



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Dissertação de Mestrado

VELOCIDADE TERMINAL EM ÁGUA DE ALGUMAS
FRUTAS TROPICAIS

AVANI DE OLIVEIRA E SILVA

Campina Grande
Paraíba

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
MESTRADO

**VELOCIDADE TERMINAL EM ÁGUA DE ALGUMAS
FRUTAS TROPICAIS**

DISSERTAÇÃO

AVANI DE OLIVEIRA E SILVA

Campina Grande – Paraíba
NOVEMBRO- 1999

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**VELOCIDADE TERMINAL EM ÁGUA DE
ALGUMAS FRUTAS TROPICAIS**

AVANI DE OLIVEIRA E SILVA

**CAMPINA GRANDE
NOVEMBRO - 1999**

AVANI DE OLIVEIRA E SILVA

**VELOCIDADE TERMINAL EM ÁGUA DE
ALGUMAS FRUTAS TROPICAIS**

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

Área de Concentração:

Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas

ORIENTADORA: Dra. Maria Elita Duarte Braga

CO-ORIENTADOR: Dr. Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

CAMPINA GRANDE
NOVEMBRO DE 1999



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

AVANI DE OLIVEIRA E SILVA

Título: "Velocidade Terminal em Água de Algumas Frutas Tropicais".

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Meliton
Prof. Dra. Maria Elita D. Braga-Orientadora

Meliton (APROVADO)

Mário Eduardo R.M.C. Mata
Prof. Dr. Mário Eduardo R.M.C. Mata-Co-Orientador

APROVADO

Alexandre José de M. Queiroz
Prof. Dr. Alexandre José de M. Queiroz-Examinador

APROVADO

Jailson N. Alves
Prof. Dr. José Jailson N. Alves-Examinador

APROVADO

Campina Grande, 22 de novembro de 1999

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal da Paraíba e a Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Pnsino Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

Ao Prefeito Cássio Cunha Lima como também ao secretário Otávio Leite filho, por permitir o meu afastamento para que pudesse realizar esta pesquisa.

A Professora e Orientadora Dra. Maria Elita Duarte Braga pelas orientações e sugestões dadas para enriquecimento desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata, pelo desempenho principalmente na aquisição do equipamento sem o qual não seria possível a execução desta pesquisa.

A Amiga e Professora Dra. Josivanda Palmeira, por ter me ajudado bastante sempre quando precisei. Muito obrigada.

Ao Professor Dr. Francisco de Assis por tudo.

As amigas Patrícia César, Aldanisa e Hosaneide Farias pela amizade sincera, apoio e ajuda nas horas mais difíceis deste curso.

Aos colegas do curso, Alessandra, Bené, Antonio e sua noiva Severina pela indispensável ajuda na coleta dos dados deste trabalho.

ÍNDICE

	PÁGINA
LISTA DE FIGURA	iii
LISTA DE TABELA	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 - Generalidades das frutas	4
2.2 - Coeficiente de arraste e velocidade terminal	6
2.3 - Meio fluido	8
2.3.1 - Transporte de partículas esféricas	9
2.3.2 - Transporte de partículas não esféricas	11
2.4 - Características hidrodinâmicas	17
2.5 - Análise do efeito de parede	22
3 - MATÉRIAS E MÉTODOS	27
3.1 - Caracterização física	27
3.1.1 – Massa	27
3.1.2 – Medidas dos diâmetros	27
3.1.3 – Volume	28
3.1.4 – Massa específica	29
3.1.5 – Esfericidade	30
3.2 - Velocidade terminal das frutas	31
3.2.1 – Equipamento	31

3.2.2 – Procedimento experimental	33
3.2.3 – Coletas de dados	33
3.2.4 – Procedimento de cálculo da velocidade terminal calculada	34
3.3 - Análise do efeito de parede	37
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 - Características físicas	39
4.2 - Velocidade terminal	44
4.2.1 - Velocidade terminal experimental	44
4.2.2 - Velocidade terminal calculada	46
4.3 - Análise do efeito de parede	57
4.4 - Análise do transporte	60
5 - CONCLUSÕES	63
6 - LITERATURAS CITADAS	65

LISTA DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1- Coeficiente de arraste para partículas com formas geométricas. Reproduzida a partir de VENNARD (1961)	10
Figura 2- Correlações para C_D de partícula esféricas em fluidos Newtonianos (Reproduzida a partir de MASSARANI,1986)	15
Figura 3- Correlações para C_D de partícula com $\phi = 0,8$ fluidos Newtonianos (Reproduzida a partir de MASSARANI,1986)	16
Figura 4- Correlações para C_D de partícula com $\phi = 0,6$ fluidos Newtonianos (Reproduzida a partir de MASSARANI,1986)	16
Figura 5- Deslocamento em função do tempo ,obtidos para o cálculo da velocidade terminal da maçã em água. (Figura reproduzida a partir da MATTHEWS et al., 1965)	18
Figura 6- Aparelho de teste utilizado por TENNES e STOUT (1968) para medir a velocidade terminal de cereja	20
Figura 7- Equipamento usado por Ataide (1996) para medir a velocidade terminal de partículas de diferentes formas e materiais	26
Figura 8- Experimento de projeção das frutas	28
Figura 9- Método do deslocamento de massa de água para o cálculo do volume e da massa específica	29
Figura 10- Esquema de traçados feitos da projeção da fruta para a obtenção do grau de esfericidade	30
Figura 11 Equipamento usado para determinar a velocidade terminal das frutas	31

Figura 12-	Detalhes de montagem e funcionamento do equipamento usado para determinar a velocidade terminal de frutas em água	32
Figura 13-	Exemplo esquemático de senas congeladas para retirada dos dados de tempo, em cada posição da fruta	34
Figura 14-	Curva deslocamento em função do tempo e ajuste linear para o cálculo da velocidade terminal de ameixa em água	44
Figura 15-	Curva deslocamento em função do tempo e ajuste linear para o cálculo da velocidade terminal de umbu em água	45
Figura 16-	Curva deslocamento em função do tempo e ajuste linear para o cálculo da velocidade terminal de goiaba em água	45
Figura 17-	Curva deslocamento em função do tempo e ajuste linear para o cálculo da velocidade terminal de maçã em água	46
Figura 18-	Curva deslocamento em função do tempo para o cálculo da velocidade terminal da ameixa por quatro diferentes método ..	48
Figura 19-	Curva deslocamento em função do tempo para o cálculo da velocidade terminal da goiaba por quatro diferentes método ...	51
Figura 20-	Comportamento verificado, em, goiabas, ao final do experimento de velocidade terminal	51
Figura 21-	Curva deslocamento em função do tempo para o cálculo da velocidade terminal da maçã por quatro diferentes método	54
Figura 22-	Curva deslocamento em função do tempo para o cálculo da velocidade terminal do umbu por quatro diferentes método	56
Figura 23-	Análise de alguns parâmetros de transporte hidráulico da goiaba em canal aberto	62

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 1-	Resumo comparativo de equações de movimento de esfera, discos e cilindros circulares	14
Tabela 2-	Algumas características físicas de maçã imersa n'água	19
Tabela 3-	Velocidade terminal e coeficiente de arraste obtido para duas variedades de cerejas	20
Tabela 4-	Efeito de parede na queda livre de uma esfera de diâmetro D_p ao longo do eixo de um tubo de diâmetro D_t	23
Tabela 5-	Efeito de parede na subia da laranja e modelo esférico ao longo de um eixo de um tubo D_t	24
Tabela 6-	Resultados da inclinação dos gráficos de $f_w D_p/D_t$ para geometria esférica	25
Tabela 7-	Características físicas da ameixa	39
Tabela 8-	Características físicas da goiaba	40
Tabela 9-	Características físicas da maçã	42
Tabela 10-	Características físicas do umbu	43
Tabela 11-	Velocidade terminal calculada ($m.s^{-1}$) e experimental da ameixa	47
Tabela 12-	Velocidade terminal calculada ($m.s^{-1}$) e experimental da goiaba	49
Tabela 13-	Velocidade terminal calculada($m.s^{-1}$) e experimental da maçã	53

Tabela 14-	Velocidade terminal calculada (m/s^{-1}) e experimental do umbu	55
Tabela 15-	Efeito de parede na descida da ameixa, ao longo do eixo de um tubo de diâmetro $D_t=250mm$	58
Tabela 16-	Efeito de parede na descida da goiaba, ao longo do eixo de um tubo de diâmetro $D_t=250mm$	59
Tabela 17-	Efeito de parede na subida da maçã ao longo do eixo de um tubo de diâmetro $D_t=250mm$	59
Tabela 18-	Efeito de parede na descida do umbu ao longo do eixo de um tubo de diâmetro $D_t=250mm$	60

RESUMO

Neste trabalho foram determinados e os característicos físicos hidrodinâmicas de ameixa, goiaba, maçã e umbu, as quais por possuírem cascas finas e delicadas estão mais susceptíveis a danos mecânicos e principalmente a choques por impactos e vibrações durante o transporte. Caracterizou-se as frutas quanto ao tamanho, pela medida dos três diâmetros mutuamente perpendiculares; massa, volume e massa específica. Quanto à forma, a caracterização foi obtida em termos do fator de esfericidade. Das características hidrodinâmicas, estudou-se a velocidade terminal em água, coeficiente de arraste e analisou-se o efeito de parede obtido do transporte vertical da fruta em um cilindro contendo água. Verificou-se que as frutas apresentaram as seguintes características físicas: **ameixa** (massa = 93,20g, volume=73,27cm³, massa específica=1,12g.cm⁻³, esfericidade=0,93 e diâmetro médio =52,11mm); **goiaba** (massa=130,81g, volume=136,71cm³, massa específica=1,07g.cm⁻³, esfericidade=0,72 e diâmetro médio=68,90mm); **maçã** (massa=66,15g, volume=60,05cm³, massa específica=0,98g.cm⁻³, esfericidade=0,93 e diâmetro médio=48,76mm) e **umbu** (massa=14,67g, volume=12,51cm³, massa específica=1,13g.cm⁻³ e diâmetro médio=28,78mm). A velocidade terminal obtida para ameixa, goiaba, maçã e umbu foram respectivamente iguais a 0,19; 0,06; 0,23 e 0,15m.s⁻¹. Todas as frutas apresentaram efeito de parede sendo este mais acentuado para a goiaba seguida da maçã, ameixa e umbu.

ABSTRACT

In this work they were certain the physical characteristics and properties plum hydrodynamics, guava, apple and umbu, the ones which for they possess fine and delicate peels they are more susceptible to mechanical damages and mainly collide her for impacts and vibrations during the transport. It was characterized the fruits with relationship to the size, for the measure of the three diameters mutually perpendicular; mass, volume and specific mass. With relationship to the form, the characterization was obtained in terms of the spherical factor. Of the hydrodynamic characteristics, it was studied the terminal speed in water, coefficient of it drags and it was verified the obtained wall effect of the vertical transport of the fruit in a cylinder contends water. It was verified that the fruits presented the following physical characteristics: plum (mass = 93,20g, volume=73,27cm³, specific mass=1,12g.cm⁻³, spherical=0,93 and medium diameter =52,11mm); guava (mass=130,81g, volume=136,71cm³ specific mass=1,07g.cm⁻³, spherical=0,72 and diameter medium=68,90mm); apple (mass=66,15g, volume=60,05cm³, specific mass=0,98g.cm⁻³, spherical=0,93 and diameter medium=48,76mm) and umbu (mass=14,67g, volume=12,51cm³, specific mass=1,13g.cm⁻³ and diameter medium=28,78mm). The terminal speed obtained for plum, guava, apple and umbu went respectively the same to 0,19; 0,06; 0,23 e 0,15m.s⁻¹. All the fruits presented wall effect being this more accentuated for the guava followed by the apple, plum and umbu.

1. INTRODUÇÃO

A importância econômica de determinada cultura pode ser avaliada sob vários aspectos, o principal deles é a qualidade da matéria-prima produzida. Isto depende muito do manuseio e trato que é dado a estes vegetais durante as diversas etapas do processamento.

Atualmente, na sua grande maioria, os sistemas de carga, descarga e transporte de frutas são feitos de forma manual ou mecânica. Num sistema de embalagem, por exemplo, transporte da fruta é feito manualmente na primeira linha de embalagem; este transporte mesmo sendo feito cuidadosamente pode acarretar pequenos danos físicos, por impacto e até por atrito. Algumas das frutas mais susceptíveis a esse tipo de danos, são as frutas de casca delicada, aquelas que racham facilmente devido ao impacto e aquela que ao sofrer machucações desencadeiam reações químicas provocando um escurecimento na região afetada e fazendo com que esta venha a se deteriorar mais facilmente. Entre estas frutas encontram-se a ameixa, goiaba, maçã e umbu.

No processamento de frutas e nos terminais de embalagens o transporte, em sua grande maioria, é feito mecanicamente em esteiras e durante este processo é feita a seleção e classificação manual da fruta.

Na busca pela melhoria que se vem dando na qualidade dos produtos, o transporte, da colheita a armazenagem, dos frutos em unidades que antecedem o processamento pode ser feito, em muitas dessas etapas por canais, usando transporte hidráulico; para o estudo econômico desse transporte, o dimensionamento adequado e a sua otimização, se faz necessário conhecer o comportamento dinâmico desses frutos neste tipo de transporte. Portanto se faz necessário o conhecimento das propriedades físicas envolvidas no transporte hidrodinâmico.

O transporte hidráulico não é uma técnica recente, apenas foi desativado nas décadas passadas por falta de conhecimento dos conceitos fundamentais que o envolvia. Para algumas frutas ainda se utilizam este tipo de transporte, como no caso da maçã, onde se utiliza canais para transportar este produto de um ponto a outro do sistema.

O transporte de pequenos sólidos ($D_p < 1,0$ mm) é uma técnica bem conhecida e tem sua teoria bem estabelecida. No entanto, muitas indústrias manuseiam sólidos maiores e necessitando usar tubos de transporte para seus materiais, encontram apenas informações limitadas na literatura. No passado sugeriu-se que a velocidade mínima de operação e conseqüente pressão perdida no sistema de transporte de grandes partículas, poderia também ser alto para uma operação econômica. Todavia tais predições foram baseadas em experimentos com pequenas partículas, em tubo de pequenos diâmetros e pouquíssimos resultados foram aproveitados. (Mckay & Dabbaghzadeh, citado por BRAGA, 1997).

A interação sólido-fluido é determinante para o projeto, avaliação e operação de diversos equipamentos típicos de indústrias de alimentos; somente em casos muito particulares de interação sólido-fluido, a força de arraste, F_D , que o fluido exerce sobre uma dada partícula sólida, pode ser prevista com sucesso. A literatura é extensa em se tratando de assentamento de minúsculas partículas esféricas, cobrindo uma larga faixa de Reynolds, que geralmente está direcionada para estudos na área de mineração e para indústria química.

A velocidade terminal é um parâmetro fundamental no que diz respeito ao transporte hidráulico de suspensão, sedimentação, processamento de fibras poliméricas e reatores catalíticos, segundo relatam os trabalhos desenvolvidos por SHARMA E CHHABRA (1991), CHHABRA (1995) e CHHABRA (1996).

A velocidade de frutas, tais como as de interesse deste trabalho estão situadas numa faixa de $5.000 \leq N_R \leq 20.000$, faixa na qual segundo UHLHERR e CHHABRA (1995), existem vários trabalhos disponíveis sobre o efeito de parede, no entanto poucos destes dados experimentais são utilizados e o fato de que altos números a dependência do fator de parede possa ser desprezado ainda não ficou bem estabelecido nem documentado. Este valor parece depender da razão de diâmetros, decrescendo com o decréscimo da razão D_p/D_t (Diâmetro da partícula/ Diâmetro do tubo).

O conhecimento de propriedades hidrodinâmicas de frutas intactas, de diversas formas e tamanho são de grande interesse para a indústria de alimentos. Por isso, este trabalho tem por finalidade investigar os parâmetros hidrodinâmicos envolvidos na velocidade

de terminal em água, de ameixa, goiaba, maçã e umbu, que possam contribuir para cálculos de simulação de sistemas hidráulicos de transporte.

1.1 Objetivos

- Caracterização geométrica da fruta: forma e tamanho (diâmetro, volume e massas e massa específica)
- Propriedades hidrodinâmicas como : velocidade terminal, coeficiente de arraste
- Analisar o efeito da forma no coeficiente de arraste e na velocidade terminal
- Analisar o efeito de parede.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Generalidades das Frutas

Ameixa (*Prunus salicina*, L.)

A ameixeira cultivada no Brasil pertence à espécie *Prunus salicina*, L., originária do Extremo Oriente, ou é um de seus híbridos com espécies geneticamente próximas, da Europa e da América do Norte. No Brasil, são poucos os estados que têm expressão na produção de ameixa sendo Santa Catarina, o maior produtor. A ameixa é consumida praticamente em “in natura”, uma pequena parcela, inadequada ao consumo “in natura”, é destinada à industrialização (doces, passas, etc.). O fruto da ameixeira é de tamanho variável, de formato oval a oblongo, de polpa firme e massuda e com epiderme extremamente fina de coloração amarela, vermelha ou azul (DUCROQUET e MONDIM, 1997).

Goiaba (*Psidium guajava* L.)

A goiabeira (*Psidium guajava* L.) é uma árvore muito apreciada, não só pela excelência de seus frutos, mas também pela facilidade com que cresce na maior parte do território nacional. A goiabeira tem porte que varia do arbusto ao arbóreo, Guia Rural, Abril (1986).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de goiaba. Os estados de São Paulo, Minas Gerais e Pernambuco responderam, juntos, por aproximadamente 74% da produção nacional no ano de 1980 (MEDINA, 1988).

MEDINA (1988) cita que a goiaba, além de ser consumida “in natura”, tem grande importância na indústria de doces, dos quais destaca-se a goiabada, sem rival entre os produtos de frutos tropicais. Outras aplicações de valor comercial da goiaba estão no

preparo de geléias, pasta, fruta em calda, purês, alimentos para criança, refresco xaropes, vinhos e outros produtos de menor importância.

O fruto é de forma arredondada ou baga globosa, ovóide ou piriforme, de 4-12mm de comprimento coroado pelo cálice, comumente de cor amarelada (na maturação), com polpa sucosa, variando de cor esbranquiçada ou amarelada a rosada ou avermelhada, sementes numerosas, podendo a casca ser grossa ou fina (MARANCA, 1981; MEDINA, 1988).

Maçã (*Pyrus malus*)

Até poucos anos, o Brasil importava praticamente toda maçã que consumia. Hoje, somos, praticamente, auto-suficiente nesta cultura, que é, basicamente, consumida na forma “in natura”. Com o aumento da oferta de maçãs, o setor de industrialização também vem tendo um aumento considerável, principalmente na produção de suco, polpa, iogurte, maçã desidratada, entre outros. Embora tenham sido testados diversos cultivares de macieira no Brasil, a ponicultura nacional está baseada nos cultivares fuji e gala, que representam mais de 80% da, produção nacional. Estes cultivares apresentam excelentes características, sendo que a coloração avermelhada da epiderme de seus frutos que tem garantido boa parte do sucesso.

Atualmente, a ponicultura é uma atividade bastante importante para o Brasil, principalmente para os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, principais produtores do Brasil. Com o aumento da oferta de maçãs, o setor de industrialização também vem tendo um aumento considerável, principalmente na produção de suco, polpa, iogurte, sorvete, maçã desidratada, entre outros (DONADIO, 1998).

