



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS



TESE

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS**

MODELAGEM DE PARÂMETROS FLUIDODINÂMICOS DE TOMATES

RUTH BRITO DE FIGUEIREDO MELO

**Campina Grande, Paraíba
Dezembro/2019**

RUTH BRITO DE FIGUEIREDO MELO

MODELAGEM DE PARÂMETROS FLUIDODINÂMICOS DE TOMATES

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Área de Concentração: Desenvolvimento de processos

ORIENTADORES:

Prof^a. Dra. Maria Elita Martins Duarte

Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Campina Grande – Paraíba

Dezembro/2019

M528m Melo, Ruth Brito de Figueiredo.
Modelagem de parâmetros fluidodinâmicos de tomates / Ruth Brito de Figueiredo Melo. – Campina Grande, 2019.
158 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, 2019.
"Orientação: Prof. Dra. Maria Elita Martins Duarte, Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata".

Referências.

1. Tomates (*Solanum lycopersicum L.*). 2. Ascensão. 3. Modelagem. 4. Fluido. I. Duarte, Maria Elita Martins. II. Mata, Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti. III. Título.

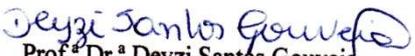
CDU 635.64(043)

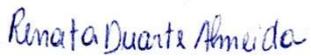
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE RUTH BRITO DE FIGUEIREDO MELO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado apresentada em 13 de Dezembro de 2019.


Prof.^a Dr.^a Maria Elita Martins Duarte
UFCG/CTRN/UAEA – ORIENTADORA


Prof. Dr. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata
UFCG/CTRN/UAEA – ORIENTADOR


Prof.^a Dr.^a Deyzi Santos Gouveia
UFCG/CTRN/UAEA – EXAMINADORA EXTERNA


Dr.^a Renata Duarte Almeida
UFCG/CTRN/UAEA – EXAMINADORA EXTERNA


Prof. Dr. Marcos José de Almeida Gama
UFCG/CTRN/UAEA – EXAMINADOR INTERNO


Prof. Dr. Ramon Viana de Sousa
IFRN/DF – EXAMINADOR EXTERNO

Campina Grande, Paraíba

Dezembro/2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para realização deste trabalho, em especial:

- ✓ A Deus em primeiro lugar, por ter me iluminado e transmitido força para realizar com êxito este trabalho, a ele toda honra e glória.
- ✓ Aos meus queridos pais Romualdo e Helena, por todo incentivo, amor, dedicação, apoio e por todos os conselhos para que eu pudesse ser quem sou hoje, a eles meu eterno agradecimento.
- ✓ Ao meu esposo Alisson, por todo apoio durante toda esta caminhada, em todos os aspectos, não só na pesquisa, como também nos momentos de dúvidas e incertezas, sempre ao meu lado, sendo um ajudador e cuidador em todos os sentidos. E aos meus filhos Lucas e Ana Leticia, por também sempre me apoiarem, me animarem e torcerem por mim, vocês sempre foram minha fonte de inspiração para não fraquejar durante todo o curso de doutorado.
- ✓ A minha irmã Raquel e a Aldaíza por todo carinho, cuidado e incentivo e também ao meu irmão Romualdinho, que apesar de não estar, mas fisicamente entre nós devido a sua partida prematura, sinto sua lembrança e seu amor todos os dias da minha vida.
- ✓ A Sandy e a Jozilma, por toda ajuda concedida durante a pesquisa, bem como a todos os meus outros familiares, pelas orações, apoio, ajuda e incentivo.
- ✓ A Prof^a. Dra. Maria Elita Martins Duarte, pela eficiente orientação e incentivo no desenvolvimento de todas as etapas do trabalho, e pela sua amizade, assim como ao Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata.
- ✓ Agradeço a minha instituição, a Universidade Estadual da Paraíba, pela liberação parcial para realização do curso de doutorado, bem como a meus colegas de trabalho e aos meus queridos alunos, pela força e incentivo sempre concedidos.
- ✓ Meus respeitosos agradecimentos pelas contribuições e sugestões da banca, nas pessoas da Dra. Renata Duarte Almeida, do Prof. Ramon Viana de Sousa, do Prof. Dr. Marcos José de Almeida Gama e da Prof.^a Dr.^a Deyzi Santos Gouveia.
- ✓ Aos amigos que conquistei na UFCG, Anastácia, Amanda, Leila, Rafaela, Rebeca, Manoel, Douglas, Ana Paula, Sevé, Thaysa, Mércia e tantos outros, que tornaram a caminhada mais amena.
- ✓ Aos amigos André e Lizziane por toda apoio e amizade, inclusive na correção primorosa do trabalho escrito, como também por suas orações.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral	4
1.2 Objetivos específicos	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Tomate (<i>Solanum lycopersicum L.</i>), o fruto do tomateiro	5
2.1.1 Tomate da variedade Caqui.....	9
2.1.2 Tomate da variedade Italiano.....	10
2.2 Características físicas	11
2.2.1 Teor de água	12
2.2.2 Forma e tamanho	14
2.2.2.1 Relações entre a forma e a dinâmica da partícula	15
2.2.3 Volume	20
2.2.4 Massa específica	20
2.2.5 Área projetada e critério	23
2.2.6 Área Superficial	24
2.2.7 Esfericidade	24
2.2.8 Firmeza	26
2.3 Transporte hidráulico	27
2.3.1 Orientação do fruto no fluido	28
2.3.2 Interações sólido-fluido	30
2.3.3 Velocidade terminal	33

2.3.3.1 Velocidade terminal para corpos esféricos	38
2.3.3.2 Velocidade terminal para corpos isométricos	40
2.3.4 Força e coeficiente de arrasto	43
2.3.5 Efeito de parede	51
3 MATERIAL E MÉTODOS	55
3.1 Local dos experimentos	55
3.2 Matéria-prima	55
3.3 Características físicas	56
3.3.1 Teor de água	57
3.3.2 Tamanho	57
3.3.3 Massa	58
3.3.4 Volume	58
3.3.5 Massa específica real	59
3.3.6 Área projetada	59
3.3.7 Área critério ou área projetada média	62
3.3.8 Área superficial	62
3.3.9 Esfericidade.....	62
3.3.10 Firmeza.....	63
3.3.11 Análise estatística	64
3.4 Parâmetros hidrodinâmicos do transporte em ascensão livre.....	64
3.4.1 Orientação do fruto no fluido	64
3.4.2 Velocidade terminal e coeficiente de arraste experimental	65
3.4.2.1 Equipamento	66
3.4.2.2 Procedimento experimental	67
3.4.2.3 Efeito da forma (modelos esféricos)	69
3.4.3 Velocidade terminal e coeficiente de arraste calculados para corpos esféricos	70
3.4.3.1 Método 1.....	70

3.4.3.2 Método 2	71
3.4.3.3 Método 3	71
3.4.3.4 Método 4	71
3.4.3.5 Método 5	71
3.4.3.6 Método 6	72
3.4.4 Velocidade terminal e coeficiente de arraste calculados para corpos isométricos	72
3.4.4.1 Método 1	72
3.4.4.2 Método 2	73
3.4.4.3 Método 3	73
3.4.4.4 Método 4	73
3.5 Efeito de parede	74
3.5.1 Método 1	74
3.5.2 Método 2	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1 Características Físicas	75
4.1.1 Tomates da variedade Caqui	75
4.1.2 Tomates da variedade Italiano	81
4.1.3 Firmeza dos tomates da variedade caqui e italiano	87
4.2 Comportamento hidrodinâmico dos tomates	88
4.2.1 Tomates da variedade Caqui	88
4.2.2 Tomates da variedade Italiano	92
4.2.3 Efeito da forma na velocidade terminal	97
4.3 Parâmetros hidrodinâmicos dos modelos esféricos	99
4.4 Parâmetros hidrodinâmicos calculados	101
4.4.1 Modelos esféricos.....	101
4.4.2 Tomates da variedade caqui.....	105

4.4.3 Tomates da variedade Italiano.....	110
4.5 Efeito de parede	114
4.5.1 Modelos esféricos.....	114
4.5.2 Tomates da variedade caqui.....	115
4.5.3 Tomates da variedade italiano.....	117
4.5.4 Relação entre o efeito de parede, a forma, a orientação e a estrutura interna do fruto	119
4.6 Modelagem de parâmetros hidrodinâmicos de tomate	125
4.6.1 Coeficiente de arraste, número de Reynolds e velocidade terminal de tomates	127
5 CONCLUSÕES	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
APÊNDICE A – Análise de variância das propriedades físicas dos tomates da variedade caqui e Italiano.....	146
APÊNDICE B – Fotos dos tomates caqui e italiano internamente	156
APÊNDICE C – Modelos matemáticos (MELO - DUARTE, 2019)	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Tomate (<i>Solanum lycopersicum L.</i>) variedade Caqui	10
Figura 2.2	Tomate (<i>Solanum lycopersicum L.</i>) variedade Italiano	11
Figura 2.3	Comparação das leis de arrasto com dados de experimentos de esfera	18
Figura 2.4	Comparação da lei de arrasto de Rubey's com dados de sedimentos naturais	19
Figura 2.5	Perfil da velocidade de escoamento na região de entrada e no escoamento completamente desenvolvido	34
Figura 2.6	Forças e momentos atuantes em um corpo genérico imerso em um escoamento	43
Figura 2.7	Comportamento do coeficiente de arraste em esferas	45
Figura 2.8	Coeficiente de arraste para partículas com formas geométricas regulares	47
Figura 3.1	Amostras do tomate Italiano adquiridos no comércio local	55
Figura 3.2	Esquema para realização do experimento	56
Figura 3.3	Máximas dimensões (a, b, c) do tomate caqui em 3 direções mutuamente perpendiculares no estágio 1 de maturação	57
Figura 3.4	Determinação do volume do fruto.....	59
Figura 3.5	Cálculo da área projetada 1, da tomate 1 tipo 2	60
Figura 3.6	Cálculo da área projetada 2, da tomate 1 tipo 2	61
Figura 3.7	Cálculo da área projetada 3, da tomate 1 tipo 2	61
Figura 3.8	Texturômetro modelo TA-XT plus, utilizado para determinação da firmeza	63
Figura 3.9	Foto da área superficial submersa e do ângulo em relação a superfície da água da amostra 1, do tomate tipo 1 (Caqui), no estágio maduro ...	65
Figura 3.10	Equipamento construído para determinação da velocidade terminal da fruta	67
Figura 3.11	Modelos esféricos	69
Figura 4.1	Deslocamento (m) x tempo (s) do tomate da variedade caqui	90

Figura 4.2	Deslocamento (m) x tempo (s) após atingir a velocidade terminal do tomate da variedade caqui	91
Figura 4.3	Relação da Esfericidade pela velocidade terminal dos tomates da variedade Caqui	91
Figura 4.4	Figuras geométricas definidas, (a) esfera, (b) esferoide oblato, (c) esferoide prolato	94
Figura 4.5	Deslocamento (m) x tempo (s) do tomate da variedade italiano	95
Figura 4.6	Deslocamento (m) x tempo (s) após atingir a velocidade terminal do tomate da variedade italiano	96
Figura 4.7	Relação da Esfericidade pela velocidade terminal do tomate da variedade italiano	96
Figura 4.8	Relação da velocidade terminal experimental, e das velocidades calculadas dos modelos esféricos confeccionados segundo as correlações matemáticas para corpos esféricos	103
Figura 4.9	Curva de CD em função de Re (dados experimentais/correlações da literatura)	104
Figura 4.10	Relação da velocidade terminal experimental, e das velocidades calculadas por ordem de esfericidade para tomates da variedade caqui por ordem de esfericidade.....	108
Figura 4.11	Relação da velocidade terminal experimental, e das velocidades calculadas por ordem de esfericidade para tomates da variedade italiano por ordem de esfericidade.....	113
Figura 4.12	Influência do efeito de parede para os modelos esféricos (1), (2) e (3), durante a realização do experimento de velocidade terminal	119
Figura 4.13	Influência do efeito de parede para os tomates da variedade caqui em todos os estádios de maturação	120
Figura 4.14	Influência do efeito de parede para os tomates da variedade italiano em todos os estádios de maturação	121
Figura 4.15	Estrutura interna do tomate da variedade caqui nos 5 estádios de maturação	122
Figura 4.16	Estrutura interna do tomate da variedade italiano nos 5 estádios de maturação	122
Figura 4.17	Forma do tomate caqui em diferentes estádios de maturação	123

Figura 4.18	Forma do tomate italiano em diferentes estádios de maturação	124
Figura 4.19	Orientação no fluido do tomate variedade caqui em diferentes estádios de maturação	124
Figura 4.20	Orientação no fluido do tomate variedade italiano em diferentes estádios de maturação	124
Figura 4.21	Curva ($C_D \times Re$) dos tomates da variedade caqui com seus valores experimentais e calculados	126
Figura 4.22	Curva ($C_D \times Re$) dos tomates da variedade italiano com seus valores experimentais e calculados.....	126
Figura 4.23	Curva ($C_D \times Re$) dos valores experimentais e calculados dos tomates com esfericidade de $0,75 \leq \varphi \leq 1^*$, no Regime de Newton ($9000 \leq Re \leq 16000$) segundo (Melo e Duarte, 2019)	130
Figura 4.24	Curva ($C_D \times Re$) tomates com esfericidade de $0,75 \leq \varphi \leq 1^*$, no Regime de Newton ($9000 \leq Re \leq 16000$) segundo (Melo e Duarte, 2019) usando as correlações de PettyJohn e Christiansen (1948)	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição média centesimal do fruto de tomate fresco, em massa.....	6
Tabela 2.2	Classes do tomate em função do diâmetro transversal	9
Tabela 2.3	Características físicas dos frutos de tomate em diferentes estádios de maturação, escoados no entreposto de comercialização da EMPASA-CG	12
Tabela 2.4	Densidade e teor de água de polpas de frutas tropicais	22
Tabela 2.5	Caracterização do tomate inteiro fresco de quatro cultivares de tomates	22
Tabela 2.6	Fluidodinâmica da partícula esférica; avaliação das correlações.....	39
Tabela 2.7	Fluidodinâmica da partícula isométrica; avaliação das correlações	42
Tabela 2.8	Resumo comparativo de equações de movimento de esferas, discos e cilindros circulares	50
Tabela 2.9	Efeito de parede em queda livre de uma esfera ao longo de um tubo....	52
Tabela 2.10	Efeito de parede de laranjas e modelos esféricos ao longo do eixo de um tubo	53
Tabela 2.11	Efeito de parede na fluidodinâmica da partícula isométrica em fluido newtoniano	54
Tabela 4.1	Características físicas dos tomates da variedade Caqui nos cinco estádios de maturação – Parte 1	76
Tabela 4.2	Características físicas dos tomates da variedade Caqui nos cinco estádios de maturação – Parte 2	77
Tabela 4.3	Valores médios das características físicas dos tomates da variedade caqui nos cinco estádios de maturação segundo análise estatística	79
Tabela 4.4	Características físicas dos tomates da variedade Italiano nos cinco estádios de maturação – Parte 1	82
Tabela 4.5	Características físicas dos tomates da variedade Italiano nos 5 estádios de maturação – Parte 2	83

Tabela 4.6	Valores médios das características físicas dos tomates da variedade italiano nos cinco estádios de maturação segundo análise estatística...	85
Tabela 4.7	Esfericidade com respectiva velocidade terminal experimental para os tomates da variedade caqui	89
Tabela 4.8	Esfericidade com respectiva velocidade terminal experimental para tomate variedade italiano	92
Tabela 4.9	Comparação entre os valores médios de velocidade terminal de tomates das variedades caqui e italiano, durante a subida em duto de água, com secção quadrada com $L = 0,38$ m	97
Tabela 4.10	Coefficiente de arraste e velocidade terminal experimental dos modelos esféricos	99
Tabela 4.11	Comparação entre os valores médios de velocidade terminal dos modelos esféricos durante a subida em duto de água, com secção quadrada com $L = 0,38$ m.....	99
Tabela 4.12	Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos esféricos segundo (CD1 = 0,44) e Abraham – 1970 - CD2), para os modelos esféricos confeccionados.....	102
Tabela 4.13	Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos esféricos segundo (Brauer e Sucker – 1976 – CD3) e (Concha e Almeida – 1979 - CD4), para os modelos esféricos	102
Tabela 4.14	Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos esféricos segundo (Haider e Levenspiel – 1989 – CD5) e (Coelho e Massarani, 1996 – CD6), para os modelos esféricos	103
Tabela 4.15	Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos isométricos segundo (Pettyjohn e Christiansen – 1948 - CD1) e (Concha e Barrientos - 1986) - CD2, para tomate da variedade caqui	106
Tabela 4.16	Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos isométricos segundo (Haider e Levenpiel – 1989 – CD3) e (Coelho e Massarani – 1996 - CD4), para tomate da variedade caqui	107
Tabela 4.17	Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos isométricos segundo (Pettyjohn e Christiansen – 1948 - CD1) e (Concha e Barrientos - 1986) - CD2, para tomate da variedade italiano.....	111
Tabela 4.18	Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos isométricos segundo (Haider e Levenpiel – 1989 – CD3) e (Coelho e Massarani – 1996 - CD4), para tomate da variedade italiano.....	112

Tabela 4.19	Efeito de parede segundo Massarani (1990 - K_p1), e Almeida (1995 - K_p2) para os modelos esféricos	114
Tabela 4.20	Efeito de parede segundo Massarani (1990 - K_p1), e Almeida (1995 - K_p2) para o tomate da variedade caqui.	116
Tabela 4.21	Efeito de parede segundo Massarani (1990 - K_p1), e Almeida (1995 - K_p2) para o tomate da variedade italiano	118
Tabela 4.22	Correlações obtidas nesta pesquisa (Melo e Duarte, 2019) para os parâmetros fluidodinâmicos de tomate, durante ascensão livre em água, para faixa de esfericidade $0,75 \leq \phi \leq 1$, no Regime de Newton ($9000 \leq Re \leq 16000$)	128
Tabela 4.23	Parâmetros hidrodinâmicos calculados dos tomates, segundo as correlações obtidas nesta pesquisa (MELO E DUARTE, 2019) - (CD1) e segundo este trabalho usando as correlações de (PETTYJOHN E CHRISTIANSEN, 1948) - (CD2)	129

RESUMO

MELO, R.B.F. **Modelagem de parâmetros fluidodinâmicos de tomates**. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

Esta pesquisa teve como objetivo estudar as características físicas e os parâmetros hidrodinâmicos de duas variedades de tomates: caqui e italiano (*Solanum lycopersicum L.*), em cinco estádios de maturação, de verde a maduro. Para atingir esses resultados, foram determinados o teor de água, a firmeza, as características físicas dos tomates, os parâmetros hidrodinâmicos: velocidade terminal (V_t), coeficiente de arraste (C_D), número de Reynolds (Re), efeito de parede (K_P), orientação dos frutos na água e a análise do efeito da forma com determinação desses parâmetros para modelos esféricos de mesma massa específica. Para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos experimentais, foram utilizadas vinte e cinco amostras de cada variedade de fruto, bem como três modelos esféricos, os quais foram dispostas no equipamento de observação experimental, constituído de uma coluna de vidro com seção transversal quadrada. A velocidade terminal dos frutos e dos modelos esféricos foi registrada por uma câmera e foi analisada utilizando a ferramenta computacional *Quick Time Player*. Para os parâmetros hidrodinâmicos calculados dos tomates, foram utilizadas as equações para partículas isométricas dadas por Pettyjohn e Christiansen (1948), Concha e Barrientos (1986), Haider e Levenspiel (1989), Coelho e Massarani (1996); e para os modelos esféricos, foram utilizadas as equações para partículas esféricas dadas por Vennard (1961) através da curva ($C_D \times Re$), considerando o $C_D = 0,44$, Abraham (1970), Brauer e Sucker (1976), Concha e Almendra (1979), Haider e Levenspiel (1989) e Coelho e Massarani (1996). Devido à irregularidade dos frutos, as alterações de tamanho e forma durante a maturação não foram estatisticamente significativas. Por essa razão, os frutos foram organizados e analisados por ordem crescente do fator de forma (esfericidade) com suas respectivas velocidades de subida, coeficientes de arraste, número de Reynolds e também análise de efeito de parede. Concluiu-se que os tomates da variedade italiano têm maiores números de (Re), menores valores de (C_D) e velocidade terminal maior que a velocidade do tomate caqui. Os frutos da variedade caqui não apresentaram efeito de parede, enquanto que os da variedade italiano chocaram-se várias vezes nas paredes, percebendo-se que existe grande influência da forma do fruto nestes parâmetros, visto que essas frutas apresentaram densidade muito próxima. Já para os modelos esféricos, o modelo de maior diâmetro obteve maior valor de velocidade terminal e tendeu a se aproximar mais da parede do tubo do que os de menores diâmetros. Quando as equações da literatura são utilizadas para as partículas isométricas e esféricas, os valores obtidos não apresentam boas correlações com os valores experimentais. Desse modo, realizou-se uma modelagem matemática para coeficiente de arraste, número de Reynolds e velocidade terminal dos tomates, para esfericidades variando entre 0,76 e 1.

Palavras-chaves: ascensão, modelagem, tomates, fluido.

ABSTRACT

MELO, R.B.F. **Modeling of fluid dynamic parameters of tomatoes.** 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

This research aimed to study the physical characteristics and hydrodynamic parameters of two tomato varieties: persimmon and Italian (*Solanum lycopersicum* L.), in five ripening stages, from green to ripe. To achieve these results, were determined water content, firmness, physical characteristics of tomatoes, hydrodynamic parameters: terminal velocity (V_t), drag coefficient (CD), Reynolds number (Re), wall effect (KP), fruit orientation in water and shape effect analysis with determination of these parameters for spherical models of the same specific mass. For the determination of the experimental hydrodynamic parameters, twenty-five samples of each fruit variety were used, as well as three spherical models, which were arranged in the experimental observation equipment, consisting of a glass column with square cross section. The terminal velocity of fruits and spherical models was recorded by a camera and were analyzed using the computational tool Quick Time Player. For the hydrodynamic parameters calculated from tomatoes, the equations for isometric particles given by Pettyjohn and Christiansen (1948), Concha and Barrientos (1986), Haider and Levenspiel (1989), Coelho and Massarani (1996); and for the spherical models, the equations for spherical particles given by Vennard (1961) through the curve (CD x Re) were considered considering the CD = 0.44, Abraham (1970), Brauer and Sucker (1976), Concha e Almendra (1979), Haider and Levenspiel (1989) and Coelho and Massarani (1996). Due to fruit irregularity, changes in size and shape during ripening were not statistically significant. For this reason, the fruits were organized and analyzed in ascending order of the form factor (sphericity) with their respective climb speeds, drag coefficients, Reynolds number and also wall effect analysis. It was concluded that the tomatoes of the Italian variety have higher number of (Re), lower values of (CD) and terminal velocity higher than the speed of persimmon tomato. The fruits of the persimmon variety had no wall effect, while the fruits of the Italian variety crashed several times on the walls, realizing that there is a great influence of the fruit shape on these parameters, since these fruits had very close density. For spherical models, the larger diameter model obtained a higher terminal velocity value and tended to be closer to the pipe wall than the smaller diameter ones. When using the literature equations for isometric and spherical particles, the obtained values do not correlate well with the experimental values. Thus, a mathematical modeling for drag coefficient, Reynolds number and terminal velocity of tomatoes was performed for sphericities ranging from 0.76 to 1.

Keywords: rise, modeling, tomatoes, fluid.

1 INTRODUÇÃO

Tem-se observado nos últimos anos uma mudança de hábitos alimentares da população mundial, que tem optado por alimentos mais saudáveis, e, nesse sentido, observa-se um expressivo crescimento no consumo de frutas e hortaliças, especialmente nos grandes centros urbanos, o que tem propiciado novas possibilidades de negócios com polpas e frutos naturais produzidos no Brasil (OLIVEIRA et al, 2012).

Dentro desse contexto, ocorreu um aumento significativo na demanda de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) em decorrência desse processo de reeducação alimentar que vem ocorrendo, no qual as pessoas estão cada vez mais em busca de produtos saudáveis para sua alimentação (BEZERRA et al, 2018). Esses novos hábitos da sociedade têm impulsionado as empresas a buscarem novas soluções para o processamento de alimentos que resultem em um produto que atenda aos interesses do consumidor (CENCI, 2011).

Segundo dados do Boletim Hortigranjeiro (BRASIL, 2018), o tomate no Brasil é a espécie mais importante no grupo das hortifrutos, tanto sob o ponto de vista econômico quanto social, pelo volume da produção e geração de empregos, o que gerou uma produção de cerca de 4.084.910 milhões de toneladas por ano.

Sobre a produção mundial de tomates, segundo dados da FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), a China é responsável por 31% da produção de tomate no mundo, sendo seguida pela Índia com 11% e pelos Estados Unidos, que produz 8% do volume global. O Brasil encontra-se na nona posição com 2,5% da produção mundial. O destaque é a forte possibilidade de o país passar a ocupar um espaço intercontinental na produção da solanácea na próxima década (DOSSA e FUCHS, 2017).

De acordo com Oliveira et al., (2012), a movimentação de produtos perecíveis no transporte pode acarretar inúmeros problemas na manutenção de sua qualidade, uma vez que o tipo de transporte utilizado para frutas é de grande importância, pois é um elo fundamental na cadeia de comercialização e o sucesso da manutenção do produto fresco com boa qualidade durante o trânsito, dependendo do controle de cada etapa da cadeia.

As injúrias mecânicas causadas por impacto, compressão e corte, e as podridões são comumente observadas após a colheita de frutos e de hortaliças, sendo responsáveis pela redução da qualidade e, conseqüentemente, a desvalorização comercial dos produtos (CHITARRA e CHITARRA, 2005).

Boa parte dos transportes de frutas nas indústrias de alimentos são realizadas de forma mecânica, o que, muitas vezes, dependendo da fruta, pode acarretar diversos danos físicos, devido ao impacto e atrito, principalmente nas mais suscetíveis, como aquelas de casca mais fina e delicada, o que desencadeia reações químicas, provocando um escurecimento da região afetada, podendo deteriorar de forma mais rápida, como o tomate, por exemplo. No processamento de frutas e nos terminais de embalagens, em sua grande maioria, o transporte é realizado mecanicamente em esteiras e durante esse processo é feita a seleção e classificação manual da fruta (SILVA e CORRÊA, 2000).

Na busca por um melhor processamento desde a colheita até a armazenagem, o transporte possui fundamental importância, visto que o estudo econômico desse transporte, o dimensionamento adequado e a sua otimização, é um fator relevante nessa cadeia, o qual, muitas vezes, pode ser realizado por canais. Diante de tantas variações e complexidade que implicam os sistemas de transporte, tornam-se necessárias as informações a respeito das características físicas e dos parâmetros hidrodinâmicos dessas frutas, no tipo de transporte utilizado, para que seja possível a formulação e a evolução de novos projetos de máquinas e equipamentos, evitando o desperdício dos produtos (SILVA e CORRÊA, 2000).

De acordo com Duarte et al. (2006), o pré-processamento desses produtos, geralmente se dá utilizando-se água tanto para o transporte quanto para lavagem, e, nesse contexto, o transporte hidráulico através de canais e em tubos horizontais e/ou verticais apresenta vantagens sobre os demais tipos, pois a água funciona como amortecedor de impactos, minimizando os danos mecânicos aos materiais biológicos, a exemplo das frutas.

Segundo Braga (1997), na busca constante pela melhoria da qualidade do produto comercializado, outros sistemas de transporte de frutas têm ganhado ênfase, como é o caso dos sistemas de flutuação, que possuem vantagens, como serem relativamente baratos, uma vez que se utiliza a água como meio de condução.

Diante desses fatos, o transporte hidráulico pode ser uma opção para minimizar o custo na condução da fruta de um setor a outro, existindo ainda a possibilidade de, nessa condução, as frutas serem separadas segundo o grau de maturação. Ao analisarmos a literatura, nos deparamos com a necessidade dos conhecimentos fundamentais do transporte hidráulico para frutas, porém, não são encontradas muitas informações nesse aspecto.

No campo da investigação do processamento de frutas, o conhecimento do tamanho e da forma são algumas das características físicas que devem ser estudadas, assim como os parâmetros hidrodinâmicos, principalmente quando se deseja realizar o projeto de uma máquina ou de uma unidade de processamento, no qual o volume de produto a ser manejado é o principal dado do projeto.

Segundo Duarte et al. (2006), o conhecimento dessas informações é de grande interesse para a indústria alimentícia, pois em algumas pesquisas, como por exemplo sobre transferência de calor e massa, algumas soluções são apresentadas na literatura sob forma de cartas ou gráficos, no entanto para uso dessas soluções torna-se necessária uma estimativa precisa da forma e dimensões do material.

1.1 Objetivo geral

Determinar as características físicas e os parâmetros hidrodinâmicos de duas variedades de tomates, Caqui e Italiano (*Solanum lycopersicum L.*), em cinco estádios de maturação, do verde ao maduro.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar o teor de água e as características físicas: dimensões em três direções mutuamente perpendiculares – comprimento, largura e espessura; massa, volume, massa específica real, área projetada, área critério, área superficial, esfericidade e firmeza dos tomates em cinco estádios de maturação;
- Estudar e analisar a velocidade terminal, o coeficiente de arraste, o número de Reynolds e o efeito de parede dos frutos nesses estádios de maturação;
- Observar a orientação do fruto no fluido para a medição do ângulo formado entre o nível da água e o pedúnculo;
- Analisar os parâmetros hidrodinâmicos no efeito da forma, com uso de modelos esféricos de mesma massa específica em diferentes diâmetros da partícula;
- Estudar o emprego de equações citadas na literatura para corpos isométricos na faixa de Reynolds correspondente à região do movimento dos frutos e para corpos esféricos na faixa de Reynolds correspondente à região do movimento dos modelos esféricos;
- Modelar o coeficiente de arraste, o número de Reynolds e a velocidade terminal de tomates com esfericidade entre 0,76 e 1.

Dessa forma, contempla-se informações sobre o cultivo do tomate no Brasil, o estudo das características físicas e dos parâmetros hidrodinâmicos dos frutos necessários ao transporte, sua definição, as interações sólido-fluido, tais como a força gravitacional e de empuxo, força e coeficiente de arrasto, a velocidade terminal em corpos esféricos e não esféricos, efeito de parede, os modelos matemáticos utilizados para representar os fenômenos, bem como estudos de fundamentos do transporte de partículas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O transporte de pequenos sólidos é uma técnica bem conhecida, porém, muitas indústrias manuseiam sólidos maiores, necessitando utilizar tubos de transporte para seus materiais. Entretanto, essas informações são limitadas na literatura. Segundo Gonzaga et al. (2007), mediante a complexidade e variações dos sistemas de transporte, é necessário otimizar a engenharia no intuito de aplicá-la na produção agrícola através de novas informações das características físicas e hidrodinâmicas, possibilitando a formulação e a evolução de novos projetos de máquinas e equipamentos também para sólidos maiores, com o objetivo de conhecer em profundidade o comportamento dinâmico desses produtos em sistemas de transporte hidrodinâmico.

2.1 Tomate (*Solanum lycopersicum L.*), o fruto do tomateiro

Sendo uma das espécies de maior importância no setor hortícola, o tomate apresenta diferentes segmentos para atender às mais diversas demandas desse importante mercado, sendo sua cultura formada por duas cadeias produtivas distintas, caracterizadas pelos segmentos de mesa, destinado ao consumo *in natura*, e de indústria, destinado ao processamento. Cada cadeia produtiva possui características intrínsecas na produção, beneficiamento, processamento e comercialização, desde as cultivares utilizadas até as formas de cultivo e consumo final (SANTOS, 2009).

Como a maioria das hortaliças, o tomate é um produto altamente perecível, o que, aliado ao manuseio precário nos processos de comercialização, tem gerado perdas enormes que prejudicam a sua comercialização. Por esse motivo, o fruto é colhido ainda com a pigmentação verde, o que facilita o manuseio, diminui o risco de perdas em nível de produtor e permite que o fruto não chegue totalmente maduro ao consumidor (PARISSOTO, 2016; (MAKISHIMA e MELO 2017).

O fruto possui em sua composição entre 90 e 95 % de água e nos sólidos encontram-se compostos inorgânicos, ácidos orgânicos, açúcares, sólidos insolúveis em álcool e outros constituintes, em que a composição dos frutos, além de ser uma característica da cultivar, pode também ser influenciada pelas condições climáticas e do solo da região produtora (PARISSOTO, 2016).

O tomate tem assumido o status de alimento funcional por conter diversas vitaminas, minerais e substâncias antioxidantes como ácido ascórbico, licopeno, caroteno

e compostos fenólicos, considerando-se as evidências epidemiológicas que o apontam como sendo responsável pela redução do risco de certos tipos de câncer (BORGUINI e SILVA, 2005), segundo a Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Composição média centesimal do fruto de tomate fresco, em massa.

Componente	Valor médio em massa (%)
Água	93 - 97
Sólidos secos	5,0 - 7,0
Sólidos solúveis	3,5 - 6,0
Fibras	0,5 - 0,6
Proteína	0,7 - 1,1
Gordura	0,1 - 0,3
Calcio	0,006 - 0,034
Cobre	$5,0 \times 10^{-5} - 3,3 \times 10^{-4}$
Enxofre	0,0067 - 0,0103
Ferro	$2,9 \times 10^{-4} - 4,4 \times 10^{-4}$
Fosforo	0,017 - 0,043
Magnésio	$7,1 \times 10^{-3} - 9 \times 10^{-3}$
Potássio	0,025 - 1,90
Sódio	$1,1 \times 10^{-3} - 2,1 \times 10^{-3}$
Zinco	$1,2 \times 10^{-4} - 1,9 \times 10^{-4}$
Manganês	$6,0 \times 10^{-5} - 1,7 \times 10^{-5}$
Vitamina B1	$5,0 \times 10^{-5} - 9 \times 10^{-5}$
Vitamina B2	$3,0 \times 10^{-5} - 5,0 \times 10^{-5}$
Vitamina B3	0,05 - 0,75
Vitamina B5	$5,0 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$
Vitamina C	0,018 - 0,040
Vitamina E	0,040 - 1,2

Fonte: Parissoto (2016).

De acordo com Ferreira et al. (2012), a qualidade do tomate está relacionada com o estágio de maturação do fruto, pois é ele que define o momento da colheita. Durante a maturação do tomate, são produzidas mudanças fisiológicas e bioquímicas que induzem a mudanças de cor, sabor, textura e aroma, definindo o momento da colheita. O estágio

verde maduro (início de mudança de cor) é considerado o primeiro indicador visual para o índice de maturação.

As perdas registradas para o tomate variam muito de região para região e estão relacionadas aos danos mecânicos ocasionados durante o manuseio do produto (colheita, seleção, embalagem, transporte e exposição), e em relação as perdas no transporte, muitos são causados pela vibração.

O tomate começou a ter relevância mundial a partir de 1900 e a produção brasileira de tomate rasteiro para industrialização começou em Pernambuco no final do século XVIII. Atualmente, é o segundo produto olerícola mais cultivado no mundo, sendo a quantidade produzida superada apenas pela batata, que, juntamente com a cebola e o alho, são os alimentos mais industrializados. No Brasil, seu hábito de consumo foi introduzido por imigrantes europeus no final do século XIX (FILGUEIRA, 2000; SANTOS, 2009; PARISSOTO, 2016, BRASIL, 2018).

Segundo Santos (2009), as espécies selvagens de tomate são nativas da região andina que abrange parte do Chile, Colômbia, Equador, Bolívia e Peru, mas sua ampla domesticação se deu no México, estendendo sua produção e consumo para os Estados Unidos, no século XIX, onde seus produtos derivados já eram consumidos regularmente.

O cultivo do tomate está presente na maioria dos estados brasileiros, estando os principais produtores nos estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Bahia e Rio de Janeiro, sendo destinados 70% da produção total ao mercado para consumo ao natural e o restante da matéria-prima para industrialização, com os quais são elaborados diversos produtos, tais como extratos, pastas, molhos, sucos e outros derivados. A produtividade média parcial da primeira parte da safra de inverno (fevereiro a novembro) de 2017 foi de 3.902 t/ha, 15,7% maior que no mesmo período de 2016 (SANTOS, 2009; MAKISHIMA e MELO, 2017; BRASIL, 2018).

De acordo com dados do Boletim Hortigranjeiro/CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) de 2018, o tomate teve em seus preços tendência predominantemente ascendente, ficando somente em queda em São Paulo/SP(1,38%) e Fortaleza/CE (4,74%), assim mesmo em pequenos percentuais, porém, nos demais mercados analisados, o maior aumento foi em Recife (53,43%), seguido do Rio de Janeiro/RJ (14,22%), Belo Horizonte/MG (11,64%), Goiânia/GO (11,49%) e Vitória/ES (3%) (BRASIL, 2018).

Selecionando as Ceasas que enviam seus dados para a base do PROHORT (Programa Brasileiro de Modernização do Mercado Hortigranjeiro), pode-se visualizar

que este total na comparação mensal caiu 12%, passando de 57.173 toneladas em outubro para 50.452 toneladas em novembro de 2018 (BRASIL, 2018).

O tomateiro é uma planta com ampla capacidade de adaptação às diferentes condições de clima, porém as condições mais favoráveis de temperatura estão na faixa de 18 a 25 °C. O fruto do tomateiro é do tipo baga, sendo um alimento rico em licopeno, vitaminas C, A e complexo B, sais minerais como ácido fólico, potássio e cálcio. Possui diferentes tamanhos e formatos, constituindo-se de película, polpa, placenta e sementes, sendo dividido internamente em lóculos, e o formato do fruto define as variedades do tomate de mesa no Brasil. Atualmente, consideram-se seis segmentos principais: santa cruz, salada ou saladete, caqui, italiano, cereja e penca (FERREIRA, FREITAS e LAZZARI, 2004).

A cultura do tomateiro apresenta grande relevância no Brasil, tanto por sua representatividade em área plantada, quanto pela quantidade produzida, sendo o mais importante cultivo olerícola, tanto *in natura* como processada, nas formas de suco, molho, pasta, desidratada e doce, sendo o nordeste brasileiro responsável por 16,60% da produção nacional, com destaque para os Estados da Bahia, Pernambuco e Ceará, por apresentarem ótimas condições para o cultivo (FERREIRA et al., 2012).

Segundo Filgueira, (2000), Ferreira, Freitas e Lazzari, (2004) graças às novas tecnologias, o número de cultivares plantadas em escala comercial no centro-sul foi cada vez maior, o que gerou necessidade de adotar normas de padronização e classificação de tomate destinado ao mercado, tendo como base o comprimento, diâmetro dos frutos, coloração, brilho e outros parâmetros.

A partir da década de 70, foi estabelecida uma norma oficial para padronização e classificação de tomate que, ao longo dos anos, foi submetida a alterações pela legislação vigente (BRASIL, 1995) e pela proposta no Anexo XVII da Portaria SARC nº 085/02 do MAPA (BRASIL, 2002), sendo o tomate classificado em grupos, subgrupos, classes ou calibres, tipos ou grau de seleção, e definida em função do diâmetro transversal do fruto, em *mm*, de acordo com o grupo a que pertença.

De acordo com o formato do fruto, o tomate é classificado em dois grupos: oblongo, quando o diâmetro longitudinal é maior que o transversal, e redondo, quando o diâmetro longitudinal é menor ou igual ao transversal (BRASIL, 1995; BRASIL, 2002) conforme a Tabela 2.2. Na norma da Comissão Econômica Europeia (ECE, 2000) e no *Codex alimentarius* proposto pela FAO em 2002, o tomate é classificado em quatro

grupos: redondo, achatado com sulcos, oblongo ou alongado e tomate cereja, incluindo no último o tomate cocktail (FERREIRA, FREITAS e LAZZARI, 2004).

Tabela 2.2 – Classes do tomate em função do diâmetro transversal

Classes ou calibres	Diâmetro transversal do fruto (mm)	
	Oblongo	Redondo
Gigante	-	Maior que 100
Grande	Maior que 60	Maior que 80 até 100
Médio	Maior que 50 até 60	Maior que 65 até 80
Pequeno	Maior que 40 até 50	Maior que 50 até 65

Fonte: Brasil, (2002)

2.1.1 Tomate da variedade Caqui

O tomate Caqui, possui formato de um esferoide oblato, sendo classificado segundo a Tabela 2.2, como redondo, por possuir seu semieixo de rotação mais longo que os demais semieixos ($a < b, c$). Sendo revestido por uma película transparente que exalta a cor de sua polpa, consumido maduro, verde ou menos maduro, sua característica principal, além do tamanho, é a disposição irregular de polpa no interior do fruto entre as sementes. Nas lavouras, trata-se de uma planta compacta, com pencas muito próximas umas das outras, ótimo pegamento de fruto por penca, com média de cinco frutos, precocidade de colheita nas primeiras pencas, além de ser uma planta bem robusta com folhas bem distribuídas, dando uma ótima proteção de frutos e excelente pós-colheita, com coloração de fruto bem atrativa (MACANAN e XAVIER, 2016).



Figura 2.1 – Tomate (*Solanum lycopersicum L.*) variedade Caqui
Fonte: (MACANAN e XAVIER, 2016).

A região de maior cultivo e produtividade do tomate Caqui refere-se ao Sul, estando os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul como principais no cultivo e na produtividade desta variedade, pois esse pegamento se estende durante todo seu ciclo, principalmente em condições adversas ou com temperaturas amenas. A qualidade do fruto e a firmeza trazem total segurança ao agricultor para comercializar e enviar seu produto para todas as regiões do Brasil sem preocupações com ponto de colheita, pois apresenta ótima coloração, qualidade e excelente pós-colheita. Uma característica peculiar deste mercado é a exportação para outras regiões do Brasil, destacando-se o Sudeste e Centro Oeste (MACANAN e XAVIER, 2016).

2.1.2 Tomate da variedade Italiano

O tomate italiano possui formato de um esferoide prolato, com o semieixo de rotação menor que os demais semieixos ($a > b, c$), podendo se assemelhar a um kibe, sendo classificado, conforme a Tabela 2.1, como oblongo. O tomateiro (*Lycopersicum esculentum* Mill) “tipo Italiano” pertencente à família das Solanáceas, originário da América do Sul, sendo cultivado em quase todo o mundo, é uma variedade híbrida que se adapta em regiões de diferentes climas, destaca-se pela espessura da polpa, alta produtividade e pelo sabor (BEZERRA et al, 2018).



Figura 2.2 – Tomate (*Solanum lycopersicum L.*) variedade Italiano

Fonte: <http://coopas.org/produto/tomate-italiano>

Por ser um fruto climatérico, ou seja, que mantém suas atividades metabólicas ativas no período pós-colheita, ocorre uma série de transformações fisiológicas e bioquímicas que ocasionam alterações físico-químicas no fruto (FERREIRA et al., 2012).

2.2 Características físicas

O conhecimento das características físicas é essencial no que se refere às pesquisas com materiais biológicos. Entretanto, os dados disponíveis na literatura para estes produtos nem sempre são encontrados. Muitos dos problemas enfrentados pela engenharia estão associados a estas características, sobretudo quando se faz necessária a realização de projetos de dimensionamento de maquinários ou análises do comportamento de determinados produtos agrícolas (RIBEIRO et al. 2002; DUARTE, CAVALCANTI-MATA e ALMEIDA. 2006).

De acordo com Massarani (2002), o estudo fluidodinâmico da partícula requer o conhecimento da reologia do fluido e das características físicas da partícula expressas pela massa específica, dimensão e forma, em que se torna necessário o conhecimento do diâmetro volumétrico da partícula estudada (D_p), como também a esfericidade (ϕ).

Sirisomboon et al. (2007), em uma pesquisa sobre grãos de amendoim, apresentaram área superficial, área projetada, volume, circularidade e esfericidade dos frutos, nozes e sementes como indispensáveis no dimensionamento de máquinas e equipamentos capazes de realizar o processo de descasque. De acordo com os autores,

esta informação também pode ser utilizada para determinar o limite inferior do tamanho dos transportadores, como esteira, elevador de caneca e transportador helicoidal.

Goneli et al. (2011) comenta que informações como tamanho, volume, massa específica, entre outras, são ferramentas imprescindíveis no estudo envolvendo transferência de calor e massa e movimentação de ar em uma massa de grãos.

