



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ANASTÁCIA MARIA MIKAELLA CAMPOS NÓBREGA**

**EFEITO DA FORMA E DO DIÂMETRO DO TUBO DE QUEDA NO  
COEFICIENTE DE ARRASTE EM ÁGUA PARA VEGETAIS  
MINIMAMENTE PROCESSADOS**

**CAMPINA GRANDE - PB  
2013**

**ANASTÁCIA MARIA MIKAELLA CAMPOS NOBREGA**

**EFEITO DA FORMA E DO DIÂMETRO DO TUBO DE QUEDA NO  
COEFICIENTE DE ARRASTE EM ÁGUA PARA VEGETAIS  
MINIMAMENTE PROCESSADOS**

**Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Agrícola.**

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

**CAMPINA GRANDE - PB  
2013**



N337e Nóbrega, Anastácia Mikaella Campos.

Efeito da forma e do diâmetro do tubo de queda no coeficiente de arraste em água para vegetais minimamente processados. / Anastácia Mikaella Campos Nóbrega. - Campina Grande - PB: [s.n], 2013.

42 f.

Orientadora: Professora Dr<sup>a</sup> Maria Elita Martins Duarte.

Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia (Curso de Bacharelado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

1. Macaxeira - processamento mínimo. 2. Sistema de transporte hidráulico. 3. Parâmetros hidrodinâmicos. 4. Velocidade terminal da partícula - macaxeira. 5. Velocidade terminal da água. 6. Efeito de parede. 7. Medição de vazão - mangueira. I. Duarte, Maria Elita Martins. II. Título.

CDU:664(043.1)

**Elaboração da Ficha Catalográfica:**

Johnny Rodrigues Barbosa  
Bibliotecário-Documentalista  
CRB-15/626

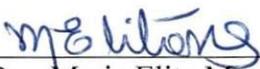
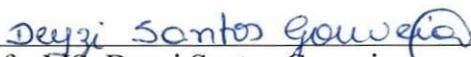
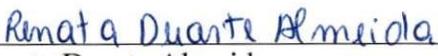
**DEFESA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Anastácia Maria Mikaella Campos Nobrega**

**Efeito da forma e do diâmetro do tubo de queda no coeficiente de arraste em água para vegetais minimamente processados.**

BANCA EXAMINADORA:

PARECER  
(nota)

 _____ Profa. Dra. Maria Elita Martins Duarte (Orientadora) UFCG/UAEAg	<u>9,5</u>
 _____ Profa. MS. Deyzi Santos Gouveia (Examinadora) UFCG/UAEAg	<u>9,3</u>
 _____ Renata Duarte Almeida (Examinadora) Mestranda – UFCG/UAEA	<u>9,7</u>

CAMPINA GRANDE

Fevereiro 2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



**EFEITO DA FORMA E DO DIÂMETRO DO TUBO DE QUEDA NO  
COEFICIENTE DE ARRASTE EM ÁGUA PARA VEGETAIS MINIMAMENTE  
PROCESSADOS**

*Anastácia Maria Mikaella Campos Nobrega*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande.

Julgado em, 09 / 02 / 2013  
Nota: 9,5 (nove, cinco)

*Anastácia Maria Mikaella Campos Nobrega*

Anastácia Maria Mikaella Campos Nobrega

BANCA EXAMINADORA:

*Maria Elita Martins Duarte*

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Maria Elita Martins Duarte (UAEA/UFCG) – *Orientadora*

*Deyzi Santos Gouveia*

Profa. Ms. Deyzi Santos Gouveia - UFCG/UAEA

*Renata Duarte Almeida*

Mestranda Renata Duarte Almeida - UFCG/UAEA

***Dedicatória***

*À minha família e meu esposo, pelo  
carinho que enriquece a minha vida.*

## ***Agradecimentos***

*À Deus, autor e doador da vida, pela perfeição de sua criação, e pela fidelidade do amor com que, incondicionalmente, tem nos amado.*

*A minha mãe que foi a minha grande força de vontade, minha guerreira que sempre estava do meu lado.*

*Meu esposo **Suellton Rodrigues** que sempre esteve comigo dando força, companheirismo, dedicação e apoiando quando precisava.*

*À minha família pelo carinho.*

*A minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> **Maria Elita Martins Duarte** pelo empenho, pela orientação, pela paciência e pelos momentos de descontração.*

*As minhas amigas **Renata Duarte, Leila Nunes e Viviane Farias** pelos momentos de descontração, companheirismo, que sempre me apoiaram e ajudaram quando precisei.*

*Aos membros da banca examinadora pela colaboração.*

*À todos os colegas de curso, pela amizade, apoio e ajuda nos momentos difíceis.*

*À coordenadora do Curso Soahd Arruda pela dedicação e colaboração.*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	viii
<b>RESUMO</b> .....	ix
<b>1.0-INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1- Objetivos.....	3
1.1.1- Objetivos específicos.....	3
<b>2.0- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
2.1 - Macaxeira (Manihot utilissima).....	4
2.2 - Produtos minimamente processados.....	4
2.3 - Teor de água.....	5
2.4 - Propriedades físicas.....	5
2.4.1 - Forma e tamanho.....	5
2.4.2 - Massa específica.....	6
2.4.3 - Volume.....	7
2.5 - Propriedades hidrodinâmicas.....	7
2.5.1 - Orientação de partículas.....	7
2.5.2 - Velocidade terminal e coeficiente de arraste.....	8
2.5.3 - Efeito de parede.....	10
<b>3.0-MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	12
3.1- Teor de Água.....	12
3.2- Características Físicas.....	12
3.3- Propriedades Hidrodinâmicas.....	14
3.4- Efeito de Parede.....	18
3.5- Análise Estatística.....	19
<b>4.0- RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	20
4.1- Características Físicas.....	20
4.2- Efeito do tamanho do cilindro de queda na velocidade terminal em água .....	20
4.3- Efeito da forma das partículas na velocidade terminal .....	27
4.4 - Coeficiente de arraste e efeito de parede.....	28
<b>5.0- CONCLUSÃO</b> .....	30
<b>6.0- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	31

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Figura esquematizada para a obtenção de dados para o traçado da curva tempo-deslocamento, utilizada no cálculo da velocidade terminal de partículas fatiadas do vegetais em água ..... 7
- FIGURA 2 - a) Pontos experimentais dos dados de deslocamento em função do tempo, para placas planas de macaxeira durante queda em cilindros com diâmetros de 50, 100 e 150 mm, contendo água e linha indicadora do alcance da velocidade terminal; b) Regressão linear da parte reta da curva para obtenção da velocidade terminal de placas planas circulares de macaxeira 14
- FIGURA 3- a) Pontos experimentais dos dados de deslocamento em função do tempo, para cilindros de macaxeira durante queda em tubos com diâmetros de 50, 100 e 150 mm, contendo água e linha indicadora do alcance da velocidade terminal; b) Regressão linear da parte reta da curva para obtenção da velocidade terminal dos cilindros de macaxeira. 16
- FIGURA 4 - a) Pontos experimentais dos dados de deslocamento em função do tempo, para cubos de macaxeira durante queda em tubos com diâmetros de 50, 100 e 150 mm, contendo água e linha indicadora do alcance da velocidade terminal; b) Regressão linear da parte reta da curva para obtenção da velocidade terminal dos cubos de macaxeira. 18

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1-	Dimensões para as partículas de macaxeira	4
TABELA 2-	Características físicas com desvio padrão para massa, volume e massa específica das peças de macaxeira.	12
TABELA 3-	Comparação entre as médias obtidas das velocidades terminais das placas planas circulares de macaxeira em função do tamanho segundo teste de Tukey.	14
TABELA 4-	Comparação entre as médias obtidas das velocidades terminais de cilindros de macaxeira em função do tamanho segundo teste de Tukey.	17
TABELA 5-	Comparação entre as médias obtidas das velocidades terminais de cubos de macaxeira em função do tamanho, segundo teste de Tukey.	18
TABELA 6-	Comparação das médias de velocidade terminal das partículas em cada tubo: verificação do efeito da forma e tamanho na velocidade terminal.	19
TABELA 7-	Coefficiente de arraste das placas circulares, cilindros e cubos obtidos pela equação proposta por ISAACAS E THODOS (1967).	20
TABELA 8-	Efeito de parede, $K_p$ , calculado para peças geométricas de macaxeira, durante a queda em tubo de PVC, com 50, 100 e 150 mm de diâmetros	21

