sup>. O fluxo de ar, correspondente às velocidades terminais, apresentou regime turbulento. A melhor separação de sementes inteiras das danificadas, chochas e vagens, foi com a velocidade de 15 m.s<sup>-1</sup>, apresentando 67,3% de separação. Não foi possível a seleção por tamanho das sementes de amendoim por esse princípio.

## Summary

This work had as a general objective, the determination of the physical properties, and aerodynamics of husk and seeds of peanut - variety L7, for future designs of machines and equipment to be used in the improvement processes; to develop and to evaluate an archetype of separation and selection of peanut using the terminal principle of speed and to determine the theoretical and experimental terminal speed of peanut - variety L7. The average results gotten for the physical features of several peanut sizes of the variety L7, had been: for husk, the biggest frequency of length, considering 75.8% of the sample, was verified to belong to the interval between 30 and 40 mm and 79.2% with diameter between 12 and 14 mm; the mass varied from 0.7377g to 0.8847g; the verified average volume, was between 11.159 and 15.181 mm<sup>3</sup>, the projected area displayed indices between 93.0465 and 135.0885 mm<sup>2</sup>, the roundness between 64.74 and 40.70% and the sphericity between 65.9952 and 88.1155%. For entire seeds, the biggest frequency of length, considering 48% of the sample, between 13 and 15 mm and 77.02% from 8 to 10 mm, for the diameter the gotten mass was between 0.3672 and 0.7468g, the volume between 3.394 and 7,0 mm<sup>3</sup>, the projected area between 12.4313 and 71.124 mm<sup>2</sup>, the roundness have gotten values between 51.75 and 71.55% and sphericity disclosed indices between 53.07 and 72.92 %. The wilted seeds brought out the biggest frequency of length between 12 and 14 mm (48.38 %), diameter between 5 and 7 mm (65.80 %), the mass between 0.2028 and 0,3787g, the average volume between 1.950 and 3.391mm<sup>3</sup>, the projected area: 12.43-71.12 mm<sup>2</sup>, the roundness: 22.61-53.01 % and sphericity: 53.93-48.95 %. The damaged seeds had gotten mass between 0.0907 and 0.3552 g, average volume between 0.846 and 3.336 mm<sup>3</sup>, the projected area between 43.78 and 67.84 mm<sup>2</sup>, the verified roundness: 39.50-83.50 % and sphericity between 37.64 and 80.64 %. The porosity for the peanut was verified to be 44 % and the determined resting angle was 18°. The dragging coefficient considering all the sizes of peanut particles - variety L7, had varied between 0.17 and 0.48 excepting husks containing 2 seeds which brought out 3.91. The Reynolds numbers found for peanut, had varied between 6000 and 26000 in the amount of particle sizes found for the variety in study. The found experimental terminal speed for the entire seeds was between 12.39 and 13.80 m.s<sup>-1</sup> and for husks: 9.30 - 9.40 m.s<sup>-1</sup>. The air stream, corresponding to the terminal speed brought out a turbulent system. The best way to separate the entire seeds from the damaged ones, wilted seeds and husks, was in fact using a speed of 15 m.s<sup>-1</sup>. This procedure achieved 67.3 % of success. This procedure didn't aloud a peanut seed selection according to size.

## Lista de Figuras

Figura 2.1.	Desenho esquemático do métodos de deslocamento de massa usado para o cálculo do volume e da massa específica de sementes de amendoim. ....	8
Figura 2.2.	Métodos de determinação da circularidade .....	11
Figura 2.3.	Métodos de determinação da esfericidade .....	13
Figura 2.4.	Representação esquemática do ângulo de repouso .....	17
Figura 2.5.	Máquina de descascamento de amendoim desenvolvida pela Embrapa Algodão.....	17
Figura 2.6.	Percentuais do descascamento da máquina de descascamento por acionamento mecânico desenvolvida pela Embrapa Algodão, para amostra de 5kg de vagem de amendoim .....	18
Figura 2.7.	Amostra do material, recolhido no duto de sementes, após o descascamento e a separação manual, das quais originaram as partículas .....	18
Figura 2.8.a	Classificação das sementes inteiras .....	21
Figura 2.8.b.	Classificação das sementes chochas .....	22
Figura 2.8.c.	Classificação de vagens.....	22
Figura 2.8.d.	Classificação das sementes danificadas .....	23
Figura 2.9.	Picnômetro de comparação a ar desenvolvido pelo Núcleo de Tecnologia em Armazenagem .....	27
Figura 2.10.	Equipamento de determinação do ângulo de repouso .....	28
Figura 3.1.	Sistema de coordenadas usado na descrição do escoamento de um fluido sobre uma esfera rígida.....	37
Figura 3.2.	Coefficiente de arraste para partículas com formas geométricas regulares .....	44
Figura 3.3.	Curvas deslocamento em função do tempo para grãos e sementes agrícolas .....	56

Figura 3.4.	Equipamento construído para determinação da velocidade terminal .....	61
Figura 3.5.	Curvas tempo-deslocamento para as diversas classes segundo a caracterização por tamanho de sementes de amendoim L7 .....	69
Figura 4.1.	Comportamento de sementes inteiras, (a) sem fluxo de ar, (b) com fluxo de ar .....	79
Figura 4.2	Comportamento de vagens com uma semente, (a) sem fluxo de ar, (b) com fluxo de ar....	80
Figura 4.3.	Comportamento de vagem com duas sementes, (a) sem fluxo de ar, (b) com fluxo de ar .....	80

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1.	Intervalos de comprimento largura e espessura encontrados para diferentes teores de umidade .....	7
Tabela 2.2.	Valores médios para teor de umidade do amendoim L7, após o descascamento e após os testes de velocidade terminal.....	29
Tabela 2.3.	Classes de comprimento e diâmetro de vagens, sementes inteiras e sementes chochas, com as frequências as quais ocorrem na amostra .....	30
Tabela 2.4.	Médias de massa, volume e massa específica, para as diferentes partículas de amendoim, variedade L7 .....	32
Tabela 2.5.	Valores médios para área superficial ( $A_p$ ), circularidade ( $Cr$ ) e esfericidade ( $\phi$ ) das partículas de amendoim, variedade L7.....	33
Tabela 3.1.	Propriedades aerodinâmicas de sementes e grãos.....	56
Tabela 3.2.	Dados de coeficiente de arraste, número de Reynolds e velocidade terminal calculadas e experimentais .....	66
Tabela 3.3.	Médias de desvio padrão e erro médio obtidos para velocidade terminal nas diversas classes de sementes de amendoim L7.....	68
Tabela 4.1	Percentuais de sementes, para as diferentes partículas, em relação a quatro velocidades .....	77

## Nomenclatura

<i>Símbolo</i>		<i>Unidade</i>
$a, b, c$	parâmetros usados na definição dos raios de um elipsóide	m
$A_p$	área projetada da partícula	$m^2$
$A_c$	área do círculo que circunscribe a projeção da partícula	$m^2$
$C$	comprimento	m
$C_r$	circularidade	%
$C_D$	coeficiente de arraste	adimensional
$D$	diâmetro	m
$D_e$	diâmetro da menor circunferência que circunscribe a projeção do objeto	m
$D_i$	diâmetro da maior circunferência inscrita na projeção do objeto	m
$D_p$	diâmetro da esfera de igual volume da partícula	m
$f$	força resistiva	
$f_D$	força de arraste	N
$\bar{f}$	contribuição cinética do vetor força resistiva exercida pelo fluido sobre a superfície da partícula sólida	N
$\bar{g}$	vetor aceleração da gravidade	$m \cdot s^{-2}$
$g$	aceleração da gravidade	$m \cdot s^{-2}$
$I$	indicador dos efeitos da forma e tamanho	adimensional
$k_1, k_2, m$	funções da esfericidade definidas por PETTYJOHN e CHRISTIANSEN (1948)	adimensional
$L$	leitura do planímetro	mm
$L7$	variedade de amendoim lançada pela Embrapa Algodão	
$P$	porosidade	$N \cdot m^{-2}$
$r$	coordenada radial	m
$r_1, r_2, r_3$	raios de curvatura	m
$r_a, r_b, r_c$	raios maior, médio e menor de um elipsóide	m

$R$	raio da esfera	m
$N_R$	número de reynolds	adimensional
$S$	coeficiente de tamanho	adimensional
$Sh$	coeficiente de forma	adimensional
$t$	tempo	s
$U_r, U_\theta$	componentes radial e angular da velocidade do fluido	$m \cdot s^{-1}$
$\bar{U}$	velocidade média	$m \cdot s^{-1}$
$U_\infty$	velocidade no seio do fluido	$m \cdot s^{-1}$
$U$	velocidade média do fluido em escoamento monofásico e velocidade média do fluido em escoamento bifásico	$m \cdot s^{-1}$
$u', v', w'$	componentes de velocidade turbulenta	$m \cdot s^{-1}$
$w$	componente de velocidade	$m \cdot s^{-1}$
$W$	peso	N
$V_{elip}$	volume do elipsóide	$m^3$
$V_{ol}$	volume da partícula	$m^3$
$\bar{V}$	vetor velocidade da partícula	$m \cdot s^{-1}$
$V_p$	velocidade da partícula	$m \cdot s^{-1}$
$v_t$	velocidade terminal	$m \cdot s^{-1}$
$v_{texp}$	velocidade terminal experimental	$m \cdot s^{-1}$
$v_{tcalc}$	velocidade terminal calculada	
$V_{t\infty}$	velocidade terminal da partícula isolada	$m \cdot s^{-1}$
$v_r$	componente da velocidade radial	$m \cdot s^{-1}$
$v_\phi$	componente da velocidade angular	$m \cdot s^{-1}$
$v_n$	velocidade normal	$m \cdot s^{-1}$
$v_t$	velocidade tangencial	$m \cdot s^{-1}$
$x, y, z$	coordenadas cartesianas	--
%	percentagem	
$\rightarrow$	tende	
<	menor	
>	maior	

## Letras Gregas

<i>Símbolo</i>		<i>Unidade</i>
$\alpha$	ângulo de inclinação	graus
$\beta$	relação entre diâmetros	adimensional
$\Delta$	diferença	--
$\phi$	coordenada angular	--
$\eta$	viscosidade aparente ( $\tau/\dot{\gamma}$ )	
$\varphi$	esfericidade	(%)
$\varphi_s$	fator de esfericidade	(%)
$\theta$	coordenada angular	--
$\mu$	viscosidade dinâmica	$\text{Kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
$\rho, \rho_f$	massa específica do fluido	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_p$	massa específica da partícula	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\tau$	tensão de cisalhamento	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\nu$	viscosidade cinemática ( $\mu/\rho$ )	
$\psi$	função corrente	--

## Unidades

b.s.	base seca
g	grama
g.cm <sup>-3</sup>	grama por centímetro cúbico
g.m <sup>-3</sup>	grama por metro cúbico
Hp	Horse-power
kg	kilograma
kg.m <sup>-3</sup>	kilograma por metro cúbico
kw	kilowatts
lb	libra
ln	logaritmo neperiano
log	logaritmo
m	metro
m.s <sup>-1</sup>	metro por segundo
m.s <sup>-2</sup>	metro por segundo ao quadrado
m <sup>2</sup>	metro quadrado
m <sup>3</sup>	metro cúbico
m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	metro cúbico por hora
mm	milímetro
mm <sup>2</sup>	milímetro quadrado
mm <sup>3</sup>	milímetro cúbico
N	Newton
N.m <sup>-2</sup>	Newton por metro quadrado
N.s.m <sup>-2</sup>	Newton vezes segundo por metro quadrado
N.s.m <sup>-3</sup>	Newton vezes segundo por metro cúbico
°	grau
pés	unidade de comprimento no sistema inglês
rpm	rotação por minuto
s	segundo
t	tonelada
t.h <sup>-1</sup>	toneladas por hora

# Capítulo I

## Introdução

### 1.1. Generalidades

O amendoim (*Arachis hypogaea L.*) é uma das principais oleaginosas no Brasil e no mundo, tendo como principais países produtores a Índia, a China, os EUA, o Sudão e o Senegal (FIGUEIREDO, 1992). Sendo 80% da produção mundial oriunda dos países em desenvolvimento e aproximadamente 67% dos trópicos semi-áridos (SALES, 1995).

No início da década de 70, o Brasil situava-se entre os sete primeiros países produtores de amendoim, cujo principal produto comercializado era o óleo. Em meados desta década sofreu grande redução de área plantada e conseqüentemente de produção, devido a competição de preço com a soja. A partir da safra 1987/1988, tem-se verificado um retorno gradativo de crescimento na área cultivada com essa oleaginosa no País (FREITAS *et al.*, 1995).

Na safra de 1997, o Brasil colheu 134.000t, numa área de 82.000 hectares. Verificando-se aumentos significativos de um ano para o outro (MONTEIRO, 1998). O estado de São Paulo tem participado com a maior parcela, tanto em área plantada como produção e a região nordeste tem gradativamente aumentado sua contribuição. sendo os principais produtores os Estados da Bahia, de Sergipe, da Paraíba e do Ceará (PREVISÃO E ACOMPANHAMENTO DE SAFRAS, 1995).

Apesar da região apresentar grandes potencialidades relativo a edafoclimatologia para a exploração desta cultura, vários fatores têm contribuído para a sua lenta expansão, destacando-se, o baixo nível tecnológico utilizado pelo agricultor e a falta de tecnologias adequadas à sua capacidade de adoção.

Entre as principais dificuldades técnicas no cultivo do amendoim ressaltam-se não somente a escassez de semente melhorada ou adaptadas à região e os altos custos de produção envolvendo mão-de-obra no plantio, na colheita e pós-colheita, mas também, a carência de equipamentos e máquinas agrícolas adaptadas às necessidades dos produtores nas operações de beneficiamento, visando a redução do esforço físico despendido e tornando disponível o tempo de trabalho para outras atividades na propriedade (ARAÚJO *et al.*, 1992; BARROS *et al.*, 1994).

Em várias regiões produtoras de amendoim do mundo, desenvolveu-se equipamentos de descascamento por acionamento manual, poucos preocuparam-se com a separação entre sementes, cascas e impurezas.

A indústria de alimentos necessita, cada vez mais, de produtos mais homogêneos e com menor percentual de impurezas, e para tanto, a engenharia vem melhorando os processos de beneficiamento, através das informações das propriedades físicas, que surgem para os novos projetos de máquinas e equipamentos, evitando, assim, desperdícios dos produtos.

Dentre estas propriedades, o conhecimento da velocidade terminal tem fundamental importância na agricultura, durante e após a colheita, quando o produto está em vias de comercialização. Com a finalidade de melhorar as características e de agregar valor econômico, conseqüentemente, reduzir custos com mão de obra e tempo de operação no processamento de pós-colheita.

Com base no princípio que grãos maiores, com maior massa específica contendo mais reservas nutritivas e por isso constituem melhores semente, uma pesquisa que pode ser utilizada é a de investigar a possibilidade do uso de uma corrente de ar com velocidade controlável para separação de sementes de uma mesma variedade, visto que o método convencional de separação, feito por peneiras as quais são projetadas não levando em consideração o surgimento de novas variedades podem levar a uma má separação com reflexo considerável no percentual de germinação.

Numa análise momentânea, onde se faz necessário estudos mais profundos e detalhados, um equipamento projetado com base na velocidade terminal do produto pode

ser mais versátil, se prestando à separação de produtos de materiais estranhos, como também, para a seleção de uma mesmo produto. Sendo o equipamento projetado com base na velocidade terminal do produto, uma vez conhecidas algumas características físicas, pode-se ajusta-lo para selecionar as sementes por categorias de tamanho.

### 1.1.1 Objetivos

Com vistas ao exposto, o presente trabalho teve como objetivo geral:

- a) determinar as propriedades físicas e aerodinâmicas de vagens e sementes de amendoim variedade L7, para futuros projetos de máquinas e equipamentos nos processos de colheita e pós-colheita;
- b) desenvolver e avaliar um protótipo de separação e seleção de amendoim utilizando os princípios de velocidade terminal;
- c) determinar a velocidade terminal teórica e experimental de amendoim variedade L7.

## *Capítulo II*

### **Caracterização física do amendoim**

#### **2.1. Introdução**

As propriedades físicas dos materiais biológicos tem sido investigadas por vários pesquisadores, por constituir importante fonte de dados para o “design” de máquinas, estruturas, unidades beneficiadoras, análises dos processos e controles e determinações da eficiência de máquinas, operações com embalagens, transporte, no desenvolvimento de novos produtos de consumo de origem animal e vegetal e na avaliação e manutenção da qualidade final do produto.

##### 2.1.1. Objetivos

Nesta fase do trabalho, os objetivos foram determinar:

- a) Teor de umidade;
- b) Tamanho;
- c) Peso;
- d) Volume;
- e) Massa específica;
- f) Circularidade;
- g) Esfericidade;
- h) Porosidade;
- i) Ângulo de repouso.

## 2.2. Revisão Bibliográfica

### 2.2.1. Teor de Umidade

O teor de umidade é uma das características físicas dos produtos que mais influenciam nos processos de beneficiamento.

CAVALCANTI MATA *et al.* (1986) estudaram o comprimento, a largura, a espessura, a área e o volume das sementes de algaroba, cacau, feijão macassar, feijão mulatinho, mamona e milho, obtendo variações lineares com o aumento do teor de umidade.

JOSHI *et al.* (1993) estudaram algumas propriedades físicas de sementes e grãos de abóbora, como densidade, porosidade, volume, ângulo de repouso, velocidade terminal e coeficiente estático de atrito, em diferentes teores de umidade (4 a 40%) verificando que todos apresentam modificações.

SUTHAR e DAS (1996) determinaram algumas propriedades físicas e aerodinâmicas de sementes e grãos de melancia em função do teor de umidade.

ARAÚJO (1999) e SILVA *et al.* (1996) estudaram o teor de umidade de amendoim para então descascá-lo em máquinas de acionamento manual e mecânica, encontrando valores entre 8 e 10% b.s.

### 2.2.2. Forma e tamanho

A forma e o tamanho de um objeto são características inseparáveis e necessárias para descrevê-lo satisfatoriamente. Para algumas aplicações em que estas características afetam o processo, a solução é uma simples relação bidimensional, como mostra a equação abaixo:

$$I = f(sh, s) \tag{2.1}$$

onde:

*I*- indicador dos efeitos da forma e tamanho

*sh*- coeficiente de forma

*s*- coeficiente de tamanho

THALER (1981) descreveu sobre a importância de considerar as características específicas, como tamanho e dimensão dos produtos para um melhor planejamento dos sistemas de transporte e processamento de materiais.

A influência de teores de umidade no comprimento, largura e espessura de sementes de feijão mulatinho e feijão macassar foi estudada por CAVALCANTI MATA e FERNANDES FILHO (1984) e verificaram que estas dimensões obtiveram crescimento linear com o aumento do teor de umidade.

Estudando a influência do tamanho de sementes de lentilha para o processamento, ERSKINE *et al.* (1991) concluíram que a maior eficiência destas operações ocorre com a fração de pequenas sementes, em torno de 4mm.

SUTHAR e DAS (1996) determinaram as médias de comprimento, largura e espessura de 100 sementes de melancia, com teor de umidade de 7,35% b.s., encontrando 10,60; 6,18 e 2,37mm, respectivamente, e valores correspondentes para 100 grãos, que foi de 8,85; 4,88 e 1,64mm, constatando que cerca de 55% de sementes têm comprimento entre 9,5 e 11,5 mm.

As médias de comprimento, largura e espessura de sementes de cominho foram determinadas em 5,61, 1,77 e 1,55mm, respectivamente (SINGH e GOSWAMI, 1996).

ÇARMAN (1996) estudou sementes de lentilha maduras e secas (6,5% b.s.) e encontrou valores de 6,64 e 2,65 mm para diâmetro e largura, respectivamente.

Os valores de comprimento, largura e espessura de sementes de girassol foram de 9,52; 5,12 e 3,27mm, respectivamente e correspondentes para grãos, 8,28; 4,09 e 2,43mm. Cerca de 80% da amostra de sementes obtiveram variações de comprimento entre 8 e 10 mm; cerca de 11% apresentaram 10mm, e 8% menos que 8mm (GUPTA e DAS, 1997).

SINGH (1993) determinou as características físicas de vagens e sementes de amendoim JL-24, verificando as maiores frequências (70%) nos comprimentos de 28 a 34mm. Para a largura, encontrou os maiores números de vagens (60%) em 12,5 a 14mm. Para espessura da vagem, verificou 60% com 11,5 a 12,5 mm. Para semente, constatou a maior incidência de comprimento em intervalos de 15 a 17mm, e diâmetros de 8 a 9,5mm.

Classes de tamanhos de vagens e sementes foram estudadas por SILVA *et al.* (1996), para amendoim da variedade CNPA BR1, encontrando as maiores frequências de comprimento de vagens em 30 a 50mm, mais de 90% da amostra, para o diâmetro de 11 a 14mm, cerca de 75%.

ARAÚJO *et al.* (1997) determinaram as características físicas de amendoim da variedade BR1, para projetar uma máquina descascadora de amendoim por acionamento mecânico, constatando maior frequência (86%) de comprimento de vagens em 20 a 40mm e maiores percentuais de diâmetros em 11 a 13mm (83%).

VARSHNEY *et al.* (1994) estudaram as características físicas de 5 variedades de amendoim, com diferentes teores de umidade, encontrando os valores apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Intervalos de comprimento, largura e espessura encontrados para 5 variedades de amendoim com diferentes teores de umidade

Teor de umidade (%)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
5	9,32 - 15,77	6,47 - 7,48	6,45 - 7,42
12	9,59 - 16,02	6,67 - 7,69	6,75 - 7,54
17	10,47 - 17,08	7,79 - 8,50	7,14 - 7,80
22	11,32 - 18,48	8,50 - 9,03	7,39 - 7,93

Fonte: VARSHNEY *et al.* (1994)

### 2.2.3. Volume

MOHSENIN (1978) descreve um método no qual o volume é determinado pelo deslocamento de água, onde o objeto é pesado no ar, em seguida mergulhado em um recipiente graduado com água. Desta última pesagem é retirado o peso do recipiente mais água, restando o peso da água deslocada, que é usado na equação 2.2, para o cálculo do volume. 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.

Neste método são feitas 3 pesagens (Figura 2.1), a primeira (a) é a simples pesagem do amendoim ao ar livre, a segunda (b) é a pesagem de um recipiente contendo água e a terceira (c) é a pesagem do recipiente com água + grão submerso. Nesta terceira pesagem, o grão é suportado por uma haste, e então, forçado para dentro d'água sem, no entanto, tocar as superfícies do recipiente. A terceira pesagem (c) menos a segunda (b) é a massa de água deslocada que deve ser usada na Equação 2.2 para o cálculo do volume.

