

PEDRO CASANOVA TRETO

**PROPRIEDADES FÍSICAS, AERODINÂMICAS E TÉRMICAS DE FRUTOS
DE CAFÉ CONILON (*Coffea canephora*)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C335p
2012

Casanova Treto, Pedro, 1975-

Propriedades físicas, aerodinâmicas e térmicas de frutos de café conilon (*Coffea canephora*) / Pedro Casanova Treto. – Viçosa, MG, 2012.
xvii, 93f. : il. ; (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Paulo César Corrêa.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. *Coffea canephora*. 2. Café - Propriedades térmicas.
3. Café - Secagem. 4. Café - Tecnologia pós-colheita.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

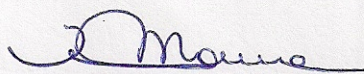
CDD 22. ed. 633.73

PEDRO CASANOVA TRETO

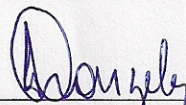
PROPRIEDADES FÍSICAS, AERODINÂMICAS E TÉRMICAS DE FRUTOS
DE CAFÉ CONILON (*Coffea canephora*)

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

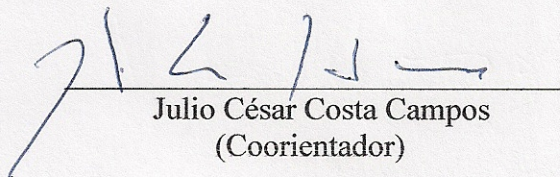
APROVADA: 17 de dezembro de 2012.



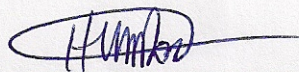
Waldênia de Melo Moura



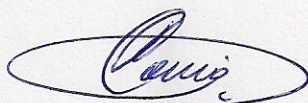
Sergio Mauricio Lopes Donzeles



Julio César Costa Campos
(Coorientador)



Henrique Márcio Pereira Rosa



Paulo César Corrêa
(Orientador)

“Não conheço nenhuma fórmula infalível para obter o sucesso, mas conheço uma forma infalível de fracassar: tentar agradar a todos” (John F. Kennedy).

Aos meus pais, Casimira e Lorenzo, à minha esposa Kattia e minhas filhas Ariadna e Luana, motivos maiores de cada instante de meus esforços.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Casimira e Lorenzo, pelo trabalho árduo e incansável e por não terem medido esforços para que eu chegasse até aqui.

À minha esposa Kattia, pelo seu carinho e apoio, e à minhas filhas Ariadna e Luana.

Ao Prof. Paulo César Corrêa, pela orientação e confiança.

Ao Prof. Julio César Costa Campos, pela orientação e amizade.

Ao Prof. Jadir Nogueira da Silva, pelas valiosas sugestões apresentadas.

À pesquisadora Waldênia de Melo Moura, pela colaboração na pesquisa.

Aos amigos Marcelo e Sandra, pela presença nos momentos mais difíceis no Brasil.

Aos amigos Ivanildo e Oscar, aos colegas do CENTREINAR e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
RESUMEN.....	xvi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS.....	4
CAPÍTULO I – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FRUTOS DE CAFÉ CONILON (<i>Coffea canephora</i>).....	6
1 INTRODUÇÃO.....	6
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
2.1 Massa específica unitária e aparente.....	9
2.2 Porosidade.....	10
2.3 Forma e tamanho.....	10
2.4 Índice de contração da massa e unitária (ψ).....	12
2.5 Análise estatística.....	13
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
4 CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIAS.....	39
CAPÍTULO II – PROPRIEDADES TÉRMICAS DE FRUTOS DE CAFÉ CONILON (<i>Coffea canephora</i>).....	43
1 INTRODUÇÃO.....	43
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4 CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS.....	55
CAPÍTULO III – ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES AERODINÂMICAS DOS FRUTOS DE CAFÉ (<i>Coffea canephora</i>) DURANTE A SECAGEM.....	59
1 INTRODUÇÃO.....	59
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
2.1 Determinação da velocidade terminal.....	63
2.2 Determinação do coeficiente de arrasto.....	63
2.3 Análise numérica.....	67

2.4 Análise estatística.....	70
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
4 CONCLUSÕES.....	88
REFERÊNCIAS.....	89
CONCLUSÕES GERAIS.....	92

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FRUTOS DE CAFÉ CONILON (*Coffea canephora*)

Figura 1 – Desenho esquemático do fruto de café, considerado como esferoide tri axial, com suas dimensões características.....	11
Figura 2 – Valores experimentais e estimados da massa específica real em função do teor de água dos frutos de café do clone 83.....	15
Figura 3 – Valores experimentais e estimados da massa específica real em função do teor de água dos frutos de café do clone 31.....	16
Figura 4 – Valores experimentais e estimados da massa específica real em função do teor de água dos frutos de café do clone 74.....	16
Figura 5 – Valores experimentais e estimados da massa específica real em função do teor de água dos frutos de café do clone 32.....	17
Figura 6 – Valores experimentais e estimados da massa específica aparente em função do teor de água dos frutos de café do clone 83.....	17
Figura 7 – Valores experimentais e estimados da massa específica aparente em função do teor de água dos frutos de café do clone 31.....	18
Figura 8 – Valores experimentais e estimados da massa específica aparente em função do teor de água dos frutos de café do clone 74.....	18
Figura 9 – Valores experimentais e estimados da massa específica aparente em função do teor de água dos frutos de café do clone 32.....	19
Figura 10 – Valores experimentais e observados da porosidade em função do teor de água dos frutos de café do clone 83.....	21
Figura 11 – Valores experimentais e observados da porosidade em função do teor de água dos frutos de café do clone 31.....	21
Figura 12 – Valores experimentais e observados da porosidade em função do teor de água dos frutos de café do clone 74.....	22
Figura 13 – Valores experimentais e observados da porosidade em função do teor de água dos frutos de café do clone 32.....	22
Figura 14 – Valores experimentais e estimados da área projetada e superficial em função do teor de água dos frutos de café do clone 83.....	27
Figura 15 – Valores experimentais e estimados da área projetada e superficial em função do teor de água dos frutos de café do clone 31.....	28
Figura 16 – Valores experimentais e estimados da área projetada e superficial em função do teor de água dos frutos de café do clone 74.....	28
Figura 17 – Valores experimentais e estimados da área projetada e superficial em função do teor de água dos frutos de café do clone 32.....	29
Figura 18 – Valores experimentais e estimados pelo modelo polinomial de contração volumétrica unitária e da massa em função do teor de água dos frutos de café do clone 83.....	31

Figura 19 – Valores experimentais e estimados pelo modelo polinomial de contração volumétrica unitária e da massa em função do teor de água dos frutos de café do clone 31.....	31
Figura 20 – Valores experimentais e estimados pelo modelo polinomial de contração volumétrica unitária e da massa em função do teor de água dos frutos de café do clone 74.....	32
Figura 21 – Valores experimentais e estimados pelo modelo polinomial de contração volumétrica unitária e da massa em função do teor de água dos frutos de café do clone 32.....	32

CAPÍTULO II – PROPRIEDADES TÉRMICAS DE FRUTOS DE CAFÉ CONILON (*Coffea canephora*)

Figura 1 – Desenho esquemático do calorímetro.....	47
Figura 2 - Desenho esquemático do equipamento para determinação da condutividade térmica.....	49
Figura 3 – Valores experimentais e estimados do calor específico, em função dos teores de água para os frutos de café conilon.....	52
Figura 4 – Valores experimentais e estimados de condutividade térmica, em função dos teores de água para os frutos de café conilon.....	53
Figura 5 – Valores experimentais e estimados de difusividade térmica, em função dos teores de água para os frutos de café conilon.....	54

CAPÍTULO III – ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES AERODINÂMICAS DOS FRUTOS DE CAFÉ (*Coffea canephora*) DURANTE A SECAGEM

Figura 1 – Esquema do dispositivo usado para determinação da velocidade terminal.....	63
Figura 2 – Túnel de vento utilizado para a determinação do coeficiente de arrasto	64
Figura 3 – Cluster de frutos de café (4x5x3 frutos).....	64
Figura 4 – Cluster de frutos de café na seção de testes do túnel de vento.....	65
Figura 5 – Tela do programa AeroTek do túnel de vento.....	66
Figura 6 – Domínio utilizado para a análise numérica.....	67
Figura 7 – Resultados dos testes de malhas realizados para cada clone de café.....	68
Figura 8 – Malha utilizada para o clone 83 cereja (a=15,67 mm; b=11,34 mm; U=1,99 b.s.).....	69
Figura 9 – Comportamento da velocidade terminal durante a secagem do clone 83 (verde e cereja).....	72
Figura 10 – Comportamento da velocidade terminal durante a secagem do clone 31 (verde e cereja).....	73
Figura 11 – Comportamento da velocidade terminal durante a secagem do clone 74 (verde e cereja).....	73

Figura 12 – Comportamento da velocidade terminal para todos os clones ajustado ao modelo comum.....	75
Figura 13 – Comportamento do coeficiente de arrasto para todos os clones ajustado ao modelo comum.....	77
Figura 14 – Comportamento do coeficiente de arrasto para cada valor de velocidade terminal ao diminuir o teor de água durante a secagem de todos os clones estudados.....	78
Figura 15 - Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de Reynolds para o clone 83 cereja.....	79
Figura 16 – Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de Reynolds para o clone 83 verde.....	79
Figura 17 – Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de Reynolds para o clone 31 cereja.....	80
Figura 18 – Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de Reynolds para o clone 31 verde.....	80
Figura 19 – Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de Reynolds para o clone 74 cereja.....	81
Figura 20 – Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de Reynolds para o clone 74 verde.....	81
Figura 21 – Distribuição de pressão absoluta para o clone 83 e velocidade de 12 m s ⁻¹ a) cereja b/a=0,72, b) verde b/a=0,56.....	84
Figura 22 – Distribuição de pressão absoluta para o clone 31 e velocidade de 12 m s ⁻¹ a) cereja b/a=0,82, b) verde b/a=0,78.....	84
Figura 23 – Distribuição de pressão absoluta para o clone 74 e velocidade de 12 m s ⁻¹ a) cereja b/a=0,7, b) verde b/a=0,72.....	85
Figura 24 – Distribuição de velocidades para o clone 83 e velocidade de 12 m s ⁻¹ a) cereja b/a=0,72, b) verde b/a=0,56.....	86
Figura 25 – Distribuição de velocidades para o clone 31 e velocidade de 12 m s ⁻¹ a) cereja b/a=0,82, b) verde b/a=0,78.....	86
Figura 26 – Distribuição de velocidades para o clone 74 e velocidade de 12 m s ⁻¹ a) cereja b/a=0,7, b) verde b/a=0,72.....	86
Figura 27 – Vectors de velocidades para o clone 83 cereja (v=12 m s ⁻¹ ; b/a=0,72).....	87
Figura 28 – Gráficos de convergência gerados no teste de regime laminar para o clone 83 cereja (v=12 m s ⁻¹ ; b/a=0,72); a) Resíduos, b) Coeficiente de arrasto.....	87

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FRUTOS DE CAFÉ CONILON (*Coffea canephora*)

Tabela 1 – Modelos utilizados para simular o índice de contração volumétrica de produtos agrícolas.....	12
Tabela 2 – Combinações que representam as várias possibilidades de agrupamento entre os clones estudados.....	15
Tabela 3 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados aos valores experimentais e calculados de massa específica real e aparente e a porosidade.....	20
Tabela 4 – Resultado do teste de identidade para a massa específica real e aparente e a porosidade em todas as combinações estudadas.....	24
Tabela 5 – Índices de contração (a/ao, b/bo e c/co), o volume (V), a área projetada (Ap), a área superficial (S), a esfericidade (E) e a circularidade (C) dos frutos de café.....	25
Tabela 6 – Índices de contração (a/ao, b/bo e c/co), o volume (V), a área projetada (Ap), a área superficial (S), a esfericidade (E) e a circularidade (C) dos frutos de café (Continuação).....	26
Tabela 7 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados aos valores experimentais e calculados da área projetada (Ap) e a área superficial (S).....	30
Tabela 8 – Coeficientes dos modelos de contração volumétrica unitária ajustados aos valores experimentais.....	34
Tabela 9 – Coeficientes dos modelos de contração volumétrica unitária ajustados aos valores experimentais (Continuação).....	35
Tabela 10 – Coeficientes dos modelos de contração volumétrica da massa ajustados aos valores experimentais.....	36
Tabela 11 – Coeficientes dos modelos de contração volumétrica da massa ajustados aos valores experimentais (Continuação).....	37
Tabela 12 – Resultado do teste de identidade para as contrações volumétricas unitária e da massa em todas as combinações estudadas.....	38

CAPÍTULO II – PROPRIEDADES TÉRMICAS DE FRUTOS DE CAFÉ CONILON (*Coffea canephora*)

Tabela 1 – Equações de regressão do calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica para o café conilon cereja e verde e o modelo comum.....	51
Tabela 2 – Análise estatística e de incertezas das propriedades térmicas dos frutos de café conilon cereja.....	51
Tabela 3 – Análise estatística e de incertezas das propriedades térmicas dos frutos de café conilon verde.....	52

CAPÍTULO III – ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS
PROPRIEDADES AERODINÂMICAS DOS FRUTOS DE CAFÉ
(*Coffea canephora*) DURANTE A SECAGEM

Tabela 1 – Malhas utilizadas no teste de malhas.....	68
Tabela 2 – Combinações que representam as várias possibilidades de agrupamento entre os clones estudados.....	72
Tabela 3 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados aos valores experimentais e calculados de velocidade terminal.....	74
Tabela 4 – Resultado do teste de identidade para velocidade terminal em todas as combinações estudadas.....	75
Tabela 5 – Resultado do teste de identidade para o coeficiente de arrasto em todas as combinações estudadas.....	76
Tabela 6 – Resumo dos coeficientes de arrasto experimentais e numéricos e os erros entres eles para os clones estudados.....	83

RESUMO

CASANOVA TRETO, Pedro, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2012. **Propriedades físicas, aerodinâmicas e térmicas de frutos de café conilon (*Coffea canephora*)**. Orientador: Paulo César Corrêa. Coorientadores: Julio César Costa Campos e Jadir Nogueira da Silva.

O café é considerado um dos produtos agrícolas de maior importância no Brasil, tanto pela receita gerada pela exportação e industrialização, como pelo número de empregos diretos e indiretos relacionados com o seu agronegócio. As espécies de maior importância no mercado econômico internacional são *Coffea arabica* (café arábica) e *Coffea canephora* (café robusta). Considerando as limitadas pesquisas no processo de secagem e visando obter dados que possam ser utilizados no desenvolvimento de sistemas durante os processos de colheita e pós-colheita, o presente trabalho objetivou, avaliar a influência do teor de água nas propriedades físicas, aerodinâmicas e térmicas de frutos de café conilon (*Coffea canephora*). Foram utilizados frutos de café (*Coffea canephora*), clones 83 e 74 da variedade clonal EMCAPA 8141 e os clones 31 e 32 da variedade clonal EMCAPA 8131, procedentes da fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), situada no município de Leopoldina, Minas Gerais. Posteriormente os diferentes lotes de café foram secos em estufa com ventilação forçada com temperatura do ar de aproximadamente $60 \pm 3^{\circ}\text{C}$, até diferentes níveis de teores de água. Durante a secagem, para cada teor de água obtido, amostras eram homogeneizadas e encaminhadas para a determinação de suas propriedades, sempre em triplicata. Para os quatro clones foram determinadas as massas específica unitária e aparente, a porosidade, a forma, o tamanho e o índice de contração volumétrica unitária e da massa em cada estágio de maturação; além de ajustar aos modelos matemáticos disponíveis na literatura. Também foi estudada a influência do teor de água nas propriedades aerodinâmicas durante o processo de secagem. Mediante técnicas da Mecânica dos Fluidos Computacional foi estudado o processo utilizando o modelo k- ϵ para regime turbulento. Determinou-se também as propriedades térmicas (calor específico, condutividade e difusividade térmica) para os frutos de café da espécie *Coffea canephora*, clone 32 da variedade clonal EMCAPA 8131. Ao estudar o comportamento de cada clone foi determinado que a área projetada, a área superficial, o volume e a porosidade aumentam com a elevação do teor de água para todos os clones, enquanto as massas específicas reais e aparentes aumentam com o aumento da umidade

dos frutos de café até um valor máximo e depois decrescem. A forma dos frutos de café conilon é influenciada no processo de secagem, promovendo diminuição dos valores da esfericidade e circularidade com a redução do teor de água. A contração volumétrica apresentou um comportamento não linear decrescente com a redução do teor de água da massa de frutos de café conilon. Os modelos de Bala e Woods adaptado, Corrêa e o polinomial ajustados aos valores experimentais para estimar o índice de contração volumétrica unitária e da massa dos frutos de café em função do teor de água representaram de forma satisfatória o fenômeno estudado, sendo o modelo polinomial o de melhor ajuste em todos os casos. Ao aumentar o teor de água a velocidade terminal cresceu de forma não linear em todos os clones de café conilon e estádios de maturação estudados. Determinou-se experimentalmente em um túnel de vento horizontal o coeficiente de arrasto de cada clone. O coeficiente de arrasto apresentou um comportamento não linear, decrescendo ao aumentar o número de Reynolds. O modelo numérico utilizado representou o processo adequadamente com diferenças entre o coeficiente de arrasto experimental e o numérico inferiores a 5 %. Foi possível determinar a distribuição de pressões e velocidades mediante a simulação numérica, pelo fato da razão de aspecto ter uma mínima influência nas mesmas; isso significa que é possível utilizar a mesma razão de aspecto para todos os clones. Determinou-se que as propriedades térmicas do café conilon são dependentes do conteúdo de umidade. O calor específico e a condutividade térmica dos frutos de café conilon aumentaram com o aumento do conteúdo de umidade, enquanto a difusividade térmica decresce com o aumento do conteúdo de umidade. Realizou-se o teste de identidade identificando a combinação e a propriedade física representada por um modelo comum.

ABSTRACT

CASANOVA TRETO, Pedro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December 2012. **Physical, thermal and aerodynamic properties of conilon coffee fruits (*Coffea canephora*)**. Advisor: Paulo César Corrêa, Co-Advisor: Julio César Costa Campos and Jadir Nogueira da Silva.

Coffee is considered one of the most important agricultural products in Brazil, by revenue generated of exports and industrialization, as the number of direct and indirect jobs associated with their agribusiness. The species of greatest importance in the international economic market are *Coffea arabica* (Arabica coffee) and *Coffea canephora* (robusta). Considering the limited research in the drying process and to obtain data that can be used in systems development processes during harvest and post-harvest, the present study aimed to evaluate the influence of water content on physical, aerodynamic and thermal properties of coffee fruits (*Coffea canephora*). It was used Conilon coffee cherries (*Coffea canephora*), clones 83 and 74 of the clonal variety EMCAPA 8141 and clones 31 and 32 of the clonal variety EMCAPA 8131, coming from an experimental farm of EPAMIG in the municipality Leopoldina, Minas Gerais. Subsequently the different batches of coffee were dried in an oven with forced ventilation with air temperature of approximately 60 ± 3 °C until different levels of water content. During drying, for each moisture content obtained, samples were homogenized and forwarded to the determination of their properties, always in triplicate. For the four clones were determined true and bulk density, porosity, shape, size and shrinkage in each maturation stage, besides adjusting the models available in the literature. It was also studied the influence of water content on the aerodynamic properties during the drying process. The process was studied by techniques of Computational Fluid Dynamics using the k- ϵ turbulence model. It was also determined the thermal properties (specific heat, thermal conductivity and diffusivity) for coffee cherries from *Coffea canephora* species, clone 32 of clonal variety EMCAPA 8131. When studying the behavior of each clone was determined that the projected area, surface area, volume and porosity increase with increasing moisture content for all clones, while the bulk and true densities increased with increasing moisture content of coffee cherries to a maximum and then decreases. The shape of the conilon coffee cherries is influenced during the drying process, promoting the decrease of sphericity and roundness values with reduced moisture content. The shrinkage showed a

nonlinear behavior with decreasing reducing the moisture content of the conilon coffee cherries. The models adapted Bala & Woods, Correa and polynomial adjusted to the experimental values to estimate the shrinkage of conilon coffee cherries depending on the moisture content represented satisfactorily the phenomenon studied, with the model of the polynomial better fit in all cases. By increasing the moisture content, the terminal velocity increased non-linearly in all conilon coffee clones and maturation stages studied. It was determined the experimentally drag coefficient in a horizontal wind tunnel of each clone. The drag coefficient showed a non-linear behavior as a function of the Reynolds number, but decreased by increasing the Reynolds number. The numerical model used represented the process properly with differences between the experimental and numerical drag coefficient less than 5 %. It was possible to determine the distribution of pressures and velocities by numerical simulation finding that the aspect ratio has a minimum influence on them, which means that it is possible to use the same aspect ratio for all clones. It was determined that the thermal properties of the conilon coffee cherries are dependent on the moisture content. The specific heat and thermal conductivity of conilon coffee cherries increased with increasing moisture content, whereas the thermal diffusivity decreasing with increasing moisture content. It carried out the identity test by identifying the combination and physical property represented by a common model.

RESUMEN

CASANOVA TRETO, Pedro, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, diciembre de 2012. **Propiedades físicas, aerodinámicas y térmicas de frutos de café conilon (*Coffea canephora*)**. Orientador: Paulo César Corrêa. Coorientadores: Julio César Costa Campos y Jadir Nogueira da Silva.

El café es considerado uno de los productos agrícolas más importantes de Brasil, tanto por los ingresos generados por las exportaciones y la industrialización, como por el número de empleos directos e indirectos relacionados con la agroindustria. Las especies de mayor importancia en el mercado económico internacional son *Coffea arabica* (café arábica) y *Coffea canephora* (robusta). Dada la limitada investigación en el proceso de secado y pretendiendo obtener datos que puedan ser utilizados en los procesos de desarrollo de sistemas durante la cosecha y poscosecha, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la influencia de la humedad en las propiedades físicas, aerodinámicas y térmicas de frutos de café conilon (*Coffea canephora*). Fueron utilizados frutos de café (*Coffea canephora*), clones 83 y 74 de la variedad clonal EMCAPA 8141 y clones 31 y 32 de la variedad clonal EMCAPA 8131, procedente de la estación experimental de la Empresa de Investigación Agropecuaria de Minas Gerais (EPAMIG), ubicada en el municipio Leopoldina, Minas Gerais. Posteriormente, los diferentes lotes de café se secaron en un horno con ventilación forzada con una temperatura del aire de aproximadamente 60 ± 3 °C hasta diferentes niveles de humedad. Durante el secado, para cada valor de humedad obtenido, las muestras se homogenizaron y remitieron para la determinación de sus propiedades, siempre por triplicado. Para los cuatro clones se determinaron la densidad aparente y real, porosidad, forma, tamaño y contracción volumétrica unitaria y de masa en cada etapa de maduración, además de ajustar los modelos disponibles en la literatura. Se estudió la influencia de la humedad en las propiedades aerodinámicas durante el proceso de secado. El proceso fue estudiado mediante técnicas de Mecánica de los Fluidos Computacional utilizando el modelo k-ε para para régimen turbulento. También se determinaron las propiedades térmicas (calor específico, conductividad y difusividad térmica) para los frutos de café de la especie *Coffea canephora*, clon 32 de la variedad clonal EMCAPA 8131. Estudiando el comportamiento de cada clon fue determinado que el área proyectada, el área superficial, el volumen y la porosidad aumentan con el aumento de la humedad para todos los clones, mientras las densidades reales y aparentes aumentan hasta un valor

máximo y después decrecen con el aumento de la humedad de los frutos de café. La forma de los frutos de café conilon es influenciada en el proceso de secado, promoviendo una disminución de los valores de esfericidad y circularidad con la reducción de la humedad. La contracción volumétrica presentó un comportamiento no lineal decreciente con la reducción de la humedad de los frutos de café conilon. Los modelos de Bala y Woods adaptado, Corrêa y el polinomial ajustados a los valores experimentales para estimar el índice de contracción volumétrica unitaria y de masa de los frutos de café en función de la humedad representaron de forma satisfactoria el fenómeno estudiado; siendo el modelo polinomial el de mejor ajuste en todos los casos. Al aumentar la humedad la velocidad terminal aumentó de forma no lineal en todos los clones de café conilon y estados de maduración estudiados. El coeficiente de arrastre de cada clon fue determinado experimentalmente en un túnel de viento horizontal. El coeficiente de arrastre presentó un comportamiento no lineal, disminuyendo al aumentar el número de Reynolds. El modelo numérico utilizado representó el proceso adecuadamente con diferencias entre los coeficientes de arrastre experimental y teórico inferiores a 5 %. Fue posible determinar la distribución de presiones y velocidades mediante la simulación numérica y se comprobó que la razón de aspecto del fruto de café tiene una influencia mínima en las mismas, pudiéndose utilizar la misma razón de aspecto para todos los clones. Las propiedades térmicas de los frutos de café son dependientes de la humedad. El calor específico y la conductividad térmica de los frutos de café conilon crecieron con el aumento de la humedad, mientras la difusividad térmica disminuye. La prueba de identidad estadística se utilizó para identificar la combinación y la propiedad física representada por un modelo común.

INTRODUÇÃO GERAL

O agronegócio do café está entre as atividades de maior importância socioeconômica quando comparadas às diferentes atividades ligadas ao comércio agrícola, sendo uma grande *commodity* mundial. As espécies de maior importância no mercado econômico internacional são *Coffea arabica* (café arábica) e *Coffea canephora* (café robusta). Cerca de 70 % do café negociado no mundo é do tipo arábica e 30 % do robusta. No contexto da cafeicultura mundial, o Brasil é um país estrategicamente melhor situado, por apresentar uma produção, em larga escala, das duas espécies mais importantes (IVOGLIO, 2007).

O Brasil é o maior produtor mundial de café, ocupando atualmente uma área cultivada em produção de 2.056.290 hectares (CONAB, 2012). A média de produção, na safra 2012, está estimada em 50.482,6 mil sacas de café beneficiado, das quais 37.947,5 mil são de café arábica e 12.535,1 mil são de café robusta (variedade conilon) (CONAB, 2012). No Brasil, a quase totalidade das lavouras de café, conhecido como café robusta, é da variedade conilon, sendo o estado Espírito Santo o maior produtor, seguido por Rondônia e Bahia.

Um dos principais fatores do sucesso do café conilon deve-se ao fato dessa espécie ser componente importante na composição dos *blends* (mistura) com o café arábica (INACIO, 2005). Nas indústrias brasileiras de torrado e moído, o café conilon participou, em 2010, com 42,5 % do volume total consumido (SANTOS, 2011). Isso se deve ao fato dele possuir maior teor de sólidos solúveis, maior rendimento industrial e conferir a característica corpo e estrutura ao produto final. É importante ressaltar que as torrefadoras internacionais passaram a aumentar o percentual de robusta/conilon nos *blends*, passando de 15 a 25 % para 30 a 45 % (MATIELLI; RUGGIERO, 2011).

Um importante desafio a ser enfrentado pelo setor de produção do café conilon é a sua competitividade, a qual deverá ser ambientalmente sustentável e economicamente viável. Isso implica em ofertar café de qualidade superior para atender aos mercados, interno e externo, cada vez mais exigentes.

Os principais fatores relacionados com a qualidade do café são os genéticos (espécies, variedades, linhagens), os ecológicos (diferentes condições ambientais onde é cultivado) e o processamento ao qual é submetido (colheita, preparo, secagem e armazenamento) (TEIXEIRA; TEIXEIRA, 2001).

Segundo Ribeyre (2003), a qualidade do conilon não deve ser entendida unicamente como critério relacionado a características da bebida (xícara), mas deve também envolver outros critérios requisitados ou mesmo impostos pelo mercado, ou seja, a qualidade do produto deve ser avaliada levando-se em consideração um conjunto de atributos, como: a) características físicas; b) características da bebida; c) características tecnológicas; d) critérios sociais; e) critérios relacionados ao meio ambiente; f) segurança alimentar; g) constância e estabilidade de oferta; h) origem; i) preço; entre outras.