Almeida et al. (2011), em um estudo sobre a qualidade física de tomates comercializados na Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas de Campina Grande (EMPASA-CG), observou as características físicas dos frutos de tomate em diferentes estádios de maturação, conforme a Tabela 2.3:

Tabela 2.3. Características físicas dos frutos de tomate em diferentes estádios de maturação, escoados no entreposto de comercialização da EMPASA-CG.

Estádio de maturação	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Espessura do pericarpo (mm)	Rendimento em polpa (g)	Massa dos frutos (g)
Verde	55,6 a	69,4 a	7,2 a	84,85 b	105,62 a
Braeker	55,2 a	70,8 a	7,5 a	88,14 a	110,61 a
Maduro	55,5 a	69,7 a	8,4 a	86,99 ab	118,10 a
CV (%)	4,94	9,31	25,06	3,41	13,42
DMS	0,30	0,70	0,21	3,27	16,59

Fonte: Almeida et al. (2011)

2.2.1 Teor de água

O teor de água é uma das características que mais influenciam nos processos de beneficiamento e processamento de produtos agrícolas. Ele representa a água contida no alimento e corresponde à perda em peso sofrida pelo produto quando aquecido em condições nas quais a água é removida. A água é o componente em maior quantidade nos alimentos, variando de 60 a 70% na carne e de 90 a 95% nos vegetais. Nos frutos, os valores médios são elevados e oscilam de uma variedade a outra, dependendo também da época em que são colhidos e do seu tempo de armazenamento (ALVARADO e AGUILERA, 2001; RODRIGUES e PINHEIRO-SANTANA, 2003).

O teor de água pode ser expresso em base úmida ou em base seca. Em base úmida é determinado por:

$$\%X_{bu} = \frac{M_{H_2O}}{M_T} 100 = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2O} + M_{MS}} 100 \quad (01)$$

em que,

X_{bu} → teor de água em base úmida, %

M_T → massa total da semente, g

M_{H_2O} → massa de água da semente, g

M_{MS} → massa da matéria seca da semente, g

O teor de água em base seca é expresso por:

$$\%X_{bs} = \frac{M_{H_2O}}{M_{MS}} 100 \quad (02)$$

sendo,

$\%X_{bs}$ → teor de água em base seca.

Na comercialização de um produto e na indústria, utiliza-se a determinação do teor de água em base úmida, e em atividades relacionadas ao estudo da secagem, utiliza-se o teor de água expresso em base seca. As relações de conversão entre o teor de água em base seca e o teor de água em base úmida podem ser expressas pelas seguintes equações:

$$X_{bu} = \frac{X_{bs}}{100 + X_{bs}} 100 \quad (03)$$

$$X_{bs} = \frac{X_{bu}}{100 - X_{bu}} 100 \quad (04)$$

Camargo (2000), em um estudo feito com tomates de diversas variedades, encontrou um teor de água de 93 a 94%. Monteiro et al. (2008) obteve 95,88 % para tomates italianos sem sementes e casca e 85,09 % com sementes e casca. Lourenço e Finzer (2013), em um estudo de Secagem parcial de tomate-cereja, encontraram um teor de água inicial dos frutos de tomate *in natura* de 94,01% (bu).

Couto et al. (2003), em estudos realizados com frutos de café, Souza, Tonetti e Davide (2005) com sementes de girassol e Silva et al. (2003) com grãos de sorgo e

milheto concluíram que o teor de água dos frutos afeta significativamente os seus valores da velocidade terminal. Os autores verificaram que a velocidade terminal diminui com a redução do teor de água.

2.2.2 Forma e tamanho

O tamanho e a forma são características específicas, definidas geneticamente e que podem influenciar as demais propriedades do produto, sendo essas informações de grande relevância para o estudo da dinâmica da partícula (SILVA e CORRÊA, 2000). Essas características são importantes nas operações de processamento, porque facilitam os cortes, o descascamento ou a mistura para a obtenção de produtos uniformes. De acordo com Mayor e Sereno (2004), a redução do teor de água do produto pode causar danos em suas estruturas celulares tanto quanto variações na forma.

Os produtos com características de tamanho e peso padronizadas são mais fáceis de serem manuseados em grandes quantidades, pois apresentam perdas menores, produção mais rápida e melhor qualidade. A cor também é um importante atributo de qualidade nas frutas destinadas ao processamento e, na indústria, a intensidade de cor de doces é importante, especialmente para aquelas frutas que podem sofrer degradação dos pigmentos naturais durante o tratamento térmico ou por processos naturais iniciados pela ação mecânica que sofrem nas etapas de preparo (DUARTE et al. 2006).

Segundo Ferreira, Freitas e Lazari (2004), os atributos largura e altura dos frutos do tomateiro variam em função da cultivar. Flori (1993), em um estudo sobre essas características em tomate salada, observou 6% de frutos com diâmetro maior que 105 mm e 39% de diâmetro de 90-105 mm. Essa variação relacionada ao tamanho do fruto foi atribuída a um alto índice pluviométrico para os tomates de maiores diâmetros.

De acordo com Almeida et al. (2011), o estudo do diâmetro dos tomates consiste em um parâmetro muito importante, influenciando nos parâmetros quantitativos e qualitativos, como também no preço do produto, no grau de aceitabilidade do consumidor, na comercialização *in natura* ou direcionamento à indústria de processamento e até mesmo na sua classificação botânica.

A forma do tomate está relacionada ao grupo a que pertence a cultivar. Os frutos são avaliados pelo tamanho, que, por sua vez, é medido através da circunferência ou

diâmetro transversal, largura, peso e volume (FERREIRA, FREITAS e LAZZARI, 2004; CHITARRA e CHITARRA, 2005).

Segundo Ferreira, Freitas e Lazzari, (2004), o tomate redondo é classificado em quatro classes, conforme a Tabela 2.2: gigante, grande, médio e pequeno, sendo permitida a mistura de tomates pertencentes a classes diferentes, desde que a somatória das unidades não supere 10% e que pertençam à classe imediatamente superior e/ou inferior, não podendo exceder a 15mm a diferença entre o diâmetro do maior e do menor fruto em cada embalagem.

De acordo com Casquet (1998), o tamanho do fruto está relacionado, entre outros fatores, à quantidade de água utilizada na rega, o que determina a maior ou menor concentração de componentes solúveis. Em um estudo sobre as características do tomate salada, Flori (1993) observou que na variedade Tropicana menos de 6% de frutos possuíam diâmetro maior que 105mm e 39 % tinham diâmetro de 90-105mm.

Quanto ao estágio de maturação, segundo a Portaria n° 553/95 (BRASIL, 1995) e Anexo XVII da Portaria SARC no 085/02 do MAPA (BRASIL, 2002), o tomate de coloração vermelha é classificado em cinco subgrupos: verde maduro, pintado, rosado, vermelho e vermelho maduro. Verde maduro, quando se evidencia o início do amarelecimento na região apical do fruto; pintado, quando as cores amarelo, rosa ou vermelho encontram-se entre 10% a 30 % da superfície do fruto; rosado, quando 30% a 60% do fruto encontra-se vermelho; vermelho, quando o fruto apresenta entre 60% e 90% da sua superfície vermelha; e vermelho maduro, quando mais de 90% da superfície do fruto encontra-se vermelha (FERREIRA, FREITAS e LAZZARI, 2004).

2.2.2.1 Relações entre a forma e a dinâmica da partícula

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, e os métodos descritivos, que apenas nomeiam os produtos, conforme diagrama padrão, ajudam na escolha de equações adequadas para se fazer aproximações de volume, área superficial, área projetada e demais características relativas à forma. Entretanto, os métodos de maior utilidade nos projetos de processamento, transformação e conservação de produtos são aqueles que fornecem um fator de forma na maioria dos processos e são usados como fatores de correção do processo segundo um modelo empregado, funcionando 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 et al. 2006).

Uma partícula não esférica pode ter planos e eixos de simetria, mas não pode possuir ponto de simetrias iguais a de uma esfera, por apresentar problemas mais complexos do que os problemas que surgem para esferas. De acordo com Clift, Grace e Weber (1978), partículas axissimétricas incluem corpos gerados da rotação de uma curva fechada ao redor de um eixo, já as 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 esferoide é um elipsoide 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 esferoide 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 esferoide, com $E < 1$ para um esferoide oblato e $E > 1$ para um esferoide 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 (CLIFT, GRACE e WEBER, 1978 citado por GONZAGA et al, 2007).

O movimento de esferas caindo através de fluidos é um problema clássico na mecânica de fluidos com muitas aplicações práticas, onde qualquer partícula que caia em um fluido tem um período de aceleração ou desaceleração. O período de aceleração de uma partícula é frequentemente negligenciado, e a velocidade de queda é assumida como sendo sua velocidade terminal. Em laboratórios hidráulicos, por exemplo, a análise do tamanho de partículas de sedimento é frequentemente conduzida em um tubo de sedimentação onde se supõe que todas as partículas caiam em suas velocidades terminais. Semelhantemente, esses pressupostos são feitos também para partículas se estabelecendo em engenharia ambiental, química ou biomédica (GUO, 2011).

A dificuldade se origina do arrasto fluido não proporcional à velocidade para pequenos números de Reynolds (lei de Stokes), mas proporcional à velocidade ao quadrado para grandes números de Reynolds (lei de Newton). Esferas caindo através de fluidos foram estudadas extensivamente ao longo dos tempos. Galileu mostrou

experimentalmente que, se o arraste fluido é negligenciado, o movimento de queda de uma esfera é independente de sua massa, a velocidade de queda é proporcional ao tempo e a distância de queda é proporcional ao tempo ao quadrado. Em 1687, Newton desenvolveu a teoria de Galileu, considerando o arrasto fluido e fundando a segunda lei de Newton, formando o conhecimento moderno dos fluxos de esfera em termos de coeficiente de arrasto. Newton afirmou que o C_D é uma constante experimental (GUO, 2011).

Para resolver um problema de interação fluido-esfera, F_D é definida por:

$$F_D = \frac{C_D}{2} \rho V_t^2 A \quad (05)$$

Em que:

F_D → força de arrasto, N

C_D → coeficiente de arrasto

ρ → massa específica do fluido, kg.m^{-3}

V_t → velocidade terminal, m/s

A → a área da seção transversal perpendicular à direção da queda, m^2 .

$$C_D = \alpha \quad (06)$$

Segundo Guo (2011), experiências de Lapple e Shepherd (1940), Preukschat (1962) e Donley (1991) indicam que a Equação 6 é válida apenas para números grandes de Reynolds = $wD / \nu > 1000$, em que D é o diâmetro da esfera e ν a viscosidade do fluido cinemático; e $\alpha \cong 0,44 \pm 0,06$ conforme a Figura 2.3. Para ≤ 1000 , o coeficiente de arrasto diminui com o aumento dos números de Reynolds.

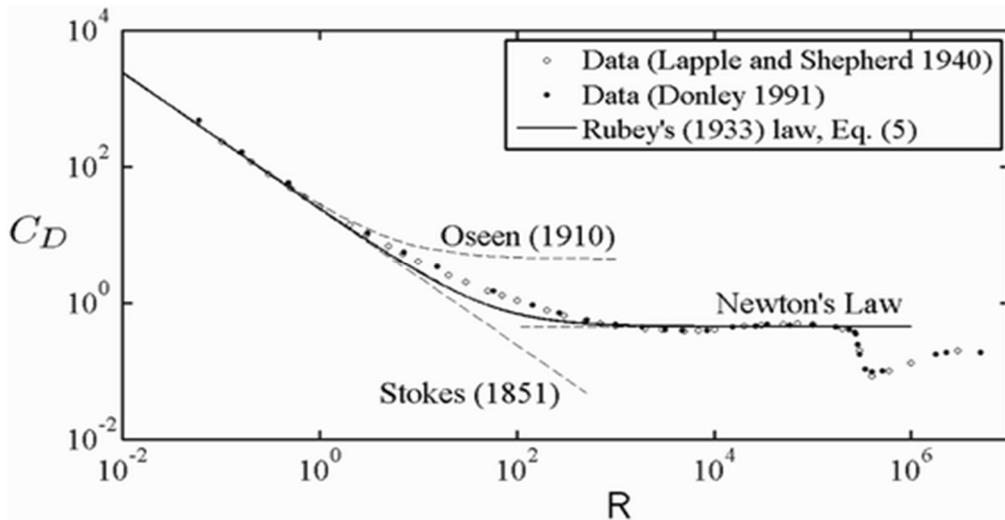


Figura 2.3 - Comparação das leis de arrasto com dados de experimentos de esfera.
Fonte: White, (2011).

De acordo com Guo (2011), para pequenos números de Reynolds, Stokes negligenciou a inércia (termo não-linear) provando que, se uma esfera cair lentamente em um fluido, o arrasto é linearmente proporcional à velocidade, conforme os dados experimentais dispostos na Figura 2.4. Isso implica que a inércia não pode ser negligenciada nas equações de Navier-Stokes ao resolver números maiores de Reynolds:

$$C_D = \frac{24}{R} \quad (07)$$

A inércia foi considerada por Oseen (1927), que linearizou o termo de inércia nas equações de Navier-Stokes, usando o campo de velocidade longe da esfera como:

$$C_D = \frac{24}{R} \left(1 + \frac{3}{16} R \right) = \frac{24}{R} + 4.5 \quad (08)$$

Apesar de existirem diversos trabalhos na literatura para pequenos números de Reynolds, com o conhecimento atual, o coeficiente de arrasto para números intermediários e grandes de Reynolds só pode ser aproximado empiricamente. Rubey's (1933) utilizou a equação 9, que é semelhante à lei de Oseen, mas os valores de α e β foram determinados empiricamente. Para ser consistente com as Equações 6 e 7, este estudo recomenda para esferas (GUO, 2011):

$$C_D = \frac{\beta}{R} + \alpha \quad (09)$$

Sendo: $\alpha = 0,44 \pm 0,06$ e $\beta = 24$

A comparação da Equação 9 com os dados da Figura 2.4 mostra um acordo razoável se $Re \leq 2 \times 10^5$, embora C_D para $1 < Re < 1000$ é um pouco subestimado. A simplicidade da Equação 9 favorece nos fluxos subcríticos. De acordo com Guo (2011), essa comparação da Equação 9 com dados de sedimentos naturais, se $\alpha = 1,5$ e $\beta = 28$, podem ser vistos na Figura 2.4, que, segundo o autor, servem para encontrar uma solução de forma fechada para esferas que caem através de fluidos.

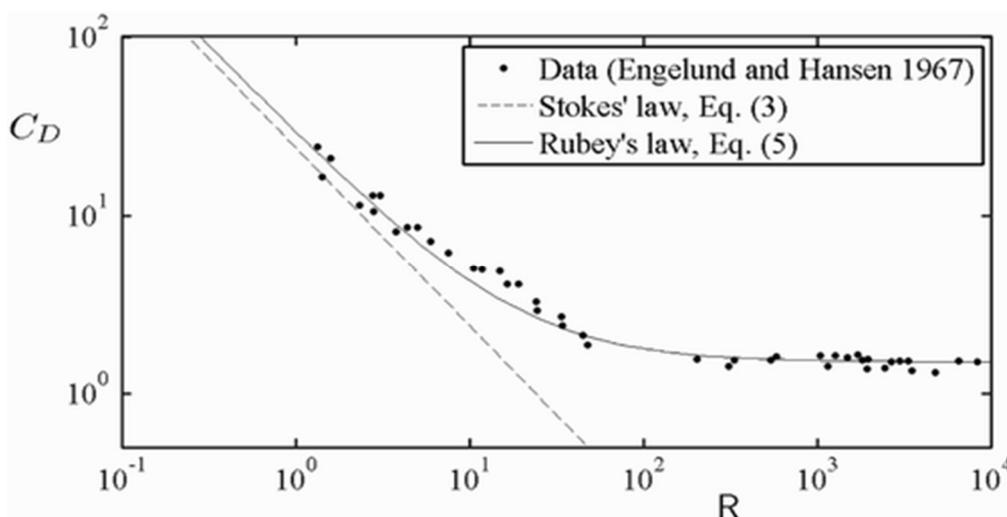


Figura 2.4 - Comparação da lei de arrasto de Rubey's com dados de sedimentos naturais.
Fonte: Guo (2011).

Gonzaga et al. (2007), em um estudo sobre características físicas e hidrodinâmicas de chuchu minimamente processados, observou, através dos resultados obtidos experimentalmente, que a velocidade terminal das partículas geométricas de chuchu, independente da forma geométrica, tende a aumentar à medida que se aumenta o tubo de queda, exceto para os discos com 10 mm de diâmetro, e ainda referente à forma geométrica, para um mesmo diâmetro de tubo, houve um aumento da velocidade terminal com o aumento da massa da partícula transportada.

Nascimento, Duarte e Almeida (2012), em um estudo sobre o transporte hidráulico de batata, observaram que a velocidade terminal em cilindro contendo água é fortemente influenciada pelas características físicas de forma e tamanho, uma vez que as velocidades

terminais em queda livre para placas planas circulares cilindros e cubos de batata doce ocorrem em tubos com diâmetros maiores que 50 mm e que a maior velocidade terminal em água foi alcançada pelas peças de forma cilíndrica e a menor por cubos de batata doce.

2.2.3 Volume

O volume dos produtos é normalmente a propriedade física que mais sofre variação. Durante a secagem, por exemplo, há redução no seu tamanho ou até mesmo na sua forma geométrica. De acordo com Araújo et al. (2014), são essas características que determinam o tamanho e a forma dos furos das peneiras utilizadas no beneficiamento dos produtos agrícolas após a colheita.

Goneli et al. (2011) comenta que informações a respeito de tamanho, volume, e massa específica, entre outras características físicas dos produtos agrícolas, são consideradas de grande importância para estudos que envolvem transferência de calor e massa e movimentação de ar em massas granulares.

Lino et al. (2012), em um estudo sobre a determinação do volume de tomates através da reconstrução em 3D a partir de imagens das suas silhuetas, obteve valores de volume do tomate redondo da variedade Andrea de 134,12 cm³, da variedade Débora de 65,04 cm³, e do tomate oblongo da variedade Carmem de 50,65 cm³.

Segundo Corrêa et al. (2015), o volume, o teor de água e a massa específica são parâmetros utilizados para determinar as condições de secagem e armazenagem de produtos agrícolas e, conseqüentemente, possibilitar a predição de perdas de qualidade do material até o momento de sua comercialização.

2.2.4 Massa específica

Segundo Gonzaga et al. (2007), a massa específica real é determinada pela relação entre a massa do produto e o seu volume:

$$\text{Massa específica real} = \frac{\text{Massa do produto (kg)}}{\text{Volume do Produto (m}^3\text{)}} \quad (10)$$

De acordo com Sasseron (1980) citado por Gonzaga et al. (2007), 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 conteúdo 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.

$$\text{Massa específica aparente} = \frac{\text{Massa contida em um recipiente (Kg)}}{\text{Volume do recipiente (m}^3\text{)}} \quad (11)$$

De acordo com Araújo et al. (2014), a massa específica aparente e a massa específica real dos produtos agrícolas são características físicas de grande relevância, pois estas informações são capazes de auxiliar no dimensionamento de silos, cálculo de transportadores e separadores. Ainda segundo os autores, diversos são os fatores que afetam a massa específica dos materiais vegetais, dentre os principais se encontram o teor de água, a forma e a superfície dos produtos.

Para o dimensionamento correto de todas as operações unitárias relacionadas com a transferência de quantidade de movimento, tais como o transporte de materiais através de tubulações, operações de agitação, de filtração, de fluidização, a sedimentação de sólidos em suspensões, é fundamental o conhecimento não só da massa específica do material, como também do fluido, para a determinação da pressão exercida por uma coluna do mesmo, sendo imprescindível para o projeto de tanques de armazenagem e de sistemas de bombeamento. A variação da massa específica de um fluido em um processo pode determinar se ele é compressível ou incompressível, resultando em abordagens distintas no processo (SOUZA, 2008).

Em uma pesquisa sobre a massa específica aparente de hortaliças e frutas em suas principais embalagens de comercialização no Brasil, Luengo, Calbo e Jacomino (2007) observaram que os valores de massa específica real variaram de 0,14 a 0,69 g. cm⁻³. O tomate apresentou comprimento de 53cm, largura de 23 cm, altura de 33 cm, volume de 40227 cm³, massa líquida de 22000 g e massa específica e aparente de 0,55 g/ cm³.

Mattos e Mederos (2008), em um estudo sobre massa específica de polpas de frutas tropicais, encontrou os seguintes valores, conforme a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Massa específica e teor de água de polpas de frutas tropicais

Amostras de polpas de frutas	Teor de umidade (%)	Massa específica (kg/m³)
Maracujá	88,19	1.046 ± 0,25
Tangerina ponkã	88,49	1.041 ± 0,73
Graviola	89,80	1.076 ± 0,66
Caju	86,32	1.053 ± 0,24
Acerola	90,78	1.038 ± 0,12

Fonte: Mattos e Mederos (2008)

Castro (2003), em uma pesquisa sobre o controle do amadurecimento pós-colheita do tomate da variedade carmem tratado com ácido 2-cloroetil fosfônico, observou que a massa específica variou com o estágio de maturação e também com a qualidade do produto, em que os frutos armazenados à temperatura de 14 °C aumentaram sua massa específica no final do amadurecimento e armazenados a temperaturas de 20 °C no mínimo mantiveram a sua massa específica no final do amadurecimento, nesse caso pode ser devido à qualidade do fruto que sofreu deterioração.

Raupp et al. (2009) encontrou valores de massa, volume e massa específica para quatro variedades de tomates, segundo a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Caracterização do tomate inteiro fresco de quatro cultivares de tomates.

Parâmetro avaliados	Italiano	Débora plus	Santa Cruz	Delícia
Massa por unidade (g)	119,2	155,0	162,5	207,1
Volume por unidade (cm ³)	126,0	164,8	168,2	208,8
Massa específica g/cm ³	0,946	0,940	0,966	0,992

Fonte: Raupp et al. (2009)

Braga (1997) encontrou para laranjas valência uma massa específica média de 0,941 kg.m³, em uma pesquisa sobre transporte hidráulico de laranjas. Da mesma forma, Silva (1999), em um estudo sobre a velocidade terminal em água de frutos sensíveis a danos, encontrou massa específica real média de 1,12; 1,07; 0,98 e 1,13, respectivamente

para ameixa, goiaba, maçã e umbu. Gonzaga et al. (2007), em uma pesquisa sobre parâmetros hidrodinâmicos de vegetais fatiados, encontrou a massa específica real para chuchu, batata e cenoura, de 1007; 1073 e 1006 (kg.m^3), respectivamente.

2.2.5 Área projetada e critério

Na área projetada da fruta são feitas projeções em 3 planos mutuamente perpendiculares, utilizando um retroprojetor. A fruta a ser estudada é projetada 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 (GONZAGA, 2006):

$$\text{Diâmetro} = L \times E \quad (12)$$

Em que, $L \rightarrow$ leitura da dimensão feita, m

$E \rightarrow$ fator de correção da escala da projeção, adimensional.

Segundo Braga (1997), estas projeções são de extrema importância para simular o movimento da fruta no fluido, principalmente no regime turbulento, em que a área perpendicular à direção do movimento muda constantemente. A área de critério, A_c (m^2) ou área projetada média, é a média aritmética das 3 áreas projetadas da fruta.

Em um estudo sobre as características físicas dos grãos de amendoim, Araújo et al. (2014) encontrou valores da área projetada, relação superfície volume e área superficial dos grãos de amendoim em função da redução do teor de água durante a secagem. Os autores constataram que os valores da área projetada dos grãos de amendoim decresceram com a redução do teor de água. Segundo eles, este fenômeno ocorre devido à contração volumétrica dos grãos de amendoim durante o processo de secagem, ou seja, o processo de desumidificação colabora para redução das dimensões características do produto evidenciando o encolhimento dos grãos de amendoim.

Segundo Araújo et al. (2014), a redução da área projetada e a redução do teor de água, bem como suas relações, também foram sendo observadas por diversos

pesquisadores (AYDIN, 2007; COŞKUNER e KARABABA, 2007; GONELI et al. 2008; GUEDES et al. 2011; BANDE et al. 2012).

2.2.6 Área superficial

A determinação da área superficial é um dado relevante no estudo do transporte de frutas em meios fluidos. Segundo Duarte et al (2006), ela é importante para a observação da atuação de forças exercidas pelo fluido sobre a partícula, como também para compreender o comportamento da fruta imersa, o ângulo de repouso e a orientação da fruta no fluido.

Dentre os métodos relatados para medir área superficial, Miller, Sadbolt e Holm (1959), citado por Gonzaga et al (2007), relatam alguns métodos para determinação da área superficial de hastes e folhas, no qual eram impressos a superfície em um papel e medido a área com um planímetro e uso de projetor fotográfico. Braga (1997) encontrou para as laranjas valência uma área superficial média de $13,97.10^{-3} \text{ m}^2$, no seu estudo sobre transporte hidráulico de laranjas. Mohsenin (1986) apresenta um método em que maçãs eram descascadas em tiras e a soma das áreas planimetradas do traçado era considerada como área superficial da maçã.

Razavi et al. (2007) encontrou valores de área superficial em função da redução do teor de água para grãos de pistache, e Kibar e Öztürk (2008), para grãos de soja durante a secagem. Os dados corroboraram com Bande et al. (2012) para sementes de melão e Araújo et al. (2014) para grãos de amendoim.

De acordo com Araújo et al. (2014), a determinação da área superficial dos produtos agrícolas é um processo difícil e um tanto complexo de ser realizado em razão da maioria dos produtos agrícolas não apresentarem uma uniformidade e homogeneidade. Com isso, leva-se um tempo maior para obtenção de informação referente à área superficial, sem contar que a margem de erros se torna maior quando não há um número adequado de repetições. Esse tipo de informação é essencial para o desenvolvimento e melhoria dos equipamentos de secagem e pode ajudar os estudos referentes à transferência de calor e massa.

2.2.7 Esfericidade

Estudos apontam que a esfericidade, assim como outras características físicas, também possui influência no trabalho com produtos agrícolas. Segundo Massarani (2002), a esfericidade é um fator de forma empírico, e a partícula esférica que apresenta valores entre 0 e 1, sendo o maior valor da esfericidade, $\phi = 1$; as partículas que ocorrem usualmente, como aquelas resultantes de processos de moagem, apresentam esfericidade na faixa de 0,5 a 0,7.

Braga (1997), no estudo sobre transporte hidráulico de laranjas, encontrou esfericidade média de 91,10% para as laranjas valência, observando que, mesmo estando saudas, as laranjas com esfericidade muito diferente da média fogem cerca de 8° do comportamento esperado. Segundo a autora, mesmo apresentando esfericidade próxima da unidade, comete-se erro no cálculo da velocidade terminal das laranjas ao considerá-las esféricas, e que, além da esfericidade, foi verificado também um efeito de parede influenciando na velocidade terminal destes frutos.

Silva (1999) encontrou valores de esfericidade média de 93,40% para a ameixa, de 72,24% para a goiaba, 93,5% para a maçã e de 84,3% para o umbu, em um estudo sobre velocidade terminal de frutos tropicais, e observou que, no cálculo de correção do coeficiente de arraste, com base na esfericidade, a equação de Massarani funciona melhor para frutas com diâmetros maiores do que 50 mm.

Couto et al. (2003), em um estudo sobre a determinação da força de arrasto e da velocidade terminal de frutos de café, observou que, em média, as esfericidades dos frutos são iguais ou maiores que 85; 77 e 74% para frutos com teores de umidade de 67,8; 46,9 e 18,7% bu., respectivamente, e seus valores parecem não ter uma relação direta com os erros nos valores simulados das forças de arrasto de frutos considerados esféricos.

Corrêa et al (2006), no estudo sobre a determinação e modelagem das características físicas e da contração volumétrica do trigo, observou, durante a secagem, a variação dos eixos ortogonais dos grãos de trigo, da circularidade e esfericidade em função do teor de água. Os autores constaram que as três dimensões dos grãos de trigo reduziram proporcionalmente com a diminuição do teor de água, assim, os valores de esfericidade e circularidade não apresentaram diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade para os teores de água estudados, fato que indica que os grãos de trigo, para a faixa de umidade estudada, apresentam contração uniforme de acordo com seus eixos principais.

Lourenço e Finzer (2013), em um estudo de Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibratórias com reciclo, observou que a esfericidade do tomate variou do valor unitário (início da secagem) para 0,53 ao final da secagem.

Guedes et al. (2011) observaram o aumento nos valores da esfericidade nos grãos de soja em função da redução do teor de água, diferentemente de Araújo et al. (2014) no estudo com grãos de amendoim, que observaram, quanto à esfericidade, redução dos seus valores com o decréscimo do teor água. Tanto a esfericidade como a circularidade mantiveram seus valores abaixo de 80%, evidenciando a incapacidade de classificação como esféricos e circulares, independente do teor de água que apresentem (ARAÚJO, et al. 2014).

2.2.8 Firmeza

Segundo Chitarra e Chitarra (2005) pode-se definir textura como o conjunto de propriedades do alimento, composto por características físicas perceptíveis pelo tato, relacionadas com a deformação, desintegração e fluxo do alimento sob a aplicação de uma força. A textura é um dos atributos de qualidade mais importantes e relaciona-se com o “flavor”, porque a liberação de compostos presentes no fruto que são perceptíveis ao paladar são também relacionados com a estrutura do tecido. A firmeza do fruto é uma das características da textura.

O texturômetro é um equipamento utilizado para analisar diversas características dos alimentos, dentre elas a firmeza, através da resistência à deformação apresentada, sendo um atributo sensorial importante durante a mastigação. Este equipamento simula o tipo e a intensidade da mastigação humana, tendo como objetivo substituir a percepção humana por uma medição mais mensurável (CARUSO, 2009).

Os elementos básicos de um texturômetro consistem em células de medição denominadas de probe, um sistema mecânico para maior movimentação, um sistema de registro, além da aplicação de softwares para facilitar na análise e a obtenção dos dados. A avaliação da textura são ensaios mecânicos que medem as relações entre tensão (ou força) e a deformação dos materiais por ensaios instrumentais (SILVA et al. 2013).

Os texturômetros universais permitem a obtenção de dados de resistência à compressão, ao cisalhamento, extrusão e corte, entre outros, com rapidez e precisão, registrando a resposta do material durante o processo de medição, através de curvas de tensão (ou força) x deformação. Dentre os instrumentos de medição de força disponíveis,

o mais utilizado é o analisador de textura TAXT2, que mede a força e as propriedades de textura de produtos alimentícios através de uma força necessária para provocar a deformação e/ou ruptura dos mesmos (SHARMA, MULVANEY e RIZVI, 2000).

De acordo Lien, Ay e Ting (2009), os testes de compressão e penetração demonstram uma relação satisfatória com as condições reais e são amplamente utilizados para estimar a firmeza dos frutos por meio de um perfil de força-deformação. A composição do tomate sofre mudanças durante a maturação, sendo a determinação da firmeza uma forma prática de se avaliar o estágio de maturação do fruto, determinada pela força de coesão entre pectinas (CERQUEIRA, 2011).

Após a variação da cor, o amolecimento do fruto é a transformação mais evidente que ocorre durante a maturação e amadurecimento. Além da importância do ponto de vista econômico, já que afeta a qualidade do fruto, a firmeza tem efeito na resistência ao transporte, na conservação e no ataque a microrganismos, sendo influenciada pelo estágio de maturação, condições climáticas durante o período de colheita e variabilidade genética (AWAD, 1993; PAIVA, FIORAVANÇO e MANICA, 1995).

No caso do tomate, existem vários aspectos que influenciam na textura, desde a espessura da casca, a firmeza da polpa e a estrutura interna do fruto. Além da medida de compressão usada para se avaliar a textura do fruto, avaliações bioquímicas também são realizadas (CASTRO, 2003).

Ferreira et al. (2012), ao estudarem a caracterização física e química de híbridos de tomate em diferentes estágios de maturação, encontraram redução nos valores de firmeza para os frutos de tomate híbrido Maraiana variando de 13,23N no estágio verde, para 12,88N no estágio maduro, e no tomate híbrido 'MS-16', os mesmos autores detectaram firmeza variando de 18,93 N para 12,92 N.

2.3 Transporte hidráulico

Segundo Gonzaga et al. (2007), o transporte hidráulico refere-se ao movimento de sólidos em água através de canais e em tubos horizontais e/ou verticais, e essa utilização apresenta vantagens sobre os demais tipos de transporte, funcionando como amortecedor de impactos, minimizando os danos mecânicos aos materiais biológicos quando transportados hidraulicamente. Esse sistema apresenta uma grande vantagem, pois

diversas etapas do processamento podem ser incorporadas ao transporte com eficiência, como por exemplo a lavagem e a seleção das frutas.

O sistema de descarga hidráulico consiste basicamente de uma rampa inclinada na direção de um tanque de flutuação, em que, através de estrados, as frutas são carregadas. Quando o estrado está submerso, as frutas separam-se do estrado e se distribuem numa camada singular na superfície da água, as quais, são conduzidas por canais, até diversos pontos da unidade de processamento (BRAGA, 1997).

Segundo Massarani (2002), o transporte de partículas sólidas por arraste em fluido conduz à formação de um campo de porosidades heterogêneo na seção transversal do escoamento da mistura sólido-fluido, e, dependendo da natureza do problema em estudo, a formulação para o transporte de partículas pode ser simplificada considerando que a mistura se comporta como um fluido homogêneo.

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 necessário ter conhecimento não só das características físicas que afetam o comportamento hidrodinâmico, ou seja, estudar partículas dinâmicas em termos de coeficiente de arraste e velocidade terminal, como também as interações sólido-fluido (BRAGA, 1997; DUARTE et al., 2006).

Garić-Grulović et al. (2008) observaram, em um estudo sobre transferência de calor no transporte hidráulico de partículas de vidro esféricas e em leitos fluidizados, dois regimes característicos de fluxo, sendo um paralelo e outro turbulento, nos quais os coeficientes de transferência de calor são significativamente mais altos dos que os valores do fluxo paralelo. Os autores encontraram os dados de transferência de calor no transporte hidráulico das partículas de vidro esféricas e no leito fluidizado $eP < 0,80$ para $d_p = 0,80$ mm; $eP = 0,77$ para $d_p = 1,1$ e $1,2$ mm; $eP = 0,74$ para $d_p = 1,94$ mm.

2.3.1 Orientação do fruto no fluido

No movimento laminar, a partícula normalmente mantém sua orientação inicial enquanto ocorre seu assentamento, de maneira que, na região turbulenta do escoamento, a partícula teoricamente assume a posição de máxima resistência (BRAGA, 1997).

Bilanski, Colins e Chu, (1962) e Bilanski e Lal (1965), em estudos aerodinâmicos de grãos de trigo, observaram que os mesmos 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, sendo esta rotação e inclinação explicada pelo fato da força aerodinâmica no grão assimétrico não passar pelo centro de gravidade nem ser paralelo à velocidade de ar. Essa 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.

Dewey et al. (1966) e Matthews et al. (1995) estudaram 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, em que a velocidade terminal foi determinada pela liberação da fruta do fundo do recipiente de 0,381 m de diâmetro. Com os dados obtidos experimentalmente, observou-se que os mesmos foram menores do que os calculados, sendo esse fato atribuído ao efeito de parede (relação $D_p/D_t = 0,2$). Porém, foi admitido que, devido à pequena profundidade do recipiente utilizado para o estudo, provavelmente a fruta não tenha atingido a velocidade terminal.

Em seus experimentos, Braga (1997) analisou o comportamento da laranja imersa em água e, relacionando seu ângulo de repouso, esfericidade e massa específica 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 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.

Em um estudo sobre o comportamento do amendoim em fluxo de ar ascendente, Braga e Santana (1999) observaram que as sementes, quando atingiam a velocidade terminal, apresentavam um movimento de rotação na posição de equilíbrio. Nesse 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 uma 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 foi dado o nome 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 “boia”, no qual o espaço livre entre as sementes e a vagem funcionava como ar dentro de uma boia, fazendo-a flutuar (GONZAGA, 2006).

2.3.2 Interações sólido-fluido

De acordo com Bird, Stewart e Lightfoot (2002), um fluido Newtoniano pode ser definido como aquele para o qual a representação da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação sendo uma relação linear. A maior parte dos líquidos de importância na engenharia e todos os gases são fluidos newtonianos, nos quais os estudos envolvendo em particular água e ar têm merecido muita atenção, visto que já são conhecidos os resultados da integração dos perfis de velocidade ao redor da esfera para o escoamento axissimétrico, permanente e a baixo número de Reynolds.

Com a importância que vem sendo dada à qualidade dos produtos, existe uma tendência às pesquisas sobre o transporte hidráulico de frutas, sendo necessário compreendermos as interações existentes. O estudo econômico desse transporte, bem como o dimensionamento adequado e a sua otimização, ainda são respostas a serem dadas pelos pesquisadores, sendo necessário conhecer em profundidade o comportamento dinâmico desses frutos em sistemas de transporte hidráulico (BRAGA, 1997).

Nesses estudos, uma variável de interesse relevante é a velocidade terminal da partícula. No caso de frutas com massa específica menor que 1, a velocidade terminal, no movimento devido ao efeito gravitacional, ocorre no sentido ascendente. O transporte, neste caso, da colheita à armazenagem dos frutos em unidades que antecedem o processamento, pode ser feito, em algumas dessas etapas, por canais, usando transporte hidráulico.

Segundo Braga (1997), na realidade esse tipo de transporte não é novo, mas teve seu sistema desativado nas décadas passadas por falta de conhecimento dos conceitos fundamentais que o envolviam. Para algumas frutas ainda se utilizam este meio de transporte, como é o caso da maçã, no qual se utiliza a água como meio para transportar este produto de um ponto a outro do sistema de modo a suavizar os impactos sobre as frutas causados pelo transporte. Enquanto o sistema de transporte mecânico danifica

sensivelmente os frutos, que perdem qualidade de modo a ser depreciado no mercado de venda *in natura*.

De acordo com Peçanha (2014), a interação sólido-fluido é determinante não só para projetos, como também para a avaliação e operação de diversos equipamentos típicos de indústrias químicas, petroquímicas, farmacêuticas e de alimentação, em que podemos citar aqueles que tratam da separação sólido-fluido como os ciclones, hidrociclones e sedimentadores, bem como os que promovem o contato sólido-fluido, como os leitos fixos, fluidizados e de jorro.

Sempre que um fluido se move em relação a 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 (GONZAGA et al. 2007).

A fluidodinâmica da partícula pode ser descrita através de um conjunto de equações que inclui a equação do movimento da partícula, as equações de continuidade e movimento do fluido, as equações constitutivas para o fluido e as condições de interface sólido-fluido. Essa análise limita-se a fluidodinâmica da partícula rígida, incluindo não apenas a partícula sólida, como também gotas e bolhas de dimensões diminutas (MASSARANI, 2002).

A partícula tem massa m_p , massa específica uniforme ρ_s , volume v_p e a superfície em contato com o fluido é S_p . As equações são estabelecidas em base a um referencial inercial.

$$m_p(a_s)_c = \int_{S_p} T_F ndS + \rho_s V_p b \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho_F}{\partial t} + \text{div}(\rho_F v_f) = 0 \quad (14)$$

$$\rho_F \left[\frac{\partial v_F}{\partial t} + (\text{grad } v_F) v_F \right] = \text{div } T_F + \rho_F b \quad (15)$$

De acordo com Massarani (2002), nessas equações em relação à partícula, $(V_s)_C$ e $(a_s)_C$ são respectivamente a velocidade e a aceleração de seu centro de massa, ω a velocidade angular, $r_Q C$ o vetor posição do ponto Q sobre a superfície da partícula em relação ao centro de massa. Quanto ao fluido, ρ_f , V_f e T_f são, respectivamente, a massa específica, o campo de velocidades e o tensor tensão que atua sobre esta fase, e b , a intensidade do campo exterior.

A força de interação sólido-fluido pode ser decomposta na força resistiva l e no empuxo, assim tem-se:

$$\int_{S_p} T_F ndS = l - \rho_F V_p b \quad (16)$$

Sendo nula a força resistiva quando a velocidade relativa entre as fases for nula. A equação do movimento da partícula toma a forma:

$$m_p(a_s)_C = l + (\rho_s - \rho_F) V_p b \quad (17)$$

Para este caso, as expressões analíticas conhecidas para representar a força resistiva, restringem-se a algumas configurações caracterizadas pela forma regular da partícula e pelo movimento relativo partícula-fluido suficientemente lento, ou seja, no regime de Stokes, quando a equação x do movimento do fluido pode ser linearizada. Observando os resultados alcançados através das equações 13 a 16, segundo Massarani (2002), extrai-se que:

- A força resistiva exercida pelo fluido sobre a partícula depende das dimensões e da forma da partícula;

- A força resistiva depende do campo de velocidades do fluido não perturbado pela presença da partícula;
- A força resistiva é influenciada pela presença de contornos rígidos e pela presença de outras partículas;
- No movimento acelerado da partícula, a força resistiva depende da história da aceleração da partícula.

Garić-Grulović et al. (2008) comentam que numerosas aplicações industriais de sistemas líquido-sólido requerem determinação de características de transferência de calor e massa, pois muitos equipamentos de processamento contínuo industriais tratam uma mistura de duas fases de sólidos e fluidos, como tratamento de água, polimerização, biotecnologia, processamento de alimentos, entre outros. Para entender e modelar a transferência de calor, as temperaturas e os coeficientes de transferência de calor devem ser conhecidos.

2.3.3 Velocidade Terminal

De acordo com Lima e Luz (2001), quando uma partícula cai no vácuo, sob um campo uniforme de forças (geralmente gravitacional), sua velocidade de queda cresce indefinidamente independente do seu tamanho e massa específica. Mas, caso essa mesma partícula seja imersa em um meio fluido qualquer, a mesma fica sujeita a uma força resistiva, cuja magnitude depende do regime fluidodinâmico vigente, além dos aspectos morfológicos dessa partícula. Quando o equilíbrio é alcançado entre a força gravitacional e a força de empuxo, a partícula alcança sua velocidade terminal de sedimentação e, portanto, cai a uma taxa constante.

Segundo Souza, Tonetti e Davide (2005), a velocidade terminal é uma propriedade utilizada no dimensionamento e beneficiamento de produtos agrícolas, juntamente com projetos e equipamentos de limpeza, secagem, aeração, e transportadores na indústria. Pode-se ainda utilizar a propriedade física para operações de comercialização e diferenciação de variedades, sendo um instrumento importante em tecnologias mais avançadas e na operacionalização adequada de produtos armazenados.

O cientista britânico chamado Osborne Reynolds estudou o escoamento em tubos e dutos utilizando um experimento no qual verificou que o contraste de corante apresentava comportamentos diferentes, e que dependia das características do tubo, do

fluido e do escoamento. Para identificar o tipo de escoamento, Reynolds sugeriu um parâmetro adimensional conhecido como número de Reynolds (Re), que relaciona algumas propriedades do fluido, tais como a massa específica, e a viscosidade, como também a geometria do tubo e velocidade média do escoamento. Através do (Re), pode-se determinar se o escoamento é laminar, transiente ou turbulento (VILANOVA, 2010).

No escoamento de um fluido através de um tubo ou de um duto, o perfil de velocidade de escoamento na entrada do sistema é normalmente uniforme, e na medida em que o fluido avança na direção do escoamento, os efeitos da viscosidade são percebidos pela aderência de uma camada de fluido sobre a parede do tubo, e há o surgimento de tensões de cisalhamento entre as camadas adjacentes (CLIFT, GRACE e WEBER, 1978; VILANOVA, 2010).

A camada do escoamento que é influenciada pelo efeito da viscosidade é chamada de camada limite. A velocidade da camada aderida à parede do tubo é zero e a velocidade do fluido cresce no sentido da direção do centro do tubo onde é máxima. O perfil de velocidade apresenta, em um determinado comprimento do tubo ou duto, um comportamento variável que vai de um perfil uniforme na entrada até assumir um perfil parabólico, a partir do qual se diz que o escoamento está completamente desenvolvido. A região onde o perfil de velocidade é variável, chamada de região de entrada, conforme observa-se na Figura 2.5.