## **Efeito da forma e do diâmetro do tubo de queda no coeficiente de arraste em água para vegetais minimamente processados.**

### **Resumo**

O processamento mínimo da macaxeira apresenta-se como uma alternativa para o prolongamento da vida útil, além de atender a demanda por produtos de fácil preparo e maior conveniência, pode contribuir para o aumento na sua comercialização, haja vista a dificuldade na sua comercialização pelo fato de possuir dimensões relativamente grandes. Após serem processados, os produtos devem apresentar atributos de qualidade, mantendo o máximo de suas características nutritivas e sensoriais, como o frescor, aroma, cor e sabor. O transporte hidráulico através de canais e em tubos horizontais e/ou verticais apresenta vantagens sobre os demais tipos de transporte, pois a água funciona como amortecedor de impactos, minimizando os danos mecânicos aos materiais biológicos como, por exemplo, dos produtos minimamente processados. Para projetar um sistema de transporte hidráulico é necessário que se conheça o comportamento dinâmico do produto em água, avaliado por alguns parâmetros hidrodinâmicos, tais como a velocidade terminal da partícula, o coeficiente de arraste, orientação durante transporte e o efeito da forma geométrica do produto sobre tais parâmetros. Esta pesquisa teve como objetivo determinar os parâmetros hidrodinâmicos (velocidade terminal em água, coeficiente de arraste e efeito de parede) de partículas de macaxeira com diferentes formas geométricas submetidas à queda, em tubos com 50, 100 e 150 mm de diâmetro e 1000 mm de altura.

## 1. INTRODUÇÃO

A tendência de mudanças nos hábitos alimentares da população mundial mostra um aumento discreto no consumo de frutas e hortaliças, além de uma busca constante por alimentos de conveniência, que exija tempo reduzido de manuseio e preparo sem, no entanto, alterar suas características sensoriais e nutricionais originais.

No Brasil, o processamento mínimo de frutos e hortaliças foi introduzido na década de 90 por empresas atraídas pela nova tendência do mercado, encontrando-se atualmente em franca expansão. Essa linha de produtos representa para o consumidor economia de tempo, conveniência e redução de lixo gerado (PIRES, 2005).

Os vegetais minimamente processados são aqueles que passam por um mínimo de operações de processamento, sendo oferecidos para o consumo de forma prática e atraente. O processamento mínimo inclui as atividades de seleção e classificação da matéria prima, pré-lavagem, processamento (corte, fatiamento), sanitificação, enxágüe, centrifugação e embalagem, visando-se obter um produto fresco e saudável e que, na maioria das vezes, não necessita subsequente preparo para ser consumido (CHITARRA, 2000).

Para produtores e supermercadistas, o processamento mínimo favorece o melhor aproveitamento de frutas, que seriam descartadas no processo de seleção, contribuindo para a redução das perdas, além de proporcionar maior valor agregado aos produtos (CAVALCANTE, 2005).

Esses produtos são apresentados em cubos, picados e ralados, também é usual a sua apresentação em mix de saladas. Esse processo, embora seja mais usado para verduras e legumes, também é utilizado para frutas (LUENGO & LANA, 1997).

Devido ao tamanho relativamente grande de vegetais como macaxeira, e a dificuldade no descascamento que tornam mais difícil o seu preparo, o consumo de tais legumes se restringe, na sua grande maioria, a forma “in natura”.

Neste aspecto, o processamento mínimo poderia contribuir para o aumento na comercialização dessas culturas, e atender também a demanda por produtos de fácil preparo e maior conveniência.

Os insumos destinados ao processamento mínimo dos vegetais referem-se às máquinas e equipamentos e às embalagens do produto final. Embora maior parte das operações possa ser manual, existe a possibilidade do uso de máquinas mais sofisticadas. O produtor deve desenvolver equipamentos como mesas de seleção e tanque de lavagem, adequados à sua realidade financeira e ao espaço físico da agroindústria (NANTES, 2000), bem como a adequação do sistema de transporte até os terminais de embalagens.

O transporte de pequenos sólidos é uma técnica conhecida e teoricamente bem estabelecida, mas muitas industriais manuseiam sólidos de pequenas dimensões e necessitando usar tubos de transporte para seus materiais, encontram-se apenas informações limitadas na literatura. O tipo de transporte mais adequado, nesses casos, é o hidráulico, exatamente por funcionar como meio amortecedor de impactos.

A interação sólido-fluido é determinante para o projeto, avaliação e operação de diversos equipamentos de pré-processamento. Em casos muito particulares de interação sólido-fluido, a força de arraste que o fluido exerce sobre uma dada partícula sólida, pode ser prevista com sucesso (MASSARANI, 1986).

Para projetar um sistema de transporte hidráulico é necessário que se conheça o comportamento dinâmico do produto em água, geralmente avaliado por alguns parâmetros hidrodinâmicos, tais como a velocidade terminal da partícula, o coeficiente de arraste, orientação durante transporte e efeito de parede, onde estão envolvidas as variáveis: massa específica, dimensões e forma do produto, condições de transporte como diâmetro do duto e/ou canal, o volume e tipo de fluido (TORRES, 2003).

Diante de tantas variações e complexidade que implicam os sistemas de transporte, tornam-se necessárias informações a respeito das propriedades físicas e hidrodinâmicas dos produtos agrícolas, para que seja possível a formulação e a evolução de novos projetos de máquinas e equipamentos, evitando o desperdício dos produtos.

## **1.1 Objetivos**

Determinação de parâmetros hidrodinâmicos de vegetais fatiados, em formas geométricas definidas.

## **1.2 Objetivos Específicos**

❖ Determinar as características físicas (massa, volume, área projetada, massa específica real) de macaxeira, fatiada nas seguintes formas: discos (placas planas circulares) com diâmetro de 15 mm, e altura de 5 mm; cilindros com diâmetros de 15 mm e altura de 20 mm e cubos com arestas de 15 mm.

❖ Determinar os parâmetros hidrodinâmicos: velocidade terminal em água, coeficiente de arraste e efeito de parede dos vegetais submetidos à queda, em tubos com 50, 100 e 150 mm de diâmetro e 1000 mm de altura.

❖ Avaliar os efeitos da forma e tamanho das peças da macaxeira e, também, do tamanho do tubo de queda na velocidade terminal dessas partículas em água.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Macaxeira (*Manihot utilissima*)

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de mandioca, com uma produção anual superior a 20 milhões de toneladas, o que coloca entre as principais explorações agrícolas do país. A mandioca destinada ao consumo “in natura”, também conhecida como mandioca de mesa, mansa, aipim ou macaxeira, difere da mandioca “brava” pelo teor de ácido cianídrico de suas raízes (OTSUBO & AGUIAR, 2001).

As raízes das mandiocas são bastante perecíveis. Além disso, os produtores não estão dispostos a aumentar sua produção em regiões onde o único mercado é o produto fresco, porque o período de armazenamento da mandioca é muito curto, provocando grandes perdas por deterioração fisiológica do produto e conseqüentemente diminuindo o total de produto a ser comercializado. A mandioca descascada é um produto minimamente processado que surgiu no mercado como resposta à demanda por produtos de fácil preparo e maior conveniência (ALVES et al., 2005).

### 2.2 Produtos minimamente processados

Segundo SEBRAE (2008), a International Fresh-Cut Produce Association define produto minimamente processado como qualquer fruta, hortaliça ou combinação destas que tenha sido fisicamente alterada, mas que permaneça no estado fresco.