Umbu (*Spondias tuberosas* Arruda Câmara)

O umbuzeiro (*Spondias tuberosas* Arruda Câmara) é uma árvore rústica, frutífera, excessivamente produtiva, xerófila, perfeitamente adaptada às regiões semi-áridas do Nordeste brasileiro (GOMES, 1965)

BISPO (1989) relata que os estados brasileiros com produção representativa em ordem decrescente são: Bahia, Pernambuco, Paraíba, Ceará Rio Grande do Norte, Piauí e Minas Gerais.

O fruto do umbuzeiro é uma drupa glabra ou levemente pilosa, arredondada com 2 a 3 cm de diâmetro e peso de 10 a 20g e apresentam superfície lisa ou exibem 4 a 5 protuberância na porção distal; constituído, em média, por 22% de casca (epicarpo), 68% de polpa (mesocarpo) de sabor agridoce e 10% de caroço (endocarpo), que é rico em gordura e proteína (MENDES,1990). A sua casca é uma estrutura fina de cor amarelo-esverdeado. A polpa é branco-esverdeado, mole, suculento, de sabor agridoce, e o caroço é de tamanho variado.

A comercialização do umbu a nível regional, da fruta “in natura” é feita há muito tempo por ambulantes e vendedores em feiras livres, no entanto sua industrialização e exportação agora é que está iniciando, sendo necessário desta forma a aplicação de técnicas que viabilizem sua exportação, uma vez que o umbu é uma fruta de rápido perecibilidade. Uma vez colhido, resiste no máximo 2 ou 3 dias, daí a dificuldade da comercialização da fruta “in natura”. (Souza e Catão, citado por ALMEIDA, 1999).

2.2. Coeficiente de arraste e velocidade terminal

Quando uma partícula sólida é colocada em um fluido em movimentos o fenômeno envolve a ação de forças exercidas pelo fluido nesta partícula. No atrito fluido, o transporte ocorre na direção do escoamento. O arraste é máximo quando o movimento do fluido é lento e diminui a medida que a velocidade aumenta.

Quando a força de arraste for igual ao peso da partícula, em queda livre, a partícula alcançará uma velocidade constante, velocidade terminal, v_t . Em queda livre a partícula adota a sua própria orientação, a Equação 1 representa este movimento.

$$\rho_p \frac{d\vec{v}}{dt} = (\rho_p - \rho_f)\vec{g} + \frac{\vec{F}}{Vol} \quad (1)$$

Em que:

ρ_p = massa específica do sólido (g.cm^{-3})

ρ_f = massa específica do fluido (g.cm^{-3})

g = aceleração da gravidade (m.s^{-2})

F =

Vol =

O coeficiente de arraste, C_D , é dado por:

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \rho |\vec{U} - \vec{v}|^2 A_p C_D \frac{(\vec{U} - \vec{v})}{|\vec{U} - \vec{v}|} \quad (2)$$

em que:

U = velocidade média do fluido em escoamento monofásico (m.s^{-2})

V = velocidade da partícula (m.s^{-2})

A_p = área projetada dada por:

$$A_p = \frac{\pi D_p^2}{4} \quad (3)$$

em que:

D_p = diâmetro da partícula (mm)

No escoamento em regime permanente de partícula esférica de geometria isométrica, o coeficiente de arraste é definido como:

$$C_D = \frac{4}{3} g \frac{D_p (\rho_p - \rho_f)}{(\bar{U} - \bar{v}) \rho_f} \quad (4)$$

da Equação 4 temos:

$$|\bar{U} - \bar{v}| = \sqrt{\frac{4gD_p(\rho_p - \rho_f)}{3C_D\rho_f}} \quad (5)$$

onde:

$$C_D = f(N_R, \phi)$$

e

$$N_R = \frac{\rho |\bar{U} - \bar{v}| D_p}{\mu} \quad (6)$$

em que :

N_R = número de Reynolds

μ = viscosidade da água

Com o valor de C_D , pode-se determinar o valor da velocidade terminal v_t , através da Equação 5.

2.3. Meio fluido

Um fluido Newtoniano se define como aquele para o qual a representação da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação se comporta em uma linha reta. Todos os gases, bem como a maior parte dos líquidos de importância na engenharia, são fluidos Newtonianos. Os estudos envolvendo fluidos Newtonianos, em particular água e ar, têm merecido muita atenção visto que já são conhecidos os resultados da integração dos perfis de velocidade ao redor da esfera, para o escoamento axissimétrico, permanente e a baixos números de Reynolds (BIRD *et alli*, 1982).

2.3.1. Transporte de partículas esféricas

Quando N_R é menor que a unidade ($N_R < 1$), 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 pelo arraste por atrito (STOKES, 1851). Para uma esfera de diâmetro D_p , movendo-se numa velocidade v através de um fluido de viscosidade μ , a Lei de Stokes dá a força de arraste por:

$$F_D = 3\pi\mu v D_p \quad (7)$$

Substituindo a Equação 7 na Equação 2, obtida para a força de arraste com

$A_p = \frac{\pi D_p^2}{4}$, o coeficiente de arraste será dado por:

$$C_D = 24/N_R \quad (8)$$

A Lei de Stokes não se aplica para Reynolds maior do que a unidade ($N_R > 1$) porque o escoamento se abre atrás do objeto esférico (Figura 1). Segundo MOHSENIN (1978), o coeficiente de arraste é uma combinação do arraste por atrito e arraste devido a pressão numa faixa de até $N_R=1000$.

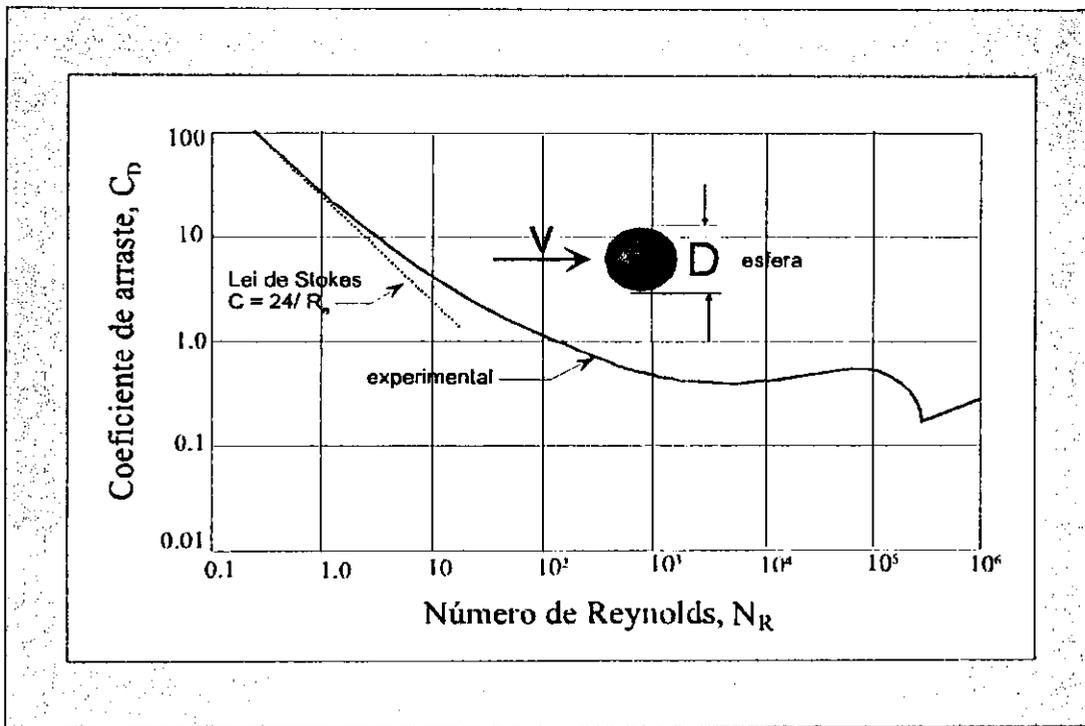


Figura 1 - Coeficiente de arraste para partículas com formas geométricas regulares. Reproduzida a partir de VENNARD, 1961).

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

$$C_D = \frac{24}{N_R} \left[1 + \frac{3}{16} N_R \right] \quad (9)$$

Allen e Bird *et alii* (1982) citado por BRAGA (1997) estudaram soluções empíricas que explicam os efeitos viscosos e inerciais.

Allen citado por BRAGA (1997)

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

Bird *et alii* citado por BRAGA (1997)

$$C_D = \frac{18,5}{N_R^{0,6}}; \text{ válido para } 2 < N_R < 500 \quad (11)$$

Na faixa onde há predominância de forças inerciais, o coeficiente de arraste é aproximadamente constante. Nesta região, da Lei de Newton do movimento, 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:

$$C_D \cong 0,44; \text{ válido para } 5 \times 10^2 < N_R < 2 \times 10^5$$

2.3.2. Transporte de partículas não esféricas

A obtenção das relações para partículas não esféricas foi obtida fazendo-se modificações nas relações para partículas esféricas combinando fatores, como esfericidade. Segundo PETTYJOHN e CHRISTIANSEN (1948), a velocidade terminal de uma partícula esférica isométrica isolada, em regime de Stokes ($N_R < 0,1$), é dada por:

$$v_t = \frac{K_1 g (\rho_s - \rho) D_p^2}{18\mu} \quad (12)$$

em que :

K_1 = função empírica da esfericidade ϕ , e é dado por:

$$K_1 = 0,843 \log \left[\frac{\varphi}{0,065} \right] \quad (13)$$

em que φ é a esfericidade, dada por:

$$\varphi = \frac{\pi D_p^2}{\text{área superficial da partícula}} \quad (14)$$

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

$$v_t = \left[\frac{4g(\rho_p - \rho_f)D_p}{3\rho_f K_2} \right] \quad (15)$$

em que,

$$K_2 = 5,31 - 4,88\varphi \quad (16)$$

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

$$C_D = \frac{24}{K_1 N_R}, \text{ válida para } N_R < 0,1 \quad (17)$$

$$C_D = K_2, \text{ válido para } N_R > 10^3 \quad (18)$$

Alguns autores apresentaram resultados para partículas não esféricas. Na Tabela 1, fornecida por MOHSENIN (1978), encontram-se equações comparativas para esferas e outros objetos com formas geométricas regulares. O autor afirma que poucos trabalhos foram feitos com partículas de formas irregulares, as quais são complicadas devido a sua orientação ao acaso e a variedade de métodos para expressar tamanho e dimensões usados nos cálculos do número de Reynolds e de área frontal.

CLIFT *et alii* (1978), apresentaram, nos casos específicos de esferóides de formas oblatas e prolatas com eixos **2a** e **2b**, diversas expressões da força de arraste em função da relação de aspecto $\varphi = b/a$

MASSARANI (1986), obteve uma correlação para todos os regimes de escoamento, através de resultados experimentais obtidos por Pettyjohn e Christiansen e o método proposto por Churchill, (Figuras 2, 3 e 4).

$$C_D = \left[\left(\frac{24}{K_1 N_R} \right)^m + K_2^m \right]^{1/2} \quad (19)$$

onde K_1 e K_2 são funções da esfericidade desenvolvida por PETTYJOHN e CHRISTIANSEN (1948) e m que também é função de φ , foi ajustado com partículas na faixa de $0,6 \leq \varphi \leq 1$, sendo:

para	$0,6 \leq \varphi \leq 0,9$	tem-se	$m = 0,9$
para	$0,9 \leq \varphi \leq 1,0$	tem-se	$m = 3,15 - 2,5\varphi$

Nas Figuras 2, 3 e 4 podemos observar que na correlação obtida por MASSARANI (1986), para sedimentação de partículas de várias formas em fluidos Newtonianos, há uma concordância com os dados experimentais de PETTYJOHN E CHRISTIANSEN (1948).

Tabela 1- Resumo comparativo de equações de movimento de esfera, discos e cilindros circulares (LAPLE, 1956).

	Esfera (direção do escoamento)	Disco fino (normal a superfície)	Disco fino (paralelo a face)	Cilindro circular Infinito (normal ao eixo)
N. de Reynolds	$D_p v \rho_f / \mu$	$D_p v \rho_f / \mu$	$2L v \rho_f / \mu$	$D_p v \rho_f / \mu$
Área frontal	$(\pi/a) D_p^2$	$(\pi/a) D_p^2$	$(D_p) L$	$(D_p) L$
Massa m_p	$\rho_p (\pi/6) D_p^3$	$\rho_p (\pi/6) D_p^2$	$\rho_p (\pi/6) D_p^2$	$\rho_p (\pi/6) D_p^2$
Arraste laminar				
$N_R \leq 0,2$	$3\mu\pi D_p$	$8\mu\pi D_p$	$(16/3)\mu v D_p$	$(4\pi/K)\mu v L$
$F_D = C_D N_R$	24	$64/\pi$	$64/3$	$8\pi/k$
Esc. Turbulento				
C_D (médio)	0,44	1.12	--	1.2
N_R (intervalo)	$1 \times 10^3 - 2 \times 10^5$	> 1000	--	$1 \times 10^2 - 2 \times 10^5$
Vel. Terminal (v_t^2)	$\frac{4gD_p(\rho_p - \rho_f)}{3C_D\rho_f}$	$\frac{2gL(\rho_p - \rho_f)}{C_D\rho_f}$	$\frac{gD_p\pi(\rho_p - \rho_f)}{2C_D\rho_f}$	$\frac{gD_p\pi(\rho_p - \rho_f)}{2C_D\rho_f}$

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

$$K = 2.002 \ln(N_R)$$

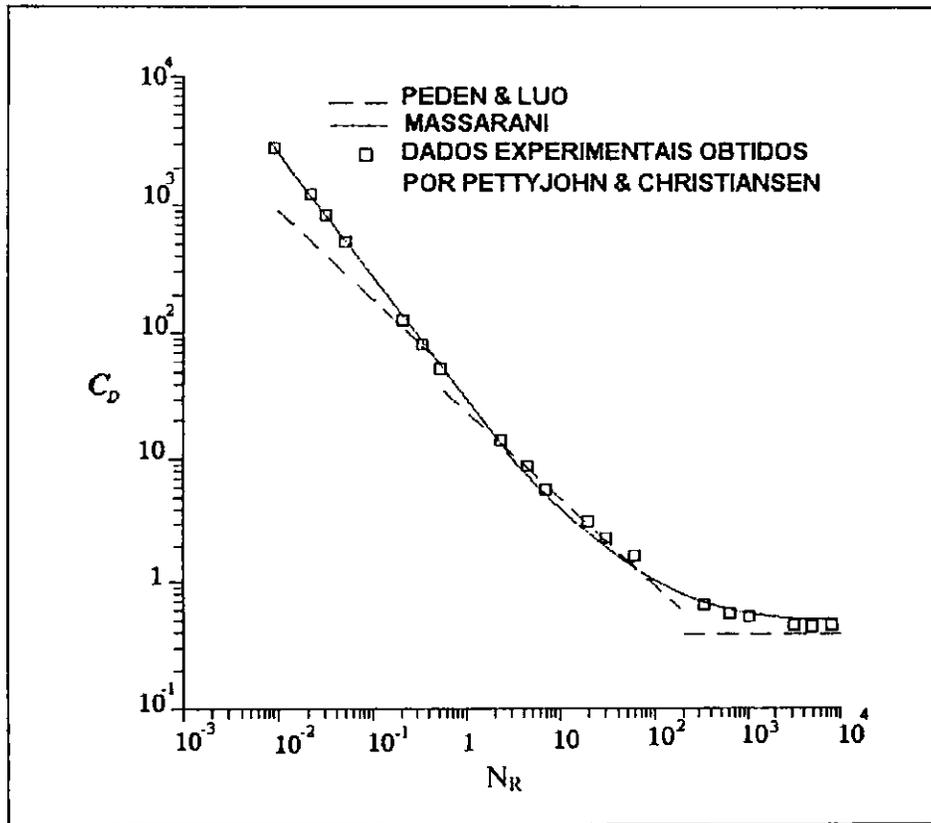


Figura 2- Correlações para C_D de partículas esféricas em fluidos Newtonianos.
(Reproduzida a partir de MASSARANI, 1986).

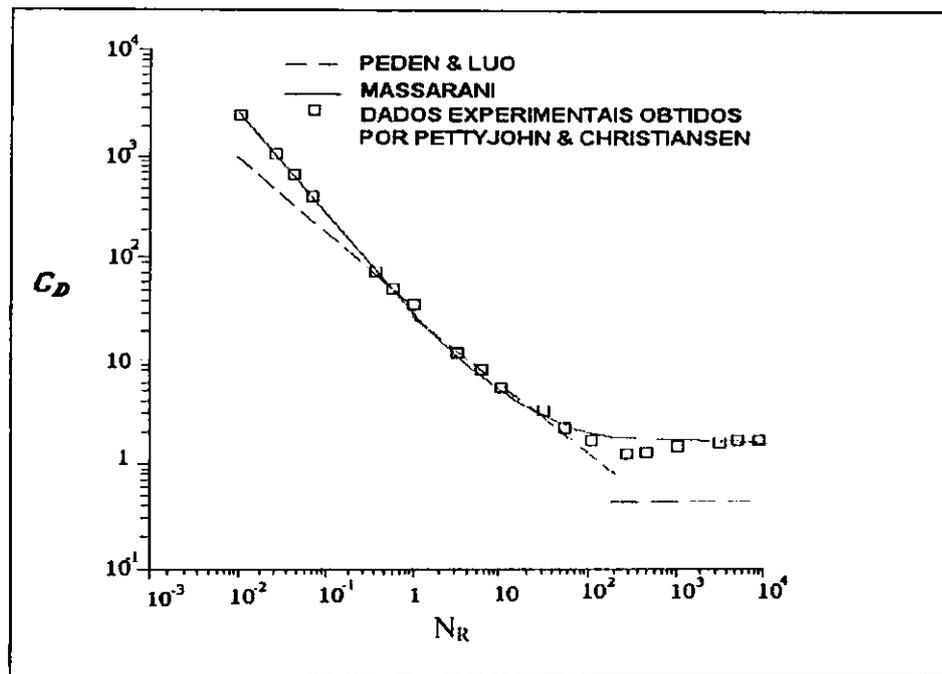


Figura 3- Correlações para C_D de partículas com $\phi = 0,8$ em fluidos Newtonianos (Reproduzida a partir de MASSARANI, 1986).

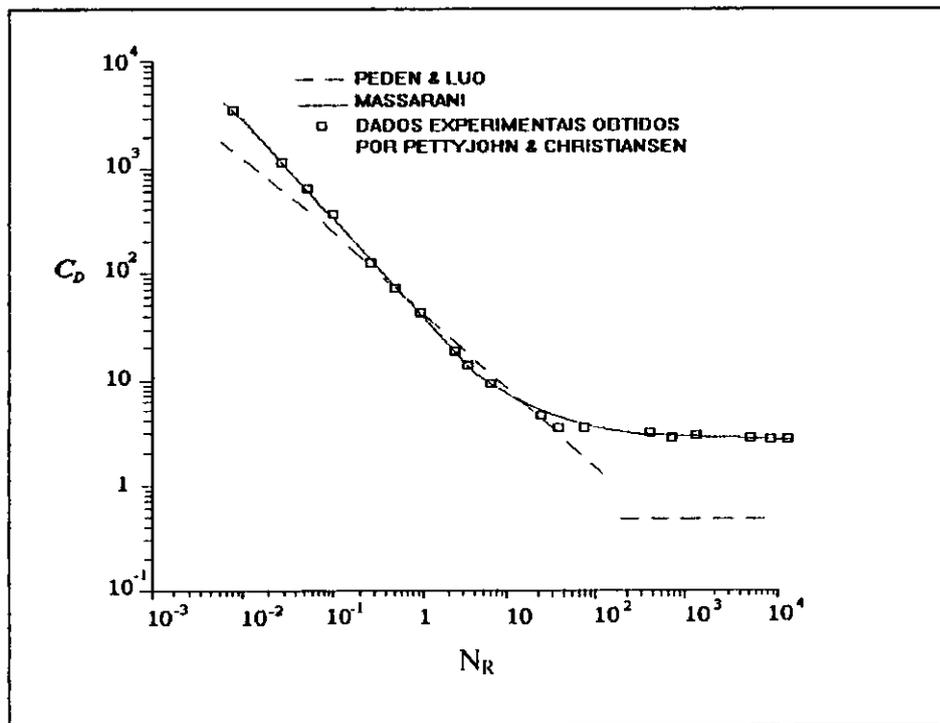


Figura 4 - Correlações para C_D de partículas com $\phi = 0,6$ em fluidos Newtonianos (Reproduzida a partir de MASSARANI, 1986).

