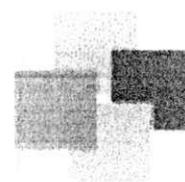




UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola

CTRN



*Área de Armazenamento e Processamento
de Produtos Agrícolas*

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

*Parâmetros hidrodinâmicos de vegetais fatiados em
geometrias definidas*

Taciana Walesca Cruz Gonzaga

ORIENTADORES :

Profa. Dra. Maria Elita Martins Duarte

Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Taciana Walesca Cruz Gonzaga

*Parâmetros hidrodinâmicos de vegetais fatiados em
geometrias definidas*

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

CAMPINA GRANDE-PB
Junho/2006



| | |
|-------|---|
| G642p | <p>Gonzaga, Taciana Walesca Cruz Parametros hidrodinamicos de vegetais fatiados em geometrias definidas / Taciana Walesca Cruz Gonzaga. - Campina Grande, 2006. 75 f.</p> <p>Dissertacao (Mestrado em Engenharia Agricola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.</p> <p>1. Transporte Hidrodinamico 2. Coeficiente de Arraste 3. Velocidade Terminal 4. Geometria Regular 5. Dissertacao I. Duarte, Maria Elita Martins, Dra. II. Mata, Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti, Dr. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título</p> <p>CDU 631.565:621.643(043)</p> |
|-------|---|



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

CTRN
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais

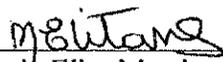
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

TACIANA WALESKA CRUZ GONZAGA

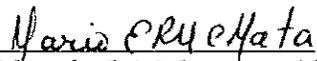
PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DE VEGETAIS FATIADOS EM
GEOMETRIAS DEFINIDAS

BANCA EXAMINADORA

PARECER


Dra. Maria Elita Martins Duarte-Orientadora

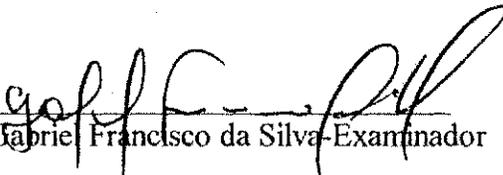
APROVADO


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

APROVADO


Dr. Francisco de Assis Santos e Silva-Examinador

APROVADO


Dr. Gabriel Francisco da Silva-Examinador

APROVADO

JUNHO - 2006

AGRADECIMENTOS

A Deus, força maior que me ilumina e me guia sempre, sem Ele jamais teria conseguido chegar ao fim desta caminhada.

A Nossa Senhora, Mãe bondosa que ilumina meus caminhos.

Aos meus pais que me deram a vida, em especial a minha mãe, por me ouvir, me aconselhar e estar sempre ao meu lado.

Aos meus irmãos Tany Wanessa, Thales Winícius e Tércio Wannucci por tudo.

Aos meus orientadores Maria Elita Martins Duarte e Mario Eduardo R. M.C. Mata pela amizade, incentivo, apoio e paciência que tiveram comigo durante esta caminhada.

À Universidade Federal de Campina Grande, pela oportunidade e apoio concedidos para cursar o mestrado.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas de mestrado, pelo companheirismo, pelos momentos de estudo e pela troca de conhecimentos.

À Veruschka Vasconcelos pela amizade e companheirismo.

Aos professores da UFCG, Rossana Figueiredo, Alexandre Queiroz, Josivanda Palmeira, Juarez Pedrosa, Francisco de Assis Santos e Francisco de Assis Alneida, pela amizade e por transmitirem seus conhecimentos da melhor forma possível.

Às secretárias Rivanilda e Cida por sempre me receberem com um sorriso incentivador.

Aos colegas Luizinho e Renato pela amizade e os momentos de alegria.

A todos que contribuíram, de uma forma ou de outra, nesta minha caminhada.

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS | vii |
| LISTA DE TABELAS | viii |
| RESUMO | xii |
| ABSTRACT | |
| 1- INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivos | 3 |
| 1.1.1 Objetivos específicos | 3 |
| 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1- Teor de água | 4 |
| 2.2- Características físicas | 5 |
| 2.2.1 Forma e tamanho | 5 |
| 2.2.2 Massa específica | 6 |
| 2.2.3 Volume | 7 |
| 2.2.4 Área superficial | 7 |
| 2.2.5 Porosidade | 8 |
| 2.2.6 Área projetada | 9 |
| 2.3- Propriedades hidrodinâmicas | 10 |
| 2.3.1 Características hidrodinâmicas | 10 |
| 2.3.2 Orientação de partículas | 12 |
| 2.3.3 Classificação de partículas | 13 |
| 2.3.4 Transporte de partículas | 14 |
| 2.3.4.1 Velocidade terminal e coeficiente de arraste | 14 |
| 2.3.5 Efeito de parede | 29 |
| 3- MATERIAL E MÉTODOS | 35 |
| 3.1. Teor de água | 35 |
| 3.2 Características físicas | 35 |
| 3.2.1 Volume | 36 |
| 3.2.2 Massa específica real e aparente | 36 |
| 3.3 Propriedades hidrodinâmicas | 36 |
| 3.3.1 Velocidade terminal | 36 |
| 3.3.1.1 Construção do equipamento | 36 |
| 3.3.1.2 Procedimento experimental | 37 |
| 3.3.1.3 Coleta de dados | 37 |
| 3.3.1.4 Velocidade terminal teórica | 38 |
| 3.3.1.5 Efeito de parede | 39 |
| 3.4 Análise estatística | 40 |

| | |
|--|----|
| 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO | 41 |
| 4.1 Teor de água. | 41 |
| 4.2 Características físicas | 41 |
| 4.3 Parâmetros hidrodinâmicos | 43 |
| 4.3.1 Velocidade terminal | 43 |
| 4.3.1.1 Velocidade terminal calculada | 43 |
| 4.3.1.2 Velocidade terminal experimental | 45 |
| 4.3.1.2.1 Velocidade terminal do chuchu | 47 |
| 4.3.1.2.2 Velocidade terminal da batata | 55 |
| 4.3.1.2.3 Velocidade terminal da cenoura | 62 |
| 4.3.2 Coeficiente de arraste | 65 |
| 4.3.3 Efeito de parede | 67 |
| 5- CONCLUSÕES | 69 |
| 6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 70 |

LISTA DE FIGURAS

| FIGURAS | | PÁGINA |
|----------|---|--------|
| Figura 1 | Partículas axissimétricas em estado de translação | 23 |
| Figura 2 | Paralelepípedo retangular em estado de translação | 27 |
| Figura 3 | Relação de arraste para paralelepípedos retangulares | 29 |
| Figura 4 | Detalhes da montagem e funcionamento do equipamento usado para determinar a velocidade terminal das peças de vegetais em água | 38 |
| Figura 5 | Relação entre diâmetros da partícula e do tubo para peças planas, circulares e quadradas. | 68 |
| Figura 6 | Relação entre diâmetros da partícula e do tubo para peças cilíndricas e paralelepípedos. | 68 |

LISTA DE TABELAS

| TABELAS | | PÁGINA |
|-----------|---|--------|
| Tabela 1 | Resumo comparativo de movimento de esfera, discos e cilindros circulares | 17 |
| Tabela 2 | Coefficiente de arraste e velocidade terminal para cilindros com movimento secundário. | 21 |
| Tabela 3 | Efeito de parede na queda livre de uma esfera de diâmetro D_p ao longo do eixo de um tubo da coluna D_t | 31 |
| Tabela 4 | Efeito de parede na subida de laranjas e modelos esféricos ao longo do eixo de um tubo de diâmetro $D_t = 250$ mm | 33 |
| Tabela 5 | Características físicas das formas geométricas de chuchu | 41 |
| Tabela 6 | Características físicas das formas geométricas de batata | 42 |
| Tabela 7 | Características físicas das formas geométricas de cenoura | 42 |
| Tabela 8 | Velocidade terminal calculada com base nas características físicas dos produtos e do fluido (água), por duas formas: v_{t1} (Equação proposta por Mohsenin, considerando o $C_D = 1,17$ proposto por Clift et al, para placas); v_{t2} (Equações propostas por Issacs e Thodos, com o C_D também proposto pelos mesmos autores) | 43 |
| Tabela 9 | Velocidade terminal calculada com base nas características físicas dos produtos e do fluido (água), por três formas: v_{t1} (Equação proposta por Mohsenin, considerando o $C_D = 1,2$); v_{t2} (Equações propostas por Issacs e Thodos, com o C_D proposto pelos mesmos autores); v_{t3} (v_t calculado pela Equação de Mohsenin com C_D proposto por Heiss e Coull) | 44 |
| Tabela 10 | Velocidade terminal (m/s) das formas geométricas de chuchu, batata e cenoura obtidas com diferentes diâmetros do tubo de queda. | 45 |
| Tabela 11 | Análise da variância da velocidade terminal das placas quadradas de chuchu em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes tamanhos (lado) das placas planas quadradas(F2). | 47 |
| Tabela 12 | Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do chuchu, para diferentes diâmetros dos tubos de queda e diferentes tamanhos das placas de chuchu. | 48 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabela 13 | Valores médios da velocidade terminal do chuchu para interação entre o diâmetro do tubo e o diâmetro da placa. | 48 |
| Tabela 14 | Análise de variância da velocidade terminal em água do chuchu, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes diâmetros dos discos de chuchu (F2). | 49 |
| Tabela 15 | Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do chuchu, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes diâmetros dos discos. | 50 |
| Tabela 16 | Valores médios da velocidade terminal de chuchu para interação entre o diâmetro do tubo e o diâmetro do disco. | 50 |
| Tabela 17 | Análise de variância da velocidade terminal de chuchu em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes dimensões de paralelepípedos (F2). | 51 |
| Tabela 18 | Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do chuchu, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes dimensões dos paralelepípedos. | 52 |
| Tabela 19 | Valores médios da velocidade terminal do chuchu para interação entre o diâmetro do tubo e as dimensões dos paralelepípedos. | 52 |
| Tabela 20 | Análise de variância da velocidade terminal de chuchu em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes dimensões de cilindros (F2). | 53 |
| Tabela 21 | Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do chuchu, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes dimensões dos cilindros. | 54 |
| Tabela 22 | Valores médios da velocidade terminal do chuchu para interação entre o diâmetro do tubo e as dimensões dos cilindros. | 54 |
| Tabela 23 | Análise de variância da velocidade terminal da batata em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes diâmetros das placas (F2). | 55 |
| Tabela 24 | Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da batata, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes tamanhos de placas. | 56 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabela 25 | Análise de variância da velocidade terminal da batata em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes diâmetros das placas (F2). | 56 |
| Tabela 26 | Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da batata, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes diâmetros de placas. | 57 |
| Tabela 27 | Valores médios da velocidade terminal da batata para interação entre o diâmetro do tubo e o diâmetro do disco. | 58 |
| Tabela 28 | Análise de variância da velocidade terminal de chuchu em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes dimensões de paralelepípedos (F2). | 58 |
| Tabela 29 | Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da batata, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes dimensões de paralelepípedos. | 59 |
| Tabela 30 | Valores médios da velocidade terminal da batata para interação entre o diâmetro do tubo e as dimensões dos paralelepípedos. | 60 |
| Tabela 31 | Análise de variância da velocidade terminal de chuchu em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes dimensões de cilindros (F2). | 60 |
| Tabela 32 | Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da batata, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes dimensões de cilindros. | 61 |
| Tabela 33 | Valores médios da velocidade terminal da batata para interação entre o diâmetro do tubo e as dimensões dos cilindros. | 62 |
| Tabela 34 | Análise de variância da velocidade terminal em água da cenoura, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes diâmetros das placas (F2). | 62 |
| Tabela 35 | Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da cenoura, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes tamanhos das placas. | 63 |
| Tabela 36 | Análise de variância da velocidade terminal da cenoura em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes diâmetros das placas (F2). | 64 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabela 37 | Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da batata, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes diâmetros dos discos. | 64 |
| Tabela 38 | Coefficiente de arraste das placas circulares e quadradas de chuchu, batata e cenoura obtidos pela equação proposta por ISAACS E THODOS (1967). | 65 |
| Tabela 39 | Coefficientes de arraste para cilindros e paralelepípedos de chuchu e batata obtidos pela Equação: proposta por ISAACS E THODOS (1967). | 66 |
| Tabela 40 | Efeito de parede dos produtos estudados nos tubos de 50 – 150 mm | 67 |

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo estudar os parâmetros hidrodinâmicos de chuchu, batata e cenoura fatiados, em formas geométricas definidas. Para atingir estes resultados foram determinados: a) as características físicas (massa, volume, massa específica) de chuchu, cenoura e batata, fatiados das seguintes formas: discos com diâmetros de 8, 10 e 12 mm, respectivamente e altura de 5 mm; placas quadradas, com lado de 8, 10 e 12 mm, respectivamente e altura de 5 mm; cilindros com diâmetros de 8 e 12 mm e altura de 20 e 30 mm, respectivamente; formas de paralelepípedos com lados de 8 e 12 mm e altura de 20 e 30 mm, respectivamente; b) velocidade terminal em água, coeficiente de arraste e efeito de parede dessas partículas submetidas à queda em tubos com 50, 100 e 150 mm de diâmetro e 1000 mm de altura; c) estudar os efeitos da forma e tamanho das peças de chuchu, batata e cenoura e, também, do tamanho do tubo de queda na velocidade terminal dessas partículas em água. Para determinação da velocidade terminal foram utilizados tubos cilíndricos de PVC com acrílico transparente, de 50, 100 e 150 mm de diâmetro, respectivamente e 1,0 m de altura. Para determinação da velocidade terminal foram utilizadas 10 amostras de cada tipo de forma geométrica (discos, placas planas, cilindros e paralelepípedos). O experimento foi acompanhado por uma câmera VHS, em que o cronômetro, colocado próximo ao tubo, era filmado simultaneamente ao experimento. A retirada de dados foi feita utilizando-se os recursos de câmera lenta de um aparelho de vídeo cassete. Para analisar os dados experimentais foram utilizadas as equações dadas por MOHSENIN (1978), CLIFT et al. (1978) e ISAACS e THODOS (1967). Concluiu-se que: a massa específica unitária (real) do chuchu, batata e cenoura com teores de água de 89,84%, 81,93% e 92,48% b.u., respectivamente, foram de 1007,1073 e 1006 kg.m⁻³; a velocidade terminal aumenta à medida que se aumenta o diâmetro do tubo de queda para todas as peças, portanto existe influência do tamanho do tubo de queda na velocidade terminal de partículas em água; os cilindros e os paralelepípedos de chuchu e batata, de modo geral, apresentaram velocidades maiores do que os discos e placas, independente do tamanho do tubo de queda, evidenciando a influência da forma da partícula na velocidade terminal em água; a velocidade terminal calculada pela equação sugerida por ISAACS e THODOS (1967) ofereceu uma boa aproximação da velocidade terminal experimental, principalmente para as formas geométricas do chuchu; a equação citada por MOHSENIN (1978), com o CD sugerido por HEISS e COULL (1952), fornece valores muito próximos dos experimentais para a batata; o coeficiente de arraste das placas circulares e quadradas de chuchu, batata e cenoura obtidos pela equação proposta por ISAACS e THODOS (1967) foram 1,35; 1,41 e 1,46 e para peças cilíndricas e paralelepípedos foram 0,91; o efeito de parede foi mais presente nos tubos de 50 mm, para as peças cilíndricas e em forma de paralelepípedos ($\beta = 0,34$) e o menor efeito foi verificado para discos e placas planas quadradas de 8 mm, no tubo de 150 mm ($\beta = 0,05$).

Palavras-chave: transporte hidrodinâmico, coeficiente de arraste, velocidade terminal, geometria regular.