Partindo-se do valor obtido por um produto de máxima qualidade, este sofre descontos proporcionais à medida que são reduzidas as características desejáveis quanto ao tipo e bebida (SILVA; BERBERT, 1999). É da boa apresentação do produto que depende, em grande parte, a sua colocação no mercado. A classificação do café, portanto, é uma fase muito importante no processo de comercialização.

A qualidade de grãos é um conceito relativo porque seu significado depende do consumidor e da finalidade do produto. Brooker et al. (1992) afirmaram que diversos fatores são requeridos para a obtenção de grãos com alta qualidade, como as condições ambientais durante o seu desenvolvimento, as características da espécie e da variedade, o período e o sistema de colheita, o sistema de secagem, as práticas de armazenagem e o procedimento de transporte. Os autores afirmaram também que a temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar de secagem, a taxa de secagem do produto, os teores iniciais e finais de água do produto, o sistema de secagem empregado e o tempo de residência do produto na câmara de secagem são os principais parâmetros que podem estar associados à preservação ou à redução da qualidade dos grãos e sementes.

Em relação às características de classificação do produto, depois de processado, o café é um produto cujo preço está vinculado a parâmetros qualitativos. Para o mercado exportador, é de fundamental importância que a qualidade do café apresente propriedades organolépticas e químicas preservadas. Essas propriedades são dependentes da eficiência do pré-processamento ao qual o produto é submetido, sendo o método de secagem uma das operações que exercem mais influência (LACERDA FILHO et al., 2006).

O café é um produto cujo valor tende a crescer com o aumento do nível de qualidade, ou seja, quanto melhor a aparência, a sanidade e a qualidade da bebida, maiores serão os preços pagos pelo produto. Portanto, a busca por produção com qualidade e os melhores meios de comercialização devem ser, no atual momento, as

principais metas a serem atingidas pela cafeicultura brasileira. Logo, o conhecimento das técnicas de produção de café de qualidade se torna indispensável para viabilizar a cafeicultura moderna (SANTOS, 2010).

A qualidade do café depende da interação entre fatores da fase de pré e pós-colheita, que garantem ao grão as características de sabor e aroma desejados. Dessa forma, observa-se a grande importância de produzir cafés com qualidade desde a etapa de produção na lavoura até a sua comercialização.

Apesar do café ser uma cultura antiga, atualmente tem-se desenvolvido variedades clonais com propriedades físicas desconhecidas, limitadas e dispersas. O Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), em vários anos de pesquisa na área de melhoramento genético com o café conilon, desenvolveu cinco variedades clonais e uma de propagação sexuada para o Estado do Espírito Santo, denominadas, respectivamente: EMCAPA 8111 – maturação precoce; EMCAPA 8121 – maturação intermediária; EMCAPA 8131 – maturação tardia; EMCAPA 8141 Robustão Capixaba – tolerante à seca; VITORIA INCAPER 8142; e EMCAPER 8151 Robusta Tropical – de propagação sexuada. Essas novas variedades têm sido a base para a renovação do parque cafeeiro da espécie no Espírito Santo e contribuído, de forma efetiva, para o avanço tecnológico da cultura de *Coffea canephora* em todo o País (FONSECA et al., 2002).

Dentro do enfoque de qualidade do café conilon, convém ressaltar a carência de trabalhos científicos relacionados aos processos de pós-colheita, com vistas à qualidade final do produto e sua rentabilidade. Segundo Palacin et al. (2005), a qualidade do café pode ser entendida como sendo o somatório de todos os atributos que atendam as preferências dos consumidores. Assim, é preciso que os trabalhos que busquem a qualidade do café conilon sejam dinâmicos, haja vista que essas preferências podem evoluir no tempo. Desse modo, é importante o trabalho contínuo de busca por novas variedades, de ajustes tecnológicos de processos de pós-colheita e de desenvolvimento de novos produtos, com foco no atendimento à demanda dos consumidores.

A redução do teor de água dos grãos influencia diretamente na alteração das suas propriedades físicas durante a secagem. A fim de minimizar os custos de produção para maior competitividade e melhoria da qualidade do produto processado, a secagem e o conhecimento do comportamento das propriedades físicas, aerodinâmicas e térmicas dos frutos de café são os principais fatores a contribuir para o adequado desenvolvimento

de equipamentos, processos e simulações que visem aperfeiçoar o sistema produtivo dessa cultura.

Considerando as limitadas pesquisas no processo de secagem e visando obter dados que possam ser utilizados no desenvolvimento de sistemas durante os processos de colheita e pós-colheita do café, o presente trabalho objetivou:

- a) Investigar o efeito do teor de água nas principais propriedades físicas dos frutos de café conilon;
- b) Avaliar a contração volumétrica dos frutos de café conilon durante a secagem e ajustar diferentes modelos matemáticos reportados na literatura aos valores experimentais, em função do teor de água;
- c) Determinar o efeito do teor de água nas propriedades térmicas dos frutos de café conilon durante a secagem;
- d) Determinar o comportamento das propriedades aerodinâmicas dos frutos de café conilon durante a secagem;
- e) Fornecer um modelo comum para o coeficiente de arrasto em função do teor de água; e
- f) Estudar o comportamento aerodinâmico dos frutos de café conilon mediante a ajuda da Mecânica dos Fluidos Computacionais (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) e validar os resultados com os experimentais.

REFERÊNCIAS

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** (van N. Reinhold, Ed.). 1st ed., p. 450. New York: Springer, 1992.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safra 2012, terceira estimativa, setembro/2012.** Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 05 dez. 2012.

FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, R. G.; FERRÃO, M. A. G.; BRAGANÇA, S. M.; SILVEIRA, J. S. M. Variedades derivadas de café conillon (*Coffea canephora*) desenvolvidas pelo INCAPER para o Espírito Santo. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2, 2001, Vitória-ES. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2002. v. 2. p. 1063-1066.

INÁCIO, A. **Fronteiras agrícolas apostam no café robusta.** Gazeta Mercantil. Disponível em: <<http://www.gazetamercantil.com.br/especiais>>. Acesso em: 28 mar. 2005.

IVOGLO, M. G. **Divergência genética entre progênies de café robusta**. 2007. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônomo. Campinas, 2007.

LACERDA FILHO, A. F.; SILVA, J. S.; SEDIYAMA, G. C. Comparação entre materiais de pavimentação de terreiro para a secagem de café. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Especial Café, n. 9, p. 83-93, 2006.

MATIELLI, A.; RUGGIERO, S. S. **Agronegócio café: Histórico e Tendências**. Newscafeicultura. Disponível em: <<http://www.newscafeicultura.com.br/news>>. Acesso em: 11 abr. 2011.

PALACIN, J. J. F.; LACERDA FILHO, A. F.; MELO, E. C.; SILVA, J. S.; DONZELES, M. L. Boas práticas para produzir café com qualidade. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 4., 2005, Londrina, PR. **Anais...** Brasília: Embrapa Café: CBP&D/Café, 2005. CD-ROOM.

SILVA, J. S.; BERBERT, P. A. Colheita, secagem e armazenagem de café. Viçosa, MG: Ed. **Aprenda Fácil**, 1999. 146 p.

SANTOS, E. S. M. **Perfil sensorial e aceitabilidade do consumidor para blends de bebidas de café preparadas com grãos arábica (*Coffea arabica* L.) e conilon (*Coffea canephora* P.)**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2010.

TEIXEIRA, A. A.; TEIXEIRA, A. R. R. Cuidados na colheita, secagem e armazenamento. In: Seminário Sobre a Qualidade dos Cafés Descascados, 1., 2001, Venda Nova do Imigrante, ES. **Palestras...** Venda Nova do Imigrante, ES: Universidade illy do café, 2001, p. 1-5.

CAPÍTULO I – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FRUTOS DE CAFÉ CONILON (*Coffea canephora*)

1 INTRODUÇÃO

A redução do teor de água dos grãos influencia diretamente na alteração das suas propriedades físicas durante a secagem. A fim de minimizar os custos de produção para maior competitividade e melhoria da qualidade do produto processado, a secagem e o conhecimento do comportamento das propriedades físicas dos frutos de café são os principais fatores a contribuir para o adequado desenvolvimento de equipamentos, processos e simulações que visem aperfeiçoar o sistema produtivo dessa cultura.

Projetos de máquinas para o processamento, classificação e dimensionamento de outros equipamentos destinados à pós-colheita de produtos agrícolas requerem dados relativos às propriedades físicas, especialmente as propriedades geométricas. Informações a respeito do tamanho, volume, porosidade e massa específica, entre outras características físicas dos produtos agrícolas, são consideradas de grande importância para estudos envolvendo transferência de calor e massa, e movimentação de ar em massas granulares. Juntamente com o teor de água, a massa específica, a porosidade e o volume 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.

Dentre os processos utilizados para a manutenção da qualidade de produtos agrícolas após a colheita, a secagem é empregada para reduzir a atividade de água no produto. Com a redução do teor de água até níveis seguros, inibe-se o crescimento de micro-organismos, reduz-se a possibilidade de proliferação de insetos pragas, além de minimizar mudanças físicas e químicas durante o armazenamento, que contribuem decisivamente para a perda de qualidade do produto.

A massa específica aparente, segundo Silva e Lucena (1995), é usada tanto na comercialização de grãos quanto na solução de problemas referentes à aerodinâmica, dimensionamento de silos, secadores, depósitos e sistemas de transporte. A massa específica aparente é também utilizada como parâmetro na avaliação da qualidade de alguns produtos e na estimativa dos danos causados por pragas aos grãos armazenados.

Os métodos mais conhecidos para a determinação da massa específica real envolvem o deslocamento do líquido ou do ar entre os frutos. De acordo com Moreira

(1985), a metodologia de complementação de volume (ou deslocamento do líquido) tem a vantagem de requerer equipamentos comuns de laboratório (balão volumétrico, balança, picnômetro, entre outros), enquanto os que envolvem deslocamento de ar requerem equipamentos especiais, como os picnômetros (MOHSENIN, 1986).

De acordo com Brooker (1992a), a porosidade de uma massa de grãos está associada à resistência que a camada de produto oferece ao movimento de ar, sendo amplamente utilizada no projeto de equipamentos de secagem e aeração.

As propriedades físicas têm sido estudadas por diferentes autores e para diferentes produtos agrícolas, como café robusta e arábica (CHANDRASEKAR, 1999), café em pergaminho (PEREZ-ALEGRIA et al., 2001), lentilhas (AMIN et al., 2004), trigo (CORRÊA et al., 2006), pistachio (KASHANINEJAD et al., 2006), trigo (AL-MAHASNEH; RABABAH, 2007), feijão (RESENDE et al., 2008), arroz (VARNAMKHAISTI et al., 2008), cevada, lentilhas, trigo e grão de bico (GÜRSOY; GÜZEL, 2010), milho (SEIFI; ALIMARDANI, 2010), dentre outros.

Segundo Goneli (2008), uma das mais importantes mudanças físicas que ocorrem nos produtos agrícolas durante a secagem é a redução do seu volume externo. A perda de água causa danos à estrutura celular do produto, levando a uma mudança na forma e a um decréscimo em sua dimensão (MAYOR; SERENO, 2004). Para Ramos (2003), a redução do conteúdo de água durante o processo de secagem origina uma redução no tamanho do tecido celular, fenômeno este usualmente chamado de contração volumétrica. A secagem de produtos agrícolas com alto teor de umidade inicial, como os frutos do café, é acompanhada de uma significativa redução de volume, pelo qual o produto sofre alterações em suas dimensões e forma originais e que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade, podendo afetar a taxa de remoção de umidade. A remoção de água diminui a tensão exercida pelo líquido nas paredes celulares do produto, provocando uma contração volumétrica do material (FORTES; OKOS, 1980). Alguns autores indicam ser a desconsideração do fenômeno de alteração volumétrica durante o processo de desidratação uma das principais fontes de erros no desenvolvimento de modelos matemáticos para simular o processo de secagem de materiais biológicos (BROOKER et al., 1992b; LANG; SOKHANSANJ, 1993).

A contração volumétrica pode ser muito intensiva, dependendo do método de secagem aplicado (KROKIDA; MAROULIS, 1997) e das condições de secagem, afetando os parâmetros da transferência de calor e massa e devendo ser considerada no estabelecimento de modelos de secagem (RAMOS et al., 2003).

A maioria dos modelos empregados para representar a secagem dos produtos agrícolas foi desenvolvida negligenciando-se a contração volumétrica do produto durante o processo de desidratação (BROOKER et al., 1992b). Mudanças volumétricas dos produtos, devido a sua desidratação, são relatadas como sendo as principais causas das alterações das principais propriedades físicas de produtos agrícolas (RATTI, 1994).

Apesar do café ser uma cultura antiga, atualmente tem-se desenvolvido variedades clonais com propriedades físicas desconhecidas, limitadas e dispersas. Visando obter dados que possam ser utilizados no desenvolvimento de sistemas durante os processos de colheita e pós-colheita do café, este trabalho teve por objetivos:

1. Verificar o efeito do teor de umidade nas principais propriedades físicas de frutos de café Conilon.
2. Avaliar a contração volumétrica dos frutos de café durante a secagem, além de ajustar diferentes modelos matemáticos reportados na literatura aos valores experimentais das propriedades analisadas, em função do teor de água.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Foram utilizados frutos de café (*Coffea canephora*), clones 83 e 74 da variedade clonal EMCAPA 8141 e os clones 31 e 32 da variedade clonal EMCAPA 8131, procedentes da fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), situada no município de Leopoldina, Minas Gerais. Os frutos foram colhidos manualmente e selecionados somente os dois estádios, cereja e verde de cada clone. Durante o processo de colheita foram eliminados os frutos imaturos, deteriorados ou danificados, com o intuito de se obter um material homogêneo e de melhor qualidade, além disso, foram utilizados os frutos de café com tamanho acima da peneira de furos de 9 mm.

Posteriormente os diferentes lotes de café foram secos em estufa com ventilação forçada com temperatura do ar de aproximadamente 60 ± 3 °C, até diferentes níveis de teores de água. O acompanhamento da redução do teor de água com o decorrer do tempo de secagem foi feito pelo método gravimétrico (perda de peso), conhecendo-se o

teor de umidade inicial do produto. Para este monitoramento foi utilizada uma balança analítica com precisão de 0,01g. Os teores de umidade do produto foram determinados pelo método da estufa, 105 ± 3 °C, até peso constante, em três repetições (BRASIL, 2009). Durante a secagem, para cada teor de água obtido, amostras eram homogeneizadas e encaminhadas para a determinação de suas propriedades físicas, sempre em triplicata.

2.1 Massa específica unitária e aparente

A massa específica é definida como a razão entre a massa e o volume ocupado por determinado produto. Este conceito aplicado à massa e ao volume de apenas um grão determina a propriedade física massa específica real ou unitária (Eq. 1). Já a aplicação do conceito para uma determinada quantidade de produto estabelece a definição da característica massa específica aparente ou granular (Eq. 2) (PABIS et al., 1998), ou seja:

$$\rho = \frac{m_p}{V_p} \quad (1)$$

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \quad (2)$$

onde:

ρ : massa específica real ou unitária do produto, kg m^{-3} ;

ρ_{ap} : massa específica aparente ou granular do produto, kg m^{-3} ;

m_p : massa unitária do produto, kg;

m : massa de produto, kg;

V_p : volume unitário do produto, m^3 ; e

V : volume ocupado pela massa de produto, m^3 .

Para a determinação da massa específica real ou unitária, utilizou-se o método do picnômetro, segundo Moreira (1985) e ASTM D 792 (1991). Com a ajuda do picnômetro determina-se o volume do produto e com a utilização de uma balança analítica com precisão de 0,001g a massa. Com os dados anteriores e a equação 1 tem-se a massa específica real.

A massa específica aparente determinou-se mediante o enchido de um recipiente cilíndrico de 500 ml com café de uma altura de 15 cm e pesando seu conteúdo numa balança. A razão entre a massa de café e o volume do recipiente foi tomada como massa específica aparente (Eq. 2).

2.2 Porosidade

A porosidade de uma massa granular é definida como a relação entre o volume ocupado pelo ar nos espaços intergranulares e o volume total desta massa (MOHSENIN, 1986). Tal propriedade é usualmente representada pela equação 3:

$$\varepsilon = \frac{V - V_p}{V} \quad (3)$$

onde:

ε = porosidade da massa de produto, decimal.

A incorporação das equações 1 e 2 na expressão de porosidade resulta na equação 4:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_{ap}}{\rho} \right) \quad (4)$$

2.3 Forma e tamanho

A forma e o tamanho dos frutos de café, considerados esferoides triaxiais (Figura 1), foram analisados pela esfericidade, circularidade, área projetada e área superficial, a partir das medidas das dimensões características, eixos ortogonais, em dez repetições, obtidas por meio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

Após determinadas suas dimensões características, o volume (V) dos frutos foi determinado como proposto por Mohsenin (1986), de acordo com a equação 5:

$$V = \frac{\pi abc}{6} \quad (5)$$

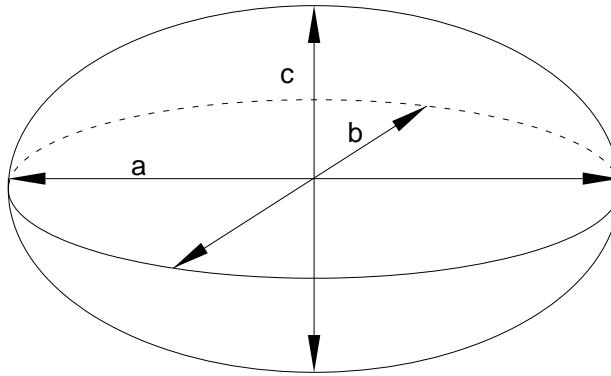


Figura 1 – Desenho esquemático do fruto de café, considerado como esferoide tri axial, com suas dimensões características.

A esfericidade (E) dos frutos de café foi calculada utilizando-se a equação 6, proposta por Mohsenin (1986):

$$E = \frac{(abc)^{1/3}}{a} \quad (6)$$

A circularidade (C) dos frutos de café foi determinada equação 7 (MOHSENIN, 1986):

$$C = \frac{b}{a} \quad (7)$$

A área projetada (A_p), em mm^2 , dos frutos de café foi determinada pela equação 8:

$$A_p = \frac{\pi ab}{4} \quad (8)$$

A área superficial (S), em mm^2 , dos frutos de café, foi calculada pela equação 9 e 10:

$$S = \frac{\pi b^2}{2} + \left(\frac{\pi ab}{2e}\right) \sin^{-1} e \quad (9)$$

$$e = \left[1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2\right]^{1/2} \quad (10)$$

2.4 Índice de contração da massa e unitária (ψ)

O índice de contração volumétrica dos frutos de café durante a secagem do produto foi determinado pela relação entre o volume para cada teor de água (V) e o volume inicial (V_0), através da equação 11:

$$\psi = \frac{V}{V_0} \quad (11)$$

onde:

ψ : índice de contração volumétrica, decimal;

V : volume em cada teor de água, m^3 ; e

V_0 : volume inicial, m^3 .

Para o acompanhamento da redução do volume da massa durante cada medição, o produto foi transferido para uma proveta, com capacidade de 1 litro. O índice de contração volumétrica unitária dos frutos de café foi determinado de acordo com a equação 11. Para a determinação do volume do produto, foi utilizada a equação 5, de acordo com a Figura 1.

Aos dados experimentais do índice de contração volumétrica unitária e da massa, foram ajustados os modelos matemáticos descritos pelas expressões listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos utilizados para simular o índice de contração volumétrica de produtos agrícolas.

Referência	Modelo	Eq.
Bala e Woods (1984) adaptado	$\Psi = 1 - \beta_0 \{1 - \exp[-\beta_1(U_0 - U)]\}$	(12)
Corrêa et al. (2004)	$\Psi = \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 \exp(U)}$	(13)
Rahman (1995)	$\Psi = 1 + \beta_1(U - U_0)$	(14)
Linear	$\Psi = \beta_0 + \beta_1 U$	(15)
Exponencial	$\Psi = \beta_1 \exp(\beta_2 U)$	(16)
Polinomial	$\Psi = \beta_0 + \beta_1 U + \beta_2 U^2$	(17)

onde:

U: teor de água, decimal b.s.;

U_0 : teor de água inicial, decimal b.s; e

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$: parâmetros que dependem do produto.

2.5 Análise estatística

Os dados experimentais da variação do teor de água, das massas específicas aparente e real, porosidade, forma, tamanho, contração volumétrica foram submetidos à análise de regressão (equação 18 e 19) e à seleção do modelo adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas.

Modelo de regressão linear:

$$Y_i = f(X_i, \beta) + \varepsilon_i \quad (18)$$

onde:

X_i : o vetor de observações das variáveis preditoras para o i -ésimo caso;

β : o vetor dos parâmetros;

$f(X_i, \beta)$: representa o valor esperado $E(Y_i)$; e

ε_i : são os erros.

Modelo de regressão não linear:

$$Y_i = f(X_i, \gamma) + \varepsilon_i \quad (19)$$

onde:

γ : o vetor de parâmetros do modelo; e

$f(X_i, \gamma)$: uma função não linear, representa o valor esperado $E(Y_i)$.

Os modelos foram selecionados considerando-se a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), a magnitude do erro médio relativo (P) e do erro padrão da estimativa (SE). O erro médio relativo e o desvio-padrão da estimativa, para cada um dos modelos, foram calculados conforme as equações 20 e 21:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (20)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (21)$$

onde:

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

n: número de observações experimentais; e

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Realizou-se o teste de identidade entre modelos, descrito por Regazzi (1999), com o propósito de avaliar a possibilidade de uma única equação representar o comportamento das variáveis estudadas. Para cada variável, foram testadas todas as combinações que representam as várias possibilidades de agrupamento entre os clones estudados, assim como o estágio de maturação (Tabela 2). A identificação da igualdade ou da diferença entre os clones e estádios de maturação, em relação às variáveis modeladas, foi feita por meio da comparação entre a soma de quadrado dos resíduos para cada variável, em cada estágio ou clone (modelo completo) e a soma de quadrado da diferença para o modelo ajustado com uma única base de dados contendo todas as informações do clone ou clones (modelo reduzido). Sempre que o valor de F calculado for maior ou igual ao valor de F tabelado, significa que o teste foi significativo, a um nível de probabilidade ($\alpha=1\%$) pré-estabelecido. Nesse caso, rejeita-se H_0 , ou seja, o total da soma de quadrados dos resíduos de cada uma das variáveis em cada estágio ou clone (modelo completo) difere, estatisticamente, da soma de quadrado da diferença para o modelo ajustado para o conjunto total dos dados para cada variável (modelo reduzido). Caso contrário, se aceita H_0 , ou seja, pode-se utilizar um único modelo para estimar a variável estudada para o clone ou grupo de clones.

Tabela 2 – Combinações que representam as várias possibilidades de agrupamento entre os clones estudados

Variedade clonal	Clones	Estádio de maturação	Combinação
EMCAPA 8141	83	Verde vs Cereja	1
EMCAPA 8131	31	Verde vs Cereja	2
EMCAPA 8141	74	Verde vs Cereja	3
EMCAPA 8131	32	Verde vs Cereja	4
EMCAPA 8141	83-74	Verde vs Verde	5
EMCAPA 8141	83-74	Cereja vs Cereja	6
EMCAPA 8131	31-32	Verde vs Verde	7
EMCAPA 8131	31-32	Cereja vs Cereja	8

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas das equações ajustadas das massas específicas real e aparente dos frutos de café de cada um dos clones estudados, em função do teor de água do produto, podem ser visualizadas da Figura 2 a 9.

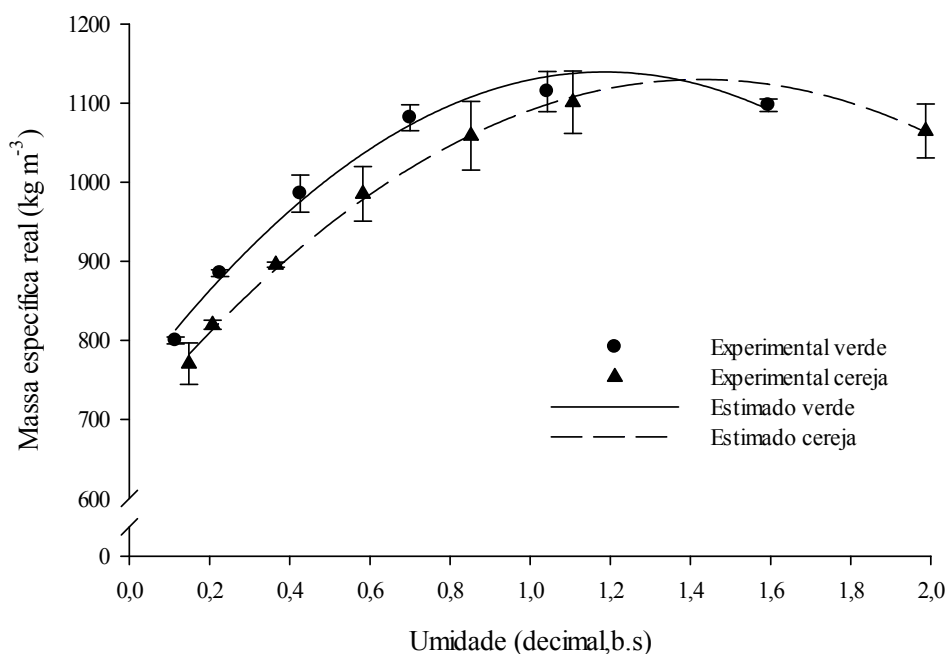


Figura 2 – Valores experimentais e estimados da massa específica real em função do teor de água dos frutos de café do clone 83.

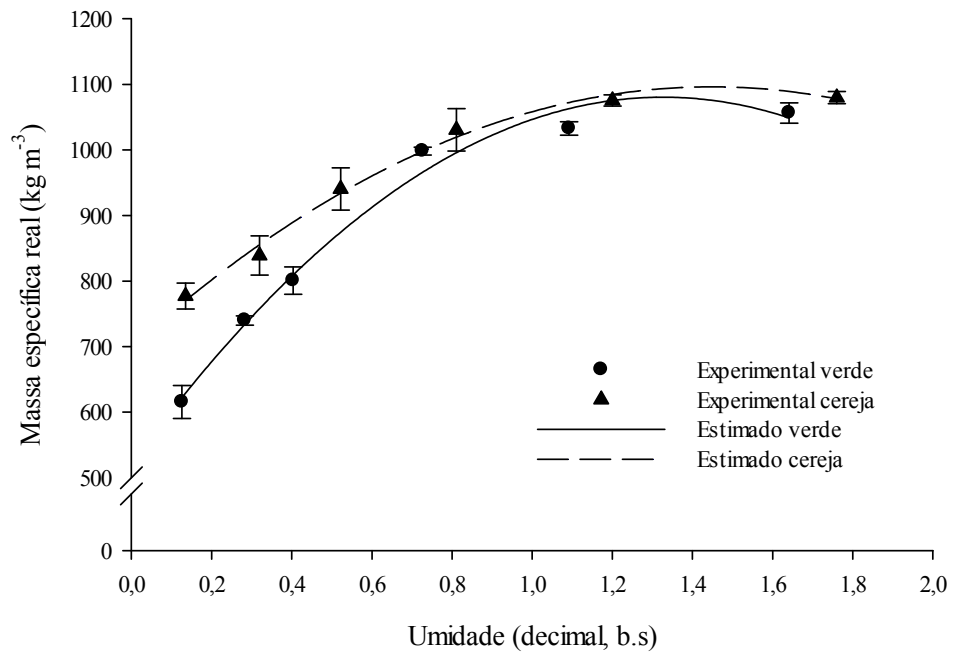


Figura 3 – Valores experimentais e estimados da massa específica real em função do teor de água dos frutos de café do clone 31.