2.4. Características hidrodinâmica

MCKAY e DABBAGHZADEH (1987), estudaram o comportamento de discos e cilindros de cenoura em um leito fluidizado, analisando a queda de pressão, velocidade terminal e as relações de formas utilizando PVC, Nylon 6.6 e cilindros de cenoura. Na fluidização mínima, eles concluíram que grandes cilindros não se comportaram como sólidos esféricos ou próximo de uma esfera. Concluíram ainda que, na fluidização e transporte hidráulico de cenoura e cilindros plásticos, a velocidade de transporte pode ser predita pelo gráfico do log (velocidade) em função do log (porosidade) e extrapolando a curva para log (porosidade = 1), e que a diferença de densidade fluido-partícula foi o efeito mais pronunciado nas características de fluidização e transporte. A Equação abaixo, obtida para cilindros com esfericidade na faixa de 0,73 a 0,87, relaciona fator de atrito a número de Reynolds e porosidade.

$$\log(f_v) = 1,439 + 0,53 \log \left[\frac{N_R D_p}{(1 - \varepsilon)} \right] \quad (20)$$

onde, o coeficiente de arraste em função da esfericidade é dado por:

$$\log(C_D) = 0,77 + 4,75 \log(\varphi) \quad (21)$$

Verificou-se que quando a razão L/D_p aumentou, ou seja a esfericidade decresceu, o arraste da partícula foi reduzido. Isto é o inverso do comportamento de assentamento e mostra que, o coeficiente de resistência medido em condições de assentamento, não pode ser usado para prever o comportamento de fluidização de cilindros tendo razão L/D_p grande.

O comportamento de maçãs em água, como a orientação (inserção de talo para cima, para baixo, etc.), velocidade terminal, ângulo de repouso de maçãs submersas, efeito da pressão hidrostática sobre danos nas cascas das frutas e profundidade de água necessária para amortecer a queda da fruta, foram estudado por MATTHEWS *et alii* (1965) e

DEWEY *et alii* (1966). A velocidade terminal foi determinada pela liberação da fruta do fundo do recipiente de 15 polegadas de diâmetro e seu movimento foi filmado. Com os dados obtidos do filme, foi plotado um gráfico do deslocamento em função do tempo e deste gráfico determinaram a velocidade terminal; Figura 5; estes valores foram maiores do que os encontrados experimentalmente, como mostrado na Tabela 2. Segundo os autores esta diferença é atribuída ao efeito de parede (relação $D_p/D_t = 0,2$). O autor admite, no entanto, que devido a pequena profundidade do recipiente utilizado para o estudo, provavelmente a fruta não tenha atingido a velocidade terminal.

Os valores das velocidades experimentais na Tabela 2, estão multiplicados por um fator de 1,06 que, segundo o autor, foi usado para corrigir o efeito da parede obtido com base em experimentos feitos com uma bola de borracha. Em condição de escoamento turbulento, um coeficiente de arraste de 0,44, o qual é apropriado para uma esfera, foi utilizado para o cálculo da velocidade terminal. Os autores justificaram o resultado de um maior coeficiente de arraste ao fato da maçã não ser esférica.

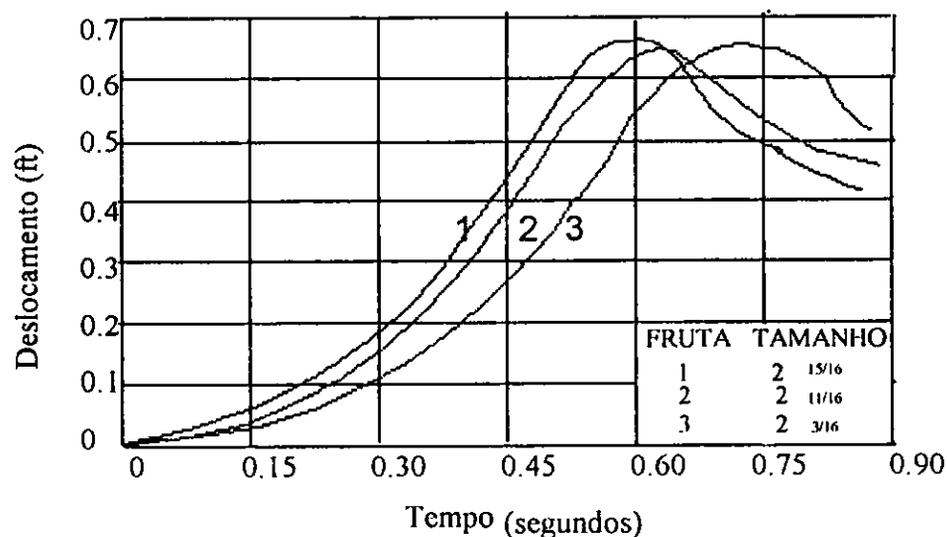


Figura 5 - Deslocamento em função do tempo, obtidos para o cálculo da velocidade terminal de maçãs em água. (Figura reproduzida a partir de MATTHEWS *et alii*, 1965)

Tabela 2- Algumas características físicas de maçãs imersas n'água (MATTHEWS *et alii*, 1965; DEWEY *et alii*, 1966).

Variedade de maçã	Orientação de flutuações com relação a inserção do talo(%)			Ângulo de repouso (graus)	D _e (ln)	Esfericidade (%)	V _t Exp. (m/s)	V _t Corrigido (m/s)	V _t Calc. (m/s)
	P/cima	p/baixo	ao acaso						
Jonathan	95	1	4	30	2,94	76	1,83	1,94	2,34
McIntosh	64	34	2	33	-	-	-	--	--
Delicious	71	2	27	36	2,84	82	1,59	1,68	1,94

Para determinar a velocidade terminal de cereja em água, TENNES e STOUT (1968) utilizaram um recipiente de vidro com 0,38 metros de diâmetro, 0,61 metros de profundidade contendo água até uma altura de 0,56 metros. Ao lado do recipiente foi colocado uma escala e um cronômetro (Figura 6). A medida que as cerejas eram soltas, sua queda era acompanhada por uma câmara fotográfica automática de 8 mm, com velocidade de 32 chapas por segundo. Dos dados coletados a partir do filme foi plotado a curva tempo em função do deslocamento. Eles também determinaram a velocidade terminal teórica de três diferentes formas; usando a média dos 3 diâmetros medidos, em 3 direções mutuamente perpendiculares, o diâmetro da esfera equivalente e o diâmetro obtido da média geométrica, Tabela 3. Desse estudo eles concluíram que a velocidade terminal teórica foi duas vezes maior que a velocidade terminal experimental. Eles afirmaram que esta diferença é devido à força causada pelo movimento rotacional da fruta durante a sua descida.

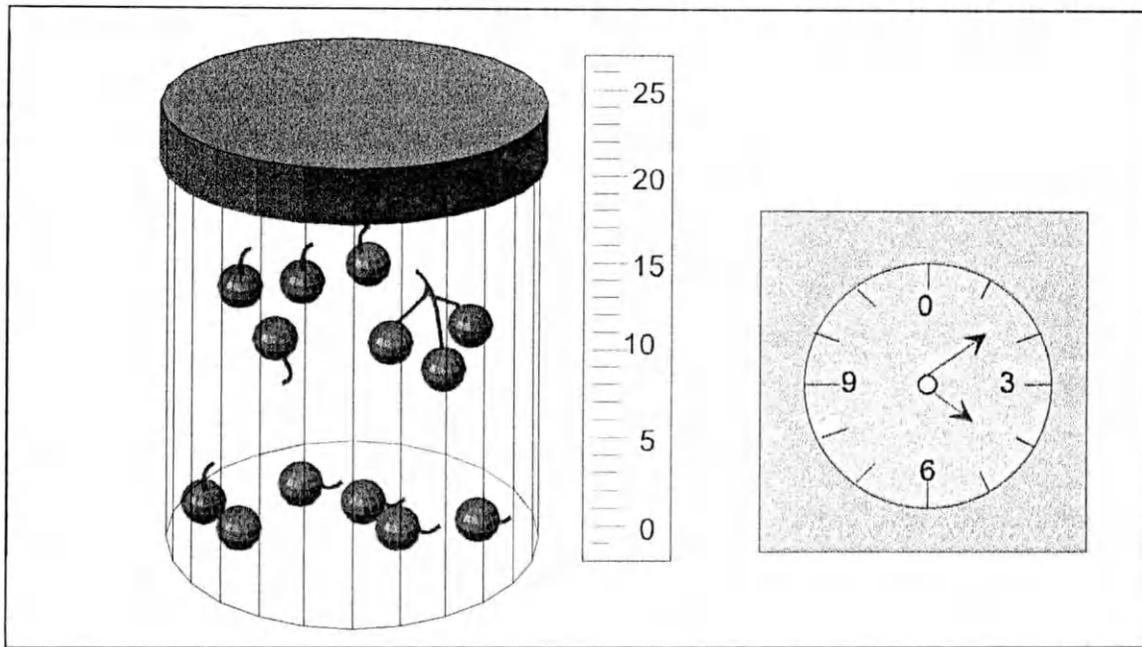


Figura 6- Aparelho de testes utilizado por TENNES e STOUT (1968) para medir a velocidade terminal de cerejas.

Tabela 3 – Velocidade terminal e coeficiente de arraste obtidos para duas variedades de cerejas. (TENNES e STOUT, 1968)

Variedade de cereja	D_p (esfera equivalente)	V_t (exp.) (m/s)	Considerando uma forma esférica					
			C_D	V_t (m/s)	C_D	V_t (m/s)	C_D	V_t (m/s)
Napoleon	0,0166	1,38	0,40	4,41	4,16	1,37	1,57	2,21
Windsor	0,0214	1,40	0,44	5,16	4,16	1,60	1,57	2,72

* O valor de 4,16 para o coeficiente de arraste foi obtido por relacionar a velocidade terminal da cereja com a velocidade terminal obtida para uma esfera.

** O valor 1,57 para o coeficiente de arraste foi obtido usando a Equação desenvolvida por PETTYJOHN e CHRISTIANSEN (1948): $C_D + 5,31 - 4,88(\varphi)$.

Tietjens citado por BRAGA (1997), estudando as forças devido ao movimento rotacional de uma esfera em um fluido, concluiu que na maioria das vezes estas forças são maiores do que a força de arraste causada pelo movimento de descida.

Em 1997, BRAGA estudou a velocidade terminal de laranja, de modelos esféricos, lisos e esféricos com a mesma rugosidade da fruta e concluiu que a velocidade terminal da laranja ($v_t = 0,21\text{m/s}$) foi menor do que a obtida com modelo esférico de mesma rugosidade $v_t = 0,25\text{m/s}$ e também, inferior a de modelo esférico liso, $v_t = 0,26\text{m/s}$; com estes resultados a autora concluiu que a rugosidade da casca da laranja não exerceu influência significativa na sua velocidade terminal.

Segundo BILANSK *et alii* (1962) e BILANSK e LAL (1965), os grãos de trigo têm orientação ao acaso por algum instante e depois giram em torno de um eixo vertical, com sua maior dimensão voltada para um plano horizontal. Eles justificam que esta inclinação e rotação são devido a força aerodinâmica no grão não passar pelo centro de gravidade nem ser paralelo a velocidade do ar. Esta força é composta por uma força vertical devido o centro de gravidade uma horizontal a qual provoca um torque que tende a girar o grão em torno de um eixo vertical, e um par no plano vertical a qual tende mudar a inclinação do eixo mais longo do grão. Eles observaram que a medida que os grãos giravam subiam no túnel de ar numa região de velocidade do ar inferior. Ou seja, a rotação causou um maior arraste e menor velocidade terminal.

BRAGA (1997) analisou o comportamento da laranja imersa em água e relacionando seu ângulo de repouso, esfericidade e densidade com seu estado em que se encontra a fruta (sadia, murcha, estragada em parte, totalmente estragada), concluiu que as laranjas imersas em água tendem a situação de equilíbrio padrão. As frutas consideradas sadias mantêm-se equilibradas e com ângulo de orientação compreendido entre 14 e 25° enquanto que quando murcham, elas tendem a manter uma inclinação nula da columela central com relação ao nível da água e uma maior percentagem (27% da sua área superficial) fica acima do nível da água, o que permite distinguir uma laranja sadia de uma estragada.

2.5. Análise do efeito de parede

A Equação de Faxen e Emerslebem, para a queda livre de esfera ao longo do eixo de um tubo de diâmetro D_t , foi indicada por MASSARANI (1980), para uso quando a velocidade terminal de partículas esféricas, em regime de Stokes, é afetada por fronteiras rígidas.

$$K_p = \frac{v_t}{v_{t\infty}} = \frac{1}{1 + 2,10\beta} \quad (22)$$

em que:

K_p = critério que analisa o efeito de parede

β = relação entre o diâmetro da partícula e o diâmetro do tubo

A Equação 22 é válida quando a relação entre diâmetro $\beta = D_p/D_t$ é inferior a 0,05. Na Equação 22, a velocidade terminal da partícula isolada $V_{t\infty}$ é, neste caso,

$$v_{t\infty} = \frac{g(\rho_p - \rho_f)D_p^2}{18\mu} \quad (23)$$

Para situações fora do regime de Stokes e condições em que $\beta > 0,05$, Massarani apresentou correlações empíricas que estão reunidas na Tabela 4.

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

Tabela 4- Efeito de parede na queda livre de uma esfera de diâmetro D_p ao longo do eixo de um tubo de diâmetro D_t . (MASSARANI, 1980).

VALIDADE		EFEITO DE PAREDE
$N_{R\infty}$	$\beta = D_p/D_t$	$K_p = v_t/v_{t\infty}$
$<0,5$	$<0,8$	$K_{p1} = 1,25 / [1 + 0,25 \exp(6,51\beta)]$
$>10^3$	-	$K_{p2} = (1 - \beta^2) / (1 + \beta^4)^{1/2}$
-	$<0,8$	$K_{p3} = \frac{\left[K_{p1} \frac{C_D N_R^2}{24} \right]^{-6/5} + \left[K_{p2} \left(\frac{C_D N_R^2}{0,44} \right)^{1/2} \right]^{-6/5}}{20,52 \left\{ \left[1 + 0,0921 (C_D N_R^2)^{1/2} \right]^{1/2} - 1 \right\}^2}$

O efeito de esferas em tubos cilíndricos, a altos números de Reynolds, foi estudado por UHLHERR e CHHABRA (1995). Para este estudo eles usaram esferas de PVC, aço, nylon, polystyrene, chumbo e vidro com massa específica variando de 1,049 a 11,913 kg/m³ e diâmetro de 1,59 a 19,05 mm, onde mediram velocidade terminal, coeficiente de arraste e números de Reynolds. O efeito de parede foi medido em termos de K_p definido como a razão entre as velocidades terminais:

$$K_p = v_t/v_{t\infty} \quad (24)$$

Onde v_t é a velocidade terminal de uma esfera de diâmetro D_p , em um meio infinito e v_m é a velocidade terminal da mesma esfera, medida no eixo de um tubo cilíndrico de diâmetro

D_t . Na Tabela 4, encontram-se as expressões utilizadas pelos autores para o cálculo do efeito de parede.

BRAGA (1997) verificou o efeito de parede na subida de laranjas em um tubo cilíndrico, como também de protótipos construídos utilizando-se esferas plásticas ocas. Nestas esferas foram feitos orifícios em sua superfície e preenchidos com farinha de mandioca, em seguida injetou-se água até se atingir o peso que fornecesse a densidade desejada. Foram construídos modelos esféricos, de quatro diâmetros diferentes, 37,0; 42,0; 50,0 e 72,0mm e dois tipos de superfície, uma com a rugosidade da casca da laranja e outra lisa. A autora concluiu que houve efeito de parede e que este tende a se anular a partir $\beta=0,2$ dentro do critério $K_p \geq 0,99$, como dito por MASSARANI (1990); concluiu também que houve um movimento “zig-zag” durante a subida da fruta e de seus modelos esféricos. Os resultados estão mostrados na Tabela 5.

Tabela- 5 Efeito de parede na subida de laranja e modelos esféricos ao longo do eixo de um tubo de diâmetro $D_t=250\text{mm}$

DIÂMETRO DA ESFERA (mm)	R_E $vD_p\rho/\mu$	$\beta = D_p/D_t$	$K_p = v_t/v_\infty$ $K_p = (1 - \beta^2) / (1 + \beta^4)^{1/2}$
72,4	15204	0,2896	0,9129
72,0	18720	0,2840	0,9139
50,0	12500	0,2000	0,9608
42,0	10080	0,1680	0,9714
37,0	8140	0,1480	0,9779

O valor $D_p=72,4$ mm é o diâmetro da esfera de volume equivalente ao da laranja.

ATAÍDE *et alii* (1996), investigaram a influência da parede de um duto cilíndrico na velocidade terminal de partículas esféricas. Para este estudo eles confeccionaram esferas de aço, PVC, teflon e latão e utilizaram um fluido não-Newtoniano. As determinações experimentais foram conduzidas em quatro tubos cilíndricos, com diâmetros internos distintos (Figura 7), onde as partículas eram abandonadas no centro do tubo e o tempo de queda era determinado através de quatro cronômetros digitais acionados por fotocélulas (Muccillo - 8800), com precisão de 1 milésimo de segundo. Os autores concluíram que o

efeito de parede do duto cilíndrico influência bastante na velocidade terminal de queda dos sólidos, na solução estudada.