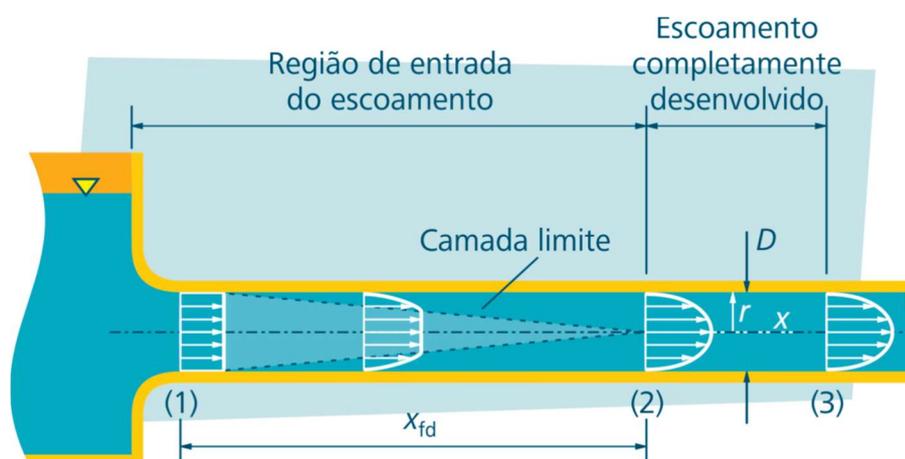


Figura 2.5 – Perfil da velocidade de escoamento na região de entrada e no escoamento completamente desenvolvido.

Fonte: (VILANOVA, 2010).

Segundo Vilanova (2010), o comprimento da região de entrada X_{ent} [m] depende do tipo de escoamento ser laminar ou turbulento e pode ser determinado pelas seguintes relações nas equações 18 e 19, em que D é o diâmetro do tubo, tem-se:

$$\frac{X_{ent}}{D} = 0,05 Re - \text{escoamento laminar} \quad (18)$$

$$10 \leq \frac{X_{ent}}{D} \leq 60 - \text{escoamento turbulento} \quad (19)$$

Embora não sejam comuns na prática, como forma de simplificação, muitos escoamentos podem ser considerados completamente desenvolvidos, permanentes e laminares. Considerando o fluido como newtoniano, o perfil de velocidade em função do raio em um tubo circular pode ser determinado pela equação 20:

$$U(r) = V_c \left[1 - \left(\frac{2r}{D} \right)^2 \right] \quad (20)$$

Em que:

$U(r)$ [m/s] → velocidade a uma distância r , qualquer da linha de centro do escoamento, m;

D → Diâmetro do tubo, m;

V_c → velocidade na linha de centro do escoamento, $m \cdot s^{-1}$

Muitos escoamentos não podem ser considerados como laminares. Escoamentos turbulentos são muito comuns e desejáveis na prática, como por exemplo os processos de mistura ou de transferência de calor em resfriadores ou trocadores de calor. Em escoamentos subsônicos com número de Reynolds elevado ($Re > 1000$, por exemplo), o arrasto de forma pode superar em várias ordens de grandeza o arrasto por atrito. Entretanto, não se pode generalizar, pois a proporção dependerá da forma do corpo, isto é, se ela favorecerá ou não a separação hidrodinâmica (CLIFT, GRACE e WEBER, 1978; VILANOVA, 2010; WHITE, 2011).

As partículas ao caírem no seio de um fluido, sob ação de uma força constante, por exemplo a força da gravidade, sofrem aceleração durante um período de tempo muito

curto e depois disso se movem a uma velocidade constante. Essa máxima velocidade que as partículas podem alcançar é nomeada de velocidade terminal, e depende da massa específica, tamanho e forma da partícula, além das características do fluido e do campo. A velocidade terminal é uma propriedade aerodinâmica muito importante para o projeto e operação de equipamentos, sendo a velocidade máxima que um objeto atinge em queda livre, quando a resistência do ar evita maior aceleração (PEIXOTO, 2012).

Segundo Peixoto (2012) baseado nos dados de Mohsenin (1986), dentre os parâmetros aerodinâmicos existentes, a velocidade terminal é uma informação essencial para o correto uso de máquinas que utilizam um fluxo de ar para separar os grãos das impurezas, tais como palha, sementes silvestres e folhas. O autor descreve a velocidade terminal como um fenômeno simples, sendo um objeto em queda livre imerso em uma corrente de ar ascendente, no qual esse objeto, caso possua massa específica inferior à do material, está sujeito à ação de três forças: a força gravitacional, a força devido ao empuxo do fluido e a força de resistência ao arraste do material; no momento em que essas grandezas vetoriais se equilibram, o objeto passa a deslocar-se com velocidade constante, denominada velocidade terminal.

Diversos estudos realizados com produtos agrícolas relatam a velocidade terminal dada em função do teor de água do produto (JOSHI, DAS e MUKHERJEE et al. 1993; SUTHAR e DAS, 1996; GUPTA e DAS, 1997; NIMKAR e CHATTOPADHYAY, 2001; BARYEH, 2002, SILVA et al. 2003).

Loeffler e Ruth (1959), em um estudo experimental sobre fluidização particulada e sedimentação de esferas, encontraram um intervalo de números de Reynolds de 0,005 a 1,800 por meio de esferas de vidro de cerca de 0,50 a 0,91 cm, em água e etilenoglicol.

Braga (1997) estudou a velocidade terminal de laranjas, de modelos esférico-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 à 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.

Braga e Santana (1999) determinaram as características aerodinâmicas, velocidade terminal e coeficiente de arraste de sementes de amendoim, e observaram, através dos resultados obtidos, uma variação nas seguintes faixas: coeficiente de arraste entre 1,37 e 3,39, o número de Reynolds entre 6.000 e 26.000 e a velocidade terminal entre 6,6 e 13,8 m/s. Dos 4 métodos de cálculo da velocidade terminal, o que forneceu o

resultado mais próximo do experimental foi o de considerar partículas esféricas com $CD = 0,44$, e o segundo melhor resultado foi obtido pela equação de Pettyjohn e Christiansen.

Mordant e Pinton (2000) mediram a velocidade de uma esfera sólida caindo verticalmente sob a gravidade na água inicialmente em repouso, com variações do tamanho e massa específica da esfera e com base na velocidade limite, entre 40 e 7000 (Re_c), observaram que os números de Reynolds encontrados mostram que a massa específica é um importante parâmetro de controle.

Silva e Corrêa (2000), em um estudo realizado sobre a velocidade terminal em água de algumas frutas (ameixa, maçã, umbu e goiaba), observaram que o comportamento das goiabas em água em estádios semimadura apresentou aspectos diferentes das demais frutas. Com massa específica aproximadamente igual à da água, possui um assentamento muito lento, o que possibilita seu transporte hidráulico em canal aberto por gravidade. No entanto, requer maiores estudos quanto a lâmina d'água e velocidades adequadas a esta lâmina, bem como o comprimento do canal, pois estes parâmetros estão intimamente ligados. Os autores também observaram comportamentos muito diferentes entre goiabas, que podem ser atribuídos a diferenças no grau de maturidade.

Silva et al (2003), em uma pesquisa sobre o comportamento da velocidade terminal de grãos de sorgo e milho, em função do teor de água, observaram uma tendência semelhante à observada para a maioria dos grãos agrícolas, ou seja, a velocidade terminal aumenta com a elevação do teor de água dos grãos, em que os valores desta propriedade física, para os grãos de sorgo, foram superiores aos encontrados para os grãos de milho, e o modelo linear ajustou-se adequadamente aos dados experimentais, apresentando coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,85 e valores de erro médio (P) inferiores a 5%.

Em um estudo sobre parâmetros hidrodinâmicos de vegetais fatiados, Gonzaga et al. (2007) observaram que a velocidade terminal aumenta à medida que se aumenta o diâmetro do tubo de queda para todas as peças de vegetais, independentemente da forma geométrica, mostrando que existe influência do diâmetro do tubo de queda na velocidade terminal de partículas. Também foi observado que os cilindros e os paralelepípedos de chuchu e batata 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. Através da equação sugerida por (ISAACS e

THODOS, 1967), observou-se uma boa aproximação da velocidade terminal experimental com a teórica, principalmente para as formas geométricas do chuchu.

2.3.3.1 Velocidade terminal para corpos esféricos

A equação geral para o cálculo da velocidade terminal, em qualquer regime de escoamento, para partículas esféricas, segundo análise dimensional, de acordo com Braga (1997), é dada pela equação 21:

$$V_t = \left(\frac{4}{3} g \frac{D_p (\rho_p - \rho_f)}{C_D \rho_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Em que:

V_t → velocidade terminal da partícula, m/s

g → Aceleração da gravidade, $m.s^{-2}$

D_p → diâmetro da partícula, ou diâmetro da esfera equivalente, m

ρ_p ; ρ_f → massa específica da partícula sólida e do fluido, respectivamente, $kg.m^{-3}$

C_D → Coeficiente de arrasto

Caso o regime de escoamento se encontre na região de Stokes, ou seja, na região de escoamento laminar, onde $Re < 1$, pode-se usar diretamente a equação 22:

$$V_t = \frac{g D_p^2 (\rho_p - \rho_f)}{18\mu} \quad (22)$$

Em que:

μ → viscosidade do fluido (da água a $25^\circ C = 1,0030 \times 10^{-3} Pa.s$)

Baseado nos dados de Lapple (1956) para fluidodinâmica de partículas esféricas, foram estabelecidas algumas correlações entre o número de Reynolds (Re), o coeficiente de arrasto (C_D) e a esfericidade (ϕ), comparadas com as de Abraham (1970), Brauer e Sucker (1976), Concha e Almendra (1979), e Haider e Levenspiel (1989). Essas correlações estão de acordo com Coelho e Massarani (1996) na Tabela 2.6, em que o valor médio e o desvio padrão foram calculados:

Tabela 2.6 - Fluidodinâmica da partícula esférica; avaliação das correlações.

Referência	Correlação	Valor médio e Desvio padrão
Abraham (1970)	$C_D=0,30 \left(1 + \frac{8,65}{Re^{1/2}}\right)^2$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}}=1,03 \pm 0,11$
Brauer e Sucker (1976)	$C_D=0,49 + \frac{24}{Re} + \frac{3,73}{Re^{1/2}} - \frac{4,83 \times 10^{-3} Re^{1/2}}{1 + 3,0 \times 10^{-6} Re^{3/2}}$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}}=1,00 \pm 0,05$
Concha e Almendra (1979)	$C_D=0,28 \left(1 + \frac{9,06}{Re^{1/2}}\right)^2$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}}=1,05 \pm 0,13$
Concha e Almendra (1979)	$Re = \frac{0,07}{C_D Re} \left\{ 1 + \left[1 + 68,49 \left(\frac{C_D}{Re} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \right\}^2$	$\frac{(Re)_{exp}}{(Re)_{cor}}=1,05 \pm 0,12$
Concha e Almendra (1979)	$Re = 20,52 \left\{ \left[1 + 0,0921 (C_D Re^2)^{1/2} \right]^{1/2} - 1 \right\}^2$	$\frac{(Re)_{exp}}{(Re)_{cor}}=0,99 \pm 0,06$
Haider e Levenspiel (1989)	$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,1806 Re^{0,6459}) + \frac{0,4251 Re}{Re + 6881}$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}}=0,98 \pm 0,04$
Coelho e Massarani (1996)	$C_D = \left[\left(\frac{24}{Re} \right)^{0,63} + 0,43^{0,63} \right]^{1/0,63}$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}}=1,00 \pm 0,99$
Coelho e Massarani (1996)	$Re = \left[\left(\frac{C_D Re^2}{24} \right)^{-0,95} + \left(\frac{C_D Re^2}{0,43} \right)^{-0,95} \right]^{1/0,95}$	$\frac{(Re)_{exp}}{(Re)_{cor}}=1,00 \pm 0,06$
Coelho e Massarani (1996)	$Re = \left\{ \left(\frac{24}{C_p/Re} \right)^{0,88} + \left(\frac{0,43}{C_p/Re} \right)^{0,88} \right\}^{1/0,88}$	$\frac{(Re)_{exp}}{(Re)_{cor}}=1,00 \pm 0,09$

Fonte: Coelho e Massarani (1996).

2.3.2.2 Velocidade terminal para corpos isométricos

As relações obtidas para partículas esféricas foram modificadas para não esféricas correlacionando fatores de forma como esfericidade. Desse modo, a velocidade terminal de uma partícula esférica isométrica isolada, em regime de Stokes, é dada conforme a equação 23, de acordo com Pettyjohn e Christiansen (1948):

Para $Re < 1$:

$$V_t = \frac{K_1 g (\rho_p - \rho_f)}{18\mu} D_p^2 \quad (23)$$

Em que K_1 é a função empírica da esfericidade, dada por:

$$K_1 = 0,843 \log \left[\frac{\varphi}{0,065} \right] \quad (24)$$

φ - Esfericidade dada por:

$$\varphi = \frac{\pi D_p^2}{\text{área superf. da partícula}} \quad (25)$$

Para condições de escoamento transiente, $1 < Re < 10^3$:

$$C_D = \left[\left(\frac{24}{K_1 Re} \right)^{0,85} + K_2^{0,85} \right]^{\frac{1}{0,85}} \quad (26)$$

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

Para $Re > 10^3$:

$$V_t = \left(\frac{4}{3} g \frac{D_p (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f K_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

Em que:

$\phi \rightarrow$ Esfericidade

$K_2 \rightarrow$ função da esfericidade dada por:

$$K_2 = 5,31 - 4,88 \phi \quad (28)$$

Exemplos da aplicação dessas equações para o cálculo da velocidade terminal e do coeficiente de arrasto com base nas características físicas de sementes podem ser vistos nos trabalhos de Braga e Santana (1999) e Torres (2003).

Baseado nos dados de Pettyjohn e Christiansen (1948) para partículas isométricas, foram estabelecidas algumas correlações entre o número de Reynolds (Re), o coeficiente de arrasto (C_D) e a esfericidade (ϕ), comparadas com as de Abraham (1970), Brauer e Sucker (1976), Concha e Almendra (1979), Concha e Barrientos (1986), e Haider e Levenspiel (1989). Essas correlações estão de acordo com Coelho e Massarani (1996), na Tabela 2.7:

Tabela 2.7 - Fluidodinâmica da partícula isométrica; avaliação das correlações.

Referência	Correlação	Valor médio e desvio padrão
Concha e Barrientos (1986)	$C_D = \frac{5,42 - 4,75\phi}{0,67}$ $\left[0,527 + \frac{22}{Re_M} + \frac{3,73}{Re_M^{\frac{1}{2}}} - \frac{0,0281 Re_M^{\frac{1}{2}}}{1 + 1,06 \times 10^{-4} Re_M^{\frac{3}{2}}} \right]$ $Re_M = \left[\frac{5,42 - 4,75\phi}{0,795} \log_{10} \frac{\phi}{0,065} \right] Re_e$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}} = 1,03 \pm 0,10$
Haider e Levenspiel (1989)	$C_D = \frac{24}{Re} \left\{ 1 + [8,172 \exp(-4,066\phi)] Re_e^{\left(\frac{0,00964}{0,5565\phi}\right)} \right\}$ $+ \frac{73,69 Re \exp(-5,075\phi)}{Re + 5,378 \exp(6,212\phi)}$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}} = 1,05 \pm 0,10$
Haider e Levenspiel (1989)	$Re = \left(\frac{3C_D Re^2}{4} \right)^{\frac{1}{3}}$ $\left[\frac{18}{\left(\frac{3C_D Re^2}{4} \right)^{\frac{2}{3}}} + \frac{2,33 - 1,74\phi}{\left(\frac{3C_D Re^2}{4} \right)^{\frac{1}{6}}} \right]^{-1}$	$\frac{(Re)_{exp}}{(Re)_{cor}} = 0,97 \pm 0,08$
Coelho e Massarani (1996)	$C_D = \left[\left(\frac{24}{K_1 Re} \right)^{0,85} + K_2^{0,85} \right]^{1/0,85}$ $K_1 = 0,843 \log_{10} \left(\frac{\phi}{0,065} \right)$ $K_2 = 5,31 - 4,88\phi$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}} = 1,00 \pm 0,13$
Coelho e Massarani (1996)	$Re = \left[\left(\frac{K_1 C_D Re^2}{24} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{C_D Re^2}{K_2} \right)^{\frac{1,2}{2}} \right]^{\frac{1}{1,2}}$ $K_1 = 0,8431 \log_{10} \left(\frac{\phi}{0,065} \right)$ $K_2 = 5,31 - 4,88\phi$	$\frac{(Re)_{exp}}{(Re)_{cor}} = 1,00 \pm 0,10$

Fonte: Coelho e Massarani (1996).

2.3.4 Força e coeficiente de arrasto

De acordo com Nunes (2009), o conhecimento da velocidade terminal e das forças de arraste do produto são importantes no projeto de sistemas de limpeza utilizados nas máquinas de colheita, sendo mais fácil realizar as operações de pré-processamento dos produtos agrícolas, o que reduz o consumo de energia, especialmente na secagem.

Para a avaliação das operações que envolvem o uso de fluxos de ar, é necessária a determinação da velocidade terminal do produto. Um objeto em queda livre, imerso em uma corrente de ar ascendente e com massa específica inferior à do material, está sujeito à ação de três tipos de força: a força gravitacional, a força devido ao empuxo do fluido e a força de resistência ao arraste do material. No momento em que essas grandezas vetoriais se equilibram, o objeto passa a deslocar-se com velocidade constante, denominada velocidade terminal (MOHSENIN, 1986, citado por PEIXOTO, 2012).

Segundo White (2011), um corpo de qualquer forma, quando imerso em um fluido em escoamento, fica sujeito a forças e momentos: o arrasto, que age numa direção paralela à direção da corrente livre, e forças de sustentação, que agem em direções ortogonais. A atuação destas forças no corpo causa momentos, conforme ilustra a Figura 2.6:

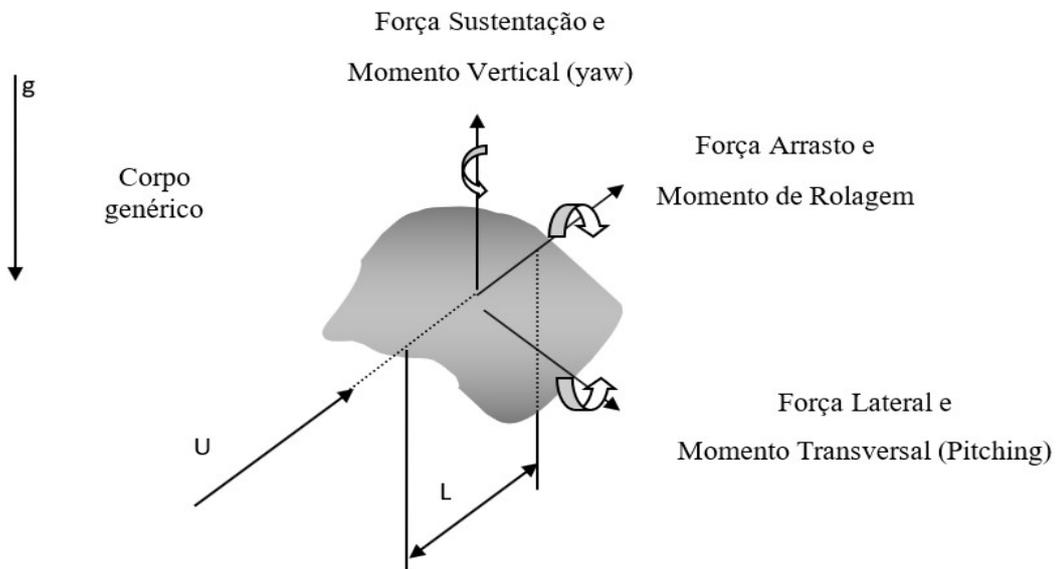


Figura 2.6 – Forças e momentos atuantes em um corpo genérico imerso em um escoamento.

Fonte: (WHITE, 2011).

Em que:

$U \rightarrow$ Velocidade da corrente livre (U);

$L \rightarrow$ Comprimento característico do corpo (L).

Quando nos referimos ao transporte hidráulico de frutas, vários fatores devem ser observados, tais como os parâmetros hidrodinâmicos e as características físicas dessas frutas, assim como as interações ocorridas em todo o processo, como é o caso da interação sólido-fluido, a qual é determinante para o projeto, avaliação e operação de diversos equipamentos de pré-processamento. Em casos muito particulares de interação sólido-fluido, a força de arraste que o fluido exerce sobre uma dada partícula sólida pode ser prevista com sucesso (MASSARANI, 2002).

Segundo Fox, McDonald e Pritchard (2004), a determinação analítica ou numérica do arrasto ainda é um desafio à teoria da mecânica dos fluidos, exceto para uma placa plana ou corpos muito delgados. Isso se deve ao fenômeno da “separação do escoamento”. A teoria da camada limite pode determinar o ponto de separação, mas ainda não avalia satisfatoriamente a pressão (usualmente baixa) na região de separação. E mesmo a própria determinação do ponto de separação do escoamento pode ser comprometida.

Nesses casos, a teoria da camada limite pode ser aplicada somente se a distribuição de pressão no corpo for previamente conhecida, e o valor do coeficiente de arrasto vai depender da forma do corpo. Em corpos rombudos, isto é, não delgados, tais como cilindros e placas planas normais ao escoamento, o arrasto de pressão é dominante e corresponde a mais que 90% do arrasto total. Para escoamentos com $Re > 1000$, por exemplo, corpos delgados com formas de placas planas, aerofólios, pássaros etc, tem-se $C_D < 0,1$ (WHITE, 2011).

Nesses corpos, os arrastos de forma e atrito são igualmente importantes na constituição do arrasto total. Por outro lado, os corpos rombudos, barra de seção quadrada, cilindro transversal ao escoamento e placa plana normal ao escoamento têm $C_D \cong 1$. A razão para os corpos rombudos apresentarem C_D próximo da unidade é que a força de arrasto total é bem próxima do produto entre a pressão dinâmica e a área frontal (WHITE, 2011).

De acordo com Paladino (2005), várias correlações para o coeficiente de arraste podem ser utilizadas, dependendo dos regimes de escoamento, forma das bolhas etc. Para uma esfera submersa numa corrente “livre”, a variação do C_D com o número de

Reynolds baseado no diâmetro adota a forma aproximadamente observada na Figura 2.7.

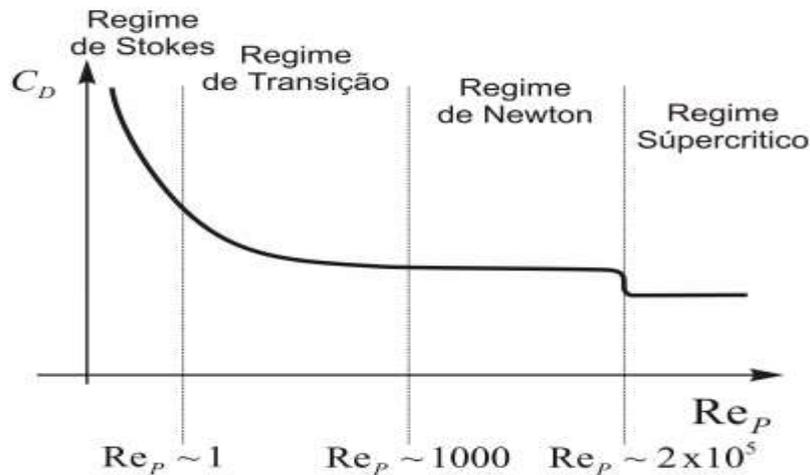


Figura 2.7 – Comportamento do coeficiente de arraste em esferas.

Fonte: (PALADINO, 2005).

A força de arraste sobre um corpo pode ser separada em duas parcelas, a força devida ao cisalhamento superficial e aquela exercida pela distribuição de tensões normais assimétricas na superfície do corpo, chamado de arraste de forma. Assim, para baixos (Re) o arraste é principalmente devido ao atrito superficial. Quando o (Re) aumenta, o arraste de forma vai tendo maior influência, até que para altos valores deste número, o arraste é dominado por este fenômeno.

A influência das diferentes forças de interface na estrutura do escoamento depende, a priori, do tipo de problema sendo estudado. Em escoamentos dispersos, a força de arraste desempenha um papel fundamental e é responsável pela maior parte da transferência de quantidade de movimento interfacial. Assim, esta força tem recebido grande atenção por parte dos pesquisadores da área, existindo inúmeros modelos para o seu cálculo. A forma padrão de expressar a força de arraste sobre um corpo numa corrente fluida é através do uso do coeficiente de arraste (PALADINO, 2005).

Geralmente, nas aplicações, o objeto fica livre para adotar sua própria orientação (SILVA e CORRÊA, 2000; MASSARANI, 2002; PALADINO, 2005), em que o coeficiente de arraste (C_D) é definido de tal forma que:

$$\vec{f} = \frac{1}{2} \rho |\vec{U} - \vec{V}|^2 A_P C_D \frac{(\vec{U} - \vec{V})}{|\vec{U} - \vec{V}|} \quad (29)$$

Em que:

$U \rightarrow$ Velocidade média do fluido em escoamento monofásico; $m.s^{-2}$

$V \rightarrow$ Velocidade da partícula; $m.s^{-2}$

$\rho \rightarrow$ Massa específica do fluido, $kg.m^{-3}$

$C_D \rightarrow$ Coeficiente de arrasto

$A_P \rightarrow$ Área projetada dada por:

$$A_P = \frac{\pi D_P^2}{4} \quad (30)$$

Sendo: D_P - Diâmetro da partícula, m

Para situação de regime permanente de escoamento, em concordância com a 2ª Lei de Newton, temos a seguinte equação para o coeficiente de arraste (C_D):

$$C_D = \frac{4}{3} g \frac{D_P (\rho_S - \rho)}{(\vec{U} - \vec{V})^2 \rho} \quad (31)$$

Em que:

$g \rightarrow$ Aceleração da gravidade, $m.s^{-2}$

$D_P \rightarrow$ Diâmetro da partícula, ou diâmetro da esfera equivalente, m

$\rho_S; \rho \rightarrow$ massa específica da partícula sólida e do fluido, respectivamente, $kg.m^{-3}$

A Equação 31 é comumente estendida às partículas não esféricas de geometrias isométricas. Explicitando $(U - V)$, obtém-se:

$$|\vec{U} - \vec{V}| = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{(\rho_P - \rho)}{C_D \rho}} \quad (32)$$

Onde:

$$C_D = f(R_e, \varphi) \quad (33)$$

e

$$R_e = \frac{\rho |\vec{U} - \vec{V}| D_P}{\mu} \quad (34)$$

Em que:

$R_e \rightarrow$ Número de Reynolds,

$\mu \rightarrow$ viscosidade do fluido (da água a 25° C = 1,0030 x 10⁻³ Pa.s)

$\phi \rightarrow$ Esfericidade

Conhecendo-se a expressão para C_D , é possível prever o valor da velocidade terminal (V_t). Segundo Gonzaga et al. (2007), estudos envolvendo fluidos Newtonianos, em particular água e ar, têm merecido muita atenção, pois para esses fluidos já são conhecidos os resultados da integração dos perfis de velocidade ao redor da esfera para escoamento axissimétrico permanente e a baixos números de Reynolds (BIRD, STEWART e LIGHTFOOT, 2002; MASSARANI, 2002).

De acordo com Gonzaga et al (2007), ao considerar o regime laminar de escoamento, as forças inerciais podem ser desprezadas. Dessa forma pode-se escrever:

$$F = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g + 6\pi\mu R U_\infty \quad (35)$$

Nesta expressão o termo $6\pi\mu R U_\infty$ representa a tão conhecida equação de Stokes (STOKES, 1851). Na faixa $0,1 < \text{Reynolds} < 1,0$ os valores experimentais de C_D vão se tornando cada vez maiores, em relação à curva teórica, na medida em que Reynolds aumenta, como pode ser visto na Figura 2.8:

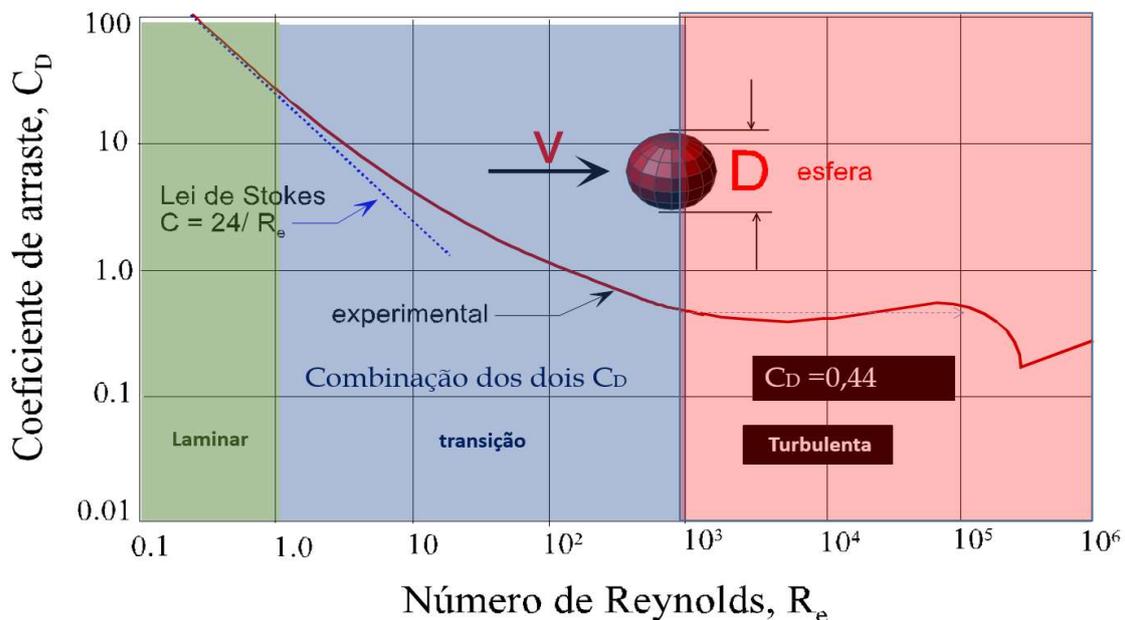


Figura 2.8 - Coeficiente de arraste para partículas com formas geométricas regulares.
Fonte: (VENNARD, 1961).

Silva e Corrêa (2000), empregando o Método de Diferenças Finitas obtiveram uma solução aproximada para números de Reynolds maiores do que a unidade, na qual os efeitos inerciais adquirem considerável importância. No entanto, para $Re > 400$ os resultados são essencialmente empíricos, como verificado por Chhabra (1996).

Stokes mostrou que para $Re < 1$, quando as forças inerciais podem ser desprezadas, considerando-se apenas as forças viscosas, o escoamento se fecha atrás do objeto esférico e o arraste é composto principalmente do arraste por atrito. Para uma esfera de diâmetro D_p , movendo-se numa velocidade V através de um fluido de viscosidade μ , a Lei de Stokes mostra que a força de arraste pode ser dada por:

$$F_D = 3\pi\mu VD_p \quad (36)$$

Combinando a Equação 35 com a Equação 36 e considerando $A_p = \pi/4 D_p^2$, o coeficiente de arraste será dado por:

$$C_D = 24 / Re \quad (37)$$

Para $Re > 1$, a Lei de Stokes não é mais aplicável porque o escoamento se abre atrás do objeto e o coeficiente de arraste é uma combinação do arraste por atrito e arraste devido à pressão numa faixa de até $Re = 1000$ (BIRD, STEWART e LIGHTFOOT, 2002).

Segundo Oseen (1927) e Gonzaga et al. (2007), a faixa de aplicação da solução de Stokes foi ampliada para a condição além das forças viscosas, na qual existe algum efeito de natureza inercial atuando sobre a partícula, chegando então a uma equação válida para $Re < 2$, dada por:

$$C_D = \frac{24}{Re} \left[1 + \frac{3}{16} Re \right] \quad (38)$$

De acordo com Silva e Corrêa, (2000), surgiram depois da equação 38 várias soluções empíricas para explicar os efeitos viscosos e inerciais:

Govier e Aziz (1972):

$$C_D = \frac{30}{Re^{0,625}} \text{ , válida para } 1 < Re < 10^3 \quad (39)$$

Bird, Stewart e Lightfoot (2002):

$$C_D = \frac{18,5}{R_e^{0,6}}, \text{ válida para } 2 < R_e < 500 \quad (40)$$

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

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

Sendo:

$$C_D = \frac{24}{k_1 R_e}, \text{ válida para } R_e < 0,1 \quad (41)$$

$$C_D = k_2, \text{ válida para } R_e > 10^3$$

De acordo com Silva e Corrêa (2000) e Gonzaga et al. (2007), muitos outros resultados para partículas não esféricas foram apresentados por diversos autores. Mohsenin (1986) estabelece uma tabela com equações comparativas para esferas e outros objetos com formas geométricas regulares. Os autores ressaltam que poucos trabalhos foram feitos com partículas de formas irregulares, devido à variedade de métodos para expressar tamanho e dimensões a serem usados no cálculo do número de Reynolds e área frontal, conforme apresenta Lapple (1956) na Tabela 2.8:

Tabela 2.8 - Resumo comparativo de equações de movimento de esferas, discos e cilindros circulares.

	Esfera (direção do escoamento)	Disco fino (normal à superfície)	Disco fino (paralelo à face)	Cilindro circular infinito (normal ao eixo)
N. de Reynolds	$\frac{D_P V \rho_P}{\mu}$	$\frac{D_P V \rho_P}{\mu}$	$\frac{2L V \rho_f}{\mu}$	$\frac{D_P V \rho_P}{\mu}$
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:				
$Re \leq 0.2$	$3\pi \mu V D_P$	$8\mu V D_P$	$\left(\frac{16}{3}\right) \mu V D_P$	$\left(\frac{4\pi}{k}\right) \mu V L$
$F_D = C_D Re$	24	$64 / \pi$	$64 / 3$	$8\pi / k$
Escoamento turbulento:				
C_D (médio)	0,44	1,12	-	1,2
Re (intervalo)	$1 \times 10^3 - 2 \times 10^5$	> 1000	-	$1 \times 10^2 - 2 \times 10^5$
Vel. terminal (V_t^2)	$\frac{4 g D_P (\rho_P - \rho_f)}{3 C_D \rho_f}$	$\frac{2 g L (\rho_P - \rho_f)}{C_D \rho_f}$	$\frac{g D_P \pi (\rho_P - \rho_f)}{2 C_D \rho_f}$	$\frac{g D_P \pi (\rho_P - \rho_f)}{2 C_D \rho_f}$

Fonte: (LAPPLE, 1956)

Sendo:

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

Em um estudo sobre os parâmetros hidrodinâmicos de vegetais fatiados, Gonzaga et al. (2007) encontrou os valores de coeficiente de arraste para placas circulares e quadradas de chuchu, batata e cenoura, respectivamente: 1,35; 1,41 e 1,46. Para peças cilíndricas e paralelepípedos, os valores de C_D foram de 0,91.

2.3.5 Efeito de Parede

O efeito de parede (K_p) pode ser obtido para a queda livre ou ascensão de esferas ao longo do eixo de um tubo de diâmetro (D_t), para uso quando a velocidade terminal de partículas esféricas em regime de Stokes é afetada por fronteiras rígidas (MASSARANI, 1990), conforme a equação 42:

$$K_p = \frac{v_t}{v_\infty} \equiv \frac{1}{1+2,10\beta} \quad (42)$$

Em que:

K_p → critério que analisa o efeito de parede

β → relação entre o diâmetro da partícula e o diâmetro do tubo obtido por:

$$\beta = \frac{D_p}{D_t} \quad (43)$$

A equação 42 é válida, quando a relação β é inferior a 0,05. Enquanto a velocidade terminal da partícula isolada $V_{t\infty}$ é dada por:

$$V_{t\infty} = \frac{g(\rho_p - \rho_f) D_p^2}{18\mu} \quad (44)$$

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.

V_t → velocidade terminal da partícula, m/s

g → aceleração da gravidade, $m.s^{-2}$

D_p → diâmetro da partícula, ou diâmetro da esfera equivalente, m

D_t → diâmetro do tubo, m

ρ_p, ρ_f → massa específica da partícula sólida e do fluido, respectivamente, $kg.m^{-3}$

μ → viscosidade da água a $25^\circ C = 1,0030 \times 10^{-3} Pa.s$

Para situações fora do regime de Stokes e condições em que $\beta > 0,05$, Massarani apresentou correlações empíricas conforme Tabela 2.9 e comprovou que, para que o efeito de parede não seja sentido, é necessário que a relação entre o diâmetro do tubo e o

diâmetro da partícula esteja dentro do critério $K_p \geq 0,99$ e seja superior a 200 no regime de Stokes (condições em que $NR < 1$ e apenas 4 no regime de Newton, ou seja, condições em que $NR > 1000$). A influência de parede se faz sentir de modo particular agudo quando prevalece o regime de Stokes (MASSARANI, 1990).

Tabela 2.9 – Efeito de parede em queda livre de uma esfera ao longo de um tubo.

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

Fonte: Massarani (1990).

Segundo Ataíde, Barrozo e Pereira (1996), a presença de paredes ou limites finitos exerce efeito na velocidade terminal das partículas em um meio viscoso, sendo necessário o conhecimento deste efeito para deduzir o arrasto hidrodinâmico líquido na partícula, devido exclusivamente ao movimento relativo entre ela e o meio fluido.

O efeito de parede representa a presença da parede e sua influência sobre o movimento da partícula, sendo obtido pela relação entre a dimensão efetiva da partícula e o diâmetro do tubo de queda (GONZAGA et al. 2007).

Em 1921, Faxen quantificou o efeito de parede no movimento de partículas esféricas no regime de Stokes ($Re < 0,10$) para uma faixa estreita de β ($0 < \beta < 0,2$) e Francis (1933) estabeleceu uma correlação para a mesma região de fluxo ($Re < 0,10$) em uma ampla gama de razões de diâmetro $0 < \beta < 0,8$. Em fluidos Newtonianos, alguns resultados experimentais de efeito de parede foram apresentados em função do diâmetro do tubo (β) na região de Newton ($Re > 1000$), por Fidleris e Whitmore, (1961),

que investigaram os efeitos de parede sobre a velocidade de assentamento livre de partículas esféricas (ATAÍDE BARROZO e PEREIRA, 1996).

Para fluidos não newtonianos, Chhabra, Tiu e Uhlherr (1981) quantificaram o efeito de limites rígidos na queda de partículas esféricas movendo-se em regime de rastejamento para a faixa de $0 < \beta < 0,5$. Almeida (1995) apresentou uma equação que estima o efeito de limites finitos para o número de Reynolds considerando não só o efeito β , mas também a forma da partícula e a influência do número de Reynolds no movimento da partícula isométrica ao longo do eixo principal de um tubo cilíndrico. Essas correlações clássicas são baseadas nos estudos de 1888 de Munroe para o regime de Newton e de Francis (1933), para o regime de Stokes, para esferas, as quais também podem ser empregadas para partículas isométricas apresentadas na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Efeito de parede na fluidodinâmica da partícula isométrica em fluido newtoniano.

$Re_{\infty} = \frac{D_P v_{\infty} \rho_F}{\mu}$	$k_P = \frac{v_t}{v_{\infty}}, \quad \beta = \frac{D_P}{D_t}$
< 0,1 (Francis, 1993)	$k_P = \left[\frac{1 - \beta}{1 - 0,475\beta} \right]^4$
$0,1 - 10^3$	$k_P = \frac{10}{1 + A Re_{\infty}^B}$
	$A = 8,91e^{2,79\beta}, B = 1,17 \times 10^{-3} - 0,281\beta$
> 10^3	$k_P = 1 - \beta^{\frac{3}{2}}$

Fonte: (ALMEIDA, 1995)

O efeito de parede foi estudado por Uhlherr e Chhabra (1995) para esferas de diversos materiais em escoamento em tubos cilíndricos a altos números de Reynolds, no qual mediram também velocidade terminal e coeficiente de arrasto. As esferas tinham massa específica que variavam de 1,049 a 11,913 kg/m³ e diâmetro de 1,59 a 19,05 mm.

Braga (1997) estudou o efeito de parede de laranjas em um tubo cilíndrico, como também de esferas com mesma massa específica dos frutos submetidos ao experimento. A autora observou que o efeito de parede tende a se anular a partir de $\beta = 0,2$ dentro do critério $K_p \geq 0,99$, e, tanto as frutas quanto seus modelos esféricos, apresentavam um movimento de “zig-zag” durante a subida, conforme resultados apresentados na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Efeito de parede de laranjas e modelos esféricos ao longo do eixo de um tubo.

Diâmetro da esfera (mm)	$Re = V_t D_p \rho / \mu$	$\beta = D_p / D_t$	$K_P = V_t / v_\infty$ $K_P = (1 - \beta^2) / (1 - \beta^4)^{1/2}$
72,4	15204	0,2896	0,9129
72,0	18720	0,2840	0,9139
50,0	12500	0,2000	0,9608
42,0	10080	0,1680	0,9714
37,0	8140	0,1480	0,9779

Fonte: Braga (1997).

Gonzaga et al (2007) analisou os parâmetros hidrodinâmicos do chuchu, fatiado em diversas formas geométricas, submetidos ao escoamento em tubos de 50, 100 e 150 mm de diâmetro. Os autores observaram que o efeito de parede foi mais presente nos tubos de 50 mm, para as peças cilíndricas e em forma de paralelepípedos ($\beta = 0,34$). Nos demais tubos, na presença de todas as outras peças, esses efeitos foram menores, sendo verificado o menor efeito para discos e placas planas quadradas de 8 mm, no tubo de 150 mm ($\beta = 0,05$).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local dos experimentos

Esta pesquisa foi desenvolvida nos Laboratórios do curso de Engenharia de Alimentos (LEA), da Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos, localizado no câmpus da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Paraíba, onde foi realizada a caracterização da matéria prima, como também a construção e a caracterização do equipamento utilizado para os ensaios de velocidade terminal.

3.2 Matéria-prima

A matéria prima utilizada foi duas variedades de tomate (*Solanum lycopersicum L.*): caqui e italiano. Foram escolhidas conforme suas diferenças na conformidade, forma, tamanho e constituição, e o intuito foi verificar a influência causada nas características hidrodinâmicas devido a essas diferenças. Foi adquirido um lote com 70 tomates totalmente verdes de cada variedade no mercado local na cidade de Campina Grande, Paraíba, conforme Figura 3.1.



Figura 3.1 - Amostras do tomate italiano adquiridos no comércio local.

No laboratório, os frutos passaram por uma rigorosa seleção, descartando-se os danificados pelo transporte, os manchados, os deformados e os que apresentavam discrepância visível de dimensões. Os frutos sadios foram separados, lavados em água

corrente, sanitizados em água clorada (50 ppm de cloro ativo) por 10 minutos e colocados enumerados em uma bandeja plástica etiquetada para que fosse precedida a caracterização física individual.

Os tomates foram separados em 5 lotes com 10 unidades cada para os dois tipos (caqui e italiano) e escolhidos com características mais semelhantes possíveis quanto ao tamanho, forma, massa e coloração. Os tomates da variedade caqui, com forma semelhante a um esferoide oblato, foram nomeados como tipo 1; e os tomates da variedade italiano, com forma semelhante a um esferoide prolato, foram nomeados como tipo 2. Para cada amostra foram realizadas três repetições. Também foram separadas algumas amostras para a determinação do teor de água e da textura.

De acordo com a Figura 3.2, os cinco lotes de frutos foram armazenados em temperatura ambiente, e, de acordo com cada estágio de maturação, os dados foram obtidos de maneira que as coletas fossem realizadas partindo do estágio verde ao maduro, com medidas feitas a cada dois dias, ou quando fosse percebida uma alteração de cor, ficando definidos os cinco estágios de maturação. Para cada fruto, foram determinadas as características físicas, como também os parâmetros hidrodinâmicos.



Figura 3.2 - Esquema para realização do experimento para os diferentes estágios de maturação dos tomates.

3.3 Características físicas

Os frutos de tomate foram analisados quanto ao teor de água, forma e tamanho, massa, volume, massa específica unitária (real), área projetada, área critério, área superficial, esfericidade, orientação na água e textura.

3.3.1 Teor de água

O conteúdo de água das partículas foi determinado de acordo com as normatizações do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2018). Em cada estágio de maturação foi determinado o teor de água das duas variedades do tomate, utilizando o método padrão da estufa a 105 °C (± 1 °C), que consiste em determinar o teor de água através da perda de massa sofrida pelo produto durante sua permanência por 24 horas na estufa a 105 °C. A massa das amostras, em triplicata, foi medida em balança analítica com precisão de 0,0001g conforme a Equação 04.