ABSTRACT

This research has objective of studying the hydrodynamics parameters of sliced chayote, potato and carrot, at defined geometries forms. The follow parameters were determined to achieve these results: a) the physical characteristics (mass, volume, specific mass) of chayote, carrot and potato, sliced as follow: disks whose diameters measured 8, 10 and 12 mm respectively, and 5 mm of height; square planes whose sides were 8, 10 and 12 mm respectively and 5 mm of height; cylinders whose diameters were 8 and 12 mm and height of 20 and 30 mm, respectively; rectangular shapes whose sides measured 8 and 12 mm and height was 20 and 30 mm, respectively; b) water terminal speed, drag coefficient and wall effect of these particles. That were submitted to falls in tubes whose diameters were 50, 100 and 150 mm and the height was 1000 mm; c) the study of the effects of the shape and size of the pieces of chayote, potato and carrot and of the size of the fall tube at the terminal speed of these particles in water. PVC cylindrical tubes, with transparent acrylic, whose were 50, 100 and 150 mm, respectively, and height of 1,0 m were used to the determination of the terminal speed. The samples of each kind of geometric shape (disks, plane plates, cylinders and rectangular) were also used to the determination of the terminal speed. The experiment was followed by a VHS camera. The chronometer, placed near the tube, was filmed simultaneously to the experiment. The data removing was done through the slow camera resources of a video cassette apparel. The equations that were given by MOHSENIN (1978), CLIFT et al. (1978) and ISAACS and THODOS (1967) were used to analyze the experimental data. It was concluded that: the unitary specific mass (real) of chayote, potato and carrot, whose water contents were 89,84%, 81,93% and 92,48% w.b., respectively, was 1007; 1073 and 1006 Kg.m^{-3} ; the terminal speed increases when the size of the fall tube at the terminal speed of water particles; the cylinders and the rectangular shapes of chayote and potato, in general, presented bigger speeds than the disks and plates, independently of the size of the fall tube, evidencing the influence of the shape of the particle at the terminal speed in water; the terminal speed, calculated through the equation suggested by ISAACS and THODOS (1967), offered a good approximation of the terminal speed, mainly to the geometric shapes of chayote; the equation cited by MOHSENIN (1978), with the C_D suggested by HEISS and COULL (1952), supply values much near to the experimental ones for the potato; the drag coefficient of the circular and square planes of chayote, potato and carrot, that was obtained through the equation proposed by ISAACS and THODOS (1967) were 1,35; 1,41 and 1,46; and were 0,91 to the cylindrical pieces and rectangular shapes; the wall effect was more present at the tubes of 50 mm, to the cylindrical pieces and rectangular shape ones ($\beta = 0,34$) and the minor effect was verified to disks and square plane plates of 8 mm, in the tube of 150 mm ($\beta = 0,05$).

Key-words: hydrodynamic transport; drag coefficient; terminal speed; regular geometry.

1 INTRODUÇÃO

A produção agrícola do Brasil é alta, produzindo praticamente todos os itens essenciais à alimentação humana e animal, e em muitos casos em quantidades suficientes para o abastecimento do mercado interno e para a exportação. No entanto, ainda se convive no país com inaceitáveis perdas desses produtos devido a técnicas inadequadas adotadas no manuseio após a colheita, no transporte e no armazenamento.

Na década de 70 surgiram nos EUA vegetais pré-processados, reunindo a praticidade e a conveniência. Esse mercado se expandiu e continua crescendo em todo mundo, principalmente nos países desenvolvidos, justamente para atender a demanda mundial de vegetais frescos Minimamente Processados (VMP) ou "prontos para o consumo" (BERBARI et al., 2001). Estima-se que, no ano de 1995, mais da metade dos dólares gastos em lojas de conveniência com a compra de alimentos, foram voltados para a aquisição de itens prontos para o consumo, dentre eles, VMPs (LIMA et al., 2003).

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 (PAZINATO, 1999).

A matéria-prima que os origina é produzida de maneira mais criteriosa que a dos produtos convencionais, principalmente no que diz respeito à utilização de defensivos e fertilizantes. A matéria-prima é selecionada, lavada, cortada e embalada dentro de padrões de qualidade exigidos pelo mercado. 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 e LANA, 1997).

Os vegetais minimamente processados foram introduzidos no Brasil em 1994, na cidade de São Paulo, em 1996 a demanda destes produtos aumentou significativamente, o que ocasionou o aparecimento de inúmeras indústrias processadoras. O maior potencial de mercado no Brasil concentra-se nas regiões sul e sudeste (CLEMENTE 1999).

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).

Os insumos destinados ao processamento dos vegetais minimamente processados 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, geralmente importadas. 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).

O transporte de pequenos sólidos é uma técnica conhecida e teoricamente bem estabelecida, mas muitas indústrias manuseiam sólidos de pequenas dimensões e necessitando usar tubos de transporte para seus materiais, encontram apenas informações limitadas na literatura.

A interação sólido-fluido é determinante para o projeto, avaliação e operação de diversos equipamentos de indústrias alimentícias. 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, bem como suas propriedades físicas.

Dentre as propriedades hidrodinâmicas dos produtos, a velocidade terminal da partícula, o coeficiente de arraste e o efeito de parede, onde estão envolvidas as

variáveis como: diâmetro do duto e o volume do fluido são estudos de real importância para o bom dimensionamento de máquinas transportadoras (TORRES, 2003).

Diante de tantas variações e complexidade que implicam os sistemas de transporte, torna-se necessário otimizar a Engenharia para emprega-la na produção agrícola, esta otimização se dá através de novas informações das propriedades físicas e hidrodinâmicas que surgem da evolução das ciências agrárias, possibilitando a formulação e a evolução de novos projetos de máquinas e equipamentos, evitando o desperdício do produto.

Contudo, o comportamento de determinados produtos em sistemas de transporte, bem como o dimensionamento adequado e sua otimização, ainda deverão ser pesquisadas, sendo ainda necessário conhecer em profundidade o comportamento dinâmico desses produtos em sistemas de transporte hidrodinâmico.

Desta forma, o estudo constituiu-se em determinar as propriedades hidrodinâmicas de vegetais fatiados, tendo como objetivos:

1.1 Objetivos

- ❖ Determinar as características físicas (tamanho, forma, volume, massa específica e porosidade) dos vegetais fatiados.
- ❖ Determinar os parâmetros hidrodinâmicos: velocidade terminal, coeficiente de arraste e efeito de parede dos vegetais submetidos em tubo de queda com 50, 100 e 150 mm de diâmetro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conhecimento das propriedades físicas dos materiais biológicos é de fundamental importância de projetos em engenharia envolvendo dimensionamento de máquinas e equipamentos.

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

2.1. Teor de água

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

Segundo COUTO et al. (2003) o teor de água dos frutos de café afeta significativamente os valores da velocidade terminal do produto. A velocidade terminal dos frutos diminui com a redução do teor de água.

Ao estudarem a velocidade terminal de grãos de sorgo e milho em função do teor de água, SILVA et al. (2002) observaram que a velocidade terminal aumenta com a elevação da quantidade de água da massa dos grãos.

SOUSA (2001), estudou duas variedades de girassol: Cargill C11 (Brasileira) e Morgan 734 (Argentina) com teores de água aproximados de 3 a 12% e observou que com o aumento do teor de água a velocidade terminal experimental aumentou, sendo maior para a variedade Argentina em relação à Brasileira.

2.2. Características físicas

O conhecimento das características físicas é de fundamental importância, principalmente, quando se deseja realizar o projeto de uma máquina ou de uma unidade de processamento ou beneficiamento.

2.2.1 Forma e tamanho

O tamanho e forma dos produtos agrícolas são características intrinsecamente ligadas e por este motivo, difícil de estudá-las separadamente, visto que para os cálculos de fatores de forma utilizam-se suas medidas de tamanho. 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 à 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).

Para MOHSENIN (1978) o conhecimento dessas propriedades pode contribuir com dados importantes e essenciais para a Engenharia, no projeto de máquinas, estruturas, processos e controles na análise e determinação da eficiência de uma máquina ou na sua operação.

Para DUARTE (2006) a quantidade de medidas que deve ser feita de um produto depende da regularidade de sua forma, ou seja, quanto mais irregular for um produto mais medidas devem ser feitas.

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

2.2.2 Massa específica

A massa específica real é determinada pela relação entre a massa do produto em gramas e o volume do produto em cm^3 .

$$\text{Massa específica real} = \frac{\text{massa do produto (g)}}{\text{volume do produto (cm}^3\text{)}} \quad (1)$$

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

A massa específica aparente é determinada pela relação entre a massa de uma quantidade do produto contida em um recipiente e o volume do recipiente.

$$\text{Massa específica aparente} = \frac{\text{massa contida em um recipiente (g)}}{\text{volume do recipiente (cm}^3\text{)}} \quad (2)$$

Segundo SASSERON (1980) dentre as diversas propriedades físicas de produtos agrícolas, a massa específica aparente e a porosidade sofrem notada influência do percentual e do tamanho das impurezas presentes na massa dos grãos.

De acordo com BENEDETTI (1987) a massa específica de grãos de soja e de amendoim diminuem quando há o aumento do teor de água dos mesmos.

2.2.3 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.

Para placas circulares e cilindros, o volume é determinado por:

$$\text{Volume} = \pi r^2 h \quad (3)$$

em que h é a altura da placa ou cilindro e r é o raio.

Para placas cúbicas e paralelepípedos, o volume é determinado por:

$$\text{Volume} = a^2 h \quad (4)$$

em que a é o lado da placa ou paralelepípedo e h é a altura da placa ou paralelepípedo.

2.2.4 Área superficial

Nas investigações relatadas sobre transporte de partículas em meio fluido, o conhecimento da área superficial é um dado fundamental no estudo da atuação das forças exercidas pelo fluido sobre a partícula e, também, para entender o comportamento da partícula imersa, ângulo de repouso e orientação (BRAGA, 1997).

Dentre os métodos relatados para medir área superficial, MOHSEIN (1978) cita um método em que maçãs eram descascadas em tiras e a soma das áreas planimetradas, do traçado de tiras, era considerada como área superficial da maçã.

MILLER et al. (1959) relatam alguns métodos para determinação da área superficial de hastes e folhas: imprimir a superfície em um papel e medir a área com um planímetro, uso de projetor fotográfico semelhante ao método usado para grãos por CURRAY (1951). No entanto, Jenkins citado por BRAGA (1997) testou os métodos acima mencionados e assegurou que o método do planímetro é o mais seguro e mais rápido.

2.2.5 Porosidade

A porosidade tem importância no estudo da hidrodinâmica, aerodinâmica e transferência de calor, no dimensionamento de ventiladores, na determinação da capacidade estática, entre outras aplicações na Engenharia.

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

A porosidade é a quantidade de espaços vazios, ocupados pelo ar, existente em uma massa de grãos, podendo variar de 30 a 50%, sendo determinada por métodos diretos, volume de líquido acrescentado à massa de grãos e por métodos indiretos, como o uso de picnômetro de comparação a ar (SASSERON, 1980).

Para BENEDETTI (1987), a porosidade aumenta com o aumento da umidade do produto.

Com a umidade variando de 4 a 20%, base seca, a porosidade das sementes de girassol indiana Morden, aumentou de 34,3 para 43,3% (GUPTA e DAS, 1997).

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

2.2.6 Área projetada

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

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

$$\text{Diâmetro} = L \times E \quad (5)$$

em que,

L = leitura da dimensão feita, m.

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

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

2.3 Propriedades hidrodinâmicas

2.3.1 Características 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 hidráulicamente.

No transporte hidráulico de frutas o escoamento do fluido ocorre em torno dos sólidos e o problema envolve a ação das forças exercidas pelo fluido nesses sólidos, sendo assim é necessário ter um conhecimento das propriedades físicas que afetam o comportamento hidrodinâmico, ou seja, estudar partículas dinâmicas em termos de coeficiente de arraste e velocidade terminal (BRAGA, 1997).

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

Ainda em seus experimentos BRAGA (1997) analisou o comportamento da laranja imersa em água e relacionando seu ângulo de repouso, esfericidade e densidade com o estado em que se encontrava a fruta (sadia, murcha, estragada em parte, totalmente estragada), concluiu que laranjas imersas em água tendem a situação de equilíbrio padrão. As frutas consideradas sadias mantinham-se equilibradas e com ângulo de orientação compreendido entre 14 e 25°, enquanto que quando murchas, tendiam a manter uma inclinação nula da columela central com relação ao nível da água, o que permitia distinguir uma laranja sadia de uma estragada.

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 observaram que os grandes cilindros não se comportaram como sólidos esféricos ou próximos 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 da velocidade em função da porosidade e extrapolando a curva para a porosidade = 1, e que a diferença de densidade fluido-partícula foi o efeito mais pronunciado nas características de fluidização e transporte.

Para determinar a velocidade terminal de cerejas em água, TENNES et al. (1969) utilizaram um recipiente de vidro com 0,38 m de diâmetro, 0,61 m de profundidade contendo água até uma altura de 0,56 m. Ao lado do recipiente foram colocados uma escala e um cronômetro. À medida que as cerejas eram soltas, sua queda era acompanhada por uma câmera fotográfica automática de 8 mm, com velocidade de 32 chapas por segundo. Dos dados coletados a partir do filme foi plotada a curva do tempo em função do deslocamento. No experimento também foi determinada a velocidade terminal teórica de três diferentes formas; usando a medida dos três diâmetros medidos, em três direções mutuamente perpendiculares, o diâmetro da esfera equivalente e o diâmetro da média geométrica. Desse estudo foi concluído que a velocidade terminal teórica foi duas vezes maior que a velocidade terminal experimental, e que esta diferença é devido a força causada pelo movimento rotacional da fruta durante sua descida.

O comportamento de maçãs em água, como orientação (inserção do 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 da água necessária para amortecer a queda da fruta, foram estudados por MATTHEWS et al. (1965) e DEWEY et al. (1966). A velocidade terminal foi determinada pela liberação da fruta do fundo do recipiente de 0,381 m de diâmetro e seu movimento foi filmado. Com os dados obtidos do filme, foi plotado um gráfico de deslocamento em função do tempo e deste gráfico determinaram a velocidade terminal; os valores foram maiores do que os encontrados experimentalmente. Segundo os autores esta diferença é atribuída ao efeito

de parede (relação $D_p/D_t = 0,2$). No entanto, foi admitido pelos autores que devido a pequena profundidade do recipiente utilizado para o estudo, provavelmente a fruta não tenha atingido a velocidade terminal.

2.3.2 Orientação de partículas

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. Neste estudo também foi analisado o comportamento de vagens com 1 e 2 sementes, com o aumento da velocidade do fluxo de ar, as vagens com 1 semente colocavam-se numa posição de resistência, posicionando-se de pé; a este fenômeno de levantar a vagem com o aumento da velocidade de fluxo e de voltar a posição de repouso quando se reduzia a velocidade, a autora denominou de efeito “joão teimoso” por lembrar um brinquedo de mesmo nome. As vagens com 2 sementes movimentavam-se em velocidade terminal menor que as outras partículas (sementes inteiras e vagens com 1 semente), provavelmente, devido ao efeito “bóia”, em que o espaço livre entre as sementes e a vagem funcionava como ar dentro de uma bóia, fazendo-a flutuar.

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).

Em estudos aerodinâmicos de grãos, BILANSKI et al. (1962) e BILANSKI e 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 é explicada pelo fato da força aerodinâmica no grão assimétrico não passar pelo centro de gravidade nem ser paralelo à velocidade de ar. Esta força pode ser considerada como a soma da força vertical através do centro de gravidade, uma força horizontal que provoca um torque o qual tende a girar o grão em torno de um eixo vertical, e um par no plano vertical o qual tende a mudar a

inclinação do eixo mais longo do grão. Uma observação interessante foi que quando os grãos começaram a girar, eles subiram no túnel de ar numa região de velocidade do ar inferior. Em outras palavras, a rotação causou um maior arraste e menor velocidade terminal.

No transporte hidráulico de laranjas da variedade valência BRAGA (1997) verificou a orientação das frutas imersas obtidas pela determinação do ângulo θ formado entre a columela central da laranja e o nível de água. Foi inserida uma haste fina na região de inserção do talo da laranja, que corresponde à columela central, em seguida a fruta foi colocada em um recipiente com água e após ter atingido o repouso, o ângulo foi medido utilizando-se um transferidor. Após estes estudos a autora concluiu que as laranjas 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.

2.3.3 Classificação de partículas

Segundo CLIFT et al. (1978), uma partícula não esférica pode ter planos e eixos de simetria, mas não pode possuir ponto de simetrias iguais a de uma esfera. Assim, uma partícula não esférica apresenta problemas mais complexos do que os problemas que surgem para esferas. As partículas foram classificadas por eles em grupos gerais, podendo uma forma pertencer a mais de um grupo.

Partículas axissimétricas incluem corpos gerados da rotação de uma curva fechada ao redor de um eixo. Partículas esferoidais, também chamadas de elipsóides de revolução, são de interesse particular, pois elas correspondem às formas adotadas por muitas bolhas e para algumas partículas sólidas. Um esferóide é um elipsóide de revolução, gerado da rotação de uma elipse sobre um de seus eixos principais. Se este é o eixo menor, o corpo é oblato, caso contrário o esferóide é prolato.