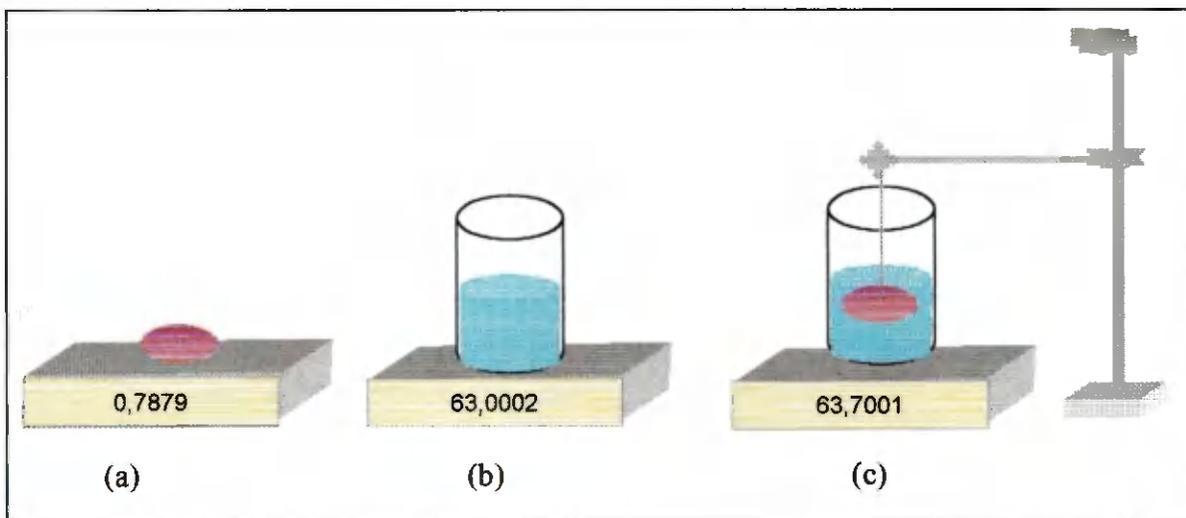


Figura 2.1. Desenho esquemático do método do deslocamento de massa usado para o cálculo do volume e da massa específica de sementes de amendoim.

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

(2.2)

ÇARMAN (1996) encontrou valores médios de  $49,08 \text{ mm}^3$  para o volume de sementes de lentilha com teor de umidade de 6,5% b.s..

#### 2.2.4. Massa específica

A massa específica aparente é definida como a relação existente entre uma certa massa do produto e o volume por ela ocupado, podendo variar conforme o teor de umidade, da percentagem de impurezas e de sementes quebradas (SASSERON, 1980).

O mesmo método utilizado para determinar o volume é usado para determinar a massa específica diretamente pela relação:

$$\text{massa específica} = \frac{\text{massa do grão no ar}}{\text{volume}} \quad (2.3)$$

JOSHI *et al.* (1993) estudaram a massa específica de sementes de abóbora em dois teores de umidade (4 e 40%) e verificaram um decréscimo de  $1.179$  para  $1.070 \text{ kg.m}^{-3}$ , e nos grãos um acréscimo de  $1.080$  para  $1.143 \text{ kg.m}^{-3}$ .

VARSHNEY *et al.* (1994) verificaram um decréscimo de massa específica com o aumento do teor de umidade de 5 para 22% b.s. para as variedades GAUG-1 ( $715$  para  $698 \text{ kg.m}^{-3}$ ); GG-2 ( $705$  para  $685 \text{ kg.m}^{-3}$ ); GAUG-10 ( $698$  para  $669 \text{ kg.m}^{-3}$ ); GG-11 ( $689$  para  $664 \text{ kg.m}^{-3}$ ) e M-13 ( $673$  para  $654 \text{ kg.m}^{-3}$ ).

SUTHAR e DAS (1996) investigaram a massa específica de sementes e grãos de melancia, em teores de umidade de 4 para 40% b.s., encontrando uma variação de  $1.148$  para  $1.004 \text{ kg.m}^{-3}$  e de  $1.010$  para  $1.134 \text{ kg.m}^{-3}$ , respectivamente, (a média de massa por umidade de semente e grãos foi de  $0,099$  e  $0,062\text{g}$ , respectivamente).

A massa específica aumentou de  $1.047$  para  $1.134 \text{ kg.m}^{-3}$  com o aumento de umidade de 7 para 22%, em sementes de cominho (SINGH e GOSWAMI, 1996).

ÇARMAN (1996) encontrou para sementes de lentilha, um decréscimo de  $1.190$  para  $935 \text{ kg.m}^{-3}$ , indicando uma diminuição na massa específica com o aumento do teor de

umidade, esta relação linear negativa também foi observada por FRASER *et al.*(1978), citados pelo autor e TONG E SOKHANSANJ (1993) .

Para sementes e grãos de girassol, GUPTA e DAS (1997) verificaram acréscimos de 574 a 682 kg.m<sup>-3</sup> e 1.050 a 1.250 kg.m<sup>-3</sup>, respectivamente, com o incremento de umidade de 4 para 20% b.s..

#### 2.2.5. Circularidade

Segundo Curray (1951), citado por CAVALCANTI MATA e FERNANDES FILHO (1984), a circularidade é um fator que nos indica o quão próximo está a área do objeto de um círculo. A fórmula e a representação gráfica para circularidade são a seguir descritas (Figura 2.1).

##### Método 1

$$C = \frac{A_p}{A_c} \times 100 \quad (2.4)$$

onde,

$C$  - circularidade, em percentagem

$A_p$  - área projetada do produto

$A_c$  - área do menor círculo que circunscreve a projeção do produto

##### Método 2

$$C = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N (r_i / R) \quad (2.5)$$

onde,

$r$  - raio de curvatura, mostrado na Figura 2.2

$R$  - raio da maior circunferência inscrita na projeção do objeto, em posição de repouso

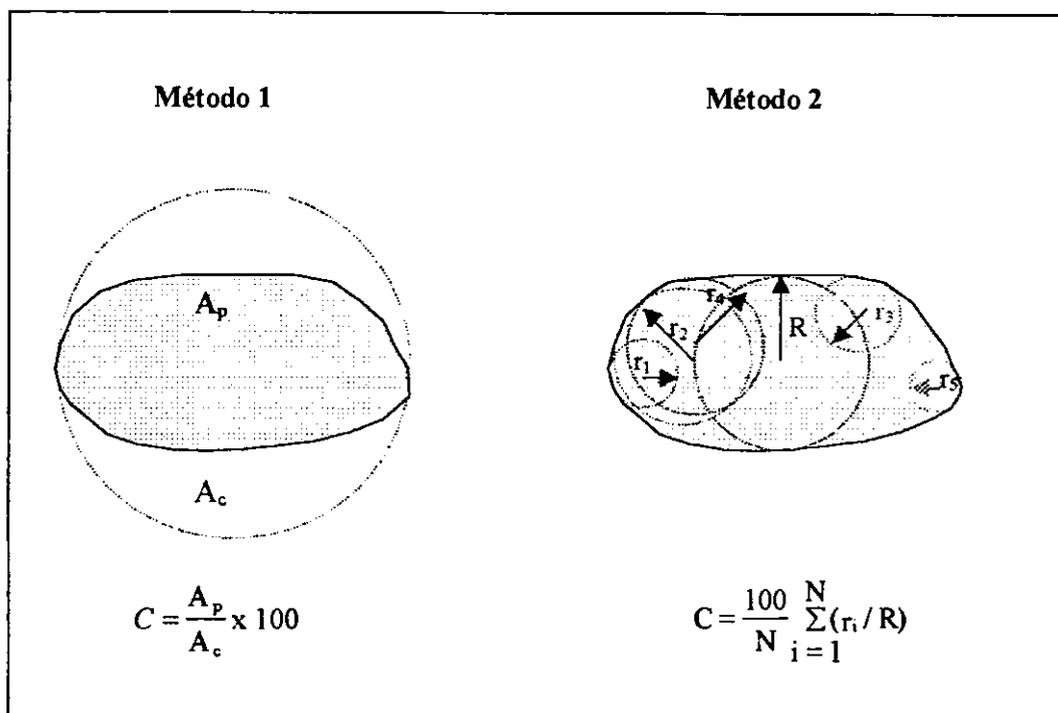


Figura 2.2. Métodos de determinação da circularidade.

CAVALCANTI MATA e FERNANDES FILHO (1984) estudaram o grau de circularidade do feijão mulatinho e macassar e verificaram que, para a primeira espécie, ocorreu um acréscimo com o aumento do teor de umidade, e a segunda espécie não apresentou alteração com o aumento do teor de umidade.

CAVALCANTI MATA *et al.* (1986) estudaram a circularidade de sementes de algaroba, cacau, feijão macassar, feijão mulatinho, mamona e milho e obtiveram 64; 52,7; 70,3; 66,5; 51,4 e 77,7%, respectivamente.

#### 2.2.6. Esfericidade

Segundo CURRAY (1951), o conceito de esfericidade pode ser entendido como a proximidade que um material está de uma esfera. Assim o autor descreve três maneiras de determiná-la:

### Método 1

$$\varphi = \frac{D_p}{D_c} \times 100 \quad (2.6)$$

onde,

$\varphi$  - Esfericidade

$D_p$  - diâmetro da esfera de volume igual ao objeto

$D_c$  - diâmetro da menor circunferência que circunscribe a projeção do objeto.

### Método 2

Considerando o objeto como um elipsóide, como pode ser visto na Figura 2.2, com volume a  $V_{elip} = 4\pi r_a r_b r_c / 3$ , onde  $r_a$  é o maior raio,  $r_b$  é o raio médio e  $r_c$  o menor raio. Considerando ainda  $a = 2r_a$ ,  $b = 2r_b$ ,  $c = 2r_c$ , tem-se:

$$\varphi = \left( \frac{\text{volume do sólido}}{\text{volume da esfera circunscrita}} \right)^{1/3}$$
$$\varphi = \frac{(abc)^{1/3}}{a} \quad (2.7)$$

### Método 3

Outra proposição de fórmula para a esfericidade, é dada por:

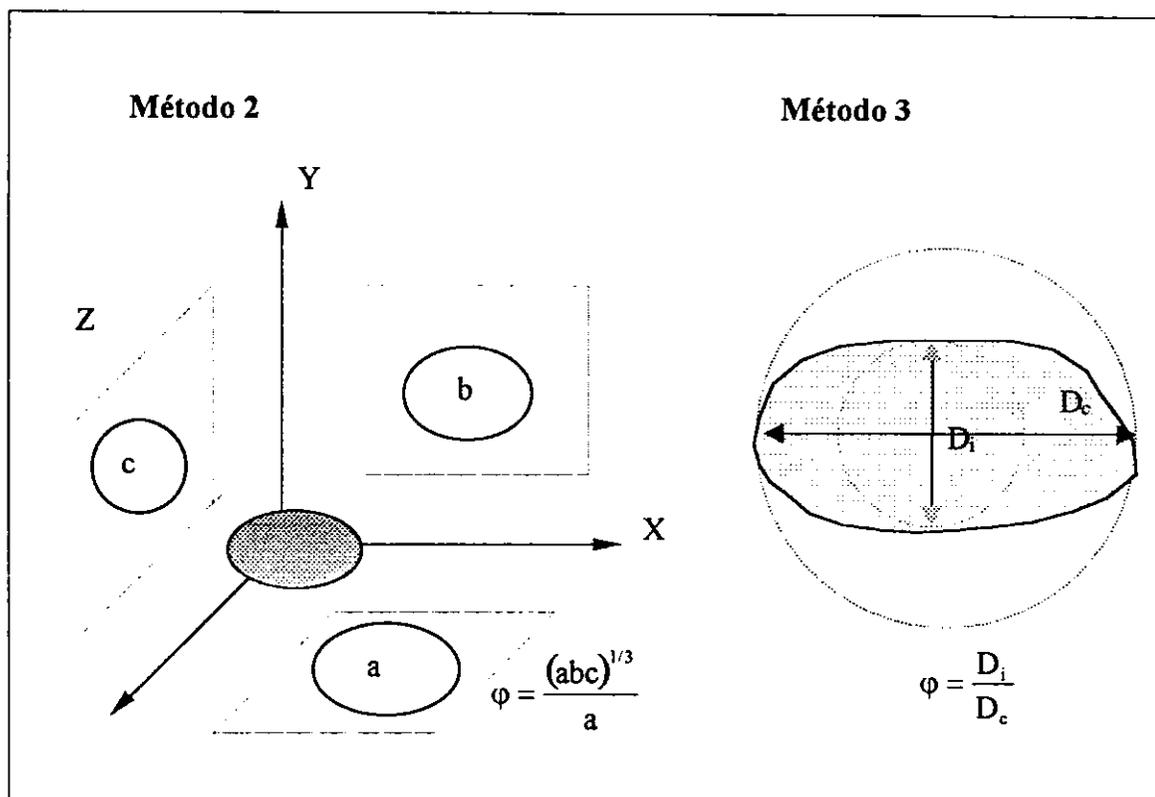
$$\varphi = \frac{D_i}{D_c} \times 100 \quad (2.8)$$

onde,

$D_i$  - diâmetro da maior circunferência inscrita na projeção do objeto

$D_c$  - menor diâmetro que circunscribe o objeto

Para um melhor entendimento os métodos 2 e 3 foram representados graficamente de acordo com a Figura 2.3.



Fonte: Curray (1951), citado por MOHSENIN (1978)

Figura 2.3. Métodos de determinação da esfericidade.

Trabalhando com três variedades de cerejas TENNES *et al.* (1968) determinaram, entre algumas características físicas, o peso, densidade, diâmetros, volume e esfericidade. A esfericidade foi determinada pela Equação 2.9.

CAVALCANTI MATA e FERNANDES FILHO (1984) constataram que, tanto para as sementes de feijão macassar como de feijão mulatinho, a esfericidade cresceu com o aumento do teor de umidade.

Estudando o grau de esfericidade médio para sementes de algaroba, cacau, feijão macassar, feijão mulatinho, mamona e milho CAVALCANTI MATA *et al.* (1986) obtiveram os valores de 24; 19,6; 48,4; 27,8; 25,7 e 31,2%, respectivamente.

O diâmetro equivalente médio e a esfericidade para sementes de girassol determinado por GUPTA e DAS (1997), foi de 5,39mm e 57%, respectivamente e para grãos foi de 4,32mm e 53%.

VARSHNEY *et al.* (1994) encontraram valores crescentes de diâmetro equivalente quando aumentou a umidade de 5 para 22% b.s. de amendoim das 5 variedades estudadas; GAUG-1 (7,88 a 9,04mm); GG-2 (8,32 a 9,63mm); GAUG-10 (8,46 a 10,17mm); GG-11 (8,74 a 10,30mm); M-13 (9,0 a 10,72mm). Quanto a esfericidade, verificou-se para a GG-2 e GAUG-1 valores acima de 77%, classificando-as como ovais e a GAUG-10, GG-11 e M-13 com valores abaixo de 61,8%, classificando-as como oblongas.

#### 2.2.7. Área superficial

Nas investigações relatadas sobre transporte de frutas em meios fluidos, o conhecimento da área superficial é um dado essencial no estudo de forças exercidas pelo fluido sobre a partícula e também para entender o comportamento da fruta imersa, o ângulo de repouso e orientação (BRAGA, 1997).

Miller *et al.*, 1959, citado por BRAGA (1997), relata alguns métodos para determinação da área superficial de hastes e folhas como: imprimir a superfície em um papel e medir a área com um planímetro; uso de um projetor fotográfico semelhante ao método usado para grãos por Curray (1951), citado por CAVALCANTI MATA *et al.* (1986); método da interceptação luminosa e o uso de uma célula fotoelétrica para medir a luz interceptada. Constatando que todas estas formas são confiáveis, no entanto Jenkins (1956), citado por BRAGA (1997), comparou os três métodos acima mencionados e encontrou que o do planímetro é o mais seguro e mais rápido, no qual é usado na Equação 2.9, para cálculo preciso.

$$A_p = L \times F \times E^2 \quad (2.9)$$

onde:

- Ap* - área projetada
- L* - leitura do planímetro
- F* - fator de correção do planímetro
- E* - escala de projeção

MOHSENIN (1978) cita um método de determinação da área superficial em que maçãs foram descascadas em finas tiras e a soma das áreas planimetradas, do traçado das tiras, foi considerada como a área superficial das maçãs.

Para sementes de lentilha, TANG e SOKHANSANJ (1993) observaram que o aumento de umidade provocava acréscimo na área projetada de  $80,67\text{mm}^3$  para  $91,83\text{mm}^3$  e ÇARMAN (1996) verificou acréscimo de 46%, quando se aumentou o teor de umidade de 6,5 para 32,6% b.s..

#### 2.2.8. Porosidade

A porosidade, segundo SASSERON (1980) 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 grão e por métodos indiretos, como o uso de picnômetro de comparação a ar, o autor ainda afirma que esta característica é influenciada pelo teor de umidade do produto, pela percentagem de quebra e de impurezas contida no lote.

A porosidade, uma das propriedades físicas estudadas em materiais biológicos, tem sua importância no estudo da hidrodinâmica, aerodinâmica e transferência de calor, sendo utilizada na determinação da capacidade estática, dimensionamento de ventiladores, resistência à passagem de ar, entre outras aplicações na Engenharia.

Alguns pesquisadores tem trabalhado utilizando diferentes métodos, THOMPSON e ISAACS (1967) afirmam que a determinação da porosidade de grãos pode ser feita através de mercúrio e tolueno. ROSSI e ROA (1980) usaram água para determinar a porosidade em grãos.

ALMEIDA *et al.* (1979) estudaram a porosidade de amêndoas de cacau através de um picnômetro de composição a ar, e obtiveram uma relação linear decrescente entre porosidade e teor de umidade.

Estudando a influência do teor de umidade nas propriedades físicas de milho e trigo, CHUNG e CONVERSE (1971) verificaram que a porosidade decresce linearmente com o aumento do teor de umidade. Este comportamento também foi observado por WHATTEN *et al.*, citados pelos autores, quando trabalharam com sementes de arroz de tamanho médio e longo.

CAVALCANTI MATA e FERNANDES FILHO (1984) verificaram a relação entre a porosidade e o teor de umidade de sementes de mamona e sementes de algaroba constatando crescimento linear com o aumento do teor de umidade.

JOSHI *et al.* (1993) investigaram a porosidade para sementes e grãos de abóbora em diferentes teores de umidade, índices de 4 a 40%, constatando uma diminuição de 65,73 para 55,46% e aumento em grãos de 55,46 para 51,53%.

VARSHNEY *et al.* (1994) verificaram um aumento da porosidade de 5 variedades de amendoim (GAUG-1, GG-2, GAUG-10, GG-11 e M-13) quando aumentou o teor de umidade de 5 para 22%.

Um decréscimo linear, com o aumento do teor de umidade, também foi observado por SUTHAR e DAS (1996) nas determinações de porosidade de sementes e grãos de melancia de 58 para 41% e de 50 para 40%, respectivamente.

A porosidade das sementes de lentilha da variedade Firat 87, verificada por ÖGÜT e ÇARMAN (1991) apresentaram um acréscimo de 25 para 31,7%. Para a variedade Sultani, ÇARMAN (1996) observou comportamento similar, obtendo um acréscimo de 28 para 32,5% com o aumento do teor de umidade de 6,5 para 32,6% b.s.

A porosidade de sementes de cominho foi observada por SINGH e GOSWAMI (1996) numa variação de teor de umidade de 7 para 22%, os autores verificaram um aumento de 54 para 64%.

### 2.2.9. Ângulo de repouso

Definido como o ângulo máximo do talude formado pelas sementes em relação a horizontal, como pode ser visto na Figura 2.4. A determinação deste ângulo é de grande importância para o conhecimento da capacidade estática dos silos, capacidade de correias transportadoras, dimensionamento de moegas, dutos e rampas de descargas (SILVA, 1995).

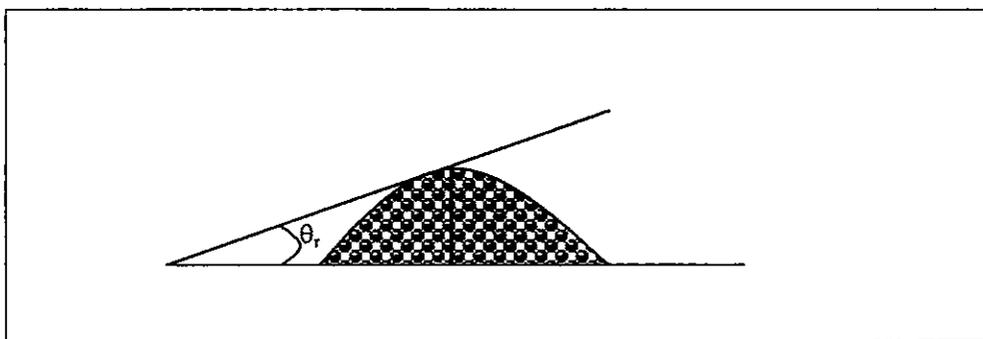


Figura 2.4. Representação esquemática do ângulo de repouso (SILVA, 1995)

Em estudos feitos com sementes de abóbora JOSHI *et al.* (1993), verificaram um aumento no ângulo de repouso de 30 para 52° quando o teor de umidade foi alterado de 4 para 40%, já para grãos de mesma espécie, verifica-se para mesma variação de umidade, um aumento de 34 para 42°.

SUTHAR e DAS (1996) encontraram um acréscimo linear no ângulo de repouso para sementes e grãos de melancia, para um aumento de umidade de 5 para 22% b.s., com valores de 31 para 43° no primeiro e 28 para 42° para o segundo.

Um aumento no ângulo de repouso de 36,5 para 51,3° em sementes de cominho com variação de umidade de 7 para 22% b.s., foi registrado por SINGH e GOSWAMI (1996).

O ângulo de repouso de sementes de girassol aumentou de 34 para 41° e em grãos de 27 para 38° com incremento de umidade de 4 para 20% (GUPTA e DAS, 1997).

## 2.3. Materiais e Métodos

### 2.3.1. Obtenção do material de estudo

O material utilizado nesta pesquisa foi amendoim da variedade L7, proveniente do município de Touros, RN, da safra referente ao ano de 1988.

O amendoim foi processado na máquina de descascamento por acionamento mecânico desenvolvida pela Embrapa Algodão, Campina Grande, PB (Figura 2.5).