3.3.2 Tamanho

O tamanho das amostras foi analisado pela medida dos diâmetros das três dimensões da fruta nas três direções mutuamente perpendiculares, a, b e c, em centímetros (Figura 3.3). Foi utilizado um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm, para tais medições.

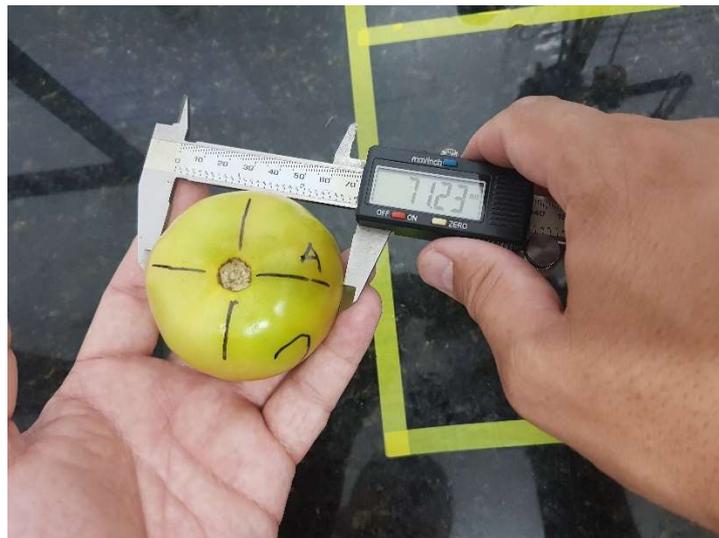


Figura 3.3 - Máximas dimensões (a, b, c) do tomate caqui em três direções mutuamente perpendiculares no estágio 1 de maturação.

O diâmetro da partícula (D_p) foi obtido através da relação entre o produto das três dimensões: a, b e c que foram, respectivamente, o maior, médio e menor diâmetro do fruto:

$$D_{P1} = \sqrt[3]{a b c} \quad (45)$$

Em que:

D_{P1} → diâmetro da esfera equivalente, m.

Obteve-se também, através da relação entre o volume da esfera, chamado de diâmetro da esfera equivalente:

$$D_{P2} = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (46)$$

Em que:

D_{P2} → diâmetro da esfera equivalente obtido do volume real do fruto, m.

V → volume do fruto, m^3 .

3.3.3 Massa

A massa (kg) foi determinada por pesagem em balança semianalítica ao início de cada dia do experimento e para cada estágio de maturação.

3.3.4 Volume

Para determinação do volume do fruto, foi utilizado o equipamento ilustrado na Figura 3.4. Este recipiente contém um furo lateral, no qual foi inserido um pequeno pedaço de mangueira (ladrão), que possui a função de manter o nível da água no recipiente.

Funcionamento:

Após completar o recipiente com água, aguarda-se até que esse finalize o gotejamento, estabelecendo um nível, então prende-se o fruto a uma fina haste fixa em um suporte, em seguida vai-se abaixando a haste até que a fruta fique submersa, ao mesmo instante em que a água expulsa do recipiente por meio da pequena mangueira vai sendo coletada em um Becker.

A água coletada no Becker é igual ao volume de água deslocado pelo fruto, ou seja, tem o mesmo volume (V) do fruto, cuja determinação é feita pela Equação 47:

$$V = \frac{(M_b + M_{H_2O}) - M_b}{\rho_{H_2O}} \quad (47)$$

Em que:

V → volume do fruto, m^3 .

$M_b \rightarrow$ massa do Becker, kg.

$M_{H_2O} \rightarrow$ massa de água, kg.

$\rho_{H_2O} \rightarrow$ massa específica da água, kg. m⁻³.

A massa específica da água foi medida segundo metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2018).



Figura 3.4 - Determinação do volume do fruto

3.3.5 Massa específica real

A massa específica real ρ_r (kg.m⁻³) foi determinada conforme equação (48), ou seja, pela relação entre a massa do fruto (kg) e o seu volume (m³) conforme determinado no item 3.3.4.

$$\rho_r = \frac{\text{Massa do fruto}}{\text{Volume do fruto}} \quad (48)$$

3.3.6 Área projetada

A determinação das áreas projetadas do fruto nas três direções mutuamente perpendiculares foi obtida utilizando-se uma câmera fotográfica. Inicialmente foram realizadas marcações no fruto para medida das três dimensões: a, b e c, conforme o item 3.3.2. Em seguida, os frutos foram colocados em um suporte metálico com o topo em

vidro transparente, o qual serviu de apoio para a câmera fotográfica. A utilização do suporte foi para que não houvesse diferenças de registros entre uma fotografia e outra, tendo-se sempre a mesma distância entre elas.

Para o cálculo das três áreas projetadas do fruto, as fotografias foram transportadas para o *software CorelDraw*, no qual cada imagem foi redimensionada para a escala do *Corel* em que o fruto correspondesse com a dimensão real, medida com o paquímetro. Logo após, foi utilizada uma ferramenta do *Corel* chamada *plug-in curva meter*, a qual contorna o objeto, calculando assim a área correspondente na unidade de medida desejada. O cálculo das áreas foi realizado para todos os frutos, em todos os ensaios, imediatamente antes de proceder aos ensaios hidrodinâmicos. As Figuras 3.5 a 3.7, correspondem às três áreas projetadas do fruto no estágio de maturação 3, nas três direções mutuamente perpendiculares respectivamente.



Figura 3.5 – Cálculo da área projetada 1, do tomate 1 tipo 2.



Figura 3.6 – Cálculo da área projetada 2, do tomate 1 tipo 2.



Figura 3.7 – Cálculo da área projetada 3, do tomate 1 tipo 2.

Para o cálculo da área projetada dos modelos esféricos, utilizou-se a equação 49:

$$A_p = \frac{\pi D_p^2}{4} \quad (49)$$

Em que:

D_p → diâmetro da partícula, ou diâmetro da esfera equivalente dado pela equação 46.

3.3.7 Área critério ou área projetada média

A área critério A_c (m^2), ou área projetada média, corresponde à média aritmética das três áreas projetadas da fruta obtidas conforme item 3.3.6:

$$A_c = \frac{(A1+A2+A3)}{3} \quad (50)$$

Para o cálculo da área projetada média, também foram utilizadas as fotografias dos frutos em escala, utilizando o *software CorelDraw*.

3.3.8 Área superficial

A área superficial da fruta foi calculada pela área projetada da casca da fruta, segundo Duarte et al. (2006). A metodologia consistiu em se fazer uma falsa casca para a fruta, utilizando técnicas de papel machê, e depois recortando essa casca em pedaços de tamanho suficiente para eliminar o efeito côncavo. Esses recortes foram digitalizados juntamente com um retângulo de papel de dimensões conhecidas, este último para que fosse possível corrigir possíveis distorções da imagem. De posse das imagens digitalizadas, utilizou-se as ferramentas do *software CorelDraw* para medir as áreas. A área superficial de cada fruto foi obtida pela soma de todas as áreas dos recortes, com a correção das distorções e aplicação do fator de escala. Essas determinações foram feitas para todos os frutos submetidos aos ensaios de transporte.

3.3.9 Esfericidade

A esfericidade da fruta foi obtida conforme a equação 51, dada por Mohsenin (1986):

$$\begin{aligned} \phi &= \left(\frac{\text{volume da fruta}}{\text{volume da menor esfera circunscrita}} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\left(\frac{\pi}{6}\right) a b c}{\left(\frac{\pi}{6}\right) a^3} \right)^{\frac{1}{3}} \\ \Rightarrow \phi &= \left(\frac{\text{média geométrica dos diâmetros}}{\text{maior diâmetro}} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{(a b c)^{\frac{1}{3}}}{a} \end{aligned} \quad (51)$$

Em que a, b e c são as três maiores dimensões da fruta em direções mutuamente perpendiculares, obtidas no item 3.3.2, apresentadas anteriormente.

3.3.10 Firmeza

As análises de firmeza foram realizadas com os frutos inteiros *in natura* nos cinco estádios de maturação. Os frutos eram lavados, secos e, em seguida, era retirada uma parte pequena da película da casca. As amostras foram fixadas sobre a base do equipamento, depois foi aplicada uma força perpendicular por meio da sonda cilíndrica na superfície das amostras, conforme a Figura 3.8. Foi determinada a firmeza dos frutos usando o texturômetro modelo TA-XT plus - Textura Analyzer do fabricante *Stable Micro Systems*.



Figura 3.8 - Texturômetro modelo TA-XT plus utilizado para determinação da firmeza

Os ensaios foram realizados com o probe P/2 de haste cilíndrica de aço inoxidável com diâmetro de 2 mm, ajustada para perfurar até 50% da amostra, uma distância de retorno de 20 mm e velocidade de retorno de $2,0 \text{ mm.s}^{-1}$. As medições do teste foram realizadas no centro de cada amostra, obtendo-se, assim, um valor da força máxima de penetração.

3.3.11 Análise Estatística

Para a análise dos resultados das características físicas foi utilizado o programa ASSISTAT versão 7.7 (SILVA e AZEVEDO, 2002). Foram realizadas a análise de variância e a comparação entre as médias dos tratamentos aplicando-se o teste de Tukey ao nível de 1 e 5% de probabilidade.

3.4 Parâmetros hidrodinâmicos de transporte em ascensão livre

Foram estudados os parâmetros hidrodinâmicos relacionados ao transporte hidráulico experimental, tais como: orientação do fruto no fluido, a velocidade terminal da partícula, o coeficiente de arraste, número de Reynolds, orientação durante transporte e efeito de parede, como também a velocidade terminal e o coeficiente de arraste teórico dos frutos submetidos ao transporte.

Para o estudo do efeito da forma, foram confeccionados modelos esféricos com o diâmetro médio dos frutos, com 1 cm maior e 1 cm menor, ambos com a mesma massa específica, em que foi calculada a velocidade terminal e coeficiente de arraste utilizando correlações estabelecidas por diversos autores, segundo métodos para partículas esféricas.

3.4.1 Orientação do fruto no fluido

Para medir a orientação do fruto no fluido, a fruta foi colocada em um reservatório de vidro transparente contendo água (Figura 3.9), foi estabelecido uma linha horizontal alinhada com a superfície da água e outra linha passando o pedúnculo e o eixo mediano do tomate. Com auxílio do *software CorelDraw*, foi determinado o ângulo entre as referidas linhas. Para fins de comparação, foram convertidos todos os ângulos para o intervalo de 0 a 90°.



Figura 3.9 – Foto da área superficial submersa e do ângulo em relação à superfície da água da amostra 1, do tomate tipo 1 (Caqui) no estágio maduro.

3.4.2 Velocidade terminal e coeficiente de arraste experimental

Para o cálculo do coeficiente de arraste (C_D) experimental dos frutos e dos modelos esféricos confeccionados para o estudo da forma, utilizou-se a equação 52:

$$C_D = \frac{2m g(\rho_f - \rho_P)}{V_t^2 A_P \rho_P \rho_f} \quad (52)$$

Sendo:

V_t → velocidade terminal experimental da partícula, $m.s^{-1}$;

m → massa da partícula, kg;

g → aceleração da gravidade, $m.s^{-2}$;

A_p → área projetada da esfera, m^2 ;

ρ_p ; ρ_f → massa específica da partícula sólida e do fluido, respectivamente, $kg.m^{-3}$;

O número de Reynolds, Re , foi definido pela equação 53:

$$R_e = \frac{V_t D_p \rho}{\mu} \quad (53)$$

Sendo:

R_e → número de Reynolds, adimensional

V_t → velocidade terminal experimental da partícula, $m.s^{-1}$

D_p → diâmetro da partícula dado pela esfera equivalente, m

ρ → massa específica do fluido, $kg.m^{-3}$

μ → viscosidade dinâmica do fluido, $kg.m^{-1}.s^{-1}$.

Para o cálculo da velocidade terminal (V_t) experimental, foi construído um equipamento conforme Figura 3.10, descrito no item 3.4.2.1.

3.4.2.1 Equipamento

1 - Reservatório de observação do transporte – constituído de uma coluna de vidro com seção transversal quadrada medindo (0,38 x 0,38 m) e 1,5 m de profundidade, com marcações feitas de 10 em 10 cm;

2 - Visor de identificação do fruto – constituído de material acrílico, identifica o tipo de fruto e sua numeração no ensaio de transporte;

3 - Válvula de retenção – consiste em uma torneira de material plástico para fechamento da passagem da água do reservatório de observação para o reservatório de armazenagem;

4 - Bancada de apoio – feita em material metálico, serve de apoio tanto para a coluna de vidro do reservatório de observação do transporte, como para o encaixe do reservatório de armazenamento da fruta;

5 - Reservatório de armazenagem da fruta – consiste em um conjunto composto de uma haste de liberação, a qual é responsável pela liberação da fruta; de um tubo de armazenagem, feito em PVC com 0,1 m de diâmetro, para o caso em que a fruta apresente velocidade ascendente (massa específica menor que 1,0); esse tubo possui uma rosca a qual permite o reabastecimento das frutas, em cada teste; e de uma caixa de armazenagem secundária, composta de material acrílico, a qual, após a liberação da fruta do tubo de PVC, permite que a mesma fique aguardando uma fruta por vez, uma nova liberação feita pela haste para que ela possa ser liberada para o reservatório de transporte;

6 - Torneira para esvaziamento do reservatório – feita em material PVC, permite o esvaziamento da água, contido na caixa de acrílico, para a possível remoção do tubo de armazenamento para o reabastecimento dos frutos para o transporte.

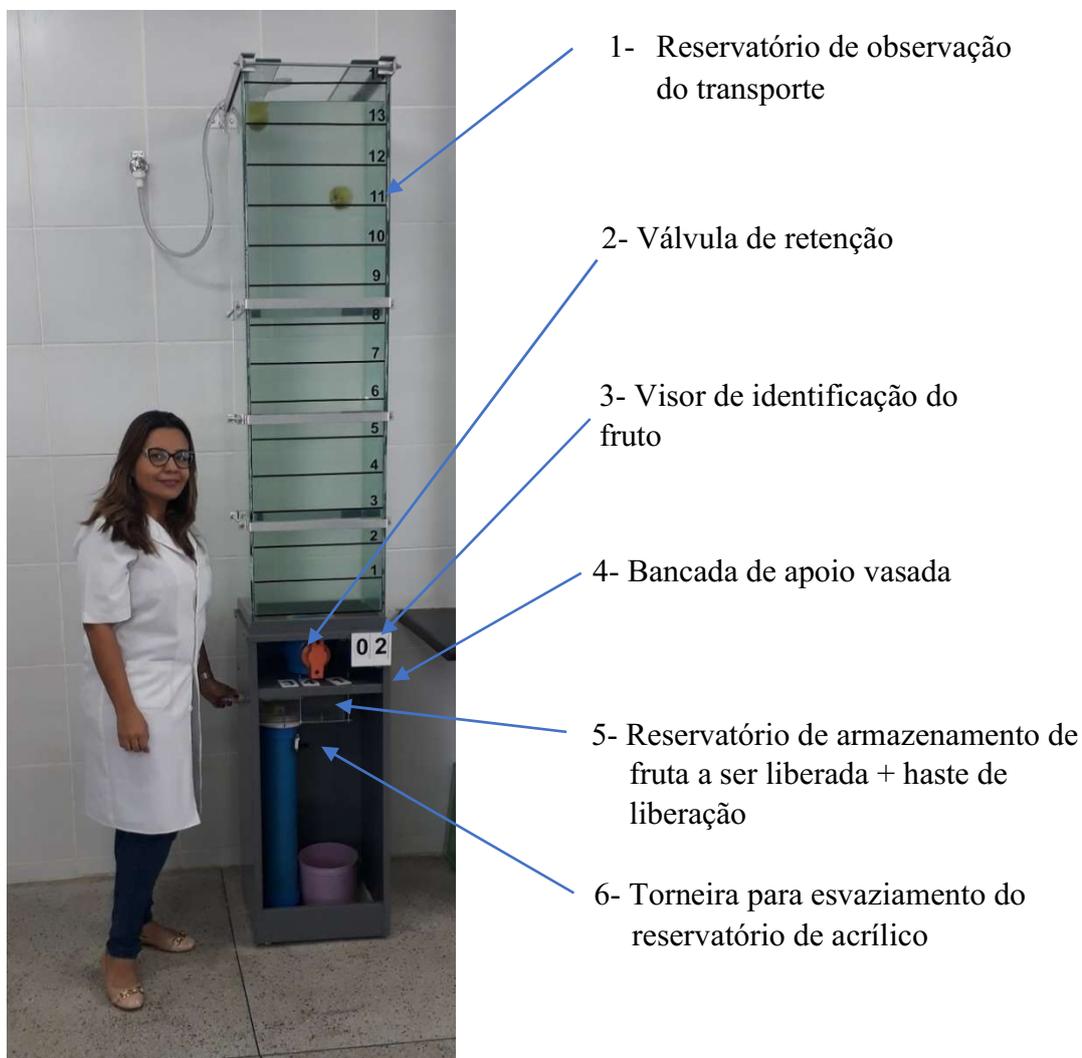


Figura 3.10 – Equipamento construído para determinação da velocidade terminal da fruta

3.4.2.2 Procedimento experimental

Para determinação da velocidade terminal experimental, em água, foi utilizado um equipamento construído conforme Figura 3.10. No ensaio, foram utilizados 50 tomates em cinco estádios de maturação diferentes do verde ao maduro, sendo 25 da variedade Caqui (tipo 1) e 25 da variedade Italiano (tipo 2).

Os ensaios foram realizados em dias alternados, de acordo com o estádio de maturação dos frutos. Como a massa específica dos tomates apresentaram valores

inferiores ao valor da massa específica da água, observou-se que a velocidade dos frutos seria ascendente.

Inicialmente, encheu-se de água a coluna de vidro do reservatório de observação de transporte (1) até a marcação de número 13. Logo após, identificou-se o tipo de fruto, bem como a sua numeração no visor de identificação (2). Em seguida, os frutos foram introduzidos no reservatório de armazenamento cilíndrico, em que seu volume foi completado com água (5), e, através da haste de liberação para controlar a saída das frutas, era liberado um de cada vez, passando pela caixa de armazenamento em acrílico, os quais eram enviados até o reservatório de observação de transporte. Como todos os frutos possuíram velocidade ascendente em todos os estádios de maturação, após cada ensaio, eles eram retirados da parte superior da coluna de vidro para a liberação do próximo fruto. Foram realizadas três repetições para cada fruto. No final de cada ensaio, a válvula de retenção (3) era fechada, impedindo que a água da coluna de vidro saísse, possibilitando a retirada do tubo de armazenamento para o reabastecimento dos frutos novamente. Antes disso, a água contida no reservatório de acrílico era retirada através da torneira para esvaziamento (6).

No instante em que as frutas iniciavam seu movimento, seu percurso era acompanhado por uma câmera apoiada em um suporte de filmagem, com uma altura igual à da marcação de número sete, e centralizada à frente da coluna de vidro.

A velocidade terminal dos frutos foi registrada através da análise de filmagens do experimento, utilizando uma ferramenta computacional chamada *Quick Time Player*. Esse software permite a análise da subida ou descida do fruto, quadro a quadro, observando o número de quadros registrado em cada marcação. Os quadros foram considerados a partir do início e do término de cada marcação da coluna de vidro, iniciando-se na marcação de número 1, considerando o início do surgimento do fruto, e terminando na de número 13. Após a análise do vídeo de cada ensaio, foi gerada uma tabela no *software Excel* para a conversão de quadros/segundo para deslocamento/tempo, obtendo-se a velocidade terminal dos frutos para cada estádio de maturação. Essa velocidade foi atingida após a marcação de número 6 na coluna de vidro, tanto para os frutos da variedade caqui como para os da variedade italiano.

3.4.2.3 Efeito da forma (modelos esféricos)

Com o intuito de verificar o efeito da forma e do tamanho na velocidade terminal e no arraste dos tomates, foram construídos três modelos esféricos com diferentes tamanhos e mesma massa específica dos tomates. As esferas ocas de material plástico foram confeccionadas em impressora 3 D, conforme a Figura 3.11.



Figura 3.11 – Modelos esféricos com diâmetros diferentes (A, B e C) e mesma massa específica média dos tomates.

Para que as esferas ficassem com a mesma massa específica dos tomates, preencheu-se com farinha de mandioca, fechou-se o orifício de preenchimento e, em seguida, com o auxílio de uma seringa com agulha, foi-se injetando água até que a relação massa/volume fosse igual à massa específica dos tomates. Os orifícios foram fechados com cola adesiva e as esferas pintadas com esmalte sintético. A pintura foi para que a superfície ficasse o mais semelhante possível à casca do tomate.

Foram testados alguns materiais para o preenchimento dos modelos, mas optou-se pela farinha, por a mesma possuir baixa massa específica e apresentar a propriedade de absorver com facilidade e uniformidade a água injetada, se expandindo, não deixando vácuo, sem permitir regiões preferenciais de repouso na água.

Os tamanhos dos modelos esféricos foram decididos da seguinte forma: o primeiro teria o diâmetro médio dos tomates ($B = 0,065$ m), ou seja, seria uma esfera de mesmo volume que o volume médio dos tomates; o segundo teria um diâmetro $0,010$ m maior ($C = 0,075$ m); e o outro com diâmetro de $0,010$ m menor ($A = 0,055$ m), e todas com a

mesma massa específica média dos tomates. Após serem pesadas e seus diâmetros conferidos com o auxílio do paquímetro, os modelos esféricos foram lançados no compartimento inferior do equipamento de velocidade terminal, no qual foi realizada a filmagem de todas as repetições em triplicata. As velocidades experimentais foram obtidas conforme item 3.4.2.2.

3.4.3 Velocidade terminal e coeficiente de arraste calculados para corpos esféricos

Para o cálculo da velocidade terminal de modelos esféricos em qualquer regime de escoamento, de acordo com Braga (1997), utilizou-se a equação geral dada pela equação 54:

$$V_t = \left(\frac{4}{3} g \frac{D_p (\rho_f - \rho_p)}{C_D \rho_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (54)$$

Em que:

V_t → velocidade terminal da partícula, m.s⁻¹;

g → aceleração da gravidade, m.s⁻²;

D_p → diâmetro da partícula, ou diâmetro da esfera equivalente, m;

ρ_p ; ρ_f → massa específica da partícula sólida e do fluido, respectivamente, kg.m⁻³;

C_D → coeficiente de arrasto.

Também foram calculados a velocidade terminal e o coeficiente de arraste para os modelos esféricos utilizando-se as metodologias abaixo descritas, segundo correlações existentes na literatura para partículas esféricas, considerando-se os valores de R_e experimentais.

3.4.3.1 Método 1

Neste método utilizou-se, para determinar a velocidade terminal (V_{t1}), a equação geral (Equação 54), fazendo uso da média dos diâmetros calculados da esfera equivalente (Equação 46). Baseado na curva clássica de Vennard (1961) (Figura 2.8), observou-se a região em que os modelos se encontraram, com os valores do R_e experimental. Com base

nesses dados, adotou-se o $C_{D1} = 044$ por se apresentar na região turbulenta (região de Newton).

3.4.3.2 Método 2

Neste método utilizou-se, para determinar a velocidade terminal (V_{t2}), a Equação 54, e, para o cálculo do C_{D2} , a equação de Abraham (1970):

$$C_{D2} = 0,30 \left(1 + \frac{8,65}{Re^{1/2}} \right)^2 \quad (55)$$

3.4.3.3 Método 3

Neste método utilizou-se, para determinar a velocidade terminal (V_{t3}), a Equação 54, e, para o cálculo do C_{D3} , a equação de Brauer e Sucker (1976):

$$C_{D3} = 0,49 + \frac{24}{Re} + \frac{3,73}{Re^{1/2}} - \frac{4,83 \times 10^{-3} Re^{1/2}}{1 + 3,0 \times 10^{-6} Re^{3/2}} \quad (56)$$

3.4.3.4 Método 4

Neste método utilizou-se, para determinar a velocidade terminal (V_{t4}), a Equação 54, e, para o cálculo do C_{D4} , a equação de Concha e Almendra (1979):

$$C_{D4} = 0,28 \left(1 + \frac{9,06}{Re^{1/2}} \right)^2 \quad (57)$$

3.4.3.5 Método 5

Neste método utilizou-se, para determinar a velocidade terminal (V_{t5}), a Equação 54, e, para o cálculo do C_{D5} , a equação de Haider e Levenspiel (1989):

$$C_{D5} = \frac{24}{Re} \left(1 + 0,1806 Re^{0,6459} \right) + \frac{0,4251 Re}{Re + 6881} \quad (58)$$

3.4.3.6 Método 6

Neste método utilizou-se a Equação 54 para determinar a velocidade terminal (V_{t6}), e, para o cálculo do C_{D6} , a equação de Coelho e Massarani (1996):

$$C_{D6} = \left[\left(\frac{24}{Re} \right)^{0,63} + 0,43^{0,63} \right]^{1/0,63} \quad (59)$$

3.4.4 Velocidade terminal e coeficiente de arraste calculados para corpos isométricos

Sabendo-se que os tomates não são esféricos, as relações obtidas para partículas esféricas foram modificadas para partículas isométricas, baseado nos dados de Pettyjohn e Christiansen (1948), em que foram estabelecidas algumas correlações entre o número de Reynolds (Re), o coeficiente de arrasto (C_D), e a esfericidade (ϕ).

Desse modo, com os valores obtidos da esfericidade dos frutos, foram calculados a velocidade terminal e o coeficiente de arraste para os tomates da variedade Caqui e Italiano, utilizando-se as metodologias abaixo descritas, segundo correlações existentes na literatura para partículas isométricas.

3.4.4.1 Método 1

Neste método utilizou-se, para determinar a velocidade terminal (V_{t1}), a Equação 54 com algumas correlações entre o coeficiente de arrasto, e a esfericidade (ϕ) segundo Pettyjohn e Christiansen (1948), resultando na Equação 60:

$$V_t = \left(\frac{4}{3} g \frac{D_p (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f K_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (60)$$

Em que:

$C_D = K_2 \rightarrow$ função da esfericidade dada por:

$$K_2 = 5,31 - 4,88 \phi \quad (61)$$

Sendo: $\phi \rightarrow$ Esfericidade dos frutos

3.4.4.2 Método 2

Neste método utilizou-se, para determinar a velocidade terminal (V_{t2}), a Equação 54, e, para o cálculo do coeficiente de arrasto (C_{D2}) e do número de Reynolds modificado (Re_M), as Equações de Concha e Barrientos (1986):

$$C_{D2} = \frac{5,42-4,75\phi}{0,67} \left[0,527 + \frac{22}{Re_M} + \frac{3,73}{Re_M^{\frac{1}{2}}} - \frac{0,0281 Re_M^{\frac{1}{2}}}{1+1,06 \times 10^{-4} Re_M^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (63)$$

$$Re_M = \left[\frac{5,42-4,75\phi}{0,795} \log_{10} \frac{\phi}{0,065} \right] Re_e \quad (64)$$

Em que:

$\phi \rightarrow$ Esfericidade

3.4.4.3 Método 3

Neste método utilizou-se, para determinar a velocidade terminal (V_{t3}), a Equação 54. Para o cálculo do coeficiente de arrasto (C_{D3}), utilizou-se as Equações de Haider e Levenspiel (1989). Para este cálculo, utilizaram-se os valores de Re_e experimentais:

$$C_{D3} = \frac{24}{Re_e} \left\{ 1 + [8,172 \exp(-4,066\phi)] Re_e^{\left(\frac{0,00964}{0,5565\phi}\right)} \right\} + \frac{73,69 Re_e \exp(-5,075\phi)}{Re_e + 5,378 \exp(6,212\phi)} \quad (65)$$

3.4.4.4 Método 4

Neste método utilizou-se, para determinar a velocidade terminal (V_{t4}), a Equação 60 segundo as correlações entre o coeficiente de arrasto e a esfericidade (ϕ) estabelecidas por Pettyjohn e Christiansen (1948). Para esse cálculo, utilizou-se o Re_e experimental, e, para o coeficiente de arrasto (C_{D4}), utilizou-se a Equação de Coelho e Massarani (1996):

$$C_{D4} = \left[\left(\frac{24}{K_1 Re_e} \right)^{0,85} + K_2^{0,85} \right]^{1/0,85} \quad (66)$$

Em que:

$$K_1 = 0,843 \log_{10} \left(\frac{\phi}{0,065} \right) \quad (67)$$

$K_2 \rightarrow$ Dada pela Equação 61

$\varphi \rightarrow$ Esfericidade

3.5 Efeito de parede

Com as médias dos diâmetros da partícula (D_p) de cada fruto da variedade Caqui e Italiano, obtidas pela Equação 46, obteve-se (β), que é a relação entre o diâmetro da partícula e a dimensão efetiva do tubo (D_t), conforme Equação 68:

$$\beta = \frac{D_p}{D_t} \quad (68)$$

Dessa forma, o efeito de parede (K_p) foi calculado para as duas variedades de tomates de acordo com os métodos abaixo descritos.

3.5.1 Método 1

Para o cálculo do efeito de parede (K_{p1}), utilizou-se a equação proposta por Massarani (1990) para situações fora do regime de Stokes em que $Re > 10^3$:

$$K_{p1} = \frac{(1-\beta^2)^{\frac{1}{2}}}{(1+\beta^4)^{\frac{1}{2}}} \quad (69)$$

3.5.2 Método 2

Com base nas correlações de Almeida (1995), obteve-se o cálculo do efeito de parede (K_{p2}), considerando $Re > 10^3$:

$$K_{p2} = 1 - \beta^{\frac{3}{2}} \quad (70)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados os resultados experimentais desta pesquisa, tanto das características físicas dos frutos, obtidos nos cinco dias de maturação, como também dos parâmetros hidrodinâmicos experimentais, tais como velocidade terminal, coeficiente de arrasto e o efeito de parede, obtidos através das filmagens, utilizando-se o equipamento construído para determinação da velocidade terminal da fruta, conforme Figura 3.10, e dos modelos esféricos confeccionados para o estudo da forma. Também serão apresentados os parâmetros hidrodinâmicos calculados por equações existentes na literatura, tanto para os tomates, utilizando correlações isométricas, como para os modelos esféricos, utilizando correlações esféricas. Por fim, pretende-se modelar a velocidade terminal e o coeficiente de arraste especificamente para tomates.

4.1 Características Físicas

4.1.1. Tomates da variedade Caqui

Os resultados das características físicas médias, obtidos experimentalmente de massa - m (kg), volume - V (m^3), massa específica real - ρ ($kg.m^{-3}$), diâmetro A - D_a (m), diâmetro B - D_b (m), diâmetro C - D_c (m) e diâmetro da partícula - D_p (m) dos tomates da variedade Caqui (oblatos), alcançados, com três repetições, nos cinco estádios de maturação, estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características físicas dos tomates da variedade Caqui, nos cinco estádios de maturação – Parte 1. ¹

	Fruto	Massa (kg)	Volume (x10 ⁻⁴ m ³)	Massa Espec. (kg.m ⁻³)	D _A (x10 ⁻² m)	D _B (x10 ⁻² m)	D _C (x10 ⁻² m)	D _p (x10 ⁻² m)
Estádio 1	1	0,1415	1,4757	959	6,74	6,65	5,87	6,41
	2	0,1379	1,4517	950	6,95	6,95	5,21	6,31
	3	0,1427	1,5060	948	6,84	6,79	5,78	6,45
	4	0,1281	1,3394	957	6,92	6,68	5,09	6,17
	5	0,1320	1,3979	944	6,55	6,49	5,38	6,12
MÉDIA	0,1364	1,4341	952	6,80	6,71	5,47	6,29	
DVP	0,0062	0,0661	6,269	0,16	0,17	0,35	0,14	
Estádio 2	1	0,1502	1,6655	902	7,14	6,90	5,79	6,58
	2	0,1550	1,6267	953	7,12	7,00	5,48	6,49
	3	0,1456	1,5402	945	7,04	6,68	5,46	6,36
	4	0,1504	1,5707	957	7,03	6,82	5,46	6,39
	5	0,1406	1,4761	952	6,95	6,62	5,54	6,34
MÉDIA	0,1484	1,5758	942	7,06	6,80	5,55	6,43	
DVP	0,0055	0,0739	22,665	0,08	0,16	0,14	0,10	
Estádio 3	1	0,1409	1,4956	942	6,89	6,78	5,40	6,32
	2	0,1336	1,4163	943	6,86	6,72	5,25	6,23
	3	0,1426	1,5264	934	6,72	6,44	5,97	6,37
	4	0,1366	1,4158	965	6,74	6,43	5,48	6,19
	5	0,1198	1,2498	958	6,73	6,24	5,02	5,95
MÉDIA	0,1347	1,4208	948	6,79	6,52	5,42	6,21	
DVP	0,0091	0,1073	12,700	0,08	0,22	0,35	0,16	
Estádio 4	1	0,1235	1,3218	934	6,43	6,48	5,31	6,05
	2	0,1285	1,3674	940	6,56	6,44	5,46	6,13
	3	0,1174	1,2182	964	6,43	6,16	5,19	5,90
	4	0,1260	1,3234	952	6,41	6,35	5,46	6,06
	5	0,1279	1,3308	961	6,48	6,32	5,47	6,07
MÉDIA	0,1247	1,3123	950	6,46	6,35	5,38	6,04	
DVP	0,0045	0,0558	13,008	0,06	0,12	0,12	0,09	
Estádio 5	1	0,1473	1,5396	956	7,34	6,93	4,96	6,32
	2	0,1445	1,5318	944	7,10	6,96	5,09	6,31
	3	0,1589	1,6838	944	6,90	6,82	5,88	6,52
	4	0,1627	1,6963	959	7,23	6,84	5,77	6,58
	5	0,1478	1,5435	957	6,92	6,60	5,54	6,32
MÉDIA	0,1522	1,5990	952	7,10	6,83	5,45	6,41	
DVP	0,0080	0,0833	7,382	0,19	0,14	0,41	0,13	

¹ Utilizou-se em todas as tabelas de propriedades físicas a potência de base 10 com expoente negativo para se evitar o acúmulo de muitas casas decimais antes da vírgula, por serem submúltiplos da unidade metro.

Na Tabela 4.2, encontram-se os resultados obtidos experimentalmente do diâmetro da esfera equivalente - D_e (m), esfericidade - ϕ , área superficial (m^2), área projetada (m^2) e teor de água (%) dos frutos da variedade Caqui nos cinco estádios de maturação.

Tabela 4.2 – Características físicas dos tomates da variedade Caqui nos cinco estádios de maturação – Parte 2.

	Fruto	Diâmetro Esf. Equiv. ($\times 10^{-2}$ m)	Esferic. (decimal)	Área superficial ($\times 10^{-2}$ m ²)	Área projetada ($\times 10^{-2}$ m ²)	Teor de água (%)
Estádio 1	1	6,56	0,95	1,4098	0,3221	94,50
	2	6,52	0,91	1,4208	0,3107	94,14
	3	6,60	0,94	1,4339	0,3283	94,16
	4	6,35	0,89	1,3676	0,3052	94,11
	5	6,44	0,93	1,3754	0,3059	94,36
	MÉDIA	6,49	0,92	1,4015	0,3144	94,25
	DESV. PAD.	0,10	0,024	0,0288	0,0103	0,17
Estádio 2	1	6,83	0,92	1,5195	0,3602	94,44
	2	6,77	0,91	1,5094	0,3502	94,48
	3	6,65	0,90	1,4332	0,3137	94,50
	4	6,69	0,91	1,4713	0,3261	94,48
	5	6,56	0,91	1,4115	0,2922	94,38
	MÉDIA	6,70	0,91	1,4690	0,3285	94,46
	DESV. PAD.	0,10	0,007	0,0468	0,0275	0,05
Estádio 3	1	6,59	0,92	1,3810	0,3261	94,44
	2	6,47	0,91	1,3303	0,3080	94,81
	3	6,63	0,95	1,3847	0,3250	94,28
	4	6,47	0,92	1,3297	0,3283	94,70
	5	6,20	0,88	1,2376	0,2872	94,50
	MÉDIA	6,47	0,92	1,3327	0,3149	94,55
	DESV. PAD.	0,17	0,025	0,0594	0,0175	0,21
Estádio 4	1	6,32	0,94	1,3164	0,2960	94,85
	2	6,39	0,93	1,2785	0,3053	94,38
	3	6,15	0,92	1,2018	0,2843	94,67
	4	6,32	0,94	1,2317	0,2948	94,76
	5	6,33	0,94	1,2653	0,2973	94,80
	MÉDIA	6,30	0,93	1,2587	0,2955	94,69
	DESV. PAD.	0,09	0,009	0,0440	0,0075	0,19
Estádio 5	1	6,65	0,86	1,4190	0,3383	95,13
	2	6,64	0,89	1,4141	0,3260	95,39
	3	6,85	0,94	1,5020	0,3570	95,26
	4	6,87	0,91	1,5014	0,3543	95,16
	5	6,66	0,91	1,3971	0,3313	95,26
	MÉDIA	6,73	0,90	1,4467	0,3414	95,24
	DESV. PAD.	0,12	0,029	0,0508	0,0138	0,10

Na Tabela 4.3 encontram-se a análise estatística dos valores médios das características físicas (massa, volume, diâmetro da partícula, diâmetro da esfera equivalente, diâmetro A, diâmetro B, diâmetro C, área projetada, área superficial e teor de água) dos tomates da variedade Caqui nos cinco estádios de maturação, utilizando-se o *software Assistat*, as quais apresentaram efeito significativo em nível de 1% de probabilidade, segundo o teste de Tukey, nos tomates estudados. Já os parâmetros (massa específica e esfericidade) não apresentaram efeito significativo. A análise de variância dessas variáveis encontra-se no Apêndice A (Tabelas A1 – A12).

Tabela 4.3 – Valores médios das características físicas dos tomates da variedade Caqui nos cinco estádios de maturação segundo análise estatística.

Estádio de maturação	Massa (Kg)	Volume (10 ⁻⁴) m	DP (10 ⁻²) m	Diâm. Esf. eq. (10 ⁻²) m	D _A (x10 ⁻²) m	D _B (x10 ⁻²) m	D _C (x10 ⁻²) m	Área projet. (10 ⁻²) m	Área superfic. (10 ⁻²) m	Teor de água (% bu)	Massa espec. (kg.m ⁻³)	Esfer. (Adim.)
1	0.1365 bc	1.4341 bc	6.2920 a	6.4940 bc	6.8000 b	6.7120 a	5.4660 b	0.3144 ab	1.4015 ab	94.254 c	951.600 a	0.9240 a
2	0.1484 ab	1.5758 ab	6.4320 a	6.7000 ab	7.0560 a	6.8040 a	5.5460 b	0.3285 a	1.4689 a	94.456 c	941.800 a	0.9100 a
3	0.1347 c	1.4198 c	6.2120 ab	6.4720 c	6.7880 b	6.5220 ab	5.4240 b	0.3149 ab	1.3326bc	94.540 bc	948.400 a	0.9160 a
4	0.1247 c	1.3123 c	6.0420 b	6.3020 c	6.4620 c	6.3500 b	5.3780 b	0.2955 b	1.2587 c	94.692 b	950.200 a	0.9340 a
5	0.1523 a	1.5990 a	6.4100 a	6.7340 a	7.0980 a	6.8300 a	6.4100 a	0.3414 a	1.4467 a	95.240 a	952.000 a	0.9020 a
DMS	0.0130	0.1503	0.2424	0.2253	0.2381	0.3163	0.4604	0.0319	0.0892	0.294	25.9715	0.0399
CV (%)	4.93	5.40	2.04	1.82	1.84	2.51	4.30	5.27	3.40	0.16	1.44	2.29
MG	0.1393	1.4682	6.2776	6.5404	6.8408	6.6436	5.6448	0.3189	1.3817	94.637	948.800	0.9172
F calculado	13.0859	11.2372	7.7580	11.2092	20.6435	7.4638	15.8406	5.2173	16.8088	28.762	0.461	1.7330
	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	Ns

DMS - Desvio Médio Significativo; CV - Coeficiente de variação; MG – Média; F cal. - F Calculado
 As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Analisando-se os dados contidos nas Tabelas 4.1 a 4.3, observa-se que:

A massa dos tomates da variedade Caqui nos cinco estádios de maturação foi em média 0,1392 kg. Esses valores não diferem muito do tomate da mesma variedade, segundo Camargo (1992), que apresentou peso médio de 0,140 kg, e da média dos frutos do híbrido 'SM-16' de 0,1158 kg e do híbrido 'Mariana' com 0,1078 kg, segundo Ferreira et al (2012).

O volume dos tomates foi em média $1,468 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, não distante dos valores obtidos por Lino et al. (2012), que encontrou valores de volume de tomates redondos da variedade Andrea de $1,341 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Os valores de massa específica dos tomates nos cinco estádios de maturação apresentaram um valor médio de 949 kg.m^{-3} , não distante dos valores obtidos por Raupp et al. (2009) de 940, 966 e 992 kg.m^{-3} para os tomates da variedade Debora Plus, Santa Cruz e Delícia, respectivamente.

Observando-se os diâmetros (D_A , D_B e D_C) dos tomates Caqui, encontrou-se um diâmetro médio da partícula em torno de $6,28 \times 10^{-2} \text{ m}$ e da esfera equivalente de $6,53 \times 10^{-2} \text{ m}$. Segundo Flori (1993), em um estudo sobre essas características em tomate salada, observou-se 6% de frutos com diâmetro maior que $10,5 \times 10^{-2} \text{ m}$ e 39% de diâmetro de $(9,0-10,5) \times 10^{-2} \text{ m}$. Vilas Boas et al. (1999), ao estudarem o comportamento de híbridos de tomate multilocular em quatro estádios de maturação, encontraram valor médio para o diâmetro transversal dos frutos de $7,37 \times 10^{-2} \text{ m}$, e o híbrido 'SM- 16' sobressaiu-se, quanto ao diâmetro transversal dos frutos, em todos os estádios de maturação, com média de $5,66 \times 10^{-2} \text{ m}$, enquanto o híbrido 'Mariana' apresentou valor médio de $5,02 \times 10^{-2} \text{ m}$.

Já Ferreira et al. (2012) não observaram diferença no diâmetro transversal dos frutos entre os estádios de maturação para o híbrido 'Mariana', porém para o híbrido 'SM-16' houve incremento no diâmetro transversal entre os estádios 2 e 3 de maturação, atingindo-se o limite máximo de $5,90 \times 10^{-2} \text{ m}$.

Os valores de esfericidade dos frutos nos cinco estádios de maturação foram em média de 0,92. Lourenço e Finzer (2013), em um estudo de secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo, observaram que a esfericidade do tomate variou do valor unitário (início da secagem) para 0,53 ao final da secagem.

O teor de água teve média de 94,65 (%). Camargo (2000), em um estudo feito com tomates da mesma variedade, encontrou um teor de água de 93 a 94%. Lourenço e Finzer (2013) encontrou um teor de água inicial dos frutos de tomate-cereja *in natura* de 94,01% (bu). Em relação à área superficial, a média foi em torno de $1,376 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, e a área projetada média de $0,318 \times 10^{-2} \text{ m}^2$.

Em relação ao desvio padrão, em todas as variáveis foram apresentados valores muito baixos, mostrando que os valores estão próximos das médias calculadas, apresentando homogeneidade das características físicas durante a maturação.

4.1.2. Tomates da variedade Italiano

Os resultados das características físicas médias, obtidos experimentalmente de massa - m (kg), volume - V (m^3), massa específica real - ρ ($kg.m^{-3}$), diâmetro A - D_a (m), diâmetro B - D_b (m), diâmetro C - D_c (m) e diâmetro da partícula - D_p (m) dos tomates da variedade italiano (tipo 2), alcançados, com três repetições, nos cinco estádios de maturação, estão expostos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Características físicas dos tomates da variedade Italiano nos cinco estádios de maturação – Parte 1.