Formas axissimétricas são descritas pela relação de aspecto E, definida como a relação do comprimento projetado no eixo de simetria ao diâmetro máximo normal ao eixo. Dessa forma, E é a relação de semieixos para um esferóide, com $E < 1$ para um esferóide oblato e $E > 1$ para um esferóide prolato.

Uma partícula ortotrópica tem três planos de simetria mutuamente perpendiculares. Partículas axissimétricas são simétricas em todos os planos que contém seu eixo e é ortotrópica se um de seus planos de simetria é normal ao eixo.

Cilindros circulares, discos e esferóides são partículas axissimétricas e ortotrópicas; cones são partículas axissimétricas, mas não são ortotrópicas; paralelepípedos são partículas ortotrópicas.

2.3.4 Transporte de partículas

2.3.4.1 Velocidade terminal e coeficiente de arraste

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

$$\text{mpg} \left[\frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} \right] = \frac{1}{2} C A_p \rho_f V_t^2 \quad (6)$$

ou

$$V_t = \left[\frac{2W(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p \rho_f A_p C} \right]^{0.5} \quad (7)$$

e

$$C_D = \frac{2W(\rho_p - \rho_f)}{V_t^2 A_p \rho_p \rho_f} \quad (8)$$

em que:

V_t = velocidade terminal, ms^{-1} .

m_p = massa da partícula, kg.

g = aceleração gravitacional, ms^{-2} .

W_p = peso da partícula, N.

ρ_p = massa específica da partícula, kgm^{-3} .

ρ_f = massa específica do fluido, kgm^{-3} .

C_D = coeficiente de arraste, adimensional.

A_p = área projetada da partícula, m^2 .

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

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

$$V_t = \left[\frac{4gD_p(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C_D} \right]^{0.5} \quad (9)$$

Para condições de corrente laminar, os coeficientes de arraste são calculados pela Equação 10:

$$C_D = \frac{24}{N_R} \quad (10)$$

$$V_t = \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho_f)}{18\mu} \quad (11)$$

Segundo Lapple, citado por MOHSENIN (1978), para $N_R = 2$, a Equação 10 dá uma boa aproximação do coeficiente de arraste.

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).

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

$$V_t = 1,74 \left[\frac{g D_p (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0,5} \quad (12)$$

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

$$C_D = \frac{18,5}{(N_R)^{0,6}} \quad (13)$$

e a velocidade terminal é dada por:

$$V_t = \frac{0,153 g^{0,714} D_p^{0,142} (\rho_p - \rho_f)^{0,714}}{\rho_f^{0,286} \mu^{0,428}} \quad (14)$$

Poucos trabalhos apresentaram resultados satisfatórios para partículas de formas irregulares, as quais são particularmente complicadas, 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.

Na Tabela 1, fornecida por MOHSENIN (1978), encontram-se as equações comparativas para esferas e outros objetos com formas geométricas regulares.

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

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

| | Esfera (direção do escoamento) | Disco fino (normal à superfície) | Disco fino (paralelo à face) | Cilindro circular infinito (normal ao eixo) |
|------------------------|---|---|---|---|
| Nº de Reynolds | $\frac{D_p v \rho_f}{\mu}$ | $\frac{D_p v \rho_f}{\mu}$ | $\frac{2L v \rho_f}{\mu}$ | $\frac{D_p v \rho_f}{\mu}$ |
| Área frontal | $\left(\frac{\pi}{4}\right) D_p^2$ | $\left(\frac{\pi}{4}\right) D_p^2$ | $(D_p)L$ | $(D_p)L$ |
| Massa | $\rho_p \left(\frac{\pi}{6}\right) D_p^3$ | $\rho_p \left(\frac{\pi}{4}\right) D_p^2 L$ | $\rho_p \left(\frac{\pi}{4}\right) D_p^2 L$ | $\rho_p \left(\frac{\pi}{4}\right) D_p^2 L$ |
| Arraste laminar | | | | |
| $N_R \leq 0,2$ | $3\pi\mu v D_p$ | $8\mu v D_p$ | $\left(\frac{16}{3}\right)\mu v D_p$ | $\left(\frac{4\pi}{K}\right)\mu v L$ |
| $F_D = C_D N_R$ | 24 | $\frac{64}{\pi}$ | $\frac{64}{3}$ | $\frac{8\pi}{K}$ |
| Esc. Turbulento | | | | |
| C_D (médio) | 0,44 | 1,12 | - | 1,2 |
| N_R (intervalo) | $10^3 - 2 \times 10^5$ | >1000 | - | $10^2 - 2 \times 10^5$ |
| Vel. Terminal V_t | $\frac{4gD_p(\rho_p - \rho_f)}{3C\rho_f}$ | $\frac{2gL(\rho_p - \rho_f)}{C\rho_f}$ | $\frac{gD_p\pi(\rho_p - \rho_f)}{2C\rho_f}$ | $\frac{gD_p\pi(\rho_p - \rho_f)}{2C\rho_f}$ |

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

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

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

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

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

Se o peso da partícula for igual à força de arraste, em queda livre, a velocidade da partícula será constante, adotando a partícula sua própria orientação.

É conveniente distinguir dois regimes para queda livre de corpos não-esféricos. No regime intermediário, as partículas adotam orientações preferidas e C_D varia com N_R , embora bem menos que à N_R mais baixos.

No regime da lei de Newton o C_D é insensível para N_R e o movimento secundário acontece geralmente associado ao lançamento. Neste regime a relação de densidade, γ , tem um papel importante, determinando o tipo de movimento, a velocidade terminal e a taxa de transferência (PETTYJOHN e CHRISTIANSEN, 1948).

Vários autores mediram o arraste em discos com movimento fixo paralelo ao eixo, os resultados numéricos e experimentais a baixos e intermediários N_R é dado por:

$$C_D = (64/\pi N_R) [1 + 10^x] \quad (0,01 < N_R \leq 1,5) \quad (15)$$

em que

$$x = -0,883 + 0,906 \log_{10} N_R - 0,025 (\log_{10} N_R)^2 \quad (16)$$

e

$$C_D = (64/\pi N_R) (1 + 0,138 N_R^{0,792}) \quad (1,5 < N_R \leq 133) \quad (17)$$

Com N_R baixos OSSEN (1927) propôs:

$$C_D = (64/\pi N_R) [1 + (N_R/2\pi)] \quad (N_R \leq 0,01) \quad (18)$$

Uma vez que o lançamento da partícula acontece, C_D é insensível para N_R e é constante a 1,17 para $N_R > 1000$ (HOERNER, 1958). Há indicações para C_D aproximado a 1,03 para $N_R \cong 400$ (LIST, 1971), mas a maioria dos dados são correlatados com $C_D = 1,17$ para $N_R > 133$ (CLIFT et al., 1978).

Para queda livre de discos expressa-se o arraste em termos de $C_D N_{RT}^2$, o qual contém as dimensões da partícula, mas não a velocidade, para um disco de densidade δ sua velocidade terminal é:

$$C_D N_{RT}^2 = \frac{2\rho\Delta\rho g \delta d^2}{\mu^2} = \frac{2\Delta\rho g L d^3}{\rho v^2} \quad (19)$$

em que

$$E = \frac{\delta}{d} \quad (20)$$

Para $0,1 < N_R < 100$ [$1,3 < (C_D N_{RT}^2)^{1/3} < 23,4$] um disco movimenta-se livremente com seu eixo vertical e o arraste é igual a de um disco fixo à mesma velocidade relativa (McNOWN, 1950). N_R pode ser calculado da relação entre C_D e N_R dado pelas Equações 15 a 17.

Segundo JAYAWEERA et al. (1969), para $(C_D N_{RT}^2)^{1/3} > 2$ e $N_R > 5$, o C_D e a velocidade terminal são independentes de E .

Cilindros são caracterizados pela relação comprimento / diâmetro (E) e o N_R está baseado no diâmetro do cilindro. Como o arraste para discos em queda livre é relativamente insensível às suas densidades, então cilindros com $E < 1$ podem ser tratados como discos. Para $N_R > 0,01$, um cilindro com $E > 1$ cai com seu eixo horizontal (CLIFT et al., 1978).

Para um cilindro com $E > 1$ em movimento livre:

$$C_D N_{RT}^2 = \frac{\pi g \rho \Delta \rho d^3}{2 \mu^2} \quad (21)$$

Com $N_R > 100$, cilindros com $E > 1$ têm seu eixo oscilando em um plano vertical, adotando orientação horizontal. Cilindros com $E = 1$ seguem uma trajetória inclinada para vertical com "tombos" para horizontal. Para $E < 1$ o eixo oscila e gira sobre uma linha vertical, como uma moeda girando em uma superfície plana (ISAACS e THODOS, 1967).

Como para discos e esferóides, a velocidade terminal neste regime depende de γ como também da forma da partícula. Na Tabela 2, fornecida por ISAACS e THODOS (1967) resume as correlações que podem ser usadas para γ de partículas típicas em líquidos. As correlações não se aplicam a altos valores de γ para partículas em gases em comparação com dados disponíveis (CHRISTIANSEN, 1965).

CLIFT et al. (1978) propõem que as velocidades terminais para gases no regime da Lei de Newton seja calculado para $E > 1$ multiplicando os valores da Tabela 2 por 0,77. Cilindros com $E < 1$ são tratados como discos.

Tabela 2 – Coeficiente de arraste e velocidade terminal para cilindros com movimento secundário.

| | $E > 1$ | $E < 1$ |
|-------|--|--|
| C_D | $0,99 \gamma^{-0,12} E^{-0,08}$ | $1,25 \gamma^{-0,05} E^{-0,18}$ |
| V_t | $1,26 \gamma^{0,06} E^{0,04} \sqrt{dg\Delta\rho/\rho}$ | $1,265 \gamma^{0,025} E^{0,59} \sqrt{dg\Delta\rho/\rho}$ |

Toda partícula possui pelo menos três eixos mutuamente perpendiculares, tal que, se a partícula está transladando sem rotação paralela a um desses eixos, a força total de arraste também é paralela ao eixo. (HAPPEL, 1973). Estes eixos são normalmente chamados de “eixos principais de translação”.

Se uma partícula está transladando com uma velocidade v paralela ao eixo principal i , então o arraste é determinado por:

$$F_D = -\mu c_i v \quad (22)$$

em que os valores de c_i são termos da resistência de translação e μ é a viscosidade adimensional.

Para uma partícula ortotrópica, os eixos principais são normais para planos de simetria. Para partículas axissimétricas, o eixo de simetria é um dos eixos principais.

Partículas que são ortotrópicas e axissimétricas possuem um ponto sobre o qual o tensor de junção é zero. Neste caso, a translação em fluxo laminar não causa arraste. A resistência para qualquer translação pode ser calculada por um procedimento simples descrito por DAHNEKE (1973), confiando na linearidade das equações. O arraste total é obtido somando o arraste dos componentes devido aos componentes de velocidade paralelo a cada um dos eixos principais de translação. Assim se os eixos principais são

definidos pelos três vetores de unidade ortogonais \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} , o arraste total resulta da translação da velocidade v determinada por:

$$F_D = -\mu [\mathbf{i} c_1 v_1 + \mathbf{j} c_2 v_2 + \mathbf{k} c_3 v_3] \quad (23)$$

Para um grande número de partículas idênticas com orientações fortuitas, a resistência é obtida integrando a Equação 23.

$$c = \frac{3}{(c_1^{-1} + c_2^{-1} + c_3^{-1})} \quad (24)$$

enquanto a direção de ajuste é paralela ao campo de gravidade. A resistência dada pela Equação 24 é usada para descrever o movimento translacional de partículas pequenas de forma arbitrária e orientação fortuita.

Considerando uma partícula axissimétrica com velocidade fixa, v , por um fluido viscoso ilimitado estacionário. A orientação da partícula mostrada na Figura 1 é definida pelo ângulo θ , o eixo de simetria e a direção do movimento. No plano da Figura 1, os eixos principais de translação são paralelos e perpendiculares ao eixo de simetria. O arraste ao longo dos eixos principais são dados pela Equação 23.

Paralelo ao eixo de simetria:

$$F_{D1} = -\mu c_1 v \cos \theta \quad (25)$$

Perpendicular ao eixo de simetria:

$$F_{D2} = -\mu c_2 v \sin \theta \quad (26)$$

em que c_1 e c_2 são as resistências principais para translação paralela e normal ao eixo de simetria. Então o arraste é:

$$F_D = -\mu v [c_1^2 \cos^2 \theta + c_2^2 \sin^2 \theta]^{1/2} \quad (27)$$

com o ângulo ϕ ao eixo de simetria tal que

$$\tan \phi = (c_2 / c_1) \tan \theta \quad (28)$$

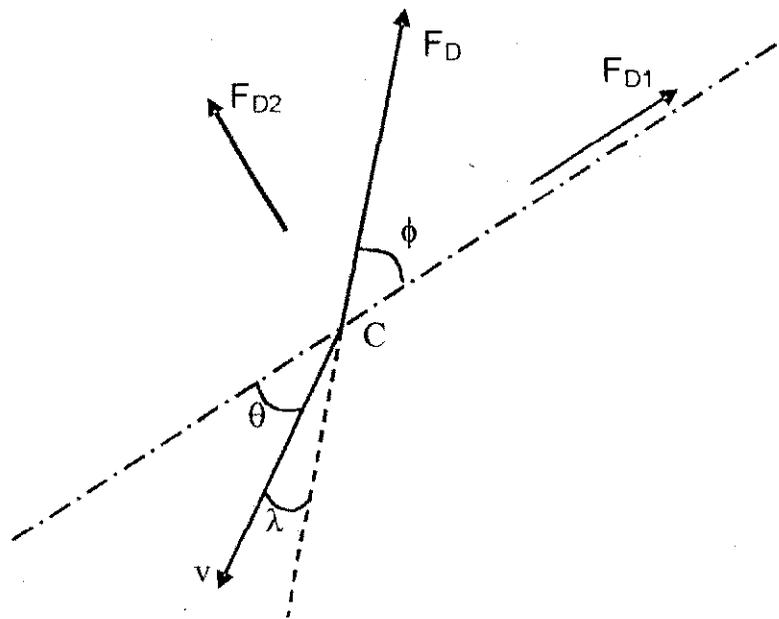


Figura 1 - Partículas axissimétricas em estado de translação.

Assim, o arraste sendo resultado de qualquer translação pode ser determinado se as duas resistências principais são conhecidas.

Para queda livre de uma partícula deve-se conhecer duas condições:

- i) O arraste total F_D deve ser dirigido verticalmente para contrabalançar a força de gravidade líquida que age na partícula.
- ii) O ponto do eixo de simetria pelo qual F_D age tem que coincidir com o centro de massa (assumindo que a partícula tem densidade uniforme).

O ângulo ϕ da inclinação do eixo torna-se vertical, de forma que a partícula cai a um ângulo vertical dado por:

$$\lambda = \phi - \theta = \tan^{-1} \left[\frac{(c_2 - c_1) \tan \phi}{c_2 + c_1 \tan^2 \phi} \right] \quad (29)$$

De forma geral c_1 é usualmente menor que c_2 para uma partícula prolata de forma que $\theta < \phi$ e a direção do movimento está entre o eixo e o vértice. Por outro lado, um corpo oblato normalmente tem $c_1 > c_2$ de forma que a direção de queda está entre o vértice e o equador.

A velocidade de ajuste segue a Equação 27:

$$v = \frac{g\Delta\rho V}{\mu c_1} \left[\frac{1 + (c_1 \tan \phi / c_2)^2}{1 + \tan^2 \phi} \right]^{1/2} \quad (30)$$

em que:

V = volume da partícula.

$\Delta\rho$ = diferença entre as densidades da partícula e do fluido.