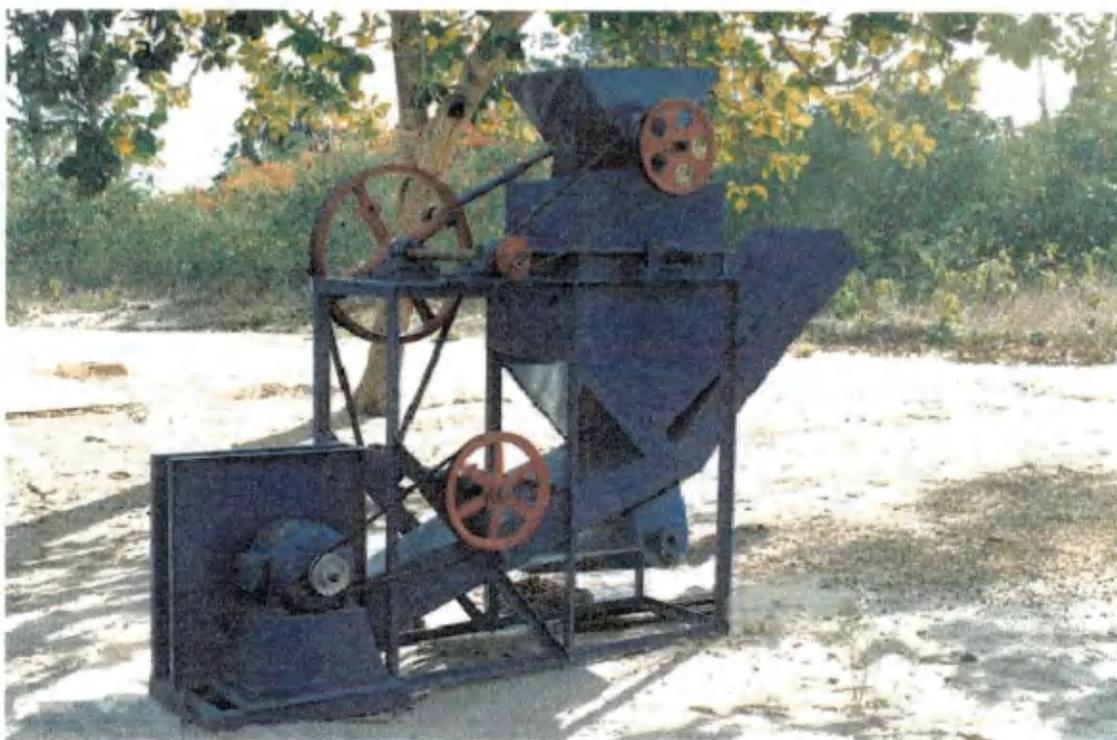


Figura 2.5. Máquina de descascamento de amendoim desenvolvida pela Embrapa Algodão.  
Fonte: ARAÚJO (1999).

A amostra de 5000g de vagens de amendoim, foi descascada na rotação de 80rpm e uma distância do semi-cilindro à tela côncava de 21mm, estas especificações foram adotadas por serem utilizadas usualmente pela Embrapa Algodão para esta variedade.

Após o descascamento, o material foi separado manualmente, originando-se amostras de sementes inteiras, chochas, danificadas, vagens não descascadas e casca tidas

obtidas no duto de descarga da semente. Os percentuais do descascamento, podem ser observados nas Figuras 2.6 e 2.7.

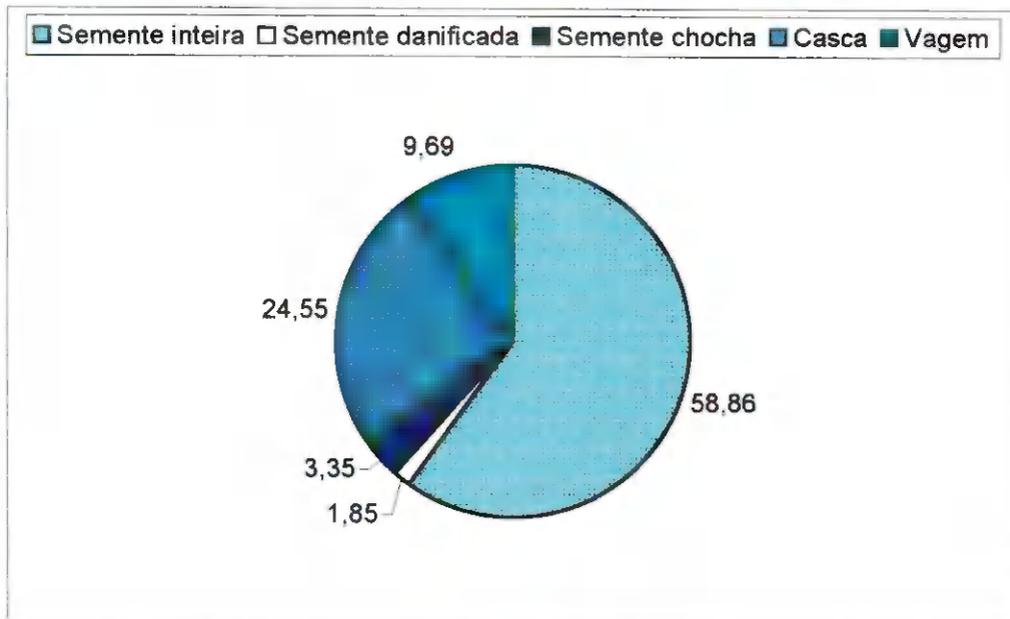


Figura 2.6. Percentuais do descascamento da máquina de descascamento por acionamento mecânico desenvolvida pela Embrapa Algodão, para uma amostra de 5kg de vagem de amendoim

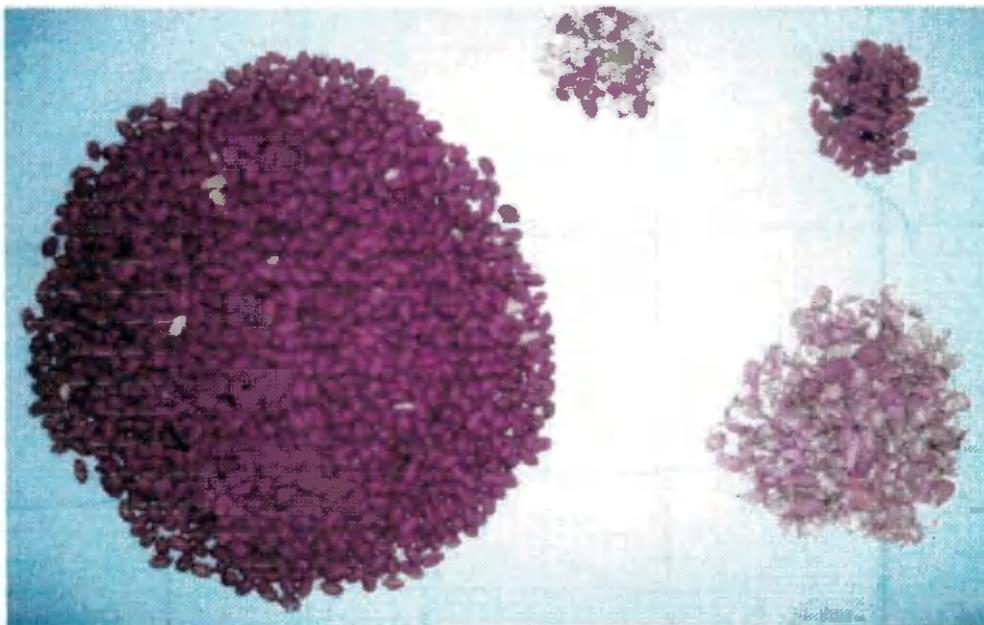


Figura 2.7. Amostra do material, recolhido no duto de sementes, após o descascamento e após a separação manual, das quais originaram as partículas

Do material descascado originou-se as diversas partículas (tamanhos) de sementes de amendoim e vagem.

Após determinar as características físicas, denominou-se as partículas em:

***Sementes inteiras***

Sementes com boa viabilidade, boa reserva e cor característica

***Sementes chochas***

Semente sem viabilidade germinativa, em geral murchas, sem reservas e de cor escura

***Sementes danificadas***

Sementes que sofreram dano mecânico no processo de descascamento

***Sementes danificadas do tipo miúdo***

Sementes que sofreram danos mecânicos no processo de descascamento das quais resultaram fragmentos forma indefinida e muito pequenos.

***Sementes danificadas com dano transversal***

Sementes que sofreram dano mecânico no processo de descascamento, das quais resultaram em partículas com corte transversal ao eixo dos cotilédones.

***Sementes danificadas com dano longitudinal***

Sementes que sofreram danos mecânicos no processo de descascamento, das quais resultam em partículas com cortes longitudinais ao eixo dos cotilédones.

***Sementes danificadas com 1 cotilédone menos um pedaço***

Sementes que sofreram danos mecânicos no processo de descascamento, das quais resultaram em partículas com apenas 1 cotilédones e estes com corte ou quebra.

***Sementes danificadas com 1 cotilédone mais um pedaço***

Sementes que sofreram danos mecânicos no processo de descascamento, o qual resultou em partículas com apenas 1 cotilédones e agregado a estes um pedaço do outro cotilédone.

***Sementes danificadas, partícula com 1/2 de semente com determinado comprimento***

Sementes que sofreram danos mecânicos no processo de descascamento, restando apenas 1 cotilédone, os quais foram classificados por comprimento.

***Vagens com 1 semente***

Vagens que eventualmente escoaram no duto de sementes da máquina de descascamento por acionamento mecânico, esta denominação foi dada a vagens que tenham sido produzidas com apenas uma semente, vagens que tenham sofrido quebra nas suas seções ou vagens em que uma seção do lóculo é chocha.

***Vagens com 2 sementes***

Vagens que eventualmente escoaram no duto de sementes da máquina de descascamento por acionamento mecânico, as quais não sofreram danos, vale lembrar que amendoim da variedade L7, há predominância de vagens com duas sementes ou duas seções no lóculo.

Nas Figuras 2.8 - a, b, c estão as diversas classes originadas a partir do descascamento, com as nomenclaturas adotadas para este trabalho.

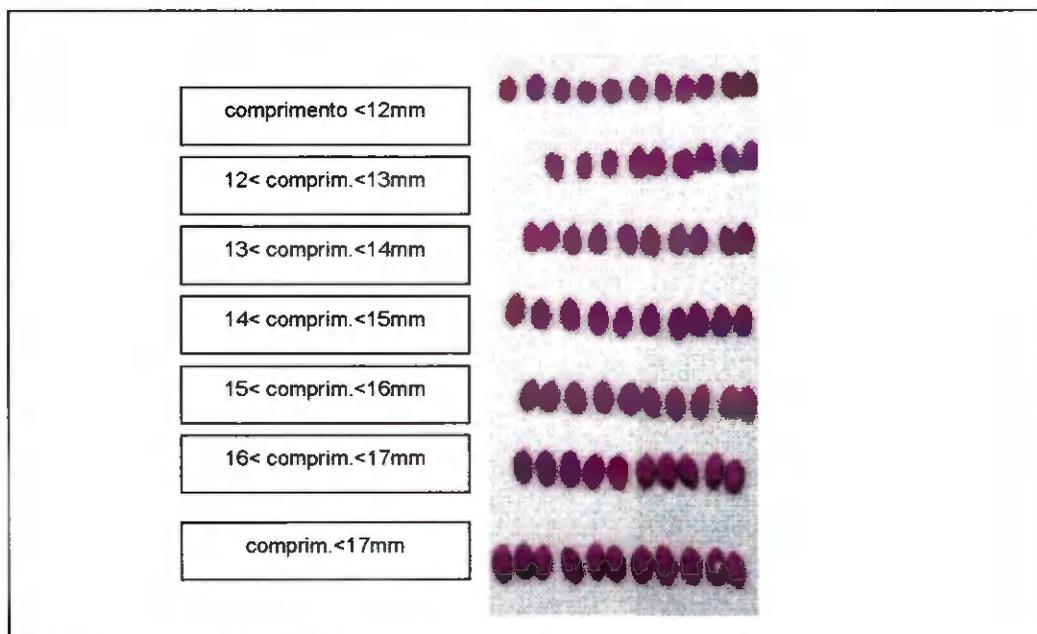


Figura 2.8.a. Classificação das sementes inteiras

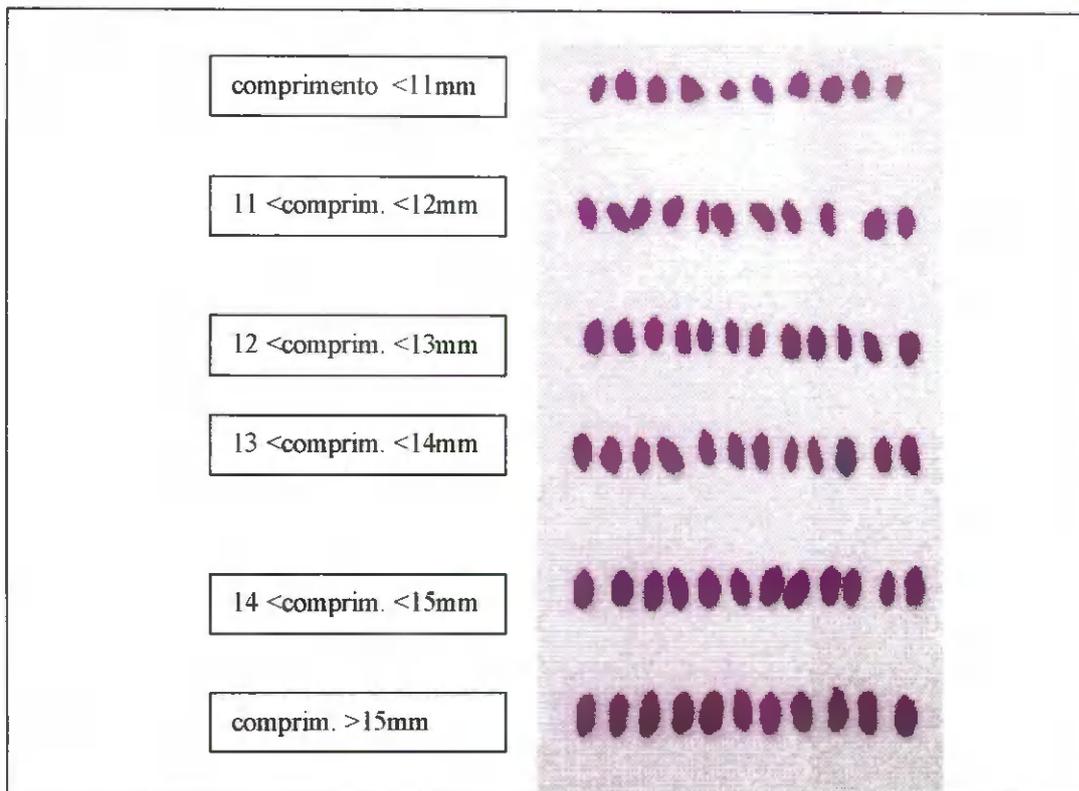


Figura 2.8.b. Classificação das sementes chochas

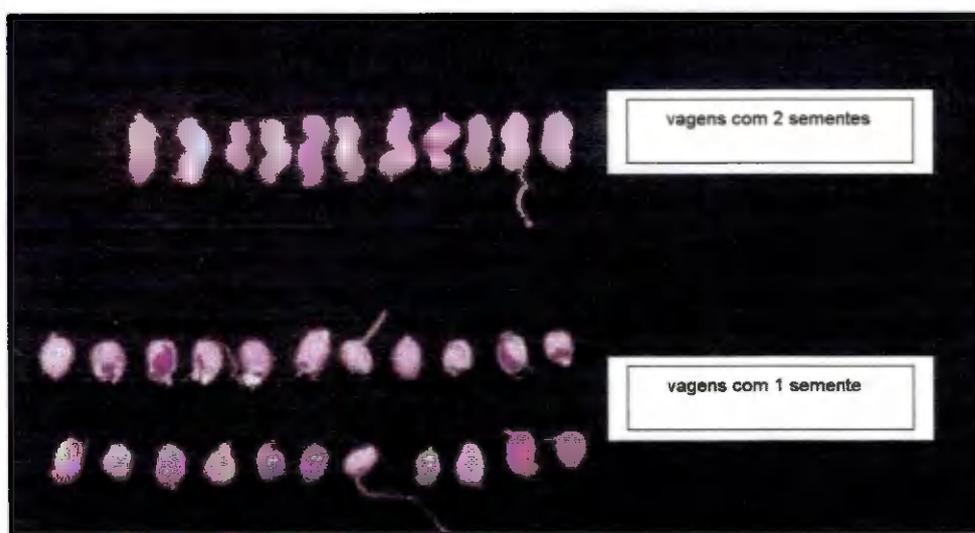


Figura 2.8.c. Classificação de vagens obtidas após o descascamento

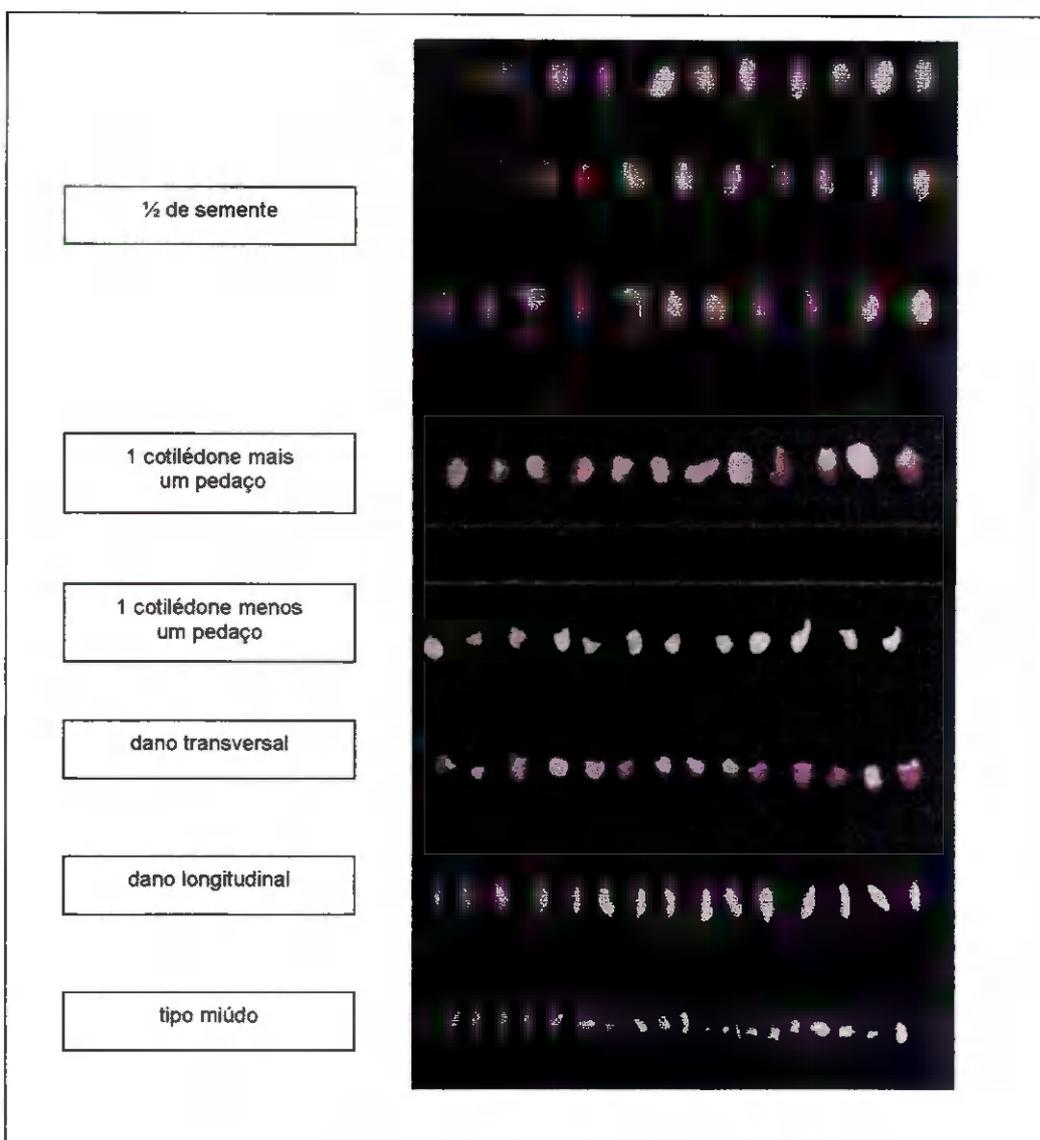


Figura 2.8.d. Caracterização das sementes danificadas

As propriedades físicas da amostra, foram determinadas no Laboratório de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba.

### 2.3.2. Teor de umidade

A determinação do teor de umidade do material foi realizada no início e no final do experimento, isto é, após o descascamento e após os testes de velocidade terminal.

A determinação do teor de umidade foi realizada pelo método oficial de estufa (BRASIL, 1992). As amostras foram inicialmente pesadas em uma balança de marca GERGER, com precisão de 0,001 gramas. Após sua permanência na estufa a 105°C, durante 24 horas, colocou-se em dissecadores durante 30 minutos para serem resfriadas e finalmente pesadas. A percentagem de umidade expressa em base seca foi obtida através da Equação (2.10).

$$\%U = \frac{P_i - P_f}{P_f} \times 100 \quad (2.10)$$

onde:

$P_i$  - peso inicial

$P_f$  - peso final

### 2.3.3. Tamanho

As amostras de sementes inteiras, sementes chochas, sementes danificadas e vagens foram separadas por tamanhos, utilizando um paquímetro Mitutoyo de 0,02mm de precisão, a partir desta classificação foi definida as amostras para realização da caracterização física.

### 2.3.4. Massa

A pesagem das partículas, de vários tamanhos de grãos e vagens, foi feita em balança analítica com 4 casas decimais, sendo pesados 10 grãos, separadamente, de cada tamanho obtido no descascamento.

### 2.3.5. Volume

O volume foi determinado pelo método da medida de massa de água deslocada, em balança analítica, pelo qual se calculou o volume da água deslocada para 10 grãos,

separadamente, de cada tamanho de sementes e vagens, utilizando a equação 2.2 e como mostrado na Figura 2.1.

$$Volume = \frac{massa\ de\ \acute{a}gua\ deslocada}{massa\ espec\ i\ f\ i\ c\ a\ da\ \acute{a}gua} \quad (2.2)$$

#### 2.3.6. Massa espec\ i\ f\ i\ c\ a

A massa espec\ i\ f\ i\ c\ a foi obtida pelo m\ e\ t\ o\ d\ o de volume descrito no item 2.3.5, diretamente pela equa\ c\ o\ e\ a\ b\ a\ i\ x\ o:

$$Massa\ espec\ i\ f\ i\ c\ a = \frac{massa\ do\ amendoim\ no\ ar}{volume\ do\ amendoim} \quad (2.3)$$

#### 2.3.7. \r{A}rea projetada

A \r{a}rea projetada do amendoim foi determinada pelo m\ e\ t\ o\ d\ o citado por MOHSENIN (1978), pela proje\ c\ o\ e\ o do objeto em sua posi\ c\ o\ e\ o de repouso, para tal, foi utilizado um retroprojetor, obtendo a \r{a}rea de proje\ c\ o\ e\ o por um plan\ i\ m\ e\ t\ r\ o da marca KOIZUNM TYPE KP-27 (Compensating Planimeter) com escala de 1:1000, em cm<sup>2</sup>, fazendo a corre\ c\ o\ e\ o pela f\ o\ r\ m\ u\ l\ a:

$$Ap = LxFxE^2 \quad (2.9)$$

onde:

*Ap*- \r{a}rea projetada do objeto na posi\ c\ o\ e\ o de repouso, cm<sup>2</sup>

*L*- leitura do plan\ i\ m\ e\ t\ r\ o, cm<sup>2</sup>

*F*- fator de corre\ c\ o\ e\ o do plan\ i\ m\ e\ t\ r\ o

*E*- escala do desenho

### 2.3.8. Esfericidade

A esfericidade foi calculada pela equação:

$$\varphi = \frac{D_i}{D_e} \times 100 \quad (2.6)$$

onde:

$\varphi$  - esfericidade

$D_i$  - diâmetro do maior círculo inscrito

$D_e$  - diâmetro do menor círculo circunscrito

OBS.: Valores próximos de 100 indica que a partícula está mais próximo da forma esférica.