A influência do diâmetro característico da partícula e o diâmetro interno do duto no efeito de parede foi determinado através da seguinte Equação:

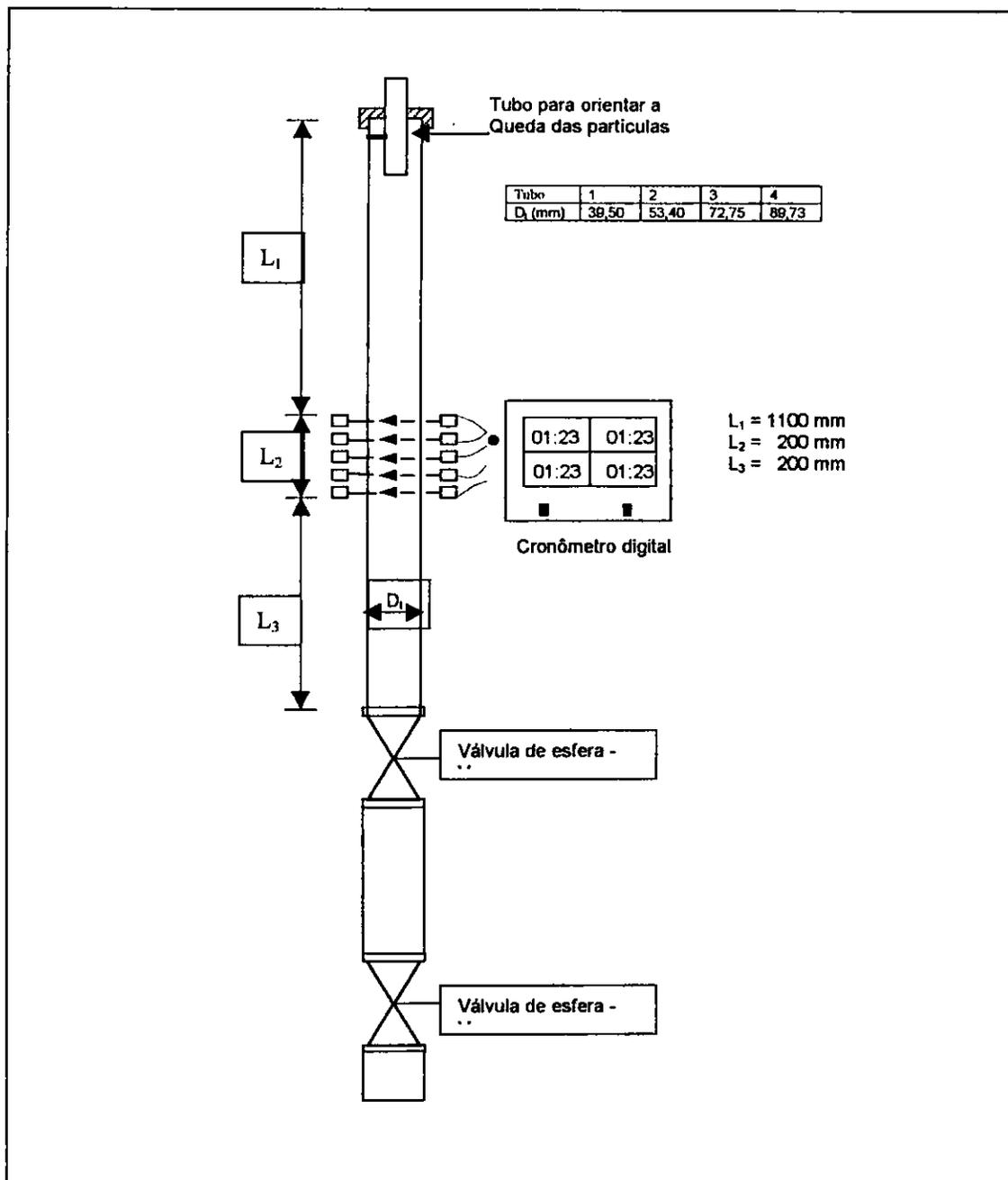
$$K_p = \frac{v_t}{v_{to}} = 1 - a \left(\frac{D_p}{D_t} \right) \quad (25)$$

Os valores da inclinação (a) da Equação (25), obtidas dos ajustes dos dados experimentais encontram-se de forma sumária na Tabela 6.

Tabela 6- Resultados da inclinação dos gráficos de K_p em função de D_p/D_t para a geometria esférica

Forma do Sólido	Valor da inclinação (a)	Faixa de $D^* = D_p/D_t$	Da literatura e Referência
esfera	0,6916	$0,12 \leq D^* \leq 0,26$	0,93 SHRAMA E CHHABRA (1991)

Fonte: ATAÍDE (1996)



Fonte -ATAÍDE (1996)

Figura 7 – Equipamento usado por ATAÍDE *et alii* (1996) para medir velocidade terminal de partículas de diferentes formas e materiais

3. Materiais e Métodos

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba-CAMPUS II.

Foram selecionadas para este estudo, 15 unidades de cada uma das quatro frutas utilizadas (ameixa, goiaba, maçã e umbu) provenientes do comércio de Campina Grande.

3.1. Caracterização física

As frutas foram caracterizadas segundo a sua forma e tamanho. Foram determinados: massa, diâmetros (comprimento (a), largura (b), espessura (c)); volume; massa específica; e esfericidade.

3.1.1. Massa

A massa de cada fruta, em gramas, foi determinada por uma balança analítica.

3.1.2. Medida dos diâmetros

Os diâmetros de comprimento, largura e espessura, foram determinados com um paquímetro da Marca Mitutoyo de 0,02 mm de precisão. Para certificar-se de que os diâmetros medidos eram os máximos, em cada direção, fez-se também a projeção de cada fruta nas três direções da seguinte forma:

Utilizando-se um retroprojektor da Marca 3M e uma escala milimétrica transparente, projetou-se a fruta em papel milimetrado, inicialmente em repouso, para obtenção do diâmetro maior, comprimento (a), como mostrado na Figura 8. Em seguida girou-se horizontalmente a fruta num ângulo de 90°, e fez-se nova projeção para obtenção do diâmetro intermediário, ou seja, a largura (b). Por fim, girou-se a fruta verticalmente num ângulo de 90°, para se fazer a projeção de espessura (c).

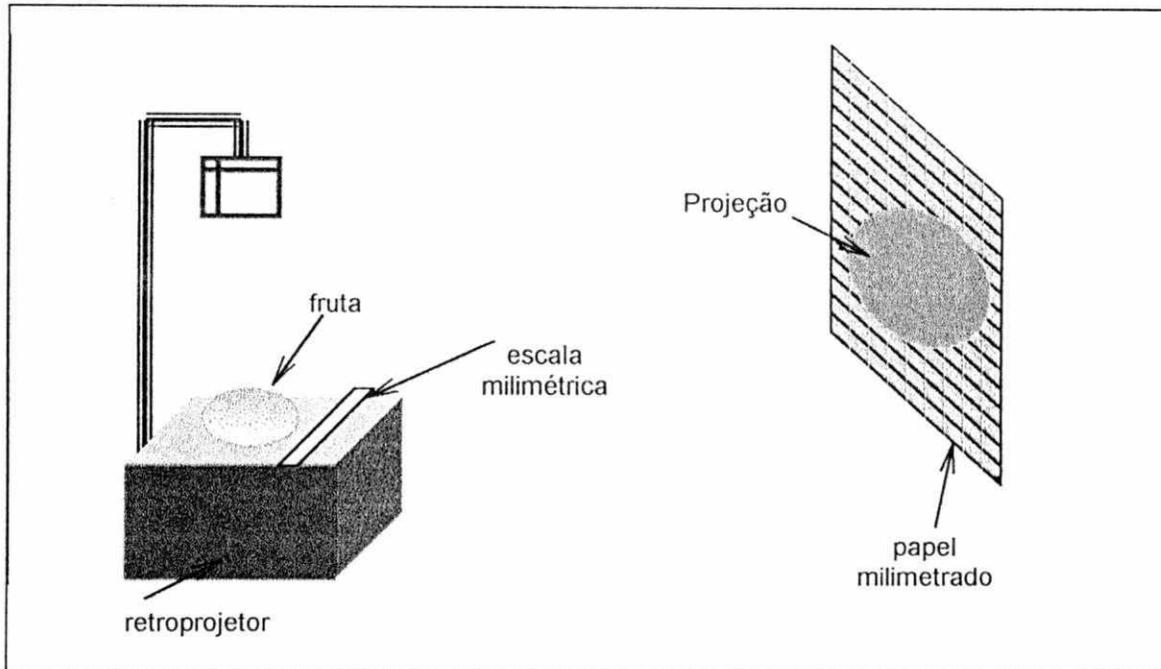


Figura 8 – Experimento de projeção das frutas

Com as três projeções e conhecendo-se a escala de ampliação, obteve-se os três diâmetros máximos da fruta.

3.1.3. Volume

O volume das frutas foi determinado pelo método de deslocamento de massa de água, como descrito por MOHSENIN (1978). Neste método são feitas 3 pesagens. A primeira pesagem é a massa da fruta, normalmente, ao ar como pode ser visto na Figura 2 (a). A segunda pesagem, Figura 2(b), é a massa de um recipiente contendo água. Em seguida, sustentada por uma haste, a fruta é forçada para dentro do recipiente com água, até sua total submersão sem, no entanto, tocar as superfícies do recipiente, neste momento é feita a terceira pesagem como pode ser verificado na Figura 9.

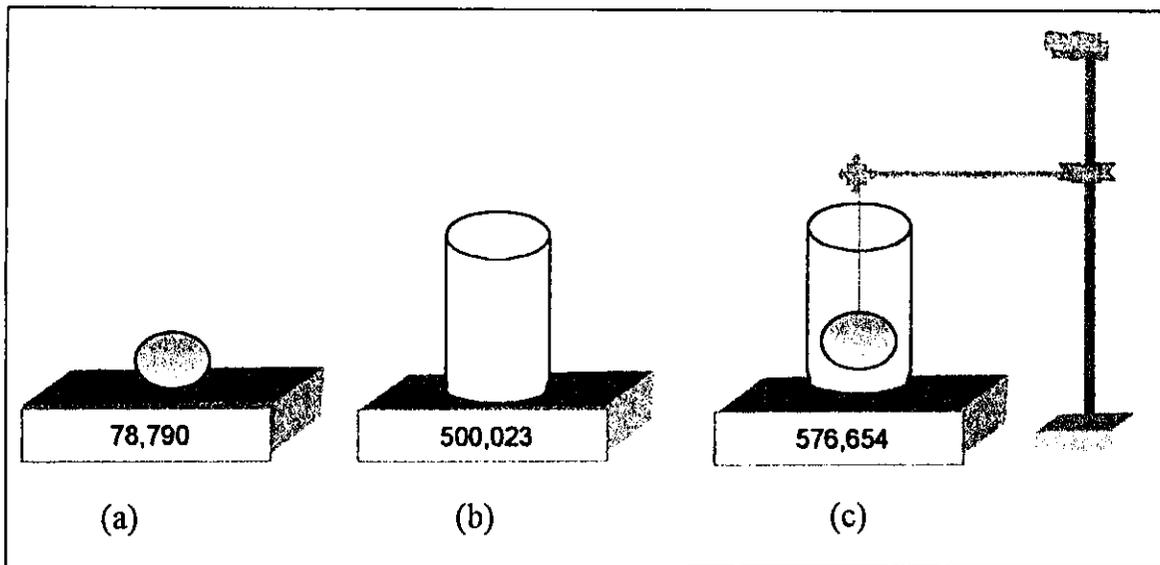


Figura 9- Método do deslocamento de massa de água para o cálculo do volume e da massa específica.

A terceira leitura feita com a fruta submersa menos o peso do recipiente + água é o peso da água deslocada, a qual é usada na equação abaixo para o cálculo do volume.

$$V = \frac{\text{massa de água deslocada}}{\text{massa específica da água}} \quad (26)$$

3.1.4. Massa específica

Utilizando-se as pesagens feitas para determinação do volume, utilizou-se a relação abaixo para obtenção da massa específica, ρ_{fruta} .

$$\rho_{\text{fruta}} = \frac{\text{massa da fruta ao ar (g)}}{\text{volume (cm}^3\text{)}} \quad (27)$$

3.1.5. Esfericidade

A esfericidade (Figura 10) foi determinada a partir da projeção da fruta na posição de repouso e utilizou-se a seguinte fórmula CURRAY (1951):

$$\varphi = \frac{D_i}{D_c} \times 100\% \quad (28)$$

onde,

D_i = Diâmetro da maior circunferência inscrita na projeção do objeto, em posição de repouso.

D_c = Diâmetro da menor circunferência que circunscreve na projeção do objeto do, em posição de repouso.

Um valor de 100% indica que a partícula é esférica.

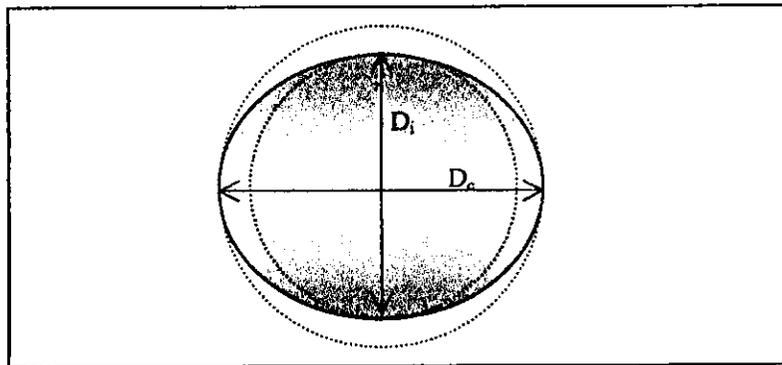


Figura 10 -Esquema de traçados feitos na projeção da fruta para obtenção do grau de esfericidade.

3.2 Velocidade terminal das frutas

3.2.1. Equipamento

Para determinação da velocidade terminal em água das frutas, foi construído um equipamento a partir de um tubo cilíndrico em acrílico transparente, medindo 1,60m de comprimento por 0,25m de diâmetro. Neste cilindro foram feitas marcas espaçadas em 0,10m uma das outras, com exceção feita à primeira marcação, a qual foi feita a 0,15m em relação ao fundo do tubo (Figura 11). A marcação a 0,15m do fundo do cilindro foi feita levando-se em consideração o movimento brusco obtido no início do deslocamento da fruta, quando esta possui velocidade terminal ascendente, em água. Desta forma, estes efeitos seriam minimizados nos 0,15m do movimento inicial da fruta, onde então se começaria a medir a sua velocidade.

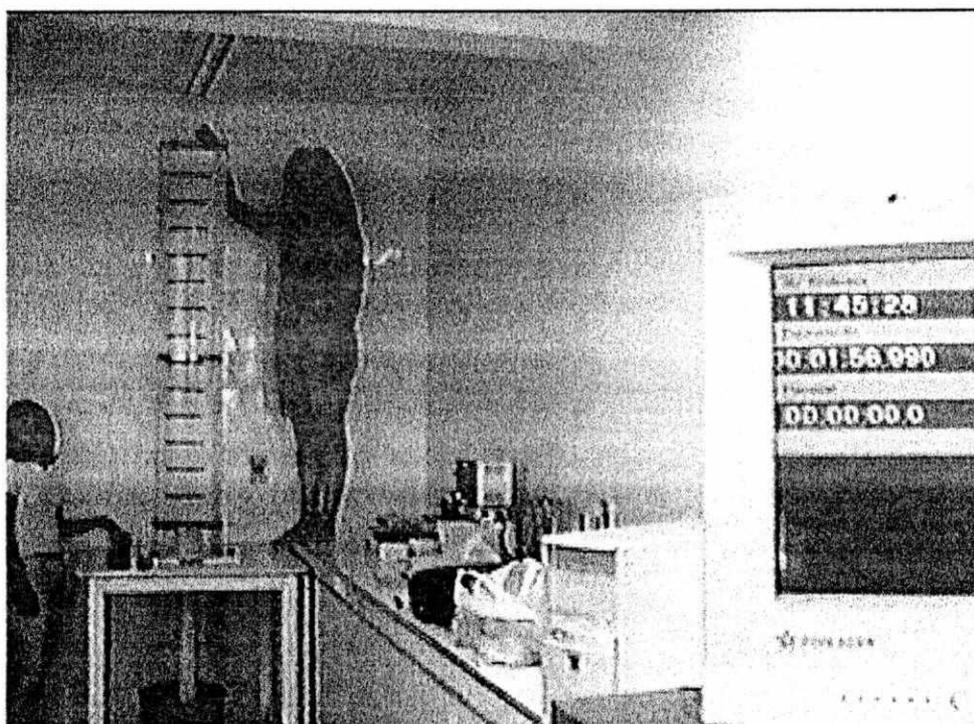


Figura 11- Equipamento usado para determinar a velocidade terminal das frutas.

A Figura 12 representa um desenho esquemático do equipamento, onde é possível verificar alguns detalhes do seu funcionamento. Lateralmente e na parte inferior do cilindro (1), foi colocada uma válvula (2) para controlar a saída das frutas, onde, com um

breve movimento lateral seria suficiente para dar início ao deslocamento ascendente da fruta (3). No fundo do tubo e centralizadamente, foi adaptado, por meio de uma rosca, um tubo em PVC, com o diâmetro aproximado ao da fruta em teste, o qual serviria de depósito para as frutas que iniciam seu movimento por deslocamento ascendente em água (4). O tubo para depósito de frutas possui uma rosca, numa das extremidades, que permite a remoção para reabastecimento (5). Na extremidade oposta é fechado por um "cap", no qual foi adaptada uma torneira para esvaziamento do fluido (6).

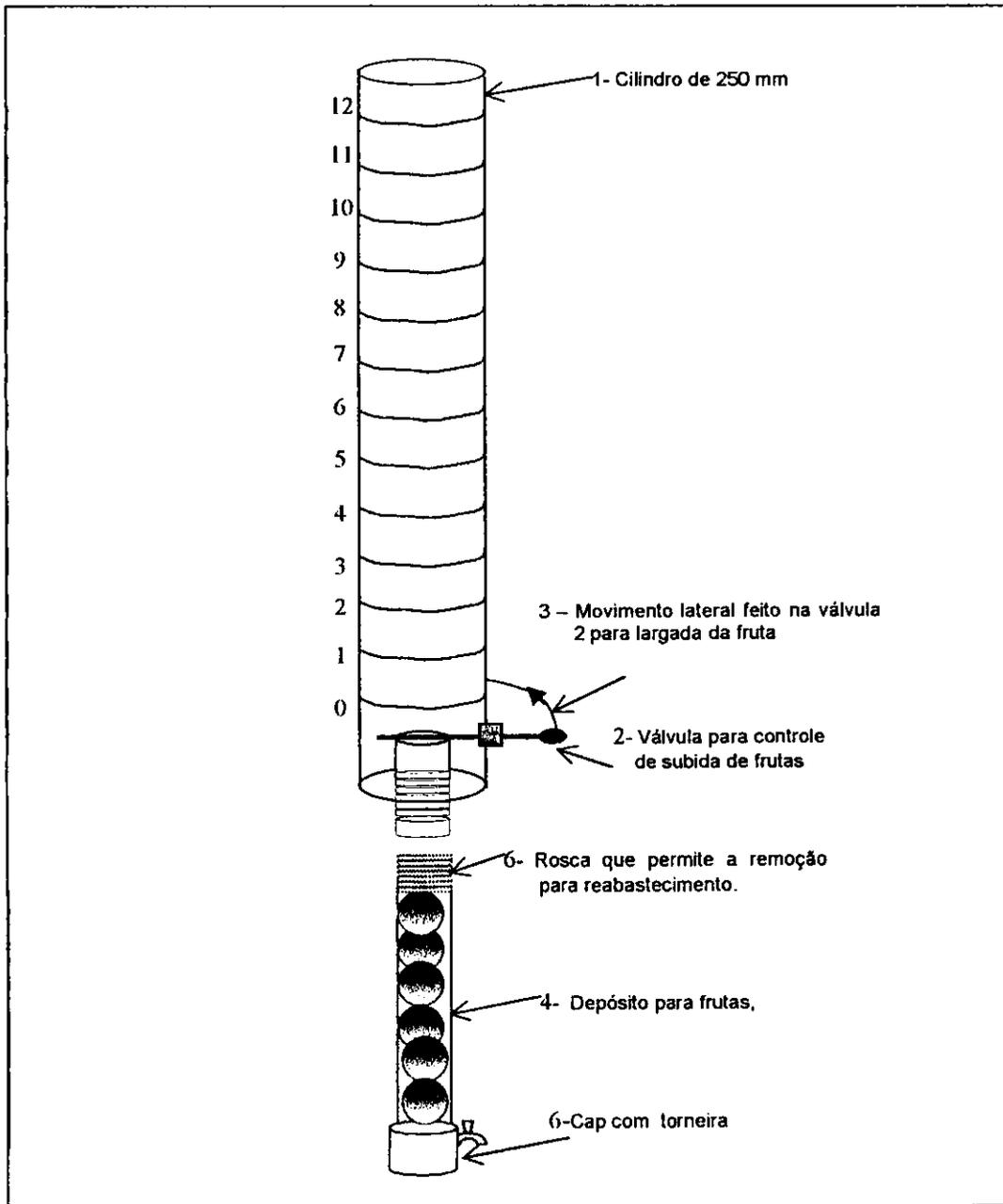


Figura 12 – Detalhes de montagem e funcionamento do equipamento usado para determinar a velocidade terminal de frutas em água.