O componente paralelo ao eixo da partícula é:

$$v \cos \theta = \frac{g\Delta\rho V}{\mu c_1 \sqrt{1 + \tan^2 \phi}} \quad (31)$$

Enquanto o componente vertical é:

$$v \cos \lambda = \frac{g\Delta\rho V}{\mu c_1 c_2} \left[\frac{c_1 + c_2 \tan^2 \phi}{1 + \tan^2 \phi} \right] \quad (32)$$

Para partículas com orientações aleatórias, a resistência é dada pela Equação 33:

$$c = \frac{3}{(c_1^{-1} + 2c_2^{-1})} \quad (33)$$

então, a velocidade é:

$$v = \frac{g\Delta\rho V}{3\mu} \left[\frac{1}{c_1} + \frac{2}{c_2} \right] \quad (34)$$

HEISS e COULL (1952) fizeram determinações experimentais precisas para cilindros, esferóides e paralelepípedos retangulares, e desenvolveram uma correlação geral para alguns fatores. Para a relação volume-arraste, Δe , os resultados obtidos foram:

para movimento paralelo ao eixo:

$$\Delta e_1 = \frac{1}{\chi_1 \sqrt{\psi}} \exp \left[\frac{0,622(\chi_1 - 1)}{\sqrt{\psi} \chi_1^{0,345}} \right] \quad (35)$$

para movimento normal ao eixo:

$$\Delta e_2 = \frac{1}{\chi_2 \sqrt{\psi}} \exp \left[0,576 \sqrt{\psi} \chi_2 (\chi_2 - 1) \right] \quad (36)$$

em que, ψ é um fator de forma semelhante a esfericidade proposta por WADELL (1933) e χ é um fator de forma semelhante a circularidade.

$$\psi = \frac{Ac}{A} = \frac{\text{Área superficial da esfera - equivalente}}{\text{Área superficial da partícula}} \quad (37)$$

$$\chi = \frac{d_c}{d_A} = \frac{\text{diâmetro da esfera de igual volume}}{\text{diâmetro da esfera circunscrita}} \quad (38)$$

O diâmetro, d_A , é definida para a área projetada do corpo, paralelo à direção do movimento. A circularidade modificada χ é relacionada ao fator de forma proposto por HEYWOOD (1962), dado por:

$$K = \pi \frac{x^3}{6} \quad (39)$$

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 41, 42 e 43.

$$E = \frac{c}{d} \quad (40)$$

em que:

c = comprimento do cilindro.

d = diâmetro do cilindro.

$$\Psi = \frac{(18E^2)^{1/3}}{(2E+1)} \quad (41)$$

$$\chi_1 = \left(\frac{3E}{2}\right)^{1/3} \quad (42)$$

$$\chi_2 = \left(\frac{3}{16}\right)^{1/3} \sqrt{\pi E}^{-1/6} \quad (43)$$

As resistências principais podem ser obtidas das relações de arraste:

$$c = 3\pi d \left(\frac{3E}{2} \right)^{1/3} \Delta e \quad (44)$$

Para uma partícula ortotrópica em translação fixa por um fluido viscoso ilimitado o arraste total é determinado pela Equação 23. A princípio, é possível seguir o desenvolvimento semelhante para o que foi determinado para partículas axissimétricas, deduzindo o comportamento geral de corpos ortotrópicos em queda livre (CLIFT et al., 1978).

As únicas partículas ortotrópicas para quais os resultados experimentais estão disponíveis são barras quadradas e paralelepípedos retangulares. As duas resistências que correspondem à direção paralela a direção do movimento são iguais. Estas resistências foram denotadas por c_2 , enquanto para a resistência normal às faces foram chamadas de c_1 .

Considerando uma partícula ortotrópica em translação arbitrária com velocidade v , v_2 é o componente de v neste plano e o ângulo entre v_2 e o eixo principal é θ . Da Equação 23, os componentes de arraste são mostrados na Figura 2.

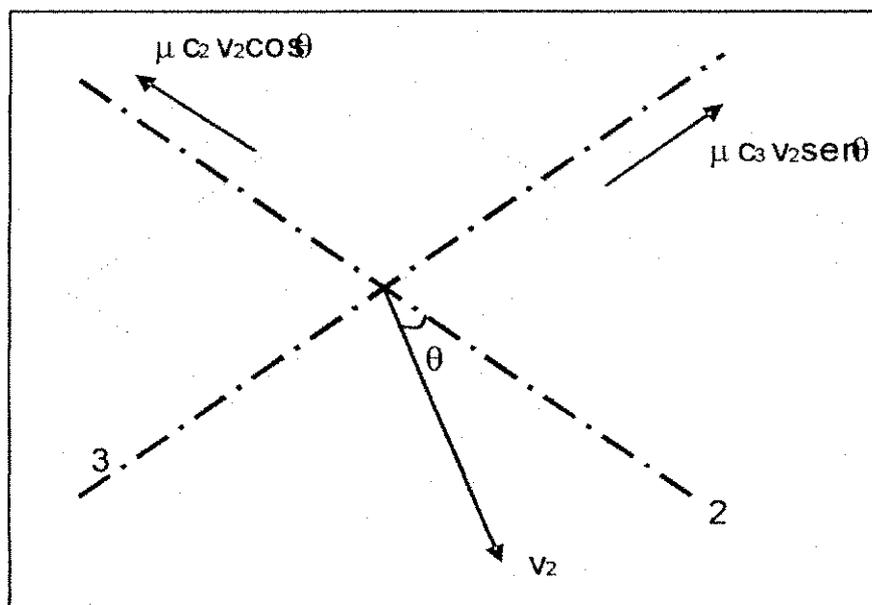


Figura 2 – Paralelepípedo retangular em estado de translação.

O componente de arraste paralelo a v_2 é:

$$F_{D||} = \mu v_2 (c_2 \cos^2 \theta + c_3 \sin^2 \theta) \quad (45)$$

Enquanto o arraste perpendicular a v_2 é:

$$F_{D\perp} = \mu v_2 (c_2 \cos\theta \sin\theta - c_3 \sin\theta \cos\theta) \quad (46)$$

desde que $c_3 = c_2$ para estas formas, $F_{D\perp}$ é zero enquanto $F_{D||}$ é $\mu v_2 c_2$.

O arraste de paralelepípedos retangulares foi determinado por HEISS e COULL (1952). Os resultados foram correlacionados pelas Equações 35 e 36, para partículas com dimensões $l \times l \times El$.

$$\psi = \frac{(9\pi E^2/2)^{1/3}}{(1+2E)} \quad (47)$$

para movimento paralelo ao eixo equivalente

$$\chi_1 = (0,75E\sqrt{\pi})^{1/3} \quad (48)$$

enquanto para movimento normal ao eixo equivalente

$$\chi_2 = (0,75\sqrt{\pi/E})^{1/3} \quad (49)$$

As resistências principais podem ser obtidas das relações de arraste:

$$c = 3l (6E\pi^2)^{1/3} \Delta e \quad (50)$$

Os valores para Δ_c são mostrados na Figura 3. De acordo com os dados experimentais esses valores são razoáveis.

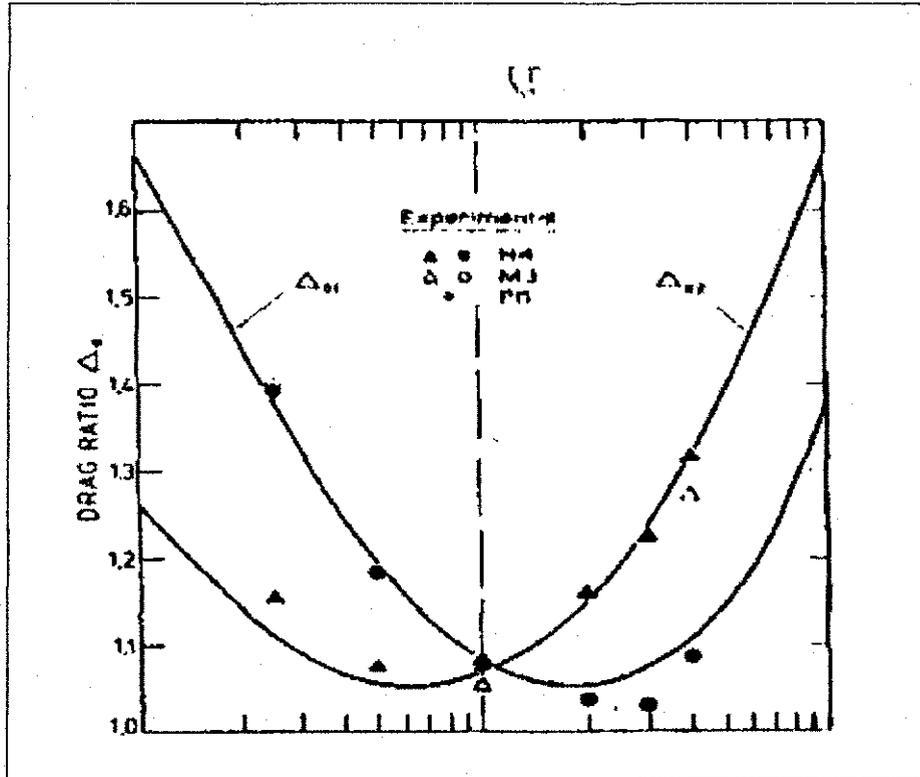


Figura 3 – Relação de arraste para paralelepípedos retangulares.

2.3.6 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.

$$K_p = \frac{v_t}{v_{to}} = \frac{1}{1 + 2,10\beta} \quad (51)$$

em que:

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

β = relação diâmetro da partícula / diâmetro do tubo (D_p / D_t), adimensional.

A Equação 51 só é válida se $\beta < 0,05$. A velocidade terminal da partícula isolada V_{∞} encontrada na Equação 51 é dada por:

$$V_{\infty} = \frac{g(\rho_p - \rho_f)D_p^2}{18\mu} \quad (52)$$

Para situações fora do regime de Stokes e condições em que $\beta > 0,05$, MASSARANI (1990) apresentou correlações empíricas que se encontram na Tabela 3.

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).

Tabela 3 – Efeito de parede na queda livre de uma esfera de diâmetro D_p ao longo do eixo de um tubo da coluna D_t .

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

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. As determinações experimentais foram conduzidas em quatro tubos cilíndricos, com diâmetros internos distintos, onde as partículas eram abandonadas no centro do tubo e o tempo de queda era determinado através de quatro cronômetros digitais acionados por fotocélulas (Muccillo -8800), com precisão de 1 milésimo de segundo. Os autores concluíram que o efeito da parede do duto cilíndrico influencia bastante na velocidade terminal da queda dos sólidos, na solução estudada.

UHLHERR e CHHABRA (1995) estudaram o efeito de esferas em tubos cilíndricos, a altos números de Reynolds. Eles usaram esferas de PVC, aço, nylon, poliestireno, 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 mediu velocidade terminal, coeficiente de arraste e número de Reynolds. O efeito de parede foi medido em termos de K_p definido como a razão entre as velocidades terminais:

$$K_p = \frac{v_t}{v_m} \quad (53)$$

onde v_t é a velocidade terminal de uma esfera de diâmetro D_p , em um meio infinito e v_m é a velocidade terminal da mesma esfera, medida no eixo de uma coluna cilíndrica de diâmetro D_c .

BRAGA (1997) verificou o efeito de parede na subida de laranjas em tubo cilíndrico, como também 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 atingir o peso que fornecesse a densidade desejada. Foram construídos modelos esféricos, de quatro diâmetros diferentes: 37,0; 42,0; 50,0 e 72,0 mm e dois tipos de superfície, uma com a rugosidade da laranja e outra lisa. A autora concluiu que houve efeito de parede e que este tende a se anular a partir de $\beta = 0,2$ dentro do critério $K_p \geq 0,99$, como dito MASSARANI (1990); concluiu também que houve um movimento de “zig-zag” durante a subida da fruta e de seus modelos esféricos. Na Tabela 4 encontram-se os resultados obtidos para este experimento.

Tabela 4 – Efeito de parede na subida de laranjas e modelos esféricos ao longo do eixo de um tubo de diâmetro $D_t = 250\text{mm}$

| Diâmetro da esfera (mm) | Re | $\beta = \frac{D_p}{D_t}$ | $K_p = \frac{v_t}{v_{tc}}$ $K_p = \frac{(1 - \beta^2)}{(1 + \beta^4)^{1/2}}$ |
|----------------------------|-------|---------------------------|---|
| 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 |

CHHABRA (1996) estudou o efeito de parede sobre a velocidade terminal de partículas rígidas de diversas formas (cubos, cilindros, prismas e discos) e densidades (1200 a 7800 kg / m³) sedimentando em fluido não-Newtoniano (soluções poliméricas) confinado em tubos de diferentes diâmetros (20 - 100 mm). A partir dos dados obtidos determinou a velocidade terminal em meio infinito através da extrapolação dos dados experimentais em gráficos de v_t versus $1 / D_t$ para $D_t \rightarrow \infty$. Os resultados de K_p , que representa a razão entre a velocidade terminal em meio com e sem a presença de fronteiras rígidas, foram correlacionados a β , razão entre D_p e D_t , para as diferentes partículas. As correlações obtidas são válidas para $Re_{NN} < 7,0$, sendo o número de Reynolds dado por:

$$Re_{NN} = \frac{\rho v_t^{n-2} D_p}{M} \quad (54)$$

onde n e M são os parâmetros do modelo da potência, utilizado para ajustar os dados de tensão cisalhante e taxa de deformação.

TORRES (2003) estudou os parâmetros aerodinâmicos de grãos de feijão, milho e soja em dutos de ar de diferentes tamanhos (20, 30, 40, 50 e 60 mm), concluindo que houve efeito de parede para os grãos de milho, inclusive na determinação da velocidade terminal na coluna de secção quadrada de 60 mm.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande. Foram utilizadas partículas geométricas (cilindros, paralelepípedos e placas planas) de chuchu, cenoura e batata, com diferentes dimensões: cilindros e paralelepípedos com 8 mm de diâmetro por 20 mm de altura, cilindros e paralelepípedos com 12mm de diâmetro por 30 mm de altura, placas planas quadradas e circulares com 8mm, 10mm e 12mm de diâmetro por 5mm de altura.

3.1 Teor de água

O teor de água das partículas foi determinado pelo método padrão da estufa (BRASIL, 1992).

Inicialmente, as amostras foram pesadas em balança analítica com precisão de 0,001 g e colocadas na estufa a 105° C por 24 horas. Essas amostras foram novamente pesadas e obteve-se a umidade, em base úmida, pela Equação 55.

$$\%U = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (55)$$

em que:

P_i = peso inicial, g.

P_f = peso final, g.

3.2 Características físicas

As características físicas determinadas foram: volume, massa específica real e aparente e porosidade.

3.2.2 Volume

O volume das partículas foi determinado de acordo com cada forma geométrica.

Para os discos e cilindros o volume foi determinado por:

$$\text{Volume} = \pi r^2 h \quad (56)$$

Para as placas quadradas e paralelepípedos o volume foi determinado por:

$$\text{Volume} = a^2 h \quad (57)$$

3.2.3 Massa específica real e aparente

A massa específica real foi determinada pela relação entre a massa da partícula e seu volume, expressa em g cm^{-3} .

A massa específica aparente foi determinada pela relação entre a massa contida num recipiente e o volume desse recipiente, expressa em g cm^{-3} .

3.3 Propriedades hidrodinâmicas

3.3.1 Velocidade terminal

3.3.1.1 Construção do equipamento

Para determinação da velocidade terminal foi utilizado um equipamento construído a partir de tubos cilíndricos de PVC com acrílico transparente, de 50, 100 e

150 mm de diâmetro e 1,40 m de altura. Nos cilindros foram feitas marcas espaçadas em 0,10m umas das outras.

3.3.1.2 Procedimento experimental

Para determinação da velocidade terminal foram utilizadas 10 amostras de cada tipo de forma geométrica (cilindros, paralelepípedos e placas planas). Foram feitas medidas de velocidade terminal para cada tipo de forma individualmente, com dez repetições.

No instante em que as partículas foram soltas no tubo, seu percurso foi acompanhado por uma câmera VHS. Usou-se um programa de cronômetro computacional, ampliado na tela do monitor, que foi colocado em um ângulo para que pudesse ser filmado simultaneamente ao experimento. Antes de começar o experimento o cronômetro foi ligado, eliminando-se o erro de disparo inicial, pois o experimento foi filmado juntamente com o cronômetro. A retirada de dados de cada marco foi feita por diferença de leitura, não importando que no ponto zero, a leitura do cronômetro fosse 0:00 segundos, conforme metodologia descrita por BRAGA (1997).

3.3.1.3 Coleta de dados

Para analisar o filme realizado durante o experimento foi utilizado os recursos de câmera lenta de um aparelho de vídeo cassete, a coleta dos dados realizou-se da seguinte forma:

À medida que a partícula passava em cada marca do cilindro, a imagem era congelada, sendo possível ler o tempo registrado no cronômetro mostrado no vídeo do computador. Cada sena congelada correspondia a um ponto a ser marcado, na curva de deslocamento (y) em função do tempo (t), para o cálculo da velocidade terminal, que foi determinada pela inclinação da porção reta da curva (Figura 4).