	Fruto	Massa (kg)	Volume ($\times 10^{-4} \text{ m}^3$)	Massa Espec. ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	D _A ($\times 10^{-2} \text{ m}$)	D _B ($\times 10^{-2} \text{ m}$)	D _C ($\times 10^{-2} \text{ m}$)	D _p ($\times 10^{-2} \text{ m}$)
Estádio 1	1	0,1187	1,2906	920	7,57	5,28	5,51	6,04
	2	0,1201	1,3125	915	7,92	5,22	5,51	6,11
	3	0,1295	1,3909	931	8,32	5,35	5,47	6,24
	4	0,1255	1,3688	917	7,98	5,36	5,62	6,22
	5	0,1288	1,3806	933	8,18	5,30	5,56	6,22
	MÉDIA	0,1245	1,3487	923	7,99	5,30	5,53	6,36
	DVP	0,0049	0,0444	8,258	0,29	0,06	0,06	0,07
Estádio 2	1	0,1469	1,6095	913	8,53	6,14	6,06	6,82
	2	0,1611	1,7391	926	8,86	6,04	6,17	6,91
	3	0,1363	1,5196	897	8,29	5,68	5,75	6,47
	4	0,1346	1,4587	923	7,88	5,67	5,85	6,39
	5	0,1347	1,5163	888	8,44	5,54	5,65	6,42
	MÉDIA	0,1427	1,5686	909	8,40	5,81	5,90	6,69
	DVP	0,0115	0,1095	16,471	0,36	0,26	0,22	0,16
Estádio 3	1	0,1460	1,6537	883	8,35	5,76	5,96	6,59
	2	0,1557	1,7384	896	8,13	6,14	6,09	6,72
	3	0,1413	1,6063	880	8,34	5,71	5,92	6,56
	4	0,1566	1,7589	890	8,56	5,77	6,19	6,74
	5	0,1504	1,6890	890	8,02	6,10	6,18	6,71
	MÉDIA	0,1500	1,6893	888	8,28	5,90	6,07	6,86
	DVP	0,0065	0,0621	6,340	0,21	0,21	0,12	0,08
Estádio 4	1	0,1274	1,4008	910	8,35	5,63	5,32	6,30
	2	0,1382	1,5780	876	8,03	6,12	5,67	6,53
	3	0,1660	1,8320	906	8,24	6,43	6,13	6,87
	4	0,1507	1,7081	882	8,77	6,02	5,54	6,64
	5	0,1599	1,7660	905	8,63	6,09	6,08	6,84
	MÉDIA	0,1484	1,6570	896	8,40	6,06	5,75	6,81
	DVP	0,0158	0,1710	15,595	0,30	0,29	0,35	0,24
Estádio 5	1	0,1485	1,5300	970	8,12	5,43	5,64	6,29
	2	0,1435	1,4929	961	7,72	5,58	5,59	6,22
	3	0,1316	1,3751	957	7,63	5,43	5,78	6,21
	4	0,1315	1,3649	963	7,59	5,38	5,76	6,17
	5	0,1662	1,7349	958	8,13	6,03	6,40	6,80
	MÉDIA	0,1443	1,4996	962	7,84	5,57	5,83	6,59
	DVP	0,0143	0,1500	5,167	0,27	0,27	0,33	0,22

Na Tabela 4.5, encontram-se os resultados obtidos experimentalmente do diâmetro da esfera equivalente – D_e (m), esfericidade - ϕ (adimensional), área superficial

(m²), área projetada (m²) e teor de água (%) dos tomates da variedade italiano nos cinco estádios de maturação.

Tabela 4.5 – Características físicas dos tomates da variedade Italiano nos 5 estádios de maturação – Parte 2.

	Fruto	Diâmetro Esf. Equiv. (x10 ⁻² m)	Esferic. (decimal)	Área superficial (x10 ⁻² m ²)	Área projetada (x10 ⁻² m ²)	Teor de água (%)
Estádio 1	1	6,56	0,95	1,3064	0,3044	94,50
	2	6,52	0,91	1,3229	0,3096	94,14
	3	6,60	0,94	1,3772	0,3114	94,16
	4	6,35	0,89	1,3495	0,3128	94,11
	5	6,44	0,93	1,3309	0,3168	94,36
	MÉDIA	6,49	0,92	1,4015	0,3110	94,25
	DESV. PAD.	0,10	0,024	0,0288	0,0045	0,17
Estádio 2	1	6,83	0,92	1,4847	0,3594	94,44
	2	6,77	0,91	1,5894	0,3707	94,48
	3	6,65	0,90	1,4414	0,3304	94,50
	4	6,69	0,91	1,3866	0,3335	94,48
	5	6,56	0,91	1,4676	0,3420	94,38
	MÉDIA	6,70	0,91	1,4690	0,3472	94,46
	DESV. PAD.	0,10	0,007	0,0468	0,0173	0,05
Estádio 3	1	6,59	0,92	1,4700	0,3562	94,44
	2	6,47	0,91	1,5306	0,3614	94,81
	3	6,63	0,95	1,4505	0,3538	94,28
	4	6,47	0,92	1,5575	0,3765	94,70
	5	6,20	0,88	1,5066	0,3569	94,50
	MÉDIA	6,47	0,92	1,3327	0,3610	94,55
	DESV. PAD.	0,17	0,025	0,0594	0,0091	0,21
Estádio 4	1	6,32	0,94	1,3367	0,3261	94,85
	2	6,39	0,93	1,4321	0,3483	94,38
	3	6,15	0,92	1,5741	0,3942	94,67
	4	6,32	0,94	1,5120	0,3703	94,76
	5	6,33	0,94	1,5398	0,3750	94,80
	MÉDIA	6,30	0,93	1,2587	0,3628	94,69
	DESV. PAD.	0,09	0,009	0,0440	0,0262	0,19
Estádio 5	1	6,65	0,86	1,4111	0,3356	95,13
	2	6,64	0,89	1,3768	0,3240	95,39
	3	6,85	0,94	1,3162	0,3119	95,26
	4	6,87	0,91	1,3092	0,3061	95,16
	5	6,66	0,91	1,5481	0,3649	95,26
	MÉDIA	6,73	0,90	1,4467	0,3285	95,24
	DESV. PAD.	0,12	0,029	0,0508	0,0233	0,10

Na Tabela 4.6 encontram-se os valores médios das características físicas dos tomates da variedade italiano nos cinco estádios de maturação obtidos através da análise estatística utilizando-se o *software Assistat*, em que as características (massa, diâmetro A e diâmetro C) apresentaram efeito significativo em nível de 5% de probabilidade segundo o teste Tukey, enquanto que (massa específica, volume, diâmetro B, teor de água, área projetada e área superficial, diâmetro da esfera equivalente e diâmetro da partícula) apresentaram efeito significativo em nível de 1% de probabilidade nos tomates estudados. Já a esfericidade não apresentou efeito significativo. A análise de variância dessas variáveis encontra-se no Apêndice A (Tabelas A13 – A24).

Tabela 4.6 – Valores médios das características físicas dos tomates da variedade italiano nos cinco estádios de maturação segundo análise estatística

Estádio de maturação	Massa (Kg)	Diâm.A (10 ⁻²) m	Diâm. C (10 ⁻²) m	Massa espec. (kg.m ⁻³)	Volume (10 ⁻⁴) m	Diâm. B (10 ⁻²) m	Teor de água (% bu)	Área projet. (10 ⁻²) m	Área superfic. (10 ⁻²) m	Diâm. Esf. eq. (10 ⁻²) m	DP (10 ⁻²) m	Esferic. (Adim.)
1	0.1245 b	7.9940 ab	5.5340 b	923.200 b	1.3487 b	5.3020 c	95.1880 b	0.3110 c	1.3374 b	6.3620 b	6.1660 b	0.7720 a
2	0.1427 ab	8.2800 ab	5.8960 ab	909.400 bc	1.5686 ab	5.8140 ab	95.3040 b	0.3472 ab	1.4739 ab	6.6900 a	6.6020 a	0.7860 a
3	0.1500 a	8.4040 a	6.0680 a	887.800 c	1.6893 a	5.8960 ab	95.3400 b	0.3610 ab	1.5030 a	6.8560 a	6.6640 a	0.8080 a
4	0.1484 a	8.4040 a	5.7480 ab	895.800 c	1.6570 a	6.0580 a	95.4140 b	0.3628 a	1.4789 a	6.8060 a	6.6360 a	0.7880 a
5	0.1443 ab	7.8380 b	5.8340 ab	961.800 a	1.4996 ab	5.5700 bc	95.9580 a	0.3285 bc	1.3923 ab	6.5860 ab	6.3380 ab	0.8080 a
DMS	0.0216	0.5186	0.4597	21.6132	0.2236	0.4384	0.2901	0.0343	0.1384	0.3188	0.3769	0.0473
CV (%)	8.04	3.34	4.17	1.24	7.60	4.04	0.16	5.28	5.08	2.52	3.07	3.15
MG	0.1420	8.1840	5.81600	915.6000	1.5526	5.7280	95.4408	0.3421	1.4371	6.6600	6.4812	0.7924
F calculado	3.9947	4.3748	3.2837	32.6693	6.6693	8.2077	19.2840	7.5053	4.5539	6.8492	6.0681	1.9357
	*	*	*	**	**	**	**	**	**	**	**	ns

DMS - Desvio Médio Significativo; CV - Coeficiente de variação; MG – Média; F cal. - F Calculado
 As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Analisando os dados contidos nas Tabelas 4.4 a 4.6 referente aos tomates da variedade italiano nos cinco estádios de maturação, observa-se que a massa dos tomates foi em média igual a 0,1419 kg e o volume foi em média $1,552 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Os dados concordam com os de Raupp et al. (2009), que encontrou valores de massa de 0,119 kg para tomates italiano e $1,26 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ para volume. Esses valores estão próximos dos obtidos por Machado (2002), que obteve valores de massa médio para tomates da variedade italiano Heinz 9780 e Kátia, de 0,1184 e 0,1134 kg respectivamente. Já Lino et al. (2012) encontraram valores de volume do tomate oblongo da variedade Carmem de $0,506 \times 10^{-4} \text{ m}^3$.

Os tomates apresentaram um valor médio de massa específica de 916 kg.m^{-3} , não distante dos valores obtidos por Raupp et al. (2009) de 940 kg. m^{-3} para o tomate da variedade italiano.

Braga (1997) encontrou, para laranjas valência, uma densidade média de 941 kg/m^3 em uma pesquisa sobre transporte hidráulico de laranjas. Da mesma forma, Silva (1999), em um estudo sobre a velocidade terminal em água de frutas, encontrou massa específica real média de 1120, 1070, 980 e 1130 kg. m^{-3} , respectivamente para ameixa, goiaba, maçã e umbu. Gonzaga (2006), em um estudo sobre parâmetros hidrodinâmicos de vegetais fatiados, encontrou a massa específica real para chuchu, batata e cenoura, de 1007, 1073 e $1006 \text{ (kg.m}^3)$, respectivamente.

Observando-se os diâmetros A, B e C dos tomates, encontrou-se um diâmetro médio da partícula em torno de $6,48 \times 10^{-2} \text{ m}$, e da esfera, equivalente a $6,66 \times 10^{-2} \text{ m}$. Esses dados concordam com os de Almeida et al. (2011) em um estudo sobre características físicas de tomates em diferentes estádios de maturação, no qual foi observado que não ocorreram diferenças significativas entre os diâmetros médios dos frutos nos diferentes estádios de maturação estudados, uma vez que os maiores diâmetros médios foram, respectivamente, expressos pelos valores dos frutos verde e maduro, de $(5,56 \text{ e } 5,55) \times 10^{-2} \text{ m}$, sendo a menor média representada pelo diâmetro dos frutos em estádio de maturação braeker, $5,52 \times 10^{-2} \text{ m}$.

A esfericidade foi em média de 0,79. Em um estudo sobre as propriedades termo físicas de manga *tommy atkins* durante armazenagem refrigerada, André (2015) encontrou valores de esfericidade de $0,85 \pm 0,060$.

Em relação a área superficial, a média foi em torno de $0,143 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, e a área projetada média de $0,342 \times 10^{-2} \text{ m}^2$.

O teor de água com média de 95,43%. Esses valores não diferem de Monteiro et al. (2008), com tomates tipo italiano, obtendo 95,88% de teor de água para tomates sem sementes e casca e 85,09% com sementes e casca.

Sabe-se que as características físicas que influenciam no comportamento hidrodinâmico da fruta são o tamanho, a forma e a massa específica. Como as frutas analisadas em cada estágio não foram as mesmas, não foi possível verificar a ocorrência de variações de tamanho e forma, pois, mesmo tendo-se adotado escolha criteriosa de tomates com forma e tamanho mais semelhantes possíveis, esses frutos tinham dimensões diferentes.

As pequenas alterações nas características físicas, que possivelmente ocorreram durante a maturação, não foram percebidas pela análise estatística, mesmo a maturidade das frutas só foi melhor percebida apenas pela cor da superfície e pelos ensaios de textura, que também foi medida em termos de firmeza e consistência.

4.1.3 Firmeza dos tomates da variedade caqui e italiano

Assim, como não houve alterações significativas nas características físicas dos frutos das duas variedades de tomates, decidiu-se obter a firmeza dos frutos, nos cinco estádios de maturação, para os tomates das duas variedades. Obteve-se para os tomates da variedade caqui, nos estádios de maturação, respectivamente, os seguintes valores de firmeza: 5,85; 5,04; 4,27; 3,45 e 2,91 N. Enquanto para os tomates da variedade italiano, estes valores foram, respectivamente, 5,24; 4,32; 3,82; 3,48 e 2,09 N. Os valores da análise estatística das duas variedades de tomates encontram-se no Apêndice A (Tabelas A25 e A26).

Diante dos dados obtidos, observou-se que houve um decréscimo nos valores de força para a perfuração do fruto do estágio verde ao maduro, ocasionado pelo amadurecimento dos mesmos. Ferreira et al. (2012) ao estudarem a caracterização física e química de híbridos de tomate em diferentes estádios de maturação, também encontraram redução nos valores de firmeza para os frutos de tomate híbrido ‘Maraiana’ variando de 13,23N no estágio verde para 12,88 N no estágio maduro, e no tomate híbrido ‘MS-16’, os mesmos autores detectaram firmeza variando de 18,93 N para 12,92 N.

Casa e Evangelista (2009), em um estudo sobre a influência das épocas de colheita na qualidade de tomate cultivado em sistemas alternativos da cultivar Epagri 19, também observaram uma variação da firmeza dos frutos com o estágio de maturação. Os valores

apresentados foram da primeira a sexta colheita de 1,43N, 1,78N, 1,96N, 2,0N, 1,95N e 1,45N, respectivamente. As menores texturas foram observadas na primeira e na sexta colheita, que, de acordo com Chitarra e Chitarra (2005), a maior textura condiciona a firmeza dos frutos, conferindo resistência a danos durante o transporte, sendo que os frutos com menor textura são mais sujeitos às deformações e ao rompimento da epiderme com liberação do suco celular, ocorrendo fermentação e deterioração, tendo-se baixa qualidade para comercialização.

4.2 Comportamento hidrodinâmico dos tomates

Conforme observou-se na determinação das características físicas dos tomates da variedade caqui e italiano nas Tabelas 4.3 e 4.6, não houve influência direta desses parâmetros na maturidade dos frutos, na análise estatística. Constatado esses fatos, construiu-se uma Tabela com todos os frutos das duas variedades (caqui e italiano), organizados por ordem crescente do fator de forma (esfericidade) com suas respectivas velocidades de subida, para que fosse investigada a influência desses parâmetros e suas interações sobre a velocidade da partícula.

4.2.1 Tomates da variedade Caqui

Na Tabela 4.7, encontra-se os dados de esfericidade por ordem crescente dos tomates da variedade Caqui, com suas respectivas velocidades terminais experimentais.

Tabela 4.7 – Esfericidade com respectiva velocidade terminal experimental para os tomates da variedade caqui.

Repetições Tomates	Esf (Adim.)	D_P (m)	Massa específica (Kg/m³)	Re (exp)	C_D (exp)	V_t (exp) (m/s)
1	0,860	0,0665	956,434	9148	1,868	0,138
2	0,884	0,0620	958,277	8361	1,775	0,135
3	0,889	0,0664	943,508	10766	1,839	0,163
4	0,892	0,0635	956,547	9675	1,463	0,153
5	0,903	0,0665	945,210	9150	2,584	0,138
6	0,909	0,0647	943,387	9104	2,395	0,141
7	0,910	0,0669	957,421	7996	2,558	0,120
8	0,911	0,0687	958,931	8772	2,138	0,128
9	0,911	0,0677	953,102	10546	1,614	0,156
10	0,913	0,0656	952,275	7930	2,964	0,121
11	0,914	0,0666	957,432	8102	2,382	0,122
12	0,917	0,0659	941,997	8201	3,133	0,125
13	0,918	0,0647	964,969	8078	1,686	0,125
14	0,918	0,0615	963,711	8621	1,384	0,141
15	0,933	0,0644	944,096	9045	2,358	0,141
16	0,935	0,0639	939,977	10545	1,808	0,166
17	0,937	0,0633	961,432	8304	1,769	0,132
18	0,943	0,0660	947,669	10390	1,756	0,158
19	0,944	0,0632	952,316	7162	3,000	0,114
20	0,950	0,0656	958,864	10124	1,402	0,155
Média	0,915	0,0652	952,878	9001	2,094	0,139
Des. Padrão	0,022	0,0019	7,720	1039	0,546	0,015

Analisando-se a Tabela 4.7, observa-se que o número de Reynolds apresentou média de 9001, variando de 7162 a 10766. O C_D obteve média de 2,094, variando de 1,38 a 3,13, e a velocidade terminal obteve média de 0,139 m.s⁻¹, variando de 0,120 a 0,163. Através da curva C_D x Re conforme observado na Figura 2.8, os frutos encontraram-se no regime turbulento, conhecido como a região de Newton do movimento.

Esses altos valores de desvio padrão para os parâmetros hidrodinâmicos são atribuídos à grande discrepância entre os frutos, uma vez que, mesmo tendo sido adotada uma escolha criteriosa na opção da maturação dos mesmos, observou-se que, por se tratar

de material biológico, mesmo após o processo da colheita, frutas e hortaliças continuam vivas, com suas atividades biológicas em funcionamento.

No caso do amadurecimento do tomate, uma série de eventos fisiológicos coordenados que desencadeiam mudanças na pigmentação, no sabor, na firmeza da polpa e no aroma, sendo altamente influenciados pela temperatura à qual os frutos estão expostos, envolvem mudanças decorrentes do amadurecimento, sendo a firmeza da polpa um dos aspectos mais importantes. O estágio de maturação do tomate, além de definir a temperatura de armazenamento, influencia a vida pós-colheita, o processo de amadurecimento e, conseqüentemente, a qualidade do produto que chega ao consumidor (LURIE et al., 1996; MOURA et al.1999).

Pela análise do vídeo do experimento nos três ensaios, foram obtidas as curvas de deslocamento em função do tempo, onde a velocidade é indicada pela inclinação da reta conforme representado nas Figuras 4.1 e 4.2 para o fruto 1 da variedade caqui. As retas foram obtidas por regressão linear, segundo ajuste $y = at$, cuja velocidade terminal é representada pelo parâmetro (a) para cada fruto, foram realizados três ensaios consecutivos.

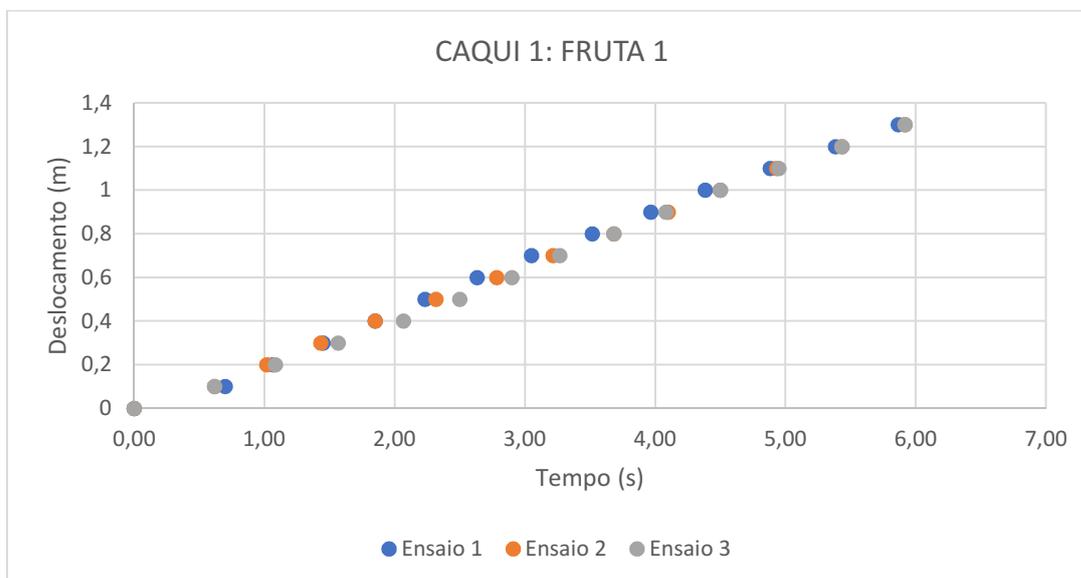


Figura 4.1 – Deslocamento (m) x tempo (s) do tomate da variedade caqui.

Na Figura 4.1 os resultados de deslocamento x tempo estão dispostos desde o lançamento do fruto na unidade de testes até o seu completo deslocamento. Já na Figura 4.2, foi desprezado a parte inicial dos pontos obtidos, sendo considerada para a determinação da equação da reta e, conseqüentemente, da velocidade terminal a parte dos pontos onde a referida velocidade apresenta-se constante.

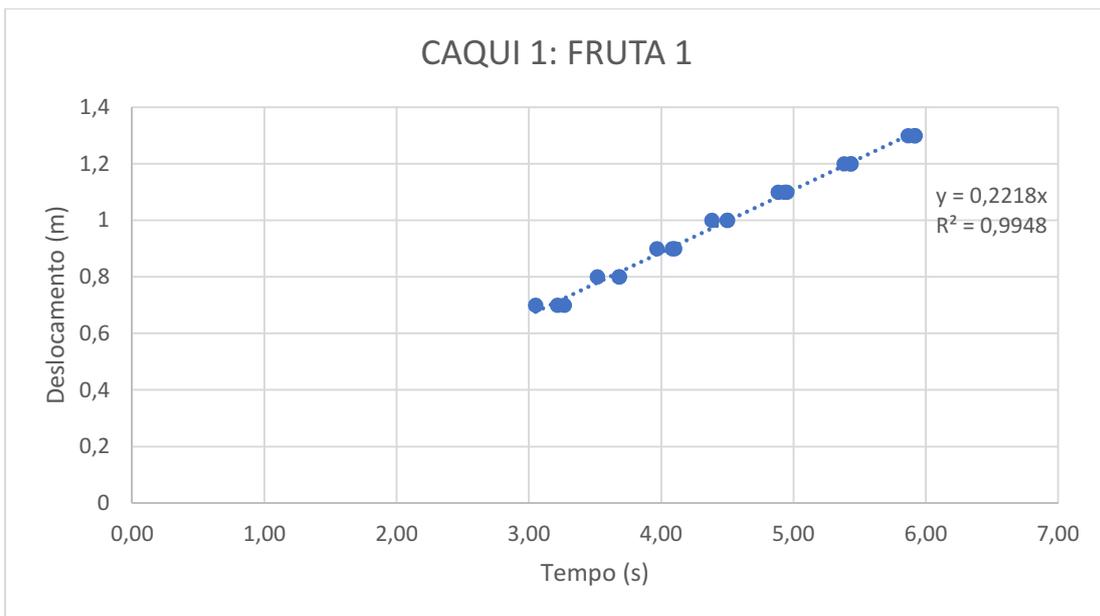


Figura 4.2 –Deslocamento (m) x tempo (s) após atingir a velocidade terminal do tomate da variedade caqui.

Na Figura 4.3 observa-se a relação da esfericidade de todos os tomates da variedade caqui pela velocidade terminal de cada fruto.

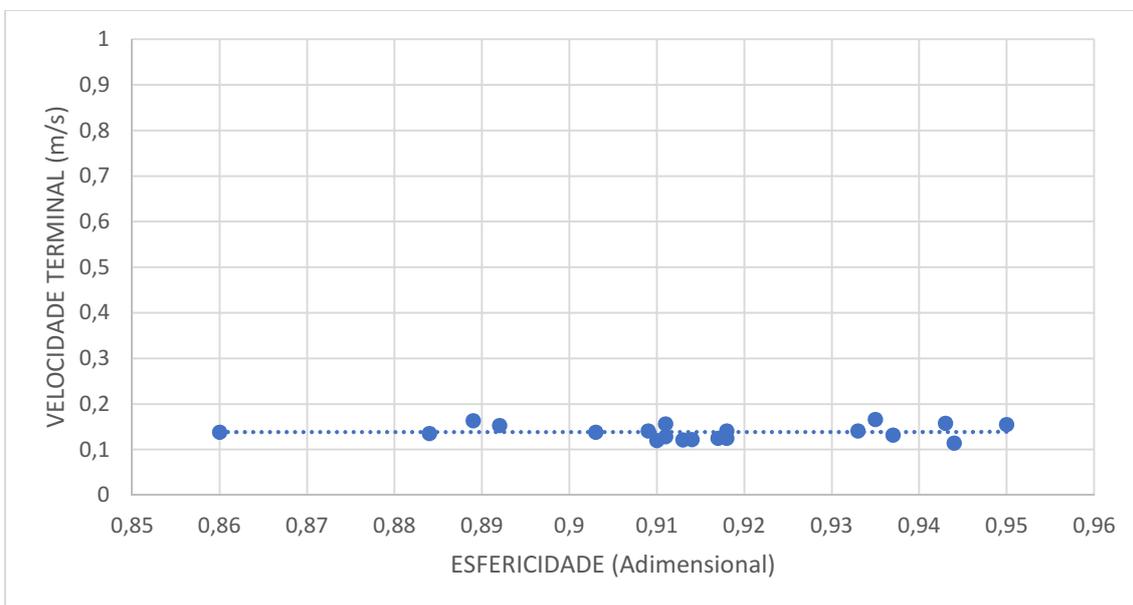


Figura 4.3 – Relação da Esfericidade pela velocidade terminal dos tomates da variedade Caqui.

Como pode-se analisar para os tomates da variedade caqui, observou-se que, com o aumento da esfericidade dos frutos, houve um pequeno aumento da velocidade terminal.

4.2.2 Tomates da variedade Italiano

Na Tabela 4.8, encontram-se os dados de esfericidade por ordem crescente dos tomates da variedade italiano, com suas respectivas velocidades terminais experimentais.

Tabela 4.8 – Esfericidade com respectiva velocidade terminal experimental para tomate variedade italiano.

Repetições Tomates	Esf (Adim.)	D_P (m)	Massa específica (Kg/m³)	Re (exp)	C_D (exp)	V_t (exp) (m/s)
1	0,750	0,0643	931,460	13256	1,329	0,207
2	0,755	0,0644	909,759	14847	1,366	0,231
3	0,757	0,0688	882,289	16959	1,692	0,247
4	0,760	0,0662	888,357	16372	1,526	0,248
5	0,761	0,0641	933,072	13300	1,249	0,208
6	0,771	0,0631	914,914	14698	1,239	0,234
7	0,779	0,0639	916,978	12714	1,713	0,200
8	0,780	0,0693	926,194	14923	1,382	0,216
9	0,780	0,0662	897,268	13653	2,091	0,207
10	0,786	0,0674	879,679	15494	1,959	0,231
11	0,787	0,0695	890,207	18421	1,378	0,266
12	0,790	0,0681	882,627	16316	1,795	0,241
13	0,793	0,0696	905,374	15374	1,713	0,222
14	0,797	0,0627	919,836	14928	1,116	0,239
15	0,800	0,0675	913,060	15658	1,351	0,233
16	0,812	0,0653	922,570	14132	1,344	0,217
17	0,813	0,0670	876,023	18715	1,365	0,280
18	0,827	0,0692	895,510	17783	1,435	0,258
19	0,834	0,0705	906,188	18939	1,131	0,270
20	0,837	0,0686	890,468	18768	1,305	0,275
Média	0,789	0,0668	904,092	15763	1,474	0,236
Des. Padrão	0,026	0,0024	17,969	1966	0,267	0,024

Analisando-se a Tabela 4.8, observa-se que o número de Reynolds apresentou média de 15763, variando de 12714 a 18939. O C_D obteve média de 1,474, variando de 1,116 a 2,091, e a velocidade terminal obteve média de 0,236 m.s⁻¹, variando de 0,200 a

0,280. Analisando-se através da curva $C_D \times R_e$ conforme Figura 2.8, os frutos também se encontram no regime turbulento.

Esses altos valores de desvio padrão para os parâmetros hidrodinâmicos são atribuídos à grande discrepância entre os frutos no processo de maturação. Segundo Gonçalves (2013), a maturação fisiológica é a fase em que o fruto adquire a capacidade de amadurecer; e para os frutos climatéricos, como é o caso do tomate, isso ocorre no momento em que se inicia a produção autocatalítica de etileno, com o desencadeamento da ativação de vias metabólicas. Além disso, dentro de uma mesma espécie, as respostas fisiológicas são variáveis.

Comparando-se a Tabela 4.7 com a Tabela 4.8, observa-se que a velocidade terminal do tomate da variedade italiano foi 1,70 vezes a velocidade do tomate caqui, embora não se possa isolar os efeitos, percebe-se que existe grande influência da forma do fruto em sua velocidade terminal, visto que essas frutas possuem densidade muito próximas.

Então, pode-se dizer que grande parte da influência se deve ao tamanho e à forma, visto que a rugosidade da casca é a mesma. Isso fica evidente ao compararmos não só os valores de velocidade terminal de ambas variedades de tomates como também o C_D e o número de Reynolds. Como os frutos da variedade italiano apresentaram velocidade e número de Reynolds maiores, conseqüentemente os mesmos obtiveram valores de coeficiente de arraste menores do que os da variedade caqui.

É importante verificar que, para os tomates da variedade italiano, existe uma relação entre o diâmetro da esfera equivalente e o fator de forma do produto esfericidade, significando que existe uma menor proximidade do produto de uma esfera e que, usar o (D_p) diâmetro da esfera equivalente para os cálculos de velocidade terminal, aproximando o produto de uma esfera, deve ser feito com bastante cautela.

Analisando-se a geometria dos tomates, essa dependência no tomate da variedade italiano fica mais evidente, conforme observa-se na Figura 4.4, em que se pode analisar as três Figuras geométricas, a esfera e os esferoides semelhantes aos frutos estudados nessa pesquisa. É importante perceber que tomar apenas um diâmetro como parâmetro da forma traz maior representatividade para o esferoide oblato do que para o prolato, visto que, para o esferoide oblato, os dois diâmetros maiores são iguais, enquanto no esferoide prolato os dois diâmetros menores são iguais, o que causa o distanciamento maior de uma esfera.

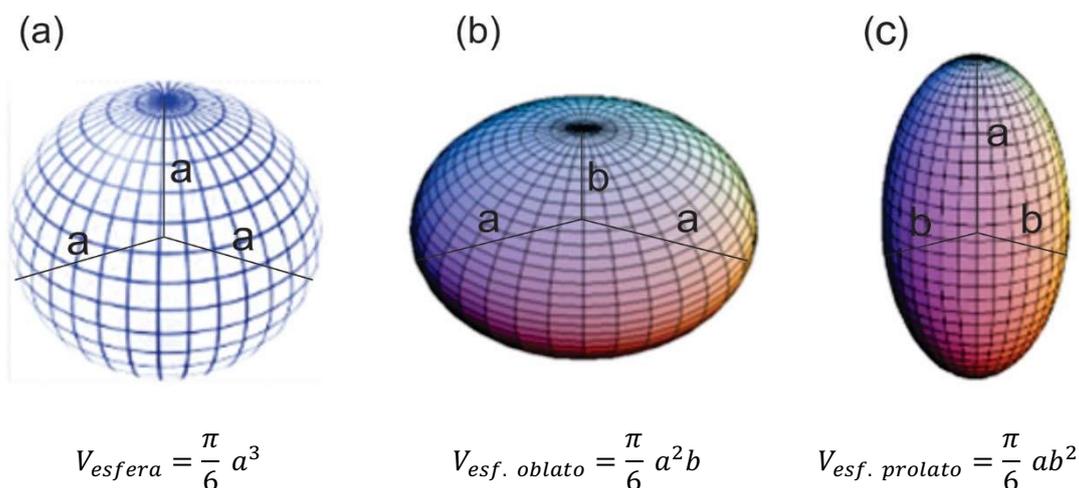


Figura 4.4 – Figuras geométricas definidas: (a) esfera, (b) esferoide oblato, (c) esferoide prolato.

Ainda analisando a Figura 4.4, outro fator importante que deve ser destacado é a resistência feita ao movimento de subida da fruta. No regime de Newton, ou seja, para $Re > 1000$, o objeto tende a se manter na posição de máxima resistência durante a subida, o que acaba resultando em uma maior força de resistência à subida do fruto, o que pode ser visto ao se comparar o coeficiente de arraste, bem maior na variedade caqui, 2,094 contra 1,474 obtido para a variedade italiano.

Outro dado importante para se compreender valores de velocidade terminal maiores para o tomate italiano é verificar a área projetada na direção perpendicular à direção do movimento, ou ainda, a área relativa a sua posição de repouso na água. Porém, essa análise comparativa deve ser feita com bastante cautela, visto o número de parâmetros que exerce essa influência e levando em consideração que as frutas aqui estudadas possuem tamanho e massa muito diferentes, não podendo, assim, isolarmos o estudo da contribuição da forma.

Tanto para os tomates da variedade caqui quanto para os da variedade italiano, não houve alterações significativas de suas características, com o avanço do estágio de maturação, que fossem suficientes para influenciar na velocidade terminal em água. Esse fato é positivo em se tratando da viabilidade de projeto para adoção do transporte hidráulico, pois, se a densidade dos frutos se mantém abaixo da densidade da água, do estágio verde ao maduro, existe a garantia da flutuação da fruta em qualquer nível de maturação, sem entupimento do canal de transporte.

Nas Figuras 4.5 e 4.6, são observados os resultados de deslocamento (m) x tempo (s) do fruto 5 do tomate da variedade italiano. Pela análise do vídeo do experimento,

foram obtidas as curvas de deslocamento em função do tempo, no qual a velocidade é indicada pela inclinação da reta. As retas foram obtidas por regressão linear, segundo ajuste $y = at$, cuja velocidade terminal é representada pelo parâmetro (a) para cada fruto, em que foram realizados três ensaios consecutivos.

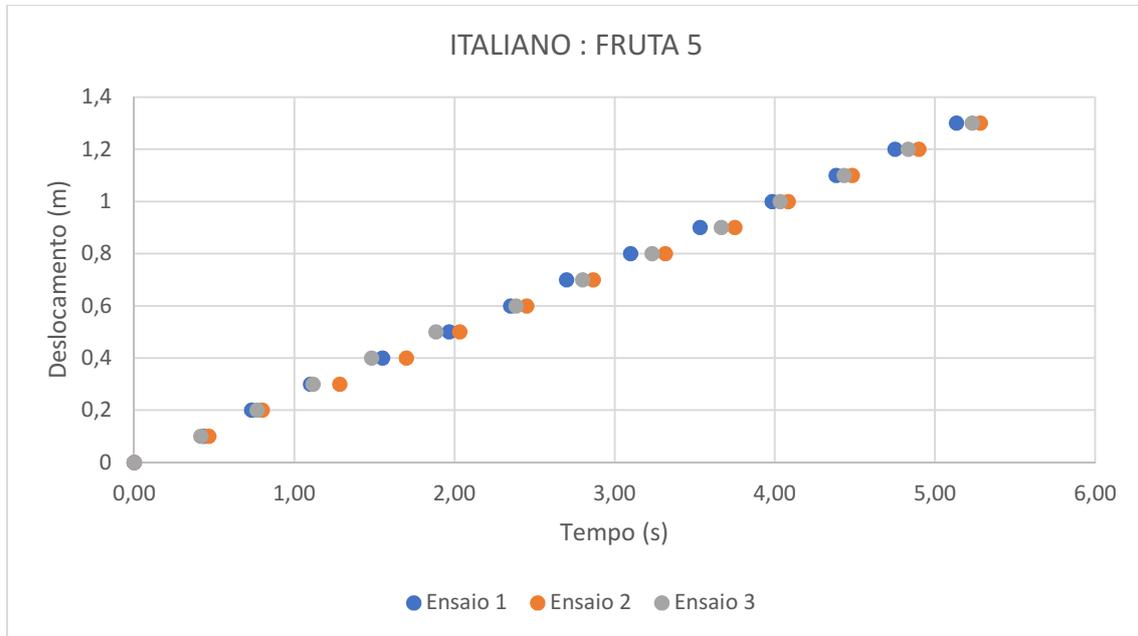


Figura 4.5 –Deslocamento (m) x tempo (s) do tomate da variedade italiano

Na Figura 4.5 os resultados de deslocamento x tempo estão dispostos desde o lançamento do fruto na unidade de testes até o seu completo deslocamento. Já na Figura 4.6, foi desprezado a parte inicial, considerando-se apenas quando o fruto alcançou sua velocidade terminal, ou seja, constante.

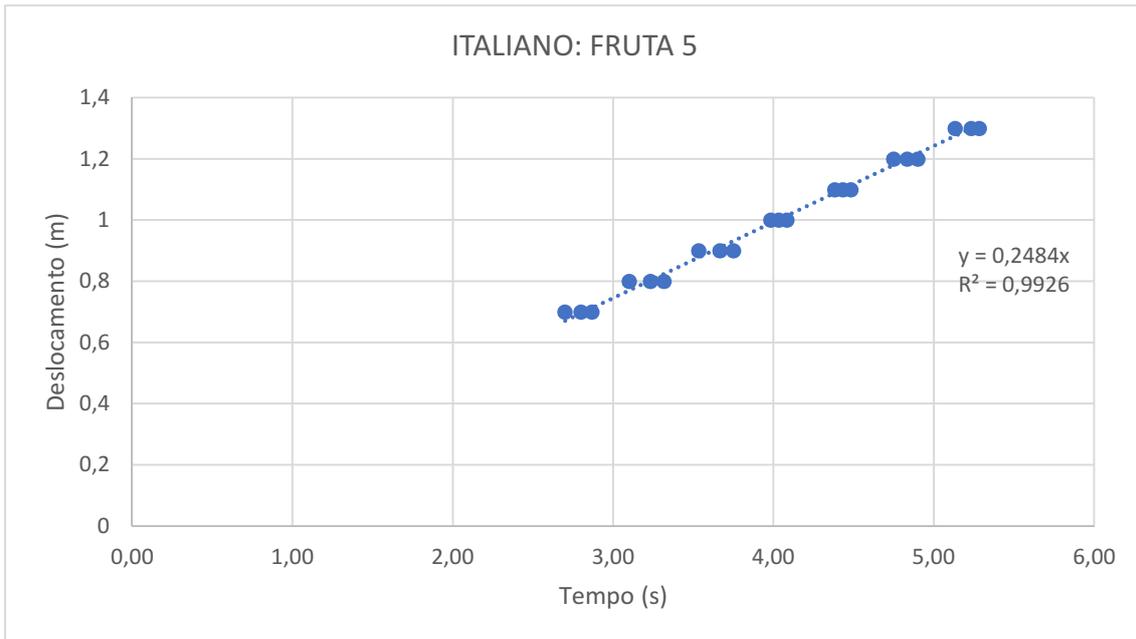


Figura 4.6 - Deslocamento (m) x tempo (s) após atingir a velocidade terminal do tomate da variedade italiano.

Na Figura 4.7, observa-se a relação da esfericidade de todos os tomates da variedade italiano pela velocidade terminal de cada fruto.

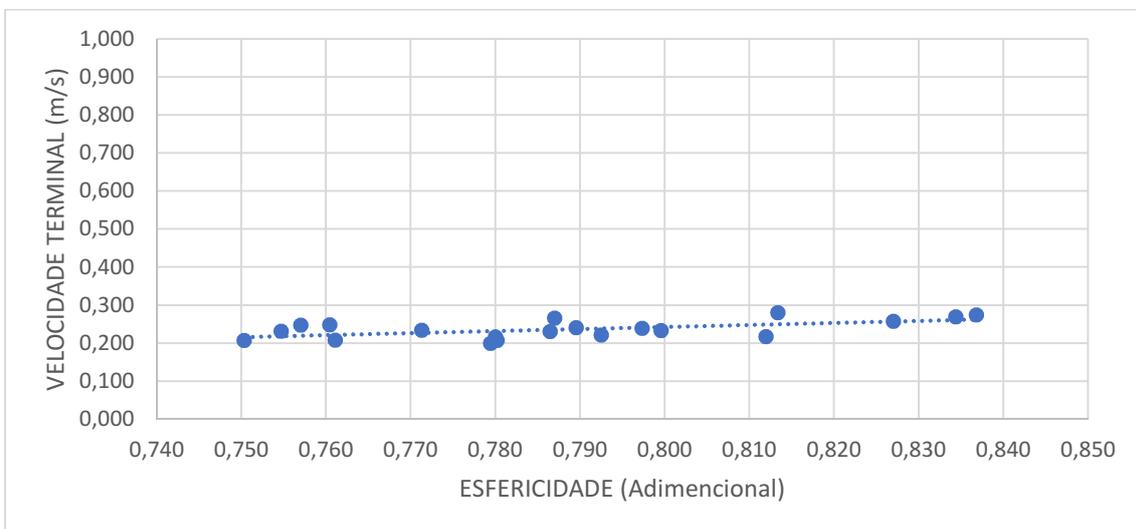


Figura 4.7 – Relação da Esfericidade pela velocidade terminal dos tomates da variedade italiano.

Como pode-se analisar, para os tomates da variedade italiano, observou-se que, assim como os tomates da variedade caqui, com o aumento da esfericidade dos frutos, houve um pequeno aumento da velocidade terminal.

4.2.3 Efeito da forma na velocidade terminal

Com o intuito de verificar o efeito da forma dos frutos, foi feito um estudo comparativo da velocidade terminal experimental dos frutos da variedade caqui com os da variedade italiano. Foram consideradas 20 repetições de cada, visto não haver diferenças significativas nas características de cada espécie com a maturação. O resultado da análise da variância, segundo experimento inteiramente casualizado, com as 20 repetições foi significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey (Apêndice A, Tabela A.27). Na Tabela 4.9, encontra-se a comparação entre os valores médios de velocidade terminal entre as duas variedades de frutos segundo análise estatística.

Tabela 4.9 – Comparação entre os valores médios de velocidade terminal de tomates das variedades caqui e italiano durante a subida em duto de água, com secção quadrada com $L = 0,38$ m.

Variedade do tomate	Velocidade terminal
Caqui	0,13860 b
Italiano	0,23650 a

$D_{ms} = 0.01301$; $CV\% = 10.83$ - as médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Analisando a Tabela 4.9, observa-se que a velocidade terminal do tomate da variedade italiano foi maior em relação à velocidade do tomate caqui. Embora não se possa isolar os efeitos, percebe-se que existe grande influência da forma do fruto em sua velocidade terminal, visto que essas frutas possuem densidade muito próximas. Então, pode-se dizer que grande parte da influência se deve ao tamanho e à forma, porquanto a rugosidade da casca é a mesma.

Outra observação é que, comparando os dados da Tabela 4.7 relacionados aos parâmetros hidrodinâmicos do tomate caqui com os dados da Tabela 4.8, referentes ao tomate italiano, foi possível analisar que houve o aumento da esfericidade, crescimento do coeficiente de arraste nos tomates da variedade caqui e diminuição do número de Re e da velocidade terminal, uma vez que a média da esfericidade foi de $\phi = 0,915$, para uma média de $CD = 2,094$, $Re = 9001$ e $V_t = 0,139$ m/s. Já para os tomates italianos, a média

da esfericidade foi de $\varphi = 0,789$, para uma média de $CD = 1,474$, $Re = 15763$ e $V_t = 0,236$ m/s.

Esses dados estão próximos dos de Braga (1997), que encontrou experimentalmente um $CD = 1,28$, $Re = 15062$ e $V_t = 0,21$ m/s para laranjas com $\varphi = 0,94$. Silva (1999), em um estudo sobre velocidade terminal de frutas em água, encontrou valores médios de $CD = 0,84$ e $V_t = 0,19$ m/s para ameixa; $CD = 1,10$ e $V_t = 0,08$ m/s para goiaba; $CD = 0,89$ e $V_t = 0,23$ m/s para maçã; e $CD = 0,91$ e $V_t = 0,15$ m/s para umbu.