### 2.3.9. Circularidade

A circularidade foi determinada pela equação:

$$C_r = \frac{A_p}{A_c} \times 100 \quad (2.4)$$

onde:

$C_r$  - circularidade

$A_p$  - área projetada na posição de repouso

$A_c$  - área do menor círculo que circunscribe o produto na posição de repouso

### 2.3.10. Porosidade

Para determinação da porosidade de sementes de amendoim, utilizou-se o picnômetro de comparação a ar (Figura 2.9), desenvolvido para essa finalidade pelo Núcleo de Tecnologia em Armazenagem. 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. Coloca-se sementes em um dos cilindros (nº 2) até seu completo enchimento e com a válvula de intercomunicação fechada, coloca-se 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  $P_2$ .

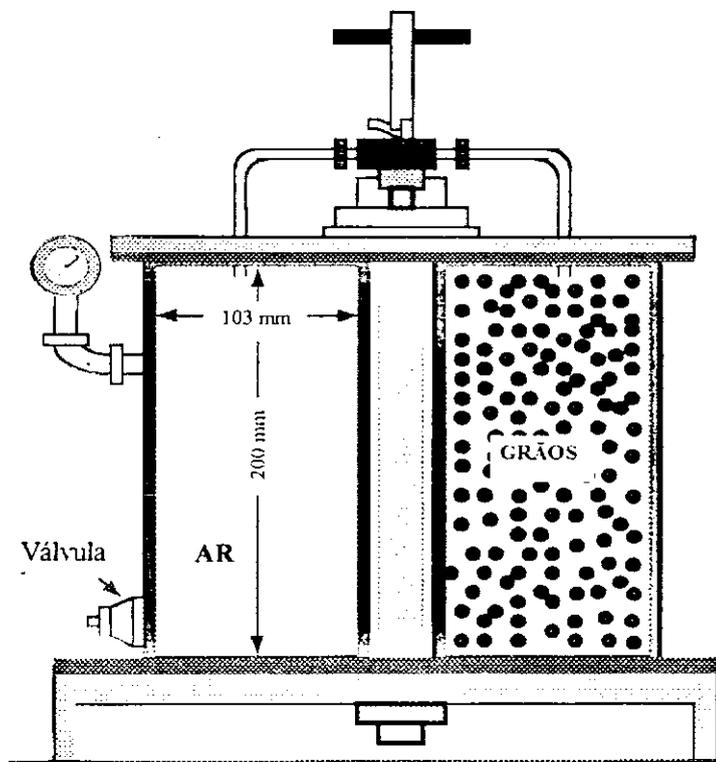


Figura 2.9. Picnômetro de comparação a ar desenvolvido pelo Núcleo de Tecnologia em Armazenamento, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB

Determinou-se, então a porosidade pela expressão:

$$P = \frac{(P_1 - P_2)}{P_2} \times 100 \tag{2.10}$$

### 2.3.11. Ângulo de repouso

O ângulo de repouso das sementes de amendoim foi determinado pelo equipamento mostrado na Figura 2.10.

Este equipamento é constituído de uma plataforma fixa (plano horizontal) e sobre ela uma plataforma móvel, construída com o material que se deseja testar; um transferidor (3) para medida de ângulo, e uma alavanca de sustentação e levantamento da plataforma móvel.

A determinação consiste na colocação de uma amostra de grãos na superfície móvel, que deve ser constituída do material que será usado no equipamento que se deseja projetar. Neste caso, o acrílico feito isto, vai-se levantando a alavanca (4) até se dá o início do movimento, ou seja, quando as sementes começarem a escorregar, mede-se o ângulo formado entre a horizontal e o plano inclinado, este ângulo é o ângulo de repouso.

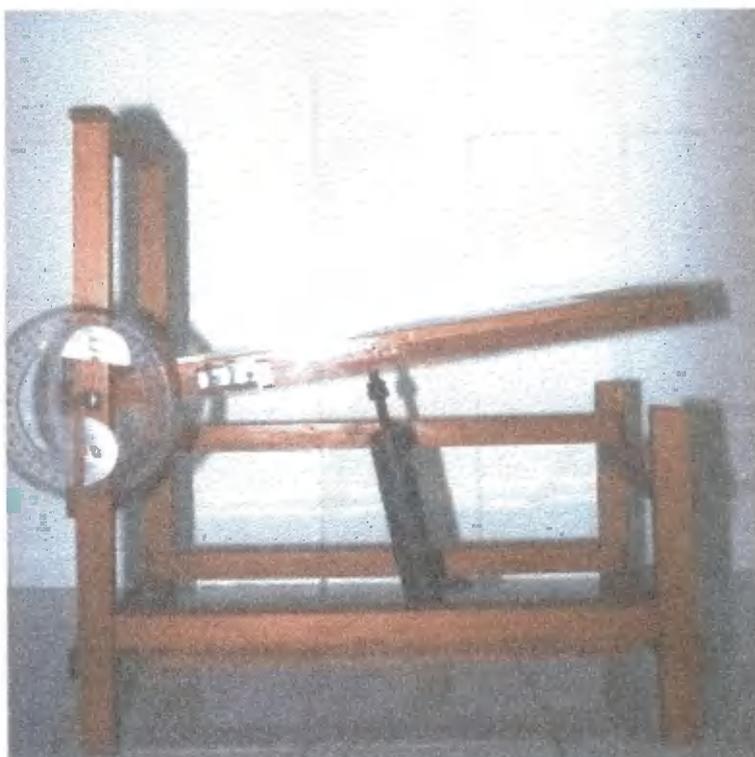


Figura 2.10. Equipamento de determinação do ângulo de repouso

## 2.4. Resultados e Discussão

### 2.4.1. Teor de umidade

Os resultados de teor de umidade em base seca são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Valores médios para teor de umidade do amendoim L7 após o descascamento e após os testes de velocidade terminal.

Após o descascamento			
Vagem	Semente		Casca
9,45%	8,01%		13,33%
Após os testes de velocidade terminal			
Vagem	Semente inteira	Semente danificada	Semente chocha
9,43%	7,66%	7,81%	8,76%

\*Casca foram descartadas

### 2.4.2. Tamanho

Na Tabela 2.3, encontrar-se as classes de comprimento de vagens, sementes inteiras e sementes chochas, encontradas para amendoim variedade L7, com seus respectivos números de sementes e frequências com a qual ocorreram na amostra obtida da máquina de descascamento por acionamento mecânico (Embrapa Algodão).

Observando a Tabela 2.3, verifica-se que a maior frequência de vagem ocorreu no intervalo de 30-35mm, com 46,6%, seguida de 29,2% no intervalo de 35-40mm, perfazendo um total de 75,8% nestas duas classes. Quanto ao diâmetro de vagem, foi encontrado 7 classes, com intervalos de 1mm, com comprimentos inferiores a 10mm até 15mm, observando-se que a maior frequência foi obtida na classe 12-13mm com 51,6% seguida da classe 13-14mm, com 27,6%, portanto, obtendo-se 79,2% da amostra com diâmetro entre 12 e 14mm.

Tabela 2.3. Classes de comprimento e diâmetro de vagens, sementes inteiras e sementes chochas, com as frequências as quais ocorrem nas amostras

Comprimento			Diâmetro		
Classe	Número de sementes	Frequência	Classe	Número de sementes	Frequência
mm		%	mm		%
<b>Vagens</b>					
<i>C</i> < 20	36	7,2	<i>D</i> < 10	1	0,2
20 - 25	20	4	10 - 12	15	3,0
25 - 30	55	11	12 - 13	79	15,8
30 - 35	233	46,6	12 - 13	258	51,6
35 - 40	146	29,2	13 - 14	138	27,6
<i>C</i> > 40	10	2	14 - 15	7	1,4
			<i>D</i> > 15	2	0,4
<b>Sementes inteiras</b>					
<i>C</i> < 12	26	5,10	7 - 8	116	22,97
12 - 13	57	11,17	8 - 9	254	50,29
13 - 14	121	23,72	9 - 10	135	26,73
14 - 15	124	24,31			
15 - 16	85	16,66			
16 - 17	67	13,14			
17 < <i>C</i>	30	5,88			
<b>Sementes chochas</b>					
<i>C</i> < 11	13	8,38	<i>D</i> < 4	3	1,93
11 - 12	20	12,90	4 - 5	14	9,03
12 - 13	33	21,29	5 - 6	30	19,35
13 - 14	42	27,09	6 - 7	72	46,45
14 - 15	31	20,00	7 - 8	36	23,22
15 - 16	16	10,32			
<b>Semente danificada</b>					
1/2 s. c. <12mm	33	6,49	4 - 5	208	40,94
1/2 s. c. 12-13mm	74	14,56	5 - 6	221	43,5
1/2 s. c. 13-14mm	118	23,22	6 - 7	79	15,55
1/2 s. c. 14-15mm	128	25,19			
1/2 s. c. 15-16mm	98	19,29			
1/2 s. c. >16mm	57	11,22			
Miúdo	31	10,87	3,81	6,03	
6,305**					
Dano transv.	14	4,91	1,71	7,31	
3,305**					
Dano longit.	51	17,89	6,25	5,70	
12,80**					
1cotil. - pedaço	120	42,10	14,72	6,31	
11,71**					
1cotil. + pedaço	69	24,21	8,46	6,03	
14,28**					

\*amostras de 500 vagens e 500 sementes e 155 sementes chochas

\*\*devido a irregularidade destas formas, os tamanhos foram feitos por média

Para sementes inteiras, encontrou-se 7 classes de comprimento, verificando-se a maior frequência nos intervalos de 14-15mm (24,31%) e de 13-14mm (23,72%). Quanto ao diâmetro, o intervalo que apresentou a maior frequência foi de 8-9mm com 50,29%.

As sementes chochas apresentaram a maior frequência de comprimento em 13-14mm com 27,09% seguida de 12-13mm e 14-15 com 21,29 e 20,0%, respectivamente. O diâmetro de maior frequência no intervalo de 4 e 8mm foi de 6-7 com 46,45%, seguido pelo diâmetro de 7-8mm com 23,22%.

Estes dados, quando comparados com a variedade BR1, estudada por ARAÚJO *et al.* (1997) e SILVA *et al.* (1996) pode-se verificar que a variedade L7 possui dimensões perpendiculares maiores, mas que sua frequência é mais dispersa entre classes.

#### 2.4.3. Massa, volume e massa específica

Na Tabela 2.4 são mostradas as médias de massa (M), volume (V) e massa específica ( $\rho$ ) para as diversas partículas de sementes inteiras, chochas, danificadas e vagens obtidas após o descascamento do amendoim variedade L7.

A massa das sementes inteiras, verificadas na Tabela 2.4, variaram de 0,3672 a 0,7468g, sendo sempre crescente com o aumento do tamanho. O mesmo comportamento foi observado para as sementes chochas, variando de 0,2028 a 0,3787g. A massa das diversas classes de sementes danificadas, ficaram entre 0,0907 e 0,4787g. As partículas classificadas como meia semente, com intervalo de comprimento de menor que 12mm a 16mm exibiram massa crescente com o tamanho, exceto as partículas maiores que 16mm, que apresentaram um pequeno decréscimo.

O volume das sementes inteiras apresentaram comportamento crescente de 3,394 a 7,0mm<sup>3</sup>. Para sementes chochas, variaram de 1,950 a 3,391mm<sup>3</sup>, exibindo o mesmo comportamento de crescimento que o das sementes inteiras.

Para sementes danificadas, verificou-se volumes entre 0,846 e 4,524mm<sup>3</sup>, só podendo ser relacionado com o tamanho, as partículas de ½ sementes que apresentaram-se crescentes até a classe 15-16mm, decrescendo um pouco na classe das partículas  $D > 16$ mm.

Tabela 2.4. Médias de massa (M), volume (V) e massa específica ( $\rho$ ) para as diferentes partículas de amendoim variedade L7.

	M (g)	V (mm <sup>3</sup> )	$\rho$ (g.cm <sup>-3</sup> )
<b>Sementes inteiras (mm)</b>			
C < 12	0,3672	3,394	1,0820
12 < C < 13	0,4705	4,367	1,0778
13 < C < 14	0,5495	5,126	1,0729
14 < C < 15	0,5910	5,550	1,0686
15 < C < 16	0,6799	6,369	1,0684
16 < C < 17	0,7369	7,037	1,0497
C > 17	0,7468	6,991	1,0682
<b>Sementes chochas (mm)</b>			
C < 11	0,2028	1,950	1,0608
11 < C < 12	0,2270	2,091	1,0547
12 < C < 13	0,2550	2,367	1,0689
13 < C < 14	0,3218	2,893	1,1244
14 < C < 15	0,3309	2,976	1,1117
C > 15	0,3787	3,391	1,1176
<b>Sementes danificada (mm)</b>			
Miúdo	0,0907	0,846	1,0687
Dano transversal	0,2951	2,779	1,0639
Dano longitudinal	0,1826	1,687	1,0828
1 cot. - pedaço	0,2540	2,406	1,0682
1 cot. + pedaço	0,4787	4,524	1,0593
1/2 s. C < 12mm	0,2276	2,077	1,0980
1/2 s. 12 < C < 13mm	0,2691	2,467	1,0941
1/2 s. 13 < C < 14mm	0,2856	2,644	1,0812
1/2 s. 14 < C < 15mm	0,3226	2,977	1,0838
1/2 s. 15 < C < 16mm	0,3884	3,612	1,0759
1/2 s. C > 16mm	0,3552	3,336	1,0658
<b>Vagem (mm)</b>			
com 1 semente	0,7377	11,159	0,6623
com 2 sementes	0,8847	15,181	0,6718

Os valores para massa específica das sementes inteiras, chochas e danificadas não apresentaram correlação direta ou indireta com o aumento do tamanho. Variando de 1,04 à 1,08 g.cm<sup>-3</sup>, para sementes inteiras; de 1,05 a 1,11 g.cm<sup>-3</sup> para sementes chochas e de 1,05 a 1,09 g.cm<sup>-3</sup> para sementes danificadas, ou seja, aproximadamente, constante.

As vagens apresentaram peso de 0,73 e 0,88g, volume de 11,1 e 15,10mm<sup>3</sup> e massa específica de 0,66 e 0,67 g.cm<sup>-3</sup>.

#### 2.4.4. Área projetada, circularidade e esfericidade

Na Tabela 2.5 encontram-se os valores médios obtidos para área projetada, circularidade e esfericidade de sementes de amendoim variedade L7.

Tabela 2.5. Valores médios para área projetada ( $A_p$ ), circularidade ( $Cr$ ) e esfericidade ( $\phi$ ) das partículas de amendoim variedade L7.

	$A_p$ ( $mm^2$ )	$Cr$ (%)	$\phi$ (%)
<b>Sementes inteiras (mm)</b>			
$C < 12$	70,9260	71,5511	72,9249
$12 < C < 13$	84,4665	66,7687	68,6145
$13 < C < 14$	98,1840	67,1358	65,4084
$14 < C < 15$	100,6860	60,5995	59,7099
$15 < C < 16$	108,3617	56,1694	56,7809
$16 < C < 17$	115,6133	54,6117	55,8807
$C > 17$	119,7750	51,7655	53,0772
<b>Sementes chochas (mm)</b>			
$C < 11mm$	12,4313	22,6198	53,9302
$11 < C < 12mm$	56,0580	53,0119	55,5735
$12 < C < 13mm$	55,8225	43,9304	47,8435
$13 < C < 14mm$	69,1995	47,3417	48,9526
$14 < C < 15mm$	71,1240	43,6665	47,5715
$C > 15mm$	25,3125	16,9879	39,2032
<b>Sementes danificada (mm)</b>			
Miúdo	38,2230	61,0328	59,0408
Dano transversal	37,7250	83,5082	80,6473
Dano longitudinal	37,6365	39,5092	37,6471
1 cot. - pedaço	49,7833	67,8572	63,6049
1 cot. + pedaço	67,8225	59,3926	53,0135
1/2 s. $C < 12$	43,5225	69,9488	66,7300
1/2 s. $12 < C < 13$	51,6450	66,2338	64,1489
1/2 s. $13 < C < 14$	54,2700	61,0746	56,6225
1/2 s. $14 < C < 15$	58,8750	58,4191	56,1290
1/2 s. $15 < C < 16$	65,9175	55,1166	52,7369
1/2 s. $C > 16$	67,8450	52,2360	51,6304
<b>Vagem (mm)</b>			
com 1 semente	93,0465	64,7407	65,9952
com 2 sementes	135,0885	40,7044	88,1155

As sementes inteiras apresentaram circularidade entre 51,76 e 71,55%, verificando-se decréscimo com o aumento do comprimento. O que também foi observado quanto a esfericidade, que apresentou seu valor máximo em 72,79% e o mínimo de

53,07%. A área projetada na posição de repouso, apresentou-se crescente com o aumento do comprimento, com valores entre 70,92 a 119,77mm<sup>2</sup>.

Para sementes chochas, a área projetada, a circularidade e a esfericidade aumentaram com o comprimento.

As partículas de sementes danificadas, miúdo, dano transversal, longitudinal, um cotilédone menos pedaço e um cotilédone mais pedaço, apresentaram valores variados desse parâmetro. Na classe ½ semente, verificou-se uma diminuição da esfericidade e da circularidade com o aumento do comprimento.

Para as vagens, os valores da esfericidade ficaram entre 65,99 e 88,11% e a circularidade entre 64,74 e 40,7%, para vagens com 1 e 2 sementes, respectivamente.

#### 2.4.5. Porosidade

A porosidade do amendoim variedade L7, obtida no picnômetro de comparação a ar, estando o material com teor de umidade de 8,01% b.s., foi de 44,0%, valor este maior, quando comparado aos encontrados por VARSHNEY *et al.* (1994) para 5 variedades de amendoim (GAUG-1, GG- 2, GAUG-10, GG-11, M-13) em diferentes teores de umidade (5, 12, 17 e 22%), os autores verificaram a maior porosidade na variedade M-13 a 22% de umidade, que foi de 39,56% , no entanto, vale ressaltar que a variedade estudada apresenta sementes consideravelmente maiores do que as demais.

#### 2.4.6. Ângulo de repouso

O ângulo de repouso do amendoim da variedade L7, com teor de umidade de 8,01% b.s., foi de 18°, comparando com os valores encontrados, indicam ser menores ao encontrado por ARAÚJO (1999) para a variedade BR1, que foi de 22°.

## 2.4. Conclusões

Os resultados médios obtidos para as características físicas de amendoim da variedade L7 foram:

A maior frequência observada para vagens, quanto ao comprimento, foi nas classes de 30 a 40mm, apresentando 75,8% de ocorrência. Quanto ao diâmetro, a maior frequência foi observada no intervalo de  $12\text{mm} < D < 14\text{mm}$ , com 79,2% de ocorrência. A massa variou de 0,7377 a 0,8847g, o volume médio verificado ficou entre 11,16 e  $15,18\text{mm}^3$ , a área projetada apresentou índices entre 93,04 e  $135,08\text{mm}^2$ , circularidade de 64,74 a 40,70% e esfericidade de 65,99 a 88,11%.

Para sementes inteiras, verificou-se uma maior frequência de comprimento, de 48,03% nas classes entre 13 a 15mm e 77,02% destas sementes apresentaram diâmetro entre 8 a 10mm, os valores de massa ficou entre 0,3672 e 0,7468 g, o volume entre  $3,394$  a  $7,0\text{mm}^3$ , a área projetada entre 12,4313 a  $71,124\text{mm}^2$ , a circularidade apresentou entre 51,75 e 71,55% e a esfericidade revelou índices entre 53,07 e 72,92%.

As sementes chochas, apresentaram maior frequência de comprimento nas classes de 12 a 14mm (48,38%), diâmetro entre 5 e 7mm (65,80%), a massa entre 0,2028 e 0,3787 g, volume médio entre 1,950 e  $3,391\text{mm}^3$ , área projetada de 12,43 a  $71,12\text{mm}^2$ , a circularidade de 22,61 a 53,01% e esfericidade entre 53,93 e 48,95%.

A massa das sementes danificadas, foi de 0,0907 e 0,3552 g, o volume médio ficou entre 0,846 e  $3,336\text{mm}^3$ , área projetada entre 43,78 a  $67,84\text{mm}^2$ , a circularidade foi indicada entre 39,50 a 83,50% e esfericidade entre 37,64 e 80,64%.

A porosidade para o amendoim variedade L7 foi de 44,0%, para um teor de umidade de 8,01% b.s.

O ângulo de repouso determinado para o amendoim variedade L7 foi de  $18^\circ$ .

## *Capítulo III*

### **Características aerodinâmicas de amendoim**

#### **3.1. Introdução**

A aerodinâmica já tem sido mencionada como um dos fatores que influenciam a velocidade terminal de uma partícula. Há muitas outras que, também, exercem sua influência: forma, massa específica, volume, textura da superfície, quantidade de superfície exposta, área frontal e dimensões gerais. Em relação a separação de sementes, o ar pode ser utilizado para separar as leves das pesadas, onde, os fatores determinantes são geralmente peso de cada semente, sua densidade ou massa específica. Por outro lado, se as sementes em uma mistura são todas da mesma densidade, mas diferem em formato, o ar pode ser utilizado para separar as que tem a maior superfície das que tem a menor, isto é, separar sementes de formato irregulares de sementes esféricas (VAUGHAM *et al.*, 1976).

##### **3.1.1. Objetivo**

Nesta etapa da pesquisa, o objetivo foi:

- a) Desenvolver um equipamento para determinação da velocidade terminal experimental.
- b) Determinar a velocidade terminal teórica e experimental de amendoim da variedade L7, nos diversos tamanhos, obtidos através do descascamento na máquina por acionamento mecânico (Embrapa Algodão).
- c) Comparar velocidades terminais experimentais e teóricas calculadas por 4 diferentes métodos.

## 3.2. Revisão Bibliográfica

### 3.2.1. Equações que governam o sistema

Na análise do escoamento de fluidos em torno de partículas sólidas, a configuração mais simples é a de uma esfera rígida, de raio  $R$ , caindo com velocidade constante e sob ação do campo gravitacional, em um meio fluido estacionário de dimensões infinitas, conforme ilustra a Figura 3.1. Este fenômeno é tratado na maioria dos textos básicos de Mecânica dos fluidos. Na análise desenvolvida por BIRD *et al.* (1982), três hipóteses são consideradas nesse caso:

- As grandezas envolvidas não são função da coordenada  $z$ .
- O escoamento é isotérmico
- O escoamento é incompressível

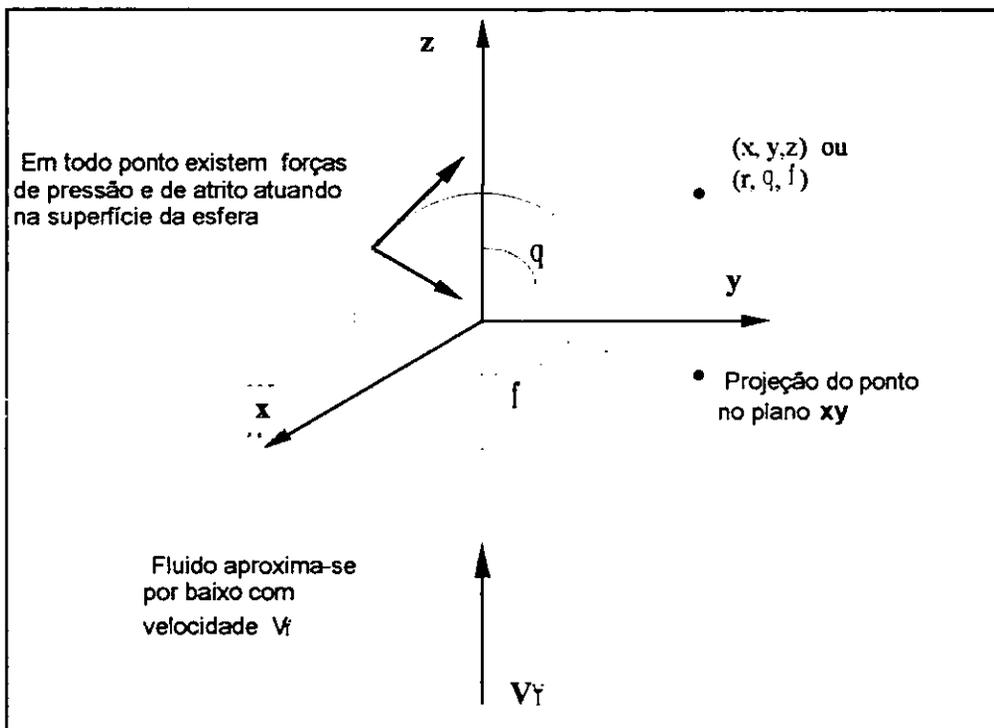


Figura 3.1. Sistema de coordenadas usado na descrição do escoamento de um fluido sobre uma esfera rígida. (Reproduzida a partir de BIRD *et al.*, 1982).