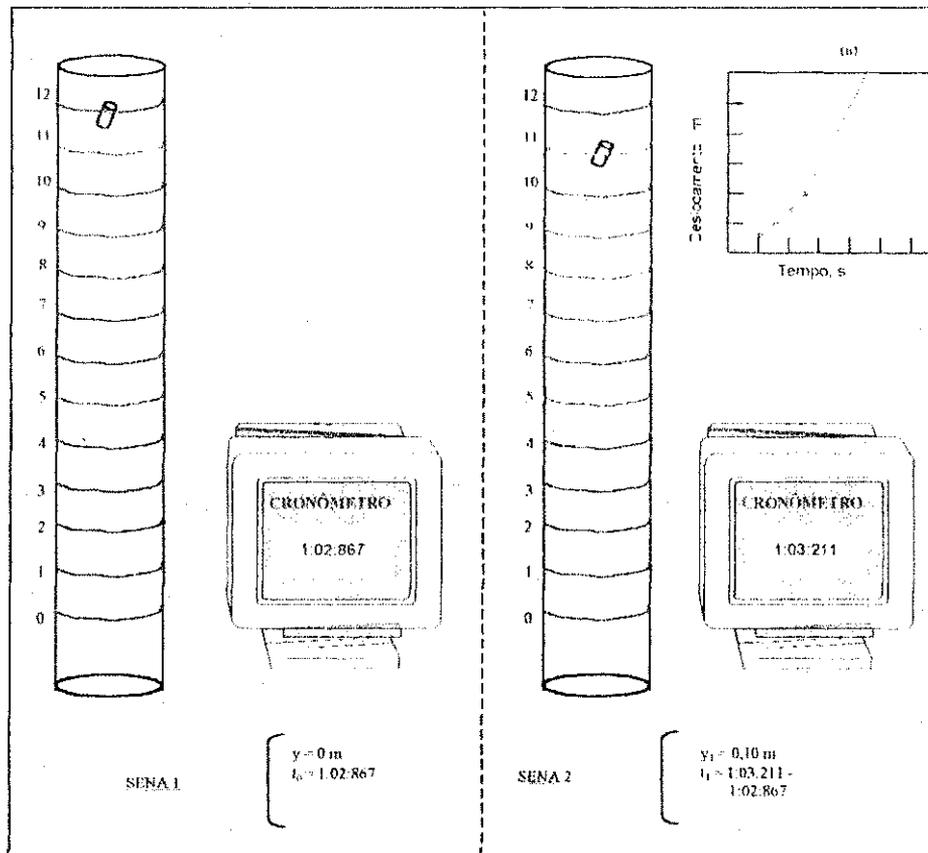


Figura 4 – Detalhes de montagem e funcionamento do equipamento usado para determinar a velocidade terminal das peças de vegetais em água.

3.3.1.4 Velocidade terminal teórica

Para o cálculo da velocidade terminal das discos e cúbicas foram utilizados dois métodos: pela Equação 58 proposta por MOHSENIN (1978) com $C_D = 1,17$ para $N_R > 133$ sugerido por CLIFT et al. (1978) e pelas Equações 59 e 60 propostas por ISAACS e THODOS (1967).

$$V_t = \frac{gD_p \pi (\rho_p - \rho_f)}{2C_D \rho_f} \quad (58)$$

$$C_D = 1,25 \gamma^{-0,05} E^{-0,18} \quad (59)$$

$$V_t = 1,265 \gamma^{0,025} E^{0,59} \sqrt{\frac{D_p \Delta \rho}{\rho_f}} \quad (60)$$

em que, $\gamma = \frac{\rho_p}{\rho_f}$ e E é a relação de aspecto comprimento / diâmetro.

A velocidade terminal dos cilindros e paralelepípedos foi calculada pela Equação 58, considerando $C_D = 1,2$ para $10^2 < N_R < 2 \times 10^5$ (MOHSEIN, 1978) e calculando o C_D pela Equação 44 para cilindros e 50 para paralelepípedos, propostas por HEISS e COULL (1952).

Também foram utilizadas as Equações 61 e 62 propostas por ISAACS e THODOS (1967) para o calculo do C_D e da velocidade terminal.

$$C_D = 0,99 \gamma^{-0,12} E^{-0,08} \quad (61)$$

$$V_t = 1,26 \gamma^{0,06} E^{0,04} \sqrt{\frac{D_p g \Delta \rho}{\rho_f}} \quad (62)$$

3.3.1.5 Efeito de parede

A relação entre as medidas das partículas com os diâmetros dos tubos foi determinada pela relação:

$$\beta = \frac{D_p}{D_t} \quad (63)$$

em que:

D_p = diâmetro da partícula.

D_t = diâmetro do tubo.

β = relação diâmetro da partícula / diâmetro do tubo (D_p / D_t), adimensional.

3.4 Análise estatística

Foi utilizado o experimento fatorial, segundo um esquema fatorial 2 fatores (F1, tamanho do tubo e F2, dimensão da partícula), e cada fator com 3 tratamentos, que forma os tamanhos dos tubos (50, 100, e 150mm) e o fator F2 com, também, com 3 tratamentos, que foram os tamanhos das peças (8, 10 e 12mm). Em alguns casos, o fator F2 continha apenas dois tamanhos (cilindros e paralelepípedos).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teor de água

Os teores de água do chuchu, da batata e da cenoura, determinados no início do experimento, foram 89,84%, 81,93% e 92,48% b.u., respectivamente.

4.2 Características físicas

Na Tabela 5 são mostrados os valores do volume e da massa específica e das partículas de chuchu.

Tabela 5 – Características físicas das formas geométricas de chuchu.

| Chuchu | Características físicas | |
|-------------------------|---------------------------|--|
| | Volume (cm ³) | Massa específica (g.cm ⁻³) |
| Disco de 8mm | 0,251 | 1,007 ± 0,004 |
| Disco de 10 mm | 0,392 | 1,007± 0,004 |
| Disco de 12 mm | 0,565 | 1,007± 0,004 |
| Placa quadrada de 8 mm | 0,320 | 1,007± 0,004 |
| Placa quadrada de 10 mm | 0,500 | 1,007± 0,004 |
| Placa quadrada de 12 mm | 0,720 | 1,007± 0,004 |
| Cilindro de 8 mm | 1,004 | 1,007± 0,004 |
| Cilindros de 12 mm | 3,391 | 1,007± 0,004 |
| Paralelepípedo de 8 mm | 1,280 | 1,007± 0,004 |
| Paralelepípedo de 12mm | 4,320 | 1,007± 0,004 |

-  - Discos com 8, 10 e 12 mm respectivamente e espessura de 5mm
-  - Placas planas quadradas com 8, 10 e 12 mm de lado respectivamente (L1), respectivamente e espessura de 5mm (Lado 2)
-  - Cilindros com diâmetros de 8 e 12 mm respectivamente, e altura de 20 e 30 mm, respectivamente
-  - Paralelepípedos com secção quadrada de 8 e 12 mm de lado (L1), respectivamente, e altura (Lado 2) de 20 e 30 mm, respectivamente.

Na Tabela 6 são mostrados os valores do volume e da massa específica das partículas de batata.

Tabela 6 – Características físicas das formas geométricas de batata.

| Batata | Características físicas | |
|-------------------------|---------------------------|--|
| | Volume (cm ³) | Massa específica (g.cm ⁻³) |
| Disco de 8mm | 0,251 | 1,0734 ±0,004 |
| Disco de 10 mm | 0,392 | 1,0734 ±0,004 |
| Disco de 12 mm | 0,565 | 1,0734 ±0,004 |
| Placa quadrada de 8 mm | 0,320 | 1,0734 ±0,004 |
| Placa quadrada de 10 mm | 0,500 | 1,0734 ±0,004 |
| Placa quadrada de 12 mm | 0,720 | 1,0734 ±0,004 |
| Cilindro de 8 mm | 1,004 | 1,0734 ±0,004 |
| Cilindros de 12 mm | 3,391 | 1,0734 ±0,004 |
| Paralelepípedo de 8 mm | 1,280 | 1,0734 ±0,004 |
| Paralelepípedo de 12mm | 4,320 | 1,0734 ±0,004 |

Na Tabela 7 são mostrados os valores do volume e da massa específica das partículas de cenoura.

Tabela 7 – Características físicas das formas geométricas de cenoura.

| Cenoura | Características físicas | |
|-------------------------|---------------------------|--|
| | Volume (cm ³) | Massa específica (g.cm ⁻³) |
| Disco de 8mm | 0,251 | 1,006 ±0,001 |
| Disco de 10 mm | 0,392 | 1,006 ±0,001 |
| Disco de 12 mm | 0,565 | 1,006 ±0,001 |
| Placa quadrada de 8 mm | 0,320 | 1,006 ±0,001 |
| Placa quadrada de 10 mm | 0,500 | 1,006 ±0,001 |
| Placa quadrada de 12 mm | 0,720 | 1,006 ±0,001 |

4.3 Parâmetros hidrodinâmicos

4.3.1 Velocidade terminal

4.3.1.1 Velocidade terminal calculada

Os resultados de velocidade terminal dos discos e placas planas quadradas de chuchu, batata e cenoura, calculados pelas equações propostas por MOHSENIN (1978) e ISAACS e THODOS (1967) estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Velocidade terminal calculada com base nas características físicas dos produtos e do fluido (água), por duas formas: v_{t1} (Equação proposta por Mohsenin, considerando o $C_D = 1,17$ proposto por Clift et al., para placas); v_{t2} (Equações propostas por Isaacs e Thodos, com o C_D também proposto pelos mesmos autores).

| Chuchu | v_{t1} (m/s) | v_{t2} (m/s) |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Disco de 8 mm | 0,00074 | 0,0226 |
| Disco de 10 mm | 0,00093 | 0,0221 |
| Disco de 12 mm | 0,0011 | 0,0218 |
| Placa quadrada de 8 mm | 0,0008 | 0,0236 |
| Placa quadrada de 10 mm | 0,0010 | 0,0221 |
| Placa quadrada de 12 mm | 0,0011 | 0,0223 |
| Batata | v_{t1} (m/s) | v_{t2} (m/s) |
| Disco de 8 mm | 0,0081 | 0,0730 |
| Disco de 10 mm | 0,0100 | 0,0714 |
| Disco de 12 mm | 0,0115 | 0,0702 |
| Placa quadrada de 8 mm | 0,0077 | 0,07278 |
| Placa quadrada de 10 mm | 0,0096 | 0,0714 |
| Placa quadrada de 12 mm | 0,0120 | 0,0703 |
| Cenoura | v_{t1} (m/s) | v_{t2} (m/s) |
| Disco de 8 mm | 0,0006 | 0,0210 |
| Disco de 10 mm | 0,0008 | 0,0205 |
| Disco de 12 mm | 0,0010 | 0,0202 |
| Placa quadrada de 8 mm | 0,0006 | 0,0211 |
| Placa quadrada de 10 mm | 0,0008 | 0,0205 |
| Placa quadrada de 12 mm | 0,0011 | 0,0211 |

 - Discos com 8, 10 e 12 mm respectivamente e espessura de 5mm

 - Placas planas quadradas com 8, 10 e 12 mm de lado respectivamente (L1), respectivamente e espessura de 5mm (Lado 2)

 - Cilindros com diâmetros de 8 e 12 mm respectivamente, e altura de 20 e 30 mm, respectivamente

 - Paralelepípedos com secção quadrada de 8 e 12 mm de lado (L1), respectivamente, e altura (Lado 2) de 20 e 30 mm, respectivamente.

Observa-se que a velocidade terminal calculada pela equação sugerida por ISAACS e THODOS (1967) ofereceu uma boa aproximação da velocidade terminal experimental, principalmente para as formas geométricas do chuchu, onde se constata que os valores são muito próximos aos obtidos experimentalmente. A equação citada por MOHSENIN (1978), com C_D sugerido por CLIFT et al. (1978) confere valores muito menores do que os valores experimentais.

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados de velocidade terminal dos cilindros e dos paralelepípedos de chuchu e de batata, calculados pelas equações propostas por MOHSENIN (1978); ISAACS e THODOS (1967).

Constata-se pela Tabela 9, que a equação citada por MOHSENIN (1978), que adota o $C_D = 1,2$ para transporte na região de Newton, não ofereceu boa aproximação da velocidade obtida experimentalmente, mas com esta mesma equação, quando calculada com o C_D sugerido por HEISS e COULL (1952), obteve-se, para as peças de batata, valores muito próximos dos experimentais, enquanto que para o chuchu esses valores, calculados dessa forma, são menores do que os obtidos experimentalmente. Quando se utilizou a equação sugerida por ISAACS e THODOS (1967), os valores obtidos foram bem próximos dos valores experimentais para o chuchu, mas para a batata, a velocidade terminal foi maior que os valores obtidos nos experimentos. Como a forma do produto é a mesma e talvez estas equações apresentem uma sensibilidade muito grande aos valores de densidade.

Tabela 9 - Velocidade terminal calculada com base nas características físicas dos produtos e do fluido (água), por três formas: v_{t1} (Equação proposta por Mohsenin, considerando o $C_D = 1,2$); v_{t2} (Equações propostas por Isaacs e Thodos com C_D proposto pelos mesmos autores); v_{t3} (v_t calculado pela Equação de Mohsenin com C_D proposto por Heiss e Coull).

| Chuchu | v_{t1} (m/s) | v_{t2} (m/s) | v_{t3} (m/s) |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Cilindros de 8 mm | 0,0018 | 0,0433 | 0,0075 |
| Cilindros de 12mm | 0,0027 | 0,0531 | 0,0076 |
| Paralelepípedos de 8 mm | 0,0020 | 0,0436 | 0,0066 |
| Paralelepípedos de 12 mm | 0,0031 | 0,0528 | 0,0070 |
| Batata | v_{t1} (m/s) | v_{t2} (m/s) | v_{t3} (m/s) |
| Cilindros de 8 mm | 0,0188 | 0,1354 | 0,0780 |
| Cilindros de 12mm | 0,0282 | 0,1713 | 0,0790 |
| Paralelepípedos de 8 mm | 0,0190 | 0,1360 | 0,0685 |
| Paralelepípedos de 12 mm | 0,0300 | 0,1674 | 0,0481 |

4.3.1.2 Velocidade terminal experimental

Os resultados obtidos experimentalmente para velocidade terminal das partículas geométricas de chuchu, batata e cenoura nos diversos diâmetros de tubo, encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Velocidade terminal (m/s) das formas geométricas de chuchu, batata e cenoura obtidas com diferentes diâmetros do tubo de queda.

| Chuchu | Diâmetros dos tubos de queda | | |
|--------------------------|------------------------------|---------------|---------------|
| | 50 mm | 100 mm | 150 mm |
| Disco de 8 mm | 0,023 ± 0,001 | 0,027 ± 0,001 | 0,029 ± 0,001 |
| Disco de 10 mm | 0,022 ± 0,001 | 0,026 ± 0,001 | 0,022 ± 0,001 |
| Disco de 12 mm | 0,024 ± 0,001 | 0,027 ± 0,002 | 0,026 ± 0,001 |
| Placa quadrada de 8 mm | 0,027 ± 0,001 | 0,027 ± 0,001 | 0,028 ± 0,001 |
| Placa quadrada de 10 mm | 0,024 ± 0,001 | 0,025 ± 0,001 | 0,027 ± 0,001 |
| Placa quadrada de 12 mm | 0,023 ± 0,001 | 0,025 ± 0,001 | 0,028 ± 0,001 |
| Cilindros de 8 mm | 0,031 ± 0,002 | 0,039 ± 0,002 | 0,033 ± 0,004 |
| Cilindros de 12mm | 0,025 ± 0,002 | 0,042 ± 0,004 | 0,041 ± 0,002 |
| Paralelepípedos de 8 mm | 0,026 ± 0,001 | 0,028 ± 0,001 | 0,032 ± 0,003 |
| Paralelepípedos de 12 mm | 0,026 ± 0,001 | 0,035 ± 0,001 | 0,036 ± 0,001 |
| Batata | 50 mm | 100 mm | 150 mm |
| Disco de 8 mm | 0,051 ± 0,001 | 0,058 ± 0,005 | 0,053 ± 0,001 |
| Disco de 10 mm | 0,051 ± 0,001 | 0,053 ± 0,002 | 0,057 ± 0,004 |
| Disco de 12 mm | 0,057 ± 0,001 | 0,056 ± 0,002 | 0,058 ± 0,004 |
| Placa quadrada de 8 mm | 0,057 ± 0,001 | 0,059 ± 0,001 | 0,057 ± 0,001 |
| Placa quadrada de 10 mm | 0,058 ± 0,001 | 0,060 ± 0,001 | 0,061 ± 0,002 |
| Placa quadrada de 12 mm | 0,056 ± 0,001 | 0,058 ± 0,001 | 0,058 ± 0,001 |
| Cilindros de 8 mm | 0,059 ± 0,003 | 0,061 ± 0,004 | 0,063 ± 0,006 |
| Cilindros de 12mm | 0,068 ± 0,002 | 0,086 ± 0,01 | 0,094 ± 0,001 |
| Paralelepípedos de 8 mm | 0,059 ± 0,001 | 0,061 ± 0,001 | 0,062 ± 0,001 |
| Paralelepípedos de 12 mm | 0,067 ± 0,003 | 0,078 ± 0,001 | 0,087 ± 0,001 |
| Cenoura | 50 mm | 100 mm | 150 mm |
| Disco de 8 mm | 0,038 ± 0,001 | 0,038 ± 0,001 | 0,040 ± 0,002 |
| Disco de 10 mm | 0,032 ± 0,001 | 0,036 ± 0,003 | 0,038 ± 0,001 |
| Disco de 12 mm | 0,031 ± 0,001 | 0,034 ± 0,001 | 0,035 ± 0,002 |
| Placa quadrada de 8 mm | 0,040 ± 0,005 | 0,042 ± 0,005 | 0,041 ± 0,002 |
| Placa quadrada de 10 mm | 0,035 ± 0,001 | 0,038 ± 0,003 | 0,038 ± 0,002 |
| Placa quadrada de 12 mm | 0,036 ± 0,001 | 0,040 ± 0,002 | 0,040 ± 0,002 |

 - Discos com 8, 10 e 12 mm respectivamente e espessura de 5mm

 - Placas planas quadradas com 8, 10 e 12 mm de lado respectivamente (L1), respectivamente e espessura de 5mm (Lado 2)

 - cilindros com diâmetros de 8 e 12 mm respectivamente, e altura de 20 e 30 mm, respectivamente

 - Paralelepípedos com secção quadrada de 8 e 12 mm de lado (L1), respectivamente, e altura (Lado 2) de 20 e 30 mm, respectivamente

Observa-se pela tabela que se obteve para a batata valores maiores de velocidade terminal, variando de 0,051 a 0,093 m/s, e que os valores da velocidade terminal do chuchu e da cenoura ficaram na mesma faixa de valores.