Os hábitos alimentares estão mudando muito rapidamente indicando que certos valores ligados ao estilo de vida da população estão passando por significativas mudanças. A falta de tempo para o preparo das refeições e a crescente preocupação com a saúde e a qualidade de vida, têm sido os maiores motivadores desta situação. Entre as alternativas de agronegócio decorrentes destas transformações de mercado, destacam-se os alimentos minimamente processados, os quais correspondem em grande parte a vegetais submetidos a algum tipo de modificação em sua condição natural, passando por operações simples de: limpeza, lavagem, descasque, desinfecção, corte, embalagem e armazenamento (LIMA et al., 2000).

### **2.3 Teor de água**

O teor de água é uma das características físicas que mais influenciam nos processos de beneficiamento e processamento de produtos agrícolas.

Em estudos realizados com frutos de café, COUTO et al. (2003) concluíram que o teor de água dos frutos afeta significativamente os seus valores da velocidade terminal. Os autores verificaram que a velocidade terminal dos frutos de café diminui com a redução do teor de água.

SOUSA (2001) também verificou fato semelhante ao estudar a influência do teor de água sobre a velocidade terminal de duas variedades de sementes de girassol: Cargill C11 (Brasileira) e Morgan 734 (Argentina) com teores de umidade aproximados de 3 a 12%. Foi observado que com a elevação do teor de água a velocidade terminal experimental das sementes aumentou.

### **2.4 Propriedades físicas**

O conhecimento das propriedades físicas dos materiais biológicos é de fundamental importância, tendo em vista que muitos dos problemas enfrentados pela engenharia estão associados a estas propriedades, sobretudo quando se faz necessário a realização de projetos de dimensionamento de maquinários ou análises do comportamento de determinados produtos agrícolas.

#### **2.4.1 - Forma e tamanho**

O tamanho e a forma são características específicas de cada produto, definidas geneticamente, e que podem influenciar as demais propriedades do produto (SILVA & CORRÊA, 2000).

Costuma-se definir formas de produtos agrícolas por semelhança com formas geométricas conhecidas. São muitos os métodos utilizados para caracterizar um produto quanto a sua forma. Os métodos descritivos, que apenas nomeiam os produtos conforme

diagrama padrão, pré-determinado, ajudam na escolha de equações adequadas para se fazer aproximações de volume, área superficial, área projetada e demais características relativas á forma, porém os métodos de maior utilidade nos projetos de processamento, transformação e conservação de produtos, são aqueles que fornecem um fator de forma. Esses fatores de forma, na maioria dos processos, são usados como fatores de correção do processo segundo um modelo empregado, funcionam como incremento de equações para uma melhor aproximação do fenômeno estudado, como exemplo pode-se citar o caso de transporte de partículas sólidas em um fluido (DUARTE, 2006).

#### 2.4.2 - Massa específica

A massa específica real é determinada pela relação entre a massa do produto em gramas e o volume do produto.

$$\rho_r = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

em que:

$\rho_r$  = massa específica real do produto ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m$  = massa do produto (g);

$V$  = volume do produto ( $\text{cm}^3$ ).

A massa específica aparente, uma das propriedades físicas de produtos agrícolas granulares, é definida como a relação entre a massa de determinada amostra e o volume por ela ocupado (CARLESSO et al., 2005).

$$\rho_a = \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

em que:

$\rho_a$  = massa específica aparente do produto ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m$  = massa de determinada quantidade de produto (g);

$V$  = volume de determinada quantidade de produto ( $\text{cm}^3$ ).

### **2.4.3 - Volume**

O volume do produto pode ser obtido por semelhança geométrica e daí utiliza-se uma equação matemática que melhor represente a forma do produto ou ainda, por deslocamento de massa de fluido (DUARTE, 2006).

Para partículas de formas geométricas definidas, a determinação do volume é feita de acordo com cada forma.

## **2.5 - Propriedades hidrodinâmicas**

O transporte hidráulico refere-se ao movimento de sólidos em água através de canais e em tubos horizontais e/ou verticais. A utilização da água apresenta vantagens sobre os demais tipos de transporte, pois funciona como amortecedor de impactos, minimizando os danos mecânicos aos materiais biológicos quando transportados hidraulicamente.

### **2.5.1 - Orientação de partículas**

No movimento laminar a partícula geralmente mantém sua orientação inicial enquanto ocorre o assentamento. Alguns autores tomam a secção transversal mínima como a área frontal no escoamento laminar. Na região turbulenta do escoamento a partícula teoricamente assume a posição de máxima resistência (DAVIES, 1947).

SANTANA (1999) estudou o comportamento do amendoim em fluxo de ar ascendente e observou que quando as sementes atingiam a velocidade terminal, apresentavam um movimento de rotação, na posição de equilíbrio.

Em estudos aerodinâmicos de grãos. BILANSKI et al. (1962) e BILANSKI & LAL (1965) encontraram que 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 o plano horizontal. Esta rotação e inclinação causaram um maior arraste e menor velocidade terminal.

No transporte hidráulico de laranjas da variedade valência BRAGA (1997) verificou as frutas imersas em água tendem a uma situação de equilíbrio padrão, as frutas consideradas sadias têm um ângulo de orientação entre 14 e 25 ° e quando murchas as laranjas tendem a manter uma inclinação nula da columela central em relação ao nível da água, permanecendo com grande parte de sua área acima do nível da água.

### 2.5.2 - Velocidade terminal e coeficiente de arraste

A partir do momento em que um corpo em queda livre a uma velocidade constante, a força do campo gravitacional é anulada, em termos, pelo efeito resultante da força de arraste, ou seja, sua aceleração é nula. Esta velocidade atingida é denominada velocidade terminal e é influenciada pela massa específica, pelo tamanho e pela forma do produto (SILVA & CORRÊA, 2000).

A velocidade terminal é uma propriedade utilizada no dimensionamento e beneficiamento de produtos agrícolas, juntamente com projetos e equipamentos de limpeza, secagem, aeração, e transportadores na indústria. Pode-se ainda utilizar a propriedade física para operações de comercialização e diferenciação de variedades: a velocidade terminal é um instrumento importante em tecnologias mais avançadas e na operacionalização adequada de produtos armazenados (SOUSA, 2001).

De acordo com MOHSENIN (1978), uma partícula em queda livre, em um fluxo de ar ascendente, atingirá a velocidade terminal quando a força gravitacional ( $F_g$ ), sendo  $F_g = \text{peso} - \text{força de empuxo}$ , se igualar à força de resistência de arraste ( $F_r$ ). A velocidade terminal pode ser, então, calculada por meio da Equação (2.2)

$$F_r = m_p g = \left[ \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} \right] = \frac{1}{2} C_D A_p \rho_f V_t^2 \quad (2.2)$$

ou

$$V_t = \left[ \frac{2W(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p \rho_f A_p C_D} \right]^{0,5} \quad (2.3)$$

e

$$C_D = \frac{2W_p(\rho_p - \rho_f)}{V_t^2 A_p \rho_p \rho_f} \quad (2.4)$$

em que,

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

$m_p$  = massa da partícula (kg);

$g$  = aceleração gravitacional ( $\text{m.s}^{-2}$ );

$W_p$  = peso da partícula (N);

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

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

$C_D$  = coeficiente de arraste (adimensional);

$A_p$  = área projetada da partícula ( $\text{m}^2$ ).

Para corpos esféricos, de diâmetro  $D_p$ , substituindo  $A_p = \frac{\pi}{4} D_p^2$  e

$W = \frac{\pi}{6} \rho_p g D_p^3$ , pode-se expressar a velocidade terminal como sendo:

$$V_t = \left[ \frac{4gD_p(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C_D} \right]^{0,5} \quad (2.5)$$

Para condições de corrente laminar, os coeficientes de arraste são calculados pela Equação 2.6.

$$C_D = \frac{24}{N_R} \quad (2.6)$$

$$V_t = \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho_f)}{18\mu} \quad (2.7)$$

em que,

$N_R$  = número de Reynolds (adimensional);

$\mu$  = viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{N.m.s}^{-2}$ ).