Gonzaga et al. (2007), em um estudo sobre os parâmetros hidrodinâmicos de chuchu fatiado em diferentes formas geométricas definidas, submetidos à queda em tubos com 50, 100 e 150 mm de diâmetro e 1000 mm de altura, observou que 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, apresentando os cilindros e os paralelepípedos de chuchu, 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.

Nóbrega (2013) também estudou de Gonzaga et al. (2007), sobre os mesmos parâmetros hidrodinâmicos dentro das mesmas condições, partículas de macaxeira com diferentes formas geométricas submetidas à queda, em tubos com 50, 100 e 150 mm de diâmetro e 1000 mm de altura. A autora encontrou para a placa plana, o cilindro e o cubo de macaxeira submetidos a queda em tubo de valores de 50 mm, os valores de $V_t = 0,00327$ m/s; 0,00547 m/s e 0,00264 m/s, respectivamente. Já para o tubo de 100 mm, os valores foram $V_t = 0,00420$ m/s; 0,0120 m/s e 0,00340 m/s, respectivamente; e para o tubo de 150 mm, obteve-se os valores de $V_t = 0,00510$ m/s; 0,01343 m/s e 0,00340 m/s, respectivamente, também para as partículas de macaxeira com as formas geométricas definidas.

Haider e Levenspiel (1988), em um experimento sobre o coeficiente de arrasto e velocidade terminal de partículas esféricas e não esféricas, obteve, para esfericidade (φ) de 1; 0,906; 0,846; 0,806 e 0,670, valores experimentais de velocidade terminal de $V_t = 0,0245$ m/s; 0,0212 m/s e 0,0257 m/s, 0,0327 m/s, 0,0275 m/s, respectivamente.

4.3 Parâmetros hidrodinâmicos dos modelos esféricos

Na Tabela 4.10, verifica-se os dados experimentais de velocidade terminal (V_t), coeficiente de arraste (C_D) e número de (Re) de modelos esféricos confeccionados com a massa específica média dos tomates e tamanhos que incluem o diâmetro médio dos tomates, submetidos ao transporte vertical, bem como seus valores de massa (m), volume (v) e diâmetro da esfera (D_p)

Tabela 4.10 – Coeficiente de arraste e Velocidade terminal experimental dos modelos esféricos.

Modelo Esférico	D_p (m)	Volume ($\times 10^{-4} \text{ m}^3$)	Massa		Re (Adim.)	C_D (exp) (Adim.)	V_t (exp) (m/s)
			Específica (kg/m^3)	Massa (Kg)			
1	0,0551	0,8754	942	0,08239	12844	0,715	0,234
2	0,0649	1,4300	936	0,13390	16034	0,834	0,248
3	0,0744	2,1555	941	0,20283	19789	0,756	0,267

$$Re = \frac{V_t D_p \rho}{\mu}$$

$$C_{D1} = \frac{2mg(\rho_P - \rho_f)}{V_t^2 A_P \rho_P \rho_f}$$

$$\rho = 996,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,001 \text{ Pa.s}$$

$$g = 9,807 \text{ m/s}^2$$

O resultado da análise da variância segundo experimento inteiramente casualizado com as três repetições para comparar os valores de velocidade terminal experimental dos três modelos esféricos foi significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey (Apêndice A, Tabela A.28).

Na Tabela 4.11, verifica-se a comparação entre os valores médios de velocidade terminal para os três modelos esféricos segundo análise estatística.

Tabela 4.11 – Comparação entre os valores médios de velocidade terminal dos modelos esféricos durante a subida em duto de água, com seção quadrada com $L = 0,38 \text{ m}$.

Esfera	Velocidade terminal
1	0,236 c
2	0,252 b
3	0,277 a

$D_{ms} = 0.01928$; $CV\% = 2,85$ - as médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

Analisando-se os dados do coeficiente de arraste da Tabela 4.10 dos modelos esféricos com massa específica média dos tomates analisados, observam-se valores maiores que os obtidos nos tomates nas duas variedades. Já em relação aos valores da velocidade terminal, as esferas se aproximaram da velocidade experimental do tomate da variedade italiano.

Analisando-se a Tabela 4.11, observa-se que a esfera de maior diâmetro apresenta uma maior velocidade do que as outras duas esferas de menores diâmetros. Esse fato pode ser descrito segundo Young e Freedmann (2016) ao comentar que, para um corpo imerso em determinado fluido, surge sobre o mesmo uma força vertical para cima chamada empuxo, verificada pelo princípio de Arquimedes, a saber, “quando um corpo está parcial ou completamente imerso em um fluido, este exerce sobre o corpo uma força de baixo para cima igual ao peso do volume do fluido deslocado pelo corpo”.

Para qualquer corpo que fica submetido à força de Empuxo, a linha de ação da força resultante (somatório de todas as forças atuantes no corpo) é a mesma que contém o Empuxo. Para o sistema considerado, as esferas se deslocando em um recipiente contendo água, a força resultante atuante no mesmo é composta pelas forças peso \vec{P} (vertical para baixo) e empuxo \vec{E} (vertical para cima). Como o deslocamento do tomate se dá verticalmente para cima, então o vetor força resultante aponta verticalmente para cima, conforme segunda lei de Newton, a saber, “quando uma força resultante externa atua sobre um corpo, ele se acelera. A aceleração possui a mesma direção e o mesmo sentido da força resultante” (YOUNG e FREEDMANN, 2016).

Karamanev (1996), em um estudo sobre a ascensão de esferas de poliestireno com massa específica entre (300 – 900) kg/m³ em um tubo de vidro vertical preenchido com água destilada a 25°C, verificou a existência de dois regimes diferentes de ascensão das esferas, em que o primeiro foi caracterizado pelo movimento retilíneo, no qual o coeficiente de arraste segue a curva padrão, quando $Re/dp < 1450$. Já no segundo regime, as esferas seguem uma trajetória espiralada e o coeficiente de arraste é constante e igual a 0,95, observando-se uma relação de $Re/Dp > 1450$.

Braga (1997) encontrou experimentalmente para modelos esféricos lisos de $Dp = 0,072m, 0,050m, 0,042m$ e $0,037m$, com mesma massa específica das laranjas, considerando valores para $CD = 0,44$, baseados na curva de $(CD \times Re)$ segundo Venard (1961), respectivamente os valores de velocidade terminal experimental de: $V_t = 0,26$ m/s, $0,25$ m/s, $0,24$ m/s e $0,22$ m/s. Já para os valores dos modelos esféricos rugosos com

$D_p = 0,071 \text{ m}$, $0,050 \text{ m}$, $0,042 \text{ m}$ e $0,037 \text{ m}$, encontrou respectivamente os valores de velocidade terminal experimental de: $V_t = 0,25 \text{ m/s}$, $0,24 \text{ m/s}$, $0,23 \text{ m/s}$ e $0,21 \text{ m/s}$.

Melo (2007), em um estudo sobre a fluidodinâmica de esferas leves e de bolhas em líquidos, observou que os dados experimentais para a ascensão de esferas leves para $Re > 1000$, levaram a valores de coeficiente de arraste constantes e aproximadamente iguais a 0,95, valor este diferente do encontrado para a queda livre de esferas, atribuído este efeito à turbulência ocasionada pela rotação no líquido atrás da partícula, levando a um desequilíbrio de forças não verticais que atuam sobre a mesma, conduzindo a uma componente horizontal da velocidade e trajetória não linear, com ângulo de desvio entre o vetor velocidade e o plano horizontal variando entre 75° e 85° de acordo com o diâmetro e a densidade da esfera.

Partículas esféricas ascendendo que tenham uma densidade menor que a do fluido que a circula têm uma baixa inércia mecânica, e o desequilíbrio das forças resulta em uma trajetória espiralada, que é a razão pela qual esferas ascendentes com mesmo D_p de esferas caindo tenham mais que o dobro do coeficiente de arraste com altos números de Reynolds, que por sua vez apresentam amplitudes e períodos que variam de acordo com os diâmetros da partícula e da esfera (MELO, 2007).

4.4 Parâmetros hidrodinâmicos calculados

Foram calculados os parâmetros hidrodinâmicos dos modelos esféricos para o estudo da forma utilizando as correlações esféricas, bem como dos tomates das duas variedades (caqui e italiano) segundo correlações isométricas existentes na literatura.

4.4.1 Modelos esféricos

Na Tabela 4.12, encontra-se os dados calculados de velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos esféricos, considerando o $CD1 = 0,44$, e o $CD2$ segundo a equação de Abraham (1970).

Tabela 4.12 – Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos esféricos segundo (CD1=0,44) e CD2 pela equação de Abraham (1970) para os modelos esféricos confeccionados.

$$CD1 = 0,44 \qquad CD2 = 0,30 \left(1 + \frac{8,65}{Re^{1/2}} \right)^2$$

Modelo Esférico	D _p (m)	CD1	VT1 (m/s)	CD2	VT2 (m/s)	VT (exp) (m/s)
1	0,0551	0,440	0,299	0,348	0,336	0,234
2	0,0649	0,440	0,341	0,342	0,387	0,248
3	0,0744	0,440	0,350	0,338	0,399	0,267

Na Tabela 4.13, encontra-se os dados calculados de velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos esféricos, segundo as equações de Brauer e Sucker (1976) – CD3 e Concha e Almeida (1979) – CD4, para os modelos esféricos.

Tabela 4.13 – Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos esféricos segundo as equações de Brauer e Sucker (1976) – CD3 e Concha e Almendra (1979) – CD4, para os modelos esféricos.

$$CD3 = 0,49 + \frac{24}{Re} + \frac{3,73}{Re^{1/2}} - \frac{4,83 \times 10^{-3} Re^{1/2}}{1 + 3,0 \times 10^{-6} Re^{3/2}} \qquad CD4 = 0,28 \left(1 + \frac{9,06}{Re^{1/2}} \right)^2$$

Modelo Esférico	D _p (m)	CD3	VT3 (m/s)	CD4	VT4 (m/s)	VT (exp) (m/s)
1	0,0551	0,423	0,305	0,327	0,347	0,234
2	0,0649	0,435	0,344	0,321	0,399	0,248
3	0,0744	0,445	0,348	0,317	0,412	0,267

Na Tabela 4.14, encontra-se os dados calculados de velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos esféricos segundo as equações de Haider e Levenspiel (1989) - CD5 e Coelho e Massarani (1996) – CD6, para os modelos esféricos.

Tabela 4.14 –Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos esféricos segundo as equações de Haider e Levenspiel (1989) - CD5 e Coelho e Massarani (1996) – CD6, para os modelos esféricos.

$$CD5 = \frac{24}{Re} (1 + 0,1806 Re^{0,6459}) + \frac{0,4251 Re}{Re + 6881}$$

$$CD6 = \left[\left(\frac{24}{Re} \right)^{0,63} + 0,43^{0,63} \right]^{1/0,63}$$

Modelo Esférico	D _p (m)	CD5	VT5 (m/s)	CD6	VT6 (m/s)	VT (exp) (m/s)
1	0,0551	0,431	0,302	0,452	0,294	0,234
2	0,0649	0,440	0,342	0,449	0,338	0,248
3	0,0744	0,447	0,347	0,447	0,347	0,267

Na Figura 4.8, observa-se a relação da velocidade terminal experimental, e das velocidades calculadas dos modelos esféricos, segundo as equações para corpos esféricos, descritos nas Tabelas 4.12 a 4.14.

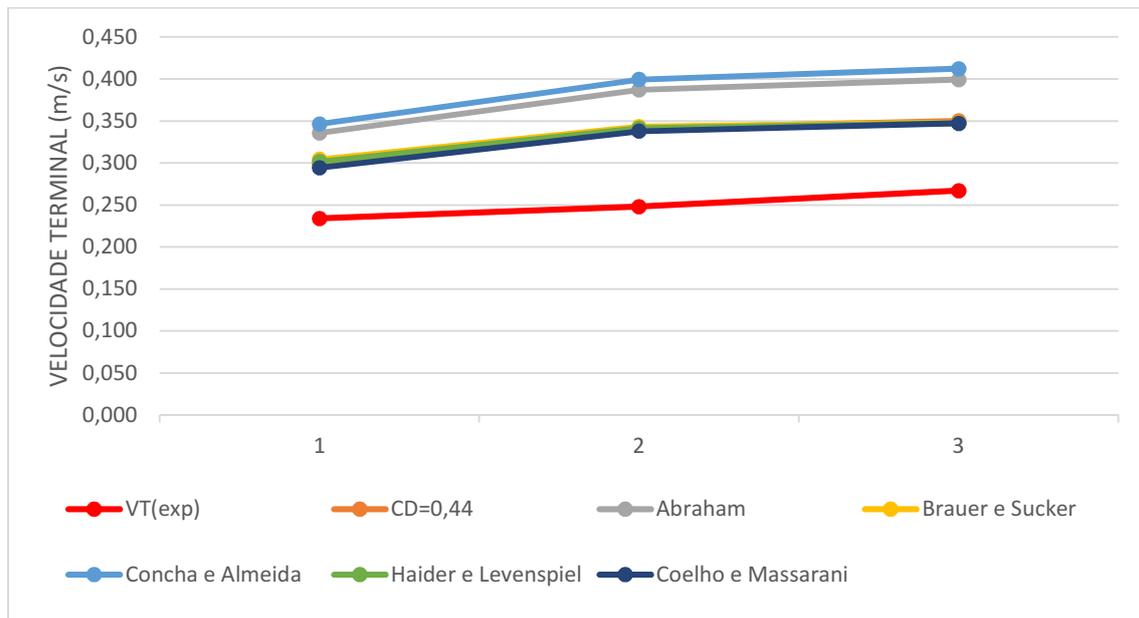


Figura 4.8 - Relação da velocidade terminal experimental, e das velocidades calculadas dos modelos esféricos confeccionados segundo as correlações matemáticas para corpos esféricos.

Analisando-se as Tabelas 4.12 a 4.14 e a Figura 4.8, verifica-se que, para todos os modelos esféricos, o coeficiente de arraste calculado foi inferior aos valores obtidos experimentalmente. Porém, os valores de velocidade terminal calculados foram maiores do que os valores experimentais.

Esses resultados são semelhantes aos de Braga (1997). No cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos de esferas lisas e rugosas com mesma massa específica de laranjas valência, a autora considerou valores para $C_D = 0,44$ baseados na curva de $(C_D \times Re_e)$ segundo Venard (1961), e encontrou para os modelos esféricos lisos de $D_p = 72$ mm, 50 mm, 42 mm e 37 mm, respectivamente, os valores de velocidade terminal calculada de: $V_t = 0,36$ m/s, 0,30 m/s, 0,27 m/s e 0,26 m/s. Já para os valores dos modelos esféricos rugosos com $D_p = 71$ mm, 50 mm, 42 mm e 37 mm, encontrou respectivamente os valores de velocidade terminal calculada de: $V_t = 0,36$ m/s, 0,30 m/s, 0,27 m/s e 0,26 m/s. Ou seja, em todos os modelos usados, tanto para os lisos como para os rugosos, as velocidades terminais calculadas foram maiores do que as obtidas experimentalmente.

Melo (2007), em um estudo sobre esferas leves e bolhas em líquidos, observou que a ascensão de esferas rígidas com baixa densidade em fluidos não-Newtoniano obedece a um padrão de escoamento para $Re < 1000$ similar ao observado para esferas ascendendo em fluidos Newtonianos, onde o C_D pode ser descrito por uma curva de arraste padrão. Baseado nestas similaridades, calculou-se, através dos modelos matemáticos descritos no gráfico (Figura 4.9), várias expressões encontradas na literatura para a queda livre de esferas em fluidos Newtoniano e não-Newtoniano, a relação entre o C_D e o número de Re_e , e as comparou com os valores experimentais conforme pode ser observado:

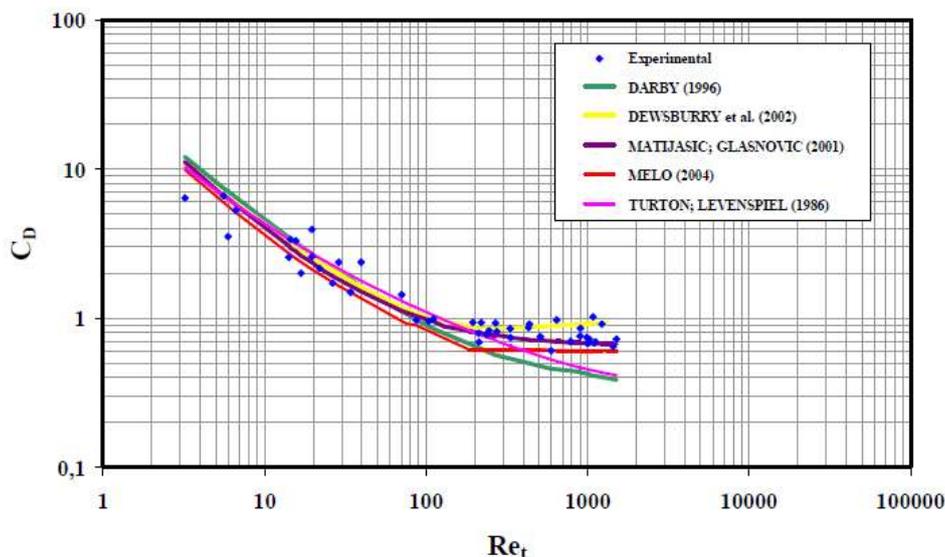


Figura 4.9 – Curva de C_D em função de Re_e (dados experimentais/correlações da literatura).

Fonte: Melo (2007).

Observa-se nas relações apresentadas na Figura 4.9, dos dados experimentais e dos calculados, que as equações de Darby (1996) e de Melo (2004) distanciaram-se dos valores experimentais, diferentemente das modelagens de Dewsbury et al. (2002) e a de Clift e Gauvin (1970), para valores de $0,1 < Re < 25000$, ajustaram-se bem aos valores experimentais. Já a modelagem proposta por Turton e Levenspiel (1986) pode ser utilizada para $Re < 200$, pois, para valores superiores, a mesma não apresenta bons resultados (MELO, 2007).

Ao comparar os dados obtidos experimentalmente com os tomates da variedade caqui e italiano com as equações da literatura para modelos isométricos, e também os modelos esféricos lisos para estudo da forma, com algumas correlações esféricas existentes na literatura e citadas neste trabalho, observa-se também um distanciamento destes valores, pois, assim como os dados obtidos por Melo (2007), Braga (1997), Silva (1999), Gonzaga (2006), os modelos existentes na literatura não descrevem com exatidão o que realmente ocorre experimentalmente com particulados grandes.

4.4.2 Tomates da variedade caqui

Na Tabela 4.15, observa-se os dados calculados de velocidade terminal e CD para corpos isométricos, segundo as equações de Pettyjohn e Christiansen (1948) – CD1 e Concha e Barrientos (1986) – CD2, para tomates da variedade caqui por ordem de esfericidade.

Tabela 4.15 – Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos isométricos segundo as equações de Pettyjohn e Christiansen (1948) – CD1 e Concha e Barrientos (1986) – CD2, para tomate da variedade caqui.

Repetições Tomates	Esfer. (Adim.)	CD1=K ₁ =5,31-4,88φ		CD2=K ₂ = $\frac{5,42-4,75\phi}{0,67} \left[0,527 + \frac{22}{R_{eM}} + \frac{3,73}{R_{eM}^{\frac{1}{2}}} - \frac{0,0281 R_{eM}^{\frac{1}{2}}}{1+1,06 \times 10^{-4} R_{eM}^{\frac{3}{2}}} \right]$		VT2 (m/s)	VT (exp) (m/s)
		CD1	VT1 (m/s)	R _{eM}	CD2=K ₂		
1	0,860	1,111	0,177	17211	1,077	0,180	0,138
2	0,884	0,995	0,176	14548	0,986	0,177	0,135
3	0,889	0,970	0,218	18399	0,966	0,218	0,163
4	0,892	0,958	0,186	16393	0,957	0,186	0,153
5	0,903	0,904	0,222	14877	0,914	0,221	0,138
6	0,909	0,876	0,226	14486	0,892	0,224	0,141
7	0,910	0,869	0,198	12645	0,886	0,196	0,120
8	0,911	0,866	0,197	13842	0,884	0,195	0,128
9	0,911	0,864	0,211	16619	0,883	0,208	0,156
10	0,913	0,857	0,210	12423	0,877	0,208	0,121
11	0,914	0,848	0,200	12603	0,870	0,197	0,122
12	0,917	0,833	0,237	12598	0,858	0,234	0,125
13	0,918	0,830	0,179	12374	0,855	0,176	0,125
14	0,918	0,828	0,178	13188	0,854	0,175	0,141
15	0,933	0,756	0,241	12996	0,797	0,235	0,141
16	0,935	0,748	0,251	15042	0,791	0,244	0,166
17	0,937	0,737	0,198	11723	0,782	0,192	0,132
18	0,943	0,707	0,244	14267	0,759	0,235	0,158
19	0,944	0,702	0,228	9782	0,753	0,220	0,114
20	0,950	0,673	0,219	13443	0,732	0,210	0,155
Média		0,847	0,210	13973	0,869	0,207	0,139
Desvio Padrão		0,109	0,024	2059	0,086	0,022	0,015

Na Tabela 4.16, verifica-se os dados calculados de velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos isométricos segundo as equações de Haider e Levenpiel (1989) - CD3 e Coelho e Massarani (1996) – CD4, para tomates da variedade caqui por ordem de esfericidade.

Tabela 4.16 – Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos isométricos segundo as equações de Haider e Levenspiel (1989) – CD3 e Coelho e Massarani (1996) – CD4, para tomate da variedade caqui.

Repetições Tomates	Esfer. (Adim.)	Equação CD3		Equação CD4			VT4 (m/s)	VT (exp) (m/s)
		CD3	VT3 (m/s)	K1	K2	CD4		
		$CD3 = \frac{24}{Re} \left\{ 1 + [8,172 \exp(-4,066\phi)] Re^{\left(\frac{0,00964}{0,5565\phi}\right)} \right\}$ $+ \frac{73,69 Re \exp(-5,075\phi)}{Re + 5,378 \exp(6,212\phi)}$		$CD4 = \left[\left(\frac{24}{K_1 Re} \right)^{0,85} + K_2^{0,85} \right]^{1/0,85}$ $K_1 = 0,843 \log_{10} \left(\frac{\phi}{0,065} \right)$ $K_2 = 5,31 - 4,88\phi$				
1	0,860	0,837	0,204	0,946	1,111	1,120	0,176	0,138
2	0,884	0,721	0,207	0,956	0,995	1,004	0,175	0,135
3	0,889	0,721	0,252	0,958	0,970	0,977	0,217	0,163
4	0,892	0,702	0,217	0,959	0,958	0,966	0,185	0,153
5	0,903	0,653	0,261	0,963	0,904	0,911	0,221	0,138
6	0,909	0,631	0,267	0,966	0,876	0,884	0,225	0,141
7	0,910	0,614	0,236	0,966	0,869	0,877	0,197	0,120
8	0,911	0,620	0,233	0,966	0,866	0,874	0,196	0,128
9	0,911	0,634	0,246	0,967	0,864	0,871	0,210	0,156
10	0,913	0,604	0,250	0,967	0,857	0,865	0,209	0,121
11	0,914	0,599	0,238	0,968	0,848	0,857	0,199	0,122
12	0,917	0,589	0,282	0,969	0,833	0,841	0,236	0,125
13	0,918	0,585	0,213	0,969	0,830	0,838	0,178	0,125
14	0,918	0,590	0,211	0,970	0,828	0,836	0,177	0,141
15	0,933	0,544	0,285	0,975	0,756	0,763	0,240	0,141
16	0,935	0,551	0,293	0,976	0,748	0,754	0,250	0,166
17	0,937	0,523	0,235	0,977	0,737	0,744	0,197	0,132
18	0,943	0,523	0,284	0,979	0,707	0,714	0,243	0,158
19	0,944	0,487	0,274	0,980	0,702	0,710	0,226	0,114
20	0,950	0,499	0,254	0,982	0,673	0,679	0,218	0,155
Média		0,611	0,247	0,968	0,847	0,854	0,209	0,139
Desvio Padrão		0,086	0,028	0,009	0,109	0,109	0,024	0,015

Na Figura 4.10, observa-se a relação da velocidade terminal experimental e das velocidades calculadas segundo os modelos matemáticos para corpos isométricos para os tomates da variedade caqui por ordem de esfericidade, descritos nas Tabelas 4.15 e 4.16.

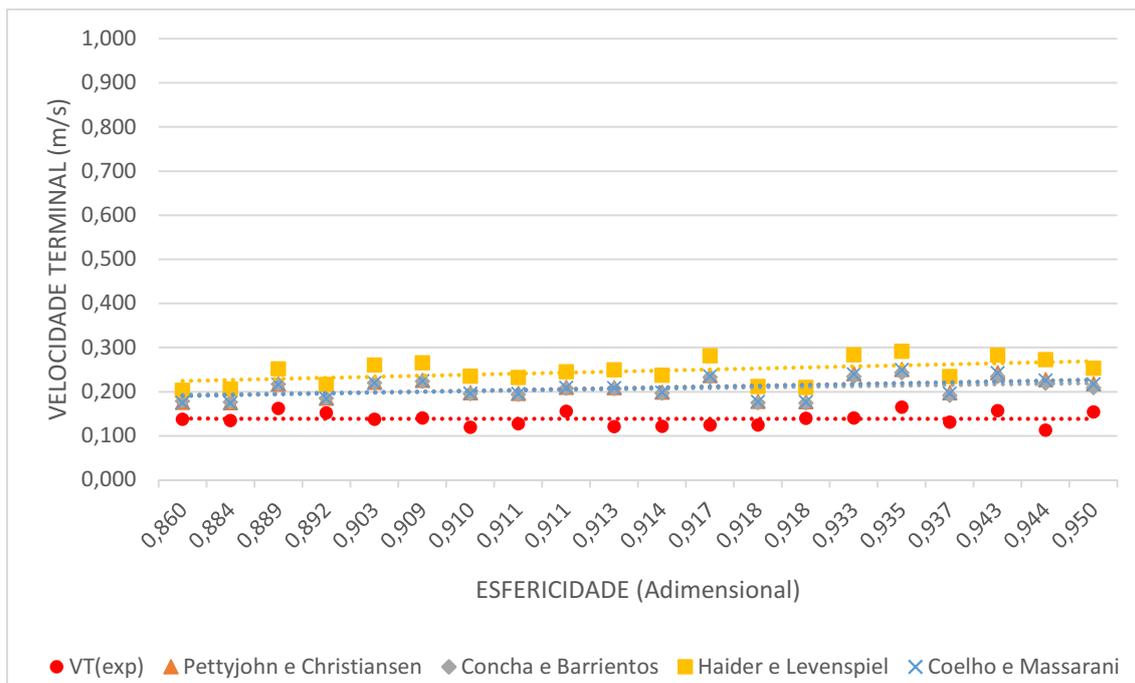


Figura 4.10 – Relação da velocidade terminal experimental e das velocidades calculadas para tomates da variedade caqui por ordem de esfericidade.

Nas Tabelas 4.15 e 4.16, bem como na Figura 4.10, verifica-se que para todos os modelos isométricos tanto a velocidade terminal como o coeficiente de arraste calculado foram maiores que os valores obtidos experimentalmente dos tomates da variedade caqui.

Analisando-se os valores de desvio padrão dos parâmetros hidrodinâmicos das Tabelas 4.15 e 4.16, observa-se que os valores calculados apresentaram altos níveis de desvio padrão, uma vez que, por se tratar de materiais biológicos, os frutos apresentaram heterogeneidade internamente conforme pode ser observado no Apêndice B (Figura B1).

Silva (1999) utilizou três métodos para o cálculo de velocidade terminal e coeficiente de arraste da ameixa, goiaba, maçã e umbu, em que, no método 1, admitiu os frutos sendo esféricos. Já no método 2, corrigiu-se o CD com a equação dada por Pettyjohn e Christiansen. No método 3, foi utilizada a equação de Massarani (1986).

Para ameixa, seus valores foram superiores aos obtidos ao considerar a fruta como sendo esférica pelo método 1, porém inferiores aos obtidos pelo método 3, respectivamente, seus valores médios foram 0,77; 0,44 e 0,90. Quanto ao coeficiente de arraste experimental, pode-se observar que seus valores apresentaram variações, ora superavam os demais coeficientes de arraste ora eram inferiores, sendo seu valor médio igual a 0,84. Os números de Reynolds tiveram média de 14.766.

Quanto à velocidade terminal utilizando o método 2, seus valores foram inferiores aos obtidos no método 1 e superior às velocidades obtidas pelo método 3, cujos valores

médios foram iguais, respectivamente, a 0,19, 0,25 e 0,17 m/s. Para a goiaba, os valores do coeficiente de arraste obtidos apresentaram pequenas variações entre seus valores, tendo em média um valor igual a 1,77, porém superiores aos obtidos utilizando o método 3 ($CD_3 = 1,3$), e comparando-se com os valores experimentais, foram de forma geral inferiores aos obtidos pelos outros 3 métodos. O número de Reynolds encontrou-se na faixa de 3.754 a 33.429, e os valores das velocidades terminais obtidos pelo método 2 foram em média 0,07m/s, estando próximos aos valores calculados utilizando-se o método 3, de 0,08m/s (SILVA, 1999).

Para as maçãs, pode-se verificar que, nos valores de coeficiente de arraste corrigidos pelo método 2, obteve-se uma média de 0,75, um pouco inferior à média obtida pelo método 3 ($CD_3 = 0,89$); sendo ambos inferiores aos coeficientes de arraste obtidos experimentalmente que foi de 1,68 em média. O número de Reynolds encontrou-se na faixa de 20.161 a 25.882, e os valores das velocidades terminais obtidos pelo método 2 foram em média iguais a 0,31m/s, superior ao obtido pelo método 3 (0,28 m/s), como também obtido experimentalmente (0,23 m/s). Já para os frutos de umbu, analisando os valores obtidos do CD pelo método 2, os mesmos foram superiores aos obtidos pelo método 3 e superior ao obtido experimentalmente, respectivamente 1,20; 1,11 e 0,91. Constatou-se para esse fruto que, utilizando o método 2, os valores das velocidades terminais se aproximaram dos valores obtidos pelo método 3, sendo 0,13 e 0,14 m/s respectivamente, e estão próximos ao valor obtido experimentalmente, que foi 0,15 m/s (SILVA, 1999).

Gonzaga et al. (2007), no estudo sobre parâmetros hidrodinâmicos de chuchu, fatiado em diferentes formas geométricas definidas, submetidas à queda em tubos com 50, 100 e 150 mm de diâmetro e 1000 mm de altura, utilizou as equações dadas por Isaacs e Thodos (1967), Clift et al. (1978) e Mohsenin (1986), para calcular os valores de velocidade terminal e compará-las com as obtidas experimentalmente. Eles observaram que a velocidade terminal aumentava à medida que se aumentava o diâmetro do tubo de queda para todas as peças, mostrando a influência do tamanho do tubo de queda na velocidade terminal de partículas em água.

Os autores também observaram que os cilindros e os paralelepípedos de chuchu 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, e que a equação utilizada de Isaacs e Thodos (1967) para a velocidade

terminal calculada ofereceu uma boa aproximação da velocidade terminal experimental, principalmente para as formas geométricas do chuchu (GONZAGA et al. 2007).

4.4.3 Tomates da variedade Italiano

Na Tabela 4.17, encontram-se os dados calculados de velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos isométricos, segundo as equações de Pettyjohn e Christiansen (1948) – CD1 e Concha e Barrientos (1986) – CD2, para tomates da variedade italiano por ordem de esfericidade.

Tabela 4.18 – Velocidade terminal e coeficiente de arraste para corpos isométricos segundo as equações de Haider e Levenspiel (1989) – CD3 e Coelho e Massarani (1996) – CD4, para tomate da variedade italiano.

Repetições Tomates	Esfer. (Adim.)	Equação CD3		Equação CD4			VT4 (m/s)	VT (exp) (m/s)	
		CD3	VT3 (m/s)	K1	K2	CD4			
		$CD3 = \frac{24}{Re} \left\{ 1 + [8,172 \exp(-4,066\phi)] Re^{\left(\frac{0,00964}{(0,5565\phi)}\right)} \right\} + \frac{73,69 Re \exp(-5,075\phi)}{Re + 5,378 \exp(6,212\phi)}$			$CD4 = \left[\left(\frac{24}{K_1 Re} \right)^{0,85} + K_2^{0,85} \right]^{1/0,85}$ $K_1 = 0,843 \log_{10} \left(\frac{\phi}{0,065} \right)$ $K_2 = 5,31 - 4,88\phi$				
1	0,750	1,571	0,187	0,896	1,648	1,655	0,182	0,207	
2	0,755	1,541	0,218	0,898	1,627	1,633	0,212	0,231	
3	0,757	1,530	0,259	0,899	1,616	1,621	0,252	0,247	
4	0,760	1,500	0,250	0,900	1,599	1,604	0,242	0,248	
5	0,761	1,483	0,189	0,901	1,596	1,602	0,182	0,208	
6	0,771	1,411	0,218	0,906	1,546	1,552	0,208	0,234	
7	0,779	1,342	0,223	0,909	1,506	1,513	0,210	0,200	
8	0,780	1,347	0,217	0,910	1,504	1,509	0,205	0,216	
9	0,780	1,341	0,253	0,910	1,503	1,509	0,239	0,207	
10	0,786	1,304	0,281	0,913	1,472	1,477	0,264	0,231	
11	0,787	1,309	0,272	0,913	1,469	1,474	0,256	0,266	
12	0,790	1,285	0,281	0,914	1,457	1,462	0,264	0,241	
13	0,793	1,262	0,256	0,916	1,442	1,448	0,239	0,222	
14	0,797	1,228	0,226	0,918	1,419	1,425	0,210	0,239	
15	0,800	1,216	0,246	0,919	1,408	1,413	0,228	0,233	
16	0,812	1,132	0,236	0,924	1,348	1,353	0,216	0,217	
17	0,813	1,138	0,305	0,925	1,341	1,345	0,280	0,280	
18	0,827	1,056	0,294	0,931	1,274	1,279	0,268	0,258	
19	0,834	1,018	0,286	0,934	1,238	1,243	0,259	0,270	
20	0,837	1,004	0,308	0,935	1,226	1,231	0,278	0,275	
Média		1,301	0,250	0,914	1,462	1,467	0,235	0,236	
Desvio Padrão		0,173	0,036	0,012	0,127	0,128	0,030	0,024	

Na Figura 4.11, observa-se a relação da velocidade terminal experimental, e das velocidades calculadas segundo os modelos matemáticos para corpos isométricos, para os tomates da variedade italiano por ordem de esfericidade, descritos nas Tabelas 4.17 e 4.18.

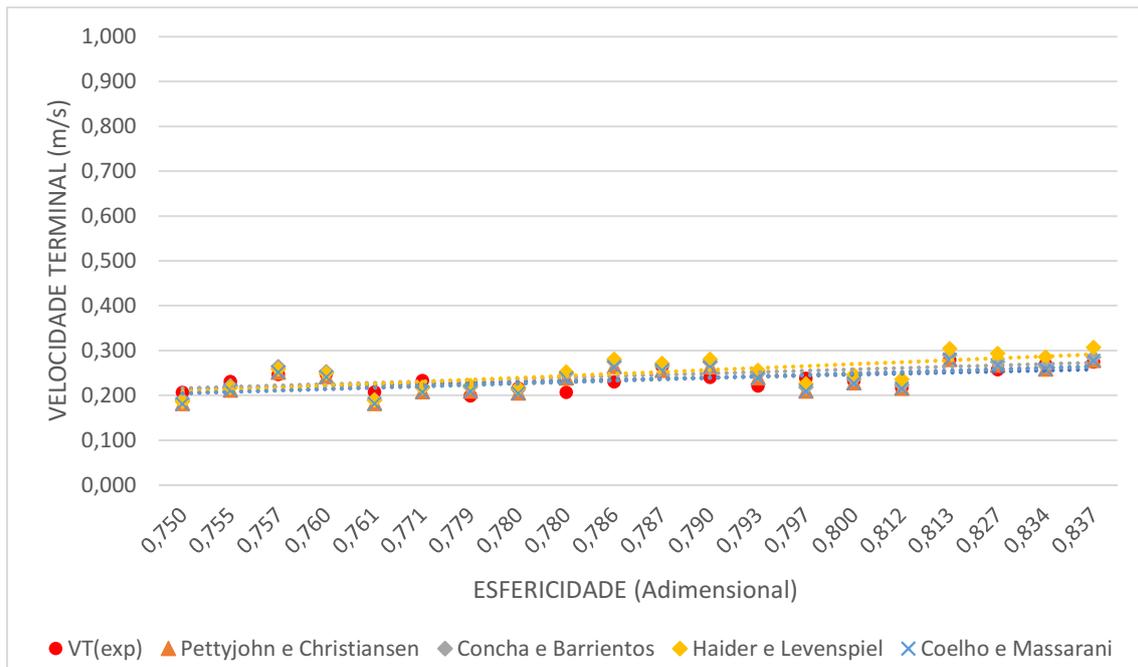


Figura 4.11 – Relação da velocidade terminal experimental, e das velocidades calculadas para tomates da variedade italiano por ordem de esfericidade.

Nas Tabelas 4.17 e 4.18, bem como na Figura 4.11, observa-se que os dados obtidos para os modelos isométricos utilizados para a velocidade terminal calculada, segundo as equações de Pettyjohn e Christiansen (1948) – V_{t1} , Coelho e Massarani (1996) – V_{t4} , apresentaram valores menores do que os experimentais, enquanto que os modelos de Concha e Barrientos (1986) - V_{t2} – e Haider e Levenspiel (1989) – V_{t3} apresentaram valores maiores do que os experimentais para os tomates da variedade italiano. Em relação ao CD, todos os modelos calculados foram um pouco menores do que os valores experimentais.

Analisando-se os valores de desvio padrão dos parâmetros hidrodinâmicos das Tabelas 4.17 e 4.18, observa-se que os parâmetros calculados dos tomates da variedade italiano também apresentaram altos níveis de desvio padrão. Isso pode ser atribuído ao fato de os tomates apresentarem diferentes formas, como também estrutura interna diferenciada de um fruto para o outro, mesmo pertencendo à mesma variedade e sendo da mesma colheita, esses frutos não são homogêneos, como pode ser observado no Apêndice B (Figura B2).

Esses dados de velocidade terminal para laranjas estão próximos aos obtidos por Braga (1997), quando chegou a $V_t = 0,21$ m/s para a velocidade experimental, e, pelas

correlações no método 1, 2 e 3, obteve, respectivamente, as velocidades terminais calculadas de: $V_{t1} = 0,36$ m/s $V_{t2} = 0,28$ m/s $V_{t3} = 0,28$ m/s.

Observou-se que o valor da velocidade terminal experimental ser inferior aos valores calculados pode ser devido ao movimento irregular da fruta durante a sua ascensão, o qual está relacionado a diversos fatores, por se tratar de um material biológico, entre eles o efeito de parede como também a distribuição das forças devido à forma irregular que o fruto apresenta. Esse fato também pode ser atribuído ao regime de escoamento em que os frutos se encontraram, sendo provável a ocorrência de esteiras de vórtices que também contribuem para o movimento irregular do fruto durante a subida (BRAGA, 1997).

4.5 Efeito de parede

4.5.1. Modelos esféricos

Os valores que indicam a existência ou não do efeito de parede (K_p) nos modelos esféricos encontram-se apresentados na Tabela 4.19. Os valores foram encontrados segundo as equações de Massarani (1990 - K_{p1}), e Almeida (1995 - K_{p2}), segundo a região de escoamento.

Tabela 4.19 – Efeito de parede para os modelos esféricos.

Modelo esférico	DP (m)	Re	$\beta = \frac{D_p}{D_T}$	$K_{p1} = \frac{(1 - \beta^2)}{(1 - \beta^4)^{\frac{1}{2}}}$	$K_{p2} = (1 - \beta^{\frac{3}{2}})$
1	0,0551	12844	0,145	0,979	0,945
2	0,0649	16034	0,171	0,971	0,929
3	0,0744	19789	0,196	0,962	0,913

Segundo Massarani (1990), para que não se faça sentir o efeito de parede no transporte, a relação entre o diâmetro da partícula e o diâmetro do tubo, obedecendo ao critério $K_p \geq 0,99$, deve ser superior a 200 no regime de Stokes (condições em que $Re < 1$) ou seja, valores de $\beta < 0,005$, enquanto que no regime de Newton (condições em que $Re > 1000$) essa relação é bem menor, de apenas 4, ou seja, valores de $\beta < 0,25$. Analisando-se os dados obtidos para os modelos esféricos apresentados na Tabela 4.19,

observa-se que, para as três esferas, os valores de β foram inferiores a 0,25. Em relação ao critério K_p , ambas as esferas tiveram valores um pouco inferiores a 0,99, porém não apresentaram efeito de parede significativo, uma vez que não bateram na parede do tubo em nenhum ensaio, apesar da esfera de maior diâmetro ter apresentado uma trajetória mais próxima da parede.

Esses dados estão de acordo com os de Braga (1997), nos quais, analisando o comportamento de laranjas valência, bem como de esferas rugosas e lisas com mesmo diâmetro da fruta, obteve para os diâmetros da partícula 72,4; 72; 50; 42 e 37 mm, respectivamente os valores de β foram 0,289; 0,284; 0,200; 0,168 e 0,147, e os valores para o K_{p1} foram 0,912; 0,9139; 0,960; 0,971 e 0,977, percebendo-se que houve o efeito de parede e que este tendeu a anular-se para $\beta \leq 0,2$, dentro do critério $K_p \geq 0,99$ e que durante o transporte das partículas observou-se um movimento de zigue-zague durante a subida. No caso em questão, a laranja chegou a golpear entre 5 a 8 vezes contra a parede do tubo, assim como as esferas de 72 mm. Já as esferas de 50 mm golpearam em torno de 3 vezes; as de 42 mm, uma ou nenhuma vez, apesar de terem apresentado desvio na sua trajetória; e apenas a esfera de 37 mm seguiu seu percurso sem desvio, subindo pelo centro do tubo.

4.5.2 Tomates da variedade caqui

Os valores que indicam a existência ou não do efeito de parede (K_p) nos tomates da variedade caqui encontram-se apresentados na Tabela 4.20. Os valores foram determinados segundo as equações de Massarani (1990 - K_{p1}), e Almeida (1995 - K_{p2}), para $Re > 1000$.

Tabela 4.20 – Efeito de parede para os tomates da variedade caqui.

Repetições Tomates	Esfer. (Adim.)	DP (m)	$\beta = \frac{D_P}{D_T}$	$K_{P1} = \frac{(1 - \beta^2)}{(1 - \beta^4)^{\frac{1}{2}}}$	$K_{P2} = (1 - \beta^{\frac{3}{2}})$
1	0,860	0,0665	0,175	0,970	0,927
2	0,884	0,0620	0,163	0,974	0,934
3	0,889	0,0664	0,175	0,970	0,927
4	0,892	0,0635	0,167	0,972	0,932
5	0,903	0,0665	0,175	0,970	0,927
6	0,909	0,0647	0,170	0,971	0,930
7	0,910	0,0669	0,176	0,969	0,926
8	0,911	0,0687	0,181	0,968	0,923
9	0,911	0,0677	0,178	0,969	0,925
10	0,913	0,0656	0,173	0,971	0,928
11	0,914	0,0666	0,175	0,970	0,927
12	0,917	0,0659	0,173	0,970	0,928
13	0,918	0,0647	0,170	0,971	0,930
14	0,918	0,0615	0,162	0,974	0,935
15	0,933	0,0644	0,169	0,972	0,930
16	0,935	0,0639	0,168	0,972	0,931
17	0,937	0,0633	0,167	0,973	0,932
18	0,943	0,0660	0,174	0,970	0,928
19	0,944	0,0632	0,166	0,973	0,932
20	0,950	0,0656	0,173	0,971	0,928
Média		0,0652	0,172	0,971	0,929
Desvio Padrão		0,0019	0,005	0,002	0,003

Analisando-se a Tabela 4.20, para os tomates da variedade caqui, a relação entre o diâmetro dos tomates pelo diâmetro do tubo foi em média de $\beta = 0,172$. Já os cálculos médios dos efeitos de parede foram de $K_{P1} = 0,971$ e $K_{P2} = 0,929$. Analisando-se os valores de desvio, observa-se que não foram significativos, mostrando que não houve grandes alterações entre os valores médios dos tomates em relação ao efeito de parede calculado. Como para os tomates Caqui, o número de R_e teve média igual a 9001, ou seja, os tomates estavam no regime turbulento, tanto para o modelo matemático de Massarani (1990) - K_{P1} como para o de Almeida (1995) - K_{P2} , o efeito de parede não foi

significativo, uma vez que os valores de β foram inferiores a 0,25, e em relação ao critério K_p , todos os tomates tiveram valores um pouco inferiores a 0,99. Isso pôde ser observado também na análise das filmagens dos ensaios de velocidade, uma vez que os tomates da variedade caqui não se chocaram nenhuma vez na parede da coluna de vidro.