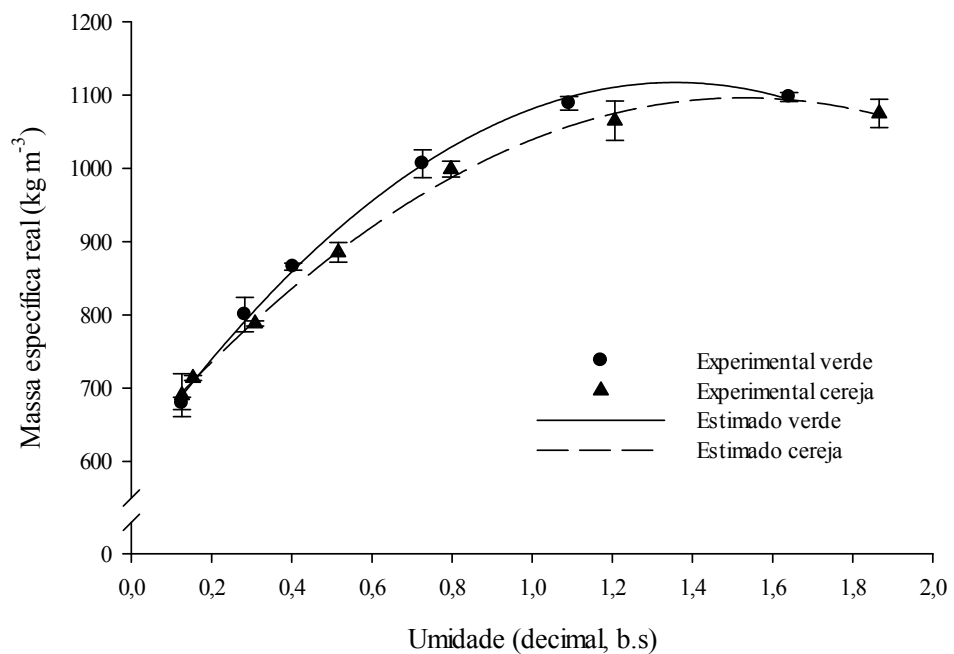


Figura 4 – Valores experimentais e estimados da massa específica real em função do teor de água dos frutos de café do clone 74.

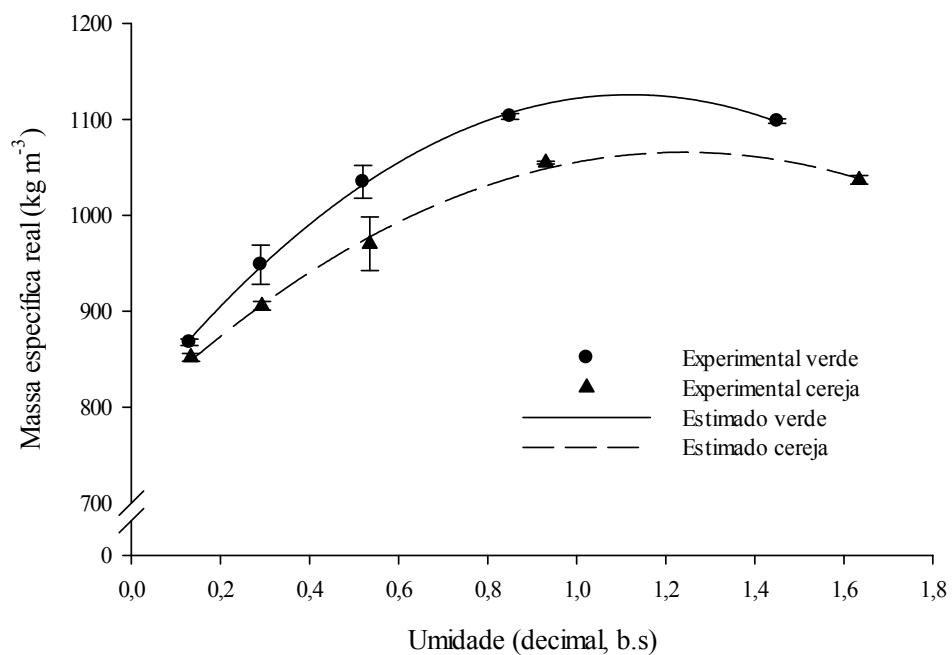


Figura 5 – Valores experimentais e estimados da massa específica real em função do teor de água dos frutos de café do clone 32.

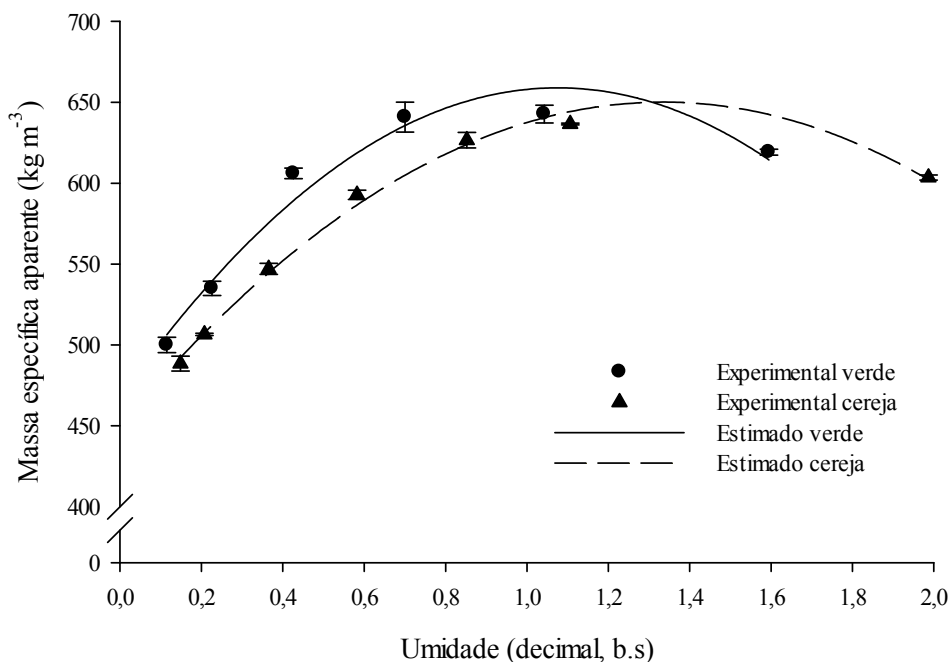


Figura 6 – Valores experimentais e estimados da massa específica aparente em função do teor de água dos frutos de café do clone 83.

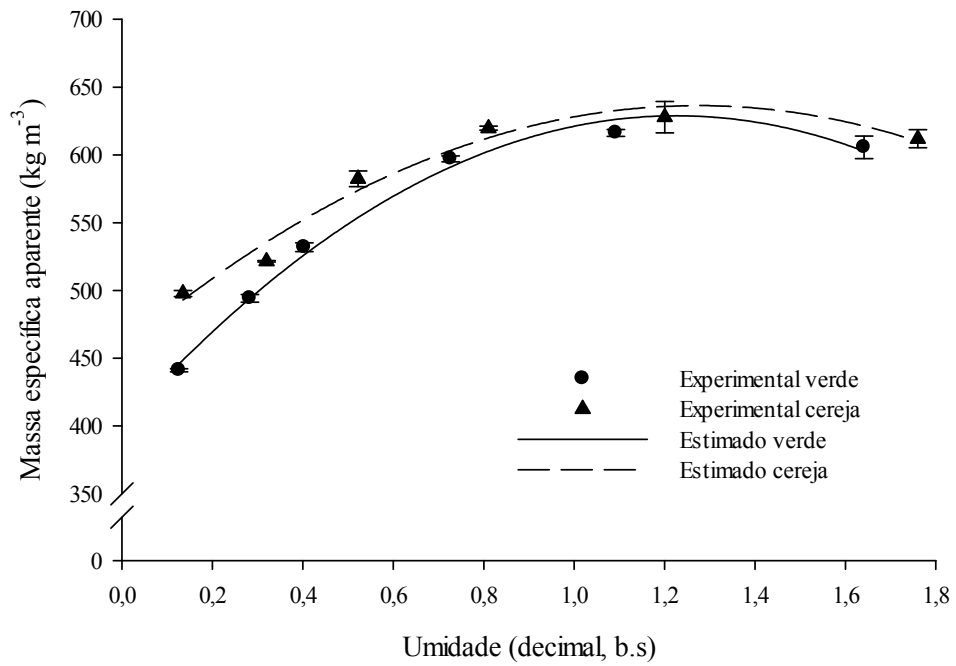


Figura 7 – Valores experimentais e estimados da massa específica aparente em função do teor de água dos frutos de café do clone 31.

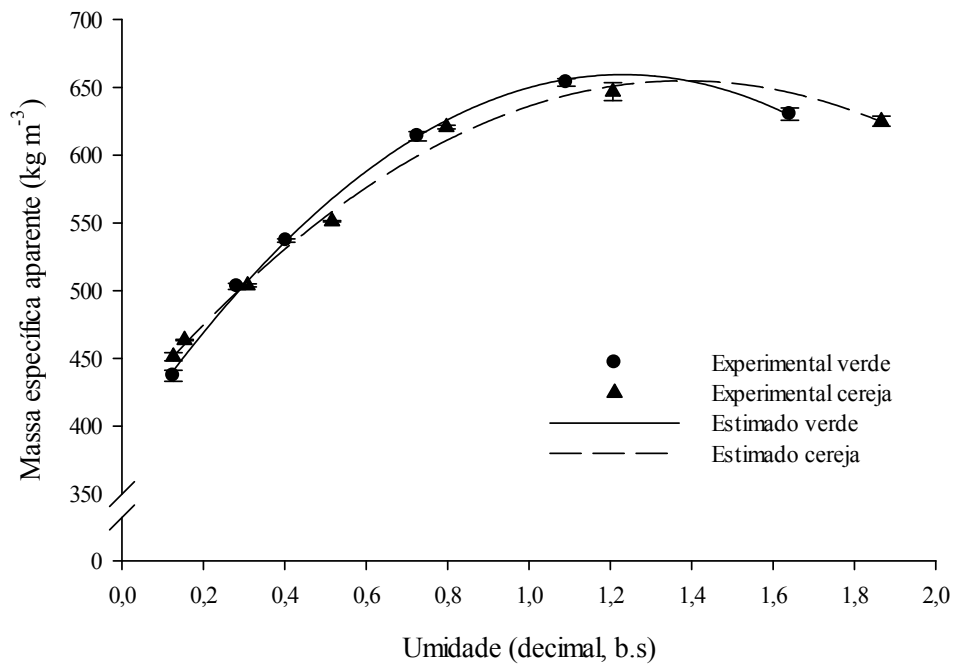


Figura 8 – Valores experimentais e estimados da massa específica aparente em função do teor de água dos frutos de café do clone 74.

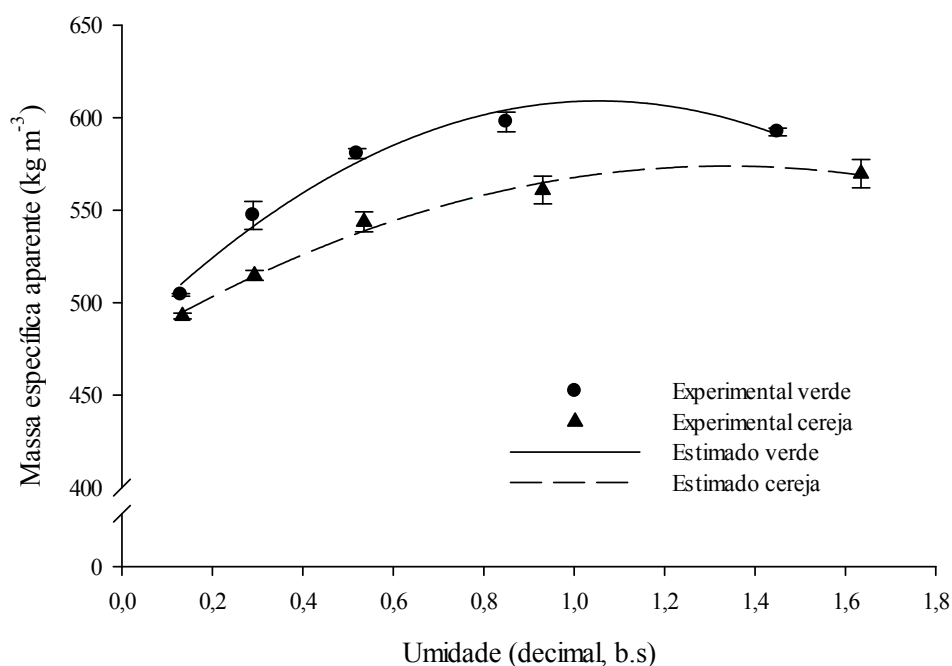


Figura 9 – Valores experimentais e estimados da massa específica aparente em função do teor de água dos frutos de café do clone 32.

Verifica-se, nas figuras anteriores, o comportamento não linear das massas específicas real e aparente em função do teor de água para cada clone analisado. Quando há aumento da umidade aumenta também a massa específica de forma não linear. Pode-se observar um mínimo incremento das massas específicas no início da secagem e depois uma diminuição devido a que na etapa inicial existe uma variação do volume superior à variação da massa do produto. Resultados similares foram reportados por Couto et al. (1999) e Afonso Júnior (2001), quando estudaram diferentes variedades de café arábica.

Nas figuras anteriores, pode-se verificar que os valores de massa específica real e aparente para frutos verdes e cerejas dos clones analisados tendem a uma variação menor para baixos teores de água; explicada pela pequena mudança volumétrica da casca do fruto. Isso faz com que o comportamento dessas propriedades físicas apresente-se de maneira diferente em relação à apresentada pela maioria dos grãos agrícolas, cujos valores tendem a aumentar com o decréscimo do teor de água do produto (BROOKER et al., 1974; MOHSENIN, 1986).

Os valores dos coeficientes da regressão não linear correspondente a cada propriedade física de cada clone e estágio de maturação estão reportados na Tabela 3 com seus respectivos valores de coeficiente de determinação.

Tabela 3 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados aos valores experimentais e calculados de massa específica real e aparente e a porosidade

Clone	Prop. física	β_0	β_1	β_2	R^2
83 cereja	ρ_{real}	696,9902	607,3592	-212,8559	0,9555
	ρ_{ap}	450,1882	299,9107	-112,4353	0,9917
	ε	36,1681	7,4135	-1,9294	0,9692
83 verde	ρ_{real}	739,7638	674,5577	-284,4921	0,9776
	ρ_{ap}	467,6767	355,6632	-165,3102	0,9566
	ε	37,2522	5,5952	-0,9844	0,9119
31 cereja	ρ_{real}	699,9460	547,9643	-189,3376	0,9650
	ρ_{ap}	456,9774	282,0646	-110,8383	0,9630
	ε	35,2639	6,5725	-1,1281	0,9869
31 verde	ρ_{real}	520,7800	843,8567	-318,0794	0,9808
	ρ_{ap}	401,3463	371,1782	-151,3732	0,9895
	ε	26,1862	23,2430	-8,1934	0,9571
74 cereja	ρ_{real}	618,3643	625,9544	-204,9002	0,9887
	ρ_{ap}	408,7257	356,4125	-129,0082	0,9942
	ε	35,4472	5,2492	-0,6155	0,9728
74 verde	ρ_{real}	597,2583	766,5714	-282,4816	0,9926
	ρ_{ap}	388,2616	440,3041	-178,7430	0,9976
	ε	34,3063	5,4035	-0,7757	0,9684
32 cereja	ρ_{real}	793,0427	440,0512	-177,4412	0,9780
	ρ_{ap}	476,3333	146,2152	-54,7569	0,9653
	ε	40,5495	10,2964	-4,5646	0,9067
32 verde	ρ_{real}	798,8215	583,8045	-260,5297	0,9873
	ρ_{ap}	480,0040	244,9349	-116,1446	0,9676
	ε	40,4645	8,7013	-3,3021	0,9703

Observa-se, nas Figuras 10, 11, 12 e 13, o comportamento das porosidades dos frutos de café estudadas onde elas tendem a crescer com o aumento do teor de água. Apesar de que a tendência do comportamento das massas específicas aparente e real diferiram das observadas para outros produtos agrícolas, a porosidade apresenta a mesma tendência da maioria dos produtos agrícolas estudados e reportados na literatura. Esses resultados são semelhantes ao encontrado por Couto et al. (1999) e Afonso Júnior

(2001), em que os autores estudaram o efeito do teor de água nas propriedades físicas de frutos de café arábica de diferentes variedades e estádios de maturação.

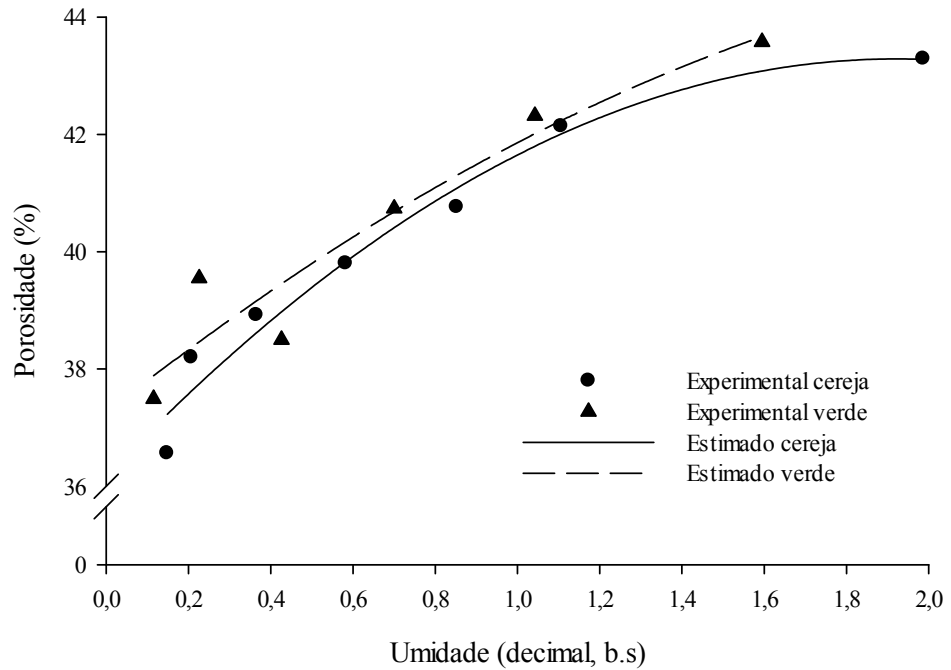


Figura 10 – Valores experimentais e observados da porosidade em função do teor de água dos frutos de café do clone 83.

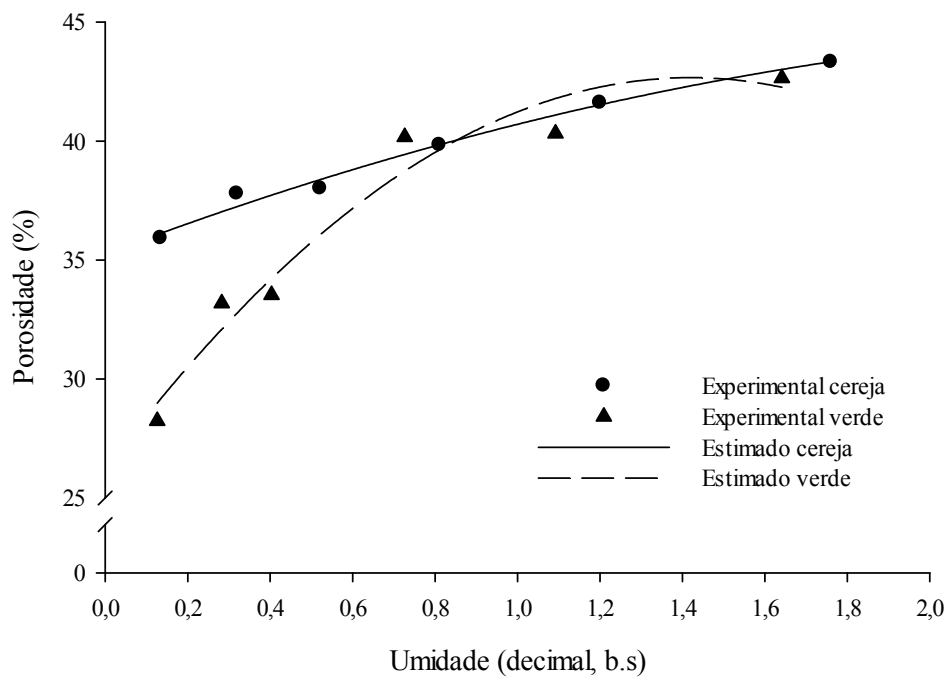


Figura 11 – Valores experimentais e observados da porosidade em função do teor de água dos frutos de café do clone 31.

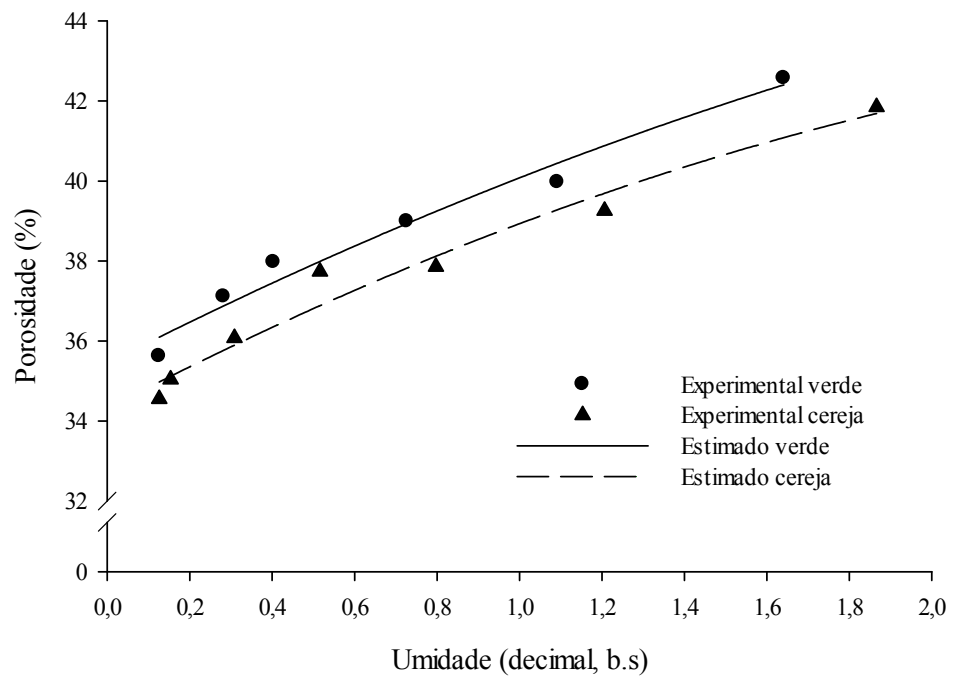


Figura 12 – Valores experimentais e observados da porosidade em função do teor de água dos frutos de café do clone 74.

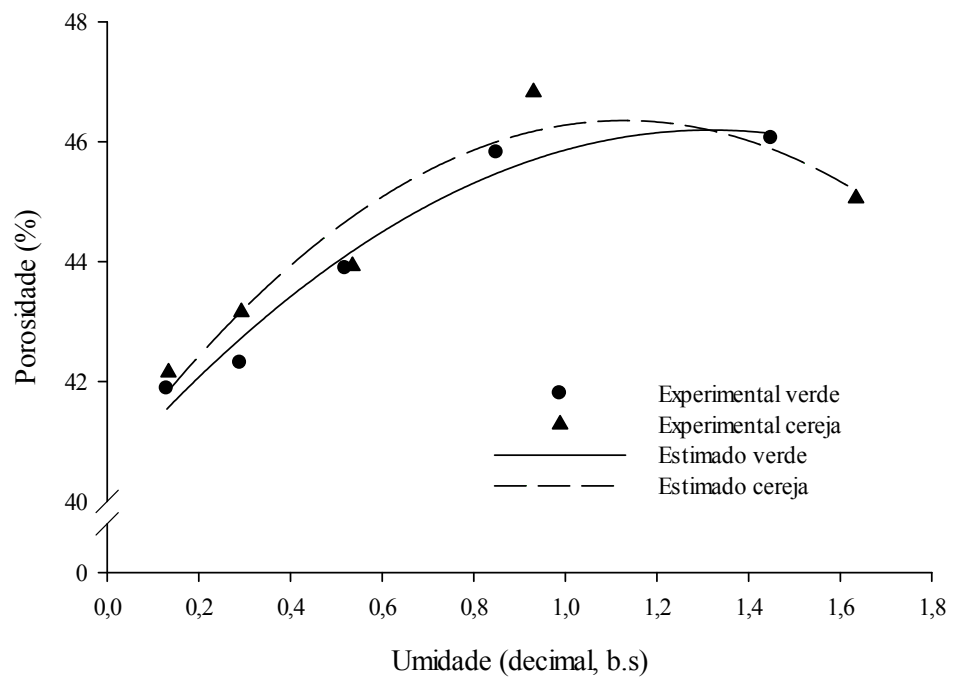


Figura 13 – Valores experimentais e observados da porosidade em função do teor de água dos frutos de café do clone 32.

Um resumo dos resultados do teste de identidade de modelos para as massas específicas real e aparente e a porosidade pode ser verificado na Tabela 4.

Esse teste tem como objetivo o agrupamento dos diferentes clones ou do estágio de maturação, visando ajustar um único modelo para o conjunto total de dados das massas específicas aparente e real e a porosidade. A Tabela 4 apresenta os resultados de cada uma das combinações estudadas para um nível de significância de 1 % onde, sempre que o valor de $F_{(\text{calculado})}$ for maior que $F_{(\text{tabelado})}$, o teste é significativo, ou seja, rejeita-se H_0 . Assim, a soma de quadrados dos resíduos de cada clone difere estatisticamente da soma de quadrados dos resíduos feita para o conjunto total dos dados. Quando ocorrer o contrário o teste é não significativo, então se aceita H_0 .

Pode-se observar que, para a combinação 3, é possível utilizar um modelo comum para representar o comportamento da massa específica real, aparente e a porosidade. Já em relação às outras combinações, o teste de F indicou que é inadequado o agrupamento para alguma das propriedades em estudo a fim de se obter equações reduzidas, devendo ser ajustadas equações individuais para cada propriedade em que o teste foi significativo.

Tabela 4 – Resultado do teste de identidade para a massa específica real e aparente e a porosidade em todas as combinações estudadas

Comb.	Prop. física	Estimativas dos parâmetros do modelo completo			F _{calc}	F _{tab}	Teste
		β_0	β_1	β_2			
1	ρ_r	727,0387	595,3301	-218,2668	16,67	8,451	S
	ρ_a	465,5600	294,5356	-116,7550	8,12	8,451	NS
	ε	36,6056	6,9138	-1,7300	0,78	8,451	NS
2	ρ_r	605,2804	698,7740	-251,3911	14,19	9,779	S
	ρ_a	427,8100	326,4866	-129,6619	6,95	9,779	NS
	ε	30,4491	15,1659	-4,6358	12,24	9,779	S
3	ρ_r	610,9594	682,444	-234,4355	8,21	8,451	NS
	ρ_a	402,5004	382,7544	-143,9819	5,70	8,451	NS
	ε	34,6671	5,9569	-1,0455	4,95	8,451	NS
4	ρ_r	794,5379	518,9497	-222,3266	71,02	16,694	S
	ρ_a	478,2535	195,5916	-84,4220	17,44	16,694	S
	ε	40,4441	9,7812	-4,1459	0,42	16,694	NS
5	ρ_r	673,2538	706,4846	-275,8475	43,54	9,779	S
	ρ_a	430,9099	388,8977	-166,9539	16,53	9,779	S
	ε	36,3793	5,3792	-0,7963	5,97	9,779	NS
6	ρ_r	652,2173	632,8158	-216,3845	58,13	7,591	S
	ρ_a	426,7281	335,0577	-123,6428	13,34	7,591	S
	ε	35,1189	6,8030	-1,5433	23,02	7,591	S
7	ρ_r	652,9771	716,0038	-287,8531	54,69	12,060	S
	ρ_a	440,5825	301,8644	-127,7430	0,56	12,060	NS
	ε	32,7481	17,1691	-6,4962	48,97	12,060	S
8	ρ_r	750,2104	478,6067	-173,3102	20,56	12,060	S
	ρ_a	454,9871	245,6928	-96,1373	11,72	12,060	NS
	ε	38,3194	6,5266	-1,8812	80,42	12,060	S

S = Significativo ao nível de 99 % de probabilidade pela distribuição F.