Sob estas hipóteses, as equações que regem o sistema, segundo BIRD *et al.* (1982), são:

Componente r:

$$\rho \left( U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} - \frac{U_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} - \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{rr}) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{r\theta} \sin \theta) - \frac{\tau_{\theta\theta} + \tau_{\phi\phi}}{r} \right] \quad (3.1)$$

Componente  $\theta$

$$\rho \left( U_r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{U_r U_\theta}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} - \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{\theta\theta} \sin \theta) - \frac{\tau_{r\theta} + \tau_{\phi\phi} \cot \theta}{r} \right] \quad (3.2)$$

Equação da continuidade

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 U_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (U_\theta \sin \theta) = 0 \quad (3.3)$$

A função corrente  $\psi$  é definida como:

$$U_r = -\frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (3.4)$$

$$U_\theta = +\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (3.5)$$

Considerando não haver escorregamento na superfície sólida tem-se:

$$\text{CC1: } U_r = 0 \quad \text{e } U_\theta = 0 \quad \text{quando } r = R$$

$$\text{CC2: } U_r = -U \cos \theta \quad \text{e } U_\theta = U \sin \theta \quad \text{quando } r \rightarrow \infty$$

Para uma dada equação construtiva do comportamento do fluido as equações de 3.1 a 3.5 podem ser trabalhadas juntamente com as condições de contorno para obter expressões para  $\psi$ ,  $U_\theta$ ,  $U_r$ ,  $\tau_{r\theta}$ ,  $\tau_{rr}$ ,  $\tau_{\theta\theta}$  e  $\tau_{\phi\phi}$ , as quais permitirão a integração da expressão da força resistiva dada por:

$$f = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (-P|_{r=R} \cos \theta) R^2 \sin \theta d\theta d\phi + \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (\tau_{r\theta}|_{r=R} \sin \theta) d\theta d\phi \quad (3.6)$$

Em cada ponto da superfície esférica existe uma pressão sobre o sólido que atua perpendicularmente à superfície. A componente z desta pressão é  $-p \cos \theta$ . O produto desta pressão local pela área da superfície  $R^2 \sin \theta d\theta d\phi$  sobre a qual ela atua, e integrada em toda a superfície esférica, fornece a componente z da força resultante de resistência ao movimento devido aos esforços normais. Em adição a estas forças, normais à superfície do corpo, há uma força de cisalhamento  $\tau$  agindo tangencialmente na superfície na direção do escoamento e resultante do efeito do atrito, que é representado pelo segundo termo da Equação 3.6. Esta, é o resultado da integração sobre cada ponto da superfície esférica do componente  $-\tau_{r\theta}$  do tensor tensão extra, na direção z. A soma dessas duas resultantes leva à expressão 3.6 da força resistiva f.

### 3.2.2. Coeficiente de arraste

Nas aplicações, em geral, o objeto fica livre para adotar sua própria orientação. Considerando ainda o mesmo sistema definido anteriormente, a equação do movimento da partícula será:

$$\rho_s \frac{d\vec{V}}{dt} = (\rho_s - \rho) \vec{g} + \frac{\vec{f}}{Vol} \quad (3.7)$$

onde:

$\vec{V}$  = vetor velocidade da partícula

$Vol$  = volume da partícula

O coeficiente de arraste,  $C_D$ , é definida de tal forma que:

$$\bar{f} = \frac{1}{2} \rho |\bar{U} - \bar{V}|^2 A_p C_D \frac{(\bar{U} - \bar{V})}{|\bar{U} - \bar{V}|} \quad (3.8)$$

onde  $A_p$  é a área projetada definida como:

$$A_p = \frac{\pi D_p^2}{4} \quad (3.9)$$

Para situação de regime permanente de escoamento, as Equações 3.7 e 3.8, em concordância com a 2ª. Lei de Newton, resultam na seguinte expressão para o coeficiente de arraste:

$$C_D = \frac{4}{3} g \frac{D_p (\rho_s - \rho)}{(\bar{U} - \bar{V})^2 \rho} \quad (3.10)$$

A Equação 3.10 é comumente estendida às partículas não esféricas de geometrias isométricas.

explicitando  $(U - V)$  na Equação 3.10 obtém-se:

$$|\bar{U} - \bar{V}| = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{D_p (\rho_p - \rho)}{C_D \rho}} \quad (3.11)$$

onde:

$$C_D = f(R_e, \varphi)$$

e

$$R_e = \frac{\rho (|\bar{U} - \bar{V}|) D_p}{\mu}$$

Conhecendo-se a expressão para  $C_D$  é possível através da Equação 3.11 prever o valor da velocidade terminal  $v_t$ .

SLAVOSKI e LOMEV (1971) estudaram as propriedades físicas e aerodinâmicas para utilizá-los no dimensionamento de equipamentos para processamento de cachos de uva fresca, sementes secas e polpa.

NEBRA e MACEDO (1988) obtiveram o coeficiente de arraste das partículas com forma de fibra em função do número de Reynolds por  $10 < N_{Rp} < 2000$ . Estes dados são básicos no desenho de sistemas para o transporte pneumático e para a secagem do bagaço.

OEZERDEM e TOKSOY (1993) calcularam o coeficiente de arraste, o número de Reynolds e a velocidade terminal, considerando que os grãos possuem geometria esférica equivalente. Determinaram as propriedades físicas e aerodinâmicas de algumas variedades de grãos de milho, soja, arroz, trigo, cevada, feijão e girassol com o objetivo de dimensionar equipamentos de transporte, secagem e limpeza.

As características aerodinâmicas de sementes de nabo foram encontradas por RAILA e BLEIZGYS (1996) para camadas acima de 70cm, verificando que a resistência aerodinâmica é diretamente proporcional a profundidade da camada e a velocidade do ar (para velocidade do ar de  $0-0,55 \text{ m.s}^{-1}$ ). A casca das sementes de nabo borbulhavam quando a velocidade do ar alcançava  $0,85 \pm 0,04 \text{ m.s}^{-1}$ .

BOGACZYNSKI *et al.* (1975) determinaram algumas das propriedades aerodinâmicas de sementes de trigo, centeio e cevada e observaram que o coeficiente de arraste diminuiu com o aumento do tamanho do grão, sendo 1,0 para pequenas sementes e 0,66 para sementes bem desenvolvidas.

#### 4.2.2. Fluidos Newtonianos

Os estudos envolvendo fluidos Newtonianos, em particular água e ar têm merecido muita atenção. Para esses fluidos, já são conhecidos os resultados da integração dos perfis de velocidade ao redor da esfera para escoamento axissimétrico permanente e a baixos números de Reynolds (BIRD *et al.*, 1982). Para o sistema definido na seção 3.2.1, as equações constitutivas do comportamento dos fluidos Newtonianos podem ser

expressas em termos da função corrente utilizando as equações 3.4 e 3.5. A substituição das equações resultantes nas equações do movimento 3.1 e 3.2, resulta:

$$E^4 \psi = \left[ \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left( \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial E^2 \psi}{\partial \theta} - \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial E^2 \psi}{\partial r} \right) - \frac{2E^2 \psi}{r^2 \sin \theta} \left( \frac{\partial \psi}{\partial r} \cos \theta - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \sin \theta \right) \right] \frac{\rho}{\mu} \quad (3.12)$$

onde:

$$E^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\sin \theta}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \right)$$

Analisando a Equação 3.12 percebe-se que o segundo termo do lado direito tem comportamento não linear, tornando assim muito difícil obter uma solução exata. Considerando porém, o regime laminar de escoamento, as forças inerciais podem ser desprezadas. Dessa forma pode-se escrever:

$$E^4 \psi = 0 \quad (3.13)$$

A equação acima foi resolvida por Stokes a 145 anos atrás, resultando em expressões para  $U_\theta$ ,  $U_r$ ,  $p$  e  $\tau_{r\theta}$ , que substituídas na Equação 3.6 da força resistiva, tornam possível a integração da mesma, chegando então na seguinte expressão:

$$F = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g + 6\pi \mu R U_\infty \quad (3.14)$$

Nesta expressão o termo  $6\pi \mu R U_\infty$  representa a tão conhecida equação de Stokes (MOHSENIN, 1978).

A equação de Stokes, segundo Slattery, citado por MOHSENIN (1978), pode ser obtida integrando-se o termo de dissipação de energia, da equação da energia mecânica, em todo o volume do fluido:

$$U_{\infty} f = - \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_R^\infty (\tau \cdot \nabla \bar{U}) r^2 dr \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.15)$$

onde:

$$(\tau: \nabla \bar{U}) = \sum_i \sum_j \tau_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} U_i$$

e

$$i, j = r, \theta$$

Inserindo a equação obtida por Stokes na Equação 3.8 com  $\bar{U} = 0$  obtém-se uma forma mais conhecida, dada por:

$$C_D = \frac{24}{R_e} \tag{3.16}$$

Com a substituição da Equação 3.16 na Equação 3.11, obtém-se:

$$U = g \frac{D_p^2 (\rho_s - \rho)}{18\mu} \tag{3.17}$$

Para números de Reynolds maiores do que 0,1 foi constatado que a Equação 3.16 apresenta desvio em relação aos pontos experimentais que cresce à medida que aumenta o número de Reynolds. Na faixa  $0,1 < \text{Reynolds} < 1,0$  os valores experimentais de  $C_D$  vão se tornando cada vez maiores, em relação à curva teórica, na medida em que Reynolds aumenta, como pode ser visto na Figura 3.2.

Jenson, citado por MOHSENIN (1978), empregando o Método de Diferenças Finitas, obteve solução aproximada para números de Reynolds maiores do que a unidade, onde os efeitos inerciais adquirem considerável importância. No entanto para  $N_R > 400$  os resultados são essencialmente empíricos como verificado por CHHABRA, (1986).

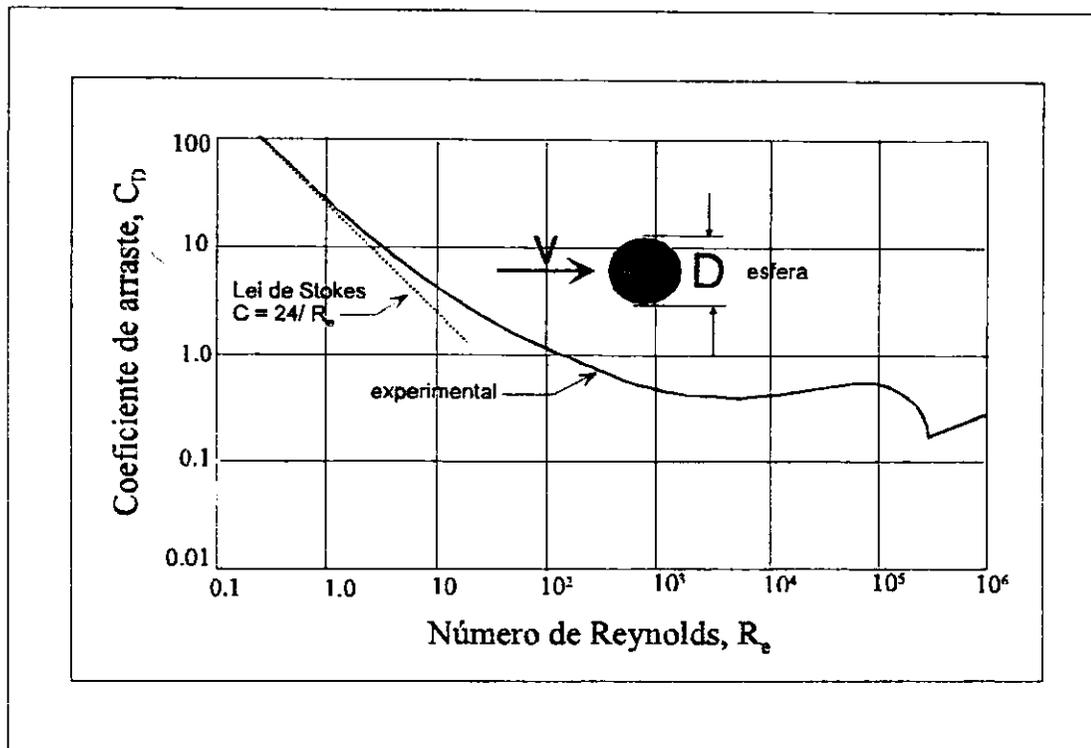


Figura 3.2. Coeficiente de arraste para partículas com formas geométricas regulares. (Reproduzida a partir de VENNARD, 1961)

### 3.2.3.1. Fluidos Newtonianos e partículas esféricas

Stokes provou que para  $N_R < 1$ , quando as forças inerciais podem ser desprezadas, considerando-se apenas as 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 dá a força de arraste por:

$$F_D = 3 \pi \mu v D_p \quad (3.18)$$

Combinando esta equação com a Equação 3.8 obtida para a força de arraste e considerando  $A_p = \pi/4 D_p^2$ , o coeficiente de arraste será dado por:

$$C_D = \frac{24}{N_R} \quad (3.19)$$

Para  $N_R > 1$ , a Lei de Stokes não é mais aplicável porque o escoamento se abre atrás do objeto e o coeficiente de arraste é uma combinação do arraste por atrito e arraste devido a pressão numa faixa de até  $N_R = 1000$  (MOHSEIN, 1978).

Oseen, citado por BRAGA (1997), estendeu a faixa de aplicação da solução de Stokes para a condição onde além das forças viscosas existe algum efeito de natureza inercial atuando sobre a partícula, chegando então a uma equação válida para  $N_R < 2$ , dada por:

$$C_D = \frac{24}{R_e} \left[ 1 + \frac{3}{16} R_e \right] \quad (3.20)$$

Surgiram depois dessa, várias soluções empíricas para explicar os efeitos viscosos e inerciais:

Allen, citado por GOVIER (1972):

$$C_D = \frac{30}{R_e^{0.625}}, \text{ válida para } 1 < R_e < 10^3 \quad (3.21)$$

Para BIRD *et al.* (1982):

$$C_D = \frac{18.5}{R_e^{0.6}}, \text{ válida para } 2 < R_e < 500 \quad (3.22)$$

Na região da "Lei de Newton do Movimento", ou seja, na faixa onde há predominância de efeitos inerciais, o coeficiente de arraste é aproximadamente constante. Nesta região, a força de resistência que atua sobre a esfera é aproximadamente proporcional ao quadrado da velocidade do fluido que escoar em torno da esfera e o coeficiente de arraste é dado por:

$$C_D \cong 0,44, \text{ válida para } 5 \times 10^2 < R_e < 2 \times 10^5 \quad (3.23)$$

### 3.2.3.2. Fluidos Newtonianos e partículas não esféricas

As relações obtidas para partículas esféricas foram modificadas para não esféricas correlacionando fatores de forma como esfericidade. Desse modo a velocidade terminal de uma partícula esférica isométrica isolada, em regime de Stokes, é dada pela Equação 3.24 (Pettyjohn e Christiansen, 1948, citado por MOHSENIN, 1978).

$$V_t = \frac{K_1 g(\rho_s - \rho)}{18\mu} D_p^2, \text{ válida para } N_R < 0,1 \quad (3.24)$$

onde ,

$K_1$  = função empírica da esfericidade  $\varphi$  e é dada por:

$$K_1 = 0,843 \log \left[ \frac{\varphi}{0,065} \right] \quad (3.25)$$

$\varphi$  = esfericidade dada por:

$$\varphi = \frac{\pi D_p^2}{\text{area superf. da partícula}} \quad (3.26)$$

Para condições de escoamento turbulento, numa região onde há predominância de efeitos inerciais, temos:

$$V_t = \left[ \frac{4g(\rho_s - \rho)D_p}{3\rho K_2} \right]^{1/2} \text{ válida para } N_R > 10^3 \quad (3.27)$$

onde,

$K_2$  = função da esfericidade dada por:

$$K_2 = 5,31 - 4,88\varphi \quad (3.28)$$

Uma combinação das Equações 3.24 com 3.17 e 3.27 com 3.10, conduz a rescrever as Equações 3.24 e 3.27, como segue:

$$C_D = \frac{24}{k_1 N_R}, \text{ válida para } N_R < 0,1 \quad (3.29)$$

$$C_D = k_2, \text{ válida para } N_R > 10^3 \quad (3.30)$$

Muitos outros resultados para partículas não esféricas foram apresentados por diversos autores. MOHSENIN (1978), fornece uma tabela com equações comparativas para esferas e outros objetos com formas geométricas regulares. Ele ainda ressalta que poucos trabalhos foram feitos com partículas de formas irregulares as quais são particularmente complicadas, devido a sua orientação ao acaso e a variedade de métodos para expressar tamanho e dimensões a serem usados no cálculo do número de Reynolds e área frontal.

#### 3.2.4. Velocidade terminal

Em queda livre, o objeto alcançará uma velocidade terminal, velocidade constante,  $v_t$ , na qual a força de aceleração da gravidade iguala-se à força de arraste,  $f_r$ .

Para se ter uma expressão que nos dê a velocidade terminal, iguala-se a força gravitacional,  $F_g$ , a força de arraste (empuxo),  $f_r$ , e a velocidade,  $v$ , a velocidade terminal,  $v_t$ .

$$F_g = f_r \text{ quando } v = v_t$$

Substituindo por  $F_g$  e  $F_r$ , a expressão para a velocidade terminal será:

$$F_g = m_p \cdot g \left[ \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \right] = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A_p \cdot \rho_f \cdot v^2 \quad (3.31)$$

e

$$v_t = \left[ \frac{2W (\rho_p - \rho_f)}{\rho_p \cdot \rho_f \cdot A_p \cdot C_D} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.32)$$

$$C_D = \frac{2W (\rho_p - \rho_f)}{v_t^2 \cdot A_p \cdot \rho_p \cdot \rho_f} \quad (3.33)$$

onde:

$g$  – aceleração da gravidade

$m_p$  – massa da partícula

$\rho_p$  – massa específica da partícula

$\rho_f$  – massa específica do fluido

$A_p$  – área projetada da partícula, na posição normal ao movimento

$W$  – peso da partícula ( $W = m \cdot g$ )

$C$  – coeficiente de arraste =  $C_f + C_d$

$C_f$  – coeficiente de arraste friccional

$C_d$  – coeficiente de arraste perfil

Quando temos corpos esféricos, por exemplo, uma esfera de diâmetro  $D_p$

$$A_p = \frac{\pi}{4} D_p^2 \quad (3.34)$$

$$W = \frac{\pi}{6} \rho_p \cdot g \cdot D_p^3 \quad (3.35)$$

Sua velocidade terminal será dada por:

$$v_t = \left[ \frac{4g \cdot D_p (\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f \cdot C_D} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.36)$$

Para condições de correntes laminar, os coeficientes de arraste,  $C_D$  são calculados como:

$$C = C_D = \frac{24}{N_R} \quad (3.37)$$

onde:

$N_R$  – número de Reynolds,  $N_R = v \cdot D_p \cdot \rho_f / \eta$

$D_p$  – dimensão efetiva do objeto (diâmetro da esfera)

$\eta$  – viscosidade absoluta do fluido

$v$  – velocidade terminal

$\rho_f$  – massa específica do fluido para um número de Reynolds menor do que 1

Substituindo na equação (3.36)

$$v_t^2 = \frac{g \cdot D_p^2 (\rho_p - \rho_f)}{18\eta} \quad (3.38)$$

Para número de Reynolds igual a 2, a equação C nos dá uma boa aproximação do coeficiente de arraste (Lapple, 1956, citado por MOHSENIN, 1978).

$$F_d = \frac{C_D \cdot A_p \cdot \rho_f \cdot v^2}{2} \quad (3.39)$$

onde:

$C$  – coeficiente de arraste

$F_d$  – força de arraste

$A_p$  – área projetada

$\rho_f$  – massa específica do fluido

$v$  – velocidade do fluido

O número de Reynolds determina se uma corrente é laminar ou turbulenta.

Para condições de corrente turbulenta numa região onde  $10^3 < N_R < 2 \times 10^5$  e  $C_D$  é aproximadamente igual a 0,44, a velocidade terminal é encontrada através da equação (LAPPLE, 1956):

$$v_t = 1,74 \left[ \frac{g \cdot D_p (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.40)$$

Numa região intermediária onde o número de Reynolds está no intervalo  $10^2 < N_R < 10^3$ , o coeficiente de arraste é dado por:

$$C_D = \frac{18,5}{(N_R)^{0,6}} \quad (3.41)$$

e a velocidade terminal

$$v_t = \frac{0.153 g^{0.714} D_p (\rho_p - \rho_f)^{0.714}}{\rho_f^{0.286} \eta^{0.248}} \quad (3.42)$$

#### 3.2.4.1. Velocidade terminal para corpos não esféricos

Poucos trabalhos apresentaram resultados satisfatórios para partículas de formas irregulares, as quais são particularmente complicadas, por suas orientações aleatórias e pela variedade de métodos para expressar seus tamanhos e dimensões a serem usados no cálculo do número de Reynolds, e área frontal. Schiller (1932), citado por BRAGA (1997), 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. Ele usou materiais como: grãos de areia, cascalho e carvão de pedra com formas não bem definidas geometricamente.

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, tanto o número de Reynolds como coeficiente de arraste incluem a velocidade terminal.