Esses dados foram próximos aos obtidos por Silva (1999) quando analisou o efeito de parede durante seu experimento de velocidade terminal de ameixa, goiaba, maçã e umbu. Para a ameixa, os valores de β foram em média de 0,22 e o $K_p = 0,95$, indicando que a ameixa sofreu uma pequena influência devido à parede do tubo, chocando-se no máximo duas vezes. Para a goiaba, os valores de β variaram de 0,24 a 0,26 e o K_p variou de 0,93 a 0,94, em que houve efeito de parede. Para a maçã, o β variou de 0,19 a 0,22 e o K_p foi em média 0,96, mostrando que a parede do tubo causou pequena influência na ascensão dos frutos. Para o umbu, o β variou de 0,10 a 0,13 e o K_p foi em média 0,99, indicando que os frutos não sofreram influência da parede do tubo.

4.5.3 Tomates da variedade italiano

Os valores que indicam a existência ou não do efeito de parede (K_p) nos tomates da variedade italiano encontram-se apresentados na Tabela 4.21. Os valores foram encontrados segundo as equações de Massarani (1990) - K_{p1} e Almeida (1995) - K_{p2} de acordo com o regime do movimento dos frutos.

Tabela 4.21 – Efeito de parede para os tomates da variedade italiano.

Repetições Tomates	Esfer. (Adim.)	DP (m)	$\beta = \frac{D_P}{D_T}$	$K_{P1} = \frac{(1 - \beta^2)}{(1 - \beta^4)^{\frac{1}{2}}}$	$K_{P2} = (1 - \beta^{\frac{3}{2}})$
1	0,750	0,0643	0,169	0,972	0,930
2	0,755	0,0644	0,170	0,972	0,930
3	0,757	0,0688	0,181	0,968	0,923
4	0,760	0,0662	0,174	0,970	0,927
5	0,761	0,0641	0,169	0,972	0,931
6	0,771	0,0631	0,166	0,973	0,932
7	0,779	0,0639	0,168	0,972	0,931
8	0,780	0,0693	0,182	0,967	0,922
9	0,780	0,0662	0,174	0,970	0,927
10	0,786	0,0674	0,177	0,969	0,925
11	0,787	0,0695	0,183	0,967	0,922
12	0,790	0,0681	0,179	0,968	0,924
13	0,793	0,0696	0,183	0,967	0,922
14	0,797	0,0627	0,165	0,973	0,933
15	0,800	0,0675	0,178	0,969	0,925
16	0,812	0,0653	0,172	0,971	0,929
17	0,813	0,0670	0,176	0,969	0,926
18	0,827	0,0692	0,182	0,967	0,922
19	0,834	0,0705	0,185	0,966	0,920
20	0,837	0,0686	0,180	0,968	0,923
Média		0,0668	0,176	0,970	0,926
Desvio Padrão		0,0024	0,006	0,002	0,004

Analisando-se a Tabela 4.21, para os tomates da variedade italiano, a relação entre o diâmetro dos tomates pelo diâmetro do tubo foi em média de $\beta = 0,176$. Já os cálculos médios dos efeitos de parede segundo as equações foi de $K_{P1} = 0,970$ e $K_{P2} = 0,926$. Apesar dos valores de desvio padrão baixos, e os valores de β terem sido inferiores a 0,25, os valores do critério K_P foram inferiores ao valor predito por Massarani (1990) de $K_P \geq 0,99$. De fato, alguns tomates da variedade italiano, durante a análise dos vídeos dos ensaios de velocidade, golpearam a parede da coluna de vidro, mostrando efeito de parede apenas em alguns frutos.

4.5.4 Relação entre o efeito de parede, a forma, a orientação e a estrutura interna do fruto

Na Figura 4.12, verifica-se a influência do efeito de parede para os modelos esféricos (1), (2) e (3) durante a realização do experimento de velocidade terminal.

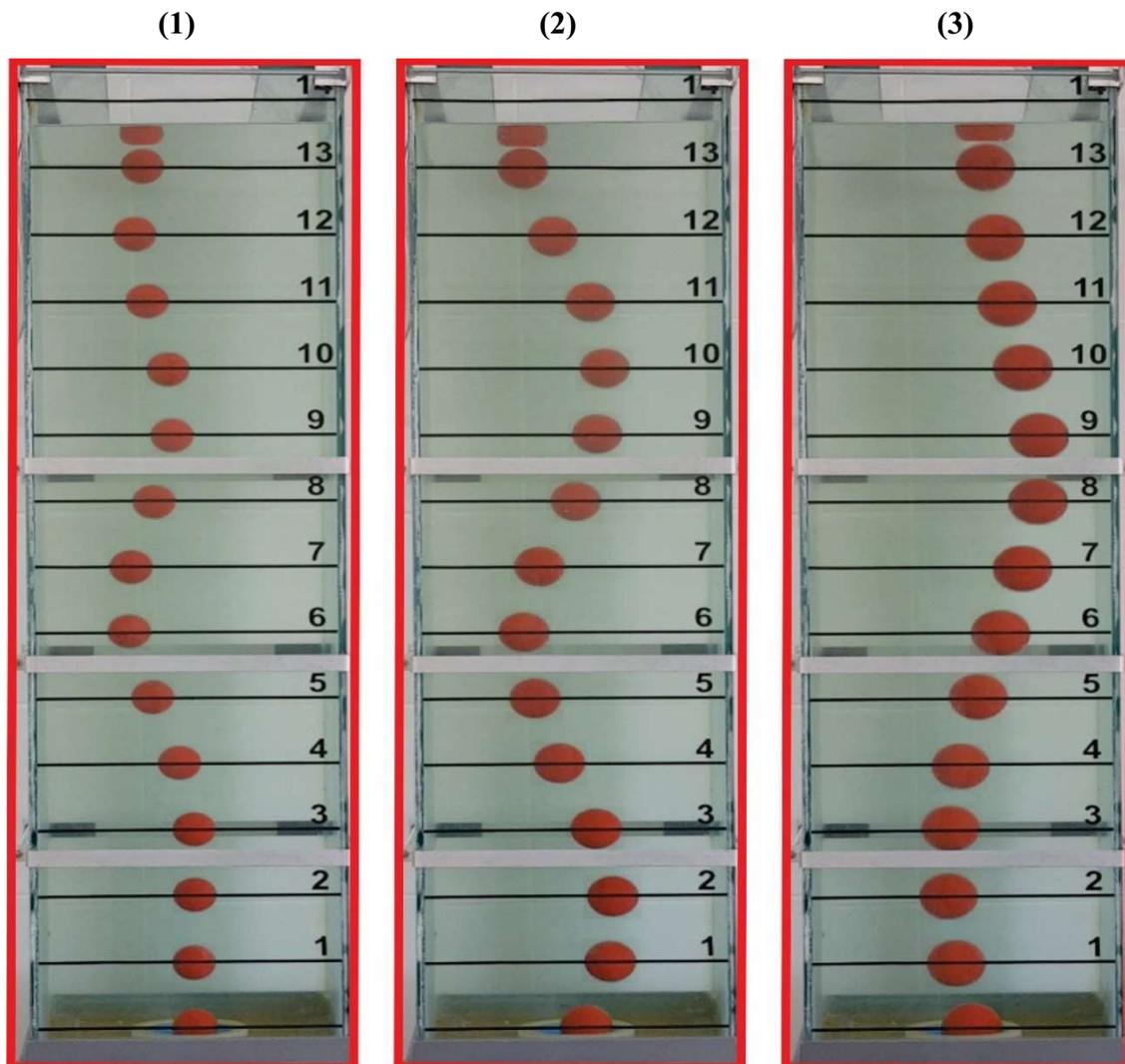


Figura 4.12 - Influência do efeito de parede para os modelos esféricos (1), (2) e (3) durante a realização do experimento de velocidade terminal.

Na Figura 4.13, observa-se a influência do efeito de parede para os tomates caqui em todos os estádios de maturação, durante a realização do experimento de velocidade terminal.

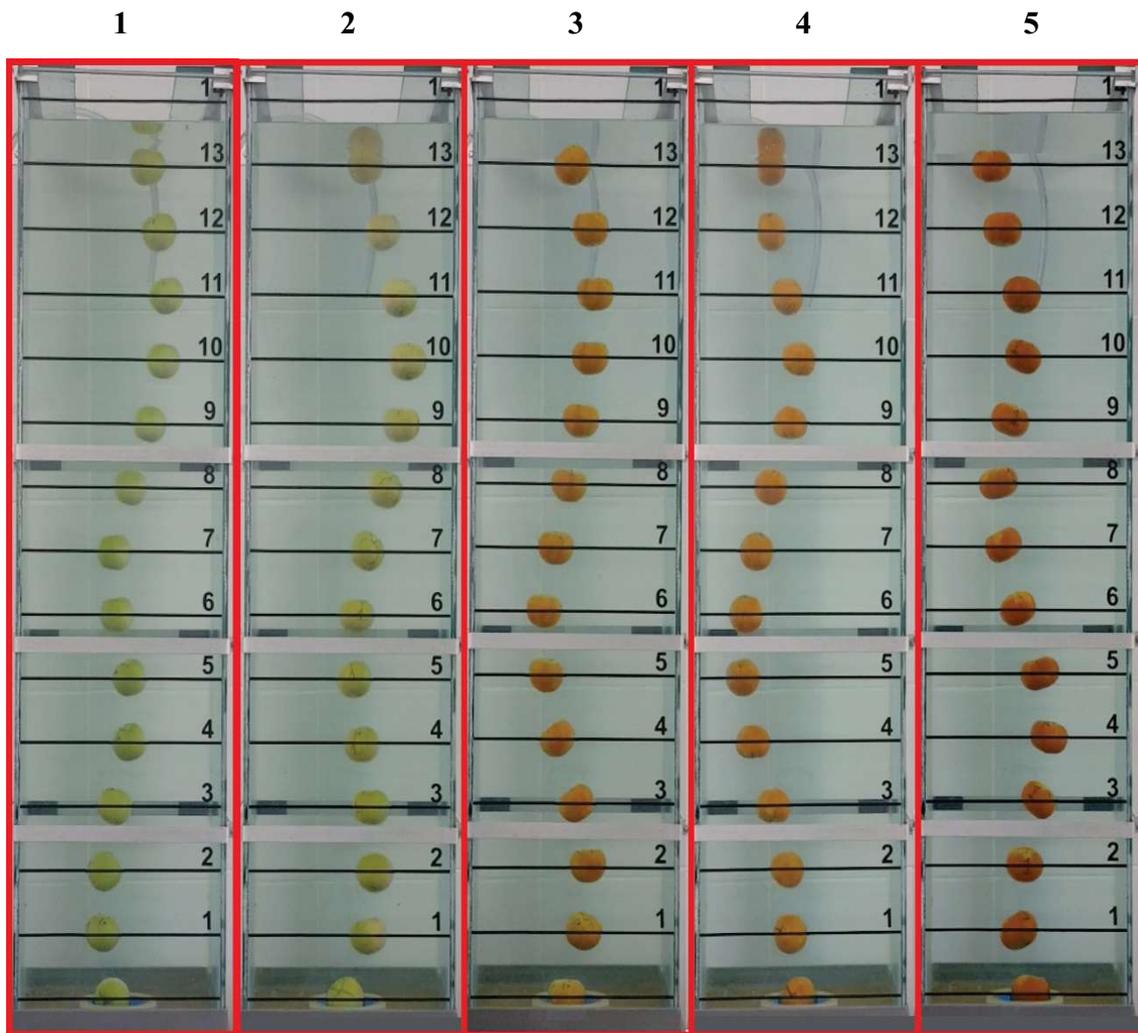


Figura 4.13 - Influência do efeito de parede para os tomates da variedade caqui nos cinco estádios de maturação.

Na Figura 4.14, verifica-se a influência do efeito de parede para os tomates da variedade italiano em todos os estádios de maturação, durante a realização do experimento de velocidade terminal.

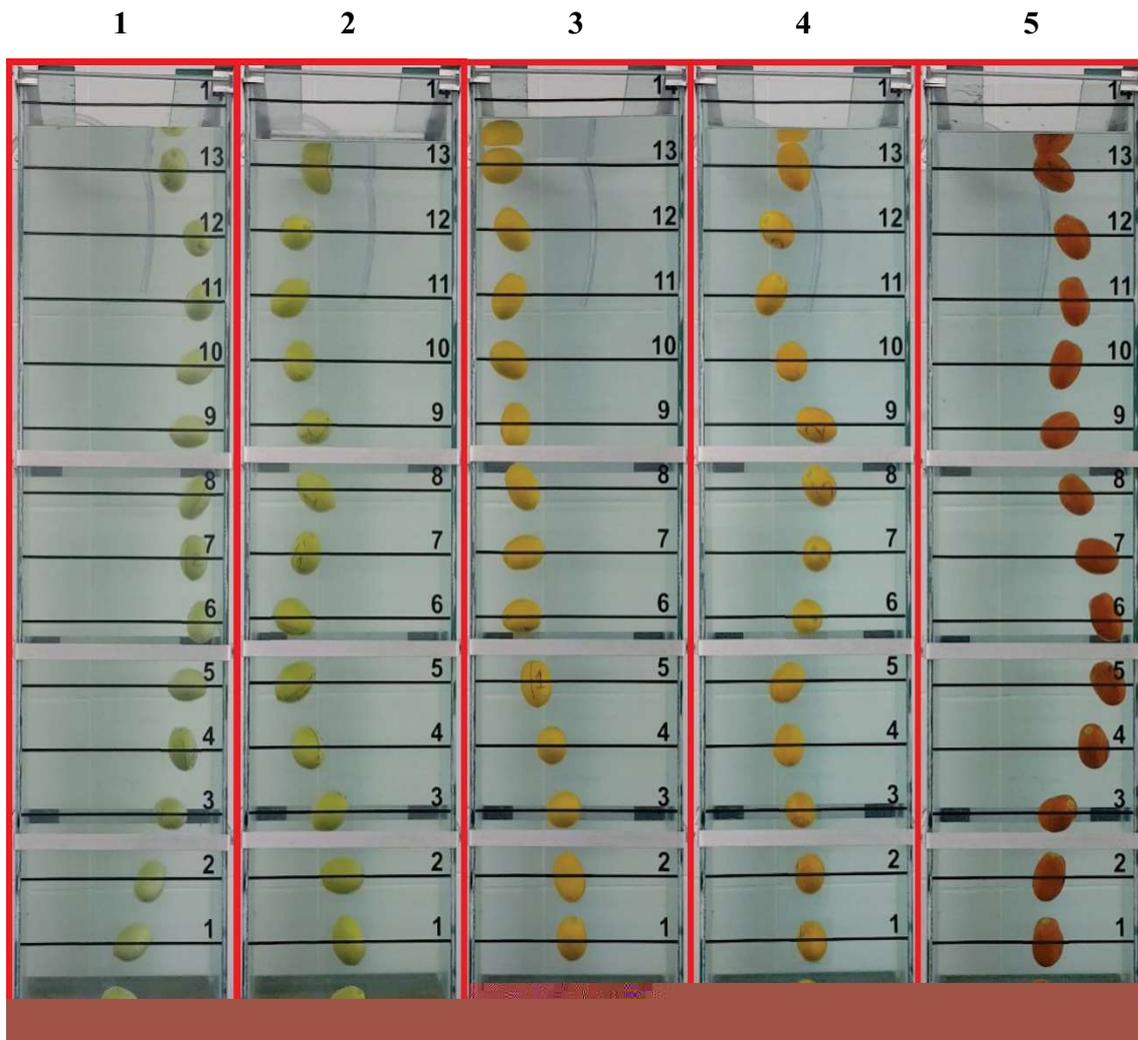


Figura 4.14 - Influência do efeito de parede para os tomates da variedade italiano nos cinco estádios de maturação.

Conforme analisado nas Figuras 4.12 a 4.14, e discutido nos itens 4.51 a 4.53, tanto os modelos esféricos quanto as duas variedades de frutos ficaram dentro do critério de $\beta < 0,25$, segundo Massarani (1990). Porém, os valores de K_p não foram $\geq 0,99$. Para os modelos esféricos e para os tomates da variedade caqui, efetivamente não houve efeito de parede significativo, uma vez que os mesmos não se chocaram em nenhum momento na parede da coluna. Entretanto, os tomates da variedade italiano apresentaram efeito de parede em alguns frutos, uma vez que, em alguns ensaios, chocaram-se na parede durante o movimento de ascensão.

Ao se analisar as Figuras 4.15 a 4.16, percebe-se que, nas duas variedades de tomates, a parte interna dos frutos não é distribuída de forma homogênea. Esse fato influencia diretamente na trajetória do fruto durante o transporte, principalmente em relação aos da variedade italiano, que obtiveram valores de velocidade terminal maiores

e, conseqüentemente, coeficiente de arraste menor dos que os da variedade caqui. Devido à forma do fruto, ligado à sua geometria externa e interna, os tomates da variedade italiano golpearam várias vezes contra a parede do tubo, mesmo se encontrando dentro do critério de $\beta < 0,25$, segundo Massarani (1990).



Figura 4.15 - Estrutura interna do tomate da variedade caqui nos 5 estádios de maturação.



Figura 4.16 - Estrutura interna do tomate da variedade italiano nos 5 estádios de maturação.

Esses dados também foram observados por Gonzaga et al. (2007) em um estudo sobre os parâmetros hidrodinâmicos de chuchu fatiado em diferentes formas geométricas definidas, submetidas à queda em tubos com 50, 100 e 150 mm de diâmetro e 1000 mm de altura, em que foi analisado os dados experimentais segundo os modelos matemáticos de Isaacs e Thodos (1967), Clift et al. (1978) e Mohsenin (1986). Constatou-se que, à medida que se aumenta o diâmetro do tubo de queda, a velocidade terminal aumenta para todas as peças, comprovando a influência do diâmetro do tubo na velocidade terminal dessas partículas em água. Também foi observado que os cilindros e os paralelepípedos de chuchu, de modo geral, apresentaram velocidades maiores do que os discos e placas, e coeficiente de arraste menor, independentemente do diâmetro do tubo de queda analisado, evidenciando a influência da forma da partícula na velocidade terminal. Em relação ao efeito de parede, observaram que o mesmo foi mais presente nos tubos de 50 mm para as peças cilíndricas e em forma de paralelepípedos em que $\beta = 0,34$, e o menor efeito foi verificado para discos e placas planas quadradas de 8 mm no tubo de 150 mm em que $\beta = 0,05$.

Para os frutos da variedade caqui, os mesmos apresentaram orientação para os estádios de 1 a 5, respectivamente as médias de: 86,14; 88,29; 88,32; 88,46; 86,69 (°). Já a orientação do fruto da variedade italiano, apresentou para os estádios de 1 a 5, respectivamente as médias de: 14,49; 14,81; 15,14; 16,44; 61,89 (°). Silva (1999), em um estudo sobre velocidade terminal de frutos tropicais em água, observou que ameixa, maçã, goiaba e umbu têm orientação semelhante na água, ou seja, adotam posição de maior área em água.

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), e 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.

Ainda sobre a forma do fruto, como pode ser observado nas Figuras 4.17 a 4.20, é possível observar que, tanto os frutos da variedade caqui como os da variedade italiano, influenciam diretamente na orientação deles no transporte. Como já foi discutido, o tomate caqui com forma oblata apresentou uma orientação média em relação ao fluido de 87,58°, enquanto que os frutos da variedade italiano com forma prolata obtiveram em média 24,55°.

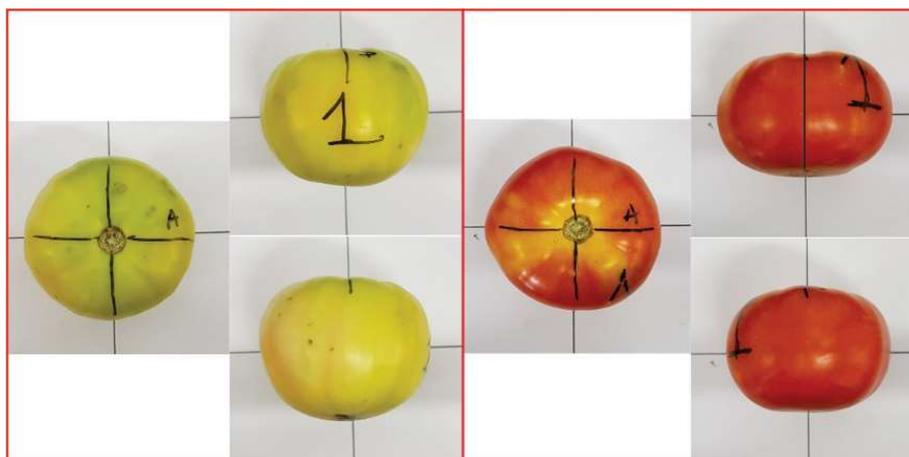


Figura 4.17 – Forma do tomate caqui em diferentes estádios de maturação

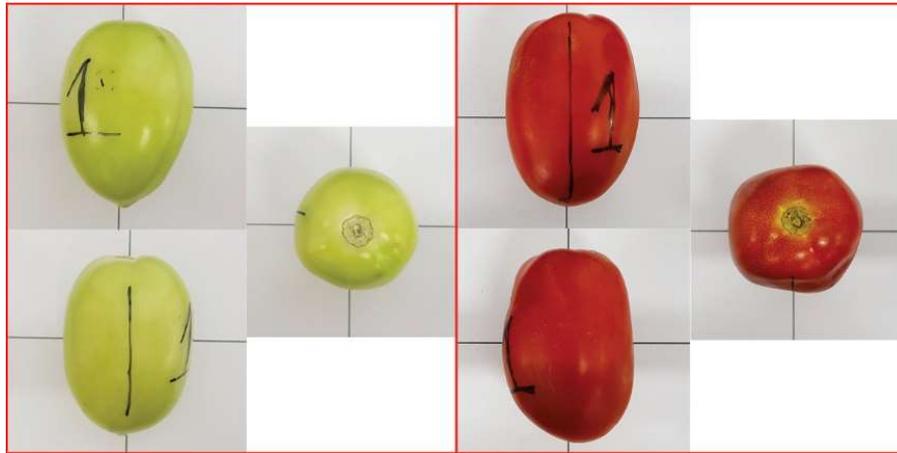


Figura 4.18 – Forma do tomate italiano em diferentes estádios de maturação

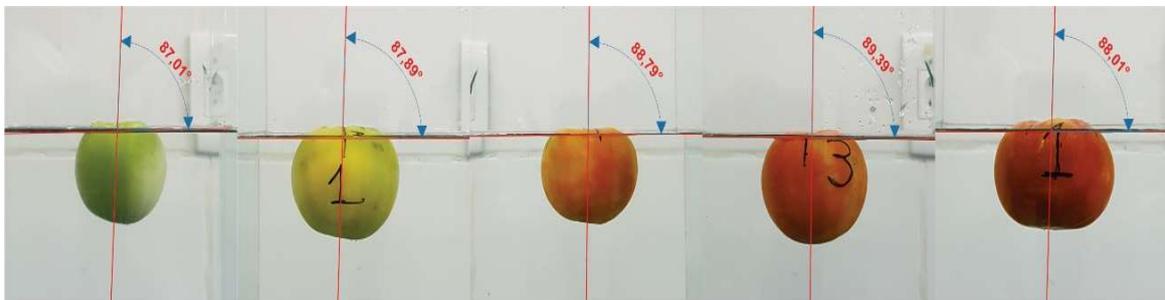


Figura 4.19 - Orientação no fluido do tomate variedade caqui em diferentes estádios de maturação.

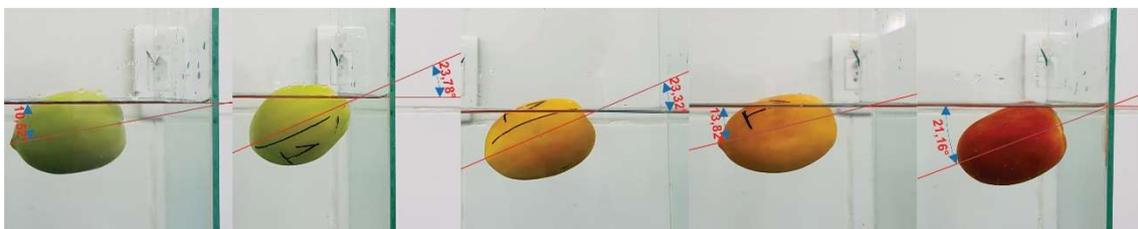


Figura 4.20 - Orientação no fluido do tomate variedade italiano em diferentes estádios de maturação.

Baseados nesses fatos, Silva (1999), ao observar a influência da forma de algumas frutas na velocidade terminal e no efeito de parede, concluiu que, nos frutos de umbu, houve uma aproximação das velocidades terminais dos valores obtidos entre o método 2 e o método 3 com todos os frutos das espécies analisadas, comprovando que outros parâmetros, além da esfericidade, podem ter afetado o coeficiente de arraste e, conseqüentemente, a velocidade terminal. Já para a maçã, a mesma apresentou comportamento semelhante ao da ameixa, uma vez que subiu rapidamente e com movimento rotacional durante todo o trajeto. Segundo Braga (1997), as forças, devido ao

movimento rotacional de uma esfera em um fluido, em muitos casos, são maiores do que a força de arraste causada pelo movimento.

Também concorda com esse estudo, o trabalho desenvolvido por Tennes, Levin e Stout (1969), no qual encontraram para a cereja uma velocidade terminal teórica maior que do que a velocidade terminal experimental, atribuindo esse fato à força causada pelo movimento rotacional da fruta durante a sua descida. De acordo com Braga (1997), esse fato nos leva a supor que o efeito de parede pode ter causado um retardamento na velocidade terminal das frutas, uma vez que, em sua pesquisa para determinar a velocidade terminal de laranjas e de um protótipo esférico de mesmo volume, utilizando uma metodologia similar, a autora concluiu que a velocidade terminal do protótipo foi igual à velocidade da laranja quando feita a correção da esfericidade, mas ainda inferior ao valor teórico (SILVA, 1999).

Karamanev (2001), em um estudo sobre a fluidodinâmica de esferas em um gás, através dos seus resultados observou que a trajetória de ascensão das esferas em ar foi espiral, e o ângulo entre o vetor velocidade e o plano horizontal foi constante e igual a 64° com um desvio de $\pm 6\%$ para todos os tamanhos e número de Re estudados. E que o ângulo do vetor velocidade de esferas ascendendo em gás pode ser considerado igual, dentro do erro experimental, ao de esferas ascendendo em líquidos.

4.6 Modelagem matemática dos parâmetros fluidodinâmicos de tomate

Um dos objetivos desta pesquisa foi estabelecer correlações entre coeficiente de arraste, número de Reynolds e esfericidade, especificamente para este estudo, como também com base nas relações estabelecidas por Pettyjohn e Christiansen (1948) para partículas isométricas.

Nesta pesquisa com tomates foram trabalhadas duas variedades do estágio de maturação verde até o maduro. Foi observado que os tomates sofreram pequenas alterações em sua massa específica nos diferentes estádios de maturação, porém não foram suficientes para que o fruto mudasse seu comportamento em água, na qual ele manteve sua flutuação. Considerando os objetivos deste estudo, tal comportamento é um fato relevantemente favorável para projetos de unidades de processamento dessas frutas utilizando o transporte hidráulico.

Nas Figuras 4.21 e 4.22 verifica-se os gráficos logarítmicos dos tomates da variedade Caqui e da variedade italiano respectivamente, com seus valores de C_D em função de Reynolds segundo diversos autores:

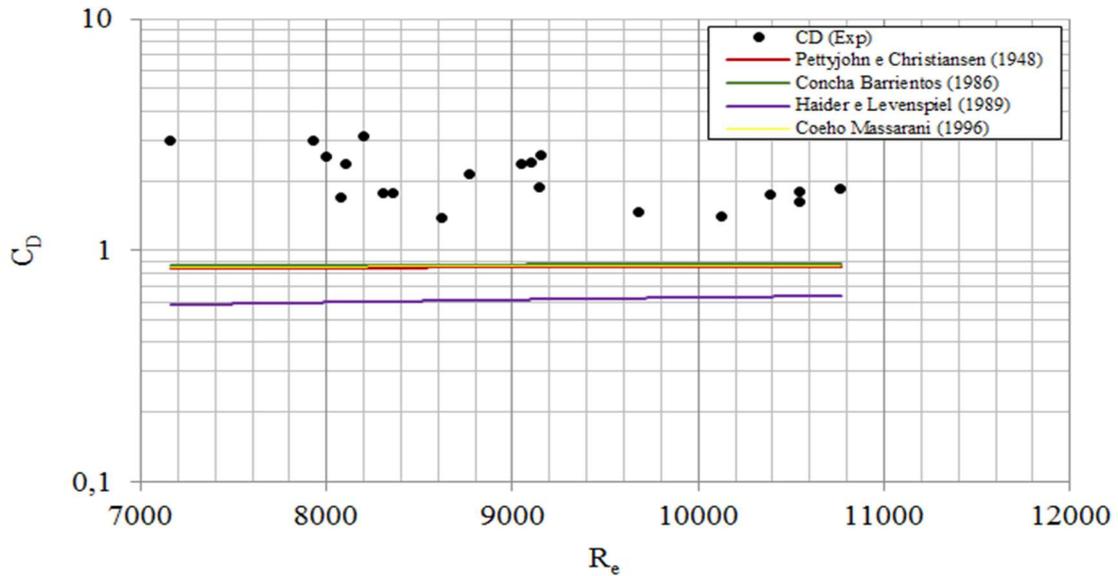


Figura 4.21 - Curva ($C_D \times R_e$) dos tomates da variedade caqui com seus valores experimentais e calculados.

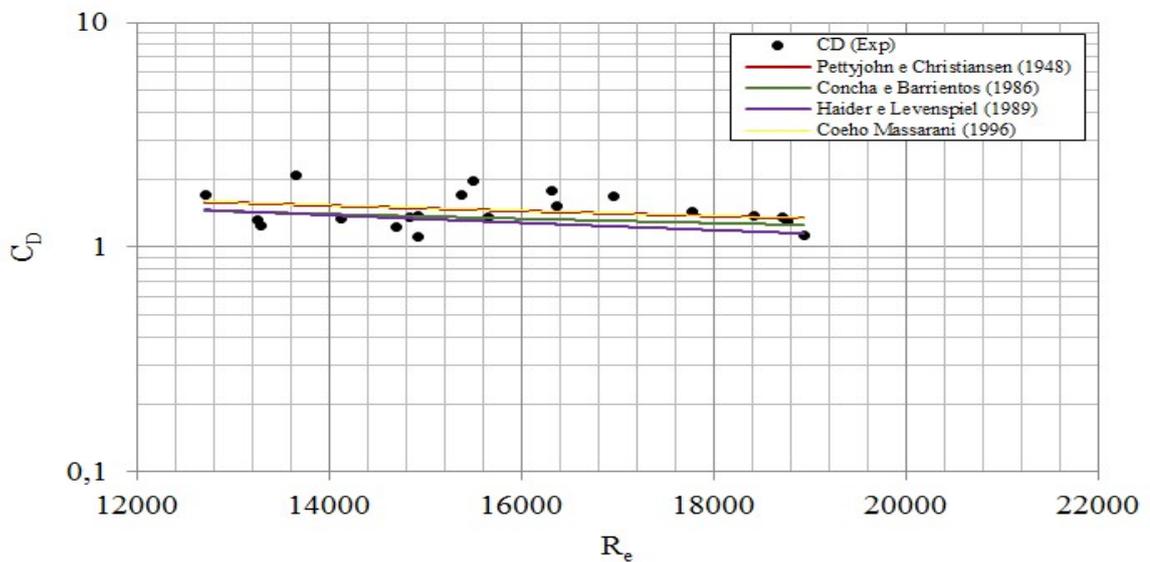


Figura 4.22 - Curva ($C_D \times R_e$) dos tomates da variedade italiano com seus valores experimentais e calculados.

Analisando-se as Figuras 4.21 e 4.22, observa-se o distanciamento dos dados experimentais dos valores calculados segundo a literatura para modelos isométricos. Geralmente, nos estudos de assentamento de partículas em água, considera-se uma

partícula homogênea, com um determinado formato, em que, se variando sua massa específica, obtêm-se os resultados de coeficiente de arraste nas várias faixas de Reynolds, do laminar ao turbulento.

Quando essa “partícula” é um material biológico, mais especificamente uma fruta, trata-se de um produto que apresenta variações de tamanho e forma, mesmo dentro de uma mesma variedade, e seu tamanho não é bem o que se pode chamar de partícula. Mais especificamente, os tomates analisados nesta pesquisa têm diâmetro médio em torno de 6 cm. Outra dificuldade que se tem é a sua composição heterogênea com zonas de preferência de orientação na água. Esses fatos tornam a modelagem mais difícil e específica.

Como os tomates das duas variedades apresentaram densidades muito próximas, nos estádios de maturação, passou-se, para fins de modelagem, a tratar a amostra em estudo apenas como tomates com esfericidade de 0,65 a 0,95. Ou seja, fez-se a modelagem de tomates, não importando seu estágio de maturação nem sua variedade, mas apenas os diferentes níveis de esfericidade.

4.6.1 Coeficiente de arraste, número de Reynolds e velocidade terminal de tomates

Na literatura existente, se tratando de materiais biológicos, heterogêneos por natureza, com zonas de preferências estimadas pela sua orientação em água, com diferentes padrões de forma e tamanho dentro de uma mesma variedade, torna-se difícil encontrar um modelo matemático disponível, que corresponda muitas vezes, aos valores obtidos experimentalmente.

Sabendo-se que, pelos ensaios hidrodinâmicos dos tomates, obteve-se número de Reynolds na faixa de 7000 a 19000, significa que o tomate se moveu na região de Newton, caracterizado pelo regime turbulento (Figura 2.8) em que, nessa região, o coeficiente de arraste para esferas é praticamente constante e igual a 0,44, e a literatura recomenda uma correção simples desse coeficiente, com base apenas na esfericidade para essa região, quando o objeto for isométrico.

Nesse sentido, com base nas considerações anteriores, os tomates foram organizados por ordem de esfericidade, que é basicamente o parâmetro que exerce maior influência nos parâmetros hidrodinâmicos, e as equações representativas para coeficiente de arraste e número de Reynolds foram obtidas da seguinte forma:

$$C_D = f1(Re, \varphi) \quad (70)$$

$$Re = f2(C_D Re^2, \varphi) \quad (71)$$

$$Re = f3(C_D/Re, \varphi) \quad (72)$$

em que:

C_D - Coeficiente de arraste

Re - Número de Reynolds

φ - Esfericidade

Na Tabela 4.22, encontram-se as correlações obtidas para os parâmetros fluidodinâmicos de tomate durante ascensão livre em água.

Tabela 4.22 – Correlações obtidas nesta pesquisa (MELO e DUARTE, 2019) para os parâmetros fluidodinâmicos de tomate, durante ascensão livre em água, para faixa de esfericidade $0,75 \leq \varphi \leq 1^*$, no Regime de Newton ($7000 \leq Re \leq 19000$).

Variável	Correlação	Valor médio e desvio Padrão
$C_D = f1(Re, \varphi)$ Este trabalho	$C_{D1} = 6,315\varphi - 3,648$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}} = 1 \pm 0,08$
$C_D = f1(Re, \varphi)$ Este trabalho usando as correlações de PettyJohn e Christiansen (1948)	$C_{D2} = \left(\left(\frac{24}{K1 Re} \right)^{0,3679} + (k2)^{-0,1338} \right)^{1/0,1706}$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}} = 1 \pm 0,05$
$Re = f2(C_D Re^2, \varphi)$ Este trabalho usando as correlações de PettyJohn e Christiansen (1948)	$Re = \text{Exp} \left\{ \left(\frac{K1 C_D Re^2}{1,2549} \right)^{0,4873} + \left(\frac{C_D Re^2}{0,1880k2} \right)^{0,7216} \right\}^{0,6129}$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}} = 1 \pm 0,01$
$Re = f3(C_D/Re, \varphi)$ Este trabalho usando as correlações de PettyJohn e Christiansen (1948)	$Re = \left[\left(\frac{24}{K1 (C_D/Re)} \right)^{0,0067} + \left(\frac{K2}{C_D/Re} \right)^{-0,6654} \right]^{111,1833}$	$\frac{(C_D)_{exp}}{(C_D)_{cor}} = 1 \pm 0,01$

*A esfericidade 1 foi conseguida com a confecção de modelo, utilizando impressora 3D (Item 3.4.2.3 - Efeito da forma (modelos esféricos).

$$Re = \frac{v_t D_p \rho_f}{\mu}; \quad C_D Re^2 = \frac{4\rho_f |\rho_p - \rho_f| g D_p^3}{3\mu^2}; \quad C_D / Re = \frac{4|\rho_p - \rho_f| \mu g}{\rho_f^2 v_t^3};$$

Correlações de PettyJohn e Christiansen (1948):

$$K_1 = 0,843 \log_{10} \left(\frac{\varphi}{0,065} \right); K_2 = 5,31 - 4,88 (\varphi)$$

Baseada nas correlações da Tabela 4.22, na Tabela 4.23 encontra-se os parâmetros hidrodinâmicos experimentais e os calculados dos tomates, segundo as correlações obtidas nesta pesquisa (MELO e DUARTE, 2019) - (CD1) e segundo este trabalho, usando as correlações de (PETTYJOHN e CHRISTIANSEN, 1948) - (CD2):

Tabela 4.23 – Parâmetros hidrodinâmicos experimentais e calculados dos tomates, segundo as correlações obtidas nesta pesquisa (MELO e DUARTE, 2019) - (CD1) e segundo este trabalho, usando as correlações de (PETTYJOHN e CHRISTIANSEN, 1948) - (CD2):

Repetições Tomates	Esfer. (Adim)	$C_{D1} = 6,315\varphi - 3,648$		$C_{D2} = \left(\left(\frac{24}{K1 Re} \right)^{0,3679} + (k2)^{-0,1338} \right)^{1/0,1706}$				VT2 (m/s)	CD (exp)	VT (exp) (m/s)
		CD1	VT1 (m/s)	Re	K1	K2	CD2			
1	0,761	1,158	0,221	12525	0,901	1,596	1,284	0,210	1,250	0,208
2	0,771	1,223	0,245	13506	0,906	1,546	1,289	0,238	1,239	0,234
3	0,787	1,322	0,286	16901	0,913	1,469	1,282	0,290	1,378	0,266
4	0,800	1,401	0,239	14324	0,919	1,408	1,357	0,243	1,352	0,233
5	0,827	1,574	0,254	15434	0,931	1,274	1,423	0,267	1,435	0,258
6	0,860	1,785	0,142	9135	0,946	1,111	1,770	0,143	1,765	0,138
7	0,889	1,968	0,157	9721	0,958	0,970	1,880	0,161	1,763	0,163
8	0,909	2,089	0,150	8987	0,966	0,876	2,091	0,150	2,296	0,141
9	0,911	2,103	0,129	8300	0,966	0,866	2,118	0,128	2,012	0,128
10	0,914	2,126	0,129	8028	0,968	0,848	2,188	0,127	2,247	0,122
11	0,933	2,245	0,144	8323	0,975	0,756	2,318	0,142	2,259	0,141
Média		1,727	0,191	11380	0,941	1,157	1,727	0,191	1,727	0,185
Desvio Padrão		0,404	0,059	3240	0,028	0,312	0,411	0,060	0,421	0,055

Analisando-se a Tabela 4.23, observa-se que, mesmo os valores de desvio padrão terem dado altos, os quais são devidos à heterogeneidade dos frutos, tanto no modelo matemático apresentado nesta pesquisa (MELO e DUARTE, 2019) – CD1 quanto no modelo desta pesquisa utilizando as correlações de (PETTYJOHN e CHRISTIANSEN, 1948) – CD2, os valores de média de CD1 e de CD2 corresponderam exatamente à média dos valores experimentais de CD = 1,727. Em relação aos valores de velocidade terminal,

os valores médios calculados de V_{t1} e V_{t2} foram de 0,191 m/s, bem próximos da média dos valores experimentais que foram de $V_t (exp) = 0,185$ m/s. Desse modo, pode-se concluir que os modelos apresentados nessa pesquisa foram os que melhor corresponderam aos valores experimentais, comparados com os modelos existentes na literatura.

Nas Figuras 4.23 e 4.24, observa-se os gráficos logarítmicos de $(C_D \times R_e)$ dos valores experimentais e dos calculados para tomates com esfericidade de $0,75 \leq \phi \leq 1^*$, no Regime de Newton ($7000 \leq Re \leq 19000$), de acordo com o modelo 1 (CD1) com as correlações obtidas nesta pesquisa, e segundo o modelo (CD2), tomando como base as correlações desta pesquisa e de PettyJonh & Christiansen (1948):

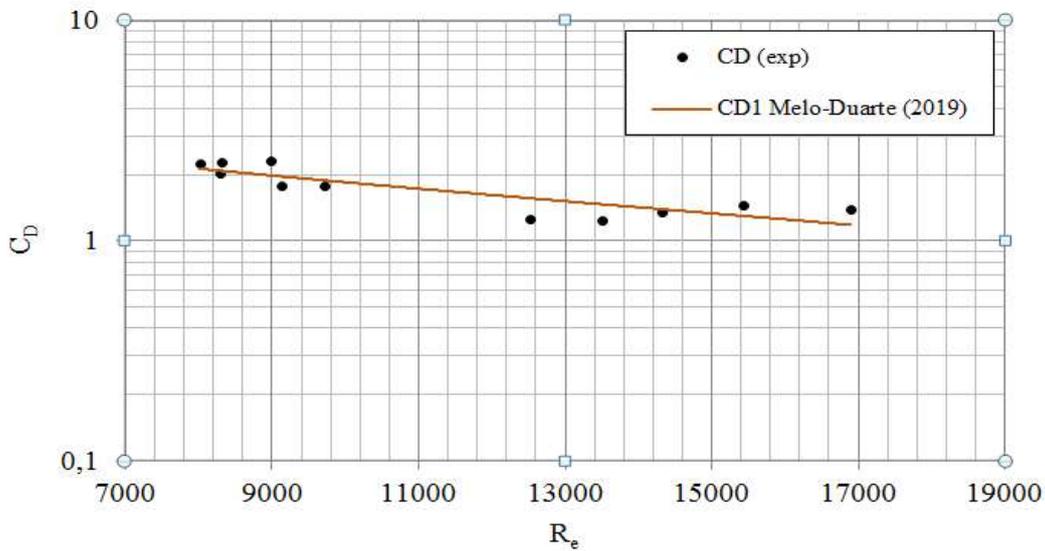


Figura 4.23 - Curva $(C_D \times R_e)$ dos valores experimentais e calculados dos tomates com esfericidade de $0,75 \leq \phi \leq 1^*$, no Regime de Newton ($7000 \leq Re \leq 19000$) segundo (MELO e DUARTE, 2019).