NS = Não significativo ao nível de 99 % de probabilidade pela distribuição F.

Nas Tabela 5 e Tabela 6 encontram-se os dados de volume, área projetada, área superficial, dos índices de contração das dimensões características (dimensão/dimensão inicial), esfericidade e circularidade dos frutos de café em função do teor de água.

Tabela 5 – Índices de contração (a/a_0 , b/b_0 e c/c_0), o volume (V), a área projetada (A_p), a área superficial (S), a esfericidade (E) e a circularidade (C) dos frutos de café

Umidade (b.s.)	V (mm ³)	A_p (mm ²)	S (mm ²)	a/a_0	b/b_0	c/c_0	E (%)	C (%)
Clone 83 cereja								
1,987	944,12	142,24	506,16	1,00	1,00	1,00	75,09	68,94
1,300	716,44	121,87	425,75	0,96	0,90	0,89	71,68	64,70
0,872	592,86	107,62	368,26	0,93	0,81	0,83	69,02	60,10
0,578	549,63	101,61	350,29	0,89	0,80	0,81	70,20	61,73
0,364	539,03	100,23	345,73	0,89	0,80	0,81	70,29	61,86
0,204	537,50	99,71	343,67	0,89	0,79	0,81	70,31	61,69
0,132	535,58	99,35	342,51	0,88	0,79	0,81	70,38	61,73
Clone 83 verde								
1,595	544,28	99,92	336,66	1,00	1,00	1,00	67,68	56,79
1,050	423,88	86,45	287,75	0,95	0,91	0,90	65,42	54,25
0,696	392,50	82,30	271,84	0,94	0,87	0,88	64,40	52,67
0,443	378,84	79,92	265,36	0,92	0,87	0,87	65,23	53,73
0,266	367,50	78,37	260,58	0,91	0,86	0,86	65,39	54,02
0,114	363,95	77,77	258,71	0,90	0,86	0,86	65,49	54,13
Clone 31 cereja								
1,760	758,12	125,63	452,89	1,00	1,00	1,00	75,91	72,04
1,161	605,40	106,57	380,02	0,94	0,90	0,94	75,07	69,43
0,778	462,07	89,34	319,81	0,85	0,83	0,86	75,43	70,35
0,509	397,40	80,26	286,59	0,81	0,79	0,82	75,36	69,75
0,313	414,18	85,47	308,11	0,82	0,82	0,80	75,24	72,04
0,158	408,93	84,57	304,76	0,82	0,82	0,80	75,27	71,95
0,127	407,82	84,41	304,13	0,82	0,82	0,80	75,25	71,90
Clone 31 verde								
1,641	542,14	100,47	365,09	1,00	1,00	1,00	76,92	73,97
1,087	435,76	86,67	310,26	0,95	0,91	0,93	75,11	70,37
0,727	395,50	81,55	290,81	0,93	0,87	0,90	74,48	69,45
0,469	372,58	77,92	280,97	0,89	0,87	0,89	76,09	72,08
0,288	366,02	76,66	277,63	0,88	0,87	0,88	76,83	73,15
0,134	363,91	76,32	276,64	0,88	0,87	0,88	76,95	73,35

Tabela 6 – Índices de contração (a/a_0 , b/b_0 e c/c_0), o volume (V), a área projetada (A_p), a área superficial (S), a esfericidade (E) e a circularidade (C) dos frutos de café.
(Continuação)

Umidade (b.s.)	Volume (mm³)	A_p (mm²)	S (mm²)	a/a₀	b/b₀	c/c₀	E (%)	C (%)
Clone 74 cereja								
1,866	805,53	130,39	460,24	1,00	1,00	1,00	73,36	67,06
1,210	649,26	117,12	407,89	0,97	0,93	0,90	70,37	63,99
0,797	578,69	106,94	372,98	0,92	0,89	0,88	71,06	64,32
0,518	554,23	103,12	360,29	0,91	0,87	0,87	71,55	64,73
0,312	533,99	100,26	348,98	0,90	0,86	0,86	71,19	63,87
0,150	527,05	99,92	348,13	0,90	0,86	0,85	71,12	64,09
0,123	525,83	99,76	347,54	0,89	0,85	0,85	71,11	64,06
Clone 74 verde								
1,641	744,14	127,09	449,48	1,00	1,00	1,00	72,62	67,52
1,088	616,10	112,40	394,89	0,95	0,93	0,94	71,68	65,98
0,726	567,06	103,69	363,85	0,92	0,89	0,93	72,44	65,70
0,478	548,98	100,68	355,09	0,89	0,89	0,93	73,37	66,87
0,287	538,78	98,82	349,74	0,88	0,88	0,93	74,03	67,67
0,135	533,60	97,90	347,00	0,87	0,88	0,93	74,34	68,03
Clone 32 cereja								
1,634	505,39	98,95	357,93	1,00	1,00	1,00	75,14	72,85
0,930	395,51	85,56	305,95	0,95	0,91	0,91	73,05	70,10
0,535	369,76	82,16	292,40	0,94	0,89	0,88	72,31	68,99
0,293	354,68	80,79	286,60	0,93	0,87	0,86	71,51	68,22
0,133	352,24	80,27	284,74	0,93	0,87	0,86	71,57	68,20
Clone 32 verde								
1,454	474,33	89,13	317,58	1,00	1,00	1,00	75,59	69,27
0,855	282,10	64,47	220,48	0,91	0,79	0,82	69,56	59,99
0,524	261,59	61,38	208,92	0,90	0,77	0,80	68,92	58,97
0,287	249,65	59,71	202,31	0,89	0,75	0,79	68,22	57,98
0,134	241,79	59,14	200,33	0,89	0,74	0,77	67,79	57,93

Conforme o que foi apresentado, pode-se observar a redução para todas as dimensões características com a redução do teor de água. Observa-se um comportamento semelhante em cada índice de contração avaliado, o que garante valores de esfericidade e circularidade com valores próximos entre o início e o final da secagem. Os clones 83, 31 e 74 mantêm um comportamento similar entre si, já o clone 32 tem menores valores de contração, o que pode estar justificado pela estrutura celular do clone.

Observa-se, da Figura 14 a 17, o comportamento da área projetada (A_p) e a área superficial (S) dos clones 83, 31, 74 e 32, nos estádios verde e cereja. O clone 74 tem um comportamento diferenciado em relação aos outros quando comparado o estádio verde com o cereja nas propriedades anteriores, em que apresenta valores muito semelhantes para cada valor de umidade. Isso pode ocorrer pelo fato de os frutos de café do clone 74 verde terem sido colhidos muito próximos ao estádio cereja. Já os outros clones apresentam uma marcada diferença entre os dois estádios.

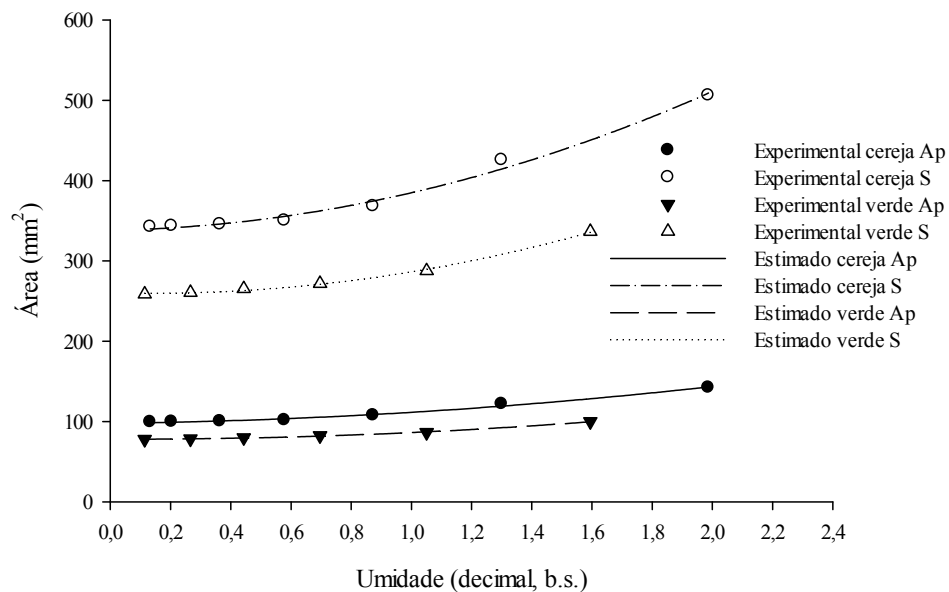


Figura 14 – Valores experimentais e estimados da área projetada e superficial em função do teor de água dos frutos de café do clone 83.

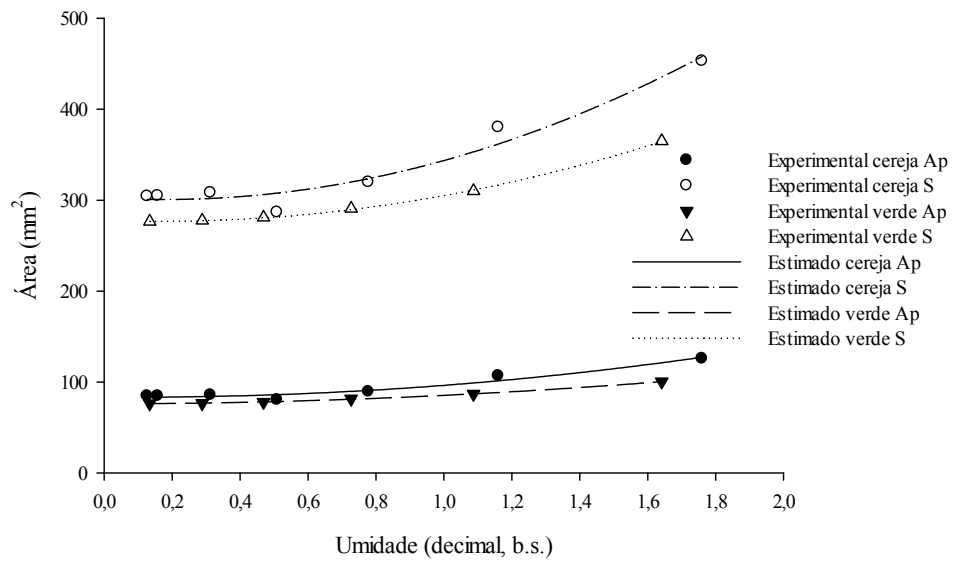


Figura 15 – Valores experimentais e estimados da área projetada e superficial em função do teor de água dos frutos de café do clone 31.

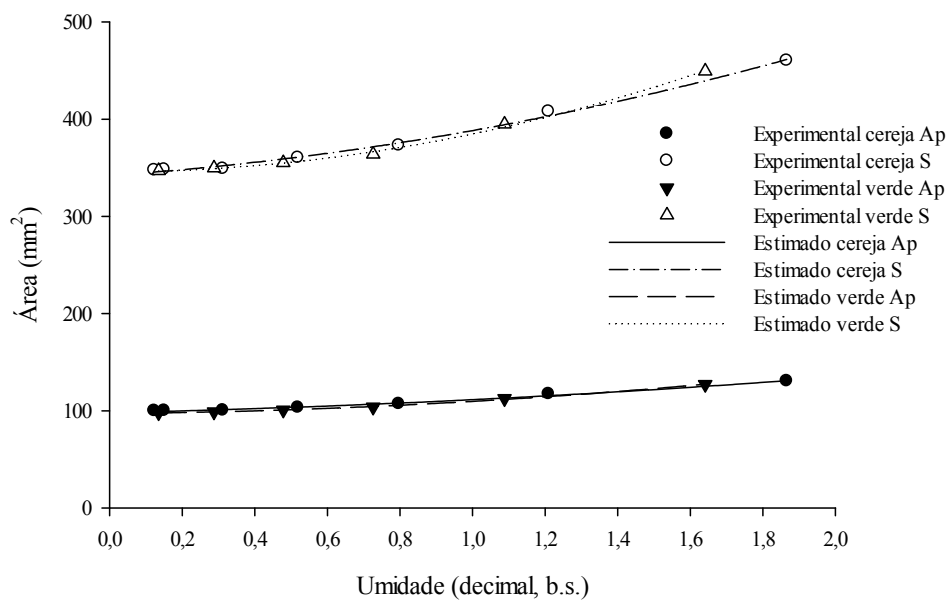


Figura 16 – Valores experimentais e estimados da área projetada e superficial em função do teor de água dos frutos de café do clone 74.

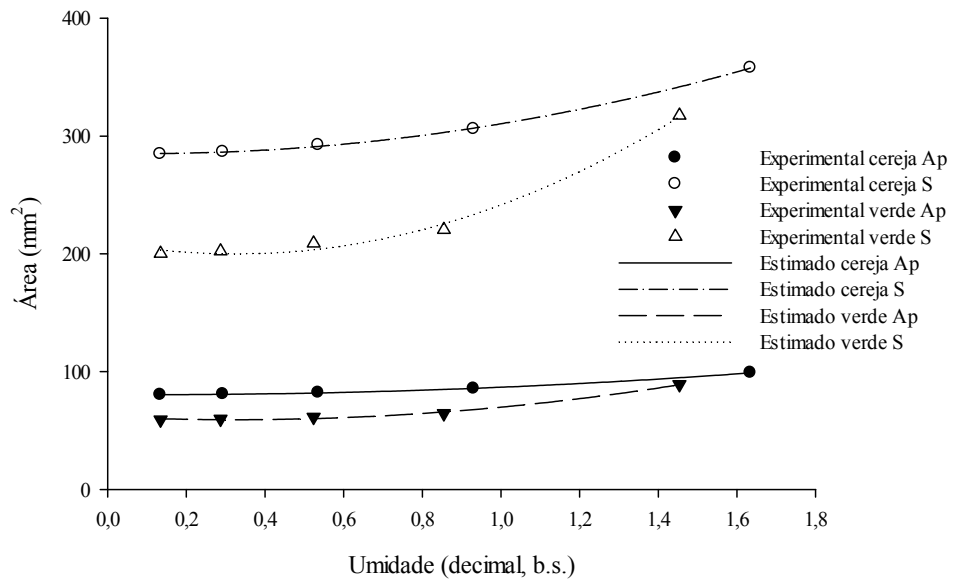


Figura 17 – Valores experimentais e estimados da área projetada e superficial em função do teor de água dos frutos de café do clone 32.

Os dados experimentais da área projetada (A_p) e da área superficial (S) dos frutos dos clones estudados apresentaram um ajuste ao modelo polinomial com valores do coeficiente de determinação superiores a 0,99, como pode verificar-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados aos valores experimentais e calculados da área projetada (A_p) e a área superficial (S).

Clone	Prop. física	β_0	β_1	β_2	R^2
83 cereja	A_p	97,7619	4,5654	9,1661	0,9913
	S	338,4011	7,1828	39,6378	0,9906
83 verde	A_p	77,9897	-0,6343	8,9379	0,9970
	S	260,5157	-9,3729	35,5574	0,9975
31 cereja	A_p	83,4991	-2,9904	15,8072	0,9568
	S	302,5651	-20,8073	62,0961	0,9576
31 verde	A_p	75,9198	0,7436	8,6439	0,9989
	S	277,9520	-12,6892	39,9677	0,9996
74 cereja	A_p	98,0145	8,4510	4,9073	0,9928
	S	342,2116	25,7216	20,4833	0,9956
74 verde	A_p	97,0611	3,4579	9,1146	0,9981
	S	345,8200	1,2104	37,9892	0,9979
32 cereja	A_p	80,5144	-1,6659	7,9040	0,9993
	S	285,3228	-4,8758	30,1019	0,9994
32 verde	A_p	61,4875	-14,7192	23,0710	0,9933
	S	209,7836	-59,4369	91,3607	0,9929

Da Figura 18 a 21 observa-se o comportamento da contração volumétrica unitária e da massa de cada um dos clones, bem como os estádios de maturação estudados. Com um comportamento influenciado pelos índices de contração anteriormente analisados, os clones 83, 31 e 74 mantêm uma diminuição de volume durante a secagem similar entre si, já o clone 32 é o que apresenta comportamento diferenciado com maior contração.

Observa-se, nas figuras mencionadas, a diminuição dos valores de volume dos frutos de café a partir da diminuição do teor de água. Esta redução durante o processo de secagem do café está associada ao encolhimento do produto, ocupando os poros que surgem no transcurso da secagem. Similar comportamento foi relatado por Afonso Júnior (2001), mas, nesse caso, a contração de cada um dos clones foi menor se comparada com a espécie de café estudada pelo autor.

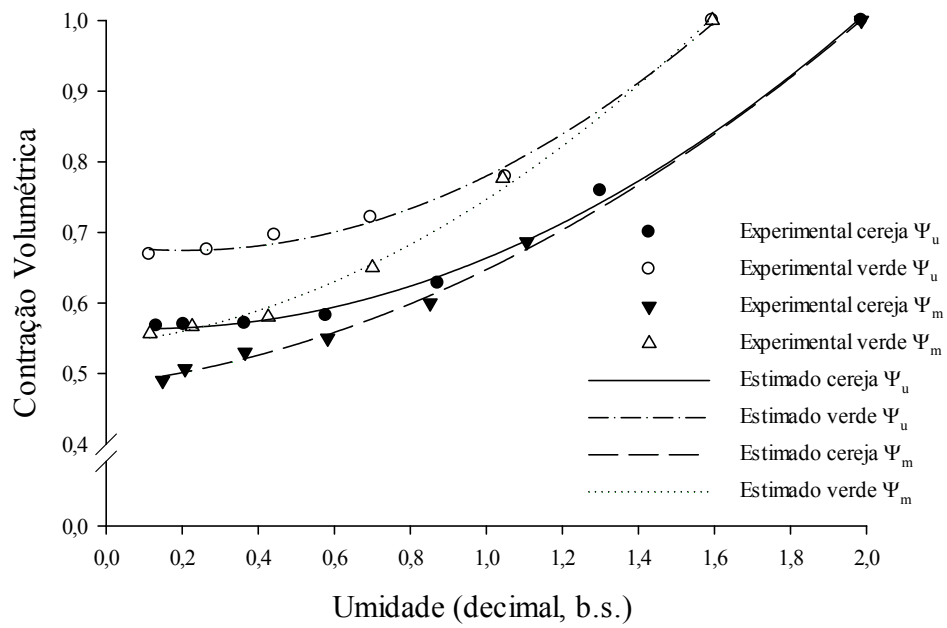


Figura 18 – Valores experimentais e estimados pelo modelo polinomial de contração volumétrica unitária e da massa em função do teor de água dos frutos de café do clone 83.

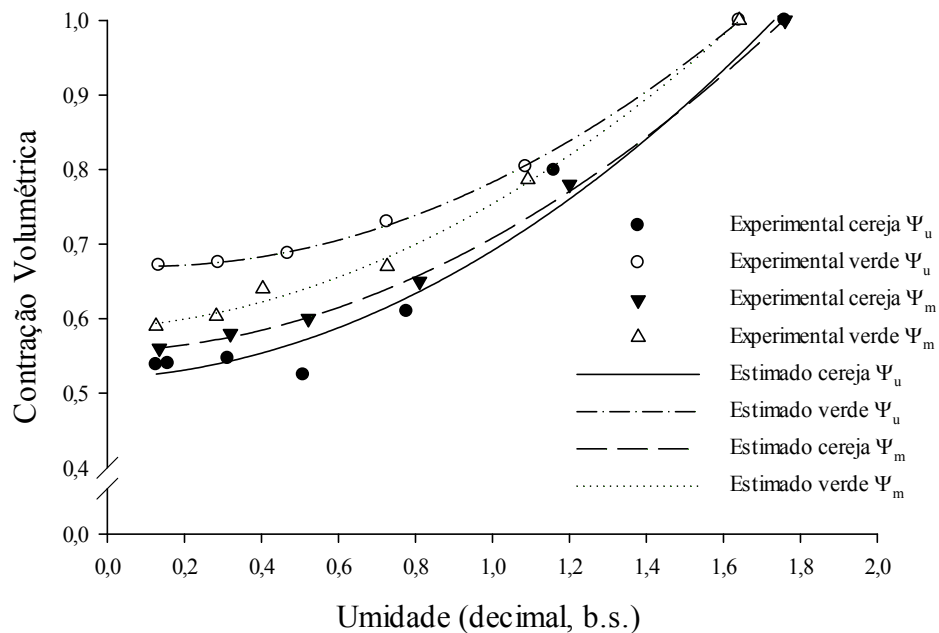


Figura 19 – Valores experimentais e estimados pelo modelo polinomial de contração volumétrica unitária e da massa em função do teor de água dos frutos de café do clone 31.

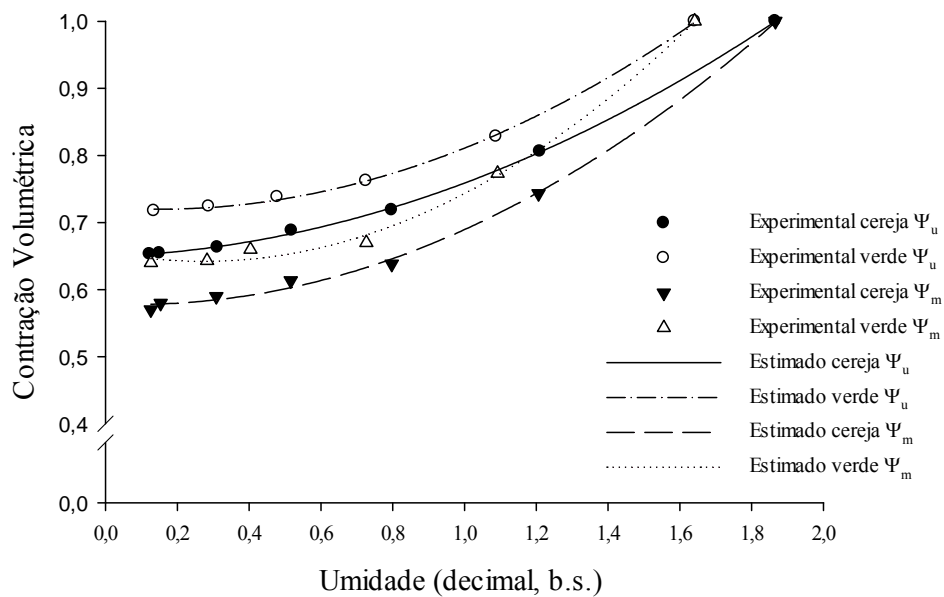


Figura 20 – Valores experimentais e estimados pelo modelo polinomial de contração volumétrica unitária e da massa em função do teor de água dos frutos de café do clone 74.

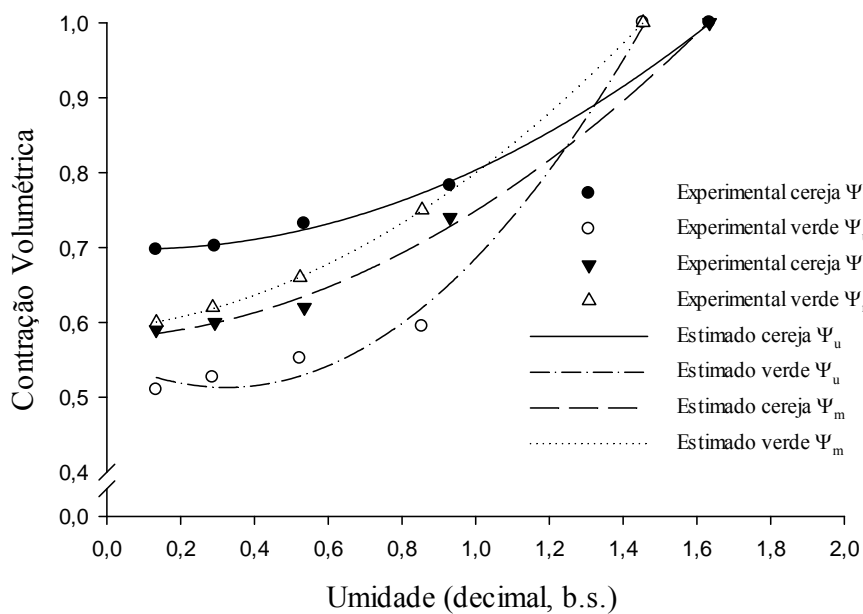


Figura 21 – Valores experimentais e estimados pelo modelo polinomial de contração volumétrica unitária e da massa em função do teor de água dos frutos de café do clone 32.

Nas Tabela 8 e 9, encontra-se o resumo dos modelos de contração estudados para a contração volumétrica unitária e da massa respectivamente. Pode-se considerar

que os modelos de Bala e Woods (1984) modificado e Corrêa et al. (2004) e o polinomial, são os que apresentam melhores ajustes quando comparados o coeficiente de determinação e a magnitude do erro médio relativo e do erro padrão da estimativa. Para a análise dos resultados foi selecionado o modelo polinomial, por ser, na maioria dos casos, o de melhor ajuste em relação aos anteriormente mencionados. Afonso et al. (2003), no estudo realizado com diferentes variedades e espécies de café, demonstraram que o modelo de melhor ajuste foi o polinomial. Corrêa et al. (2004), por sua vez, acreditam que o modelo de Bala e Woods possui melhor ajuste em relação aos valores experimentais de contração volumétrica de frutos de café durante o processo de secagem. Outros autores, como Corrêa et al. (2002), Resende et al. (2005) e Ribeiro et al. (2005), também observaram que o modelo de Bala e Woods foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de contração volumétrica unitária para grãos de café, soja e feijão, respectivamente.

Determinou-se, então, que o encolhimento decresce durante o processo de secagem. McMinn e Magee (1997) atribuem este comportamento às modificações estruturais do produto associadas com as variações celulares devido à perda de água. As diferenças do encolhimento entre os clones podem ocorrer devido às estruturas internas de cada clone em específico. Além disso, os clones apresentam diferentes variações nos índices de contração dos eixos ortogonais, como foi mostrado nas Tabela 5 e Tabela 6.

Na Tabela 10, encontram-se os resultados do teste de identidade realizado para testar a possibilidade de usar um único modelo.