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

Para partículas esféricas temos:

$$CN_R^2 = \frac{4g \cdot \rho_f \cdot D_p^2 (\rho_p - \rho_f)}{3\eta^2} \quad (3.43)$$

e

$$\frac{C_D}{N_R} = \frac{4 \cdot g \cdot \eta (\rho_p - \rho_f)}{3 \rho_f^2 \cdot v_i^3} \quad (3.44)$$

que são obtidas pela combinação de

$$N_R = \frac{v \cdot D_p \cdot \rho_f}{\eta}$$

e

$$v_i = \left[ \frac{4 \cdot g \cdot D_p (\rho_p - \rho_f)}{3 \cdot \rho_f \cdot C} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.45)$$

onde:

$\eta$  - viscosidade absoluta do fluido

$\rho_f$  - massa específica do fluido

$v$  - velocidade relativa entre o fluido e o objeto

$D_p$  - diâmetro da esfera equivalente

Se as equações:

$$N_R = \frac{v \cdot d \cdot \rho_p}{\eta} \quad (3.46)$$

e

$$C_D = \frac{2w(\rho_p - \rho_f)}{V_i^2 \cdot A_p \cdot \rho_f \cdot \rho_p}$$

são combinadas, o termo  $CN_R^2$  não incluirá  $D_p$  mas requererá um conhecimento do peso e da massa específica do objeto.

$$CN_R^2 = \frac{8w \cdot \rho (\rho_p - \rho_f)}{\pi \cdot \eta^2 \cdot \rho_p} \quad (3.47)$$

Foram feitos gráficos de  $CN_R^2$  em função  $N_R$  para objetos esféricos. Os valores usados para obter o gráfico são tomados de tabelas dadas por LAPPLE (1956) HANDERSON e PERRY (1952).

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

Na queda livre de um objeto em ar parado, a força sobre o objeto é a diferença entre a força da gravidade,  $m.g$ , e o atrito resultante ou força de arraste,  $Kv^2$ , dada por:

$$Fr = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A_p \cdot \rho_f \cdot v^2 \tag{3.48}$$

Esta força também é igual a

$$m \cdot \frac{dv}{dt} \tag{3.49}$$

Deste princípio básico a equação de movimento é obtida através da seguinte equação diferencial

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = m.g - Kv^2 \tag{3.50}$$

$$\frac{dv}{dt} = g \frac{L - Kv^2}{m.g} \tag{3.51}$$

onde:

$$K = \frac{1}{2} C_D \cdot A \cdot \rho_f \quad \text{e} \quad \frac{K}{m.g} = a^2 \tag{3.52}$$

$$\int \frac{dv}{(1 - a^2 \cdot v^2)} = g \int dt \tag{3.53}$$

onde,

$$\frac{1}{2} a \cdot \ln \left( \frac{1 + av}{1 - av} \right) = g.t + C_D \tag{3.54}$$

ou

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{1}{a} \frac{(e^{2agt} - 1)}{(e^{2agt} + 1)} \quad (3.55)$$

$$v = \frac{1}{a} \tanh agt \quad (3.56)$$

$$ds = \frac{1}{a(ag)} \tanh agt (agdt) \quad (3.57)$$

onde s e t são respectivamente deslocamento e tempo.

$$s = \frac{1}{a^2 g} \ln \cosh(agt) + C_2 \quad (3.58)$$

da condição inicial,  $t = 0, s = 0 \rightarrow C_2 = 0$

Em aplicações aerodinâmicas, onde o ar é o fluido usado e a densidade de massa do ar,  $\rho_f$  é bastante pequena em comparação com a densidade de massa do produto, a massa específica do ar pode ser considerada nulo e a equação:

$$\frac{m_p g (\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} = \frac{1}{2} \cdot A_p \cdot \rho_f \cdot v_t^2 \quad (3.59)$$

é escrita como:

$$v_t = \left( \frac{2w}{\rho_f \cdot A_p \cdot C_D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.60)$$

Combinando esta equação com a expressão

$$K = \frac{1}{2} C_D \cdot A_p \cdot \rho_f \quad (3.61)$$

temos:

$$v_t = \left[ \frac{w}{\frac{1}{2} C_D \cdot A_p \cdot \rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{w}{K} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.62)$$

ou

$$K = \frac{w}{v_t^2} \quad (3.63)$$

então:

$$a^2 = \frac{k}{mg} = \frac{\frac{w}{v_t^2}}{mg} = \frac{1}{Vt^2} \quad (3.64)$$

e finalmente, temos:

$$a^2 = \frac{1}{v_t^2} \rightarrow a = \frac{1}{v_t} \quad (3.65)$$

levando (3.65) em (3.57), temos:

$$s = \left[ \frac{v_t^2}{g} \right] \ln \cosh \frac{g.t}{v_t} \quad (3.66)$$

### 3.2.5. Aplicações a produtos agrícolas

Para determinar a velocidade terminal,  $v_t$ , dados experimentais de tempo em função do deslocamento em queda livre do objeto no ar, são plotados para obter uma curva de tempo e deslocamento. Quando o peso em queda for suficiente para o objeto atingir esta velocidade terminal, a curva tempo - deslocamento torna-se 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 (3.66) pode ser usada para calcular a velocidade terminal em dada curva tempo-deslocamento.

Para mostrar a validade da Equação (3.66) BILLANSKI *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 3.1. Como se pode observar, os dados obtidos experimentalmente de cada curva tempo-deslocamento (Figura 3.3) acompanham de forma muito aproximada a curva teórica obtida com Equação (3.66). 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 (3.30), 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 (3.60) e (3.46) respectivamente. A área para o cálculo do coeficiente de atrito eram as duas dimensões máximas  $L_1$  e  $L_2$  usada na expressão:

$$A_p = \frac{\pi}{4} L_1 L_2 \quad (3.67)$$

O diâmetro utilizado para o cálculo do número de Reynolds, era a média de três dimensões lineares mutuamente perpendiculares. A Tabela 3.1 mostra as medidas físicas e características aerodinâmicas dos grãos testados.

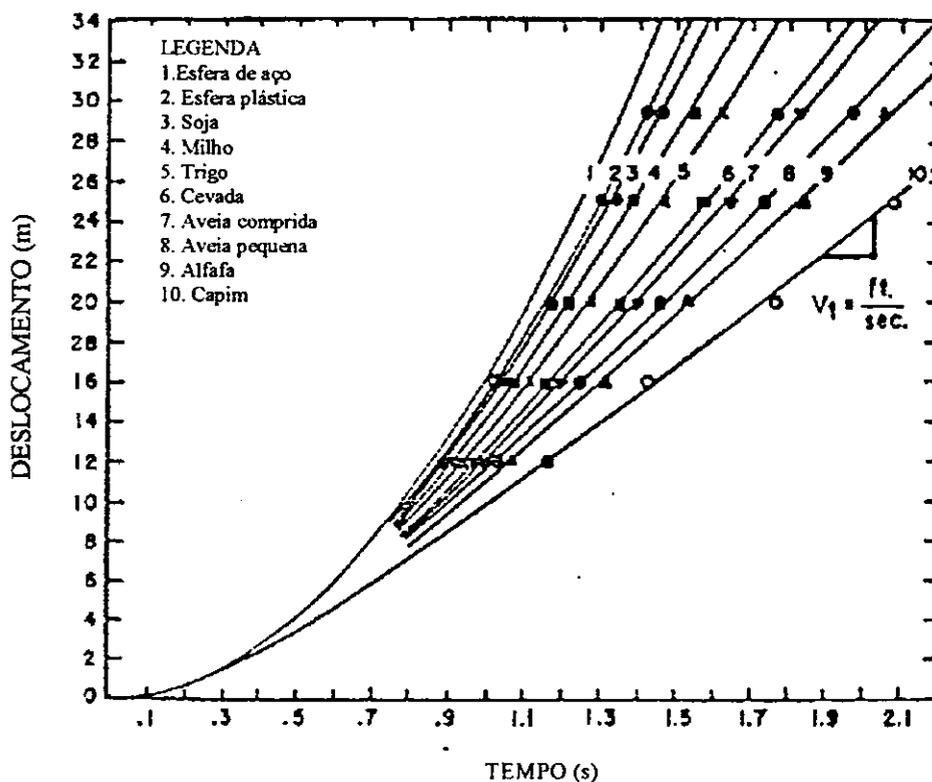


Figura 3.3. Curvas tempo-deslocamento para grãos e sementes agrícolas – as curvas experimentais foram ajustadas por curvas analíticas baseadas na Equação. 3.66. Fonte: BILLANSKI *et al.*, 1962

Tabela 3.1. Propriedades aerodinâmicas de sementes e grãos (BILANSKI *et al.*, 1962)

	Comprimento ( $\times 10^2$ pés)	Diâmetro ( $\times 10^2$ pés)	Peso ( $\times 10^4$ lb)	Velocidade terminal (pés/s)	$CA_d$ ( $\times 10^2$ pés <sup>2</sup> )	C	$N_R$ ( $N_R \times 10^{-2}$ )
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

SOULE (1970) estudou o procedimento aerodinâmico de espécies de mirtilo, comparada à dinâmica fluida teórica de objetos esféricos para projetar máquinas mais eficientes nos processos de colheita e beneficiamento. Analisou parâmetros de tamanho (nos 3 eixos perpendiculares) altura da sépala, peso em ar e em água, teor de umidade, velocidade terminal, coeficiente de arraste e número de Reynolds para cada espécie. Concluindo que o processamento de espécies de mirtilo em fluxo fluido turbulento difere significativamente de esferas nas mesmas condições, o efeito das sépalas e turbulência do fluxo diminui a velocidade terminal.

BOGACZYNSKI *et al.* (1975) observaram a velocidade terminal de  $9,3 \text{ m.s}^{-1}$  para sementes de trigo e  $8,7 \text{ m.s}^{-1}$  para centeio e cevada, concluindo ser possível a separação destas espécies pelo método pneumático.

A velocidade crítica do fluxo de ar para limpeza de sementes de trigo da variedade Giza 155, determinada matematicamente e experimentalmente por EL ASHI (1984) foi estabelecida em  $10 \text{ m.s}^{-1}$  e a velocidade do fluxo de ar, para um separador pneumático foi de  $5 \text{ m.s}^{-1}$  para obter 95% de eficiência na limpeza.

REDDY *et al.* (1984) estudaram o transporte pneumático do produto obtido em um moinho de farinha e concluíram que a velocidade terminal foi influenciada pelo volume, tamanho de partícula e pela forma e que a pressão específica em queda diminui com o aumento da velocidade do ar, carregando todos os materiais testados com exceção para o farelo de trigo e o polvilho, que com o aumento da pressão, aumenta a velocidade do ar e os fatores de atrito da mistura.

Diferentes correlações foram estabelecidas entre a velocidade terminal e diâmetros de partículas para fibras de bagaço de cana e os dados obtidos por outros autores, justifica esta diferença devido as diferentes metodologias e pela diversidade do materiais (NEBRA e MACEDO, 1988).

O transporte de partículas de cenoura em dutos verticais foi estudado por McKAY *et al.* (1992) que observaram um acréscimo inicial na velocidade terminal quando usavam partículas únicas.

JOSHI *et al.* (1993) observaram aumentos na velocidade terminal de sementes e grãos de abóbora de 4,7 para 6,5 m.s<sup>-1</sup> e de 4,27 para 5,25 m.s<sup>-1</sup>, respectivamente, quando modificou o teor de umidade de 4 para 40%.

Uma série de procedimentos físicos para tritura e limpeza de ervilha foi sugerida por PRIRKE *et al.* (1993), incluindo aspiração com uma velocidade terminal de 2,05m.s<sup>-1</sup>, para ser adotado em indústrias caseiras em áreas rurais, como forma de restabelecer a qualidade do produto.

SUTHAR e DAS (1996) observaram aumentos lineares na velocidade terminal de sementes de melancia (4,5 para 6,5 m.s<sup>-1</sup>), cascas (2,0 para 4,1 m.s<sup>-1</sup>), e grãos (3,5 para 4,8 m.s<sup>-1</sup>) quando variou a umidade de 5 para 40%.

O resultado da velocidade terminal experimental para sementes de lentilha sofreu um aumento de 10,95 para 12,06 m.s<sup>-1</sup> com a variação de 6,5 para 32,6% de teor de umidade (ÇARMAN, 1996). E este, cita Ramakrishima (1986), Keck e Goss (1965) que obtiveram resultados semelhantes.

A velocidade terminal de sementes de cominho, com aumento do teor de umidade de 7 para 22%, aumentou de 2,6 para 4,8 m.s<sup>-1</sup> (SINGH e GOSWAMI, 1996).

Em qualquer teor de umidade entre 4 e 20% b.s., a velocidade terminal de sementes de girassol apresentaram-se valores mais altos em relação aos grãos e cascas. Este incremento foi de 5,8 para 7,6 m.s<sup>-1</sup>; 3,5 para 5,8 m.s<sup>-1</sup> e 1,7 para 2,8 m.s<sup>-1</sup> para sementes, grãos e cascas, respectivamente (GUPTA e DAS, 1997).

Um equipamento projetado por LEITÃO (1983), para determinação da velocidade terminal de sementes de um modo geral, consistia basicamente de uma coluna vertical de seções transversais de forma retangular, constituída de acrílico, o que permite a visualização do fenômeno. Nessa coluna era injetado um fluxo de ar através de um ventilador centrífugo, que podia ser regulado pelo aumento ou diminuição da tomada de ar

do ventilador. A alimentação de grãos era feita pela parte inferior da coluna, sendo o fluxo de ar regulado manualmente por um sistema de pás rotativas que impedem o escape de ar pelo tubo de alimentação. Na parte central havia um tubo “pitot” para a determinação da velocidade do ar, sendo que, na coluna de acrílico, procurava-se o ponto de equilíbrio para as amostras de vários grãos, através da variação do fluxo de ar.

### 3.3. Materiais e Métodos

No Brasil, a Embrapa Algodão desenvolveu duas máquinas de beneficiamento de amendoim: um protótipo de descascamento manual, que apresenta como desvantagens a não separação de cascas das sementes, a baixa capacidade operacional e o alto índice de quebra de sementes. Visando a melhora destes aspectos, de alta importância econômica, desenvolveu-se uma máquina descascadora por acionamento mecânico onde os produtores tivessem acesso a um equipamento de baixo custo e maior eficiência nos processos de descascamento e pré-limpeza.

#### 3.3.1. Análise experimental

Todos os separadores de sementes são desenhados para efetuar separações com base em qualquer diferença de característica ou propriedade entre a semente a ser beneficiada e seus contaminantes indesejáveis. Em separação por ar, esta propriedade ou característica é denominada velocidade terminal (VAUGHAM *et al.*, 1976). Com base nestas informações, surgiu a idéia de se projetar um equipamento, utilizando o princípio de velocidade terminal, que separasse a mistura obtido da máquina de descascamento de amendoim por acionamento mecânico, desenvolvida pela Embrapa Algodão.

##### 3.3.1.1. Construção do equipamento

Baseando-se nos trabalhos desenvolvido por LEITÃO (1983), e com a finalidade de determinação da velocidade terminal do amendoim variedade L7, foi construído um equipamento (Figura 3.4), constando, basicamente, das seguintes partes:

- 1 coluna vertical de secções transversais retangular de, 0,06 x 0,06m 1,03m de altura de largura, construído em acrílico transparente de 3mm de espessura;
- 1 motor – ventilador de ciclo contínuo, potência de 1 Hp, 3600rpm;
- 1 base em madeira;

- 2 malhas de 2 mm;
- 1 variômetro de tensão (rotação);
- anemômetro de palheta, para determinação da velocidade do fluxo.



Figura 3.4. Equipamento construído para determinação da velocidade terminal.

No equipamento foi colocado uma malha na saída do ventilador, para uniformizar e diminuir a turbulência do fluxo de ar no duto ou seção e outra malha foi colocada a 0,73m da saída do ventilador para colocar o material de teste, no caso, a mistura saída da máquina de descascamento, constituída de sementes inteiras, sementes chochas, sementes quebradas e vagens não descascadas.

Na coluna era injetado um fluxo de ar através de um ventilador centrifugo, com velocidade do ar regulado e por um voltímetro ligado ao motor.

### 3.3.1.2. Procedimento

Para determinação da velocidade terminal, foram utilizadas 20 repetições de cada amostras dos 26 tamanhos obtidos na máquina por acionamento mecânico desenvolvida pela Embrapa Algodão. Colocando-se as partículas do amendoim na malha, ligava-se o motor (ventilador) controlando-se a velocidade pelo voltímetro ou variômetro, até que o grão ‘flutuasse’, e o fluxo de ar era determinado por um anemômetro digital de palheta.

### 3.3.2. Análise teórica

Para a análise teórica, utilizou-se quatro métodos de cálculo de velocidade terminal, partindo do pressuposto que a velocidade constante de uma partícula em queda depende das características físicas desta, do fluido no qual ela está sendo submetida a queda e da aceleração da gravidade.

#### Método 1

Obteve-se  $CN_R^2$  pela equação:

$$CN_R^2 = \frac{8W\rho_f(\rho_p - \rho_f)}{\pi\eta^2\rho_p} \quad (3.47)$$

onde:

W- é o peso médio dos grão

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

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

$\eta$ - viscosidade dinâmica do ar,  $N.s.m^{-3}$

Como  $\rho_f$  é muito pequeno, considerou-se  $\rho_p - \rho_f \approx \rho_p$  então:

$$CN_R^2 = \frac{8W\rho_f}{\pi\eta^2} \quad (3.47.a)$$

Com os valores de  $CN_R^2$ , encontrou-se os valores de  $N_R$  no gráfico  $CN_R^2$  (Apêndice A) dado por MOHSENIN (1978) e calculou-se a velocidade terminal com a equação:

$$v_t = \frac{N_R\eta}{D_p\rho_f} \quad (3.68)$$

onde:

- $N_R$  - número de Reynolds, adimensional
- $\eta$  - viscosidade dinâmica do ar, N.s.m<sup>-2</sup>
- $D_p$  - diâmetro da partícula da esfera equivalente, m
- $\rho$  - massa específica do fluido, kg.m<sup>-3</sup>

### Método 2

Considerou-se o amendoim como tendo forma esférica, sendo assim calculou-se o número de Reynolds para constatação do regime de escoamento e fazer as devidas considerações para  $C_D$ . Obtendo-se o  $C_D$ , substitui este valor na Equação 3.47a, para o cálculo de Reynolds,  $N_R$ , então utiliza-se a equação 3.68, para o cálculo de  $v_t$ .

### Método 3

Considerando-se que o movimento se deu na região de Reynolds maior que 1000 e que nesta região  $C_D=0,44$ , utilizou-se a Equação (3.69) para o cálculo da velocidade terminal.

$$v_t = \left[ \frac{4g.D_p(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C_D} \right]^{1/2} \quad (3.69)$$

onde:

$D_p$  - diâmetro da partícula, m

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

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

$g$  - gravidade,  $9,81 \text{ m.s}^{-1}$

$C_D$  - para esfera no regime turbulento, 0,44, adimensional

#### Método 4

Levando-se em consideração a esfericidade,  $\phi$ , de cada partícula, utilizou-se a Equação 3.70, de PETTYJONH e CHRISTIANSEN (1948) para correção, em seguida utilizou-se a equação 3.68 para o cálculo da velocidade terminal.

$$C_D = 5,31 - 4,88(\phi) \tag{3.70}$$

onde:

$\phi$  - esfericidade da partícula, em decimal

A análise estatística foi realizada utilizando o Microsoft Origin Versão 5.0, bem como a confecção dos gráficos.

### 3.4. Resultados e Discussão

#### 3.4.1. Velocidade terminal experimental e calculada

Os valores médios encontrados para a velocidade terminal experimental,  $v_{texp}$  e calculadas,  $v_{tcalc}$ , coeficiente de arraste,  $C_D$ , e número de Reynolds,  $N_R$ , das diferentes partículas do amendoim, variedade L7, calculados pelos métodos descritos, estão apresentados na Tabela 3.2, onde  $v_{t-1}$ ,  $v_{t-2}$ ,  $v_{t-3}$  e  $v_{t-4}$  são respectivamente os métodos 1, 2, 3 e 4, descritos no item 3.2.

Analisando a Tabela 3.2, verifica-se que o coeficiente de arraste das sementes inteiras, após correção utilizando-se o fator de esfericidade, apresentaram valores crescentes com o aumento do comprimento, ou seja, apresentou influência direta da forma. Este fato pode ser constatado ao se observar a Tabela 2.6, na medida que cresce o diâmetro, diminui a esfericidade do produto e aumenta o coeficiente de arraste. Este fato também foi observado por BOGACZYNKI *et al.* (1975).

Para sementes chochas, ocorreram fatos semelhantes, o coeficiente de arraste para a semente chocha de maior comprimento. Alguns resultados sofreram influência, um pouco contrária, a que pode ser atribuída a alguma variação na massa específica dessa categoria de sementes.

Sementes danificadas, apresentaram um coeficiente de arraste entre 1,32 e 3,47, no entanto, para estas sementes não foi possível verificar relações de tamanho, devido suas formas muito irregulares. O maior coeficiente de arraste obtido, entre todas as categorias, foi o de 3,47, encontrado para sementes com dano longitudinal. Este tipo de dano influi diretamente na esfericidade e portanto no arraste da partícula.

Pela Tabela 3.2, verifica-se que existe uma relação do coeficiente de arraste e o tamanho da partícula, no entanto, como trabalhou-se na região de Newton, ou seja, Reynolds maior que 1000, esta relação não é expressiva, como pode ser visto na curva clássica (Figura 3.2).

Tabela 3.2. Dados de coeficiente de arraste ( $C_D$ ), número de Reynolds ( $N_R$ ) e velocidade terminal ( $v_t$ ) calculadas e experimental ( $m.s^{-1}$ )

	$C_D$	$C_{D\text{corrig.}}$	$N_R$	$v_{t1}$	$v_{t2}$	$v_{t3}$	$v_{t4}$	$v_{t\text{exp}}$
<b>Sementes inteiras (mm)</b>								
$C < 12$	0,41	1,75	11.800	21,42	20,92	15,37	7,70	12,39
$12 < C < 13$	0,44	1,96	13.000	21,69	21,77	16,01	7,57	12,70
$13 < C < 14$	0,44	2,12	14.000	22,18	22,33	16,38	7,46	13,01
$14 < C < 15$	0,41	2,40	15.000	23,12	22,54	16,57	7,10	13,21
$15 < C < 16$	0,20	2,53	23.000	33,83	23,07	16,96	7,06	13,80
$16 < C < 17$	0,18	2,58	25.000	35,57	23,23	17,10	7,05	13,68
$C > 17$	0,17	2,72	26.000	37,06	23,43	17,23	6,93	13,28
<b>Sementes chochas (mm)</b>								
$C < 11$	0,39	2,63	9.000	19,80	18,85	13,82	5,60	10,87
$11 < C < 12$	0,40	2,91	9.500	20,56	19,61	13,89	5,71	9,31
$12 < C < 13$	0,44	2,97	9.600	20,09	20,10	14,22	5,47	9,82
$13 < C < 14$	0,48	2,92	10.300	19,89	20,83	15,19	5,89	9,72
$14 < C < 15$	0,46	2,37	10.600	20,14	20,79	15,23	5,84	10,10
$C > 15$	0,41	3,39	12.000	21,77	21,24	15,62	5,62	10,73
<b>Sementes danificada (mm)</b>								
Miúdo	0,40	2,42	6.000	17,56	16,77	12,02	5,04	6,60
Dano transversal	0,46	1,37	10.000	19,65	20,30	14,65	8,28	10,10
Dano longitudinal	0,38	3,47	8.700	19,94	18,63	13,68	4,87	6,60
1 cot. - pedaço	0,43	2,20	9.600	19,72	19,69	14,37	6,41	8,80
1 cot. + pedaço	0,41	2,72	13.500	22,39	21,83	15,91	6,39	10,30
1/2 s. $C < 12\text{mm}$	0,40	2,05	9.500	20,24	19,33	14,29	6,61	9,70
1/2 s. $12 < C < 13\text{mm}$	0,44	2,17	9.700	19,51	19,65	14,68	6,59	9,10
1/2 s. $13 < C < 14\text{mm}$	0,46	2,54	9.900	19,58	20,05	14,72	6,17	9,10
1/2 s. $14 < C < 15\text{mm}$	0,48	2,57	10.300	19,48	20,48	15,07	6,23	9,40
1/2 s. $15 < C < 16\text{mm}$	0,40	2,73	12.500	22,15	21,15	15,51	6,22	9,46
1/2 s. $C > 16\text{mm}$	0,44	2,79	11.300	20,59	20,67	15,22	6,04	9,73
<b>Vagem (mm)</b>								
com 1 semente	0,18	2,09	25.000	30,58	19,99	14,64	6,72	9,40
com 2 sementes	3,91	1,01	6.000	6,69	19,96	15,44	10,19	9,30

Vagens com 1 semente, apresentaram  $C_D$  de 2,09, o dobro do valor encontrado para vagens com 2 sementes que foi 1,01, apesar de terem a mesma massa específica, a região de contato da vagem com 2 sementes é bem maior. A vagem com uma semente apresentou praticamente a mesma velocidade terminal da vagem com 2 sementes. Apesar da vagem com 2 sementes, ter uma massa duas vezes maior do que a vagem com 1 semente, a segunda possui uma melhor aerodinâmica, fato este que pode ter causado uma compensação.