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

$$V_t = 1,74 \left[ \frac{gD_p(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0,5} \quad (2.8)$$

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

$$C_D = \frac{18,5}{(N_R)^{0,6}} \quad (2.9)$$

e a velocidade terminal é dada por:

$$V_t = \frac{0,153g^{0,714}D_p^{0,142}(\rho_p - \rho_f)^{0,714}}{\rho_f^{0,286}\mu^{0,428}} \quad (2.10)$$

Poucos trabalhos apresentaram resultados satisfatórios para partículas de formas irregulares, pelo fato de suas orientações serem aleatórias e pela variedade de métodos para expressar tamanhos e dimensões a serem usados no cálculo do número de Reynolds, e a área frontal.

### 2.5.3 - Efeito de parede

MASSARANI (1986) indicou a equação de Faxen e Emerslebem para queda livre de esfera ao longo do eixo em um tubo de diâmetro  $D_p$ , para ser usada quando a velocidade terminal de partículas esféricas, em regime de Stokes, for afetada por fronteiras rígidas.

$$K_p = \frac{v_t}{v_{t\infty}} = \frac{1}{1 + 2,10\beta} \quad (2.11)$$

Esta Equação é válida apenas para  $\beta < 0,05$ . Enquanto a velocidade terminal da partícula isolada  $V_{t\infty}$  é dada pela Equação 2.12.

$$V_{t\infty} = \frac{g(\rho_p - \rho_f)D_p^2}{18\mu} \quad (2.12)$$

em que,

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

$\beta$  = relação diâmetro da partícula / diâmetro do tubo ( $D_p / D_t$ ), adimensional.

A relação entre diâmetro da partícula e diâmetro do tubo, 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  $N_R > 1000$ ). A influência de parede se faz sentir de modo particular agudo quando prevalece o regime de Stokes (MASSARANI,1990).

ATAÍDE et al. (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. Os autores concluíram que o efeito da parede do duto cilíndrico influencia bastante na velocidade terminal da queda dos sólidos, na solução estudada.

BRAGA (1997) verificou o efeito de parede na subida de laranjas em tubo cilíndrico, como também protótipos construídos utilizando-se esferas plásticas e concluiu que houve efeito de parede e que este tende a se anular a partir de  $\beta = 0,2$ .

### 3. MATERIAL E METODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande. Serão utilizadas partículas geométricas (cilindros, cubos e placas planas circulares) de macaxeira com diferentes dimensões conforme exposto na Tabela 3.1.

**Tabela 1** - Dimensões para as partículas de macaxeira

<b>Formas geométricas</b>	<b>Aresta (mm)</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Altura (mm)</b>
<b>Cilindros</b>	*	15	20
<b>Cubos</b>	15	*	*
<b>Placas planas circular</b>	*	15	5

#### 3.1 Teor de água

O conteúdo de água das partículas será determinado de acordo com o Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2005).

#### 3.2 Características físicas

As seguintes características físicas serão determinadas para as partículas de macaxeira: massa, volume, massa específica real e área projetada da partícula na direção perpendicular ao movimento do fluido.

##### *Massa*

Cada partícula terá sua massa determinada por meio de pesagem direta em balança analítica. Os resultados das pesagens serão expressos em grama (g).

##### *Volume*

Os volumes das partículas serão determinados de acordo com cada forma geométrica.

Para os cilindros o volume será determinado através da Equação 3.1.

$$V_{cl} = \pi.r_{cl}^2.h_{cl} \quad (3.1)$$

em que,

$V_{cl}$  = volume do cilindro ( $\text{cm}^3$ );

$r_{cl}$  = raio da partícula cilíndrica (cm);

$h_{cl}$  = altura da partícula cilíndrica (cm).

Para as os cubos o volume será definido conforme descrito na Equação 3.2.

$$V_{cb} = a^3 \quad (3.2)$$

em que,

$V_{cb}$  = volume do cubo ( $\text{cm}^3$ );

$a$  = aresta da partícula cúbica (cm).

Para as placas planas circulares o volume será calculado por meio da Equação 3.3.

$$V_{pp} = \pi.r_{pp}^2.h_{pp} \quad (3.3)$$

em que,

$V_{pp}$  = volume da placa plana circular ( $\text{cm}^3$ );

$r_{pp}$  = raio da partícula plana circular (cm);

$h_{pp}$  = altura da partícula plana circular (cm).

### ***Massa específica real***

Pela relação entre a massa da partícula e seu respectivo volume, será expressa a massa específica real.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.4)$$

em que,

$\rho$  = massa específica real (g.cm<sup>3</sup>);

m = massa da partícula (g);

v = volume da partícula (cm<sup>3</sup>).

### **3.3 Propriedades hidrodinâmicas**

Para as partículas de macaxeira, serão determinadas propriedades hidrodinâmicas como velocidade terminal, velocidade terminal teórica e efeito de parede e coeficiente de arrasto.

#### ***Velocidade terminal (experimental)***

Para determinação da velocidade terminal será utilizado um equipamento constituído a partir de tubos cilíndricos de PVC com acrílico transparente, de 50, 100 e 150 mm de diâmetro e 1000 mm de altura. Cada cilindro será provido de marcações espaçadas em 100 mm umas das outras.

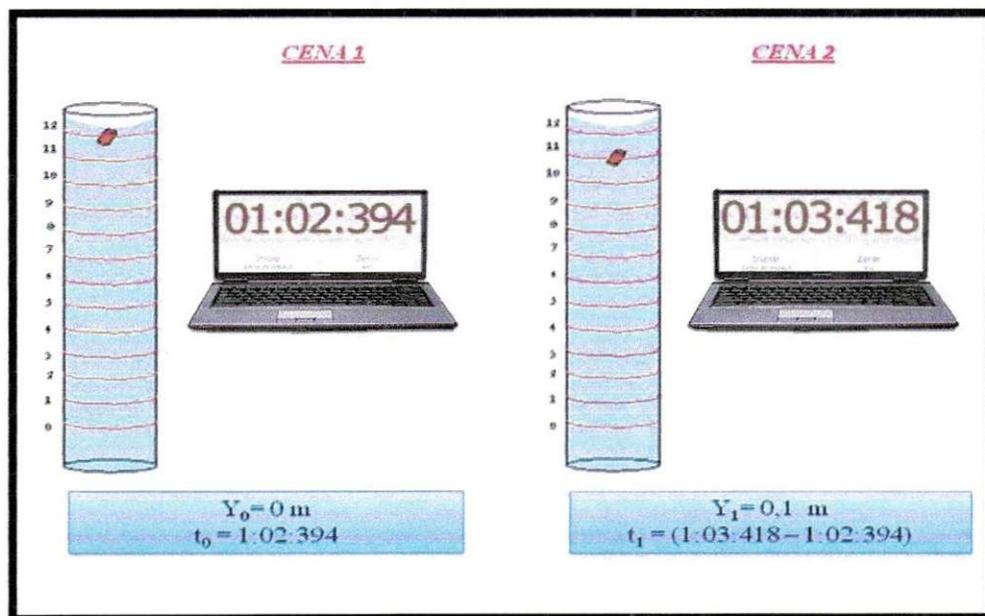
Para a determinação da velocidade terminal, serão realizadas 20 repetições para cada uma das formas geométricas de cada produto, especificadas anteriormente.

Individualmente, a partícula será solta no tubo com água e o seu percurso acompanhado por uma câmara digital.

O intervalo de tempo gasto durante o percurso da partícula será acompanhado por meio de um programa de cronômetro computacional, ampliado na tela do computador, que será filmado simultaneamente ao experimento.

A coleta de dados será feita por diferença de leitura, a partir das cenas do filme de acordo com a metodologia descrita por BRAGA (1997).

Conforme Figura 3.1, para retirada dos dados filmados, a imagem será congelada na medida em que a partícula passar em cada marcação do cilindro. Dessa forma, o tempo registrado no cronômetro mostrado no monitor do computador, será lido. Cada cena congelada corresponderá a um ponto a ser marcado, na curva de deslocamento ( $y$ ) em função do tempo ( $t$ ). Por meio da inclinação da porção reta da curva plotada, será calculada a velocidade terminal da partícula.



**Figura 1** - Figura esquematizada para a obtenção de dados para o traçado da curva tempo-deslocamento, utilizada no cálculo da velocidade terminal de partículas fatiadas de vegetais em água.