Percebe-se que para as peças de chuchu, batata e cenoura, independente da forma geométrica, em geral, houve aumento da velocidade terminal à medida que se aumentou o diâmetro do tubo de queda. No que se refere à forma geométrica, para um mesmo diâmetro de tubo, houve, de modo geral, um aumento da velocidade terminal de acordo com o aumento da massa da partícula, exceto para a cenoura, talvez pelo fato de a cenoura possuir uma constituição diferente da batata e chuchu, pois apresenta um “talo” central e uma polpa externa com diferentes teores de água, consistência e massa específica. Estes fatos, no entanto, precisam ser mais investigados.

4.3.1.2.1 Velocidade terminal do chuchu

Placas planas quadradas de chuchu

Na Tabela 11 encontra-se o quadro da análise de variância para a velocidade terminal das placas quadradas de chuchu, onde F1 representa os diâmetros dos tubos e F2, os diferentes tamanhos (diâmetros) discos. Nessa tabela observam-se diferenças significativas em nível de 1% de probabilidade para o fator diâmetro dos tubos e para o fator tamanho das placas. Para a interação entre fatores diâmetro do tubo e Tamanho das placas houve diferença significativa em nível de 5 % de probabilidade.

Tabela 11 – Análise de variância da velocidade terminal das placas quadradas de chuchu em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes tamanhos (lado) das placas planas quadradas (F2).

| Fonte de Variação | G. L. | S.Q. | Q.M. | F |
|-------------------------|-----------|----------------|---------|------------|
| Diâmetro dos tubos (F1) | 2 | 0,00009 | 0,00004 | 46,0456 ** |
| Tamanho das Placas (F2) | 2 | 0,00003 | 0,00002 | 17,0500 ** |
| Int. F1 x F2 | 4 | 0,00001 | 0,00000 | 3,2786 * |
| Resíduo | 27 | 0,00003 | 0,00000 | |
| Total | 35 | 0,00016 | | |

** = significativo em nível de 1% de probabilidade

* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Na Tabela 12 são apresentados os valores médios da velocidade terminal obtidas para as placas planas quadradas de chuchu. Observa-se que a velocidade terminal foi maior com o tubo de 150 mm e menor com os tubos de 100 e de 50 mm, constata-se ainda, que entre estes últimos não houve diferença significativa. Em relação ao tamanho das placas, verifica-se que velocidade terminal foi maior para a placa de 8 mm e que não houve diferença significativa entre as placas de 10 e de 12 mm.

Tabela 12 – Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do chuchu, para diferentes diâmetros dos tubos de queda e diferentes tamanhos das placas de chuchu.

| Diâmetro do tubo (mm) | vt (m / s) |
|--------------------------|------------|
| 50 | 0,0247 b |
| 100 | 0,0256 b |
| 150 | 0,0284 a |
| Diâmetro das placas (mm) | vt (m / s) |
| 8 | 0,0276 a |
| 10 | 0,0255 b |
| 12 | 0,0256 b |

DMS – Diâmetro do tubo = 0,00099 DMS – Diâmetro das placas = 0,00099

Os valores médios para a interação entre o diâmetro do tubo e o tamanho (lado) das placas quadradas de chuchu encontram-se na Tabela 13. Observa-se que todas as placas apresentaram maior velocidade terminal no tubo de 150 mm de diâmetro. Com relação ao diâmetro da placa, a velocidade terminal foi maior para a placa de 8 mm de diâmetro em todos os tubos.

Tabela 13 – Valores médios da velocidade terminal do chuchu para interação entre o diâmetro do tubo e o diâmetro da placa.

| Diâmetro do tubo | Diâmetro da placa (mm) | | |
|------------------|------------------------|-----------|-----------|
| | 8 | 10 | 12 |
| 50 mm | 0,0269 bA | 0,0239 bB | 0,0233 bB |
| 100 mm | 0,0271 abA | 0,0250 bB | 0,0249 bB |
| 150 mm | 0,0288 aA | 0,0278 aA | 0,0287 aA |

DMS = 0,0017 DMS = 0,0017
 Classificação com letras minúsculas nas colunas Classificação com letras maiúsculas linhas
 MG = 0,02626 CV % = 3,74131

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

Discos de chuchu

O quadro da análise de variância para a velocidade terminal dos discos de chuchu encontra-se na Tabela 14. Observa-se nessa tabela que existem diferenças significativas em nível de 1% de probabilidade para o fator diâmetro dos tubos, para o fator diâmetro das placas e para a interação entre esses dois fatores.

Tabela 14 – Análise de variância da velocidade terminal em água do chuchu, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes diâmetros dos discos de chuchu (F2)

| Fonte de Variação | G. L. | S.Q. | Q.M. | F |
|--------------------------|-----------|----------------|---------|------------|
| Diâmetro dos tubos (F1) | 2 | 0,00007 | 0,00004 | 23,9763 ** |
| Diâmetro dos Discos (F2) | 2 | 0,00006 | 0,00003 | 19,5679 ** |
| Int. F1 x F2 | 4 | 0,00005 | 0,00001 | 8,0901 ** |
| Resíduo | 27 | 0,00004 | 0,00000 | |
| Total | 35 | 0,00023 | | |

** = significativo em nível de 1% de probabilidade

* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Os valores médios da velocidade terminal para os discos de chuchu são mostrados na Tabela 15. Verifica-se que nos tubos com 100 e 150 mm de diâmetro a velocidade terminal desses discos foram maiores do que no tubo de 50 mm. Em relação ao fator tamanho das placas, observa-se que as placas de 8 e 12 mm não apresentaram diferença significativa e que a velocidade terminal foi menor para a placa de 10 mm. Na realidade, como estas velocidades são muito próximas, pode-se dizer que existiu, nesse caso, influência de erros de observação e de leitura ($DMS = 0,00126$ m/s) e que se pode considerar que estas peças tenham a mesma velocidade terminal. Os fatos de que elas têm a mesma densidade e mesma forma, e ainda, que os efeitos de parede, neste regime de escoamento (Regime de Newton), só se faz sentir quando a dimensão do tubo de queda for menor do que quatro vezes o diâmetro da partícula, reforçam a afirmativa anterior.

Tabela 15 – Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do chuchu, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes diâmetros dos discos.

| Diâmetro do tubo (mm) | vt (m / s) |
|---------------------------------|-------------------|
| 50 | 0,0235 b |
| 100 | 0,0269 a |
| 150 | 0,0260 a |
| Diâmetro dos discos (mm) | vt (m / s) |
| 8 | 0,0266 a |
| 10 | 0,0236 b |
| 12 | 0,0261 a |

DMS – Diâmetro do tubo = 0,00126 DMS – Diâmetro das placas = 0,0126

Pelos resultados da interação feita entre o diâmetro do tubo e o diâmetro dos discos, Tabela 16, verifica-se que a velocidade terminal não apresenta diferença significativa em relação ao diâmetro das placas nos tubos de 50 e 100 mm, e para o tubo de 150 mm de diâmetro, a placa com 8 mm apresentou maior velocidade terminal. Com relação ao diâmetro dos tubos, as placas de 10 e 12 mm apresentaram maior velocidade terminal no tubo de 100 mm.

Tabela 16 – Valores médios da velocidade terminal de chuchu para interação entre o diâmetro do tubo e o diâmetro do disco.

| Diâmetro do tubo | Diâmetros dos discos (mm) | | |
|-------------------------|----------------------------------|-----------|------------|
| | 8 | 10 | 12 |
| 50 mm | 0,0235 cA | 0,0224 bA | 0,0245 bA |
| 100 mm | 0,0269 bA | 0,0261 aA | 0,0276 aA |
| 150 mm | 0,0294 aA | 0,0224 bC | 0,0264 abB |

DMS = 0,0022

DMS = 0,0022

Classificação com letras minúsculas

Classificação com letras maiúsculas

MG = 0,02549

CV % = 4,89345

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

Paralelepípedos de chuchu

Na Tabela 17 são mostrados os resultados da análise de variância para a velocidade terminal de paralelepípedos de chuchu, obtidos em diferentes diâmetros de tubos (F1) e diferentes dimensões de paralelepípedos (F2). Nessa tabela encontram-se diferenças significativas em nível de 1 % de probabilidade para os fatores diâmetro do tubo, dimensões dos paralelepípedos e para a interação entre os dois fatores.

Tabela 17 – Análise de variância da velocidade terminal de chuchu em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes dimensões de paralelepípedos (F2)

| Fonte de Variação | G. L. | S.Q. | Q.M. | F |
|------------------------------------|-----------|----------------|---------|------------|
| Diâmetro dos tubos (F1) | 2 | 0,00028 | 0,00014 | 42,7979 ** |
| Dimensões dos paralelepípedos (F2) | 1 | 0,00008 | 0,00008 | 23,5079** |
| Int. F1 x F2 | 2 | 0,00005 | 0,00003 | 8,2568 ** |
| Residuo | 18 | 0,00006 | 0,00000 | |
| Total | 23 | 0,00046 | | |

** = significativo em nível de 1% de probabilidade

* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Os valores médios da velocidade terminal do chuchu para diferentes diâmetros dos tubos e dimensões de paralelepípedos são encontrados na Tabela 18. Percebe-se por esta tabela que existe diferença significativa entre os valores da velocidade terminal, obtidos nos diferentes diâmetros de tubos de queda, sendo esse valor maior no tubo de 150 mm de diâmetro. Quanto à dimensão dos paralelepípedos, observa-se que a velocidade terminal foi maior para o paralelepípedo com dimensão de 12 x 12 x 30 mm. Este fato é compreensível, pois se trata da peça de maior massa em queda “livre” no tubo de maior dimensão (não há efeitos de parede)

Tabela 18 – Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do chuchu, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes dimensões dos paralelepípedos.

| Diâmetro do tubo (mm) | vt (m / s) |
|---|-------------------|
| 50 | 0,0261 c |
| 100 | 0,0315 b |
| 150 | 0,0342 a |
| Dimensões dos paralelepípedos (mm) | vt (m / s) |
| 8 x 8 x 20 | 0,0288 b |
| 12 x 12 x 30 | 0,0324 a |

DMS – Diâmetro do tubo = 0,00230 DMS – Dimensões dos paralelepípedos = 0,0154

Na Tabela 19 encontram-se os valores médios para a interação entre o diâmetro do tubo e as dimensões dos paralelepípedos. Constata-se que os paralelepípedos com dimensões de 8 x 8 x 30 mm desenvolveram maior velocidade terminal no tubo de maior diâmetro enquanto que as peças com 12 x 12 x 30 mm desenvolveram velocidade terminal igualmente mais elevadas nos tubos de maiores diâmetros. Percebe-se também que a velocidade terminal, independente do tamanho do cilindro de queda, foi maior para o paralelepípedo de maior tamanho e, conseqüentemente, de maior massa.

Tabela 19 – Valores médios da velocidade terminal do chuchu para interação entre o diâmetro do tubo e as dimensões dos paralelepípedos.

| Diâmetro do tubo | Dimensões dos paralelepípedos (mm) | |
|-------------------------|---|---------------------|
| | 8x 8 x 20 | 12 x 12 x 30 |
| 50 mm | 0,0263 bA | 0,0259 bA |
| 100 mm | 0,0282 bB | 0,0350 aA |
| 150 mm | 0,0322 aB | 0,0364 aA |

DMS = 0,0032

DMS = 0,0027

Classificação com letras minúsculas nas colunas

Classificação com letras maiúsculas nas linhas

MG = 0,03065

CV % = 5,86975

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

Cilindros de chuchu

A análise de variância para a velocidade terminal de cilindros de chuchu, obtidas em diferentes diâmetros de tubos (F1) e diferentes dimensões de cilindros (F2) são encontrados na Tabela 20. Observam-se diferenças significativas em nível de 1 % de probabilidade para o fator diâmetro do tubo e para a interação entre os fatores F1 e F2, enquanto que para o fator dimensões dos cilindros não houve diferenças significativas.

Tabela 20 – Análise de variância da velocidade terminal de chuchu em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes dimensões de cilindros (F2)

| Fonte de Variação | G. L. | S.Q. | Q.M. | F |
|------------------------------|-----------|---------|---------|------------|
| Diâmetro dos tubos (F1) | 2 | 0,00070 | 0,00035 | 33,6262 ** |
| Dimensões dos cilindros (F2) | 1 | 0,00002 | 0,00002 | 1,6913 ns |
| Int. F1 x F2 | 2 | 0,00021 | 0,00010 | 9,9204 ** |
| Resíduo | 18 | 0,00019 | 0,00001 | |
| Total | 23 | | | |

** = significativo em nível de 1% de probabilidade

* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Na Tabela 21 encontram-se os valores médios da velocidade terminal do chuchu para diferentes diâmetros dos tubos e dimensões de cilindros. Verifica-se que a velocidade terminal foi menor no tubo de 50 mm de diâmetro, não havendo diferença significativa nos tubos com 100 e 150 mm de diâmetro. Quanto às dimensões dos cilindros não foi constatada diferença significativa.

Tabela 21 – Comparação entre os valores médios da velocidade terminal do chuchu, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes dimensões dos cilindros.

| Diâmetro do tubo (mm) | vt (m / s) |
|------------------------------|------------|
| 50 | 0,0280 b |
| 100 | 0,0407 a |
| 150 | 0,0376 a |
| Dimensões dos cilindros (mm) | vt (m / s) |
| 8 x 20 | 0,0346 a |
| 12 x 30 | 0,0363 a |

DMS – Diâmetro do tubo = 0,00412

DMS – Dimensões dos cilindros = 0,0277

Os valores médios para a interação entre o diâmetro do tubo e as dimensões dos cilindros de chuchu são mostrados na Tabela 22. Observa-se por esta tabela que a velocidade terminal dos cilindros não apresentou diferenças significativas quando determinados no tubo com 100 mm de diâmetro e que os cilindros com dimensões 30 x 12 mm apresentaram velocidade terminal maior no tubo de 150 mm. Quanto às dimensões das partículas verifica-se que os cilindros com dimensões 8 x 20 mm obtiveram maior velocidade terminal no tubo de 100 mm de diâmetro enquanto que os cilindros com dimensões 12 x 30 mm obtiveram menor velocidade terminal no tubo com 50 mm de diâmetro, não apresentando diferenças significativas nos tubos com 100 e 150 mm.