Tabela 8 – Coeficientes dos modelos de contração volumétrica unitária ajustados aos valores experimentais

Clone	Eq.	β_0	β_1	β_2	R^2	SE	P
83 cereja	12	0,5263	1,0099	-	0,9913	0,0165	<0,0001
	13	1,8799	-0,1221	-	0,9712	0,0301	<0,0001
	14	-	0,2653	-	0,8943	0,0526	-
	15	0,4886	0,2310	-	0,9198	0,0501	0,0006
	16	-	0,5047	0,3314	0,9594	0,0357	0,0001
	17	0,5650	-0,0255	0,1242	0,9967	0,0114	<0,0001
83 verde	12	0,3573	1,7314	-	0,9993	0,0037	<0,0001
	13	1,6495	-0,1315	-	0,9991	0,0042	<0,0001
	14	-	0,2572	-	0,8521	0,0483	-
	15	0,6070	0,2157	-	0,8957	0,0454	0,0042
	16	-	0,6153	0,2826	0,9287	0,0375	0,0020
	17	0,6814	-0,0668	0,1654	0,9940	0,0126	0,0005
31 cereja	12	0,6580	0,8137	-	0,9621	0,0387	<0,0001
	13	2,0240	-0,1794	-	0,9192	0,0565	0,0007
	14	-	-0,3179	-	0,9086	0,0548	-
	15	0,4513	0,2906	-	0,9189	0,0566	0,0007
	16	-	0,4733	0,4209	0,9516	0,0437	0,0002
	17	0,5197	0,0267	0,1449	0,9703	0,0383	0,0009
31 verde	12	0,3915	1,2876	-	0,9985	0,0055	<0,0001
	13	1,6325	-0,1233	-	0,9955	0,0095	<0,0001
	14	-	-0,2504	-	0,9016	0,0399	-
	15	0,6032	0,2181	-	0,9282	0,0381	0,0020
	16	-	0,6137	0,2821	0,9565	0,0296	0,0007
	17	0,6716	-0,0260	0,1376	0,9996	0,0031	<0,0001
74 cereja	12	0,4352	0,9363	-	0,9990	0,0044	<0,0001
	13	1,6171	-0,0968	-	0,9847	0,0172	<0,0001
	14	-	-0,2181	-	0,9253	0,0346	-
	15	0,6034	0,1927	-	0,9462	0,0321	0,0002
	16	-	0,6122	0,2509	0,9710	0,0236	<0,0001
	17	0,6494	0,0192	0,0904	0,9996	0,0030	<0,0001

Tabela 9 – Coeficientes dos modelos de contração volumétrica unitária ajustados aos valores experimentais (Continuação)

Clone	Eq.	β_0	β_1	β_2	R^2	SE	P
74 verde	12	0,5489	0,4491	-	0,9410	0,0294	0,0013
	13	1,5117	-0,0994	-	0,9990	0,0038	<0,0001
	14	-	-0,2148	-	0,8878	0,0363	-
	15	0,6605	0,1850	-	0,9191	0,0344	0,0025
	16	-	0,6675	0,2305	0,9443	0,0286	0,0012
	17	0,7224	-0,0352	0,1241	0,9994	0,0035	<0,0001
32 cereja	12	0,3493	1,3716	-	0,9994	0,0035	<0,0001
	13	1,5599	-0,1094	-	0,9992	0,0042	<0,0001
	14	-	-0,2263	-	0,9196	0,0358	-
	15	0,6391	0,2035	-	0,9353	0,0371	0,0071
	16	-	0,6479	0,2540	0,9586	0,0296	0,0036
	17	0,6989	0,0202	0,1247	0,9985	0,0070	0,0015
32 verde	12	0,4960	2,7530	-	0,9990	0,0074	<0,0001
	13	2,3602	-0,3170	-	0,9952	0,0164	0,0001
	14	-	-0,4297	-	0,8177	0,0878	-
	15	0,4004	0,3628	-	0,8568	0,0899	0,0241
	16	-	0,4243	0,5635	0,9192	0,0675	0,0100
	17	0,5520	-0,2424	0,3761	0,9904	0,0285	0,0096

Tabela 10 – Coeficientes dos modelos de contração volumétrica da massa ajustados aos valores experimentais

Clone	Eq.	β_0	β_1	β_2	R^2	SE	P
83 cereja	12	0,6821	0,7398	-	0,9974	0,0100	<0,0001
	13	2,0596	-0,1465	-	0,9616	0,0384	<0,0001
	14	-	-0,2982	-	0,9459	0,0416	-
	15	0,4200	0,2711	-	0,9576	0,0403	0,0001
	16	-	0,4485	0,3976	0,9893	0,0202	<0,0001
	17	0,4843	0,0652	0,0980	0,9979	0,0099	<0,0001
83 verde	12	0,6253	0,8779	-	0,9942	0,0148	<0,0001
	13	1,9572	-0,1970	-	0,9645	0,0365	0,0005
	14	-	-0,3331	-	0,9457	0,0404	-
	15	0,4805	0,3038	-	0,9573	0,0400	0,0007
	16	-	0,5023	0,4243	0,9843	0,0243	<0,0001
	17	0,5417	0,0625	0,1427	0,9966	0,0131	0,0002
31 cereja	12	0,5674	0,9497	-	0,9968	0,0108	<0,0001
	13	1,8978	-0,1566	-	0,9725	0,0313	0,0003
	14	-	-0,3042	-	0,9296	0,0448	-
	15	0,4800	0,2717	-	0,9476	0,0432	0,0010
	16	-	0,5021	0,3811	0,9793	0,0272	0,0002
	17	0,5554	0,0199	0,1329	0,9987	0,0080	<0,0001
31 verde	12	0,5290	0,9883	-	0,9958	0,0113	<0,0001
	13	1,8214	-0,1611	-	0,9786	0,0255	0,0002
	14	-	-0,2972	-	0,9375	0,0391	-
	15	0,5248	0,2671	-	0,9534	0,0377	0,0008
	16	-	0,5424	0,3616	0,9789	0,0254	0,0002
	17	0,5872	0,0357	0,1315	0,9959	0,0128	0,0003
74 cereja	12	0,4915	1,1646	-	0,9984	0,0067	<0,0001
	13	1,8590	-0,1340	-	0,9887	0,0179	<0,0001
	14	-	-0,2701	-	0,8914	0,0508	-
	15	0,5114	0,2322	-	0,9224	0,0471	0,0006
	16	-	0,5245	0,3292	0,9601	0,0337	0,0001
	17	0,5788	-0,0209	0,1318	0,9982	0,0081	<0,0001

Tabela 11 – Coeficientes dos modelos de contração volumétrica da massa ajustados aos valores experimentais (Continuação)

Clone	Eq.	β_0	β_1	β_2	R^2	SE	P
74 verde	12	0,3956	1,6793	-	0,9942	0,0120	<0,0001
	13	1,7429	-0,1441	-	0,9929	0,0133	<0,0001
	14	-	-0,2755	-	0,8446	0,0554	-
	15	0,5661	0,2318	-	0,8862	0,0530	0,0051
	16	-	0,5764	0,3139	0,9242	0,0433	0,0022
	17	0,6563	-0,1030	0,1902	0,9960	0,0115	0,0003
32 cereja	12	0,5433	0,9882	-	0,9945	0,0148	0,0002
	13	1,8610	-0,1691	-	0,9810	0,0275	0,0011
	14	-	-0,3045	-	0,9464	0,0400	-
	15	0,5114	0,2816	-	0,9548	0,0425	0,0041
	16	-	0,5313	0,3797	0,9801	0,0281	0,0012
	17	0,5782	0,0319	0,1392	0,9967	0,0141	0,0033
32 verde	12	0,5275	1,0886	-	0,9997	0,0031	<0,0001
	13	1,8572	-0,2015	-	0,9900	0,0189	0,0004
	14	-	-0,3321	-	0,9526	0,0356	-
	15	0,5271	0,3058	-	0,9621	0,0368	0,0032
	16	-	0,5468	0,4062	0,9856	0,0227	0,0007
	17	0,5912	0,0496	0,1592	1,0000	0,0013	<0,0001

Tabela 12 – Resultado do teste de identidade para as contrações volumétricas unitária e da massa em todas as combinações estudadas

Comb.	Prop. física	Estimativas dos parâmetros do modelo completo			F _{calc}	F _{tab}	Teste
		β_0	β_1	β_2			
1	Ψ_u	0,6015	0,032	0,0961	97,75	8,451	S
	Ψ_m	0,4929	0,1408	0,0712	50,93	8,451	S
2	Ψ_u	0,5744	0,0479	0,1197	15,77	8,451	S
	Ψ_m	0,5717	0,0306	0,1289	12,78	9,779	S
3	Ψ_u	0,6706	0,0385	0,0816	128,33	8,451	S
	Ψ_m	0,6017	-0,0089	0,1299	37,23	8,451	S
4	Ψ_u	0,6593	0,0091	0,1344	121,05	16,694	S
	Ψ_m	0,5764	0,0791	0,1231	1,55	16,694	NS
5	Ψ_u	0,6995	-0,043	0,1401	15,45	9,779	S
	Ψ_m	0,5949	-0,0078	0,1597	15,13	9,779	S
6	Ψ_u	0,6115	-0,0136	0,1115	44,39	7,591	S
	Ψ_m	0,5356	0,0138	0,1175	17,01	7,591	S
7	Ψ_u	0,594	-0,0382	0,1895	46,95	12,060	S
	Ψ_m	0,5826	0,0719	0,123	13,15	12,060	S
8	Ψ_u	0,5872	0,0281	0,1268	17,98	9,779	S
	Ψ_m	0,5669	0,0247	0,1345	0,04	12,060	NS

S = Significativo ao nível de 99 % de probabilidade pela distribuição F.
 NS = Não significativo ao nível de 99 % de probabilidade pela distribuição F.

Na Tabela 12, encontram-se os resultados do teste que concluem que das combinações possíveis somente duas são não significativas ao 1 % para o teste F o que significa que se pode utilizar o modelo comum reportado. A combinação 4 e 8 para a contração volumétrica da massa são as que tem a possibilidade de usar o modelo comum encontrado.

4 CONCLUSÕES

A área projetada, a área superficial, o volume e a porosidade aumentam com a elevação do teor de água para todos os clones, enquanto as massas específicas reais e

aparentes crescem com o aumento da umidade dos frutos de café até um valor máximo e depois decrescem.

A forma dos frutos de café conilon é influenciada no processo de secagem, promovendo diminuição dos valores da esfericidade e circularidade a partir da redução do teor de água. Observou-se uma maior diminuição dos valores de esfericidade e circularidade no clone 32 verde com valores de 7,8 % e 11,34 %, respectivamente, e para o clone 31 verde, valores de 0,03 % e 0,62 %, respectivamente.

A contração volumétrica apresentou um comportamento não linear decrescente com a redução do teor de água da massa de frutos de café conilon. Os modelos de Bala e Woods (1984) adaptado, Corrêa et al. (2004) e o polinomial, ajustados aos valores experimentais para estimar o índice de contração volumétrica unitária e da massa dos frutos de café em função do teor de água, representaram de forma satisfatória o fenômeno estudado, sendo o modelo polinomial, em todos os casos, o de melhor ajuste.

Tendo isso em vista, o modelo polinomial descreve satisfatoriamente o comportamento de todas as propriedades físicas estudadas durante o processo de secagem, tendo coeficientes de regressão específicos para cada clone e estágio de maturação.

Realizou-se o teste de identidade, identificando a combinação e a propriedade física, ambas podendo ser representadas por um modelo comum.

REFERÊNCIAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. 2001. 384 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.
- AFONSO, P.; CORRÊA, P. C.; PINTO, F. A.; SAMPAIO, C. P. Shrinkage Evaluation of Five Different Varieties of Coffee Berries during the Drying Process. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 4, p. 481-485. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2003.08.012, 2003.
- AL-MAHASNEH, M. A.; RABABAH, T. M. Effect of moisture content on some physical properties of green wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 4, p. 1467-1473. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.04.045, 2007.
- AMIN, M. N.; HOSSAIN, M. A.; ROY, K. C. Effects of moisture content on some physical properties of lentil seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n. 1, p. 83-87. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2003.12.006, 2004.
- ASTM D 792. **Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement**. Philadelphia, 1991.

- BALA, B. K.; WOODS, J. L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 30, p. 235-244. doi: 10.1016/S0021-8634(84)80024-4, 1984.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399 p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, E. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains and their products**. Westport, Connecticut: The AVI Publishing Company, 1974. 275 p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992a. 450 p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. (van N. Reinhold, Ed.). 1st editio ed. New York: Springer, 1992b. 450 p.
- CHANDRASEKAR, V. Physical and Thermal Properties of Coffee. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 73, n. 3, p. 227-234. doi: 10.1006/jaer.1999.0411, 1999.
- CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; GONELI, A. L. D. Mathematical modeling for representation of coffee berry volumetric shrinkage. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 14., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2004. (CD ROM).
- CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; QUEIROZ, D. M. D.; SAMPAIO, C. P.; CARDOSO, J. B. Variação das dimensões características e da forma dos frutos de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 466-470. doi: 10.1590/S1415-43662002000300014, 2002.
- 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. 31, p. 665-670, 2006.
- COUTO, S. M.; MAGALHÃES, A. C.; BASTOS, I. T.; QUEIROZ, D. M. D. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 1, p. 61-68, 1999.
- FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories. **Advances in Drying**. New York: Hemisphere Publishing, 1980.
- GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade de mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. 2008. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

GÜRSOY, S.; GÜZEL, E. Determination of Physical Properties of Some Agricultural Grains. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 2, n. 5, p. 492-498, 2010.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Some physical properties of Pistachio (*Pistacia vera* L.) nut and its kernel. **Journal of Food Engineering**, v. 72, n. 1, p. 30-38. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.11.016, 2006.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v. 15, n. 10, p. 2441-2458. doi: 10.1080/07373939708917369, 1997.

LANG, W.; SOKHANSANJ, S. Bulk volume shrinkage during drying of wheat and canola. **Journal of Food Process Engineering**, v. 16, n. 4, p. 305-314. doi: 10.1111/j.1745-4530.1993.tb00323.x, 1993.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 373-386. doi: 10.1016/S0260-8774(03)00144-4, 2004.

MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Physical characteristics of dehydrated potatoes – part I. **Journal of Food Engineering**, v. 33, n. 1-2, p. 37-48, 1997.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841 p.

MOREIRA, S. M.; CHAVES, M.; OLIVEIRA, L. Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 9, n. 1, p. 22-24, 1985.

PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998. 303 p.

PEREZ-ALEGRIA, L. R.; CIRO, H. J.; ABUD, L. C. Physical and thermal properties of parchment coffee bean. **Transactions of the ASAE**, v. 44, n. 6, p. 1721-1726, 2001.

RAHMAN, S. **Food properties handbook**. Boca Ratón: CRC Press LLC, 1995. 500 p.

RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Structural Changes During Air Drying of Fruits and Vegetables. **Food Science and Technology International**, v. 9, n. 3, p. 201-206. doi: 10.1177/1082013030335522, 2003.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, v. 23, n. 1, p. 91-105. doi: 10.1016/0260-8774(94)90125-2, 1994.

REGAZZI, A. Teste para verificar a identidade de modelos de regressão e a igualdade de parâmetros no caso de dados de delineamentos experimentais. **Revista Ceres**, v. 46, p. 383-409, 1999.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; CECON, P. R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 7, n. 1, p. 15-24, 2005.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M. Propriedades físicas do feijão durante a secagem: determinação e modelagem. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 1, p. 225-230. doi: 10.1590/S1413-70542008000100033, 2008.

RIBEIRO, D. M.; CORRÊA, P. C.; RODRIGUES, D. H.; GONELI, A. L. D. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 3, p. 611-617. doi: 10.1590/S0101-20612005000300035, 2005.

SEIFI, M.; ALIMARDANI, R. The Moisture Content Effect on Some Physical and Mechanical Properties of Corn (Sc 704). **Journal Of Agricultural Science**, v. 2, n. 4, p. 125. doi: 10.5539/jas.v2n4p125, 2010.

SILVA, J. S.; LUCENA, E. M. P. **Estrutura, composição e propriedades das sementes**. Pré-proces ed. Juiz de Fora, MG: Instituto Maria, 1995. p. 23-32.

VARNAMKHASTI, M. G.; MOBILI, H.; JAFARI, A. et al. Some physical properties of rough rice (*Oryza Sativa* L.) grain. **Journal of Cereal Science**, v. 47, n. 3, p. 496-501. doi: 10.1016/j.jcs.2007.05.014, 2008.

CAPÍTULO II – PROPRIEDADES TÉRMICAS DE FRUTOS DE CAFÉ CONILON (*Coffea canephora*)

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades físicas e térmicas do café é essencial quando se pesquisa fenômenos de transferência de calor e massa em secagem e controle de danos durante o armazenamento.

De acordo com Mohsenin (1980; 1986) e Pabis (1998), as propriedades termofísicas de grãos são importantes nos processos de secagem devido às restrições do fluxo de transferência de calor e massa. Cada propriedade térmica tem um efeito significativo na razão de secagem de um único grão ou de uma camada de grãos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Numa colheita apropriada, manejo e processamento são operações especialmente importantes, as quais determinam a qualidade final, influenciando, também, na avaliação de mercado para o produto. O conhecimento das propriedades térmicas dos produtos agrícolas é necessário para o projeto de uma nova unidade de operações ou análises de processos, como por exemplo, a secagem e o armazenamento, assim como a predição e o controle de várias mudanças que ocorrem nos alimentos durante os processos térmicos a sua conservação. Trabalhos similares evidenciam que a umidade tem considerável influência nas propriedades térmicas de materiais agrícolas e alimentos (CHANG, 1986; AVIARA; HAQUE, 2001; AFONSO JÚNIOR et al., 2002; BORÉM et al., 2002; BITRA et al., 2010).

A aplicação de princípios de engenharia para sistemas biológicos dificulta-se frequentemente por inadequadas bases de dados de propriedades de materiais biológicos (SHARMA; DUBEY; TECKCHANDANI, 1985). Dados destas propriedades têm aplicações para o manejo de materiais agrícolas, secagem, processamento, armazenamento, projeto e controle de equipamentos (MOHSENIN, 1986). Comumente, as propriedades físicas de materiais biológicos são dependentes da umidade, o que afetaria o ajuste e o comportamento dos equipamentos. Portanto, o efeito do conteúdo de umidade nas propriedades físicas de materiais agrícolas é uma importante consideração no manejo pós-colheita e nas operações de processamento de alimentos e produtos agrícolas. O conhecimento das propriedades térmicas de materiais agrícolas é essencial para a modelação, otimização e projeto de processos e equipamentos de

processamento nas operações baseadas em tratamento térmico, como por exemplo, desidratação, branqueamento, cozimento, aquecimento, esfriamento, vaporização, congelamento, entre outras (ALAGUSUNDARAM et al., 1991).

A condutividade térmica é definida como a razão entre a densidade de fluxo de calor e o gradiente de temperatura no material. Por isso, é necessário determinar a capacidade com que um produto agrícola conduz calor para prever ou controlar tal fluxo neste produto durante as operações de processamento, tais como estacionário e transiente. A condutividade térmica pode ser expressa a partir da lei de Fourier da condução de calor pela equação 1:

$$k = \frac{q \, dx}{A \, dT} \quad (1)$$

onde:

k: Condutividade térmica (W/m°C),

q: Calor (W),

A: Área de transferência de calor normal ao fluxo de calor (m²),

T: Temperatura (°C),

x: Espessura (m).

Os métodos para a determinação da condutividade térmica podem ser classificados em duas categorias: métodos de transferência de calor em estado estacionário; e transiente (MOHSENIN, 1980). O método em estado estacionário requer um tempo elevado para ser completado, podendo ocorrer migração de umidade e introduzir erros significantes de medida (KAZARIAN; HALL, 1965; MOHSENIN, 1980; DUTTA et al., 1988). Ambas as dificuldades podem ser evitadas utilizando-se o método transiente de fluxo de calor para determinar a condutividade térmica de diferentes grãos.

Os métodos da fonte linear de calor e da sonda térmica têm sido utilizados para determinar a condutividade térmica dos materiais agrícolas.

A determinação da condutividade térmica pelo método da sonda térmica em estado transiente foi utilizada em polpa de abacate (VALENTE; NICOLAS, 1990), frutos do mar frescos, pó de calamar, polvo e calamar rei (RAHMAN; POTLURI; VARAMIT, 1991), frutos de palma (OBETTA, 2000), banana, maçã e mamão (MATHUR; LELE, 2001) e cubos de batata (MUKHERJEE; CHATTOPADHYAY, 2002).

O método da fonte linear de calor em estado transiente tem sido utilizado por vários pesquisadores para determinar a condutividade térmica de grãos e sementes, como cevada, lentilhas e ervilhas (ALAGUSUNDARAM et al., 1991), mandioca, batata doce e chips de banana terra (NJIE; RUMSEY; SINGH, 1998), café em pergaminho (PEREZ-ALEGRIA; CIRO; ABUD, 2001) e sementes de borragem (YANG et al., 2002). Há consonância entre os pesquisadores em relação ao aumento da condutividade a partir do aumento da umidade do produto.

Para a determinação da quantidade de energia requerida nos processos de aquecimento ou esfriamento de alimentos em produtos agrícolas é imprescindível o conhecimento do calor específico, sendo definido como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um corpo em 1 °C, por unidade de massa sem mudança de estado.

O método das misturas é um método versátil usado por vários pesquisadores para determinar o calor específico de materiais granulares. O calor específico de produtos agrícolas aumenta com o incremento do conteúdo de umidade (BITRA et al., 2010). Singh e Goswami (2000) estudaram o calor específico das sementes de cominho e encontraram os valores variando desde 1,330 até 3090 kJ kg⁻¹ K⁻¹, devido ao aumento de temperatura de -70 a 50 °C e, posteriormente, a umidade de 1,8 b.s. até 20,5 b.s. Aviara e Haque (2001) determinaram o calor específico do fruto de karité em função da umidade e da temperatura (3,32 a 20,70 b.s. e 30 a 90 °C), concluindo que ambas têm influência significativa sobre os materiais agrícolas. Subramanian e Viswanathan (2003) determinaram o calor específico de grãos e farinhas de milho para conteúdos de umidade na faixa de 0,11 a 0,43 b.s. com valores de 1,33 a 2,40 kJ kg⁻¹ K⁻¹.

O método das misturas foi utilizado para estimar o calor específico de milho por Verma e Prasad (2000). Perez-Alegria (2001), por sua vez, utilizaram-no para café em pergaminho. Também se determinou por este método o calor específico de grama (DUTTA; NEMA; BHARDWAJ, 1988), cogumelos (SHRIVASTAVA; DATTA, 1999) e pistache (RAZAVI; TAGHIZADEH, 2007). Jaramillo (1989) e Montoya (1989) definiram o calor específico de café em pergaminho. Seus resultados mostraram que relacionar o calor específico com o conteúdo de umidade dos grãos não é simples. Jaramillo (1989) encontrou uma relação não linear entre calor específico e conteúdo de umidade dos grãos, enquanto Montoya (1989) encontrou uma correlação linear.

Para completar o estudo das propriedades térmicas dos materiais agrícolas é conveniente utilizar a razão entre a habilidade de um material em transportar energia e

sua capacidade de armazenar energia. Trata-se da difusividade térmica, definida pela equação 2:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (2)$$

onde:

α : Difusividade térmica, ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

C_p : Calor específico, ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

ρ : Massa específica aparente, (kg m^{-3}).

A Eq.(2) auxilia na estimativa do tempo necessário para transportar energia nos processos de aquecimento, esfriamento, congelamento e cozimento.

Em vista do exposto e devido ao fato da escassez de informações na literatura para os clones de café conilon, desenvolveu-se este trabalho com o objetivo de determinar as propriedades térmicas: calor específico, condutividade e difusividade térmica, em função do teor de água do produto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Foram utilizados frutos de café da espécie *Coffea canephora*, clone 32 da variedade clonal EMCAPA 8131, colhidos na fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), situada em Leopoldina, Minas Gerais. Utilizaram-se no experimento grãos de café verdes e maduros.

O processo de secagem foi realizado em estufa com ventilação forçada à temperatura de $60 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, onde se obteve amostras com diferentes teores de água, num intervalo de 0,134 a 1,454 b.s. para os grãos verdes e 0,133 a 1,634 b.s. para os grãos maduros. Os teores de água do produto foram determinados pelo método da estufa à temperatura de $105 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, em três repetições (BRASIL, 2009).

Todos os testes foram realizados para cinco teores de água, considerando os dois grupos de café testados em três repetições por cada ponto em estudo.

Dessa forma, utilizaram-se equipamentos que fornecessem os valores das propriedades térmicas para os materiais agrícolas, calor específico, condutividade térmica e massa específica aparente.

Com relação ao calor específico, foi utilizado um calorímetro de mistura direta para a determinação do calor específico da massa de grãos de café. O calorímetro era constituído de um cilindro de PVC contendo, no seu interior, uma garrafa térmica envolvida por lã de fibra de vidro para obter o máximo de isolamento possível com o exterior (Figura 1). Usou-se, para a determinação da temperatura no interior do calorímetro, um termômetro digital cujo elemento sensível era um termistor (sonda térmica) adaptado na tampa de borracha do calorímetro e interligado ao termômetro por um termopar de Cobre-Constantan.

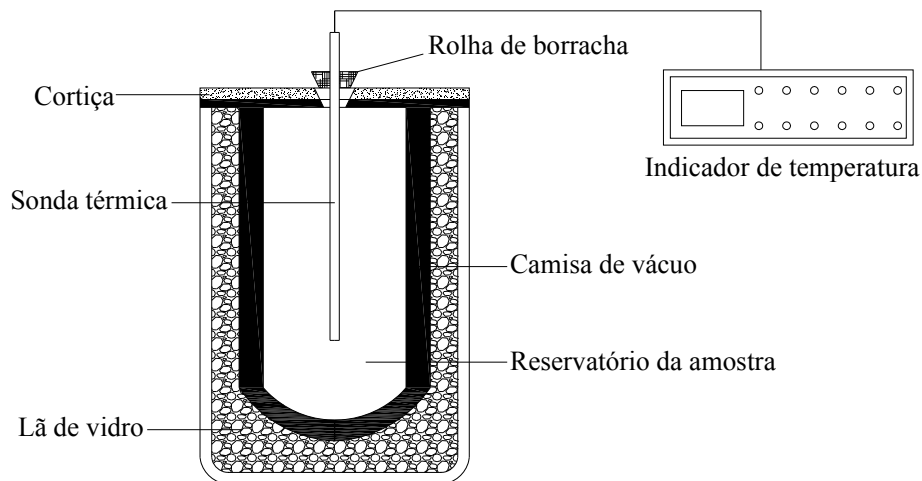


Figura 1 – Desenho esquemático do calorímetro.