Foram construídos tubos para depósitos de frutas com diâmetro de 0,100; 0,075; 0,050 e 0,035m. Neste trabalho experimental, foi utilizado apenas o reservatório de 0,075m, uma vez que das frutas estudadas, apenas a maçã apresentou velocidade terminal ascendente e cujo diâmetro está próximo deste valor.

3.2.2. Procedimento experimental

Foram realizados testes de velocidade terminal para 15 unidades de cada fruta, ameixa, maçã, goiaba e umbu. Tendo conhecimento prévio do comportamento dessas frutas em água, iniciou-se o experimento, com as frutas de massa específica maior que a da água (ameixa, goiaba, e umbu) onde o início do deslocamento do fruto se deu do topo até a base do equipamento. Para os frutos com massa específica menor que a da água (maçã) o início do deslocamento do fruto em água se deu da base até o topo do equipamento.

No instante em que as frutas iniciavam seu movimento, seu percurso era acompanhado por uma câmara Panasonic NV – M2200PN(VHS). Usou-se um programa de um cronômetro que, ampliado na tela do monitor, podia-se captar a imagem com boa resolução, através da câmara. Dessa forma o monitor foi colocado num ângulo tal que pudesse ser filmado simultaneamente ao experimento. Um pouco antes de se iniciar o experimento ligava-se o cronômetro, dessa forma, eliminava-se o erro de disparo inicial do cronômetro, pois uma vez que o experimento estava sendo filmado juntamente com o cronômetro, a retirada de dados em cada marco era feita por diferença de leitura, não importando que no ponto zero, a leitura do cronômetro fosse 0:00 segundos.

3.2.3. Coleta de dados

De posse do filme realizado com o experimento, e utilizando os recursos de câmara lenta de um aparelho de vídeo cassete, a coleta dos dados foi realizada da seguinte forma:

À medida que a fruta passava em cada marca do cilindro, a imagem era congelada (Figura 13) e assim era possível ler o tempo registrado no cronômetro mostrado no vídeo do computador. Cada sena congelada, correspondeu a um ponto a ser marcado, na curva de

deslocamento (y) em função de tempo (t), para o cálculo da velocidade terminal, que foi calculada pela inclinação da porção reta da curva, detalhe (a).

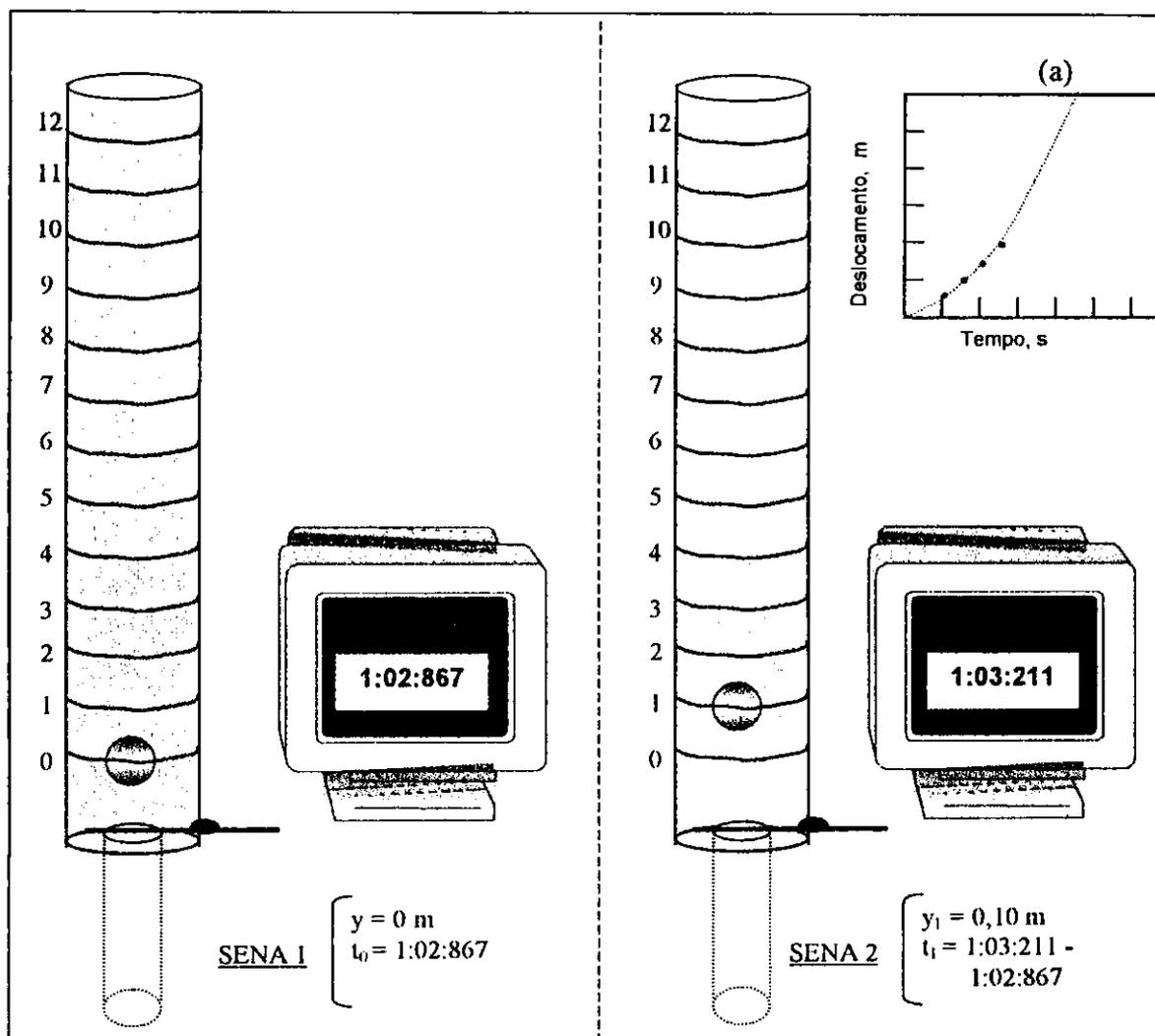


Figura 13 -Exemplo esquemático de senas congeladas para retirada dos dados de tempo, em cada posição da fruta.

3.2.4. Procedimento de cálculo da velocidade terminal teórica

A velocidade de uma partícula em queda livre, em um fluido em estado estacionário, depende do fluido onde está caindo e da aceleração da gravidade. A equação abaixo representa a força que atua numa partícula na direção vertical a qual é determinada pelo somatório da força de arraste em virtude do atrito, do peso e do empuxo.

$$M \frac{dv}{dt} = B - W - f_D \quad (29)$$

onde:

$$v = v_w - v_p$$

B = empuxu

W = peso

F_D = força de atrito

$$F_D = \frac{C_D v_t^2 \rho_f A_p}{2g} \quad (30)$$

em que:

C_D = coeficiente de arraste

V_t = velocidade terminal ($m.s^{-1}$)

ρ_f = massa específica do fluido (

A_p = área projetada

Na equação 29, fazendo $dv/dt = 0$, temos:

$$V_{oi}(\rho_p - \rho_f) = \frac{C_D \rho_f A_p v_t^2}{2g} \quad (31)$$

Nesta condição, supõe-se que a fruta atinge a velocidade terminal.

Considerando-se ainda que as frutas tenham geometria esférica de diâmetro D_p , devido a proximidade de unidade dos valores obtidos para esfericidade, da equação 29 obtém-se:

$$v_t = \left| \frac{4gD_p(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C_D} \right|^{1/2} \quad (32)$$

Através da curva clássica C_D em função do número de Reynolds $N_R = \frac{vD_p\rho}{\mu}$, fornecida por VENNARD (1961), foi obtido o coeficiente de arraste.

A velocidade terminal foi determinada utilizando-se as metodologias abaixo:

Método 1

Este método consiste em determinar a velocidade terminal usando a média dos diâmetros calculados da esfera equivalente e adotando valores para C_D no diagrama C_D em função do número de Reynolds, os cálculos foram feitos utilizando a equação 32 e testando com C_D obtido da curva clássica através do cálculo do número de Reynolds.

Método 2

Com os valores obtidos da esfericidade das frutas, e substituindo na equação 33 desenvolvida por PETTYJOHN E CHRISTIANSEN (1948), foram obtidos o coeficiente de arraste C_D este valor foi substituído na equação 32 e foi determinada uma nova velocidade terminal.

$$C_D = 5,31 - 4,88(\varphi) \quad (33)$$

Método 3

Este método consiste na determinação do coeficiente de arraste (equação 34) utilizando a equação desenvolvida por MASSARANI (1986), a qual é utilizada para todos os regimes de escoamento. Este valor foi substituído na Equação 32 e uma nova velocidade terminal foi determinada

$$C_D = \left[\left(\frac{24}{K_1 N_R} \right)^m + K_2^m \right]^{1/2} \quad (34)$$

onde

K_1 e K_2 são funções da esfericidade desenvolvida por PETTYJOHN e CHRISTIANSEN (1948) e m que também é função de φ , foi ajustado com partículas na faixa de $0,6 \leq \varphi \leq 1$, sendo:

para	$0,6 \leq \varphi \leq 0,9$	tem-se	$m = 0,9$
para	$0,9 \leq \varphi \leq 1,0$	tem-se	$m = 3,15 - 2,5\varphi$

3.3- Análise do efeito de parede

Com as médias dos três diâmetros (comprimento, largura, espessura) medidos de cada fruta determinou-se a relação entre o diâmetro das frutas com o diâmetro do tubo através da relação abaixo:

$$\beta = D_p / D_t \quad (35)$$

Em seguida foi determinado o efeito de parede (k_p) utilizando a equação seguinte:

$$K_p = (1 - \beta^2) / (1 + \beta^4)^{1/2} \quad (36)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características Físicas

Os resultados obtidos experimentalmente da massa, volume, massa específica, esfericidade, diâmetro da esfera equivalente e diâmetro médio da ameixa encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7- Características físicas da ameixa

Fruto n ^o	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS					
	Massa (g)	Volume (cm ³)	Massa específica (g.cm ⁻³)	Esfericidade (%)	Diâmetro da esfera equivalente (mm)	Diâmetro médio (mm)
1	91,40	72,50	1,10	95	54,13	51,96
2	99,60	72,90	1,13	91	55,21	52,19
3	97,50	74,20	1,12	96	54,92	52,43
4	97,50	77,10	1,12	95	55,00	52,99
5	87,00	68,60	1,12	94	52,88	50,97
6	89,90	75,70	1,08	92	54,19	52,62
7	87,20	73,40	1,07	95	53,73	52,05
8	93,30	65,66	1,12	95	54,19	50,40
9	92,50	76,54	1,12	91	54,08	52,77
10	95,70	77,10	1,12	92	54,62	52,91
11	94,90	75,42	1,13	92	54,34	52,58
12	94,50	74,39	1,12	93	54,49	52,32
13	91,30	68,65	1,12	91	53,80	50,98
14	96,30	74,65	1,11	93	54,94	52,61
15	89,80	72,25	1,11	96	53,58	51,93
Média	93,20	73,27	1,12	93,40	54,27	52,11
Desvio padrão	3,78	3,35	0,04	1,84	0,62	0,77

Analisando os dados contidos na Tabela 7 observa-se que a massa da ameixa foi em média igual a 93,20g enquanto que o volume foi em média $73,27\text{cm}^3$, a esfericidade foi em torno 93,40%, quanto a massa específica obteve-se um valor médio igual a $1,12\text{cm.g}^{-3}$ logo superior ao da água portanto velocidade terminal descendente. Verifica-se ainda nesta tabela que os valores do diâmetro da esfera equivalente para todos os frutos da ameixa, foram superiores aos diâmetros médios os quais em média foram iguais a 54,27 e 52,11mm respectivamente.

Na tabela 8 encontram-se os valores obtidos da massa, volume, massa específica, esfericidade, diâmetro da esfera equivalente e diâmetro médio dos frutos da goiaba.

Tabela 8- Características físicas da goiaba.

Fruto n°	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS					
	Massa (g)	Volume (cm^3)	Massa específica (g.cm^{-3})	Esfericidade (%)	Diâmetro da esfera equivalente (mm)	Diâmetro médio (mm)
1	124,80	136,80	1,06	70	60,71	64,50
2	134,40	129,80	1,06	69	62,31	63,59
3	118,80	115,90	1,05	80	59,90	60,64
4	139,10	149,20	1,07	69	62,89	66,51
5	124,10	123,00	1,07	77	60,55	62,02
6	125,00	136,80	1,05	69	60,69	63,23
7	161,30	169,70	1,19	72	66,08	69,56
8	143,20	147,90	1,07	77	63,51	65,93
9	121,30	119,37	1,05	77	60,10	61,42
10	136,40	152,70	1,06	69	62,49	67,24
11	118,50	125,84	1,07	70	59,62	62,80
12	131,50	147,50	1,07	64	61,73	66,11
13	122,10	127,20	1,06	76	60,22	62,71
14	130,90	132,27	1,02	73	61,64	63,92
Média	130,81	136,71	1,07	72,24	61,60	68,90
Desvio padrão	11,68	15,04	0,04	4,55	1,76	2,49

De acordo com os dados da Tabela 8, as massas da goiaba apresentaram um peso médio igual a 130,81g superando o valor obtido por CASTRO e SIGRIST (1988) que foi 67,96g, observou-se também seu volume foi em média igual a 136,71cm³, a massa específica foi em média igual a 1,07g.cm⁻³. CASTRO e SIGRIST (1988) encontraram um valor médio para a goiaba comum, sem citar o estágio de maturação, igual a 0,88g.cm⁻³, verifica-se ainda que houve pequenas variações nos valores da esfericidade e seu valor médio foi igual a 72,24%. Analisando ainda a Tabela 8, verifica-se que os valores dos diâmetros da esfera equivalente foram inferiores aos diâmetro médios ambos com desvios médios padrões inferiores a 2,5% pequenas variações sendo em média iguais a 61,60 e 68,90mm respectivamente. As variações ocorridas nos valores obtidas das massas podem ser atribuídas ao fato de se tratar de fruta formada por várias sementes; pois segundo JÚNIOR *et alii.* (1999) o caráter “menor número de sementes por fruto” pode implicar numa cavidade central preenchida por mais carnosidade, resultando em maior rendimento de polpa. A polpa apresenta uma alta relação com o peso total do fruto é o que afirma SILVA (1987).

Os resultados obtidos experimentalmente da massa, volume, massa específica, esfericidade, diâmetro equivalente e diâmetro médio da maçã encontram-se na Tabela 9.

O volume e massa médios encontrados para maçãs, foram 60,05 e 66,15cm³ respectivamente, a massa específica foi em, média igual, a 0,98g.cm⁻³ portanto a maçã possui velocidade terminal em água, ascendente, a esfericidade média foi igual 93,5%. Verifica-se ainda nesta tabela que os valores do diâmetro da esfera equivalente foram superiores aos diâmetros obtidos da média dos três diâmetros e seus valores médios foram iguais, respectivamente a 50,80 e 48,76mm.

Tabela 9- Características físicas da maçã

Fruto n ^o	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS					
	Massa (g)	Volume (cm ³)	Massa específica (g.cm ⁻³)	Esfericidade (%)	Diâmetro da esfera equivalente (mm)	Diâmetro médio (mm)
1	83,5	70,66	0,93	95	55,48	51,65
2	70,3	66,51	0,94	95	52,17	50,50
3	61,0	53,94	0,95	95	49,61	47,17
4	67,8	61,96	0,97	95	51,07	49,24
5	60,0	59,01	0,98	92	48,87	48,37
6	50,5	47,01	0,96	93	46,55	45,05
7	57,1	57,28	0,93	94	48,95	47,91
8	52,8	48,28	0,98	97	46,81	45,36
9	76,2	64,45	0,95	93	53,51	50,05
10	78,3	64,74	0,96	93	53,80	51,28
11	71,7	65,11	0,96	94	52,26	50,01
12	63,4	62,00	0,95	97	50,27	49,35
13	78,0	70,22	0,95	91	53,99	51,29
14	60,7	50,32	0,99	87	48,95	46,14
15	60,9	57,28	0,95	91	49,71	48,02
Média	66,15	60,05	0,98	93,5	50,80	48,76
Desvio padrão	9,91	7,51	0,02	2,55	2,67	2,14

Na Tabela 10 encontram-se os dados obtidos experimentalmente da massa, volume, massa específica, esfericidade, diâmetro da esfera equivalente e diâmetro médio dos frutos do umbu.

Verifica-se na Tabela 10 que em média a massa obtida para o umbu foi de 14,67g abaixo dos valores obtidos por BISPO (1989) e QUEIROZ (1994) que foi de 16,92g e 20,00g respectivamente. Encontrou-se um volume médio do umbu igual a 12,51cm³, inferior ao valor obtido por BISPO (1989) que foi de 18,21cm³. A massa específica do umbu foi, em média, 1,13g.cm⁻³ valor este superior a massa específica da água, o que

indica uma velocidade terminal em água descendente, destes frutos. BISPO (1989) encontrou um valor médio igual a $0,92\text{g.cm}^{-3}$, em estágio semi-maduro. A esfericidade média do umbu obtida neste trabalho foi igual a 84,3%. Quanto aos diâmetros da esfera equivalente não foi possível definir uma tendência, pois ora superavam os diâmetros médios, ora eram inferiores, e seus valores médios foram respectivamente de 27,20 e 28,78mm porém com pequenas variações. GOMES (1965), atribui estas variações nos dados, obtido do umbu, pelo fato de existir diversas variedades do umbuzeiro, não foram objeto de estudo deste trabalho.

Tabela 10- Características físicas do umbu

Fruto nº	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS					
	Massa (g)	Volume (cm ³)	Massa específica (g.cm ⁻³)	Esfericidade (%)	Diâmetro da esfera equivalente (mm)	Diâmetro médio (mm)
1	15,9	13,24	1,14	95	29,87	29,37
2	16,3	16,65	1,14	85	30,13	31,73
3	12,0	10,53	1,13	81	27,24	27,24
4	11,6	9,75	1,13	85	26,91	26,55
5	13,2	11,30	1,12	85	28,17	27,89
6	13,1	9,53	1,16	79	27,87	26,52
7	17,8	16,02	1,11	81	31,27	31,44
8	16,2	14,36	1,13	90	30,07	30,21
9	12,8	11,60	1,13	92	27,87	28,13
10	15,9	14,35	1,11	91	30,14	29,53
11	19,9	11,89	1,12	80	32,39	28,95
12	13,8	11,85	1,12	83	28,61	28,37
13	11,2	10,20	1,13	76	26,66	27,07
14	13,1	12,02	1,14	81	28,02	28,46
15	17,3	14,42	1,10	80	30,72	30,27
Média	14,67	12,51	1,13	84,3	27,20	28,78
Desvio padrão	2,56	2,23	0,01	5,48	1,72	1,64

4.2. Velocidade Terminal

4.2.1. Velocidade terminal experimental

Nas figuras de 14 a 17 encontram-se representada graficamente, os pontos experimentais obtidos dos ensaios de velocidade terminal e ajuste mediante equação de regressão linear do tipo $Y = aX$ para a ameixa (Figura 14), goiaba (Figura 15), maçã (Figura 16) e umbu (Figura 17). Por regressão linear da parte reta da curva deslocamento x tempo de cada fruta, determinou-se a velocidade terminal, onde a mesma é obtida pela inclinação da curva.