### *Velocidade terminal (teórica)*

Para o cálculo da velocidade terminal teórica das partículas **cúbicas** e com geometria de **placas planas circulares** serão utilizados dois métodos: utilizando a Equação 3.5 proposta por MOHSENIN (1978) com  $C_D$  sugerido por CLIFT et al. (1978), e pelas Equações 3.6 e 3.7 propostas por ISAACS & THODOS (1967).

$$V_t = \frac{gD_p \pi (\rho_p - \rho_f)}{2C_D \rho_f} \quad (3.5)$$

$$C_D = 1,25 \gamma^{-0,05} E^{-0,18} \quad (3.6)$$

$$V_t = 1,265 \gamma^{0,025} E^{0,59} \sqrt{\frac{D_p \Delta \rho}{\rho_f}} \quad (3.7)$$

$$\Delta \rho = \rho_p - \rho_f \quad (3.8)$$

$$\gamma = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (3.9)$$

em que,

$V_t$  = velocidade terminal teórica da partícula (m/s);

$\rho_p$  = massa específica da partícula sólida (kg. m<sup>3</sup>);

$\rho_f$  = massa específica do fluido (kg.m<sup>3</sup>);

$C_D$  = coeficiente de arraste;

$D_p$  = dimensão efetiva da partícula (m);

$E$  = relação de aspecto comprimento/diâmetro;

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

A velocidade terminal das partículas **cilíndricas** será calculada pela Equação 3.5, considerando  $C_D$  proposto por MOHSENIN (1978), e também calculando o  $C_D$  pela Equação 3.10 proposta por HEISS & COULL (1952).

$$C_D = 3\pi d \left( \frac{3E}{2} \right)^{1/3} \Delta e \quad (3.10)$$

em que,

$d$  = diâmetro do cilindro;

$\Delta e$  = relação volume arraste.

Os resultados de  $\Delta e$  são obtidos das Equações 3.11 e 3.12.

#### Para movimento paralelo ao eixo

$$\Delta e_1 = \frac{1}{\chi_1 \sqrt{\psi}} \exp \left[ \frac{0,622(\chi_1 - 1)}{\sqrt{\psi} \chi_1^{0,345}} \right] \quad (3.11)$$

#### Para movimento normal ao eixo

$$\Delta e_2 = \frac{1}{\chi_2 \sqrt{\psi}} \exp \left[ 0,576 \sqrt{\psi} \chi_2 (\chi_2 - 1) \right] \quad (3.12)$$

em que,  $\psi$  é um fator de forma semelhante a esfericidade proposta por WADELL (1933) e  $\chi$  é um fator de forma semelhante a circularidade.

$$\psi = \frac{A_c}{A} \quad (3.13)$$

$$\chi = \frac{d_c}{d_A} \quad (3.14)$$

em que,

$A_c$  = área superficial da esfera equivalente;

$A$  = área superficial da partícula;

$d_c$  = diâmetro da esfera de igual volume;

$d_A$  = diâmetro da esfera circunscrita.

O diâmetro,  $d_A$ , é definida para a área projetada do corpo, paralelo à direção do movimento. A circularidade modificada  $\chi$  é relacionada ao fator de forma,  $K$ , proposto por HEYWOOD (1962), dado pela Equação 3.15.

$$K = \pi \frac{\chi^3}{6} \quad (3.15)$$

para K avaliado para a mesma área projetada.

Para cilindros estes resultados podem ser escritos em termos da relação de aspecto, E, usando as Equações 3.17, 3.18e 3.19.

$$E = \frac{c}{d} \quad (3.16)$$

em que,

$c$  = comprimento do cilindro;

$d$  = diâmetro do cilindro.

$$\psi = \frac{(18E^2)^{1/3}}{(2E+1)} \quad (3.17)$$

$$\chi_1 = \left(\frac{3E}{2}\right)^{1/3} \quad (3.18)$$

$$\chi_2 = \left(\frac{3}{16}\right)^{1/3} \sqrt{\pi} E^{-1/6} \quad (3.19)$$

Também foram utilizadas as Equações 3.20 e 3.21 propostas por ISAACS & THODOS (1967) para o calculo do  $C_D$  e da velocidade terminal.

$$C_D = 0,99 \gamma^{-0,12} E^{-0,08} \quad (3.20)$$

$$V_t = 1,26 \gamma^{0,06} E^{0,04} \sqrt{\frac{D_p g \Delta \rho}{\rho_f}} \quad (3.21)$$

### 3.4- Efeitos de parede

A relação entre as medidas das partículas com os diâmetros dos tubos será determinada pela relação expressa na Equação 3.22.

$$\beta = \frac{D_p}{D_t} \quad (3.22)$$

em que,

$D_p$  = diâmetro da partícula;

$D_t$  = diâmetro do tubo.

### **3.5 Análise estatística**

Foi utilizado o experimento inteiramente casualizado para verificação do efeito do tamanho do tubo de queda, sendo o fator F1 com 3 tratamentos, que foram os tamanhos dos tubos (50, 100, e 150 mm) e 10 repetições para cada forma do produto. O mesmo procedimento foi feito para verificação do efeito da forma, F1 com 3 tratamentos (3 formas das partículas de macaxeira) com 10 repetições, para cada tubo de queda.

Estas análises foram realizadas utilizando-se o software ASSISTAT versão 7.5 (SILVA & AZEVEDO, 2006), os resultados observados foram submetidos a análises de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

## 4. RESULTADOS E DISCURSSÃO

### 4.1 Características físicas

Na Tabela 2 encontram-se os resultados das características físicas com desvio padrão para massa, volume e massa específica das peças de macaxeira, fatiadas geometricamente.

**Tabela 2** - Características físicas com desvio padrão para massa, volume e massa específica das peças de macaxeira.

Caracterização física das peças de macaxeira			
Peças	Massa $\pm$ SD (g)	Volume $\pm$ SD (cm <sup>3</sup> )	Massa específica $\pm$ SD (g.cm <sup>-3</sup> )
Placa plana circular d=15 mm; a=5 mm	1,055 $\pm$ 0,0156	0,884 $\pm$ 0,019	1,193 $\pm$ 0,0177
Cilindro d=15 mm; a=15 mm	3,821 $\pm$ 0,1037	3,534 $\pm$ 0,029	1,081 $\pm$ 0,0293
Cubo Aresta, l =15mm	4,320 $\pm$ 0,5081	3,375 $\pm$ 0,021	1,280 $\pm$ 0,1505

d= diâmetro; a= altura; l = aresta ou lado; SD = desvio padrão

### 4.2 Efeito do tamanho do cilindro de queda na velocidade terminal em água

#### *Placas planas circulares de macaxeira*

Na Figura 2 encontram-se as curvas de deslocamento em função do tempo de queda, para a placa plana circular de macaxeira, nos tubos de queda com diâmetros de 50, 100 e 150 milímetros. Ainda nesta figura foram realizadas regressões lineares da parte reta da curva para que fosse determinada a velocidade terminal dessas partículas, em cada tubo de queda.

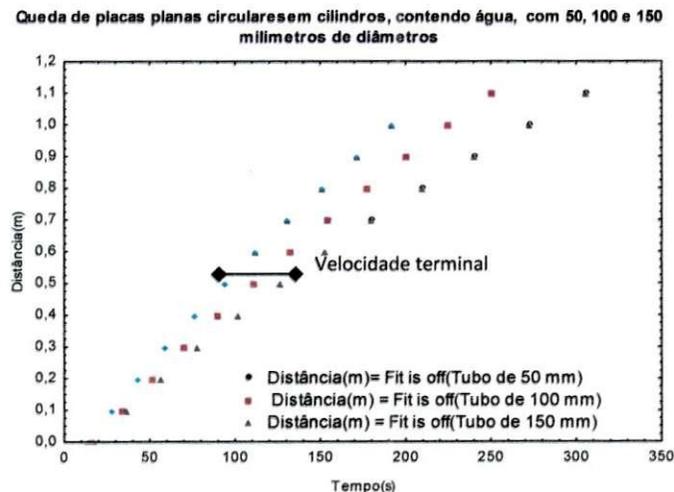
Foi realizada ainda uma comparação entre as médias de velocidades observadas, segundo experimento inteiramente casualizado, onde se tentou verificar a influência do

tamanho da secção de queda na velocidade terminal dessas partículas. Os resultados são mostrados na Tabela 3.