Este método consiste em determinar a mudança de temperatura da água destilada no calorímetro à alta temperatura, quando uma conhecida quantidade de água destilada à baixa temperatura for adicionada. Assume-se que o sistema seja adiabático e a capacidade calórica do calorímetro seja determinada mediante um balanço de energia (equação 3) (RAMASWAMY et al., 2003).

$$C = \frac{C_{p_{H_2O}} [m_{ac}(T_{ac} - T_{eq}) - m_{af}(T_{eq} - T_{af})]}{T_{eq} - T_{af}} \quad (3)$$

onde:

$C_{p_{H_2O}}$: Calor específico da água ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

C: Constante do calorímetro (kJ K^{-1})

m_{ac} : Massa de água quente (kg)

m_{af} : Massa água fria (kg)

T_{eq} : Temperatura de equilíbrio ($^{\circ}\text{C}$)

T_{af} : Temperatura da água fria ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ac} : Temperatura da água quente ($^{\circ}\text{C}$)

Na etapa de determinação do calor específico, certa massa de produto, com temperatura inicial conhecida, foi transferida para o calorímetro com capacidade térmica aparente previamente determinada. Posteriormente foi adicionada uma quantidade de água aquecida, cuja temperatura de alimentação havia sido pré-determinada. O líquido e o sólido contidos no calorímetro foram agitados, vigorosamente, a fim de que houvesse uma homogeneização das temperaturas. A temperatura interna do calorímetro passou então a ser monitorada até a obtenção de um estado de equilíbrio caracterizado por uma temperatura. De forma análoga à determinação da constante do calorímetro mediante um balanço de energia, determinase o calor específico do produto pela equação 4:

$$C_p = \frac{C_{p_{H_2O}} \cdot m_{ac}(T_{ac} - T_{eq}) + C(T_{ac} - T_{eq})}{m_p(T_{eq} - T_p)} \quad (4)$$

onde:

C_p : Calor específico do produto ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

m_p : Massa do produto (kg)

T_p : Temperatura do produto ($^{\circ}\text{C}$)

Para a determinação da condutividade térmica, empregou-se o método do cilindro teoricamente infinito, imerso em ambiente com temperatura controlada (câmara do tipo B.O.D.). Este método consiste na utilização de um cilindro de alumínio fechado em suas extremidades, sendo a extremidade superior removível para a colocação do material a ser analisado (Figura 2). Este cilindro tem um diâmetro de 100 mm e comprimento de 500 mm pré-determinados para possibilitar a adoção da hipótese de condução unidimensional na direção radial. O calor foi gerado por um fio condutor de níquel cromo, protegido por uma camada de verniz, colocado no eixo central do cilindro

(AFONSO JÚNIOR et al., 2002; ADEWUMI; OGUNLOWO, 2006; BITRA et al., 2010). Através do resistor de fio, passou uma corrente com baixa amperagem e voltagem, de aproximadamente 1,1 A e 2,2 V, respectivamente. Determinou-se a condutividade térmica mediante a equação 5 (RAMASWAMY et al., 2003):

$$k = \frac{q}{4\pi L(T_1 - T_2)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (5)$$

onde:

k: Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$);

T_1 : Temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$);

T_2 : Temperatura final ($^{\circ}\text{C}$);

L: Comprimento do cilindro (m);

t_1 : Tempo inicial (s);

t_2 : Tempo final (s)

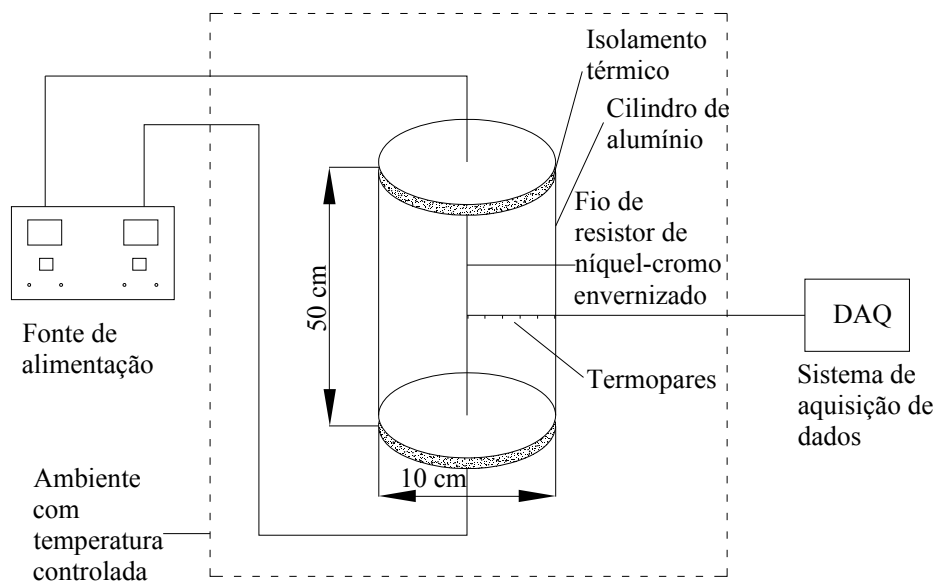


Figura 2 – Desenho esquemático do equipamento para determinação da condutividade térmica.

A massa específica aparente foi determinada mediante ao enchimento de um recipiente cilíndrico de 500 ml com café de uma altura de 15 cm e, posteriormente, pesou-se o seu conteúdo numa balança. A razão entre a massa de café e o volume do recipiente foi definida como massa específica aparente.

Com os valores obtidos das propriedades térmicas, utilizou-se a Eq.(2) para caracterizar a difusividade térmica do produto.

A incerteza é um fato da vida em engenharia. As propriedades térmicas enfatizadas no parágrafo anterior, não exprime um grau extremo de precisão. Por esse motivo, é necessário o conhecimento da incerteza dos dados, usualmente definida como a faixa dentro da qual o experimentalista está 95 % confiante de que o valor verdadeiro se situa.

Para a análise de incertezas dos resultados experimentais utilizou-se o método descrito por Holman (2001). Este método é baseado na cuidadosa especificação das incertezas das várias medidas experimentais primárias. Supondo que uma variável medida “R” é função de diversas variáveis primárias independentes x_1, x_2, \dots, x_n , tem-se a equação 6:

$$R=R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (6)$$

Sendo w_1, w_2, \dots, w_n , as incertezas individuais das respectivas variáveis primárias independentes x_1, x_2, \dots, x_n , o referido método propõe que a incerteza da resultante final medida “ w_R ” seja calculado pela equação 7:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Para minimizar o esforço matemático para as análises de incertezas dos diversos resultados experimentais, utilizou-se o programa de computador para engenharia *Engineering Equation Solver* (EES), ferramenta *Uncertain Propagation*, que é baseado no método descrito por Holman (2001).

As equações ajustadas foram comparadas pelo teste de identidade de modelo para se verificar a hipótese de nulidade de que as equações são iguais estatisticamente. O teste de identidade de modelo baseia-se na diferença entre a soma dos quadrados de parâmetros do modelo completo e a soma de quadrados de parâmetros do modelo reduzido (REGAZZI, 1999). Inicialmente, fez-se o teste para todas as equações ajustadas para cada relação; depois, o teste de identidade de modelo, comparando-se cada equação, ou seja, aplicando-se o teste para cada tratamento, verde e cereja.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicando a metodologia reportada por Regazzi (1999) para identificar a identidade de modelos de regressão determinou-se que os modelos encontrados para o calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica do café verde e cereja são idênticos. Diante disso, é possível obter um modelo comum ou reduzido com todos os dados (Tabela 1).

Tabela 1 – Equações de regressão do calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica para o café conilon cereja e verde e o modelo comum

Tratamento	Propriedade térmica	Modelo $Y=aX+b$	R^2
Cereja	Calor específico, C_p	1,4392U+1,2643	0,993
	Condutividade térmica, k	0,0705U+0,1083	0,953
	Difusividade térmica, α	-3,4246E-008U+1,5921E-007	0,958
Verde	Calor específico, C_p	1,4225U+1,2017	0,994
	Condutividade térmica, k	0,0602U+0,1203	0,911
	Difusividade térmica, α	-4,9614E-008U+1,7180E-007	0,957
Comum	Calor específico, C_p	1,4386U+1,2307	0,991
	Condutividade térmica, k	0,0659U+0,1142	0,922
	Difusividade térmica, α	-4,1108E-008U+1,6508E-007	0,924

R^2 : coeficiente de determinação

O calor específico dos frutos de café foi determinado entre 1,431 a 3,615 $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ para uma faixa de conteúdo de umidade de 0,133 a 1,634 b.s. (Tabelas 2 e 3). Mediante uma análise de regressão, foi encontrada uma relação linear entre o conteúdo de umidade e o calor específico (Tabela 1). Isso mostra que o calor específico cresce com o aumento do conteúdo de umidade dos grãos de café (Figura 3). Este comportamento é muito similar ao encontrado por outros pesquisadores.

Tabela 2 – Análise estatística e de incertezas das propriedades térmicas dos frutos de café conilon cereja.

U (b.s.)	k, ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)			δk	Cp, ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)			δC_p	α ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	$\delta \alpha$
	Mean	Std.Dv.	Std.Err.		Mean	Std.Dv.	Std.Err.			
1,634	0,216	0,0099	0,0057	0,006056	3,615	0,1073	0,0620	0,03782	1,047E-07	3,12E-09
0,930	0,184	0,0029	0,0017	0,003088	2,564	0,0109	0,0063	0,03044	1,281E-07	2,63E-09
0,535	0,155	0,0015	0,0009	0,002603	2,128	0,0108	0,0062	0,02962	1,339E-07	2,26E-09
0,293	0,127	0,0026	0,0015	0,001821	1,658	0,0345	0,0199	0,02715	1,492E-07	3,24E-09
0,133	0,108	0,0014	0,0008	0,001597	1,431	0,0389	0,0224	0,02469	1,594E-07	3,63E-09

Tabela 3 – Análise estatística e de incertezas das propriedades térmicas dos frutos de café conilon verde.

U (b.s.)	k, (W m ⁻¹ K ⁻¹)			δk	Cp, (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)			δCp	α (m ² s ⁻¹)	δα
	Mean	Std.Dv.	Std.Err.		Mean	Std.Dv.	Std.Err.			
1,454	0,204	0,0080	0,0046	0,003852	3,298	0,0547	0,0316	0,03612	1,044E-07	2,28E-09
0,855	0,172	0,0067	0,0039	0,002502	2,399	0,0186	0,0107	0,03006	1,2E-07	2,30E-09
0,524	0,163	0,0068	0,0039	0,002409	1,883	0,0317	0,0183	0,02921	1,461E-07	3,13E-09
0,287	0,141	0,0053	0,0031	0,00209	1,614	0,0713	0,0412	0,0262	1,6E-07	3,51E-09
0,134	0,117	0,0023	0,0013	0,001979	1,442	0,0139	0,0080	0,02391	1,671E-07	3,95E-09

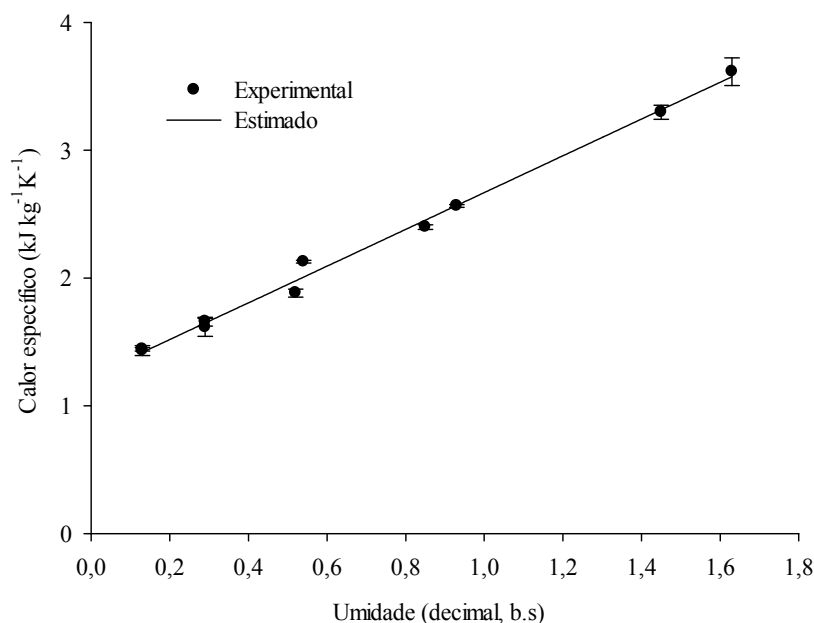


Figura 3 – Valores experimentais e estimados do calor específico, em função dos teores de água para os frutos de café conilon.

Chandrasekar (1999) determinou o calor específico de café robusta em pergaminho numa faixa de umidade de 0,11 a 0,35 b.s., obtendo-se os valores entre 1,04 e 2,36 kJ kg⁻¹ K⁻¹. Com relação ao café arábica em pergaminho com umidade na faixa de 0,119 e 0,44 b.s., os valores do calor específico estão entre 0,78 e 2,18 kJ kg⁻¹ K⁻¹. Afonso Júnior (2002) para café arábica, variedade Catuaí Vermelho, atribuiu valores entre 1,2146 e 2,5251 kJ kg⁻¹ K⁻¹ para o café em coco, entre 1,2254 e 2,4653 kJ kg⁻¹ K⁻¹ para o café descascado e entre 1,1290 e 2,3848 kJ kg⁻¹ K⁻¹ para café despulpado. Borém et al. (2002) estudaram cinco variedades de café arábica em pergaminho, encontrando o calor específico variando na faixa de 1,0 a 3,0 kJ kg⁻¹ K⁻¹ para conteúdos de umidade entre 0,1 e 0,95 b.s. Outros autores encontraram comportamento similar ao determinar o calor específico de diferentes produtos, como sementes de abóbora (SINGH; GOSWAMI, 2000; PEREZ-ALEGRIA et al., 2001; AVIARA; HAQUE, 2001; YANG et al., 2002; KOCABIYIK et al., 2009; entre outros).

A condutividade térmica dos frutos de café foi de 0,108 a 0,216 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ para uma faixa de conteúdo de umidade variando de 0,133 a 1,634 b.s. (Tabelas 2 e 3). A variação da condutividade térmica com o conteúdo de umidade é mostrada na Figura 4, onde é possível observar que a condutividade térmica cresce linearmente com o conteúdo de umidade. Comportamento similar foi obtido por Afonso Júnior (2002) para café arábica, variedade Catuaí Vermelho, atribuindo valores entre 0,0843 e 0,1415 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ para o café em coco, entre 0,0934 e 0,1735 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ para o café descascado e entre 0,1033 e 0,1762 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ para o café despulpado. Borém et al. (2002) atribuem valores de condutividade térmica entre 0,10 e 0,20 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, enquanto Chandrasekar (1999), para o café robusta em pergaminho na faixa de umidade de 0,11 a 0,35 b.s., obteve valores entre 0,10 e 0,20 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ e, para o café arábica em pergaminho com umidade entre 0,12 e 0,44 b.s., valores de calor específico entre 0,07 e 0,16 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

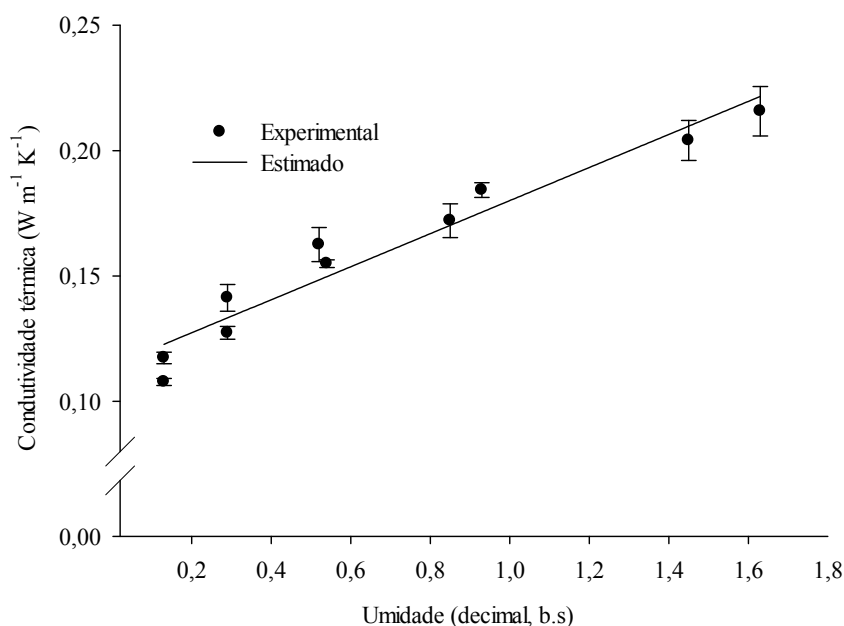


Figura 4 – Valores experimentais e estimados de condutividade térmica, em função dos teores de água para os frutos de café conilon.

Variações similares têm sido registradas para a condutividade térmica de sementes de cominho (SINGH; GOSWAMI, 2000), café em pergaminho (PEREZ-ALEGRIA; CIRO; ABUD, 2001), sementes de borragem (YANG et al., 2002), frutos de karité (AVIARA; HAQUE, 2001), milho, girassol, trigo e cevada (KAYISOGLU; KOCABIYIK; AKDEMIR, 2004), sementes de abóbora (KOCABIYIK; KAYISOGLU; TEZER, 2009), farinha de arroz (MAHAPATRA; LAN; HARRIS, 2011), entre outros.

Os valores de difusividade térmica foram determinados aplicando-se a Eq.(2) para cada um dos níveis de umidade estudados (Tabelas 2 e 3).

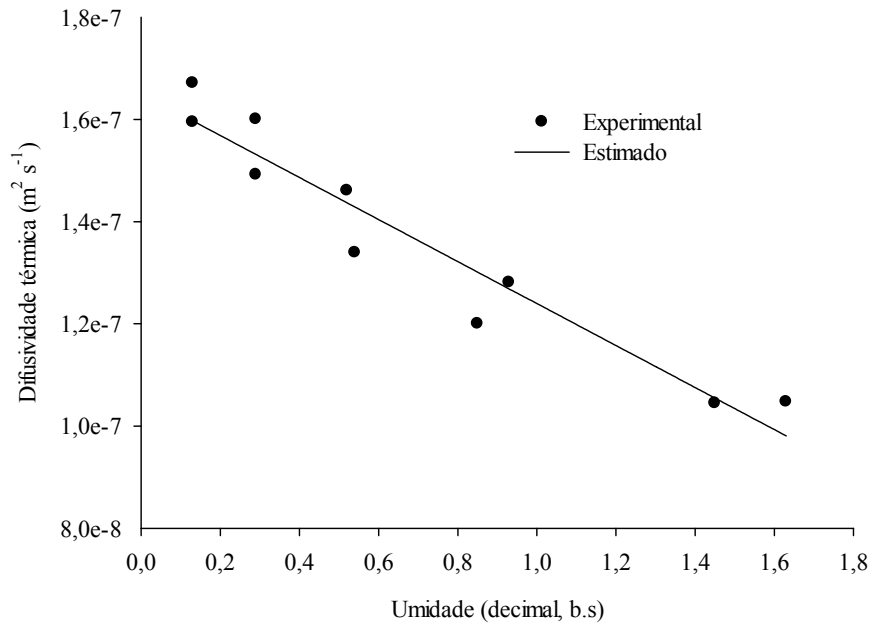


Figura 5 – Valores experimentais e estimados de difusividade térmica, em função dos teores de água para os frutos de café conilon.

A difusividade térmica para os frutos de café foi determinada entre $1,671 \times 10^{-7}$ e $1,044 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a faixa de umidade de 0,133 a 1,634 b.s. Mediante análise de regressão foi determinada a relação decrescente da difusividade térmica com o crescimento do conteúdo de umidade (Figura 5). Comportamento similar foi registrado por outros estudos publicados, os quais se determinam as propriedades térmicas de diferentes variedades e espécies de café. Entre eles, destaca-se Chandrasekar (1999). No estudo, para o café robusta em pergaminho na faixa de umidade de 0,12 a 0,35 b.s., obteve-se valores entre $2,36 \times 10^{-7}$ e $1,69 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e o café arábica em pergaminho com umidade entre 0,12 e 0,44 b.s., para valores de calor específico entre $2,08 \times 10^{-7}$ e $1,44 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Borém et al. (2002), a partir dos cinco tipos de café estudados, encontraram a difusividade térmica decrescente com o aumento da umidade em uma faixa de valores de $1,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $3,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Afonso Júnior (2002) registrou, para o café arábica, variedade Catuaí Vermelho, valores entre $1,069 \times 10^{-7}$ e $1,544 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o café em coco, entre $1,357 \times 10^{-7}$ e $1,699 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para café descascado e entre $1,344 \times 10^{-7}$ e $2,078 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para café despulpado.

Comportamento similar foi registrado na determinação da difusividade térmica de sementes de borragem (YANG et al., 2002), sementes de abóbora (KOCABIYIK;

KAYISOGLU; TEZER, 2009), amendoim (BITRA et al., 2010) e farinhas de arroz (MAHAPATRA; LAN; HARRIS, 2011).

4 CONCLUSÕES

Propriedades térmicas de frutos de café da espécie *Coffea canephora*, clone 32 da variedade clonal EMCAPA 8131, como a condutividade térmica, o calor específico e a difusividade térmica, foram determinadas para cinco níveis de conteúdo de umidade e dois estádios de maturação (verde e cereja).

O calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica para uma faixa de umidade de 0,133 a 1,634 b.s. foram determinados entre 1,431 a 3,615 kJ kg⁻¹ K⁻¹; 0,108 a 0,216 W m⁻¹ K⁻¹ e 1,044 × 10⁻⁷ a 1,671 × 10⁻⁷ m² s⁻¹, respectivamente, para os frutos de café conilon, obtendo um modelo de regressão comum para cada um deles.

Determinou-se que as propriedades térmicas do café conilon são dependentes do conteúdo de umidade. O calor específico e a condutividade térmica dos frutos de café conilon cresceram com o aumento do conteúdo de umidade, enquanto a difusividade térmica decresceu com o aumento do conteúdo de umidade.

REFERÊNCIAS

ADEWUMI, B.; OGUNLOWO, A. Preliminary Investigation on the Distribution and Spread Pattern of Cowpea in a Cross Flow Grain Separator. **Agricultural Engineering International**, v. 8, p. 1-12, 2006.

AFONSO JÚNIOR, P.; CORRÊA, P.; PINTO, F. Propriedades termofísicas dos frutos e sementes de café : determinação e modelagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, n. 4, p. 9-15, 2002.

ALAGUSUNDARAM, K.; JAYAS, D. S.; MUIR, W. E.; WHITE, N. D. G. Thermal conductivity of bulk barley, lentils and peas. **Transactions of the ASABE**, v. 34, n. 4, p. 1784-1788, 1991.

AVIARA, N.; HAQUE, M. Moisture dependence of thermal properties of sheanut kernel. **Journal of Food Engineering**, v. 47, n. 2, p. 109-113. doi: 10.1016/S0260-8774(00)00105-9, 2001.

BITRA, V. S. P.; BANU, S.; RAMKRISHNA, P.; NARENDER, G.; WOMAC, A. R. Moisture dependent thermal properties of peanut pods, kernels, and shells. **Biosystems Engineering**, v. 106, n. 4, p. 503-512. doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.05.016, 2010.

BORÉM, F. M.; RIBEIRO, R. C. M. S.; CORRÊA, P. C.; PEREIRA, R. G. F. A. Propriedades térmicas de cinco variedades de café cereja descascado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 475-480. doi:10.1590/S1415-43662002000300016, 2002.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399 p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 450 p.

CHANDRASEKAR, V. Physical and Thermal Properties of Coffee. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 73, n. 3, p. 227-234. doi:10.1006/jaer.1999.0411, 1999.

CHANG, C. S. Thermal conductivity of wheat, corn, and grain sorghum as affected by bulk density and moisture content. **Transactions of the ASAE**, v. 29, n. 5, p. 1447-1450, 1986.

DUTTA, S. K.; NEMA, V. K.; BHARDWAJ, R. K. Thermal properties of gram. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 39, n. 4, p. 269-275. doi:10.1016/0021-8634(88)90148-5, 1988.

HOLMAN, J. P. **Heat Transfer**. 9th ed. New York: [s.n.], 2001.

JARAMILLO, B. G. **Propriedades físicas del café pergamino**. Thesis M. Sc. (Physic) - Universidad Nacional de Colombia - [S.I.]. 1989.

KAYISOGLU, B.; KOCABIYIK, H.; AKDEMIR, B. The effect of moisture content on the thermal conductivities of some cereal grains. **Journal of Cereal Science**, v. 39, n. 1, p. 147-150. doi:10.1016/S0733-5210(03)00047-X, 2004.

KAZARIAN, E. A.; HALL, C. W. Thermal properties of grains. **Transactions of the ASAE**, v. 8, n. 1, p. 33-37, 1965.

KOCABIYIK, H.; KAYISOGLU, B.; TEZER, D. Effect of Moisture Content on Thermal Properties of Pumpkin Seed. **International Journal of Food Properties**, v. 12, n. 2, p. 277-285. doi:10.1080/10942910701673519, 2009.

MAHAPATRA, A. K.; LAN, Y.; HARRIS, D. L. Influence of Moisture Content and Temperature on Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Rice Flours. **International Journal of Food Properties**, v. 14, n. 3, p. 675-683. doi:10.1080/10942912.2011.555901, 2011.

MATHUR, R.; LELE, S. S. Thermal conductivity measurement technique vis-a-vis quality of fruit. **Journal of food science and technology**, v. 38, n. 5, p. 484-486, 2001.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. p. 841

- MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach, 1980. 407 p.
- MONTOYA, R. E. C. **Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino**. Thesis M. Sc (Operations Research). Universidad Tecnológica de Pereira - [S.l.]. 1989.
- MUKHERJEE, S.; CHATTOPADHYAY, P. K. The influence of moisture content and temperature on thermal properties of potato. **Journal of food science and technology**, v. 39, n. 2, p. 134-138, 2002.
- NJIE, D. N.; RUMSEY, T. R.; SINGH, R. P. Thermal properties of cassava, yam and platain. **Journal of Food Engineering**, v. 37, n. 1, p. 63-76. doi:10.1016/S0260-8774(98)00068-5, 1998.
- OBETTA, S. Studies on some physico-thermal properties of palm kernel. **Journal of food science and technology**, v. 37, n. 3, p. 245-249, 2000.
- PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998. 303 p.
- PEREZ-ALEGRIA, L. R.; CIRO, H. J.; ABUD, L. C. Physical and thermal properties of parchment coffee bean. **Transactions of the ASAE**, v. 44, n. 6, p. 1721-1726, 2001.
- RAHMAN, M. S.; POTLURI, P. L.; VARAMIT, A. Thermal conductivities of fresh and dried seafood powders. **Transactions of the ASAE**, v. 34, n. 1, p. 217-220, 1991.
- RAMASWAMY, H.; RAGHAVAN, V.; CHAKRAVERTY, A.; MUJUMDAR, A. **Handbook of Postharvest Technology**. [S.l.]: CRC Press, 2003.
- RAZAVI, S. M. A.; TAGHIZADEH, M. The specific heat of pistachio nuts as affected by moisture content, temperature, and variety. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 158-167. doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.01.039, 2007.
- REGAZZI, A. Teste para verificar a identidade de modelos de regressão e a igualdade de parâmetros no caso de dados de delineamentos experimentais. **Revista Ceres**, v. 46, p. 383-409, 1999.
- SHARMA, S. K.; DUBEY, R. K.; TECKCHANDANI, C. K. Engineering properties of black gram, soybean and green gram. In: PROCEEDINGS OF THE INDIAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Anais...** [S.l: s.n.], 1985.
- SHRIVASTAVA, M.; DATTA, A. Determination of specific heat and thermal conductivity of mushrooms (*Pleurotus florida*). **Journal of Food Engineering**, v. 39, n. 3, p. 255-260. doi:10.1016/S0260-8774(98)00145-9, 1999.
- SINGH, K. K.; GOSWAMI, T. K. Thermal properties of cumin seed. **Journal of Food Engineering**, v. 45, n. 4, p. 181-187. doi:10.1016/S0260-8774(00)00049-2, 2000.

SUBRAMANIAN, S.; VISWANATHAN, R. Thermal Properties of Minor Millet Grains and Flours. **Biosystems Engineering**, v. 84, n. 3, p. 289-296. doi:10.1016/S1537-5110(02)00222-2, 2003.

VALENTE, M.; NICOLAS, J. Thermal conductivity of avocado pulp. **Engineering and food**. v. 1: Physical properties and process control. London: Elsevier, 1990. p. 432-440.

VERMA, R. C.; PRASAD, S. Mechanical and thermal properties of maize. **Journal of Food Science and Technology**, v. 37, n. 5, p. 500-505, 2000.

YANG, W.; SOKHANSANJ S.; TANG J.; WINTER P. Determination of thermal conductivity specific heat and thermal diffusivity of borage seeds. **Biosystems Engineering**, v. 82, n. 2, p. 169-176. doi:10.1006/bioe.2002.0066, 2002.

CAPÍTULO III – ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES AERODINÂMICAS DOS FRUTOS DE CAFÉ (*COFFEA CANEPHORA*) DURANTE A SECAGEM

1 INTRODUÇÃO

Os princípios aerodinâmicos têm sido empregados por vários investigadores em aplicações como separação de materiais estranhos de sementes e grãos; transportadores pneumáticos e manipulação de grãos, forragem cortada, silagem e frutas pequenas e grandes; e manipulação hidráulica de maçãs, cerejas e batatas (MOHSENIN, 1986).

Em aeração e secagem de produtos agrícolas, como grãos, a pressão estática que o ventilador tem que vencer depende da taxa de fluxo de ar, espessura da camada de grãos, além do tipo, forma, tamanho e orientação. As variáveis anteriores afetam o coeficiente de arrasto do material e sua resistência ao fluxo (MOHSENIN, 1986).