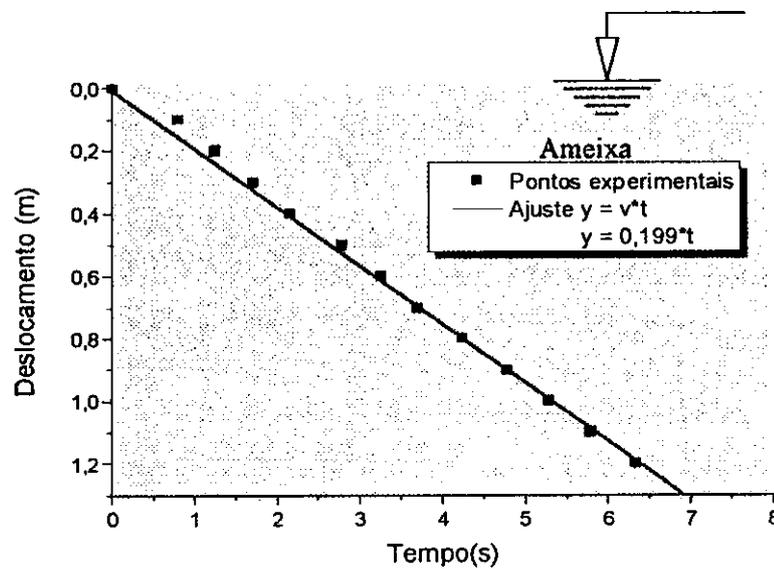


Figura 14- Curva deslocamento em função do tempo e ajuste linear para o cálculo da velocidade terminal de ameixa em água

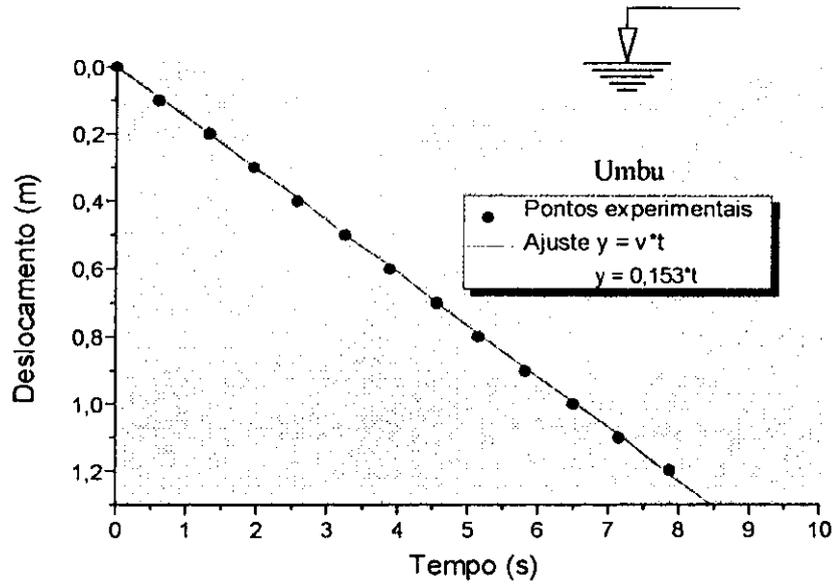


Figura 15- Curva deslocamento em função do tempo e ajuste linear para o cálculo da velocidade terminal de umbu em água

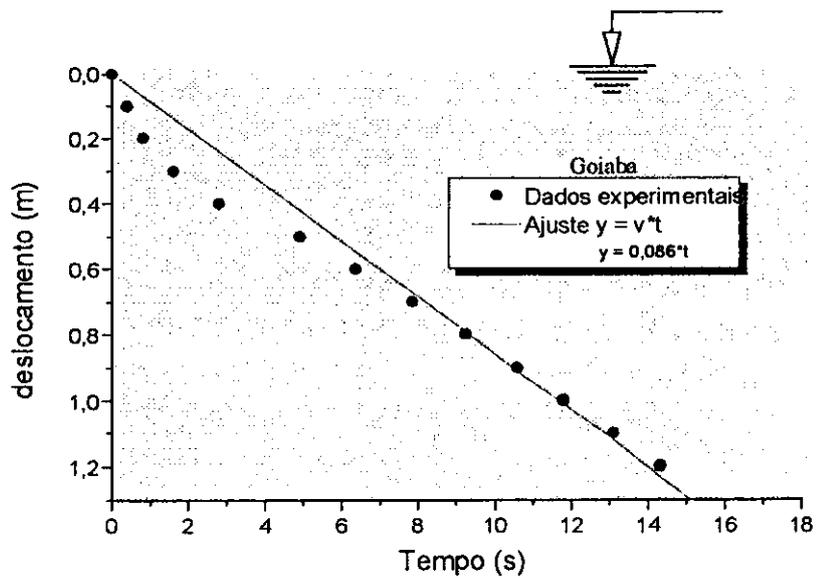


Figura 16- Curva deslocamento em função do tempo e ajuste linear para o cálculo da velocidade terminal de goiaba em água

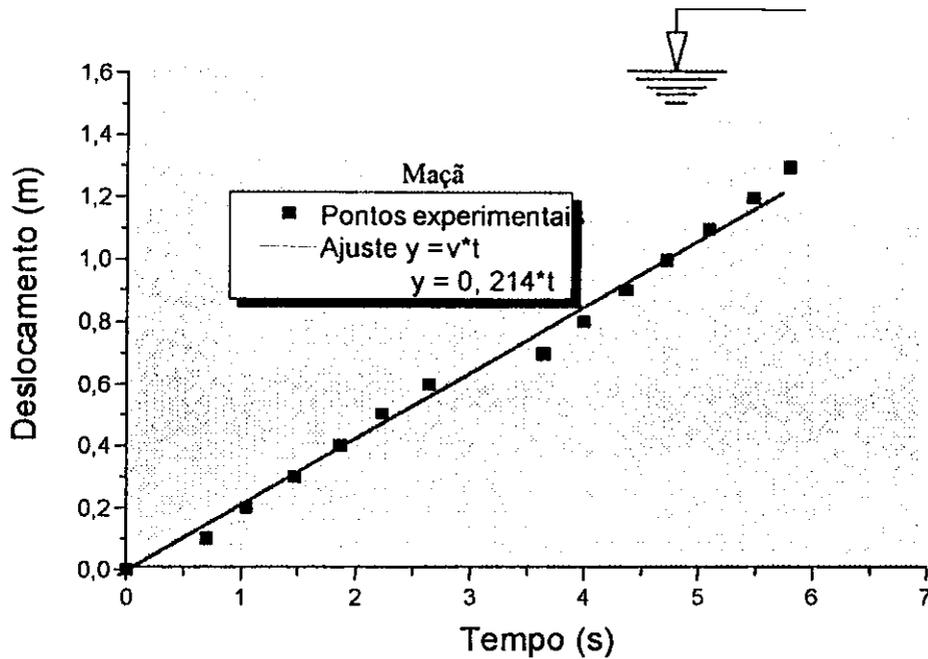


Figura 17- Curva deslocamento em função do tempo e ajuste linear para o cálculo da velocidade terminal de maçã em água

4.2.2. Velocidade terminal calculada

Nas Tabelas de 11 a 14 encontram-se os resultados obtidos da velocidade terminal calculada, velocidade terminal experimental, coeficiente de arraste e número de Reynolds para ameixa, goiaba, maçã e umbu.

Analisando os dados contidos na Tabela 11 verifica-se que após corrigido o coeficiente de arraste, método 2, utilizando a expressão dada por Pettyjohn e Christiansen para ameixa, seus valores foram superiores aos obtidos ao considerar a fruta como sendo esférica, método 1, porém inferiores aos obtidos pela equação de MASSARANI (1986), método 3, respectivamente seus valores médios foram 0,77; 0,44; e 0,90; quanto ao coeficiente de arraste experimental ($C_{Dexp.}$) obtido com a velocidade terminal experimental pode-se observar que seus valores apresentaram variações, ora superavam os demais coeficientes de arraste ora eram inferiores sendo seu valor médio igual a 0,84. Os números

de Reynolds para a ameixa, em queda livre, em um cilindro contendo água, encontram-se na faixa de 5.476 a 18.096 e em média seu valor foi igual a 14.766. Quanto a velocidade terminal utilizando o método 2 (v_{t2}) seus valores foram inferiores aos obtidos ao considerar a ameixa uma esfera (v_{t1}) porém pouco superior as velocidades obtidas utilizando o método 3 (v_{t3}) cujos valores médios foram iguais respectivamente a 0,19; 0,25 e 0,17m.s⁻¹. Ainda nesta tabela verifica-se que as velocidades que mais se aproximaram das velocidades experimentais ($v_{texp.}$) foram as obtidas utilizando o método 2 (v_{t2}) que em termo médio foi igual a 0,19m.s⁻¹ este fato pode ser constatado na Figura (18).

Tabela 11- Velocidade terminal calculada e experimental (m.s⁻¹) da ameixa

Fruto, N°	C_{D1} (método 1)	C_{D2} (método 2)	C_{D3} (método 3)	C_{Dexp} (Experimental)	N_R	v_{t1}	v_{t2}	v_{t3}	$v_{texp.}$
1	0,44	1,89	0,86	0,53	12.844	0,22	0,10	0,16	0,20
2	0,44	0,87	0,94	1,05	18.096	0,31	0,22	0,16	0,20
3	0,44	0,62	0,85	1,34	17.198	0,29	0,24	0,20	0,16
4	0,44	0,67	0,86	1,08	16.413	0,28	0,22	0,20	0,18
5	0,44	0,72	0,88	0,84	16.269	0,29	0,22	0,20	0,20
6	0,44	0,82	0,92	0,27	7.415	0,13	0,09	0,09	0,17
7	0,44	0,67	0,87	0,04	5.476	0,09	0,08	0,04	0,19
8	0,44	0,67	0,86	1,34	16.123	0,28	0,23	0,20	0,16
9	0,44	0,87	0,94	0,95	15.651	0,27	0,19	0,19	0,19
10	0,44	0,82	0,92	0,88	16.889	0,29	0,21	0,19	0,20
11	0,44	0,82	0,92	1,03	17.462	0,30	0,22	0,21	0,20
12	0,44	0,77	0,90	0,86	15.490	0,27	0,20	0,20	0,20
13	0,44	0,87	0,94	0,86	16.123	0,28	0,19	0,19	0,20
14	0,44	0,77	0,90	0,71	14.716	0,25	0,19	0,18	0,20
15	0,44	0,62	0,85	0,76	15.328	0,27	0,22	0,18	0,19
média	0,44	0,77	0,90	0,84	14.766	0,25	0,19	0,17	0,19
Desvio padrão	0,0	30,62	3,43	35,21	36,16	6,28	5,29	5,05	1,48

$$\rho_{1120} = 1,068 \text{g.cm}^{-3}$$

$C_{Dexp.}$ - coeficiente de arraste obtido através da velocidade terminal experimental

v_{t1} - velocidade terminal obtida com o coeficiente de arraste considerando a fruta esférica (método 1)

v_{t2} - velocidade terminal obtida com o coeficiente de arraste corrigido segundo Pettyjohn e Christiansen (método 2)

v_{t3} - velocidade terminal com o coeficiente de arraste calculado pela equação de Massarani (método 3)

$v_{texp.}$ - velocidade terminal experimental

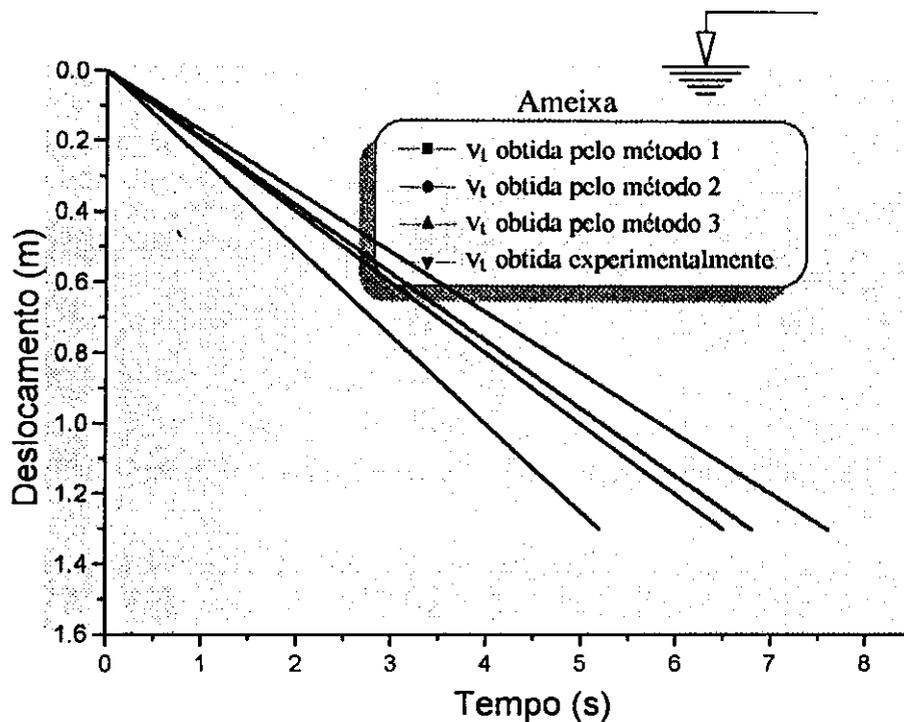


Figura 18- Curva deslocamento em função do tempo para o cálculo da velocidade terminal da amêixa por quatro diferentes métodos

Analisando-se os dados da Tabela 12, observa-se que os valores do coeficiente de arraste obtido para a goiaba após a correção de sua esfericidade (C_{D2}) apresentaram pequenas variações entre seus valores, tendo em média um valor igual a 1,77, porém superiores aos obtidos utilizando o método 3 ($C_{D3}=1,3$). Nessa tabela verifica-se que os valores do coeficiente de arraste experimental foram de uma forma geral inferiores aos obtidos pelos outros 3 métodos embora a média seja 2 vezes superior a média obtida para o coeficiente de arraste pelo método 2 e 3 e de 8 vezes quando comparada com o coeficiente de arraste obtido pelo método 1.

Tabela 12 - Velocidade terminal calculada e experimental ($m.s^{-1}$) da goiaba

Fruto Nº	C_{D1} (método 1)	C_{D2} (método 2)	C_{D3} (método 3)	C_{Dexp}	N_R	v_{t1}	v_{t2}	v_{t3}	v_{texp}
1	0,44	1,89	1,34	0,18	3.769	0,06	0,03	0,03	0,09
2	0,44	1,94	1,35	0,59	7.838	0,12	0,06	0,07	0,10
3	0,44	1,41	1,17	-	7.388	0,12	0,06	0,07	-
4	0,44	1,94	1,35	0,23	3.974	0,06	0,03	0,03	0,08
5	0,44	1,55	1,23	0,30	3.754	0,06	0,03	0,03	0,07
6	0,44	1,94	1,35	-	11.302	0,17	0,08	0,10	-
7	0,44	1,80	1,30	-	33.429	0,47	0,23	0,28	-
8	0,44	1,55	1,22	-	4.033	0,06	0,03	0,03	-
9	0,44	1,55	1,22	5,29	11.137	0,17	0,09	0,10	0,05
10	0,44	1,94	1,35	0,73	7.872	0,12	0,06	0,07	0,09
11	0,44	1,89	1,34	0,10	3.668	0,06	0,03	0,03	0,12
12	0,44	2,19	1,43	0,15	3.864	0,06	0,03	0,03	0,10
13	0,44	1,60	1,24	2,35	7.447	0,12	0,06	0,07	0,05
14	0,44	1,65	1,25	-	18.893	0,29	0,15	0,17	-
Média	0,44	1,77	1,30	1,10	9.169	0,14	0,07	0,08	0,08
Desvio padrão	0,0	22,18	7,36	1,72	81,87	11,54	5,72	7,03	2,30

$$\rho_{H_2O} = 1,068g.cm^{-3}$$

C_{Dexp} - coeficiente de arraste obtido através da velocidade terminal experimental

v_{t1} - velocidade terminal obtida com o coeficiente de arraste considerando a fruta esférica (método 1)

v_{t2} - velocidade terminal obtida com o coeficiente de arraste corrigido segundo Pettyjohn e Christiansen (método 2)

v_{t3} - velocidade terminal com o coeficiente de arraste calculado pela equação de Massarani (método 3)

v_{texp} - velocidade terminal experimental

Verifica-se também nesta tabela que o número de Reynolds, encontra-se na faixa de 3.754 a 33.429. Podendo-se observar ainda que os valores das velocidades terminais obtidos pelo método 2 (v_{t2}), que em média foi igual a $0,07m.s^{-1}$, estão próximos aos valores calculados utilizando-se o método 3 (v_{t3}) que, em média foi igual a $0,08m.s^{-1}$.

Constata-se ainda nesta tabela e na figura 19 que a velocidade terminal que mais se aproximou da velocidade terminal experimental foi a calculada pelo método 2 isto pode ser

Na Figura (16), observa-se que a goiaba apresenta uma velocidade maior, no início do percurso e depois diminui até atingir uma velocidade constante. Este fato pode ser explicado pelo fato de se largar a fruta, do topo, no ar, ou seja, existe uma influência da força de largada que por pequena que seja, exerce uma alteração inicial na velocidade, uma vez que a massa específica da água de boqueirão usada no experimento, ($1,068\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

Alguns comportamentos, não esperados foram observados durante o experimento de velocidade terminal para goiabas. Observou-se que das 14 frutas selecionadas para o teste, quatro delas apresentaram velocidades ascendentes, em água, o que foi atribuído ao fator maturidade, ou seja, quanto mais madura a goiaba, menos densa ela será. Este fato é explicado devido à formação de uma camada de ar entre a polpa e as sementes, que se torna maior a medida que os frutos da goiaba amadurecem. Uma outra observação feita, durante o experimento foi que, ao aliviar-se a pressão exercida pela coluna d'água sobre a goiaba, ou seja, ao se esvaziar o tubo, esta iniciou um movimento de subida quando esta coluna atingiu 10cm de profundidade, conforme esquema abaixo, Figura 20.