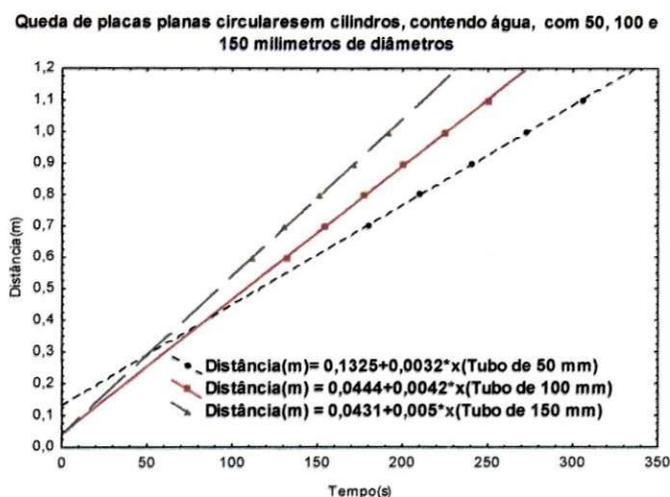
Percebe-se pela Figura 2 que existe um aumento da velocidade terminal, representada pelo coeficiente angular da reta, das placas planas de macaxeira com o aumento da secção do tubo de queda. No entanto, ao se analisar estatisticamente estes dados, Tabela 3, percebe-se que não há diferença significativa entre as velocidades terminais dessas partículas entre os tubos de 50 e 100 mm e nem entre os de 100 e 150 mm, porém as velocidades obtidas com o cilindro de 50 mm são estatisticamente diferentes daquelas obtidas com o cilindro de 150 mm. Isto leva a concluir que para se obter velocidade terminal livre de efeitos de parede o diâmetro do cilindro de queda, para partículas com estas características físicas, deveria ser maior no de 100 mm. Estes resultados foram também confirmados por Gonzaga et al. (2007) em estudo similar a este, com peças de macaxeira.

Percebe-se ainda, observando a Figura 2, de modo geral, que a velocidade terminal só é alcançada após 0,5 m de queda, ou seja, onde se percebe que todos os pontos da curva tendem a se alinhar até o final do trajeto.

(a)



(b)



**Figura 2** – a) Pontos experimentais dos dados de deslocamento em função do tempo, para placas planas de macaxeira durante queda em cilindros com diâmetros de 50, 100 e 150 mm, contendo água e linha indicadora do alcance da velocidade terminal; b) Regressão linear da parte reta da curva para obtenção da velocidade terminal de placas planas circulares de macaxeira.

**Tabela 3** – Comparação entre as médias obtidas das velocidades terminais das placas planas circulares de macaxeira em função do tamanho segundo teste de Tukey.

Tamanho do diâmetro do cilindro de queda	Velocidade terminal em água $v_t(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
Cilindro de PVC de 50 mm	0,00327b
Cilindro de PVC de 100 mm	0,00420 ab
Cilindro de PVC de 150 mm	0,00510 a

d = diâmetro; a = altura; l = aresta; SD = desvio padrão; DMS = 0,00125; MG = 0,00419; CV% = 11,88217. Números seguidos pela mesma letra não são significativamente diferentes, segundo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

### Cilindros de macaxeira

Na Figura 3 encontram-se as curvas de deslocamento em função do tempo de queda, para cilindros de macaxeira, nos tubos de queda com diâmetros de 50, 100 e 150

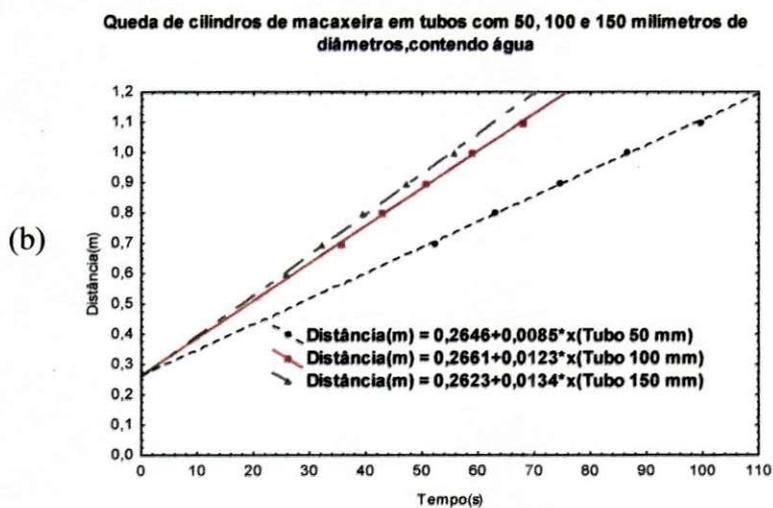
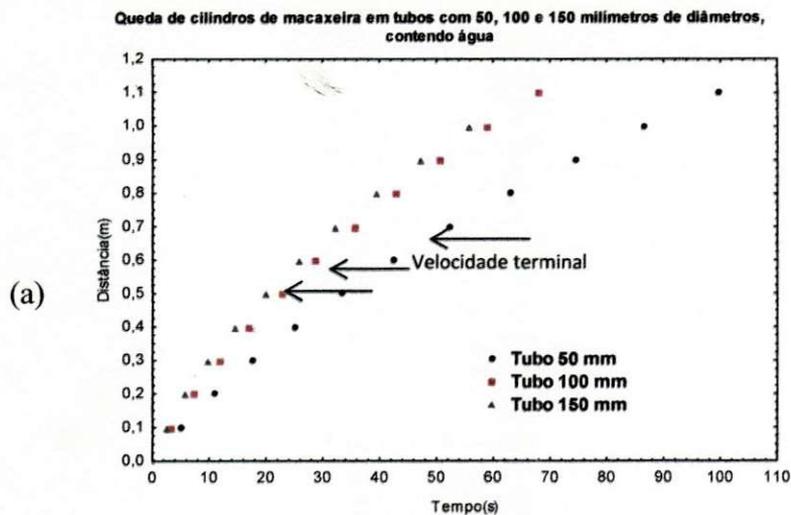
milímetros. Ainda nesta figura foram realizadas regressões lineares da parte mais reta da curva para que fosse determinada a velocidade terminal dessas partículas, em cada cilindro de queda.

Foi realizada ainda uma comparação entre as médias de velocidades observadas, segundo experimento inteiramente casualizado, para se determinar a influência do tamanho da secção de queda na velocidade terminal dessas partículas. Os resultados são mostrados na Tabela 4.

Percebe-se pela Figura 3 que existe um aumento da velocidade terminal, representada pelo coeficiente angular da reta, das placas planas de macaxeira com o aumento da secção do cilindro de queda, GONZAGA et al. (2007) perceberam o mesmo comportamento estudando peças de geometria definidas de macaxeira, em cilindro com estas mesmas dimensões.

No entanto, ao se analisar estatisticamente estes dados, Tabela 4, percebe-se que não há diferença significativa entre as velocidades terminais dessas partículas entre os tubos de 100 e 150 mm. Por outro lado, estes dados são significativamente maiores do que aqueles obtidos no tubo de 50 mm. Isto leva a concluir que existe efeito de parede na determinação da velocidade terminal em água, de cilindros de macaxeira, com as características físicas aqui definidas, em tubo de queda com 50 mm de diâmetro. Em tubos de queda com diâmetros maiores que 100 milímetros, a velocidade terminal dessas partículas se dá em queda livre.

Observando ainda a Figura 3, percebe-se que a velocidade terminal para o tubo de 50 mm inicia-se em torno de 0,7m do cilindro, ou seja, no instante em que este ponto é atingido, a aceleração da partícula se anula e esta cai na sua velocidade terminal.