O conhecimento das propriedades aerodinâmicas dos produtos agrícolas, a velocidade terminal e o coeficiente de arrasto são de fundamental importância no projeto e dimensionamento de equipamentos e estruturas utilizados, principalmente nas operações de colheita e pós-colheita desses produtos. Grande parte desses equipamentos utiliza ar ou água para transportar ou separar o produto desejável e de qualidade das impurezas ou materiais de qualidade inferior, principalmente nas operações de colheita, seleção, limpeza, secagem, armazenamento, beneficiamento e classificação do produto. Essas informações podem ser, ainda, amplamente empregadas no aprimoramento das operações relacionadas com o manuseio e as várias etapas do pré-processamento do material. A separação de sementes pode ser realizada por separadores pneumáticos, utilizando limpadores de tela ou mesas de gravidade (MOHSENIN, 1986).

Muitos limpadores comerciais incorporam mais que um destes métodos de limpeza (HAUHOUOT et al., 2000). Os sistemas de separação pneumática e transporte são usados dentro da maquinaria agrícola e de equipamento que processam alimentos por muitos anos. Quando um fluxo de ar é usada para separar um produto como trigo de materiais indesejáveis associados, o conhecimento das características aerodinâmicas de todas as partículas envolvidas se faz necessário. Isto ajuda a definir a faixa de velocidades de ar para separação efetiva do grão de materiais indesejáveis. Por isso, a velocidade terminal (V_T) foi usada como uma importante característica aerodinâmica de

materiais em tais aplicações como transporte pneumático e a separação dos materiais não desejáveis (HAUHOUOT et al., 2000).

Quando são colhidos grãos, sementes, frutas e legumes mecanicamente, materiais indesejáveis como grãos leves, sementes de erva daninha, folhas de planta e talos podem ser removidos com ar. Além disso, são transportados materiais agrícolas e produtos alimentícios usando ar e água habitualmente. Para operações como estas, a interação entre partículas sólidas e os fluidos em movimento determinam as forças aplicadas às partículas. A interação é afetada pela massa específica, viscosidade e velocidade do fluido.

A determinação da velocidade terminal de corpos, baseando-se em expressões que relacionam o coeficiente de arrasto (C_D) e o número de Reynolds (Re), tem sido extensivamente investigada por vários pesquisadores, como Christiansen e Barker (1965), Hartman et al. (1994), Chhabra et al. (1999), Brown e Lawler (2003), Tang et al. (2004), Tran-Cong (2004), Cheng (2009) e Andalib et al. (2010). A determinação da velocidade terminal por meio de quaisquer dessas equações propostas para “ C_D versus Re ” requer um procedimento de tentativa e erro, visto que a velocidade encontra-se presente nas duas variáveis e a relação entre “ C_D e Re ” é altamente não linear.

A velocidade terminal e, conseqüentemente, o coeficiente de arrasto de uma partícula são muito influenciados pela sua forma, tamanho, orientação, viscosidade do meio, e pelas massas específicas da partícula e do fluido. Dos modelos semiempíricos desenvolvidos para prever forças de arrasto em corpos submersos em um fluido, grande parte considera as partículas tendo uma forma esférica, apesar das partículas envolvidas em processos de engenharia não terem, na grande maioria, esta forma. Atualmente, é possível estimar forças de arrasto ou velocidades terminais de uma partícula esférica sob a maioria das condições de interesse prático em um meio newtoniano incompressível. Entretanto, quando se trata de partículas não esféricas, a falta de padrões para a medição da sua forma, tamanho e orientação durante a flutuação, de acordo com Chhabra et al. (1999), tem sido um dos grandes obstáculos para obtenção de modelos adequados para prever forças de arrasto e no desenvolvimento de correlações aplicáveis universalmente.

Chhabra et al. (1999) investigaram a eficácia de correlações mais comumente usadas para estimar o coeficiente de arrasto de partículas não esféricas em fluidos viscosos incompressíveis. Os autores observaram que a influência da forma da partícula sobre o coeficiente de arrasto aumenta com o número de *Reynolds* e, ainda, que

melhores estimativas desta grandeza poderiam ser obtidas somente se parâmetros ligados à forma da partícula fossem adicionados às correlações.

Afonso Júnior et al. (2007), estudando as propriedades aerodinâmicas de café arábica e conilon, determinaram a velocidade terminal experimentalmente pelo método de Mohsenin (1986) e obtiveram erros variando de 27,75 % a 52,58 % para o café arábica. Com relação ao café conilon, o erro obtido foi na faixa de 33,55 % a 47,31 %. Zanini et al. (2008) estudaram experimentalmente o comportamento aerodinâmico do milho e do feijão, determinando a velocidade terminal segundo Pettyjohn e Christiansen (1948) e Mohsenin (1986). Os autores determinaram os erros pelos métodos citados e obtiveram o erro em torno de 30,83 % a 73,23 % para o milho, e de 31,26 % a 40,34 % para o feijão.

Simplício e Braga (1999) utilizaram diferentes métodos para a determinação dos parâmetros aerodinâmicos do amendoim, que, comparados com os valores da velocidade terminal, diferem-se significativamente. Nesse contexto, os erros obtidos pelo método de Mohsenin (1986) foi de 72,88 %, enquanto pelo método de Pettyjohn e Christiansen (1948) foi 37,85 %. Já com relação a assumir o coeficiente de arrasto de uma esfera, a diferença foi de 24,05 %.

Diversos pesquisadores realizaram testes aerodinâmicos com diferentes produtos agrícolas e relataram ser a velocidade terminal função do teor de umidade, a saber: sorgo e milheto (SCHWANZ DA SILVA et al., 2003), trigo (RAJABIPOUR et al., 2006), pistácio (RAZAVI et al., 2007), trigo, cevada e lentilhas (GÜRSOY; GÜZEL, 2010), sementes de linho (EISSA, 2011), uva (KHODAEI; AKHIJAHANI, 2012), entre outros.

A implementação de técnicas numéricas para a solução do problema de secagem de grãos tem sido realizada por meio de programas computacionais (MARTINOVIC et al., 2001). As equações de Navier-Stokes possuem limitações quando aplicadas em algumas áreas da engenharia. Isso significa que processos adicionais, com um conjunto maior de regras, podem ser necessários na dinâmica do sistema durante a simulação. Nesses casos, as equações que descrevem o processo podem ser modificadas com adições de aproximações ou modelos físicos para representar inteiramente o regime do fluxo. Com isso, importantes modelos físicos, comumente usados em aplicações de engenharia, incluem modelos de turbulência, de meios porosos e de múltiplas fases.

Muitos fenômenos observados na engenharia agrícola podem ser descritos por um sistema de equações de transporte de massa, de quantidade de movimento e de

energia. Dessa forma, modelos representativos de tais fenômenos podem ser implementados e resolvidos pela mecânica dos fluidos computacional.

Devido a esta problemática, pretendeu-se estudar o comportamento aerodinâmico de frutos de clones de café conilon experimentalmente, a fim de encontrar o modelo numérico que melhor represente seu fenômeno físico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas pertencente ao CENTREINAR, localizado na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Foram utilizados frutos de café (*Coffea canephora*), clones 83 e 74 da variedade clonal EMCAPA 8141 e o clone 31 da variedade clonal EMCAPA 8131, procedentes da fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), situada no município de Leopoldina, Minas Gerais. Os frutos foram colhidos manualmente e selecionados somente os dois estádios, cereja e verde de cada clone. Durante o processo de colheita foram eliminados os frutos imaturos, deteriorados ou danificados, com o intuito de se obter um material homogêneo e de melhor qualidade, além disso, foram utilizados os frutos de café com tamanho acima da peneira de furos de 9 mm.

Posteriormente os diferentes lotes de café foram secos em estufa com ventilação forçada com temperatura do ar de aproximadamente 60 ± 3 °C, até diferentes níveis de teores de água. O acompanhamento da redução do teor de água, com o decorrer do tempo de secagem, foi realizado pelo método gravimétrico (perda de peso), conhecendo-se o teor de umidade inicial do produto. Para este monitoramento foi utilizada uma balança analítica com precisão de 0,01g. Os teores de umidade do produto foram determinados pelo método da estufa, 105 ± 3 °C, até peso constante, em três repetições (BRASIL, 2009). Durante a secagem, para cada teor de água obtido, amostras eram homogeneizadas e encaminhadas para a determinação das propriedades aerodinâmicas, sempre em triplicata.

2.1 Determinação da velocidade terminal

Na fase experimental, utilizou-se uma coluna vertical para a obtenção da velocidade terminal dos frutos de café, utilizando-se um dispositivo constituído de um ventilador centrífugo, acoplado a um tubo de acrílico transparente (Figura 1). A amostra de frutos de café foi disposta em um compartimento telado, sendo, posteriormente, submetida a um fluxo de ar, controlado por meio de um inversor de frequência, até o momento em que o grão ficasse flutuando. Fizeram-se três repetições, sendo que as medições da velocidade foram duas (0° e 90°) por cada uma. A velocidade foi medida com anemômetro de fio quente antes de o fluido passar pela tela onde ficavam os grãos.

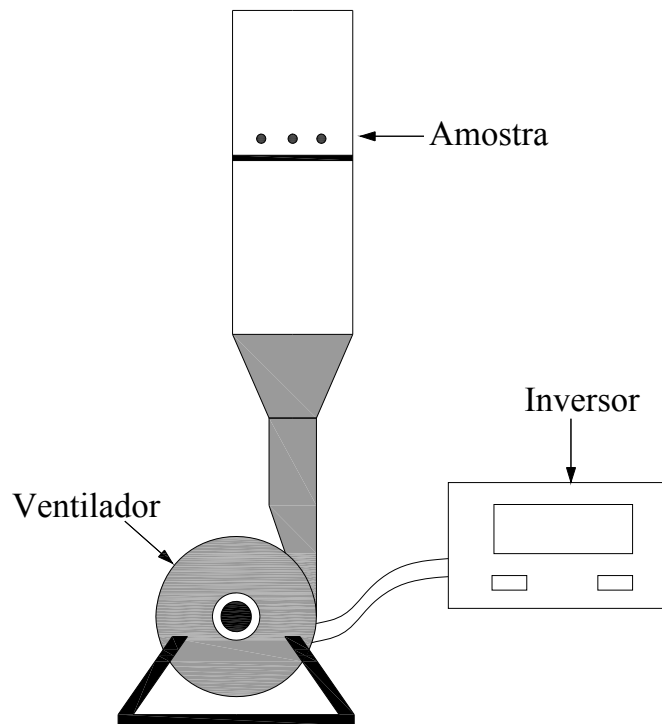


Figura 1 – Esquema do dispositivo usado para determinação da velocidade terminal.

2.2 Determinação do coeficiente de arrasto

Utilizou-se um túnel de vento horizontal, subsônico, com velocidades na faixa de 0 a 14 m s^{-1} , situado no Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica (DEP), para o estudo do comportamento aerodinâmico dos frutos de café (Figura 2). O mesmo tem uma seção de teste transparente de $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}$ que permite colocar o objeto em estudo, além de permitir observar o comportamento aerodinâmico. Neste túnel, pode-se determinar a força de arrasto sobre cada grão ou um conjunto de grãos em diversas

configurações a diferentes valores de velocidade. Conhecendo-se a força de arrasto e as demais propriedades dos grãos pode-se determinar o coeficiente de arrasto.



Figura 2 – Túnel de vento utilizado para a determinação do coeficiente de arrasto.

Devido a restrições relacionadas com a sensibilidade do túnel, não é possível a determinação da força de arrasto sobre um grão. Para poder solucionar o imprevisto, realizou-se o experimento com um grupo (*cluster*) de frutos de café, como representado na Figura 3. Os frutos de café foram colados em arranjo 4x5x3 (largura x altura x profundidade), com o intuito de eles ficarem o mais próximo possível em relação à forma (Figura 3). Para fixar o *cluster* de frutos de café à área de teste do túnel foi preciso colar estes a uma placa fina de alumínio com um parafuso no centro, o que possibilitou enroscá-lo à balança de força do túnel (Figura 4).



Figura 3 – Cluster de frutos de café (4x5x3 frutos).



Figura 4 – Cluster de frutos de café na seção de testes do túnel de vento.

O coeficiente de arrasto foi determinado mediante a equação 1 de Chen e Lee (2010), aplicada a meios porosos.

$$C_d = \frac{2 F}{\rho A v^2} \frac{V}{L A_c (1 - \varepsilon)} \quad (1)$$

onde:

Cd: Coeficiente de arrasto (adimensional);

F: Força de arrasto (N);

ρ : Massa específica do ar (kg m^{-3});

A: Área transversal do grão (m^2);

v: Velocidade do ar (m s^{-1});

V: Volume do grão (m^3);

L: Profundidade do cluster (m);

A_c : Área transversal do grupo (m^2); e

ε : Porosidade (adimensional).

O experimento foi realizado montando três grupos (*cluster*) de frutos de café por cada ponto de umidade estudado. A força de arrasto foi obtida com o programa AeroTek, que acompanha o túnel de vento (Figura 5).

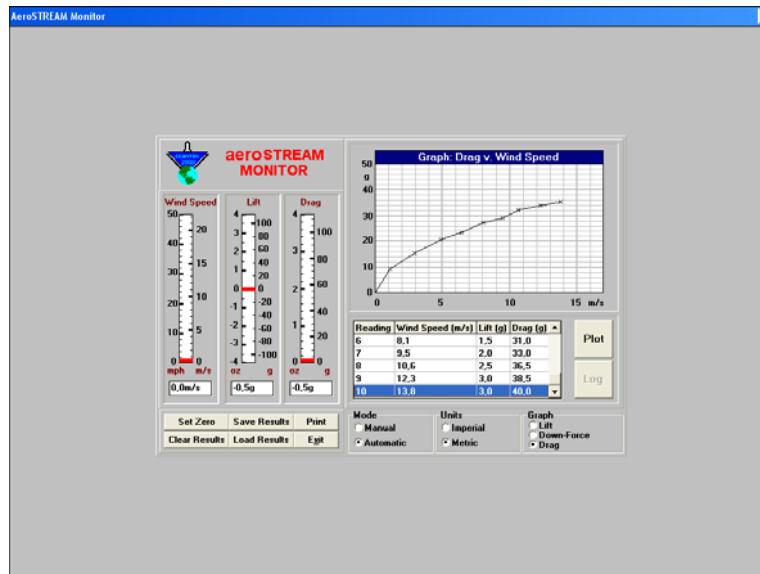


Figura 5 – Tela do programa AeroTek do túnel de vento.

As paredes do túnel de vento limitam o fluxo sobre um objeto, portanto se faz necessário corrigir os dados obtidos. A correção é requerida por causa da aceleração do fluxo, na vizinhança do objeto para satisfazer exigências de continuidade (bloqueio sólido). Para o fluxo sobre corpos poucos aerodinâmicos os efeitos de bloqueio sólido em dados medidos podem ser muito notáveis. O problema torna-se ainda mais sério quando há necessidade de modelos por razões de semelhança ou para a precisão de dimensões (OKAJIMA et al., 1997).

Para corrigir o bloqueio sólido foi aplicada a correção de Maskell (1963) (equações 2 e 3).

$$\frac{q_c}{q} = \left[1 + \frac{5}{2} C_{Dexp} \left(\frac{A_c}{A_T} \right) \right] \quad (2)$$

$$C_D = \frac{C_{Dexp}}{\left(\frac{q_c}{q} \right)} \quad (3)$$

onde:

q_c : Pressão dinâmica corrigida, Pa;

q : Pressão dinâmica sem corrigir, Pa;

C_D : Coeficiente de arrasto;

C_{Dexp} : Coeficiente de arrasto experimental;

A_T : Área transversal da seção de teste do túnel, m^2 ; e

A_c : Área do corpo, m^2 .

2.3 Análise numérica

Na análise numérica, consideraram-se as dimensões médias dos frutos de café do *cluster* utilizado no túnel de vento para cada ponto de umidade em cada clone e estágio de maturação. Durante o processo de suspensão por um fluxo de ar, o fruto girou sobre o eixo maior, ocasionando o estudo numérico de uma elipsoide regular. A geometria foi gerada no programa SolidWorks[®], inserida em um domínio cilíndrico vertical de diâmetro 0,3 m e altura de 0,4 m, situada no eixo central a 0,1 m da entrada (Figura 6). A escolha do domínio foi baseada na proposta de ANSYS FLUENT[®] de trabalhar em escoamento externo pelo menos num domínio de diâmetro 20 vezes a dimensão característica. Neste caso, a altura do domínio é 25 vezes a dimensão característica da elipsoide.

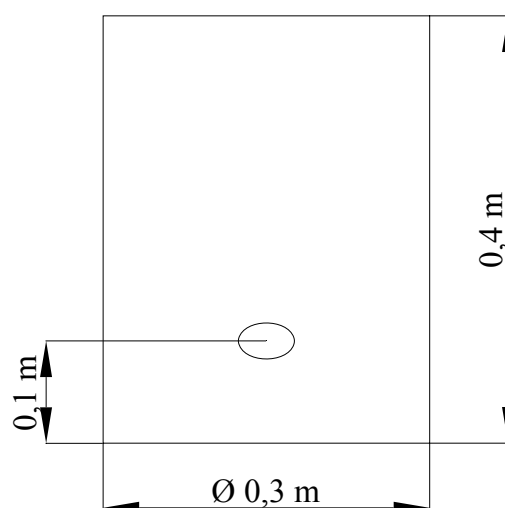


Figura 6 – Domínio utilizado para a análise numérica.

As malhas foram realizadas com o programa ICEM-CFD[®] do pacote ANSYS 14^{®1} de tipo não estruturada. O teste de malhas foi realizado para cada clone e estágio de maturação para a geometria referente ao teor de água inicial para uma velocidade de 12 m s⁻¹. Na Figura 7 e Tabela 1 observa-se o resumo do teste de malhas. Verifica-se que a malha número 3 foi a selecionada para cada clone e estágio de maturação com uma diferença entre os valores de coeficiente de arrasto experimental e numérico inferior ao 3 %.

Tabela 1 – Malhas utilizadas no teste de malhas

Clone	Est. mat.	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4
83 (EMCAPA 8141)	cereja	126536	318186	728455	1296098
	verde	125405	308659	719757	1286250
31 (EMCAPA 8131)	cereja	126694	314366	724869	1291881
	verde	125977	311415	721758	1289157
74 (EMCAPA 8141)	cereja	126191	312141	722122	1289315
	verde	126191	312141	722122	1289315

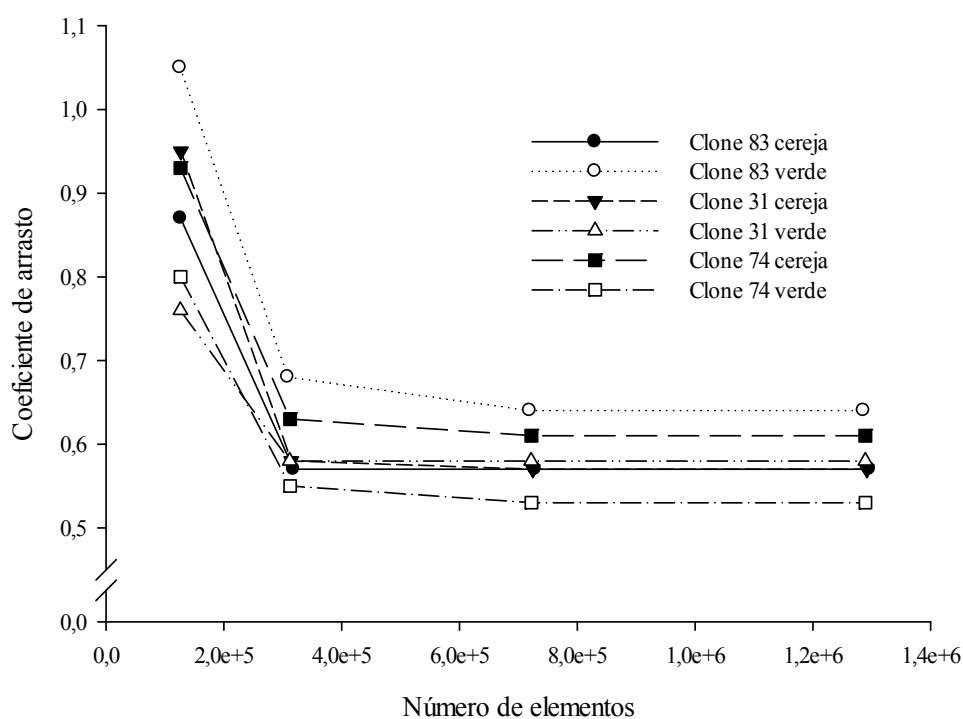


Figura 7 – Resultados dos testes de malhas realizados para cada clone de café.

¹ Licença do Departamento de Engenharia da Produção e Mecânica da UFV.

As respectivas malhas foram representadas para cada ponto de umidade com as dimensões médias dos frutos do *cluster* usado no túnel de vento (Figura 8). O tipo de malha utilizada foi a não estruturada tetraédrica. Trata-se do tipo mais flexível de malhas e que consegue adaptar-se sem quaisquer limitações à fronteira do domínio de solução.

Teoricamente, estas malhas podem ser usadas com qualquer método de discretização, mas se adaptam melhor às aproximações por volumes finitos ou por elementos finitos. Os elementos ou volumes de controle podem ter qualquer forma e não há qualquer restrição ao número de elementos vizinhos ou vértices. Na prática, malhas feitas de triângulos ou quadriláteros em 2D e tetraedros ou hexaedros em 3D são as mais frequentemente usadas. A vantagem da flexibilidade é compensada pela desvantagem da irregularidade da estrutura dos dados e pelo aumento de complexidade e formulação. A matriz do sistema de equações algébricas já não tem estrutura diagonal regular; a largura da banda necessita ser reduzida por reordenação dos elementos. Os algoritmos que resolvem os sistemas de equações algébricas são necessariamente mais lentos em relação aos algoritmos para malhas estruturadas (GONÇALVES, 2010).

As malhas não estruturadas, usualmente, são usadas com elementos finitos e, crescentemente, com volumes finitos. Os códigos computacionais para malhas não estruturadas são mais flexíveis, não necessitam ser alterados quando a malha é localmente refinada, ou quando elementos ou volumes de controle de diferentes formas são usados. Contudo, a geração de malhas e o pré-processamento são habitualmente mais complexos (GONÇALVES, 2010).

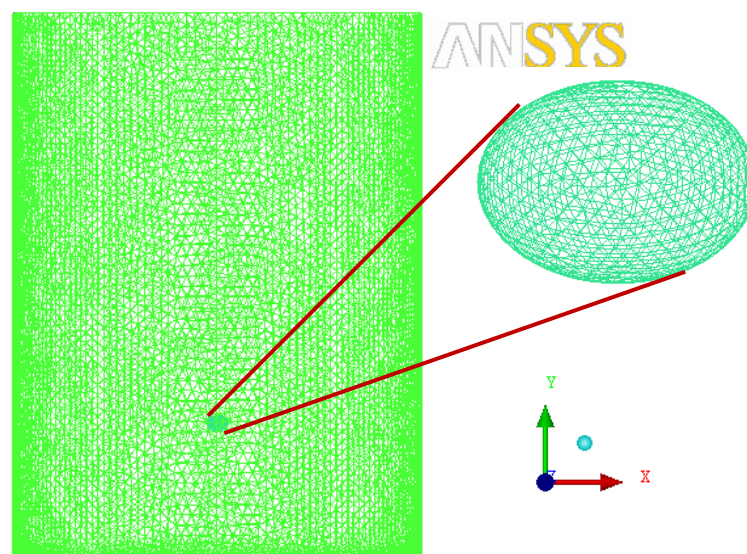


Figura 8 – Malha utilizada para o clone 83 cereja ($a=15,67$ mm; $b=11,34$ mm; $U=1,99$ b.s.)

Para o estudo numérico de pré e pós-processamento, foi utilizado o programa FLUENT[®] do pacote ANSYS 14[®]. Utilizou-se como condições de contorno velocidades na entrada variando de 7 m s⁻¹ a 14 m s⁻¹ para cada processamento, faixa na qual se encontram os valores de velocidade terminal para cada teor de água estudado. A pressão relativa na saída foi de 0 Pa e no fruto de café foi considerada a condição de parede com valor de rugosidade média na superfície de 0,28 μm, segundo Cardona-Quintero et al. (2008). O critério de convergência utilizado foi 10⁻⁴.

2.4 Análise estatística

Os dados experimentais da variação do teor de água, da velocidade terminal e o coeficiente de arrasto foram submetidos à análise de regressão (equações 4 e 5). Além disso, foi feita a seleção do modelo adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas.

Modelo de regressão linear:

$$Y_i = f(X_i, \beta) + \varepsilon_i \quad (4)$$

onde:

X_i : o vetor de observações das variáveis predictoras para o i -ésimo caso;

β : o vetor dos parâmetros;

$f(X_i, \beta)$: representa o valor esperado $E(Y_i)$; e

ε_i : são os erros.

Modelo de regressão não linear:

$$Y_i = f(X_i, \gamma) + \varepsilon_i \quad (5)$$

onde:

γ : o vetor de parâmetros do modelo; e

$f(X_i, \gamma)$: uma função não linear, representa o valor esperado $E(Y_i)$.

Os modelos foram selecionados considerando-se a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), a magnitude do erro médio relativo (P) e do erro padrão da

estimativa (SE). O erro médio relativo e o desvio-padrão da estimativa, para cada um dos modelos, foram calculados conforme as equações 6 e 7:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (6)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (7)$$

onde:

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

n: número de observações experimentais; e

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Realizou-se o teste de identidade entre modelos descritos por Regazzi (1999) com o propósito de avaliar a possibilidade de uma única equação representar o comportamento das variáveis estudadas. Para cada variável, foram testadas todas as combinações que representam as várias possibilidades de agrupamento entre os clones estudados, assim como o estágio de maturação (Tabela 2). A identificação da igualdade ou da diferença entre os clones e estágios de maturação, em relação às variáveis modeladas, foi feita por meio da comparação entre a soma de quadrado dos resíduos para cada variável, em cada estágio ou clone (modelo completo) e a soma de quadrado da diferença para o modelo ajustado com uma única base de dados contendo todas as informações do clone ou clones (modelo reduzido). Sempre que o valor de F calculado for maior ou igual ao valor de F tabelado, significa que o teste foi significativo, a um nível de probabilidade ($\alpha=1\%$) pré-estabelecido. Nesse caso, rejeita-se H_0 , ou seja, o total da soma de quadrados dos resíduos de cada uma das variáveis em cada estágio ou clone (modelo completo) difere, estatisticamente, da soma do quadrado da diferença para o modelo ajustado para o conjunto total dos dados para cada variável (modelo reduzido). Caso contrário, se aceita H_0 , ou seja, pode-se utilizar um único modelo para estimar a variável estudada para o clone ou grupo de clones.

Tabela 2 – Combinações que representam as várias possibilidades de agrupamento entre os clones estudados

Variedade clonal	Clones	Estádio de maturação	Combinação
EMCAPA 8141	83	Verde vs Cereja	1
EMCAPA 8131	31	Verde vs Cereja	2
EMCAPA 8141	74	Verde vs Cereja	3
Todas	Todos	Misturado	4

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram indicadas as velocidades terminais para cada clone de café em cada estágio de maturação dos frutos. Na Figura 9 observa-se o comportamento da velocidade terminal dos frutos de café verde e cereja do clone 83, diminuindo de forma não linear com a secagem.