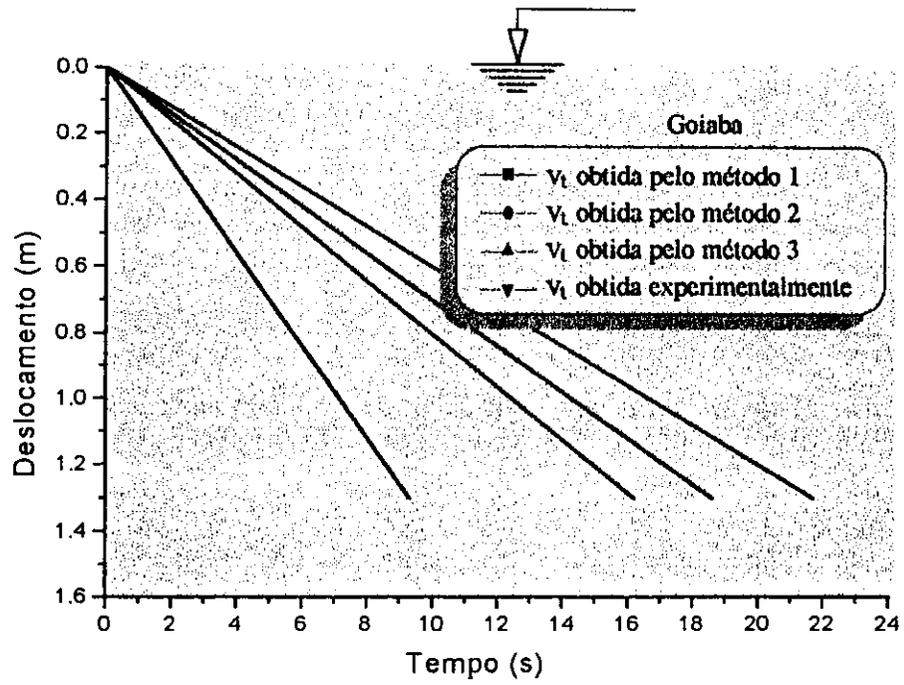


Figura 19- Curva deslocamento em função do tempo para o cálculo da velocidade terminal da goiaba por quatro diferentes métodos

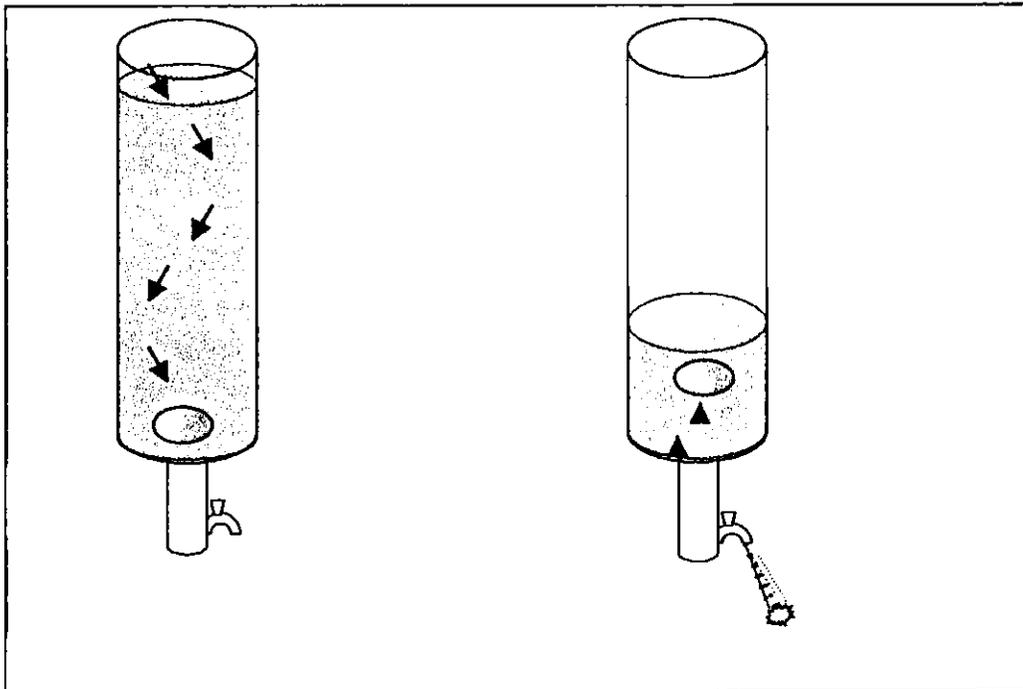


Figura 20 - Comportamento verificado, em goiabas, ao final do experimento de velocidade terminal

Na tabela 13, pode-se verificar que nos valores de coeficiente de arraste corrigidos pelo método 2 ($C_{D,corrig.}$), obtidos para maçãs, as variações desse coeficiente de arraste esta entre 0,58 a 1,06 com uma média igual a 0,75 e um pouco inferior a média obtida pelo o método 3 ($C_{D3}=0,89$); sendo ambos inferiores aos coeficientes de arraste obtidos experimentalmente que em termo médio foi igual a 1,68. Na mesma tabela constata-se também que o número de Reynolds encontra-se na faixa de 20.161 a 25.882. Quanto aos valores das velocidades terminais, verifica-se que os valores obtidos com a correção do coeficiente de arraste pelo método 2 (v_{t2}), são em média iguais a $0,31\text{m.s}^{-1}$, valor este superior ao obtido pelo método 3 ($v_{t3}=0,28\text{m.s}^{-1}$), como também ao obtido com o valor da velocidade terminal experimental ($v_{t,exp.}=0,23\text{m.s}^{-1}$), pode-se verificar que o valor médio da velocidade terminal utilizando o método 2 se aproximou do valor obtido com o método 3 e este, por sua vez, se aproximou do valor obtido experimentalmente, este fato pode-se ser verificado melhor pela Figura (21). Este resultado concorda com os valores obtidos por MATHEWS et alli (1965) e DEWEY (1966) os quais obtiveram para duas variedades de maçã, resultados experimentais de velocidade terminais bem inferiores aos valores obtidos teóricos. Eles atribuíram esta diferença ao efeito de parede (relação $D_p/D_t=0,2$) e ainda enfatizam que devido à pequena profundidade do recipiente, suas frutas possivelmente não tenham alcançado a velocidade terminal. Fato semelhante foi, observado neste experimento. Na Figura 17, percebe-se claramente que houve o mesmo efeito, ou seja, a fruta inicia-se com uma velocidade e tende a se estabilizar quando toca a parede do tubo, perde um pouco a velocidade e inicia todo o processo, ou seja, de atingir a velocidade de máxima (velocidade terminal), indicando com isto ocorreria continuamente, se o tubo possuísse altura infinita.

Tabela 13- Velocidade terminal calculada e experimental (m.s^{-1}) da maçã.

Fruto Nº	C_{D1} (método 1)	C_{D2} (método 2)	C_{D3} (método 3)	C_{Dexp} (experimental 1)	N_R	v_{t1}	v_{t2}	v_{t3}	v_{texp}
1	0,44	0,67	0,86	2,11	25.882	0,45	0,36	0,33	0,21
2	0,44	0,67	0,86	1,68	25.385	0,43	0,35	0,31	0,22
3	0,44	0,67	0,86	1,64	24.431	0,42	0,34	0,29	0,21
4	0,44	0,68	0,86	1,16	22.401	0,38	0,31	0,27	0,23
5	0,44	0,82	0,92	1,20	20.161	0,36	0,26	0,24	0,21
6	0,44	0,77	0,90	1,38	23.662	0,41	0,31	0,26	0,21
7	0,44	0,72	0,88	1,33	26.360	0,46	0,36	0,31	0,25
8	0,44	0,58	0,82	0,60	20.614	0,36	0,31	0,25	0,29
9	0,44	0,77	0,90	7,66	24.288	0,42	0,32	0,29	0,10
10	0,44	0,77	0,90	1,24	23.773	0,40	0,31	0,28	0,24
11	0,44	0,72	0,88	0,82	23.236	0,40	0,31	0,28	0,29
12	0,44	0,58	0,82	1,37	23.977	0,42	0,36	0,30	0,23
13	0,44	0,87	0,94	1,07	24.594	0,43	0,30	0,29	0,27
14	0,44	1,06	1,03	0,88	20.556	0,35	0,22	0,21	0,23
15	0,44	0,87	0,94	1,07	24.594	0,43	0,30	0,28	0,26
Média	0,44	0,75	0,89	1,68	23.594	0,41	0,31	0,28	0,23
Desvio padrão	0,0	12,38	5,30	1,69	19,06	3,30	3,83	3,03	4,53

$$\rho_{120} = 1,068 \text{g.cm}^{-3}$$

C_{Dexp} - coeficiente de arraste obtido através da velocidade terminal experimental

v_{t1} - velocidade terminal obtida com o coeficiente de arraste considerando a fruta esférica (método 1)

v_{t2} - velocidade terminal obtida com o coeficiente de arraste corrigido segundo Pettyjohn e Christiansen (método 2)

v_{t3} - velocidade terminal com o coeficiente de arraste calculado pela equação de Massarani (método 3)

v_{texp} - velocidade terminal experimental

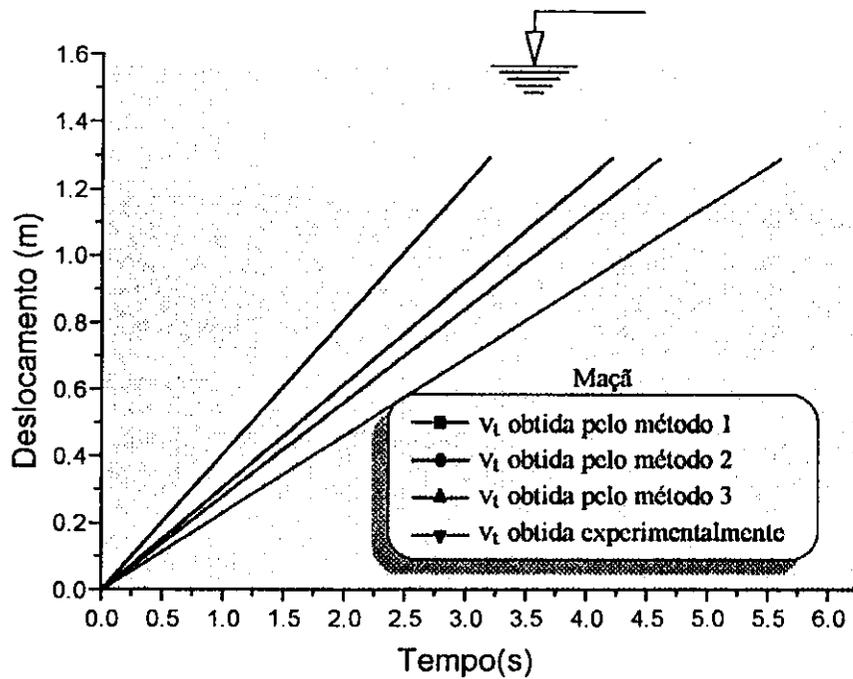


Figura 21- Curva deslocamento em função do tempo para o cálculo da velocidade terminal da maçã por quatro diferentes métodos.

Observou-se durante o experimento que a maçã apresentou comportamento semelhante ao da ameixa subia rapidamente e com movimento rotacional durante todo o trajeto. Segundo estudo feito por Tietjens citado por BRAGA (1997) as forças devido ao movimento rotacional de uma esfera em um fluido, em muitos casos, é maior do que a força de arraste causada pelo movimento de descida, este estudo vai de encontro ao trabalho desenvolvido por TENNES e STOUT (1968) onde eles encontraram para a cereja uma velocidade terminal teórica maior que duas vezes a velocidade terminal. Com a correção da esfericidade a velocidade terminal teórica ainda se apresentou superior a velocidade experimental. Os autores atribuíram esta diferença a força causada pelo movimento rotacional da fruta durante a sua descida.

Analisando os dados contidos na Tabela 14 pode-se verificar que os valores obtidos do coeficiente de arraste corrigidos pelo método 2 para os frutos do umbu (C_{D2}) foram superiores aos obtidos utilizando o método 3 (C_{D3}) e este superior ao coeficiente de

arraste obtido experimentalmente ($C_{Dexp.}$), os quais em termos médios foram iguais respectivamente a 1,20; 1,11 e 0,91 e todos apresentaram variações. Ainda nesta tabela, constata-se que utilizando o método 2 (v_{t2}), os valores das velocidades terminais do umbu se aproximaram dos valores obtidos pelo método 3 (v_{t3}), tendo valores médios iguais a 0,13 e 0,14 $m.s^{-1}$ respectivamente e estão próximos ao valor obtido experimentalmente que foi 0,15 $m.s^{-1}$. Este fato pode ser melhor visualizado na Figura (22).

Tabela-14 Velocidade terminal calculada e experimental ($m.s^{-1}$) do umbu

Fruto N°	C_{D1} (método 1)	C_{D2} (método 2)	C_{D3} (método 3)	$C_{Dexp.}$	N_R	v_{t1}	v_{t2}	v_{t3}	$v_{exp.}$
1	0,44	0,67	0,86	0,82	7.856	0,24	0,20	0,17	0,18
2	0,44	1,16	1,08	0,92	7.856	0,24	0,15	0,16	0,17
3	0,44	1,36	1,19	0,80	6.224	0,22	0,12	0,13	0,16
4	0,44	1,16	1,08	1,05	6.224	0,22	0,13	0,14	0,14
5	0,44	1,16	1,08	0,79	6.020	0,20	0,12	0,13	0,15
6	0,44	1,45	1,25	1,40	8.007	0,27	0,13	0,16	0,15
7	0,44	1,36	1,19	0,94	6.302	0,19	0,11	0,12	0,13
8	0,44	0,92	0,97	0,79	7.290	0,23	0,16	0,15	0,17
9	0,44	0,82	0,92	0,74	6.573	0,22	0,16	0,15	0,17
10	0,44	0,87	0,94	0,69	6.000	0,19	0,13	0,13	0,15
11	0,44	1,41	1,22	1,21	7.355	0,21	0,12	0,13	0,13
12	0,44	1,26	1,13	0,72	6.345	0,20	0,12	0,13	0,16
13	0,44	1,60	1,34	1,42	6.224	0,22	0,11	0,12	0,12
14	0,44	1,36	1,19	0,96	7.083	0,24	0,13	0,14	0,16
15	0,44	1,41	1,22	0,37	5.501	0,16	0,09	0,10	0,18
Média	0,44	1,20	1,11	0,91	6.637	0,22	0,13	0,14	0,15
Desvio padrão	0,0	26,83	13,78	27,61	7,86	2,66	2,65	1,83	1,84

$$\rho_{H_2O} = 1,068g.cm^{-3}$$

$C_{Dexp.}$ - coeficiente de arraste obtido através da velocidade terminal experimental

v_{t1} - velocidade terminal obtida com o coeficiente de arraste considerando a fruta esférica (método 1)

v_{t2} - velocidade terminal obtida com o coeficiente de arraste corrigido segundo Pettyjohn e Christiansen (método 2)

v_{t3} - velocidade terminal com o coeficiente de arraste calculado pela equação de Massarani (método 3)

$v_{texp.}$ - velocidade terminal experimental

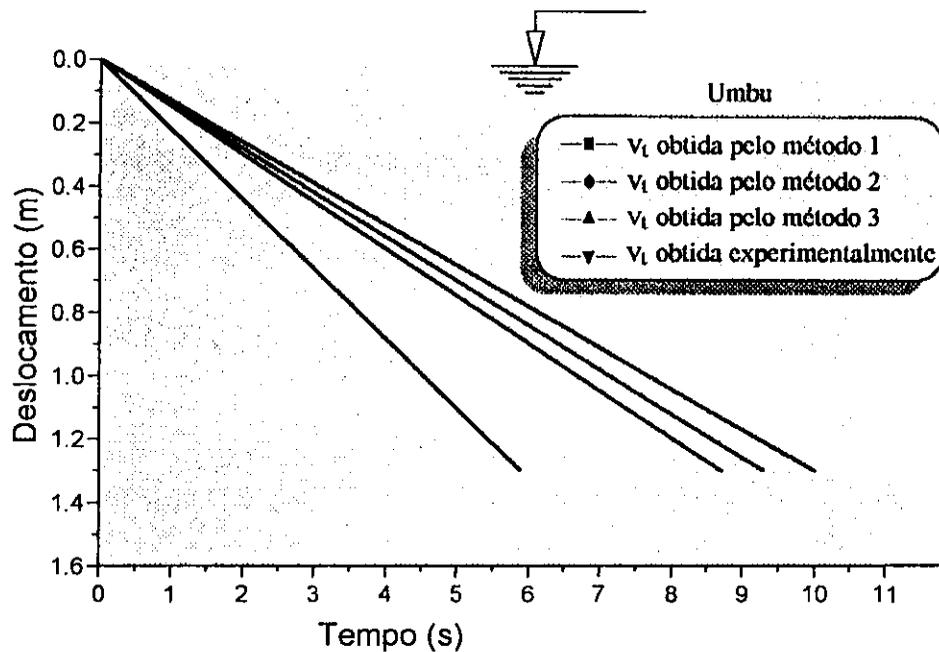


Figura 22- Curva deslocamento em função do tempo para o cálculo da velocidade terminal do umbu por quatro diferentes métodos

Esta aproximação que ocorreu entre os valores médios obtidos entre o método 2 e o método 3, com todos os frutos das espécies analisadas, revela que outros parâmetros além da esfericidade pode ter afetado no coeficiente de arraste e conseqüentemente na velocidade terminal. Este fato nos leva a supor que o efeito de parede pode ter causado um retardamento na velocidade terminal das frutas. Esta suposição encontra apoio no trabalho desenvolvido por BRAGA (1997), quando foi determinada a velocidade terminal da laranja e de um protótipo esférico de mesmo volume da laranja utilizando uma metodologia similar e a autora concluiu que a velocidade terminal do protótipo foi igual à velocidade da laranja quando feita a correção da esfericidade, mas ainda inferior ao valor teórico.

4.3. Análise do efeito de parede

Nas Tabelas de 15 a 18 encontram-se os valores que indicam a existência, ou não de efeito de parede na descida de ameixa, goiaba e umbu; e na subida de maçãs em um tubo de água de 25cm de diâmetro.

Analisando-se os valores mostrados na Tabela 15 pode-se observar que relação entre o diâmetro médio da ameixa e o diâmetro do tubo foi em média de 0,22 e que o critério K_p foi de 0,95, valor este que indica que a ameixa sofreu pequena influência devido à parede do tubo. De fato, durante o experimento observou-se que os frutos se desviavam do centro do tubo, chegando a se chocar contra a parede no máximo duas vezes.

Observando-se os dados da Tabela 16 verifica-se que a relação entre o diâmetro da goiaba e o diâmetro do tubo variou de 0,24 a 0,26 e que o critério K_p encontra-se no intervalo de 0,93 a 0,94 valores este que indicam efeitos da parede do tubo durante a descida da goiaba. Este resultado era esperado visto que durante a realização do experimento as goiabas se desviavam bastante do centro do tubo chegando a se chocar contra a parede do tubo no mínimo três vezes. Um outro fator que pode ter influenciado tal comportamento é a forma da goiaba.

Nos dados contidos na Tabela 17 pode-se constatar que a relação entre o diâmetro maçã e o diâmetro do tubo encontram-se no intervalo de 0,19 a 0,22 e que o efeito de parede foi em média 0,96 indicando que a parede do tubo causou pequena influência na subida dos frutos; assim como ocorreu com ameixas, a maçã durante seu trajeto se desviava pouco do centro do tubo, chegando a se chocar na parede do tubo no máximo duas vezes. Apesar da maçã apresentar tamanho próximo ao da goiaba, a sua forma mais esférica faz com que sua subida apresente-se mais uniforme.

Dos dados contidos na Tabela 18 pode-se constatar que a relação entre o diâmetro médio do umbu e o diâmetro do tubo variou de 0,10 a 0,13 e que o critério K_p foi em média 0,99 o que indica que os frutos não sofreram influência devido à presença de parede do tubo. Este fato vem confirmar as afirmações de MASSARANI (1990) que afirma que a

partir de $\beta = 0,2$ dentro do critério $k_p \geq 0,99$ o efeito de parede tende a anular-se. De fato foi observado que neste experimento os umbus seguiram seu curso sem desvios e desceram todo tempo pelo centro do tubo.