**Figura 3** – a) Pontos experimentais dos dados de deslocamento em função do tempo, para cilindros de macaxeira durante queda em tubos com diâmetros de 50, 100 e 150 mm, contendo água e linha indicadora do alcance da velocidade terminal; b) Regressão linear da parte reta da curva para obtenção da velocidade terminal dos cilindros de macaxeira.

**Tabela 4** – Comparação entre as médias obtidas das velocidades terminais de cilindros de macaxeira em função do tamanho segundo teste de Tukey.

Tamanho do diâmetro do cilindro de queda	Velocidade terminal em água $v_t(\text{m.s}^{-1})$
Cilindro de 50 mm	0,00847b
Cilindro 100 mm	0,01200 a
Cilindro de 150 mm	0,01343 a

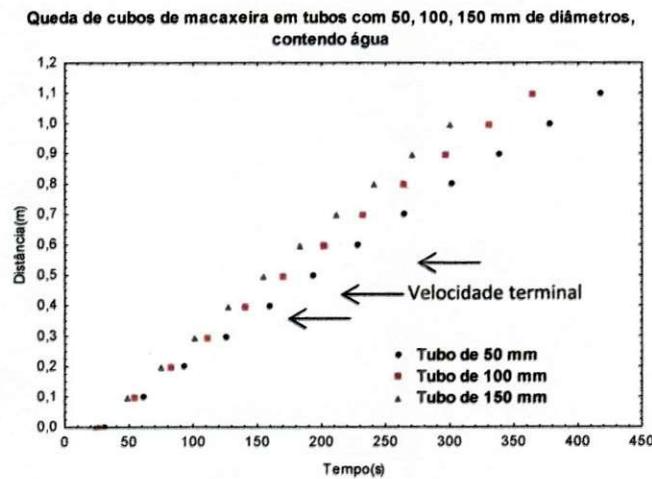
DMS = 0,00310; MG = 0,01130; CV%=10,95424.

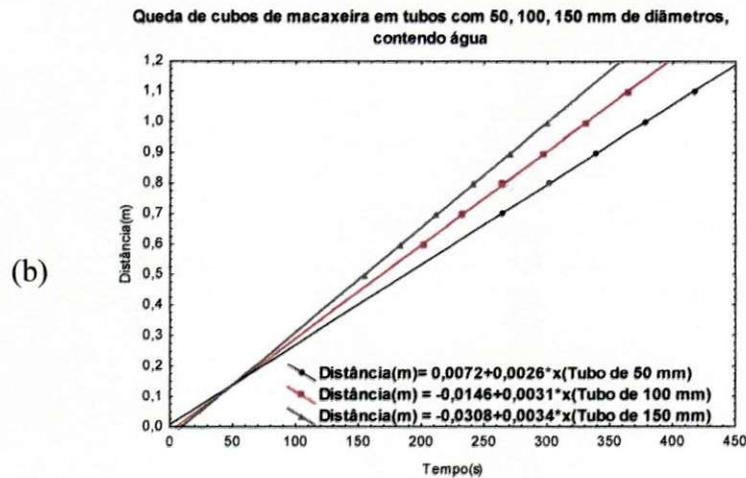
Números seguidos pela mesma letra não são significativamente diferentes, segundo teste de tukey ao nível de 1% de probabilidade.

### Cubos de macaxeira

Na Figura 4 encontram-se as curvas de deslocamento em função do tempo de queda, para cubos de macaxeira, em tubos de queda com diâmetros de 50, 100 e 150 milímetros. Foram também realizadas regressões lineares da parte mais reta da curva para que fosse determinada a velocidade terminal dessas partículas, em cada cilindro de queda.

(a)





**Figura 4** – a) Pontos experimentais dos dados de deslocamento em função do tempo, para cubos de macaxeira durante queda em tubos com diâmetros de 50, 100 e 150 mm, contendo água e linha indicadora do alcance da velocidade terminal; b) Regressão linear da parte reta da curva para obtenção da velocidade terminal dos cubos de macaxeira.

Realizou-se ainda uma comparação entre as médias de velocidades observadas, segundo experimento inteiramente casualizado, para se determinar a influência do tamanho da secção de queda na velocidade terminal dessas partículas. Os resultados são mostrados na Tabela 5.

**Tabela 5** – Comparação entre as médias obtidas das velocidades terminais de cubos de macaxeira em função do tamanho, segundo teste de Tukey.

Tamanho do diâmetro cilindro de queda	Velocidade terminal em água $v_t(m.s^{-1})$
Cilindro de 50 mm	0,00264 a
Cilindro 100 mm	0,00307 a
Cilindro de 150 mm	0,00340 a

DMS = 0,00130; MG = 0,00304; CV%=17,0475.

Números seguidos pela mesma letra não são significativamente diferentes, segundo teste de tukey ao nível de 1% de probabilidade.

Ao se analisar estatisticamente os dados da Tabela 5 percebe-se que não há diferença significativa entre as velocidades terminais dessas partículas entre os tubos de 50, 100 e 150 mm. Isto leva a concluir que não existe efeito de parede na determinação da velocidade terminal em água, de cubos de macaxeira, com as características físicas aqui definidas, em tubos com diâmetros acima de 50 mm.

Observando ainda a Figura 4, percebe-se ainda que a velocidade terminal inicia-se em torno de 0,5m no cilindro de queda de 150; 0,6m no cilindro de queda de 100 e 0,7m no cilindro de queda de 50m, ou seja, a velocidade terminal é atingida um tanto antes quanto maior for o diâmetro do tubo de queda. BRAGA (1997), estudando a velocidade terminal de laranjas em água, também observou tempos diferentes de alcance da velocidade terminal, de acordo com a relação tamanho da fruta/ tamanho do tubo. ZANINNI et al. (2007), estudando Influência do tamanho e da forma da coluna de queda na velocidade terminal de grãos de milho e feijão, também constataram este efeito.

#### 4.3 Efeito da forma da partícula na velocidade terminal

Na Tabela 6 encontra-se os dados de velocidade terminal de todas as partículas em que foi aplicado análise comparativa de médias de velocidade terminal, segundo teste de Tukey, em cada tubo isoladamente, com o intuito de verificar o efeito das características físicas, forma e tamanho, na velocidade terminal.

**Tabela 6** – Comparação das médias de velocidade terminal das partículas em cada tubo: verificação do efeito da forma e tamanho na velocidade terminal.

Forma da partícula	Tubo de 50 mm	Tubo de 100 mm	Tubo de 150 mm
Placa plana	0,00327 b	0,00420b	0,00510 b
Cilindro	0,00547 a	0,01200a	0,01343 a
Cubo	0,00264 b	0,00340 b	0,00340 c
DMS	0,00132	0,00310	0,00129
MG	0,00379	0,00653	0,00731
CV%	13,84768	18,9326	7,03370

As médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Percebe-se pela Tabela 6 que existe influência da forma e do tamanho das partículas de macaxeira na velocidade terminal, visto que em todos os tubos de queda a maior velocidade foi verificada para a partícula de forma cilíndrica. TORRES (2003),

estudando a queda de grãos com diferentes formas (feijão, milho e soja) em túnel de ar, também confirmou a influência da forma da partícula na velocidade terminal.

Nos tubos de 50 e de 100 mm não existem diferenças significativas entre as velocidades terminais obtidas para placa plana circular e cubos de macaxeira. No tubo de 150 mm, percebe-se claramente que a maior velocidade foi alcançada por cilindros e a menor por cubos de macaxeira.

#### 4.4 Coeficiente de arraste e efeito de parede

##### *Coeficiente de arraste*

**Tabela 7** – Coeficiente de arraste das placas circulares, cilindros e cubos obtidos pela equação proposta por ISAACAS E THODOS (1967).

<b>Formas geométricas das peças de macaxeira</b>	<b><math>C_D</math> (adimensional)</b>
Placa plana	1,51
Cilindro	1,20
Cubos	1,41

Os cálculos dos coeficientes de arraste confirmam os resultados obtidos para a velocidade terminal, ou seja, a maior velocidade foi obtida para as partículas cilíndricas e portanto são aquelas que oferecem menor resistência ao arraste, conforme pode-se perceber pela Tabela 7.