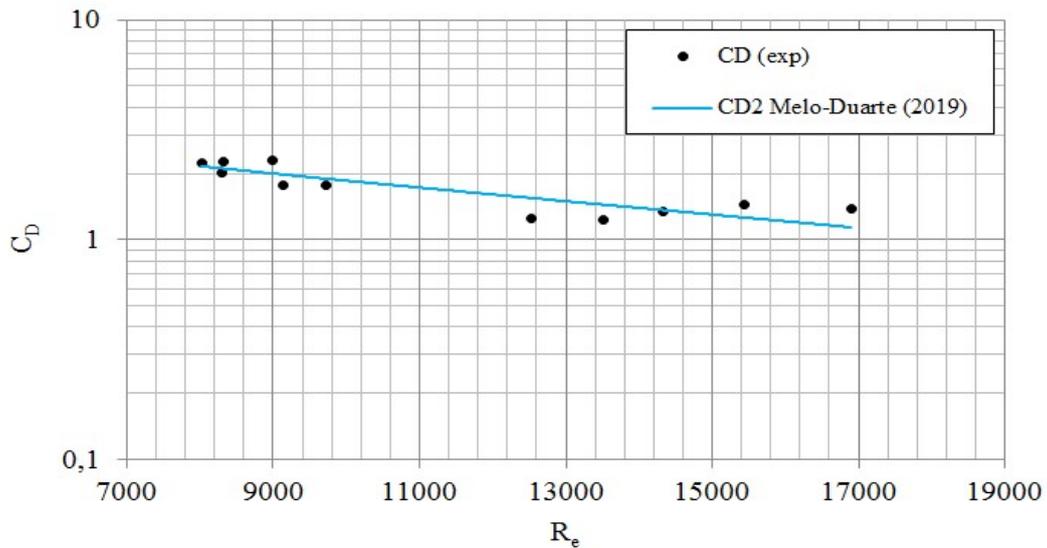


Figura 4.24 - Curva ($C_D \times R_e$) tomates com esfericidade de $0,75 \leq \phi \leq 1^*$, no Regime de Newton ($9000 \leq R_e \leq 16000$) segundo (MELO e DUARTE, 2019), usando as correlações de (PETTYJOHN E CHRISTIANSEN, 1948).

Analisando-se as curvas ($C_D \times R_e$) das Figuras 4.24 e 4.25, observa-se o que já foi explanado anteriormente na análise da Tabela 4.23, uma vez que os valores calculados tanto de C_D quanto de velocidade terminal, baseados nos modelos desta pesquisa (CD1) e usando as correlações de (PETTYJOHN e CHRISTIANSEN, 1948) (CD2), apresentaram boa proximidade dos valores obtidos experimentalmente para esses parâmetros hidrodinâmicos.

5 CONCLUSÕES

- A massa dos tomates da variedade caqui nos cinco estádios de maturação foi em média 0,1392 kg; o volume foi em média $1,468 \times 10^{-4} \text{ m}^3$; tomando como base os diâmetros (D_A , D_B e D_C) dos tomates caqui, encontrou-se um diâmetro médio da partícula em torno de $6,28 \times 10^{-2} \text{ m}$, e da esfera equivalente de $6,53 \times 10^{-2} \text{ m}$; os valores de esfericidade dos frutos nos cinco estádios de maturação foi em média de 0,92; e o teor de água teve média de 94,65 (%).
- A massa dos tomates da variedade italiano nos cinco estádios de maturação foi em média igual a 0,1419 kg, e o volume, $1,552 \times 10^{-4} \text{ m}^3$; o valor médio de massa específica foi de 916 kg.m^{-3} ; tomando como base os diâmetros (D_A , D_B e D_C) dos tomates italiano, encontrou-se um diâmetro médio da partícula em torno de $6,48 \times 10^{-2} \text{ m}$, e da esfera equivalente de $6,66 \times 10^{-2} \text{ m}$; a esfericidade foi em média de 0,79; a área superficial, a média foi em torno de $0,143 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ e a área projetada média foi de $0,342 \times 10^{-2} \text{ m}^2$; o teor de água teve média de 95,43 (%).
- A média da firmeza nos cinco estádios de maturação para os tomates da variedade caqui foram, respectivamente, 5,85; 5,04; 4,27; 3,45 e 2,91 N, e, para os tomates da variedade italiano, foram, respectivamente, 5,24; 4,32; 3,82; 3,48 e 2,09 N, registrando-se um decréscimo nos valores de força para a perfuração do fruto do estádio verde ao maduro, ocasionado pelo amadurecimento dos mesmos.
- Tanto para os tomates da variedade caqui quanto para os tomates da variedade italiano, não houve alterações em suas características físicas com o avanço do estádio de maturação que fossem suficientes para ocasionar influências do seu comportamento em água.
- Em relação aos parâmetros hidrodinâmicos, os tomates da variedade caqui apresentaram, durante sua ascensão em água, número de Reynolds médio de 9001, C_D médio de 2,094 e velocidade terminal média de $0,139 \text{ m.s}^{-1}$. Para os tomates da variedade italiano, o número de Reynolds obtido teve média de 15763 e C_D médio de 1,474 para uma velocidade terminal média de $0,236 \text{ m.s}^{-1}$.

- Os frutos da variedade italiano apresentaram velocidade terminal e número de Reynolds maiores; conseqüentemente, os mesmos obtiveram valores de coeficiente de arraste menores do que os da variedade caqui.
- A velocidade terminal do tomate da variedade italiano foi 1,70 vezes a velocidade do tomate caqui, constatando-se que existe influência do tamanho e da forma do fruto na sua velocidade terminal, visto que essas frutas possuem densidade muito próximas.
- Para os tomates da variedade italiano, existe uma relação entre o diâmetro da esfera equivalente e o fator de forma do produto esfericidade.
- Os frutos se encontraram no regime de Newton, mostrando que tendem a se manter na posição de máxima resistência durante a subida, o que acaba resultando em uma maior força de resistência a subida do fruto, o que pode ser visto ao se comparar o coeficiente de arraste bem maior na variedade caqui de 2,094 contra 1,474 para a variedade italiano.
- Tanto para os tomates da variedade caqui quanto italiano, observou-se o aumento da esfericidade dos frutos com um pequeno aumento da velocidade terminal.
- Em relação aos modelos esféricos confeccionados para o estudo da forma com mesma massa específica dos tomates e D_p (0,055; 0,065 e 0,075) m, o número de Reynolds foi, respectivamente, 12844, 16,034 e 19789, o C_D foi 0,715; 0,834; 0,756; e a velocidade terminal foi (0,234; 0,248 e 0,267) m.s⁻¹.
- Em relação aos valores de velocidade terminal e coeficiente de arraste calculados para os tomates da variedade caqui, todos os modelos isométricos utilizados apresentaram valores maiores que os obtidos experimentalmente.
- Em relação aos valores de velocidade terminal calculados para os tomates da variedade italiano, os modelos isométricos utilizados de Coelho e Massarani e Pettyjohn e Christiansen apresentaram valores menores do que os experimentais, enquanto que os modelos de Concha e Barrientos e Haider e Levenspiel, apresentaram valores maiores do que os experimentais. Em relação ao C_D , em todos os modelos calculados, estes valores foram um pouco menores do que o valor experimental.
- As correlações obtidas nesta pesquisa (MELO E DUARTE, 2019) e segundo este trabalho, usando as correlações de (PETTYJOHN E CHRISTIANSEN, 1948) para os parâmetros fluidodinâmicos de tomate, durante ascensão livre

em água, para faixa de esfericidade $0,75 \leq \phi \leq 1$ no Regime de Newton ($7000 \leq Re \leq 19000$), foram as que melhor corresponderam aos valores experimentais de velocidade terminal e coeficiente de arraste de tomates, comparados com os modelos existentes na literatura.

- Em relação aos modelos esféricos, os coeficientes de arraste calculados foram inferiores aos valores obtidos experimentalmente. Porém, os valores de velocidade terminal calculados foram maiores do que os valores experimentais.
- Para os tomates da variedade caqui, a relação entre o diâmetro dos tomates pelo diâmetro do tubo foi em média de $\beta = 0,172$. Os cálculos médios dos efeitos de parede, segundo os autores, foi de $Kp1 = 0,971$ e $Kp2 = 0,929$.
- Para os tomates da variedade italiano, a relação entre o diâmetro dos tomates pelo diâmetro do tubo foi em média de $\beta = 0,176$. Enquanto os cálculos médios dos efeitos de parede, segundo os autores, foi de $Kp1 = 0,970$ e $Kp2 = 0,926$.
- Os frutos da variedade caqui apresentaram orientação em relação ao nível da água, para os estádios de 1 a 5, respectivamente iguais a 86,14; 88,29; 88,32; 88,46; 86,69°. Enquanto a orientação do fruto da variedade italiano, nos estádios de maturação de 1 a 5, foram, respectivamente, 14,49; 14,81; 15,14; 16,44; 61,89°.
- Tanto as duas variedades de frutos, como também os modelos esféricos, apresentaram valores de $\beta < 0,25$, porém não obtiveram valores de $Kp \geq 0,99$, percebendo-se que a forma influenciou na trajetória desses frutos, apresentando efeito de parede nos tomates da variedade italiano segundo Massarani (1990).
- A forma do fruto e sua estrutura interna influenciam diretamente os parâmetros hidrodinâmicos, como a orientação e a trajetória do fruto durante o transporte em água.
- Para os modelos esféricos de mesma massa específica dos tomates, foi possível observar que o modelo de maior diâmetro tendeu a se aproximar mais da parede do tubo do que o de menor diâmetro.
- Existe viabilidade de projeto para adoção do transporte hidráulico de tomates das variedades caqui e italiano, uma vez que os tomates estudados apresentaram massa específica real abaixo da água, do estágio verde ao maduro, existindo a garantia da flutuação dos frutos em qualquer nível de maturação sem entupimento do canal de transporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAN, F.F. Functional dependence of drag coefficient of a sphere on Reynolds number. **Physics of Fluids**, London, v.13, n.8, p.2194-2195, 1970.

ALMEIDA, O.P. **Estudo do efeito de fronteiras rígidas sobre a velocidade terminal de partículas isométricas**. 86 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

ALMEIDA, E.I.B.; FILHO, F.A.S.; SANTOS, S.R.B.; BARBOSA, J.A.; CÔRREA, M.C.M. Qualidade física de tomates comercializados na empresa Paraibana de abastecimento e serviços agrícolas de Campina Grande. **Revista Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa/PB, v.5, n.3, p.33-37, 2011.

ALVARADO, J. D.; AGUILERA, J. M. **Métodos para medir propriedades físicas em Indústrias de Alimentos**. Zaragoza: Acribia S.A, 2001.

ANDRÉ, A.M.M.C.N. Propriedades termo físicas de manga *Tommy Atkins* durante armazenagem refrigerada. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2015.

ARAÚJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; SOUZA, C.M.A.; GONÇALVES, A.A.; VILHASANTI, H.C.B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v.18, n.3, p.279 - 286, 2014.

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: **Anais do Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, Uberlândia – MG, v.1, p.29 - 34, 1996.

AWAD, M. **Fisiologia pós-colheita de frutos**. São Paulo: Nobel, 1993.

AYDIN, C. Some engineering properties of peanut and kernel. **Journal of Food Engineering**, Konya, Turkey v.79, p.810-816, 2007.

BANDE, Y. M.; ADAM, N. M.; AZNI, Y.; JAMAREI, O. Moisture-dependent physical and compression of bitter melon (*Citrullus colocynthis lanatus*) seeds. **International Journal of Agricultural Research**, v.7, p.243-254, 2012.

BARYEH, E.A. Physical properties of millet. **Journal of Food Engineering**, London, v.51, n.1, p.39-46, 2002.

BEZERRA, C.S.; CASTRO, J.S.; PADINHA, M.L; ROMANO, C.; OTANI, F.S. Caracterização físico-química de tomate Italiano produzidos na região Oeste do Pará. **Revista Agro ecossistemas**, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, Pará, v.10, n.2, p. 37-49, 2018.

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

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

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC livros Técnicos, 2002.

BORGUINI, R.G.; SILVA, M.V. Características físico-químicas e sensoriais do tomate (*lycopersicon esculentum*) produzido por cultivo orgânico em comparação ao convencional. **Revista Alimentos e nutrição**, Araraquara, v.16, n.4, p. 355-361, out./dez. 2005.

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

BRAGA, M.E.D.; SANTANA, M.F.S. Parâmetros aerodinâmicos que influenciam na separação de amendoim. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.1, n.1, p.67-73, 1999.

BRASIL. Ministério da Agricultura do Abastecimento e da Reforma Agrária. Portaria nº 553 de 30 de agosto de 1995. Dispõe sobre a Norma de Identidade, Qualidade, Acondicionamento e Embalagem do Tomate *in natura*, para fins de comercialização e revoga as especificações de Identidade, Qualidade, Acondicionamento e Embalagem do Tomate, estabelecidas pela Portaria nº. 76, de 25 de fevereiro de 1975. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, set, 1995.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria SARC nº 085 de 06 de março de 2002. Propõe o Regulamento técnico de identidade e qualidade para classificação do tomate. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, mar, 2002.

BRASIL, **Boletim Hortigranjeiro/Companhia Nacional de Abastecimento**, v.4, n.12. Brasília: CONAB, 2018.

BRAUER, H.; SUCHER, D. Stationare stoff-und warmeubergang na stationar quer angestromten zylindern. **Warme-und Stoffubertragung**, Berlin, p. 1-12, 1976.

CAMARGO, G.A. **Secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) para conserva: estudo de parâmetros com base na qualidade final**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, SP, 2000.

CARUSO, M.W. **Análise do efeito combinado da irradiação e do tratamento do tratamento hidrotérmico nas características de qualidade das mangas para exportação**. 61f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, São Paulo, 2009.

CASA, J.; EVANGELISTA, R. M. Influência das épocas de colheita na qualidade de tomate cultivado em sistemas alternativos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 30, suplemento 1, p. 1101-1108, 2009.

CASQUET, E. **Princípios de economia agrária**. Zaragoza: Acribia, 1998.

CASTRO, V.A.S.P.T. **Controle do amadurecimentos pós-colheita do tomate Carmem tratado com ácido 2-cloroetil fosfônico**. Tese (Doutorado em engenharia agrícola) Campinas, S.P, 2003.

CENCI, S.A. **Processamento mínimo de frutas e hortaliças: tecnologia, qualidade e sistemas de embalagem**. Rio de Janeiro: Embrapa Agroindústria de Alimentos, 2011.

CERQUEIRA, T.S., JACOMINO, A.P., SASAKA, F.F., ALLEONI, A.C.C. Recobrimento de goiabas com filmes proteicos e de quitosana. **Tecnologia de pós-colheita**, Bragantia, Campinas, v.70, n.1, p.216-221, 2011.

CHHABRA, R.P.; TIU, C.; UHLHERR, P.H.T. **Creeping Motion of Spheres Through Ellis Mode/ Fluids, Rheo**, Acta, v. 20, p. 346-351, 1981.

CHHABRA, R.P. Wall effects on terminal velocity of non spherical particles in non-Newtonian polymer solutions. **Powder Tecnology**, n.88, p.39-44, 1996.

CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. In: Perdas Pós-colheita, ESAL/FAEPE, Piracicaba, p.65-88, 2005.

CLIFT, R.; GAUVIN, W. H. Motion of entrained particles in gas streams. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.50, p.23-30, 1970.

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

COELHO, R. M. L.; MASSARANI, G. **Fluidodinâmica de partículas: Ainda sobre correlações em base aos dados experimentais de Pettyjohn e Christiansen**. Relatório Técnico, LSL/COPPE, Rio de Janeiro, 1996.

CONCHA, F.; ALMENDRA, E.R. Settling velocities of particulate systems, 1. Settling velocities of individual spherical particles. **International Journal of Mineral Processing**, v.5, p.349-367, 1979.

CONCHA, F.; BARRIENTOS, A. Settling velocities of particulate systems, 4. Settling velocities of non spherical isometric particles. **International Journal of Mineral Processing**, v.18, p. 297-308, 1986.

CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F.M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.3, p.665-670, Campina Grande, PB, 2006.

CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.M.; BOTELHO, F.M.; TRETO, P.C.; ALVES, E.A. **Propriedades físicas e químicas inferentes na pós-colheita do café. Livro: Café na Amazônia.** Brasília, DF: Embrapa, 2015.

COSKUNER, Y.; KARABABA, E. Physical properties of coriander seeds (*Coriandrum sativum* L.). **Journal of Food Engineering**, v.80, p.408-416, 2007.

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

DARBY, R. Determining settling rates of particles, **Chemical Engineering**, nº103, p. 109, 1996.

DEWSBURY, K. H.; TZOUNAKOS, A.; KARAMANEV, D. G.; MARGARITIS, A. A. Wall effects for the free rise of solid spheres in moderately viscous liquids, **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 80, p.974- 978, 2002.

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**, n.743 STD, UDFS, 1966.

DONLEY, H.E. The drag force on a sphere. Undergraduate Mathematics and its Applications, (**UMAP**) **Journal**, v.12, n.1, p.47-80, 1991.

DOSSA, D.; FUCHS, F. **Tomate: análise técnico-econômica e os principais indicadores da produção nos mercados mundial, brasileiro e paranaense.** Boletim Técnico n.3, agosto de 2017.

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

FAO - Food and agriculture organization of the United nations. **FAOSTAT.** 2014.

FERREIRA, S.M.R.; FREITAS, R.J.S.; LAZZARI, E.N. Padrão de identidade e qualidade do tomate de mesa (*Lycopersicon esculentum* Mill). **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.1, p.329-335, 2004.

FERREIRA, R.M.A.; LOPES, W.A.R.; AROUCHA, E.M.M.; MANO, N.C.S.; SOUSA, C.M.G. Caracterização física e química de híbridos de tomate em diferentes estádios de maturação produzidos em Baraúna. **Revista Ceres**, Rio Grande do Norte, v.59, n.4, p.506-511, 2012.

FIDLERIS, V.; WHITMORE, R. L. Experimental Determination of Wall Effect for Spheres Falling Axially in Cylindrical Vessels. **British Journal of Applied Physics**, v.12, p. 490-494, 1961.

FILGUEIRA, F.A.R. **Novo Manual de Olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**, Viçosa: UFV, 2000.

FLORI, J.E. **Obtenção e avaliação de híbridos F1 de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) no grupo multilocular**. 144f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, 1993.

FOX, R. W., MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. **Introduction to fluid mechanics**. 6. ed. New York: Willey International, p.787, 2004.

FRANCIS, A. W. Wall Effect in Falling Ball Method for Viscosity. **Physics**, v.4, p.403-406, 1933.

GARIĆ-GRULOVIĆ, R.; BOSKOVIĆ-VRAGOLOVIĆ, N.; GRBAVCIĆ, Z.; ARSENIJEVIĆ, Z. Wall-to-bed heat transfer in vertical hydraulic transport and in particulate fluidized beds. **International Journal of heat and mass transfer**, p.5942-5948, 2008.

GONÇALVES, C.X. **Alterações moleculares, físico-químicas e fisiológicas em melões e tomates: Relações com Etileno e Citocininas**. 131 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) Universidade Federal de Pelotas, 2013.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; OLIVEIRA, G. H. H.; SANTOS, E. S. Propriedades físicas dos frutos de mamona durante a secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.33, p.148-155, 2008.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, Universidade Estadual de Maringá, Brasil, v.33, n.1, p.1-8, 2011.

GONZAGA, T.W.C. **Parâmetros hidrodinâmicos de vegetais fatiados em geometrias definidas**. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, 2006.

GONZAGA, T.W.C.; DUARTE, M.E.M.; RANGEL, M.E.M.C.M.; PIMENTEL, L.W.; PIMENTEL, N.W.; SANTANA, P.B.; OLIVEIRA, C.C.A. Características físicas e hidrodinâmicas de chuchu minimamente processados. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.9, n.1, p.83-98, 2007.

GOVIER, G.W. e AZIZ, K. **The flow of complex mixtures in pipes**. Van Nostrand Reinhold Co, New York, p.792, 1972.

GUEDES, M. A.; MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M.; FARIAS, P. A.; NÓBREGA, A. M. M. C. Caracterização física de grãos de soja utilizando processamento digital de imagens. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, p.277-292, 2011.

GUO, JUNKE. Motion of spheres falling through fluids. **Journal of Hydraulic Research**, v.49, n.1, p.32–41, 2011.

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

HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. **Powder Technology**, v. 58, p. 63-70, 1989.

IAL- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4 ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2018.

ISAACS, J. L., THODOS, G. The free-settling of solid cylindrical particles in the turbulent regime. **Canadian Journal Chemical Engineering**, v.45, p.150-155, 1967.

JOSHI, D. C.; DAS, S. K.; MUKHERJEE, R. K. Physical properties of pumpkin seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 54, n.3, p.219-229, 1993.

KARAMANEV, D. G. Equations for calculation of the terminal velocity and drag coefficient of solid spheres and gas bubbles. **Chemical Engineering Communications**, v.147, n.1, p.75-84, 1996.

KARAMANEV, D.G. The study of free of buoyant spheres in gas reveals the universal behaviour of free rising spheres in fluid in general. **International Journal of Multiphase Flow**, n.27, p.1479-1486, 2001.

KIBAR, H.; ÖZTÜRK, T. Physical and mechanical properties of soybean. **International Agrophysics**, v.22, p.239-244, 2008.

LAPPLE, C.E.; SHEPHERD, C.B. Calculation of particle trajectories. **Industrial & Engineering Chemistry**, v.32, n.4, p.605–617, 1940.

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

LIEN, C.C.; AY, C.; TING, C.H. Non-destructive impact test for assessment of tomato maturity. **Journal of Food Engineering**, v.91, n.3, p.402-407, 2009.

LIMA, R.M.F.; LUZ, J.A.M. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional. Parte I: lei de Stokes. **Revista escola de Minas**, Ouro Preto, MG, v.54, n.2, 2001.

LINO, A.C.L.; SANCHES, J.; NAKANO NETO, N.; DA SILVA, M.V.G.; ANTONIALI, S. Determinação do volume de tomate através de silhueta. **Horticultura Brasileira**, v.30, n.2, 2012.

LOEFLER, A.L.; RUTH, B.F. Particulate fluidization and sedimentation of spheres. **AIChE The Global Home of Chemical Engineers Journal**, New York, v.5, n.3, p.310-314, 1959.

LOURENÇO, G.A.; FINZER, J.R.D. Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo. **Brazilian Journal of food Technology**, Campinas, v.16, n.4, p.334-345, 2013.

LUENGO, R.F.A.; CALBO, A.G.; A.P, JACOMINO. **Densidade aparente de hortaliças e frutas em suas principais embalagens de comercialização no Brasil.** Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, v.1, 2007.

LURIE, S.; HANDROS, A.; FALLIK, E.; SHAPIRA, R. Reversible inhibition of tomato fruit gene expression at high temperature. **Plant Physiology**, Rockville, v.110, n.4, p.1207-1214, 1996.

MACANAN, D; XAVIER, C. **Tomate Caqui Itaipava F1. Topped premium: tecnologia em sementes.** Agristar do Brasil Ltda, 2016.

MACHADO. A. Q. **Produção de tomate italiano (saladete) sob diferentes Densidades de plantio e sistemas de poda visando ao consumo *in natura*.** 90 f. Dissertação de mestrado, UFLA, universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2002.

MAKISHIMA, N.; MELO, W.F. O rei das hortaliças. **Como cultivar, Embrapa hortaliças**, p. 28-32, 2017.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica da partícula sólida. Tópicos especiais em sistemas particulados**, v.3, p.117-160, 1990.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados.** 2.ed. Rio de Janeiro: E-papers serviços editoriais, 2002.

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.

MATTOS, J.S.; MEDEROS, B.J.T. Densidade de polpas de frutas tropicais: banco de dados e determinação experimental. **Revista Bio Engenharia**, Campinas, v.2, n.2, p.109-118, 2008.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials. **Journal of Food Engineering**, v.61, p.373-386, 2004.

MELO, F. R. G. Velocidade terminal de esferas em líquidos não-Newtonianos. **Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química (CD-ROM)**, Curitiba – PR, 2004.

MELO, F. R. G. **Fluidodinâmica de esferas leves e bolhas em líquidos.** 100f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

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.** 2.ed. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

MONTEIRO, C.S.; BALBI, M.E.; MIGUEL, O.G.; PENTEADO, P.T.P.; HARACEMIV, S.M.C. Qualidade nutricional e antioxidante do tomate “tipo italiano”. **Revista Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v.19, n.1, p.25-31, 2008.

MORDANT, N.; PINTON, J.F. Velocity measurement of a settling sphere. **The European Physical Journal B**, v.18, p.343-352, 2000.

MOURA, M.L.; SARGENT, S. A; OLIVEIRA, R.F. Efeito da atmosfera controlada na conservação de tomates colhidos em estágio intermediário de maturidade. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.56, n.1, p.135- 142, 1999.

NASCIMENTO, A.P.S.; DUARTE, M.E.M; ALMEIDA, R.D. Transporte hidráulico de batata: efeitos do tamanho e forma da partícula e do tamanho do tubo de queda na velocidade terminal. **Anais do XIII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande**, PIBIC/CNPq/UFCG, 2012.

NIMKAR, P. M.; CHATTOPADHYAY, P. K. Some physical properties of green gram. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.80, n.2, p.183-189, 2001.

NÓBREGA, A.M.M.C. **Efeito da forma e do diâmetro do tubo de queda no coeficiente de arraste em água para vegetais minimamente processados**. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2013.

NUNES, D.M.C. **Propriedades físicas, térmicas e aerodinâmicas de grãos de quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*)**. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2009.

OLIVEIRA, I.P.; OLIVEIRA, L.C.; MOURA, C.S.F.T.; JÚNIOR, A.F.L.; ROSA, S.R.A. Cultivo da goiabeira: do plantio ao manejo. **Revista Faculdade Montes Belos**, v.5, n.4, 2012.

OSEEN, C. W. **Neuere Methoden und Ergebnisse in der Hydrodynamik**. Editora Leipzig Akademische Verlagsgesellschaft m.b.h, 1927.

PAIVA, M.C.; FIORAVANÇO, J.C.; MANICA, I. Características físicas de quatro cultivares e duas seleções de goiabeira no 5º ano de produção em Porto Lucena, RS. **Ciência rural**, v.25, n.2, p. 209-213, 1995.

PALADINO, E.E. **Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial**. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

PARISOTTO, E.I.B. **Determinação de parâmetros, modelagem matemática e simulação numérica da secagem de polpa de tomate por *cast-tape drying***. 129 f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Alimentos) Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

PEÇANHA, Ricardo Pires. **Sistemas Particulados. Operações unitárias envolvendo partículas e fluidos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

PEIXOTO, T.R. **Determinação da velocidade terminal de sementes de *Brachiaria brizantha***. Projeto final de estágio supervisionado, Faculdade de agronomia e medicina veterinária, Universidade de Brasília, DF, 2012.

PETTYJOHN, E. S.; CHRISTIANSEN, E. B. **Effect of particle shape on free-settling rates of isometric particles**. Editora: Portella, J.A, 1948.

PREUKSCHAT, A.W. **Measurements of drag coefficients for falling and rising spheres in free motion**. Ph.D. Dissertation. California Institute of Technology, Pasadena CA. 1962.

RAUPP, D.S.; GARDINGO, J.R.; SCHEBESKI, L.S.; AMADEU, C.A.; BORSATO, A.V. Processamento de tomate seco de diferentes cultivares. **Revista Acta Amazônica**, v.39, n.2, p. 415-422, 2009.

RAZAVI, S. M. A.; EMADZADEH, B.; RAFE, A.; AMINI, A. M. The physical properties of pistachio nut and kernel as a function of moisture content and variety: Part I. Geometrical properties. **Journal of Food Engineering**, v.81, p.209-217, 2007.

RIBEIRO, V.S.; SOBRAL, M.C.; ALMEIDA, M.M.; SILVA, G.F. Propriedades físicas de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.1, p.1-6, 2002.

RODRIGUES, C.M.A.; PINHEIRO-SANTANA, H.M. É possível prevenir perdas de vitaminas em alimentos? **Nutrição em Pauta**, v.63, p.12-18, 2003.

RUBEY'S, W.W. Settling velocity of gravel, sand, and silt particles. **American Journal Science**, v.225, n.12, p.325-338, 1933.

SANTOS, F.F.B. **Obtenção e seleção de híbridos de tomate visando à resistência ao *tomato yellow vein streak virus* (toyvsv)**. 80 f. Dissertação (Mestrado em agricultura tropical e subtropical), Campinas, SP, 2009.

SASSERON, J. L. **Características dos grãos armazenados**. Viçosa, MG: Centreinar, 1980.

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

SHARMA, S.K.; MULVANEY, S. J.; RIZVI, S.S.H. Food process engineering – theory and laboratory experiments. **John Wiley & Sons Publication**, Cornell University, Ithaca, EUA, p. 216-218, 2000.

SILVA, A.O.E. **Velocidade terminal em água de algumas frutas tropicais**. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

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

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

SILVA, F.S.; CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; GONELI, A.L.D. Influência do teor de umidade na velocidade terminal de grãos de sorgo e milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.2, n.3, p.143-147, 2003.

SILVA, A. V. C.; MUNIZ, E. N.; YAGUIU, P.; LEDO, A. S. Armazenamento de manga 'Tommy Atkins' minimamente processada. **Scientia Plena**, v.9, n.4. 2013.

SIRISOMBOON, P.; KITCHAIYA, P.; PHOLPHO, T.; MAHUTTANYAVANITCH, W. Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. **Biosystems Engineering**, v.97, p.201-207, 2007.

SOUZA, L. A.; TONETTI, O. A. O.; DAVIDE, A. C. Determinação do teor de água em sementes de Milho. **Revista Energia na Agricultura**. Botucatu, v.30, n.3, p.249-256, 2005.

SOUZA, D. **Estudo das Propriedades físicas de polpas e néctares de pequenos frutos**. 191 f. Dissertação (Mestrado em engenharia química) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

STOKES, G.G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, Part II, v.9, p.8-106, 1851.

SUTHAR, S. H.; DAS, S. K. Some physical properties of karingda [*Citrullus lanatus* (Thumb) Mansf] seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.65, n.1, p.15-22, 1996.

TENNES, B.R.; LEVIN, J.H.; STOUT, B.A. Swett cherryproperties usefull in harvesting and handling equipment design, **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.12, n.5, p.710-714, 1969.

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

TURTON, R.; LEVENSPIEL, O. A short note on drag correlation for spheres, **Powder Technology**, v.47, p.83-86, 1986.

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

VENNARD, J.K. **Elementary Fluid Mechanics**. 4.ed. Editora: Wiley Toppan. 1961.

VILAS BOAS, E.V.B.; CHITARRA, A.B.; MALUF, W.R.; CHITARRA, M.I.F. Influência do alelo Alcobaça em heterozigose sobre a vida de prateleira e qualidade pós-colheita de tomates. **Ciência e Agrotecnologia**, v.23, p.650-657, 1999.

VILANOVA, L.C. **Mecânica dos fluidos**. 3.ed. Santa Maria, RS: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Curso em Automação Industrial, 2010.

WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. 7.ed. McGraw Hill, 2011.

YOUNG, D.H.; FREEDMAN, R. A. **Física II**, Sears e Zemansky: Termodinâmica e Ondas. Colaborador: A. Lewis Ford; Tradução: Daniel Vieira; Revisão técnica: Adir Moisés Luiz. 14ª ed. - São Paulo: Addison Wesley, 2016.

APÊNDICE A – Análise de variância das propriedades físicas dos tomates da variedade caqui e Italiano.

Tabela A.1 – Análise de variância do Diâmetro da Partícula tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.50694	0.12673	7.7580 **
Resíduo	20	0.32672	0.01634	
Total	24	0.83366		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.2 - Análise de variância da Área projetada do tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.00589	0.00147	5.2173 **
Resíduo	20	0.00565	0.00028	
Total	24	0.01154		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.3 - Análise de variância da área superficial do tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.14881	0.03720	16.8088 **
Resíduo	20	0.04426	0.00221	
Total	24	0.19307		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.4 - Análise de variância do Diâmetro A, do tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1.30202	0.32551	20.6435 **
Resíduo	20	0.31536	0.01577	
Total	24	1.61738		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.5 - Análise de variância do Diâmetro B, do tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.83070	0.20767	7.4638 **
Resíduo	20	0.55648	0.02782	
Total	24	1.38718		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.6 - Análise de variância do Diâmetro C, do tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	3.73598	0.93400	15.8406 **
Resíduo	20	1.17924	0.05896	
Total	24	4.91522		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.7 - Análise de variância da esfera equivalente do tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.63310	0.15827	11.2092 **
Resíduo	20	0.28240	0.01412	
Total	24	0.91550		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.8 - Análise de variância do teor de água do tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	2.77182	0.69295	28.7628 **
Resíduo	20	0.48184	0.02409	
Total	24	3.25366		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.9 – Análise de variância do volume do tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.28246	0.07061	11.2372 **
Resíduo	20	0.12568	0.00628	
Total	24	0.40814		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.10 – Análise de variância da massa do tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.00247	0.00062	13.0859 **
Resíduo	20	0.00094	0.00005	
Total	24	0.00341		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.11 – Análise de variância da esfericidade do tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.00306	0.00077	1.7330 ns
Resíduo	20	0.00884	0.00044	
Total	24	0.01190		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.12 – Análise de variância da massa específica do tomate Caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	346.00000	86.50000	0.4611 ns
Resíduo	20	3752.00000	187.60000	
Total	24	4098.00000		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.13 – Análise de variância da área projetada do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.00981	0.00245	7.5053 **
Resíduo	20	0.00653	0.00033	
Total	24	0.01634		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.14 – Análise de variância da área superficial do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.09704	0.02426	4.5539 **
Resíduo	20	0.10655	0.00533	
Total	24	0.20359		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.15 – Análise de variância do diâmetro A, do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1.30916	0.32729	4.3748 *
Resíduo	20	1.49624	0.07481	
Total	24	2.80540		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.16 – Análise de variância do diâmetro B, do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1.75480	0.43870	8.2077 **
Resíduo	20	1.06900	0.05345	
Total	24	2.82380		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.17 – Análise de variância do diâmetro C, do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.77188	0.19297	3.2837 *
Resíduo	20	1.17532	0.05877	
Total	24	1.94720		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.18 – Análise de variância da esfera equivalente, do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.77456	0.19364	6.8492 **
Resíduo	20	0.56544	0.02827	
Total	24	1.34000		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.19 – Análise de variância do diâmetro da partícula do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.95914	0.23979	6.0681 **
Resíduo	20	0.79032	0.03952	
Total	24	1.74946		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.20 – Análise de variância da esfericidade do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.00482	0.00120	1.9357 ns
Resíduo	20	0.01244	0.00062	
Total	24	0.01726		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.21 – Análise de variância da massa específica do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	16977.60000	4244.40000	32.6693 **
Resíduo	20	2598.40000	129.92000	
Total	24	19576.00000		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.22 – Análise de variância da massa do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.00208	0.00052	3.9947 *
Resíduo	20	0.00261	0.00013	
Total	24	0.00469		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.23 – Análise de variância do teor de água do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1.80498	0.45125	19.2840 **
Resíduo	20	0.46800	0.02340	
Total	24	2.27298		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.24 – Análise de variância do volume do tomate caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	28.07170	7.01792	25.5435 **
Resíduo	20	5.49488	0.27474	
Total	24	33.56658		

*

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.25 – Análise de variância da firmeza do tomate caqui

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	28.07170	7.01792	25.5435 **
Resíduo	20	5.49488	0.27474	
Total	24	33.56658		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.26 – Análise de variância da firmeza do tomate italiano

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	26.49526	6.62382	31.4877 **
Resíduo	20	4.20724	0.21036	
Total	24	30.70250		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.27 – Comparação entre os valores médios de velocidade terminal de tomates das variedades caqui e italiano, durante a subida em duto de água, com secção quadrada de $L = 0,38$ m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	0.09584	0.09584	232.4561 **
Resíduo	38	0.01567	0.00041	
Total	39	0.11151		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela A.28 – Comparação entre os valores médios de velocidade terminal dos modelos esféricos durante a subida em duto de água, com secção quadrada de $L = 0,38$ m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	2	0.00514	0.00257	43.4353 **
Resíduo	6	0.00036	0.00006	
Total	8	0.00550		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

APÊNDICE B – Fotos dos tomates caqui e italiano internamente

Figura B1 – Tomates da variedade caqui

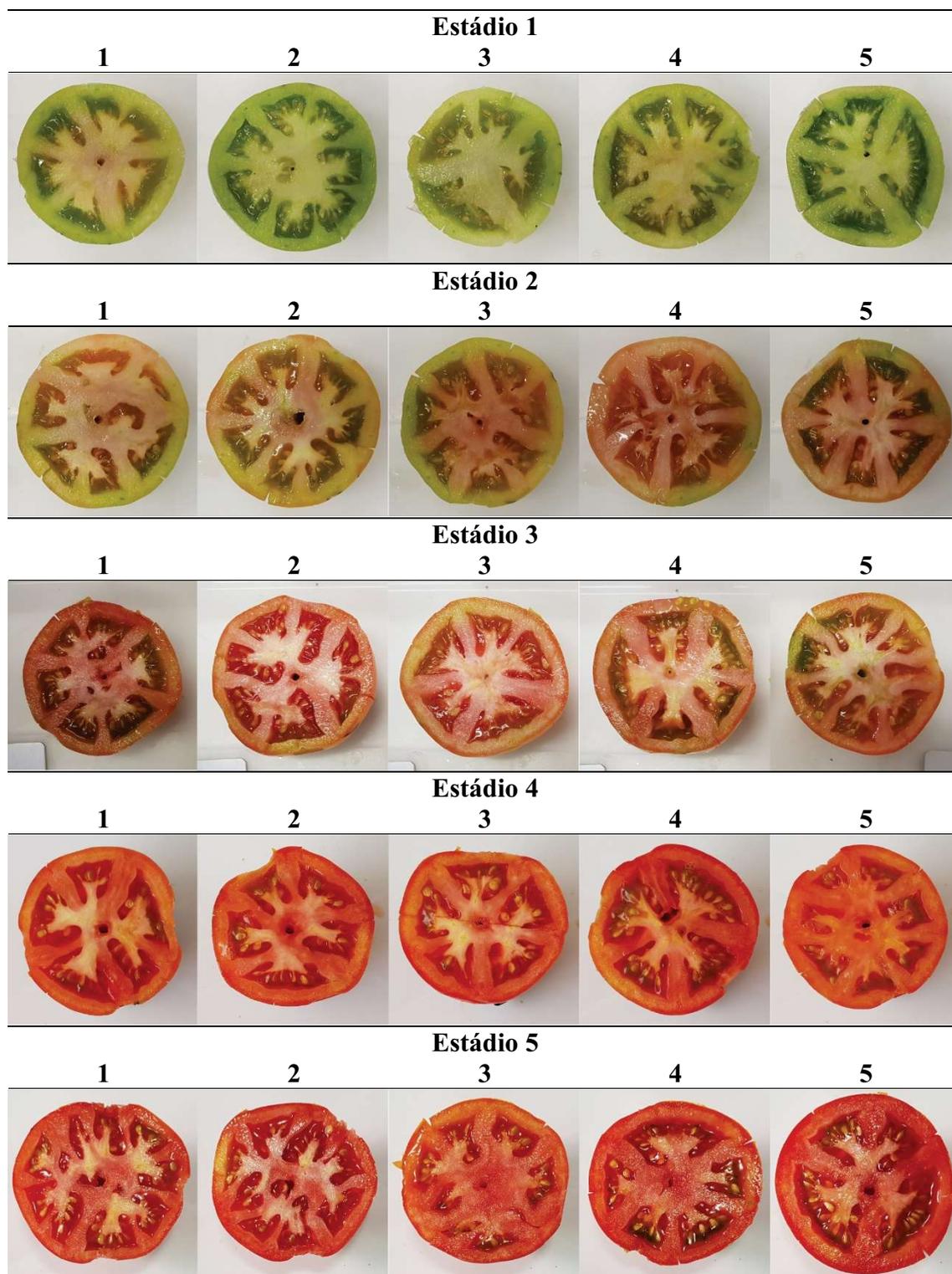
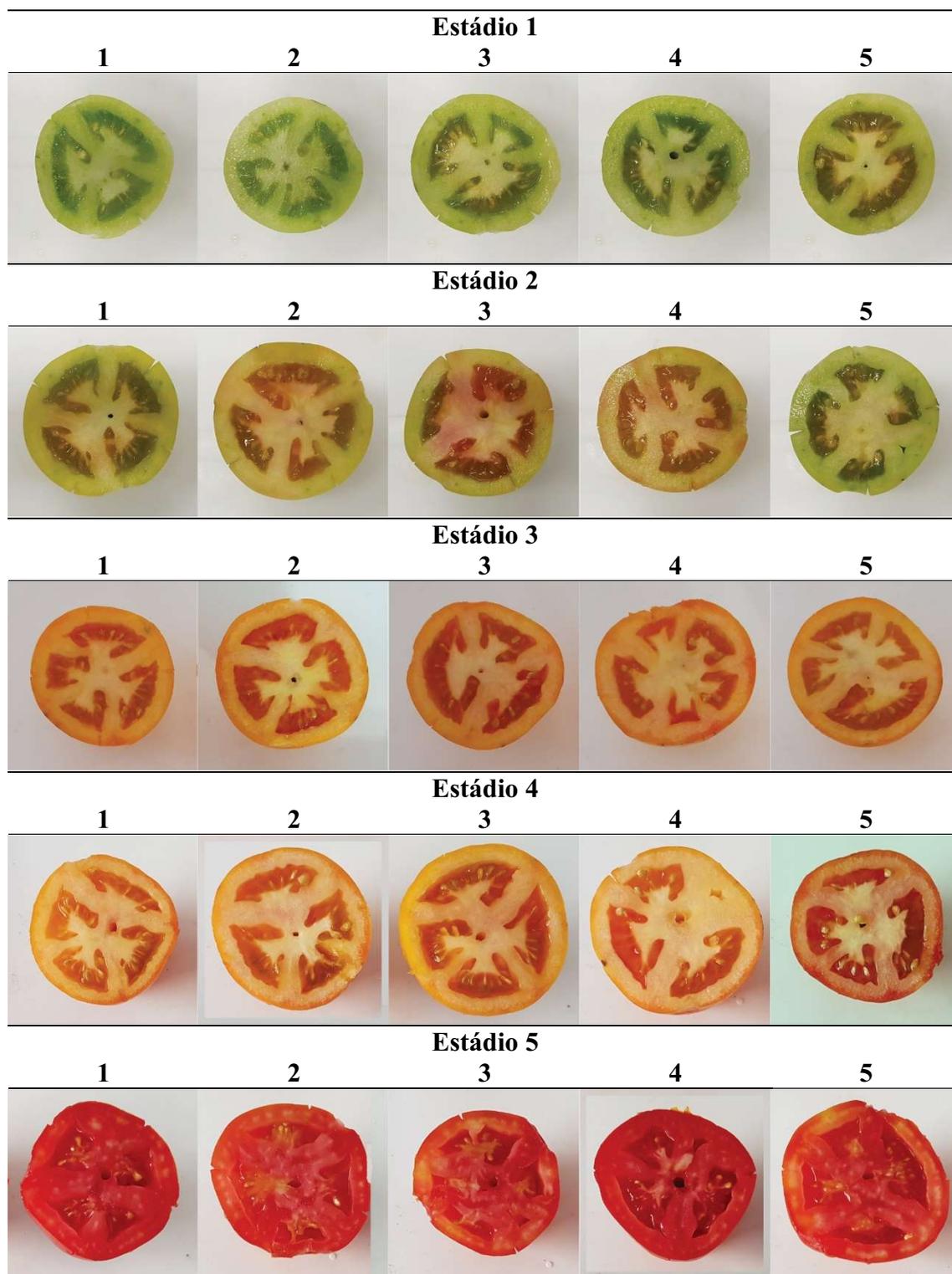


Figura B2 – Tomates da variedade italiano



APÊNDICE C – Modelos matemáticos (MELO - DUARTE, 2019)

Modelo 1

Model: $Re = ((k1 * CdRe2/a)^b + (CdRe2/d * k2)^g)^y$ (DadosPorEsfericidade in modelageum Reynolds2) Dep. var: Re Loss: (OBS-PRED)**2 Final loss: 1128189,8741 R= ,99470 Variance explained: 98,943%						
N=11	a	b	d	g	y	
Estimate	1,254891	0,487334	0,187995	0,721574	0,612857	

Modelo 2

Model: $Re = ((24/(K1 * CdQRe))^b + (k2/CdQRe)^c)^d$ (DadosPorEsfericidade in modelageum Reynolds2) Dep. var: Re Loss: (OBS-PRED)**2 Final loss: 3826582,1163 R= ,98190 Variance explained: 96,413%			
N=11	b	c	d
Estimate	0,006699	-0,665381	111,1833