Tabela 22 – Valores médios da velocidade terminal do chuchu para interação entre o diâmetro do tubo e as dimensões dos cilindros.

| Diâmetro do tubo | Dimensões dos cilindros (mm) | |
|------------------|------------------------------|-----------|
| | 20 x 8 | 30 x 12 |
| 50 mm | 0,0311 bA | 0,0250 bB |
| 100 mm | 0,0390 aA | 0,0425 aA |
| 150 mm | 0,0337 abB | 0,0416 aA |

DMS = 0,0058

Classificação com letras minúsculas nas colunas

MG = 0,03549

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

DMS = 0,0048

Classificação com letras maiúsculas nas linhas

CV % = 9,09772

4.3.1.2.2 Velocidade terminal da batata

Placas planas quadradas de batata

Na Tabela 23 encontra-se o quadro da análise de variância para a velocidade terminal de placas planas quadradas de batata, onde F1 representa os diâmetros dos tubos e F2 os diferentes tamanhos das placas. Constata-se nessa tabela que houve diferenças significativas em nível de 1% de probabilidade para o fator diâmetro dos tubos e para o fator diâmetro das placas. Para a interação entre esses dois fatores não houve diferença significativa.

Tabela 23 – Análise de variância da velocidade terminal da batata em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes diâmetros das placas (F2)

| Fonte de Variação | G. L. | S.Q. | Q.M. | F |
|--------------------------|-----------|----------------|---------|------------|
| Diâmetro dos tubos (F1) | 2 | 0,00004 | 0,00002 | 10,9291 ** |
| Diâmetro das Placas (F2) | 2 | 0,00004 | 0,00002 | 11,6368 ** |
| Int. F1 x F2 | 4 | 0,000001 | 0,00000 | 1,1467 ns |
| Resíduo | 27 | 0,000005 | 0,00000 | |
| Total | 35 | 0,00013 | | |

** = significativo em nível de 1% de probabilidade

* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Os valores médios da velocidade terminal obtida para as placas quadradas de batata encontram-se na Tabela 24. Observa-se que para os diâmetros dos tubos de 100 e 150 mm não houve diferença significativa entre os valores da velocidade e que para o tubo de diâmetro 50 mm a velocidade terminal foi menor. Analisando a mesma tabela, com relação ao tamanho das placas, verifica-se diferença significativa para a placa com 10 mm de lado, onde a mesma apresentou velocidade terminal maior que as placas com tamanho de 8 e 12 mm (lado).

Tabela 24 – Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da batata, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes tamanhos de placas.

| Diâmetro do tubo (mm) | vt (m / s) |
|-------------------------|------------|
| 50 | 0,0573 b |
| 100 | 0,0596 a |
| 150 | 0,0593 a |
| Tamanho das placas (mm) | vt (m / s) |
| 8 | 0,0582 b |
| 10 | 0,0602 a |
| 12 | 0,0575 b |

DMS – Diâmetro do tubo = 0,00134

DMS – Diâmetro das placas = 0,00134

Discos de batata

Na Tabela 25 encontra-se o quadro da análise de variância para a velocidade terminal de discos de batata, onde F1 representa os diâmetros dos tubos e F2 os diferentes diâmetros dos discos. Observa-se nessa tabela que houve diferenças significativas em nível de 5% de probabilidade para o fator diâmetro dos tubos, para o fator diâmetro dos discos e também para a interação entre esses dois fatores.

Tabela 25 – Análise de variância da velocidade terminal da batata em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes diâmetros das placas (F2)

| Fonte de Variação | G. L. | S.Q. | Q.M. | F |
|--------------------------|-----------|----------------|---------|----------|
| Diâmetro dos tubos (F1) | 2 | 0,00009 | 0,00004 | 4,2096 * |
| Diâmetro dos discos (F2) | 2 | 0,00009 | 0,00004 | 4,2974 * |
| Int. F1 x F2 | 4 | 0,00012 | 0,00003 | 2,8676 * |
| Resíduo | 27 | 0,00027 | 0,00001 | |
| Total | 35 | 0,00056 | | |

** = significativo em nível de 1% de probabilidade

* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Na Tabela 26 são apresentados os valores médios da velocidade terminal obtidas para discos de batata. Observa-se diferença significativa para a velocidade terminal em relação ao diâmetro dos tubos, onde se pode constatar que a velocidade aumenta com o aumento do diâmetro do tubo. Em relação ao diâmetro das placas verifica-se que a velocidade terminal é maior para o disco de 12mm e que os discos de 8 e 10 mm não apresentaram diferença significativa.

Tabela 26 – Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da batata, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes diâmetros de placas.

| Diâmetro do tubo (mm) | vt (m / s) |
|---------------------------------|-------------------|
| 50 | 0,0531 b |
| 100 | 0,056 ab |
| 150 | 0,0566 a |
| Diâmetro dos discos (mm) | vt (m / s) |
| 8 | 0,0541 b |
| 10 | 0,0542 b |
| 12 | 0,0574 a |

DMS – Diâmetro do tubo = 0,00322

DMS – Diâmetro das placas = 0,0322

Na Tabela 27 são mostrados os valores médios para a interação entre os diâmetros dos tubos e dos discos circulares de batata. Verifica-se que para o tubo de 50 mm de diâmetro, o disco de 12 mm apresenta maior velocidade terminal e em relação ao diâmetro dos discos, o de 8 mm apresentou menor velocidade terminal no tubo de 50 mm de diâmetro enquanto que o disco de 12 mm não apresentou diferença significativa em nenhum dos tubos de queda

Tabela 27 – Valores médios da velocidade terminal da batata para interação entre o diâmetro do tubo e o diâmetro do disco.

| Diâmetro do tubo | Diâmetros dos discos (mm) | | |
|------------------|---------------------------|------------|-----------|
| | 8 | 10 | 12 |
| 50 mm | 0,0509 bB | 0,0512 bB | 0,0571 aA |
| 100 mm | 0,0580 aA | 0,0534 abA | 0,0567 aA |
| 150 mm | 0,0534 abA | 0,0578 aA | 0,0585 aA |

DMS = 0,0056

DMS = 0,0056

Classificação com letras minúsculas nas colunas

Classificação com letras maiúsculas nas linhas

MG = 0,05523

CV % = 5,76478

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

Paralelepípedos

Na Tabela 28 encontra-se a análise de variância para os valores da velocidade terminal de paralelepípedos de batata, obtidos em diferentes diâmetros de tubos (F1) e diferentes dimensões de paralelepípedos (F2). Verifica-se que houve diferenças significativas em nível de 1% de probabilidade para os fatores diâmetro do tubo, dimensões dos paralelepípedos e para a interação entre esses dois fatores.

Tabela 28 – Análise de variância da velocidade terminal de chuchu em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes dimensões de paralelepípedos (F2)

| Fonte de Variação | G. L. | S.Q. | Q.M. | F |
|------------------------------------|-----------|----------------|---------|-------------|
| Diâmetro dos tubos (F1) | 2 | 0,00056 | 0,00028 | 74,4194 ** |
| Dimensões dos paralelepípedos (F2) | 1 | 0,00168 | 0,00168 | 446,6778 ** |
| Int. F1 x F2 | 2 | 0,00029 | 0,00015 | 39,1636 ** |
| Resíduo | 18 | 0,00007 | 0,00000 | |
| Total | 23 | 0,00260 | | |

** = significativo em nível de 1% de probabilidade

* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Os valores médios da velocidade terminal da batata para os diferentes diâmetros dos tubos e dimensões dos paralelepípedos estão na Tabela 29. Observa-se que os paralelepípedos apresentaram maior velocidade terminal no tubo com 150 mm de diâmetro. Quanto às dimensões, os paralelepípedos com 12 x 12 x 30 mm apresentaram velocidade terminal maior que os paralelepípedos com 8 x 8 x 20 mm.

Tabela 29 – Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da batata, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes dimensões de paralelepípedos.

| Diâmetro do tubo (mm) | vt (m / s) |
|---|-------------------|
| 50 | 0,0634 c |
| 100 | 0,0699 b |
| 150 | 0,0752 a |
| Dimensões dos paralelepípedos (mm) | vt (m / s) |
| 8 x 8 x 20 mm | 0,0611 b |
| 12 x 12 x 30 mm | 0,0779 a |

DMS – Diâmetro do tubo = 0,00248 DMS – Dimensões dos paralelepípedos = 0,00166

Os valores médios para a interação entre o diâmetro do tubo e as dimensões dos paralelepípedos de batata são mostrados na Tabela 30. Por esta tabela verifica-se que para todos os diâmetros dos tubos, a velocidade terminal foi maior para os paralelepípedos com dimensões 12 x 12 x 30 mm. Quanto ao fator dimensão dos paralelepípedos, observa-se que não houve diferenças significativas para a velocidade terminal dos paralelepípedos com 8 x 8 x 20 mm, enquanto que os paralelepípedos com 12 x 12 x 30 mm apresentaram maior velocidade terminal no tubo com 150 mm de diâmetro.

Tabela 30 – Valores médios da velocidade terminal da batata para interação entre o diâmetro do tubo e as dimensões dos paralelepípedos.

| Diâmetro do tubo | Dimensões dos paralelepípedos (mm) | |
|------------------|------------------------------------|--------------|
| | 20 x 8 x 8 | 30 x 12 x 12 |
| 50 mm | 0,0595 aB | 0,0673 cA |
| 100 mm | 0,0610 aB | 0,0787 bA |
| 150 mm | 0,0628 aB | 0,0877 aA |

DMS = 0,0035

DMS = 0,0029

Classificação com letras minúsculas nas colunas

Classificação com letras maiúsculas nas linhas

MG = 0,06950

CV % = 2,79201

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

Cilindros de batata

A análise de variância para os valores da velocidade terminal obtidos para cilindros de batata encontra-se na Tabela 31. Assim como os valores encontrados para os paralelepípedos de batata, observam-se diferenças significativas em nível de 1% de probabilidade para os fatores diâmetro do tubo, dimensões dos cilindros e para a interação entre os dois fatores.

Tabela 31 – Análise de variância da velocidade terminal de chuchu em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes dimensões de cilindros (F2)

| Fonte de Variação | G. L. | S.Q. | Q.M. | F |
|------------------------------|-----------|----------------|---------|------------|
| Diâmetro dos tubos (F1) | 2 | 0,00087 | 0,00044 | 13,6023 ** |
| Dimensões dos cilindros (F2) | 1 | 0,00274 | 0,00274 | 85,1015 ** |
| Int. F1 x F2 | 2 | 0,00051 | 0,00025 | 7,9028 ** |
| Residuo | 18 | 0,00058 | 0,00003 | |
| Total | 23 | 0,00470 | | |

** = significativo em nível de 1% de probabilidade

* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Na Tabela 32 estão os valores médios da velocidade terminal para os cilindros de batata com diferentes dimensões e em diferentes diâmetros dos tubos. Assim como observado para os cilindros de chuchu, a velocidade terminal dos cilindros de batata foi menor no tubo de 50 mm de diâmetro, não havendo diferenças significativas para os tubos com 100 e 150 mm de diâmetro. Quanto às dimensões dos cilindros, verifica-se que a velocidade terminal foi maior para o cilindro com dimensões 12 x 30 mm.

Tabela 32 – Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da batata, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes dimensões de cilindros.

| Diâmetro do tubo (mm) | vt (m / s) |
|-------------------------------------|-------------------|
| 50 | 0,0641 b |
| 100 | 0,0735 a |
| 150 | 0,0787 a |
| Dimensões dos cilindros (mm) | vt (m / s) |
| 8 x 20 | 0,0614 b |
| 12 x 30 | 0,0828 a |

DMS – Diâmetro do tubo = 0,00724

DMS – Dimensões dos cilindros = 0,00486

Na Tabela 33 encontram-se os valores médios da velocidade terminal para a interação entre o diâmetro do tubo e a dimensão dos cilindros de batata. Observa-se por esta tabela que a velocidade terminal foi maior para os cilindros com dimensões de 12 x 30 mm em todos os diâmetros de tubo. Da mesma forma que para os paralelepípedos de batata, observa-se que não houve diferenças significativas para a velocidade terminal de cilindros com 8 x 20 mm enquanto que os cilindros com dimensões de 12 x 30 mm apresentaram velocidade terminal menor no tubo com 50 mm de diâmetro.

Tabela 33 – Valores médios da velocidade terminal da batata para interação entre o diâmetro do tubo e as dimensões dos cilindros.

| Diâmetro do tubo | Dimensões dos cilindros (mm) | |
|------------------|------------------------------|-----------|
| | 20 x 8 | 30 x 12 |
| 50 mm | 0,0598 aB | 0,0685 bA |
| 100 mm | 0,0610 aB | 0,0860 aA |
| 150 mm | 0,0636 aB | 0,0940 aA |

DMS = 0,0102

DMS = 0,0084

Classificação com letras minúsculas nas colunas

Classificação com letras maiúsculas nas linhas

MG = 0,07216

CV % = 7,85874

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

4.3.1.2.3 Velocidade terminal da cenoura

Placas planas quadradas de cenoura

Na Tabela 34 encontra-se o quadro da análise de variância para a velocidade terminal de placas planas quadradas de cenoura, onde os diâmetros dos tubos são representados por F1 e os diferentes diâmetros das placas representados por F2. Observa-se que houve diferença significativa em nível de 5% de probabilidade para o diâmetro das placas e que para o diâmetro dos tubos e para interação entre os fatores F1 e F2 não houve diferenças significativas.

Tabela 34 – Análise de variância da velocidade terminal em água da cenoura, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes diâmetros das placas (F2)

| Fonte de Variação | G. L. | S.Q. | Q.M. | F |
|--------------------------|-----------|----------------|---------|-----------|
| Diâmetro dos tubos (F1) | 2 | 0,00006 | 0,00003 | 2,7435 ns |
| Diâmetro das Placas (F2) | 2 | 0,00009 | 0,00005 | 4,0103 * |
| Int. F1 x F2 | 4 | 0,00001 | 0,00000 | 0,1865 ns |
| Resíduo | 27 | 0,00031 | 0,00001 | |
| Total | 35 | 0,00047 | | |

** = significativo em nível de 1% de probabilidade

* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Os valores médios da velocidade terminal obtidas para as placas quadradas de cenoura encontram-se na Tabela 35. Observa-se que não houve diferenças significativas para a velocidade terminal para os diâmetros dos tubos. Com relação ao tamanho das placas, verifica-se diferença significativa para a placa com 8 mm de lado, onde a mesma apresenta velocidade terminal maior que as placas com lados de 8 e 12 mm.

Tabela 35 – Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da cenoura, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes tamanhos das placas.

| Diâmetro do tubo (mm) | vt (m / s) |
|--------------------------------|-------------------|
| 50 | 0,0374 a |
| 100 | 0,0403 a |
| 150 | 0,0400 a |
| Tamanho das placas (mm) | vt (m / s) |
| 8 | 0,0414 a |
| 10 | 0,0375 b |
| 12 | 0,0389 ab |

DMS – Diâmetro do tubo = 0,00341

DMS – Diâmetro das placas = 0,00341

Discos de cenoura

O quadro da análise de variância para a velocidade terminal de discos de cenoura encontra-se na Tabela 36, onde F1 representa os diâmetros dos tubos e F2 os diferentes diâmetros dos discos placas. Observa-se nessa tabela que houve diferenças significativas em nível de 1% de probabilidade para o fator diâmetro dos tubos, para o fator diâmetro das placas e para a interação entre esses dois fatores não houve diferença significativa.

Tabela 36 – Análise de variância da velocidade terminal da cenoura em água, em tubos de diferentes diâmetros (F1) e diferentes diâmetros das placas (F2)

| Fonte de Variação | G. L. | S.Q. | Q.M. | F |
|--------------------------|-----------|----------------|---------|------------|
| Diâmetro dos tubos (F1) | 2 | 0,00009 | 0,00005 | 11,7651 ** |
| Diâmetro das Placas (F2) | 2 | 0,00015 | 0,00008 | 18,9312 ** |
| Int. F1 x F2 | 4 | 0,00002 | 0,00001 | 1,2997 ns |
| Resíduo | 27 | 0,00011 | 0,00000 | |
| Total | 35 | 0,00038 | | |

** = significativo em nível de 1% de probabilidade

* = significativo em nível de 5% de probabilidade

ns = não significativo

Na Tabela 37 são mostrados os valores médios da velocidade terminal obtidos para os discos de cenoura. Verifica-se que a velocidade foi menor no tubo de 50 mm de diâmetro e não apresentou diferença significativa para os tubos de 100 e 150 mm de diâmetro. Com relação ao diâmetro das placas observa-se que a velocidade terminal é maior para o disco de 8 mm e que os discos de 10 e 12 mm não apresentaram diferença significativa.