Sementes inteiras apresentam número de Reynolds,  $N_R$ , entre 11.800 e 26.000, sendo crescente com o aumento de tamanho das partículas de amendoim variedade L7, para valores que variam entre os comprimentos das sementes inferiores a 12mm até 14-15mm, com 8% b.s.. Estes dados aproximam-se dos encontrados para amendoim variedade tatu, por BENEDETTI e JORGE (1992), com teor de umidade de 9,95 e 14,58% b.s. que apresentaram  $N_R$  com 10.400 e 10.650, respectivamente.

Os valores de  $N_R$ , para sementes chochas, variaram de 9.000 a 12.000 e para sementes danificadas que possuem forma, tamanho, massa e densidades diversificadas ficaram entre 6.000 a 13.500.

Para vagens, os valores de  $N_R$ , foram de 6.000 para vagens com 2 sementes e 25.000 para vagens com 1 semente, o que significa que houve maior influência da forma, uma vez que a massa específica foi praticamente a mesma.

Na Tabela 3.2, observa-se, para sementes inteiras, que os valores encontrados de  $v_{t-3}$ , dentre as velocidades calculadas, foi a que mais se aproximou da velocidade terminal experimental, em torno de  $13,0 \text{ m.s}^{-1}$ . A  $v_{t-4}$  apresentou valores abaixo da experimental e  $v_{t-1}$  mostrou-se muito superior. BENEDETTI e JORGE (1992) encontraram para vários grãos como: arroz em casca, feijão, milho, trigo e amendoim, valores de velocidade terminal experimental superiores a teórica.

Para sementes chochas,  $v_{t-3}$  e  $v_{t-4}$  foram os métodos que apresentaram valores mais próximos da velocidade terminal experimental. Entretanto  $v_{t-3}$  apresentou valores maiores e  $v_{t-4}$  valores menores do que a velocidade terminal experimental. Em  $v_{t-1}$  e  $v_{t-2}$  os valores foram superiores ao da velocidade terminal experimental.

Para sementes danificadas, os valores que mais se aproximaram da velocidade terminal experimental foram os de  $v_{t-4}$ , no qual foi corrigido o valor de  $C_D$  com a esfericidade do corpo, pela equação proposta por Pettyjonh e Christiansen, no entanto, apresentaram valores sempre abaixo dos valores de  $v_{t \text{ exp.}}$ . Também pode-se notar que os valores calculados pelos métodos 1, 2 e 3 foram acima dos encontrados para a velocidade terminal experimental.

Sobre a velocidade terminal, pode-se concluir, pelos dados da Tabela 3.2, que os métodos 3 e 4, isto é, o método que considera o movimento na região de  $N_R > 1000$ , e o amendoim como sendo esférico, portanto  $C_D = 0,44$ , e o método que leva em consideração a correção de  $C_D$ , pela esfericidade, proposto por Pettyjonh e Christiansen (1948) citado por MOHSENIN (1978), foram os valores que mais se aproximaram dos dados encontrados para velocidade terminal experimental, portanto, fazendo-se necessário ajustes no modelo matemático para materiais biológicos, uma vez que o método utilizado foi desenvolvido para partículas isotrópicas e isométricas.

Os valores encontrados para velocidade terminal experimental de amendoim, variedade BR1, estão próximos aos encontrados por BOGACZYNSKI *et al.* (1975) para trigo, centeio e cevada e aos encontrados por JOSHI *et al.* (1993), para sementes e grãos de abóbora.

BENEDETTI e JORGE (1992) encontraram valores de velocidade terminal teórica para amendoim, variedade tatu de  $15,35 \text{ m.s}^{-1}$ , estando o produto com 9,95% de umidade b.s. e de  $14,47 \text{ m.s}^{-1}$  para velocidade terminal experimental. Estes valores quando comparados com as velocidades teóricas do amendoim variedade L7, aproxima-se mais dos calculados pelo método 3, bem como da velocidade terminal experimental.

Tabela 3.3. Média, desvio padrão (sd) e erro médio (se) obtidos para velocidade terminal, nas diversas classes de sementes de amendoim da variedade L7

Classes	Médias	sd (Er ±)	se(Er ±)	Soma	N
Sementes inteiras	13,15	0,50	0,19046	92,07	7
Sementes chochas	10,09	0,61	0,24741	60,55	6
Sementes danificadas (1/2 sementes)	9,46	0,28	0,11272	56,49	6

No sentido de representar cada classe de sementes em curvas de tempo-deslocamento, e visto que a velocidade terminal experimental, dentro de uma mesma classe não apresento grandes variações, calculou-se a média desta (Tabela 3.2) e segundo a equação  $y = v.t$ , sendo  $y$  o deslocamento,  $v$  a velocidade e  $t$  o tempo, montou-se as curvas apresentadas na Figura 3.5.

A Figura 3.5 permite concluir que a máxima velocidade terminal encontrada, foi para sementes inteiras, cerca de 21,7% maior do que sua vizinha mais próxima, que é a classe de sementes danificadas e cuja nomenclatura dada foi cotilédone mais pedaço.

Com esta observação, conclui-se que, a separação dessa categoria, semente inteira, das demais é obtida facilmente. Ainda observando a Figura 3.5, conclui-se que, utilizando-se apenas o fluxo de ar como método de separação, é impossível separar algumas categorias como, miúdos e sementes com dano longitudinal, por mais fino que seja o ajuste. Esta observação pode ser estendida para mais três categorias, identificadas na figura supra citada, como curvas 2, 3 e 4.

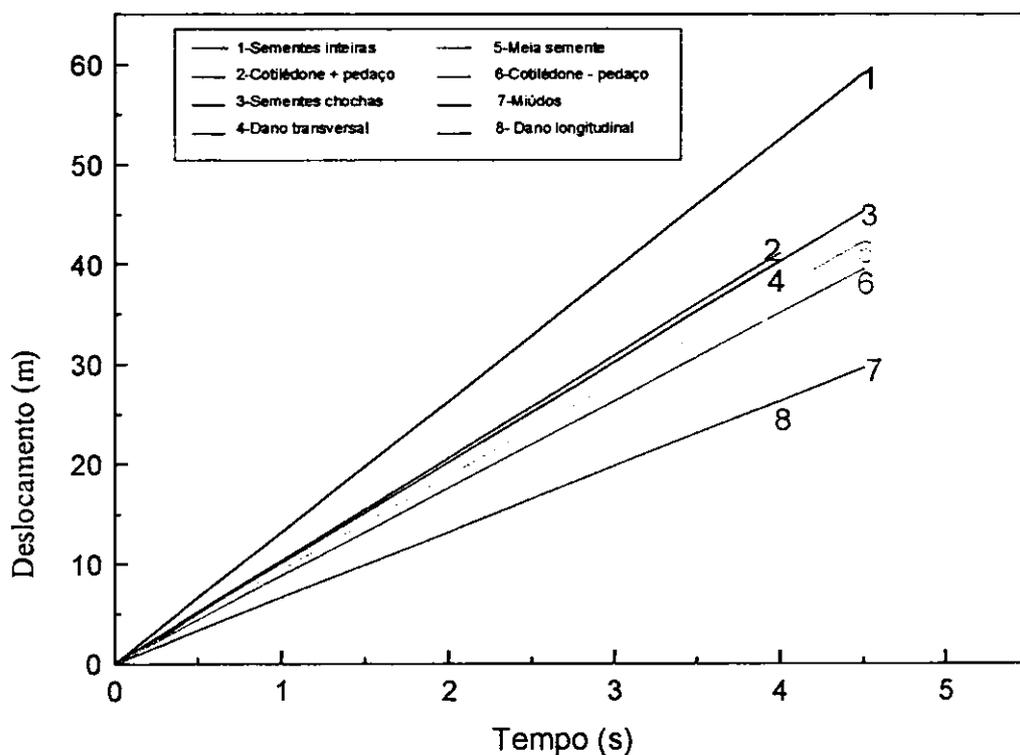


Figura 3.5. Curvas tempo-deslocamento para as diversas classes, segundo a caracterização por tamanho, de sementes de amendoim L7

### 3.5. Conclusões

O coeficiente de arraste das sementes inteiras, após correção utilizando-se o fator de esfericidade, apresentaram valores crescentes com o crescimento comprimento e diminuição da esfericidade, ou seja, apresentou influência direta da forma.

O maior coeficiente de arraste obtido, entre todas as categorias, foi o de 3,47, encontrado para sementes com dano longitudinal.

Os números de Reynolds encontrados para amendoim variaram entre 6.000 e 26.000 nos diversos comprimentos de partículas encontrados para a variedade em estudo.

Os dados obtidos para velocidade terminal teórica que mais se aproximaram da experimental foram as calculadas pelos métodos 3 e 4. A mais distante foi a calculada pelo método 1, portanto, faz-se necessário o ajuste dos métodos matemáticos para os materiais biológicos.

A velocidade terminal experimental encontrada para sementes inteiras foi de 12,39 a 13,80  $\text{m.s}^{-1}$ ; para sementes chochas de 9,31 a 10,87  $\text{m.s}^{-1}$ ; para sementes danificadas de 6,6 à 10,30  $\text{m.s}^{-1}$  e de vagens de 9,30 e 9,40  $\text{m.s}^{-1}$ .

A máxima velocidade terminal encontrada, foi para sementes inteiras, cerca de 21,7% maior do que sua vizinha mais próxima e portanto, a separação de sementes inteiras, das demais pode ser obtida facilmente.

Utilizando-se apenas o fluxo de ar como método de separação, não foi possível separar algumas categorias como, miúdos e sementes com dano longitudinal, por mais fino que seja o ajuste.

O fluxo de ar, correspondente as velocidades terminais, apresentou regime turbulento, para todos as partículas.

## *Capítulo IV*

### **Avaliação da separação utilizando o princípio de velocidade terminal**

#### **4.1. Introdução**

Um dos primeiros métodos de beneficiamento utilizado foi o sistema de abano, em que se lançava a mistura ao ar até que se observasse a presença mínima de impurezas, este método baseava-se na diferença de densidade entre o produto principal e o material estranho.

Com o passar do tempo, tornou-se mais comum o uso de peneiras, que utilizava como princípio de separação, a diferença de tamanho do material. Esses equipamentos não levava em consideração o surgimento de novas variedades, o que poderia ocasionar uma má separação deste novo material genético, devido a formas e tamanhos diferentes, o que refletiria nos percentuais de germinação, no aspecto visual e, conseqüentemente, na sanidade do produto.

Com base nestas características, faz-se necessário estudar o uso de uma corrente de ar com velocidade controlável para separação de sementes de uma mesma variedade.

##### **4.1.1. Objetivos**

Nesta fase do trabalho o objetivo foi:

- a) Avaliar a separação de diferentes tamanhos de partículas de amendoim, variedade L7, no protótipo desenvolvido, com o princípio de velocidade terminal.

## 4.2. Revisão Bibliográfica

### 4.2.1. Separação por velocidade terminal

Vários equipamentos patenteados são destinados à limpeza, classificação e transportes, baseado em fluxo de ar, desenvolvendo os diferentes níveis de eficiência. Como os descritos por ZUEV *et al.* (1978) que possuem capacidade operacional de 6000 kg/h, operando com fluxos de ar de 15 a 24 m.s<sup>-1</sup>; com remoção de 75 a 85% de casca, 35 a 40% semente; 60 a 65% de trituras e 0,05 a 0,5% de sementes quebradas, tendo um consumo de ar para transporte pneumático de 800 a 1.270m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> e um consumo de ar para separação de 1.000 a 1.500 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> e capacidade total de 1,36 a 2,67 kw.

Nesses separadores pneumáticos, o ventilador está localizado perto da entrada de ar, onde este cria uma pressão maior que a atmosférica, forçando o ar passar através da coluna separadora sobre pressão positiva.

Em geral, a operação de separação se dá com a alimentação do equipamento por uma bica a uma coluna vertical de ar em movimento. Quando a mistura de sementes encontra a corrente de ar, aquelas sementes e outros materiais contaminantes (os materiais leves), cuja velocidade terminal é menor que a velocidade imposta pelo ar, são levantados e ascendem através da coluna, em direção ao seu topo, onde são desviadas a uma bica de descarga. Sementes cuja velocidade terminal é superior a velocidade do ar (sementes pesadas) caem através da coluna de ar até alcançarem uma peneira inclinada, que atravessa e as desvia a uma bica de descarga (VAUGHAM *et al.*, 1976). Nos separadores pneumáticos com uma só coluna de ar, é possível fazer a separação de apenas duas frações – material leve e pesado. As regulagens são feitas na velocidade de alimentação e no fluxo de ar.

MOSSONE (1970) avaliou as características operacionais de separadores comerciais que utilizavam as diferenças de densidade, classificação por tamanho e forma e processamento com correntes de ar.

ZIEGLER (1972) apresenta uma série em torno de 7 fluxos, com várias combinações e seqüências de peneiras e seleção por ar, testado para limpeza de trigo duro, relativamente limpo, com partículas de tamanhos e formas variáveis e de difícil separação.

A classificação e limpeza de café, ainda verde, foi estudado por CLARKE (1972), processando o material em telas mecânicas para separação por tamanho e depois em fluxo de ar ascendente, para retirada do material estranho. Concluindo que a uniformidade de tamanho do grão traz vantagens para o material torrado e moído e que, o percentual de impurezas e o tipo de defeito influi na qualidade final do produto.

ZHURAVLEVA (1974) testou a separação de ervas daninhas de grãos de trigo, através de meios físicos como tamanho, peso de 1000 sementes, dimensões, densidade e propriedades aerodinâmicas, obtendo 73% de eficiência na separação por diferença de densidade e 83% de eficiência no método por fluxo de ar a uma velocidade de  $6,2 \text{ m.s}^{-1}$ .

A importância de múltiplas fases de limpeza para o trigo moído ao invés de limpeza seletiva de fluxos impuros foi discutida por STANGER (1977) que cita alguns princípios e métodos de limpeza de grãos, dentre eles, a separação por largura e através da velocidade terminal.

BELOKHOVOSTIKOV *et al.* (1978) ressaltam que para algumas misturas se faz necessário métodos associados de limpeza para que os materiais cheguem ao padrão exigido comercialmente.

Testando a separação de arroz '*paddy*' e arroz marrom por fluxo de ar, considerando as propriedades aerodinâmicas como a velocidade terminal, a altura que o material alcança e a distribuição do grão com o limite de ar, TSUCHIYA *et al.* (1981), concluíram ser difícil a separação deste material apenas por este método.

Um sistema de separação pneumático para passas, sementes e nozes, foi descrito por MUKAI (1983), baseado em um fluxo de ar no produto, situado em uma tela, com a finalidade de produção de um material nos padrões de limpeza exigidos comercialmente.

SADYNAM e GROVER (1983) avaliaram a eficiência de um aspirador de coluna

vertical, para a retirada de poeira e de impurezas, com 7 amostras de fluxo, 4 amostras de constituintes de masala e 3 taxas de alimentação.

TYLER e PANCHUK (1984) estudaram o efeito da maturidade de sementes de ervilha de campo, na classificação por ar e concluíram que altos níveis de sementes imaturas não provocaram efeitos na classificação, embora possa afetar o descascamento.

Testando um sistema de descascamento e limpeza de sementes de girassol, MILLER *et al.* (1986), obtiveram de 1 a 6,4% de cascas e 91,7 a 99,3% de sementes recuperadas, estando estas com um teor de umidade de 9,4%.

THOMAS *et al.* (1993) desenvolveram um processo para separação de partículas de areia e pedra de sementes de coentro, usando os princípios de fluidização a ar.

BURKOV e ANDREEV (1995) apresenta um sistema de limpeza e separação pneumática em duto fechado e aberto, e o recomenda para limpeza primária e secundária, tendo uma capacidade de  $10 \text{ t.h}^{-1}$ .

A eficiência de um separador pneumático, para seleção de sementes, foi testada por GUARELLA *et al.* (1997), os testes teóricos e experimentais comprovaram que, a seleção de sementes ocorrida no interior de um separador pneumático, levam as sementes a um lugar conforme sua massa e características aerodinâmicas.

### 4.3. Materiais e Métodos

Neste trabalho experimental foi utilizado amendoim variedade L7, da safra referente ao ano de 1998, proveniente do município de Touros, RN. O amendoim foi processado numa máquina por acionamento mecânico, desenvolvida pela Embrapa Algodão, de onde foi separado manualmente em sementes inteiras, sementes chochas, sementes danificadas e vagens ainda não descascadas, que eventualmente, foram conduzidas para o duto de saída das sementes descascadas.

As amostras obtidas da separação manual, foram classificadas por tamanhos de partículas, as quais foram utilizadas em número de 10 para compor a amostra mista, a ser avaliada na separação, pelo equipamento desenvolvido nesta pesquisa (Figura 3.4), utilizando o princípio de velocidade terminal.

Foram avaliados 4 níveis de velocidade do fluxo de ar, 13, 14, 15 e 16  $\text{m.s}^{-1}$ , para separação do amendoim variedade L7. As velocidades foram escolhidas a partir da velocidade média encontrada para um conjunto de partículas.

## 4.4. Resultados e Discussão

### 4.4.1. Avaliação da separação de amostras compostas

Os resultados médios percentuais da avaliação da separação do amendoim, variedade L7, são mostradas na Tabela 4.1.

A separação com velocidade do ar de  $13 \text{ m.s}^{-1}$ , carregou apenas 2,85% de sementes inteiras, 26,66% de sementes chochas e 71,66% de sementes danificadas.

Com a velocidade de  $14 \text{ m.s}^{-1}$ , obteve uma separação de 80% para sementes danificadas, 28,33% para sementes chochas e 0% para sementes inteiras.

Para velocidade de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ , verificou-se um carregamento de 2,85; 75 e 90%, para separação de sementes inteiras, chochas e danificadas, respectivamente.

E para a velocidade de  $16 \text{ m.s}^{-1}$ , verifica-se índices de carregamento de 14,28; 98,33 e 95,83%, para sementes inteiras, chochas e danificadas, respectivamente.

A separação de vagens da amostra, apresentou eficiência total, nas quatro velocidades de fluxo de ar estudadas.

Levando-se em consideração, que a velocidade ótima para separação seria um fluxo ascendente que carregasse o máximo de sementes chochas, danificadas e vagens e o mínimo de sementes inteiras, pode-se recomendar, dentre as velocidades estudadas, a de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ , que carregou o menor percentual de sementes inteiras (2,85%), mesmo não apresentando um bom carregamento de sementes chochas (75%) e um índice razoável de danificadas.

No entanto, o fluxo de ar de  $16 \text{ m.s}^{-1}$ , apresentou valores percentuais de separação de materiais contaminantes (sementes danificadas, chochas e vagens) melhores que o fluxo de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ , com a desvantagem de carrear 14,28% de sementes inteiras o que não é de interesse para o processo, uma vez que a cada 100kg de produto processado, se perderia

14,28kg, o que seria de grande prejuízo financeiro para o produtor, pois trata-se de material de grande qualidade técnica.

Tabela 4.1. Percentuais de sementes separadas, para as diferentes partículas, em relação a quatro velocidades de fluxo de ar.

$v_i$ (m.s <sup>-1</sup> )	13	14	15	16
Peso. Deslocado (g)	8,84	8,96	11,72	14,04
	%	%	%	%
<b>Semente inteira</b>				
Comp. <12mm	20	0	10	10
Comp. 12-13mm	0	0	0	20
Comp. 13-14mm	0	0	0	10
Comp. 14-15mm	0	0	10	30
Comp. 15-16mm	0	0	0	10
Comp. 16-17mm	0	0	0	20
Comp. >17mm	0	0	0	0
Médias p/ sem. inteira	2,85	0	2,85	14,28
<b>Semente chocha</b>				
Comp. <11mm	20	30	70	100
Comp. 11-12mm	30	40	100	100
Comp. 12-13mm	20	30	70	90
Comp. 13-14mm	30	10	90	100
Comp. 14-15mm	40	40	60	100
Comp. >15mm	20	20	60	100
Médias p/ sem. chocha	26,66	28,33	75	98,33
<b>Semente danificada</b>				
Miúdo	100	100	100	100
Dano transversal	40	30	70	80
Dano longitudinal	90	100	100	100
Icotilédona menos pedaço	70	80	100	100
Icotilédona mais pedaço	40	60	90	100
Comprimento <12	80	90	100	100
Comprimento 12-13mm	90	100	100	100
Comprimento 13-14mm	80	100	100	100
Comprimento 14-15mm	80	100	100	100
Comprimento 15-16mm	90	90	100	100
Comprimento >16mm	90	100	100	100
Médias p/ sem. danificada	71,66	80	90	95,83
<b>Vagem</b>				
com 1 semente	100	100	100	100
com 2 semente	100	100	100	100
Média p/ vagem	100	100	100	100

Para separação de sementes de amendoim de seus contaminantes (sementes inteiras, danificadas, chochas e vagens) após o processo de descascamento, verifica-se na tabela 4. que o uso do princípio de velocidade terminal é eficiente, com velocidade de fluxo do ar de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ , foi em torno de 67,30%. Para a velocidade de  $16 \text{ m.s}^{-1}$ , correndo-se o risco de perda de sementes boas, este índice vai para 78,46% .

Para o estudo de seleção de sementes inteiras por tamanho, verificou-se que não foi eficiente o princípio de velocidade. Estudo realizado por TSUCHIYA *et al.* (1981), também revelou ser difícil a separação de 2 tipos de sementes de arroz ('paddy' e marrom), por fluxo de ar, recomendando a utilização de métodos conjugados ou associados, o que também ressaltaram BELOKHVOSTIKOV *et al.* (1978), para que os produtos cheguem ao padrão exigido comercialmente.

#### 4.2.2. Comportamento do amendoim em fluxo de ar ascendente

Algumas situações de interesse para o estudo de transporte pneumático, foram observados neste estudo.