Das espécies estudadas verificou-se que as que sofreram mais com o efeito de parede foi a goiaba seguida da maçã, ameixa e umbu. Este resultado concorda com o estudo realizado por BRAGA (1997) onde a pesquisadora utilizou a mesma metodologia deste trabalho e verificou o efeito de parede de esferas as quais tinham diâmetros próximos aos diâmetros dos frutos deste trabalho ou seja: 50,0; 42,0 e 37,0mm. A autora concluiu que as esferas de 50mm golpearam no máximo 3 vezes contra a parede, as de 42mm chocaram-se uma ou nenhuma vez contra a parede, mais sempre apresentavam desvio em seu percurso. Apenas o modelo de 37mm seguiu seu curso sem desvios e subiu todo o tempo pelo centro do tubo.

Tabela 15- Efeito de parede na descida da ameixa, ao longo do eixo de um tubo de diâmetro $D_T = 250$ mm

Fruto N ^o	$\beta = D_p/D_t$	$K_p = v_1/v_\infty$
		$K_p = (1 - \beta^2)/(1 + \beta^4)^{1/2}$
1	0,22	0,95
2	0,22	0,95
3	0,22	0,95
4	0,22	0,95
5	0,21	0,95
6	0,22	0,95
7	0,21	0,95
8	0,22	0,95
9	0,22	0,95
10	0,22	0,95
11	0,22	0,95
12	0,21	0,95
13	0,21	0,95
14	0,22	0,95
15	0,21	0,95

D_p - Diâmetro do produto

D_t - Diâmetro do tubo

Tabela 16- Efeito de parede na descida da goiaba, ao longo do eixo de um tubo de diâmetro $D_T = 250$ mm

Fruto N°	$\beta = D_p/D_t$	$K_p = v_i/v_\infty$ $K_p = (1 - \beta^2)/(1 + \beta^4)^{1/2}$
1	0,24	0,94
2	0,25	0,94
3	0,24	0,94
4	0,25	0,93
5	0,24	0,94
6	0,24	0,94
7	0,26	0,93
8	0,25	0,93
9	0,24	0,94
10	0,25	0,94
11	0,24	0,94
12	0,25	0,94
13	0,24	0,94
14	0,25	0,94

D_p - Diâmetro do produto
 D_t - Diâmetro do tubo

Tabela 17- Efeito de parede na subida da maçã, ao longo do eixo de um tubo de diâmetro $D_T = 250$ mm

Fruto N°	$\beta = D_p/D_t$	$K_p = v_i/v_\infty$ $K_p = (1 - \beta^2)/(1 + \beta^4)^{1/2}$
1	0,22	0,95
2	0,21	0,96
3	0,20	0,96
4	0,20	0,96
5	0,19	0,96
6	0,19	0,96
7	0,20	0,96
8	0,19	0,96
9	0,21	0,95
10	0,21	0,95
11	0,21	0,95
12	0,20	0,96
13	0,22	0,95
14	0,20	0,96
15	0,20	0,96

D_p - Diâmetro do produto
 D_t - Diâmetro do tubo

Tabela 18 - Efeito de parede na subida do umbu, ao longo do eixo de um tubo de diâmetro $D_T = 250$ mm

Fruto N°	$\beta = D_p/D_T$	$K_p = V_t/V_{\infty}$
		$K_p = (1 - \beta^2) / (1 + \beta^4)^{1/2}$
1	0,12	0,99
2	0,12	0,98
3	0,11	0,99
4	0,11	0,99
5	0,11	0,99
6	0,11	0,99
7	0,12	0,98
8	0,12	0,98
9	0,11	0,99
10	0,12	0,98
11	0,13	0,98
12	0,11	0,99
13	0,11	0,99
14	0,11	0,99
15	0,12	0,98

D_p - Diâmetro do produto
 D_T - Diâmetro do tubo

4.4. Avaliação do transporte

Sob o aspecto de transporte das frutas estudadas, levando-se em consideração os resultados obtidos de velocidade terminal, coeficiente de arraste e efeito de parede, pode-se fazer as seguintes análises:

A ameixa possui velocidade terminal, em água, descendente igual a $0,19\text{m.s}^{-1}$, o que não possibilita seu transporte por canal aberto, devido seu assentamento rápido, causando o entupimento do mesmo. Neste caso, um outro método teria que ser avaliado para transportar estas frutas em meio aquoso e aí poderia se considerar a hipótese do transporte sob pressão, em dutos, onde seu dimensionamento requer estudos que considerem além dos aspectos estudados, comportamento da fruta, finalidade do transporte, fator econômico e conseqüências danosa aos frutos. Dentro destas mesmas condições está o umbu, tendo como vantagem sua forma mais esférica e seu tamanho, fatores que favorecem quanto aos efeitos do atrito e conseqüentemente no arraste dessas frutas.

As maçãs possuem velocidade terminal, em água, ascendente ou seja, sua densidade é menor do que a da água o que possibilita facilmente o seu transporte em canal aberto e por gravidade, tendo-se que avaliar apenas, de acordo com a finalidade, as dimensões do canal e a inclinação do mesmo, fator este que considera a velocidade que se quer dar ao transporte ou ao processamento.

O comportamento de goiabas em água apresentou aspectos diferentes das demais frutas. Por possuir, em estágio semimaduro, uma densidade aproximadamente igual a da água, possui um assentamento muito lento o que possibilita seu transporte hidráulico em canal aberto por gravidade, no entanto requer maiores estudos quanto à lâmina d'água e velocidades adequadas a esta lâmina, bem como ao comprimento do canal. O parâmetro lâmina d'água, velocidade (inclinação do canal) e comprimento do canal estariam, neste caso, intimamente ligados. Uma lâmina inadequada à velocidade causaria, também, um entupimento no canal. A Figura 23 ilustra alguns aspectos de como se poderia trabalhar o transporte hidráulico de goiabas e quais parâmetros poderiam ser mudados para se obter os resultados desejados.

No caso 1, temos uma situação em que a inclinação (θ) do canal é pequena e, portanto a velocidade de escoamento ($v_{l \text{ água}}$) é praticamente a mesma que a velocidade terminal da fruta ($v_{l \text{ fruta}}$), sendo assim, para um determinado comprimento (S_1) do canal, haveria assentamento e conseqüente entupimento deste, antes do final do percurso. No caso 2, temos as mesmas condições do caso 1 no que se refere a velocidades, comprimento do canal e inclinação, mudando apenas a lâmina d'água (L_2), assim a fruta chegaria ao seu destino antes de ocorrer o assentamento. No caso 3, todos os outros parâmetros foram mantidos iguais ao caso 1, mudando-se apenas a inclinação do canal, o que causou um aumento na velocidade de escoamento ($v_3 \text{ água}$), tornando-se muito maior do que a velocidade terminal da fruta ($v_{l \text{ fruta}}$) e portanto o arraste é obtido sem problemas, independente do comprimento do canal e da lâmina de transporte. Estas são apenas algumas questões levantadas, várias outras situações podem ser analisadas mas todas requerem um estudo mais detalhado.

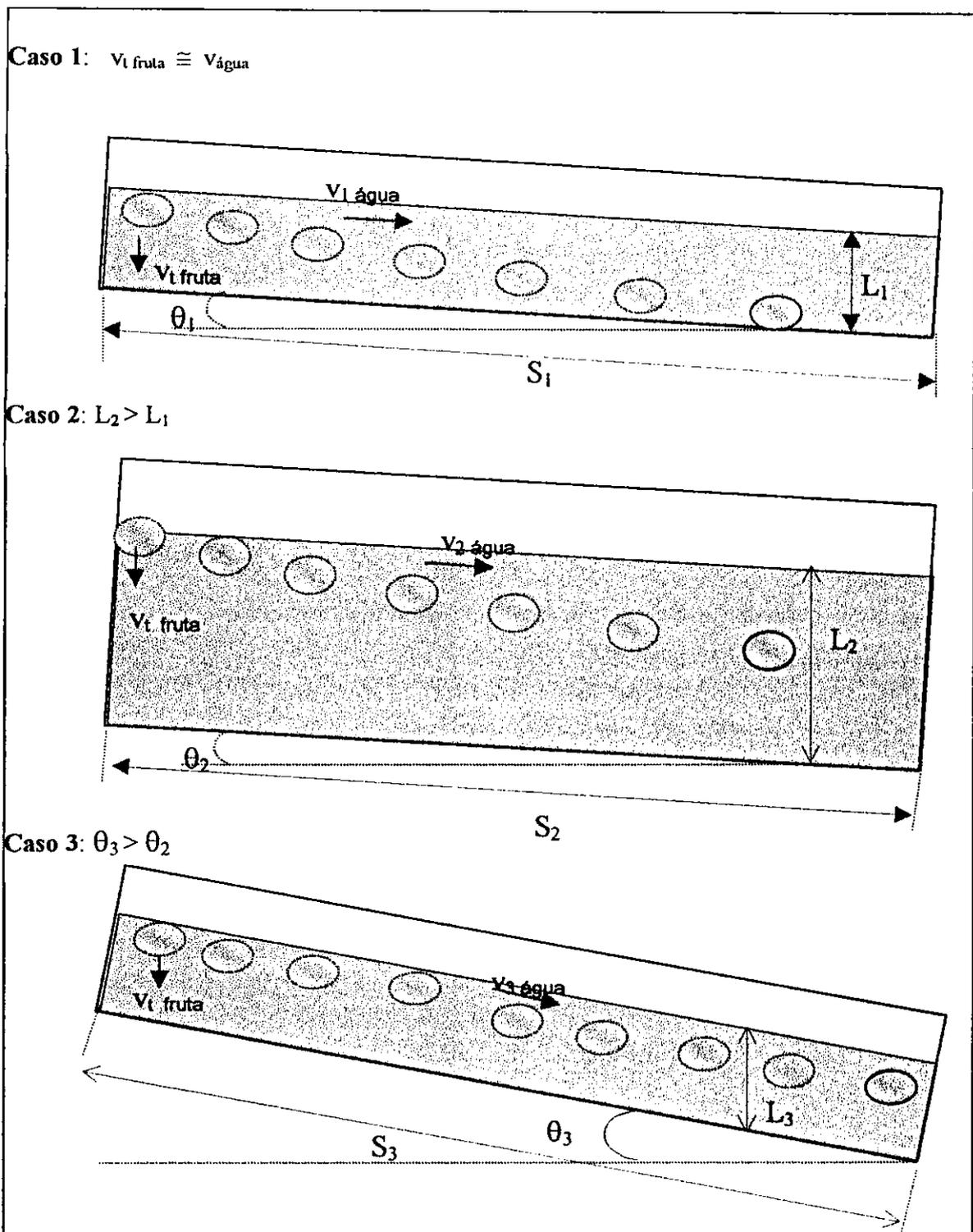


Figura 23 – Análise de alguns parâmetros do transporte hidráulico de goiabas em canal aberto

5- CONCLUSÕES

Diante dos estudos realizados das propriedades físicas e hidrodinâmicas de ameixa, goiaba, maçã e umbu, concluiu-se que:

- A massa média da ameixa, goiaba, maçã e umbu foram respectivamente 93,20; 130,81; 66,15 e 14,67g e o volume médio de 73,27; 136,71; 60,05 e 12,51cm³.
- A massa específica média, da ameixa, goiaba, maçã e umbu foi respectivamente 1,12; 1,07; 0,98 e 1,13 e a esfericidade média foi 0,93; 0,72; 0,93 e 0,84 respectivamente.
- O diâmetro da esfera de igual volume da fruta média da ameixa, goiaba, maçã e umbu foi respectivamente 54,27; 61,60; 50,80 e 27,20mm e o diâmetro médio ($\sqrt[3]{a.b.c}$) foi 52,11; 68,90; 48,76 e 28,78mm respectivamente.
- A ameixa, maçã, goiaba e umbu têm orientação semelhante em água, ou seja, adotam posição de maior área em água.
- A velocidade terminal encontrada para ameixa foi 0,19m.s⁻¹ (descendente), para goiaba 0,06m.s⁻¹ (descendente), para maçã 0,23m.s⁻¹ (ascendente) e para umbu 0,15m.s⁻¹ (descendente).
- A velocidade terminal da ameixa foi alcançada a 0,40m, da goiaba a 0,70m, da maçã 0,50m e do umbu a 0,20m e do início do percurso constatando-se que a velocidade terminal cresceu com o aumento do tamanho da fruta.
- Dos métodos existentes na literatura para o cálculo da velocidade terminal, os que mais se aproximam dos valores experimentais foram: Para ameixa e goiaba, o método que

corrige a esfericidade pela equação de Pettyjohn e Christiansen ($C_d = 5,31 - 4,88(\varphi)$) e

para maçã e umbu, obtido pela equação de Massarani $C_d = \left[\left(\frac{24}{K_1 N_R} \right)^m + K_2^m \right]^{1/2}$

- No cálculo de correção do coeficiente de arraste, com base na esfericidade, a equação de Massarani funciona melhor para frutas com diâmetros maiores do que 50mm.
- As duas conclusões acima bem como a discrepância entre os valores calculados e os experimentais, faz crer que há necessidade de rever o conceito de área projetada da definição do coeficiente de arraste, para produtos agrícolas.
- Não é adequado o transporte hidráulico de ameixa e umbu em canais abertos por gravidade.
- Goiabas em água demonstraram, uma dependência do estágio de maturação: goiaba semimadura afunda e madura flutua.
- Goiabas maduras, flutuam, não apresentando restrições ao transporte hidráulico por gravidade em canais e goiaba semi-madura requer um estudo cuidadoso da velocidade de escoamento e lâmina d'água.
- Maçãs em água, flutuam, possui velocidade terminal ascendente e das frutas estudadas é a que melhor se adequa ao transporte hidráulico em canal aberto.
- Os coeficientes de arraste médios para velocidade terminal média encontrados para ameixa, goiaba, maçã e umbu, foram respectivamente: 0,84; 3,54; 1,68; 0,91.

5. LITERATURAS CITADAS

- ALMEIDA, M.M. **Armazenagem refrigerada de umbu (*Spondias tuberosa* Arruda câmara); Alterações das características físicas e químicas de diferentes estádios de maturação.** Campina Grande: UFPB, 1999. 89p. (Tese de Mestrado)
- ATAÍDE, C.H., BARROZO, M.A.S., PERREIRA, F.A.R. Estudo do movimento de partículas em soluções de hidroxietilcelulose: Efeito de parede e coeficiente de arraste. In: XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulado, **Anais...** Uberlândia-MG. v.1., p.29-34, 1996.
- BRAGA, M.E.D.; **Estudo experimental dos fundamentos do transporte hidráulico de laranja.**; Campinas, SP : FEA/ UNICAMP, 1997 (Tese de Doutorado).
- BILANSKI, W.K.; COLLINS, S.H.; CHU, P. Aerodynamic properties of seed grains. **Agricultural Engineering.** v. 43, n. 4 p. 216-219, 1962.
- BILANSKI, W.K.; LAL, R. The behavior of threshed materials in a vertical wind tunnel. **Trans. of the ASAE.** p. 411-413, 416, 1965
- BISPO, E.S. **Estudo dos produtos industrializáveis do umbu (*Spondia tuberosa* Arr. Câmara)** Fortaleza: UFCE, 1989. (Tese de Mestrado).
- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. **Fenómenos de transporte,** Espanha, Editorial Reverté S.A., 1982.
- BRAGA, M.E.D.; GASPARETO, C.A. Transporte hidráulico de laranja- Estudo da velocidade terminal. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, e 25 li Congresso Latino-Americano de Ingenieria Agrícola, 2 **Anais...** Bauru – São Paulo, Brasil.
- CASTRO, J.V.; SIGRIST, J.M.M. **Goiaba-matéria-prima.** In: Série de frutas tropicais, 6 São Paulo, Secretária de Agricultura e Abastecimento - ITAL ,1988.p.121-139.
- CLIFT, R.; GRACE, J.R.; WEBER, M.E. **Bubbles, drops and particles,** Academic Press, New York, 1978

- CURRAY, J.K. **Analysis of sphericity and roundness of quartz grains.** (Magister Science Thesis in Minerology). The Pensylvânia State, University Park, Pa. 1951.
- DEWEY, D.H., STOUT, B.A.; MATTHEWS, R.H; BAKKER-ARKEMA, F.W. **Development of a hydrohandling system for sorting and sizing apples for Storage in pallet boxes,** Marketing Research Reporting No.743 STD, UDFS.1966.
- DONADIO, L.C. **Frutas exóticas.** Jaboticabal: Funcp, 1998. 279p.
- DUCROQUET, J.P.H.J.; MONDIN, V.P. **Cadeias produtivas do estado de Santa Catarina: Pêssego e ameixa.** Florianópolis: EPAGRI, 1997.73p.
- GOMES, P.F. **Mundo Agrícola.** São Paulo. V.14, n 159, p.94-97,1965.
- GUIA RURAL ABRIL. – **As culturas de A até Z.** Rio de Janeiro: Abril, 1986. 385p.
- JÚNIOR, J.F.S. Competição de cultivares de goiabeira (*Psidium guajava L.*) para indústria na chapada do Araripe, PE .II. Características físico-químicas do fruto .**Revista Brasileira de Fruticultura.** Jaboticabal; SP. v.21 n.1 p.1-6, 1999.
- LAPPLE, C.E. **Fluid particle mechanics.** University of Delaware, Newark.,1956.
- MARANCA, G. **Fruticultura comercial: mamão, goiaba e abacaxi.** 2ed. São Paulo: NOBEL, 1981 ,p..57-80.
- MASSARANI, G. Alguns aspectos da separação sólido-fluido, **Tópicos Especiais em Sistemas particulados,** v.2, cap.1, 1986.
- MASSARANI, G. Fluidodinâmica da partícula sólida. **Tópicos Especiais em Sistemas particulados,** v.3, p.117-160, 1990.
- MATTHEWS, F.V.; STOUT, B.A.; DEWEY, D.D; BAKKER-ARKEMA. F.N. Hydrohandling of apple fruits. ASAE Paper No. 65-130. **American Society of Agricultural Engineers.** St. Joseph, Michigan, 1965.
- MEDINA, J.C **Goiaba.** Cultura. In: Série frutas tropicais, 6 São Paulo: Secretária de Agricultura e Abastecimento- ITAL, p.1-120. 1988.
- MENDES, B.V. **Umbuzeiro (*Spondia tuberosa* Arr. Cam) : Importante fruteira do semi-árido.** Coleção mossoreense. Série C-v.164. 1990, 67p.
- McKAY, W.R.M.; DABBAGHZADEH, S.J. Fluidization and hidraulic transport of carrot pieces. Department of Chemical Engineering, **Journal of Food Engineering.** v. 6, p. 377-399, 1987.

- MOHSEIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. Gordon and Breach Science Publishers. New York .1978, 2 ed, 742p.
- PETTYJOHN, E.S.; CHRISTIANSEN, E.B. **Effect of particle shape on free-settling rates of isometric particles**. C.E.P. v.44 ,n 156, p 1948.
- QUEIROZ, A.J.M. **Propriedades físicas e pré-Resfriamento de umbu (*Spondia tuberosa* Arruda Câmara)**. Campina Grande: UFPB, 1994. 145p. (Tese de Mestrado)
- SILVA, C.M.S. **Caracterização dos frutos do umbuzeiro**. Petrolina, PE: EMBRABA-CPATSA, 1987. 17p.
- STOKES, G.G.- On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums, **Trans. Cam. Phil. Society.**, v 9, p.8-27, 1851.
- TENNES, B.R.; LEVIN, J.H.; STOUT, B.A. Swett cherryproperties usefull in harvesting and handling equipment design, **Transactions of the ASAE** . St. Joseph, Michigan, v12, n5, p. 710-714, 1969.
- UHLHERR, P.H.T.; CHHABRA , R.P **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.73, p. 918-923, December, 1995.
- VENNARD,J.K. – **Fluid mechanics**. 4Th Ed. New York Jonh Wiley and Sons, Inc., 1961.