Tabela 37 – Comparação entre os valores médios da velocidade terminal da cenoura, para diferentes diâmetros de tubos e diferentes diâmetros dos discos.

| Diâmetro do tubo (mm) | vt (m / s) |
|--------------------------|------------|
| 50 | 0,0342 b |
| 100 | 0,0365 a |
| 150 | 0,0382 a |
| Diâmetro das placas (mm) | vt (m / s) |
| 8 | 0,0390 a |
| 10 | 0,0359 b |
| 12 | 0,0340 b |

DMS – Diâmetro do tubo = 0,00203

DMS – Diâmetro das placas = 0,00203

Analisando todos os resultados obtidos em todos os casos estudados anteriormente, verifica-se, de modo geral, que quanto ao tamanho do tubo de queda, a velocidade terminal foi maior quando obtidas com o tubo de maior diâmetro. No estudo

da influência do tamanho e forma das peças, em geral, para placas planas e discos planos, a velocidade terminal foi maior para a peça de menores dimensões, enquanto que para os paralelepípedos e cilindros, a velocidade terminal foi maior para a peça de maior dimensão e, conseqüentemente, maior massa. Não houve diferença entre os resultados para o chuchu e a batata visto que ambos possuem praticamente a mesma massa específica, aproximadamente, 1070 kg.m^{-3} , e algumas diferenças de comportamento foram observados para a cenoura, isto devido a sua diferença de densidade bem como sua constituição diferente, com um miolo mais denso do que sua polpa mais externa.

Para melhor entendimento destes resultados faz-se necessário um estudo detalhado do coeficiente de arraste, bem como do efeito de parede em cada caso.

4.3.2 Coeficiente de arraste

Na Tabela 38 encontram-se os valores do coeficiente de arraste dos discos e placas quadradas de chuchu, batata e cenoura, calculados pela Equação proposta por ISAACS e THODOS (1967).

Tabela 38 – Coeficiente de arraste das placas circulares e quadradas de chuchu, batata e cenoura obtidos pela equação proposta por ISAACAS e THODOS (1967).

| Chuchu | C_D (adimensional) |
|--|--|
| Placas circulares e quadradas de 8 mm | 1,35 |
| Placas circulares e quadradas de 10 mm | 1,41 |
| Placas circulares e quadradas de 12 mm | 1,46 |
| Batata | C_D (adimensional) |
| Placas circulares e quadradas de 8 mm | 1,35 |
| Placas circulares e quadradas de 10 mm | 1,41 |
| Placas circulares e quadradas de 12 mm | 1,46 |
| Cenoura | C_D (adimensional) |
| Placas circulares e quadradas de 8 mm | 1,35 |
| Placas circulares e quadradas de 10 mm | 1,41 |
| Placas circulares e quadradas de 12 mm | 1,46 |

Percebe-se por estas tabelas que o menor coeficiente de arraste é, exatamente, para as placas de menores tamanhos, como o coeficiente de arraste é uma medida da resistência ao movimento oferecida para partícula, estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos, anteriormente, para velocidade terminal.

Os valores dos coeficientes de arraste de cilindros e paralelepípedos de chuchu e batata, calculados pelas equações propostas por ISAACS e THODOS (1967) encontram-se na Tabela 39.

Tabela 39 – Coeficientes de arraste para cilindros e paralelepípedos de chuchu e batata obtidos pela Equação proposta por ISAACS E THODOS (1967).

| Chuchu | C_{D1} (adimensional) |
|--------------------------|---|
| Cilindros de 8 mm | 0,91 |
| Cilindros de 12 mm | 0,91 |
| Paralelepípedos de 8 mm | 0,91 |
| Paralelepípedos de 12 mm | 0,91 |
| Batata | C_{D1} (adimensional) |
| Cilindros de 8 mm | 0,91 |
| Cilindros de 12 mm | 0,91 |
| Paralelepípedos de 8 mm | 0,91 |
| Paralelepípedos de 12 mm | 0,91 |

Analisando os resultados, segundo ISAACS e THODOS, percebe-se que o coeficiente de arraste é o mesmo em todos os casos e isto explica a obtenção da maior velocidade terminal, para a peça de maior massa e no tubo de queda de maior diâmetro. O fato de a velocidade terminal ter sido maior no tubo de maior diâmetro pode ser explicado pelo efeito de parede.

4.3.3 Efeito de parede

Na Tabela 40 estão mostrados os valores do efeito de parede, também chamado de efeito devido à presença de fronteira rígida, dos produtos estudados nos tubos de 50 mm, 100 mm e 150 mm.

Tabela 40 – Efeito de parede dos produtos estudados nos tubos de 50 – 150 mm

| β (adimensional) | Diâmetros dos tubos | | |
|---|---------------------|--------|--------|
| | 50 mm | 100 mm | 150 mm |
| Placas circulares e quadradas de 8 mm | 0,16 | 0,08 | 0,05 |
| Placas circulares e quadradas de 10 mm | 0,20 | 0,10 | 0,06 |
| Placas circulares e quadradas de 12 mm | 0,24 | 0,12 | 0,06 |
| Cilindros e paralelepípedos de 8 mm (diâmetro médio = 10,85 mm) | 0,22 | 0,11 | 0,07 |
| Cilindros e paralelepípedos de 12 mm (diâmetro médio = 16,28 mm) | 0,34 | 0,17 | 0,10 |

O efeito de parede representa a presença de parede e sua influência sobre o movimento da partícula. Representado por β , o efeito de parede é obtido diretamente pela relação entre a dimensão efetiva da partícula e o diâmetro do tubo de queda. Isto significa que quanto menor for β , menor será o efeito de parede e mais livremente a partícula cai no tubo (Figuras 5 e 6). Estes fatos explicam porque os resultados de velocidade terminal foram menores nos tubos de menor diâmetro e maior nos tubos de maiores diâmetros.

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 40 e as Figuras 5 e 6, percebe-se que o parâmetro β , em todos os casos, é menor, exatamente, para o tubo de 150 mm, o que justifica os resultados maiores de velocidade terminal obtidos com este tubo.

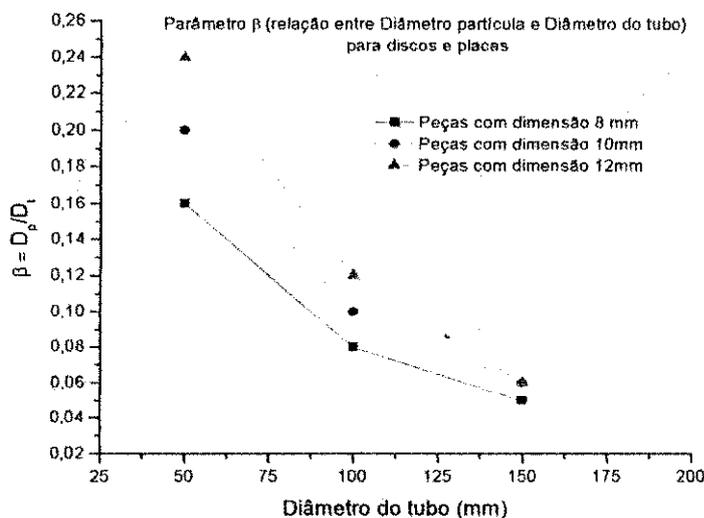


Figura 5 – Relação entre diâmetros da partícula e do tubo para peças planas, circulares e quadradas.

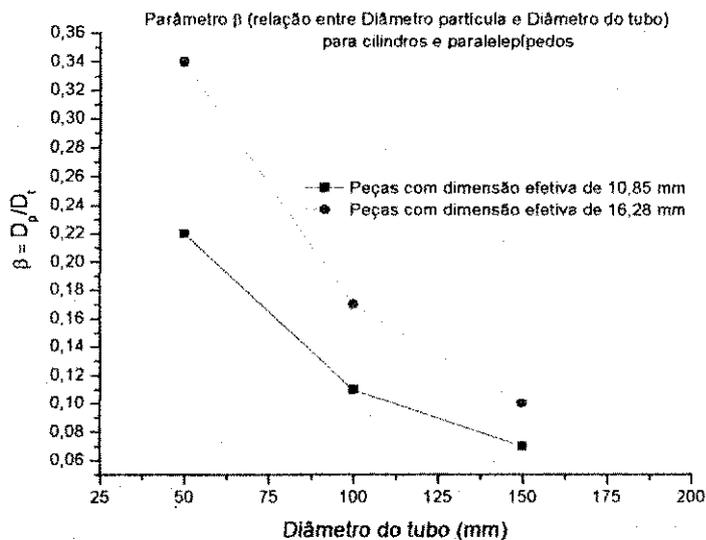


Figura 6 – Relação entre diâmetros da partícula e do tubo para peças cilíndricas e paralelepípedos.

5- CONCLUSÕES

- A massa específica unitária (real) foi de 1007; 1073 e 1006 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, para chuchu, batata e cenoura, respectivamente, com teores de água de 89,84%, 81,93% e 92,48% b.u. respectivamente.
- As velocidades máximas das placas planas quadradas de chuchu foram obtidas com o tubo de 150 mm e foram de aproximadamente, 0,028; 0,028 e 0,029 m/s para as placas com diâmetros de 8, 10 e 12 mm, respectivamente.
- As velocidades máximas dos discos de chuchu foram obtidas com o tubo de 150 mm e foram de aproximadamente 0,029; 0,022 e 0,026 m/s para os discos com diâmetros de 8, 10 e 12 mm, respectivamente.
- As velocidades máximas dos cilindros de chuchu foram obtidas com o tubo de 100 mm e foram de aproximadamente 0,039; 0,042 m/s para os cilindros com diâmetros de 8 e 12 mm, respectivamente.
- As velocidades máximas dos paralelepípedos de chuchu foram obtidas com o tubo de 150 mm e foram de aproximadamente 0,032; 0,036 m/s nos paralelepípedos com diâmetros de 8 e 12 mm, respectivamente.
- As velocidades máximas das placas planas quadradas de batata foram obtidas com o tubo de 150 mm e foram de aproximadamente 0,058; 0,062; 0,059 m/s para as placas com diâmetros de 8, 10 e 12 mm, respectivamente.
- As velocidades máximas dos discos de batata foram obtidas com o tubo de 150 mm e foram de aproximadamente 0,053; 0,059 e 0,059 m/s para os discos com diâmetros de 8, 10 e 12 mm, respectivamente.
- As velocidades máximas dos cilindros de batata foram obtidas com o tubo de 150 mm e foram de aproximadamente 0,064 e 0,094 m/s para os cilindros com diâmetros de 8 e 12 mm, respectivamente.

- As velocidades máximas dos paralelepípedos de batata foram obtidas com o tubo de 150 mm e foram de aproximadamente, 0,063; 0,088 m/s nos paralelepípedos com diâmetros de 8 e 12 mm, respectivamente.
- As velocidades máximas das placas planas quadradas de cenoura foram obtidas com o tubo de 150 mm e foram de aproximadamente 0,041; 0,038 e 0,040 m/s para as placas com diâmetros de 8, 10 e 12 mm, respectivamente.
- As velocidades máximas dos discos de cenoura foram obtidas com o tubo de 150 mm e foram de aproximadamente 0,041; 0,039 e 0,036 m/s para os discos com diâmetros de 8, 10 e 12 mm, respectivamente.
- Velocidade terminal aumenta à medida que se aumenta o diâmetro do tubo de queda para todas as peças de chuchu, batata e cenoura, independente da forma geométrica, portanto existe influência do diâmetro do tubo de queda na velocidade terminal de partículas.
- Os cilindros e os paralelepípedos de chuchu e batata, de modo geral, apresentaram velocidades maiores do que os discos e placas, independentemente do tamanho do tubo de queda, evidenciando a influência da forma da partícula na velocidade terminal em água.
- A velocidade terminal calculada pela equação sugerida por ISAACS e THODOS ofereceu uma boa aproximação da velocidade terminal experimental, principalmente para as formas geométricas do chuchu.
- A equação citada por MOHSENIN, com C_D sugerido por CLIFT et al. resulta em valores muito menores do que os valores experimentais.
- A equação citada por MOHSENIN, com o C_D sugerido por HEISS e COULL, fornece valores muito próximos dos experimentais, para batata, mas para o chuchu os valores calculados são menores do que os obtidos experimentalmente.

- O coeficiente de arraste das placas circulares e quadradas de chuchu, batata e cenoura obtidos pela equação proposta por ISAACS e THODOS, foram 1,35; 1,41 e 1,46 e para peças cilíndricas e paralelepípedos foram 0,91.
- O efeito de parede foi mais presente nos tubos de 50 mm, para as peças cilíndricas e em forma de paralelepípedos ($\beta \in 0,34$). Nos demais tubos, na presença de todas as outras peças, esse efeito foi menor sendo verificado o menor efeito para discos e placas planas quadradas de 8 mm, no tubo de 150 mm ($\beta=0,05$).

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

BERBARI, S.A.G.; PASCHOALINO, J. E.; SILVEIRA, N. F. A. Efeito do cloro na água de lavagem para desinfecção de alface minimamente processada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**., v. 21, n. 2, p. 197-201, 2001.

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.

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

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

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

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

CHHABRA, R. P. Wall effects on terminal velocity of non spherical particles in non-Newtonian polymer solutions.**Powder Technology**. nº88, p.39-44, 1996.

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 de ; 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.

CHRISTIANSEN, E. B., BARKER, D. H. **AIChE Journal**. p 145-151, 1965.

DAHNEKE, B. E., **Journal Aerosol Science**. p. 139-145, 1973.

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

DEWEY, D. H. ; STOUT, B. A.; MATTEWS, R. H. ; BAKKER-ARKEMA, F. W. **Development of hydrohandling system sorting and sizing apples storage in pallet boxes**. Marketing Research Reporting nº743 STD, UDFS. 1966.

DUARTE, M. E. M. In: Tecnologia de Armazenagem de Sementes. SBEA – UFCG. 2006. 400p.

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.

GUPTA, R. K. ; DAS, S. K. Physical properties of sunflower seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v.66, n.1, p.1-8, 1997.

HAPPEL, 1973

HEISS, J. F., COULL, J. **Chemical Engineering Program**. p. 133-140, 1952.

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

HOERNER, S. F. **Fluid dynamic drag**. New Jersey, 1958.

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

JAYAWEERA, K. O. L. F. **Q. J. R. Meteorology Society**. p 703-709, 1969.

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

LIMA, J.M.; MASSON, M.L. Alimentos minimamente processados: a nova tendência de mercado. **Nutrição Brasil**. Ano 2, n. 3, p. 154-159, 2003.

LIST, R. **Journal Atmospheric Science**. p 110-115, 1971.

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.

MATTHEWS, F. V.; SOUT, B. A.; DEWEY, D. D.; BAKKER-ARKEMA, F. W. **Hydrohandiling of apple fruits. American Society of Agricultural Engineers.** St Joseph, Michigan, 1995.

MCKAY, W. R. M. ;DABBAGHZADEH, S. J. Fluidization and hydraulic transport of carrot pieces. Department of Chemical Engineering. **Journal of Food Engineering.** v.6, p. 377-399, 1987.

McNOWN, J. S., MALAIKA, J. **Trans. Am. Geophysical Union.** p 74-82, 1950.

MILLER, E. E.; SADBOLT, C. A.; HOLM, L. Use of optical planimeter for measuring leaf area. **Plant Physiology.** P. 484-496. 1959.

MOHSENIN, N. N. **Physical proprieties of plant and animal materials.** 2nd ed New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1978. 742 p.

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.

PAZINATO, B. C. **Vegetais minimamente processados.** Campinas: Secretaria da Agricultura e do Abastecimento, 1999.

PETTYJOHN, E. S.; CHRISTIANSEN, E. B. **Effect of particle shape on free-settling rates of isometric particles.** 1948, 44, 156.

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

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

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

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

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

SILVA, F de A S. e. The ASSISTAT Software: statistical assistance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 6, Cancun, 1996. **Anais...** Cancun: American Society of Agricultural Engineers, 1996. p.294-298.

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

TENNES, B. R.; LEVIN, J. H.; STOUT, B. A. Sweet cherry properties useful in harvesting and handling equipment design. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, Michigan, v.12, p. 710-714, 1969.

THALER, A. In-plant transport of bulk goods in confectionery factories. **Kakao and Zucker**. V.33,n.1, p. 2-6, 1981.

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.

UHLHERR, P. H. T. ;CHHABRA, R. P. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v.73, p.918-923, 1995.

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