##### a) Comportamento de sementes de amendoim, no fluxo de ar ascendente

Observou-se que as sementes de amendoim quando estavam no duto, no momento que atingiam a velocidade terminal, apresentavam um movimento de rotação, na posição de repouso, num eixo transversal aos cotilédones, como mostra a Figura 4.1

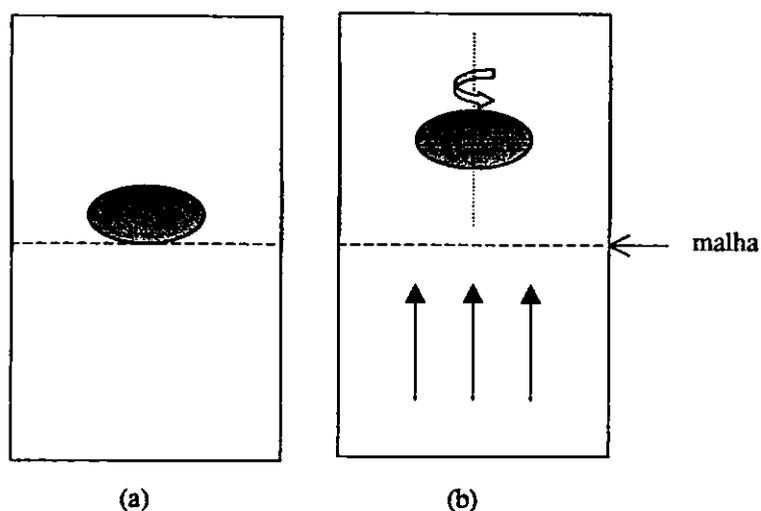


Figura 4.1. Movimento de sementes inteiras, (a) sem fluxo de ar e (b) no fluxo de ar

a) Comportamento de vagens com 1 semente no fluxo ascendente

Observou-se que vagens com 1 semente, com o aumento da velocidade do fluxo de ar, colocava-se numa posição de resistência que não aquela de repouso, isto é, posicionava-se em 'pé', principalmente quando estas vagens apresentavam deformidade em uma das extremidades, devido a algum problema genético como inviabilidade ('lóculo' ou cavidade da vagem chocha), como mostra a Figura 4.2.

A este fenômeno, de levantar a vagem com o aumento da velocidade de fluxo e de voltar a posição de repouso quando reduz-se a velocidade, denominamos o efeito '*joão teimoso*', que lembra o brinquedo de mesmo nome.

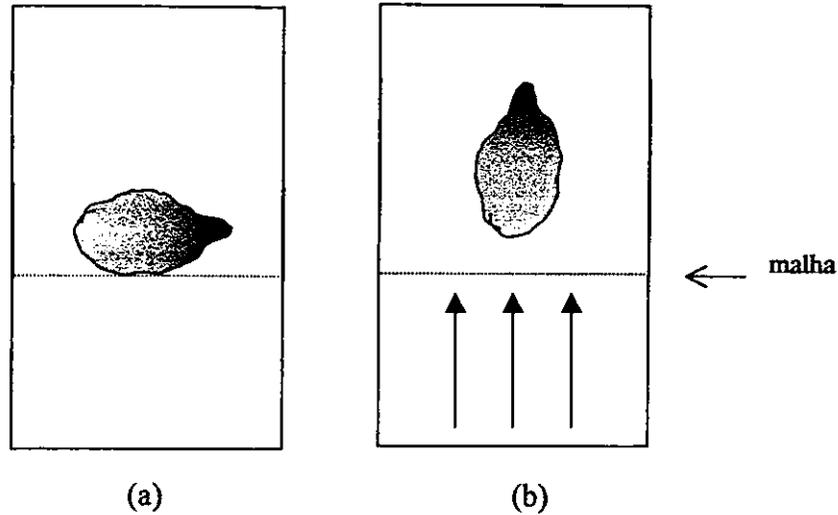


Figura 4.2. Movimento de vagens com 1 semente num fluxo de ar

b) Comportamento de vagens com 2 sementes no fluxo ascendente

Verificou-se que as vagens movimentavam-se em velocidade terminal menor que todas as outras partículas (sementes inteiras, chochas, danificadas e vagens com 1 sementes), isto, provavelmente, devido ao efeito que chamamos 'bóia', em que o espaço livre entre as sementes e a casca/vagem funcionava como o ar dentro de uma bóia, que a faz flutuar, ou como o ar numa 'bexiga', que a faz subir. Este efeito é mostrado na Figura 4.3.

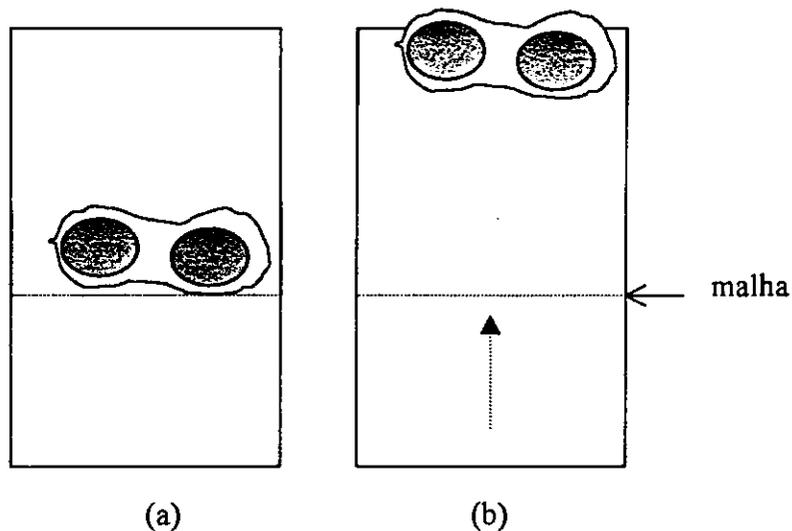


Figura 4.3 . Movimento de vagens com 2 sementes num pequeno fluxo de ar

#### 4.4. Conclusões

- A melhor separação de sementes inteiras das danificadas, chochas e vagens foi com a velocidade de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ , com 67,30% de eficiência. A separação com velocidade do ar de  $13 \text{ m.s}^{-1}$ , carregou apenas 2,85% de sementes inteiras, 26,66% de sementes chochas e 71,66% de sementes danificadas.
- A velocidade de  $14 \text{ m.s}^{-1}$ , apresentou uma separação de 80% para sementes danificadas, 28,33% para sementes chochas e 0% para sementes inteiras. Para velocidade de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ , verificou-se um carregamento de 2,85; 75 e 90%, para separação de sementes inteiras, chochas e danificadas, respectivamente. E para a velocidade de  $16 \text{ m.s}^{-1}$ , verifica-se índices correspondente de carregamento de 14,28; 98,33 e 95,83%, respectivamente.
- Não foi possível separar as sementes inteiras por usando diferentes tamanho usando o princípio de velocidade terminal.

## Referência Bibliográfica

- ALMEIDA, B.V.; PINHEIRO FILHO, J.B.; HARA, T.; FORTES, M. Determinação da porosidade para cacau em amêndoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Campina Grande, PB, **Anais...**, Campina Grande, PB: SBEA, p. 606-612, 1979.
- ARAÚJO, M.C. de; SILVA, O.R.R.F. da, OLIVEIRA, N.V. de. Concepção, projeto e otimização de uma máquina para beneficiamento de amendoim. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Bauru, SP. **Anais...**, Bauru, SP (CD COBEM) 1997.
- ARAÚJO, M.C. **Desenvolvimento e avaliação de uma máquina descascadora de amendoim por acionamento mecânico**. Universidade Federal da Paraíba, (Dissertação de Mestrado) 76p. Campina Grande, PB, 1999
- BELOKHVOSTIKOV, I. I.; ANTONOV, V.N.; KOVALEVA, T.K. Comparison of technological efficiency of cleaning sunflower seeds in pneumatic sieve separators. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh zavedenii, Pishchevaya Tekhnologiya*, n.1, p.158-160, 1978.
- BENEDETTI, B.C.; JORGE, J.T. Influência da variação do teor de umidade sobre a velocidade terminal de vários grãos. *Revista de Engenharia Agrícola*. 1992, v.12, n. p.102-118
- BILANSKI, W.K.; COLINS, S.H.; CHU, P. Aerodynamic properties of seed grains. *Agricultural Engineering*. v.43, n.4, p.216-219, 1962.
- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOD, E.N. **Fenômenos de Transporte**, Espanha, Editorialo Reverté., S.A, 1982.
- BOGACZYNSKI, K. Some aerodynamic properties of selected samples of wheat, rye and barley seeds. *Acta Alimentaria Polonica*. Poznan, Poland, v.1, n.2, p. 165-175, 1975.

- BRAGA, M.E.D. **Estudo experimental dos fundamentos do transporte hidráulico de laranjas**. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. Campinas, SP. 1997, p. (Tese de Doutorado).
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária (Brasília, DF) **Regras para análise de sementes**. 1992. 365p.
- BURKOV, A.I. e ANDREEV, V.L. A closed-open pneumatic system for grain and seed cleaning machines. *Traktory i Sel'skokhozy Aistvennye Mashiny*. n.5, p.18-21, 1995.
- ÇARMAN, K. Some physical properties of lentil seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*. v. 63, n.2, p. 87-92, 1996.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. e 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. de; SILVA, F.A.S. Estudo da morfologia geométrica em grãos. *Revista Nordestina de Armazenagem*. Campina Grande, PB. v.3, n.1, p.03-30, 1986.
- CHHABRA, R.P. **Steady Non-Newtonian Flow About a rigid sphere**. Encyclopedia of fluid mechanics, Gulf Publishing Company, v.1, 1986.
- CHUNG, D.S. e CONVERSE, H.H. Effect of moisture content on some physical properties of grains. *Transaction of the ASAE*. St. Joseph, Michigan, v.14, n.4, p.612-614 e 620, 1971.
- CLARKE, R.J. Grading green coffee. *Process Biochemistry*. v.7, n.10, p.18-20, 1972.
- CURRAY, J.K. **Analysis of sphericity and roundness of quartz grains**. (Magister Science Thesis in Mineralogy). The Pennsylvania State, University Park, Pa. 1951.

- El ASHI, M.E. Determination of the critical velocity of the air stream cleaning for wheat seeds. **Minufiya Journal of Agricultural Research**. Shebin El Kom, Egypty, v.8, p.553-561, 1984.
- ERSKINE, W.; WILLIANS, P.C.; NAKKOUL, H. Splitting and dehulling lentil (*Lens culinaris*): effects seed size and different pretreatments. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Aleppo, Syria, v.57, n.1, p.77-84, 1991.
- FIGUEIREDO, D.J.C. de. **Comportamento e estabilidade fenotípica em genótipos de amendoim nos Estados da Paraíba e Pernambuco**. Areia:UFPB, 1992. 54p. Dissertação (Mestrado).
- FISCUS, D.E.; FOSTER, G.H.; KAUFMANN, H.H. Grain-stream velocity measurements. **Transaction of the ASAE**. St. Joseph, Michigan, v.17, n.1, p.162-166, 1971.
- FREITAS, S.M. de; GODOY, I.J. de; VIEIRA, R.D. Aspectos comparativos da produção e comercialização de amendoim nos países do Mercosul. **Informações Econômicas**, v.25, n.1, p.49-55, 1995.
- GOVIER, G.W.; AZIZ, K. **The flow of complex**. Mixture in pipes, liton Education publishing Inc., New York City, pp. 4-13, 1972
- GUARELLA, P.; PASCUZZI, S.; PELLERANO, A. A pneumatic separator for vegetable species seeds: Construction and operating aspects. **Rivista di Ingegneria Agraria**. v.28, n.2, p.102-107, 1997.
- GUPTA, R.K.; DAS, S.K. Physical properties of sunflower seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v.66, n.1, p.1-8, 1997.
- HALLEE, N. D. Aerodynamic properties of potatoes and associated soil materials. **Transaction of the ASAE**. St. Joseph, Michigan, v.15, n.2, p.303-307, 1972.
- HENDERSON, S.M.; PERRY, R.L. **Agricultural process engineering**. Edwards Brothers, inc., Ann Arbor, Michigan, 1952.

- HERGERT, G.B. A laboratory classifier for separation of ground products by terminal velocity. **Canadian Institute of Food Science and Tecnology Journal**. Ontario, Ottawa, Canada, v.6, n. 4, p.298-299, 1973.
- JOSHI, D.C.; DAS, S.K.; MUKHERJEE, R.K. Physical properties of pumpkin seeds. **Journal of Agricultural Engeering Research**, v.54, n.3, p.219-229, 1993.
- KIM, M.H.; PARK, S.J.; NOH, S.H. Study on the physical, mechanical and aerodynamic properties of peanut pods. **Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery**. v.20, n.2, p.141-150, 1995.
- LAPPLE, C.E. **Fluid and particle mechanics**. University of Delaware, Newark. 1956.
- LEITÃO, A.M. **Algumas propriedades físicas e mecânicas da pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally**. FEA/UNICAMP Campinas, 1983. 109p. (Tese de mestrado).
- McKAY, G.; MURPHY, W.R.; JODIERI - DABBAGHZADDEH, S. Settling characteristics of carrot particles in vertical pipelines. **Journal of Food Process Engineering**. v.15, n.2, p.81-97, 1992.
- MILLER, N.; VILLIERS, J.B.M. de.; PEULEN, J.M.J. A process for the dehulling of high oil-content sunflower seeds. **Fette Seifen Anstrichmittel**. Pretoria, South Africa, v.88, n.7, p.28-271, 1986.
- MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal material**. Gorson and Breach Science Publishess. New York, 1978, 2 ed, 742p.
- MONTEIRO, M.J.C. Além das aparências. In: **Agroanalysis**. Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, v.18, n.5, p.52, 1998.
- MOSSONE, P.G. Separation methods in wheat cleaning. **Tecnica Molitoria**, Itália, v.21, n.24, p.721-726 e 728, 1970.
- MUKAI, S. Pneumatic cleaning system. **United States Patent**. 1983.

- NEBRA, S.A.; MACEDO, I. de C. Bagasse particles shape and size and their free-settling velocity. **Internacional Sugar Journal**. v.90, n.1077, 1988.
- OEZERDEM, B.; TOKSOY, M. Physical properties based on cleaning and drying of secondary crops raised in Turkey. **Journal of Agriculture And Forestry**. Doga, Turkish. v.17, n.2, p.381-388, 1993.
- ÖGÜT, H.; ÇARMAN, K. Determination of coefficient of friction on the different surface of small grain crops. **National Symposium on Mechanisation in Agriculture**, Konya, Turkey, 1991, p.471-480.
- PREVISÃO E ACOMPANHAMENTO DE SAFRAS, MAARA:CONAB** Abril, ano 1998, n.4, p.13-14, 1995.
- PRIRKE, P.S.; UMBARKAR, S.P.; KUBDE, A.B.; TAPRE, A.B. Process development for pigeonpea milling at rural level. **New Agriculturist**. v.4, n.1, p. 47-56, 1993.
- RAILA, A; BLEIZGYS, R. Aerodynamical characteristics of rape seeds. **Zennes Ukio Inzinerija**, Makslo Darbai, v. , n.28, p.161-170, 1996.
- REDDY, P.V.; FARRELL, E.P.; WARD, A.B. Pneumatic conveying of flour mill stocks. **Association of operated millers**. 1984, p.4251-4255. (Bulletin)
- ROSSI, S. J. e ROA, G. Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural. São Paulo, DAG, 1980. 229p.
- SADYNAM, M.; GROVER, P.C. Separation behaviour of pulses and masala constituents. **Journal of Research, Punjab Agricultural University**. Punjab, India, v.20, n.1, p.89-94, 1983.
- SALES, M.M.S. **Estudo da divergência genética em genótipos de amendoim do banco de germoplasma do CNPA**, Areia, Universidade Federal da Paraíba, 1995. 56p. (Trabalho de Graduação).
- SASSERON, J.L. **Características dos grãos armazenados**. Viçosa, MG: CENTREINAR, 1980. 65p.

- SILVA, J.de S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995. 500p.
- SILVA, O.R.R.F. da; VALE, L.V.; SANTOS, R.C. dos; SANTOS, R.F. dos; CARTAXO, W.V.; ALVES, I.; GOMES, O.L. **Descascador manual de amendoim, alternativa para o pequeno produtor**. Campina Grande: Embrapa-CNPA, 1996. 10p. (Embrapa-CNPA- Comunicado técnico, 49).
- SINGH, K.K.; GOSWAMI, T.K. Physical properties of cumin seed. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v.64, n.2, p.93-98, 1996.
- SLAVOVSKI, M.K; LOMEV, M.G. Some physical and aerodynamic properties of grape combs, seeds and pomace. **Vissh Institut po Khranitelna i Vkusova Promyshlennost**. Nauchni Trudove, v.18, n.2, p.269-272, 1971.
- SOULE, H.M. Investigation of some aerodynamics properties of lowbush blueberry. **Transaction of the ASAE**. St. Joseph, Michigan, paper n.68-847, 1970.
- SUTHAR, R.K.; DAS, S.K. Some physical properties of karingda (*Citrullus lanatus* (Thumb) Mansf) seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v.65, n.1, p.15-22, 1996.
- TANG, J.; SOKHANSANJ, S. Geometric changes in lentil seeds caused by drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.56, p. 313-326, 1993.
- TENNES, B.R.; LEVIN, J.H.; STOUT, B.A. Swett cherry properties usefull in harvesting and handling equipment design. **Transaction of the ASAE**. St. Joseph, Michigan, v.12, n.5, p.710-714, 1969.
- THALER, A. In-plant transport of bulk goods in confectionery factories. **Kakao und Zucker**. v.33, n.1, p.2-6, 1981.
- THOMPSON, R.A.; ISAACS, G.W. Porosity determination of grains and seeds with na air comparision pycnometer. **Transaction of the ASAE**. St. Joseph, Michigan, v.10, n.6, p.693-696, 1967.

- TSUCHIYA, M.; KAMIDE, J.; ISHIWATA, K. Study on separation of unhulled and brown rice by winnowing. **Journal of the Society of Agricultural Machinery**. Japan, v.43, n.3, p.433-442, 1981.
- TYLER, R.T.; PANCHUK, B.D. Effect of seed maturity on the air classification of field peas. **Cereal Chemistry**. Saskatoon, Saskatchewan, Canada, v.61, n.2, p.192-193, 1984.
- VARSHNEY, A.K.; NANDASANA, J.N.; SATASIYA, R.M. Physical properties of peanut kernels. **Gujarat Agricultural University Research Journal**. v.20, n.1, p.129-133, 1994.
- VAUGHAM, C.E.; GREGG, B.R.; DELOUCHE, J.C. **Beneficiamento e manuseio de sementes**. Ministério da Agricultura. AGIPLAN. Brasília, 1976 (Traduzido por Charles W. Lingerfelt e Francisco Ferraz de Toledo, 195p).
- ZHURAVLEVA, M.S. **Separation weed seeds from bulk wheat grain after primary cleaning**
- ZIEGLER, H.D. Aspects of the layout of cleaning equipment for durum wheat. **Mehl und Brot**. Getreide, v.26, n.10, p.280-284, 1972.
- ZUEV, F.G.; ANDREEVA, Z.E.; OSTROMETSKII, V.N. **Pneumatic separator for pneumatic conveyor installations in groat factories.**

## APÊNDICE A

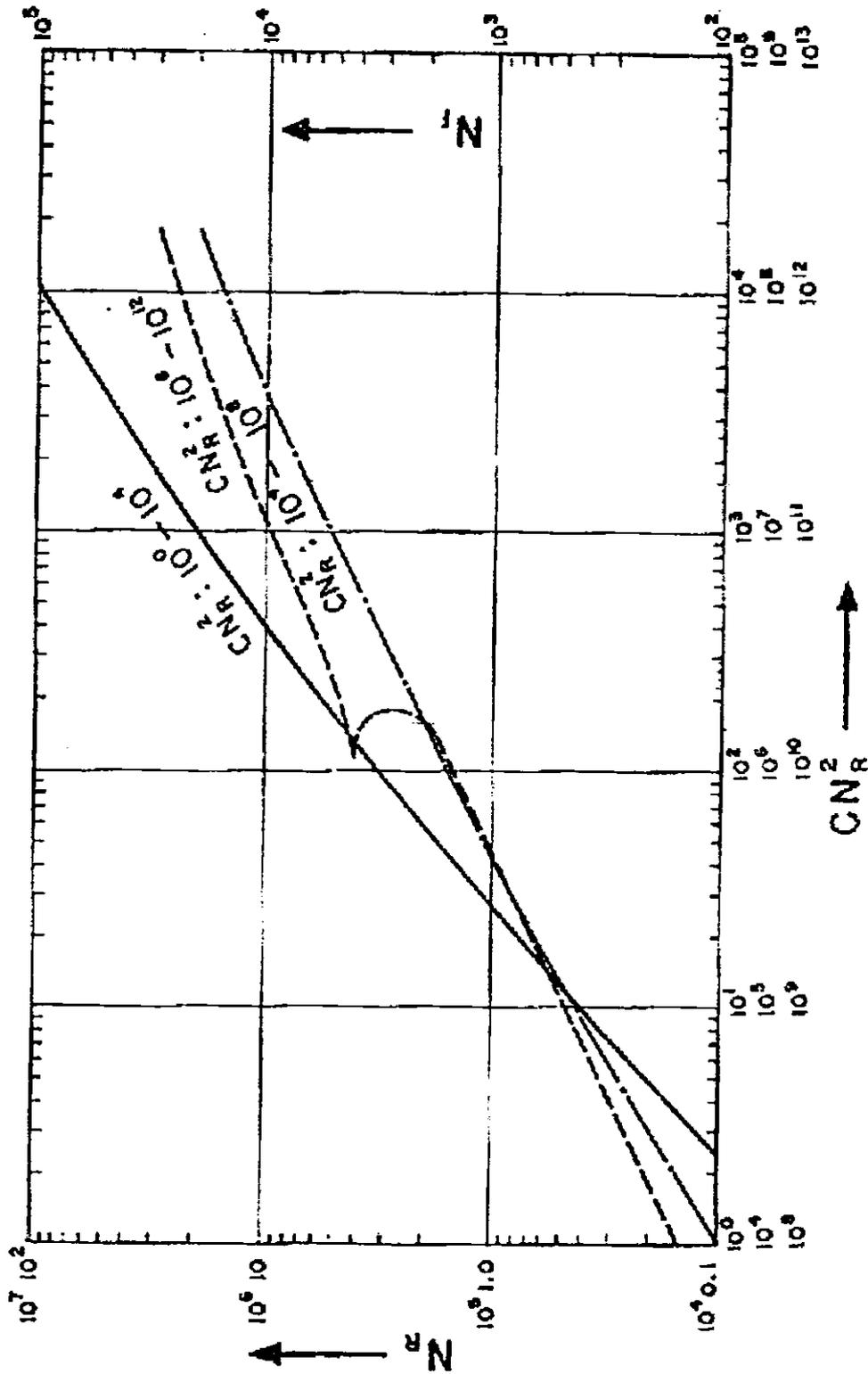


Figure 9.1 Reynolds Number,  $N_R$ , versus  $CN_R^2$  for spheres