##### *Efeito de parede*

Na Tabela 8 estão mostrados os valores do efeito de parede, conforme desenvolvimento da queda das peças em água nos tubos de 50 mm, 100 mm e 150 mm.

**Tabela 8** – Efeito de parede,  $K_p$ , calculado para peças geométricas de macaxeira, durante a queda em tubo de PVC, com 50, 100 e 150 mm de diâmetros.

<b>Diâmetros dos tubos</b>
----------------------------

<b><math>K_p</math> (adimensional)</b>	<b>50 mm</b>	<b>100 mm</b>	<b>150 mm</b>
Placa plana circular: $d=15$ mm; $a=5$ mm	0,2	0,1	0,067
Cilindro: $d=15$ mm; $a=15$ mm	0,3	0,15	0,1
Cubo: $l=15$ mm	0,3	0,15	0,1

O efeito de parede mede a influência que a existência da parede exerce sobre o movimento da partícula sólida. É também um coeficiente de resistência, representado por  $\beta$ , que é medido diretamente pela relação entre a dimensão máxima de resistência da partícula e o diâmetro do tubo de queda. Isto significa que quanto menor for o efeito de parede, mais livremente ocorre o assentamento de partícula na água. Quanto maior o diâmetro do tubo menor será o efeito exercido por essa no movimento da partícula, motivo que justifica os resultados de maior velocidade terminal nos tubos de maior diâmetros, como pode ser visto na Tabela 6.

Segundo BRAGA (1997), quando a velocidade terminal ocorre na região de Newton (regime turbulento) uma dimensão do tubo de queda maior do que quatro vezes a dimensão da partícula, é suficiente para que o movimento se dê em “queda livre”.

Observando a Tabela 8, percebe-se que o efeito de parede, observado durante a queda em água, em todos os casos, é menor para o tubo de 150 mm, o que justifica os resultados maiores de velocidade terminal obtidos com este tubo, estes fatos também foram observados por GONZAGA et al. (2007), ao realizar estudos semelhantes com peças de chuchu, batatinha e cenoura, durante queda em tubos como os mesmos diâmetros que os deste estudo.

## 5. CONCLUSÕES

- Existe influência do tamanho do diâmetro do tubo de queda na velocidade terminal em água de peças geométricas de macaxeira;
- As maiores velocidades terminais em água, para placas planas circulares, cilindros e cubos de macaxeira, ocorreram no tubo de 150 mm de diâmetro;
- A velocidade terminal em cilindro contendo água é fortemente influenciada pelas características físicas de forma e tamanho da partícula, onde as peças em forma de placa plana desenvolveram menor velocidade e apresentaram maior coeficiente de arraste;
- A maior velocidade terminal em água foi alcançada pelas peças de forma cilíndrica;
- Houve influência devido à presença da parede, porém bem inferiores ao coeficiente de arraste de cada partícula, sendo os menores valores de efeito de parede encontrados para as placas planas circulares;
- O efeito de parede observado em placas planas no tubo de queda de 150 mm foi bem menor que os valores encontrados, nesse mesmo tubo, para as demais partículas geométricas.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALVES, A.; CANSIAN, R. L. ;STUART, G.; VALDUGA, E. Alterações na qualidade de raízes de mandioca(*Manihot esculenta* Crantz) minimamente processadas. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 330-337, 2005.

ATAÍDE, C. H, BARROZO, M. A. S., PEREIRA, F.A R. Estudo do movimento de partículas em soluções de hidroxietilcelulose: Efeito de parede e coeficiente de arraste. In: XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, **Anais...**, Uberlândia – MG. v.1, p.29-34,1996.

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

BILANSKI, W. K.; LAL, R. The behavior of thereshed materials in vertical wind tunnel. **Transition of the ASAE**, P.411-413, 1965.

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

CAVALCANTE, A. Alimentos minimamente processados ganham mercado.**Diário do Nordeste**.2005.

CHITARRA, M. I. F. Processamento mínimo de frutas e hortaliças. Lavras: UFLA/FAEPE, 2000. 113 p. Apostila.

CLEMENTE, E. S. **O mercado de vegetais minimamente processados**. Seminário Sobre Hortaliças Minimamente Processadas, Piracicaba, ESALQ, 1999.

CLIFT, R.; GRACE, J.R.; WEBER, M. E. **Bubbles, drops and particles**. New York, 1978.

COUTO, S. M; MAGALHAES, A. C.; QUEIROZ, D. M .; BASTOS, I. T. Parâmetros relevantes na determinação da velocidade terminal de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.7, n.1, p. 141-148, 2003.

DAVIES, C.N. Symposium on Particle Size Analysis. **Inst. Chem. Engrs. & Soc. Chem. Ind.**, London. 1947.

DUARTE, M. E. M. ; CAVALCANTI-MATA, M. E. R. M.; ALMEIDA, F. A. C. Características Físicas de sementes. In: Francisco de Assis Cardoso Almeida; Maria Elita Martins Duarte; Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata. (Org.). **Tecnologia de Armazenagem em Sementes**. 1 ed. Campina Grande: Marconi, v. 1, p. 191-270, 2006.

FRANCISCO, F. G.; USBERTI, R. Propriedades físicas de cultivares de feijão. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 31. Salvador. **Anais...**, Salvador, BA: SBEA, CD-ROM, 2002.

GONZAGA, T. W. C.; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; PIMENTEL, N. W. P.; SANTANA, P. B.; OLIVEIRA, C. C. DE A. Características físicas e hidrodinâmicas de chuchu minimamente processado. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina grande, v.9, n.1, p.83-98, 2007.

HEYWOOD, H. Symposium Interaction Fluids and Particles. **Institute Chemical Engineering**. London. p 1-8, 1962.

HEISS, J. F., COULL, J. **Chemical Engineering Program**. p 133-140, 1952.  
IAL – Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análises de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2005. 1018p.

HEYWOOD, H. Symposium Interaction Fluids and Particles. **Institute Chemical Engineering**. London. p 1-8, 1962.

ISAACS, J. L., THODOS, G. **Canadian Journal Chemical Engineering**. p 150-155, 1967.

IAL- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4 ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2005. 1018p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/download>>. Acesso em: 1/02/ 2008.

ISAACS, J. L., THODOS, G. **Canadian Journal Chemical Engineering**. p 150-155, 1967.

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

LIMA, A.S. et al. Faça o processamento mínimo de alimentos e ganhe dinheiro. **Boletim Técnico de Hortaliças**, Lavras-MG. nº 60. 1ª ed/2000. Disponível em: <<http://www.ufla.br>>. Acesso em: 04 mar, 2003.

LUENGO, R. F.; LANA, M. M. **Processamento mínimo de hortaliças**. Brasília: Embrapa, 1997.

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

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

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

MORETTI, C.L.; ARAUJO, A.L.; MARQUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C.; Respiratory activity and browning of minimally processed sweet potatoes. **Horticultura Brasileira**. Brasília, v.20,3, p.497-500, 2002.

NANTES, J. F. D.; LEONELLI, F. C. V. A estruturação da cadeia produtiva d vegetais minimamente processados. **Revista FAE**. v.3, n.3, p.61-69, 2000.

OTSUBO & AGUIAR, 2001

PIRES E.F; SHINOHARA, N.K.S; FREITAS, F.; SILVEIRA, K. C.; PEREZ, A. Estabilidade de vegetais minimamente processados. Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Nutrição – Laboratório de Experimentação e Análises de Alimentos (LEAAL), 2005.

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

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Hortalças minimamente processadas**. Série Mercado. 2008.

SILVA J. S.; CORRÊA, P. C. Estrutura, composição e propriedades dos grãos. In: SILVA, J. S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas, Viçosa, p. 21-37, 2000.

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

SOUSA (2001)

TORRES, H. L. H. **Influencia do tamanho e da forma da secção da coluna de queda sobre os parâmetros aerodinâmicos de grãos**. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.

WADELL, H. **Journal Geology**. p 310-331, 1933.

ZANINI, H. L. H. T.; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; PIMENTEL, L. W. Influência do tamanho e da forma da coluna de queda na velocidade terminal de grãos de milho e feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, n.1, p.53-61, 2008