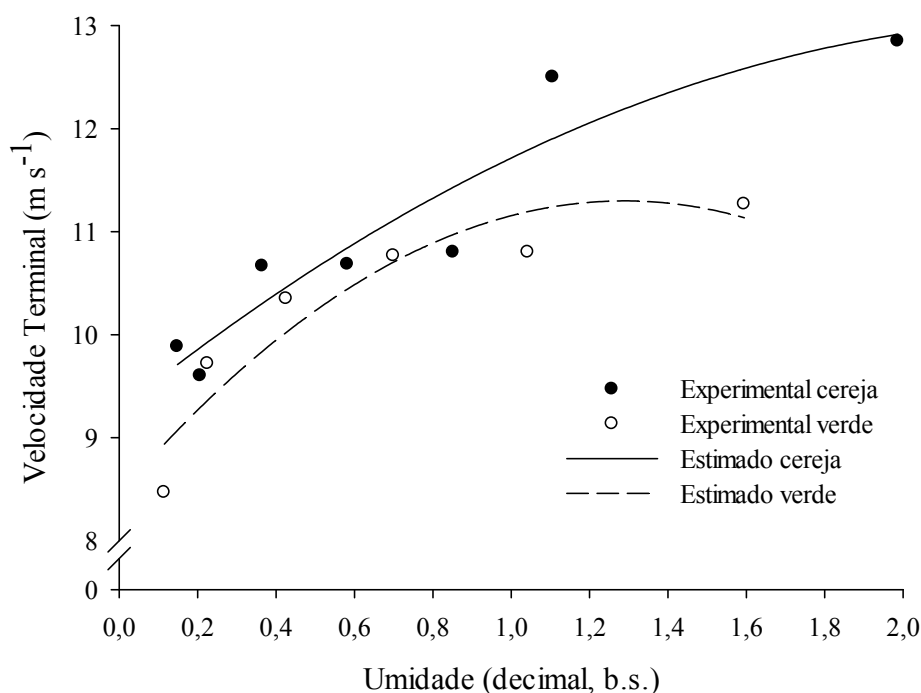


Figura 9 – Comportamento da velocidade terminal durante a secagem do clone 83 (verde e cereja).

Observa-se nas Figuras 10 e 11 o comportamento da velocidade terminal dos clones 31 e 74. Tal comportamento é similar ao clone 83, diminuindo de forma não linear com a diminuição do teor de água. Este comportamento está diretamente relacionado com o comportamento da massa específica estudada no capítulo um, à medida que avança a secagem tem um aumento nos primeiros instantes da secagem,

consequentemente, há um aumento da velocidade para garantir a flutuação do fruto de café no fluxo de ar. O menor valor de velocidade terminal encontrado foi de $8,47 \text{ m s}^{-1}$ para o clone 83 verde e o maior foi de $12,87$ para o clone 74 cereja.

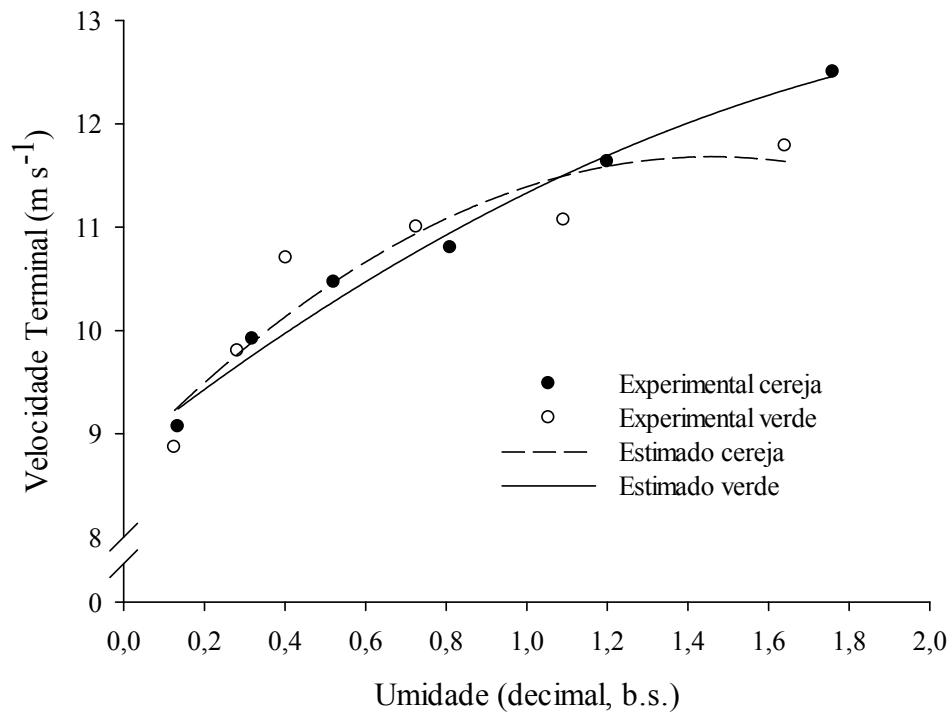


Figura 10 – Comportamento da velocidade terminal durante a secagem do clone 31 (verde e cereja).

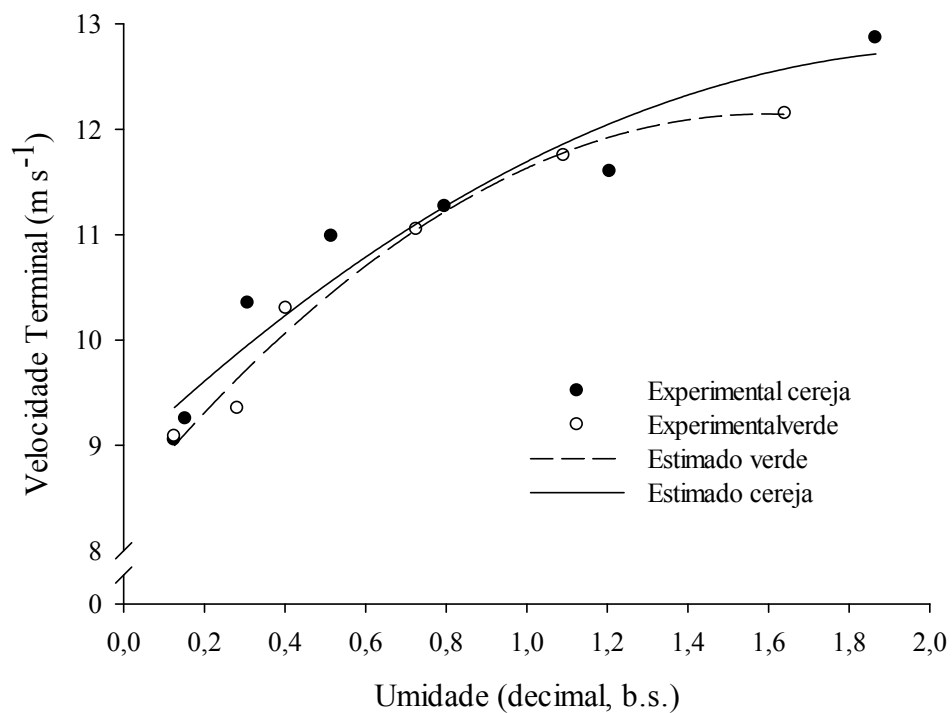


Figura 11 – Comportamento da velocidade terminal durante a secagem do clone 74 (verde e cereja).

Na Tabela 3 registra-se o resumo dos modelos de regressão não linear de melhor ajuste para cada clone de café conilon verde e cereja. Neste caso, o modelo polinomial de grau dois apresentou o melhor ajuste em todos os casos aos dados experimentais. O menor coeficiente de determinação foi para o clone 83. Tal valor pode ser explicado devido ao grau de maturação deste clone ser o menos uniforme de todos os clones em estudo.

Verifica-se, nas figuras anteriores, tendência de aumento dos valores da variável dependente velocidade terminal com a elevação do teor de água, para ambos os produtos analisados, sendo este comportamento o mesmo encontrado para outros produtos agrícolas (SCHWANZ DA SILVA et al., 2003; RAJABIPOUR et al., 2006; RAZAVI et al., 2007; GÜRISOY; GÜZEL, 2010; KHODAEI; AKHIJAHANI, 2012). Possivelmente este aumento deve-se às alterações das características físicas do produto, principalmente, à massa, à área e ao volume, com a perda de água. Isto confirma a expectativa de que a maior presença de água na composição do produto contribui de forma decisiva para a alteração direta da relação entre a massa e o volume dos frutos, de forma a aumentar os valores da velocidade terminal.

Tabela 3 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados aos valores experimentais e calculados de velocidade terminal

Clone	Prop. física	β_0	β_1	β_2	R^2
83 cereja	V_T	9,2667	3,0697	-0,6207	0,8880
83 verde	V_T	8,4521	4,4239	-1,7186	0,8756
31 cereja	V_T	8,8372	3,0681	-0,5734	0,9844
31 verde	V_T	8,7393	4,0403	-1,3864	0,8794
74 cereja	V_T	8,9150	3,6351	-0,8562	0,9354
74 verde	V_T	8,4343	4,6647	-1,4657	0,9823
Todos (Comum)	V_T	8,9036	3,3066	-0,7774	0,8654

Na Tabela 4 encontra-se o resumo do teste de identidade realizado aos modelos registrados anteriormente na Tabela 3, onde foi determinado ser possível utilizar um modelo comum que represente o comportamento da velocidade terminal durante a secagem. O estudo foi realizado para um nível de significância de 1 %, onde sempre que o valor de $F_{(calculado)}$ for maior que $F_{(tabelado)}$, o teste é significativo, ou seja, rejeita-se H_0 . Dessa forma, a soma de quadrados dos resíduos de cada clone difere estatisticamente da

soma de quadrados dos resíduos feita para o conjunto total dos dados. Quando ocorrer o contrário o teste é não significativo, então se aceita H_0 . Em todos os casos, o valor de F calculado foi menor que o tabelado para um alfa igual a 1 %, o que significa ser possível utilizar o modelo comum registrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado do teste de identidade para velocidade terminal em todas as combinações estudadas

Comb.	Prop. física	Estimativas dos parâmetros do modelo completo			F_{calc}	F_{tab}	Teste
		β_0	β_1	β_2			
		1	V_T	9,0725			
2	V_T	8,8414	3,3330	-0,8339	0,83	9,779	NS
3	V_T	8,7624	3,8489	-0,9808	0,68	8,451	NS
4	V_T	8,9036	3,3066	-0,7774	0,33	3,499	NS

S = Significativo ao nível de 99 % de probabilidade pela distribuição F.

NS = Não significativo ao nível de 99 % de probabilidade pela distribuição F.

Na Figura 12 observa-se o modelo comum determinado mediante o teste de identidade. Pode-se apreciar similar comportamento aos registrados por Couto et al. (2003) e Afonso Júnior et al. (2007) para diferentes variedades de café arábica.

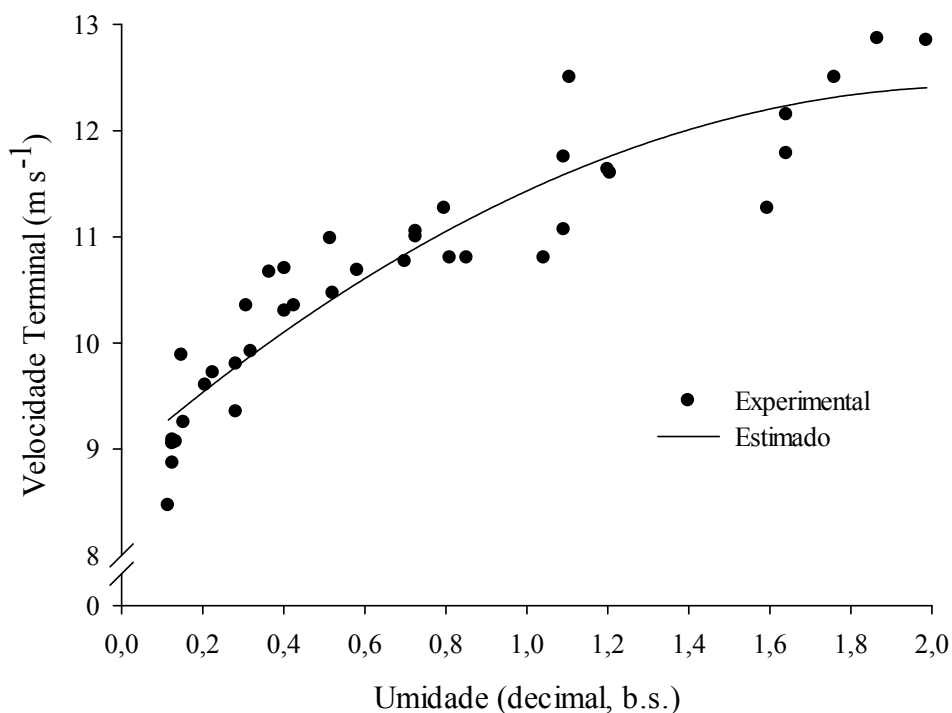


Figura 12 – Comportamento da velocidade terminal para todos os clones ajustado ao modelo comum.

Outros produtos agrícolas apresentam um comportamento linear, como foi observado para sorgo e milho (SCHWANZ DA SILVA et al., 2003), trigo (RAJABIPOUR et al., 2006), pistache (RAZAVI et al., 2007), trigo, cevada e lentilhas (GÜRSOY; GÜZEL, 2010), sementes de linho (EISSA, 2011), uva (KHODAEI; AKHIJAHANI, 2012), entre outros.

O coeficiente de arrasto experimental foi determinado no túnel de vento horizontal para *clusters* de frutos de cada clone verde e cereja. Realizou-se o teste de identidade entre todos os clones e estádios de maturação, encontrando o modelo comum de melhor ajuste. Na Tabela 5 observam-se os modelos encontrados para cada clone e seu correspondente estágio de maturação, além dos resultados do teste de identidade realizado.

Tabela 5 – Resultado do teste de identidade para o coeficiente de arrasto em todas as combinações estudadas

Clone	Prop. física	Estimativas dos parâmetros do modelo completo			F _{calc}	F _{tab}	Teste
		β_0	β_1	β_2			
83 cereja	C _D	1,4323	-1,88E-04	9,98E-09	0,20	2,157	NS
83 verde	C _D	1,4939	-2,58E-04	1,86E-08	1,94	2,297	NS
31 cereja	C _D	1,455	-2,16E-04	1,30E-08	0,43	2,297	NS
31 verde	C _D	1,4677	-2,26E-04	1,37E-08	0,93	2,297	NS
74 cereja	C _D	1,4857	-2,22E-04	1,35E-08	1,17	2,157	NS
74 verde	C _D	1,4617	-2,08E-04	1,22E-08	0,55	2,297	NS
Todos	C _D	1,3468	-1,78E-04	1,01E-08	0,71	1,967	NS

S = Significativo ao nível de 99 % de probabilidade pela distribuição F.

NS = Não significativo ao nível de 99 % de probabilidade pela distribuição F.

Com a aplicação do teste de identidade pode-se utilizar um modelo comum para cada clone em cada estágio de maturação, além disso, também foi encontrado um modelo comum para todos os clones estudados. Esse modelo possibilitou determinar o coeficiente de arrasto para qualquer clone em diferentes estádios de maturação. Esse resultado é de extrema importância para a indústria do café, devido às variedades de conilon estarem constituídas por vários clones que, muitas vezes, impossibilitam a obtenção de um modelo padrão para determinar diferentes propriedades físicas necessárias na pós-colheita.

Na Figura 13 observa-se o comportamento do coeficiente de arrasto com relação ao número de *Reynolds* que está diretamente relacionado com a dimensão (b) característica do fruto de café e a velocidade em estudo.

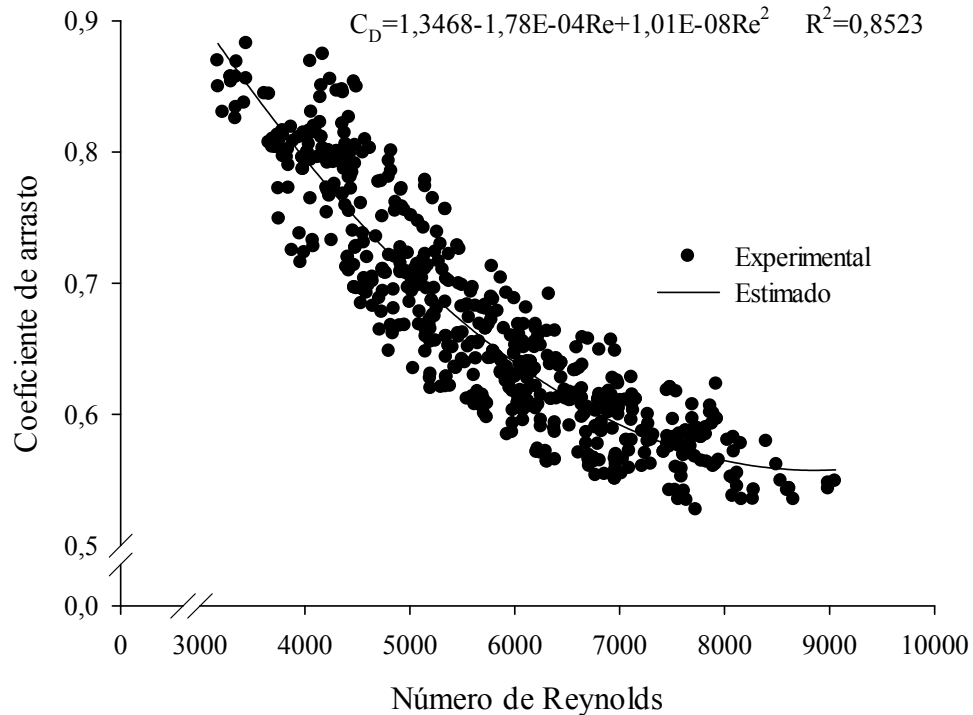


Figura 13 – Comportamento do coeficiente de arrasto para todos os clones ajustado ao modelo comum.

Os resultados mostrados na Figura 13 estão em plena concordância quando comparados com outros registrados por Rosendahl (2000), que estudou o comportamento do coeficiente de arrasto para diferentes formas geométricas incluídas às elipsoides. O modelo encontrado satisfaz as necessidades dos especialistas da área na utilização de propriedades aerodinâmicas em projetos de máquinas e contribui para o enriquecimento de dados de propriedades físicas de clones de café conilon.

Observa-se na Figura 14 o comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o teor de água. Tem-se um comportamento não linear diminuindo o coeficiente de arrasto com o aumento do teor de água no fruto de café. O modelo encontrado para determinar o coeficiente de arrasto viabiliza o processo de determinação da velocidade terminal de frutos de café que anteriormente precisava usar procedimentos de erro e tentativa (MOHSENIN, 1986), utilizar modelos reportados na bibliografia para outros corpos diferentes a produtos agrícolas que apresentam características de tipo biológicas

(PETTYJOHN; CHRISTIANSEN, 1948) ou aproximar o produto a uma esfera e utilizar o valor de coeficiente de arrasto de 0,44.

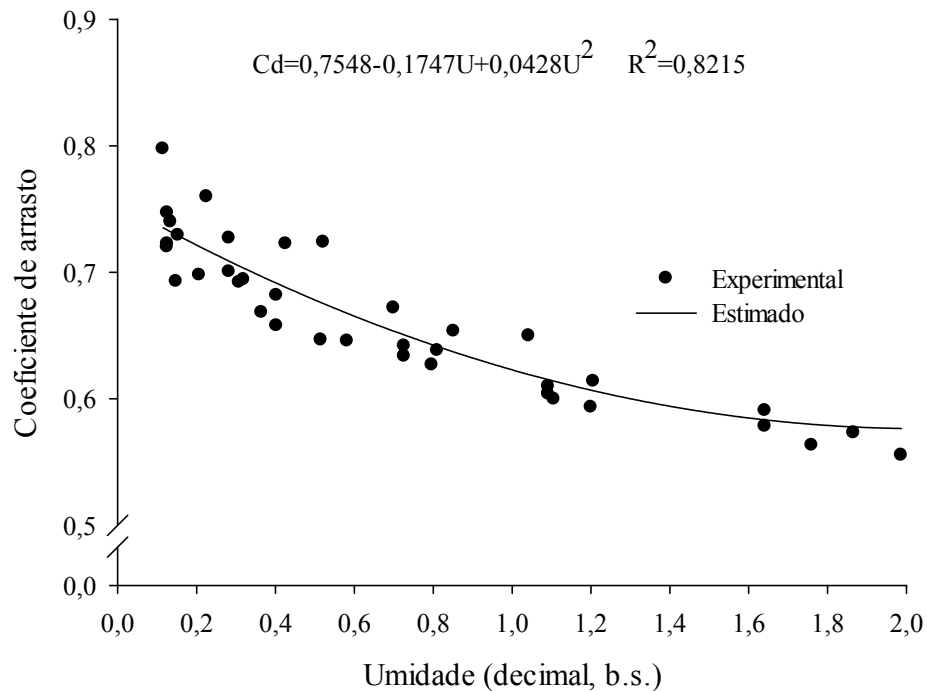


Figura 14 – Comportamento do coeficiente de arrasto para cada valor de velocidade terminal ao diminuir o teor de água durante a secagem de todos os clones estudados.

O estudo numérico foi realizado para cada um dos clones e respectivos estádios de maturação para valores de velocidade na faixa de 7 m s^{-1} a 14 m s^{-1} . Os resultados são apresentados da Figura 15 a 20. Observa-se o comportamento do coeficiente de arrasto *versus* o número de *Reynolds*, experimental e numérico. Nestas figuras observa-se a partir de números de *Reynolds* igual a 7000 que o coeficiente de arrasto torna-se constante.

Observa-se que o modelo numérico representou o fenômeno estudado em todos os clones e estádios de maturação. O modelo numérico para o clone 31 verde apresentou maior dispersão quando comparado ao experimental. Além disso, o modelo numérico para o clone 83 verde foi o que ficou mais próximo aos resultados experimentais segundo as seguintes figuras de coeficiente de arrasto e a Tabela 6.

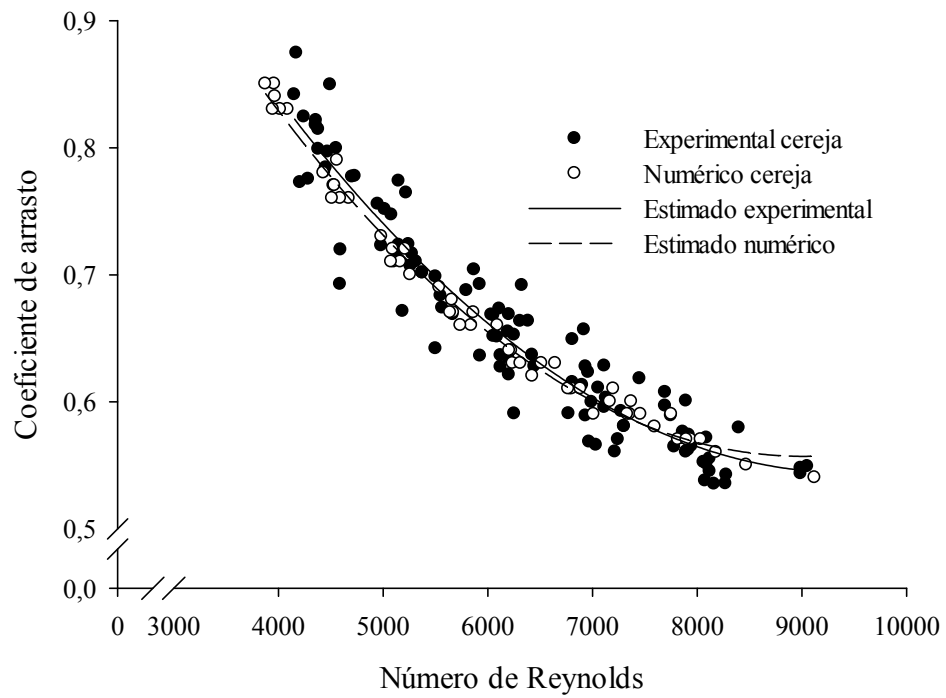


Figura 15. Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de *Reynolds* para o clone 83 cereja.

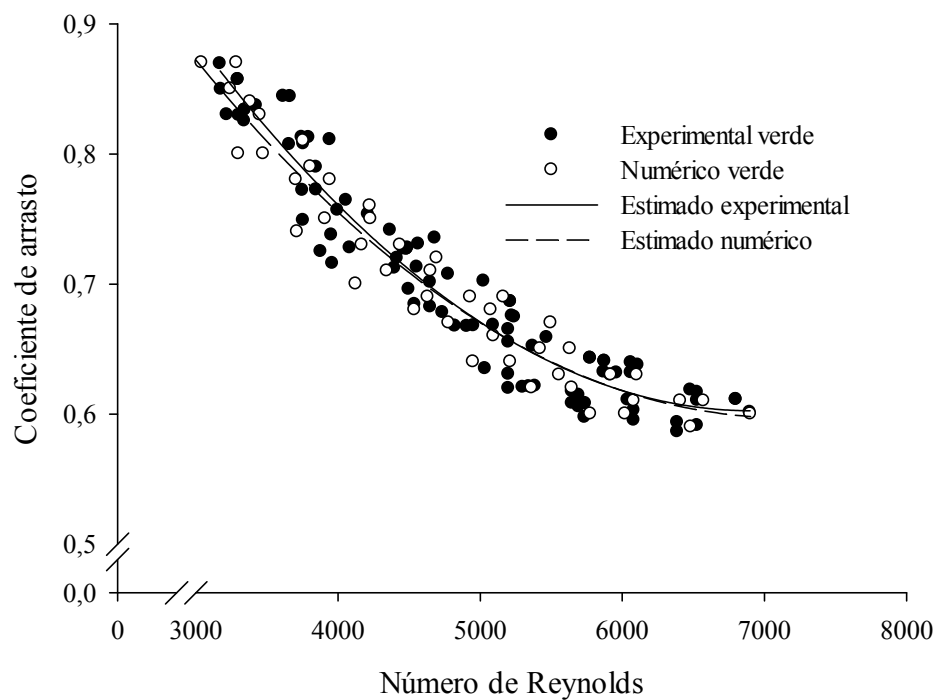


Figura 16 – Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de *Reynolds* para o clone 83 verde.

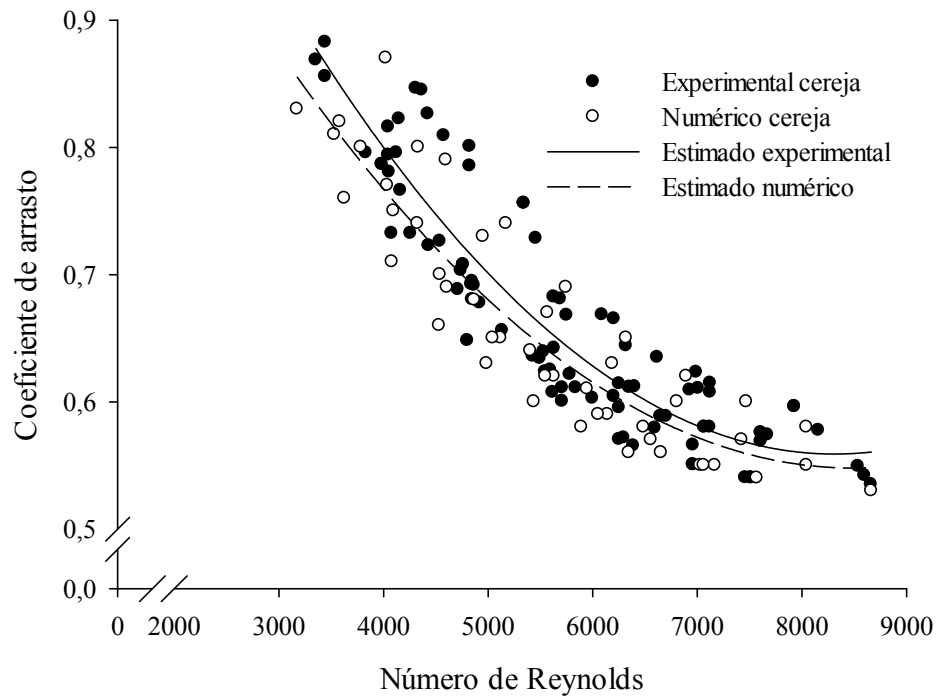


Figura 17 – Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de *Reynolds* para o clone 31 cereja.

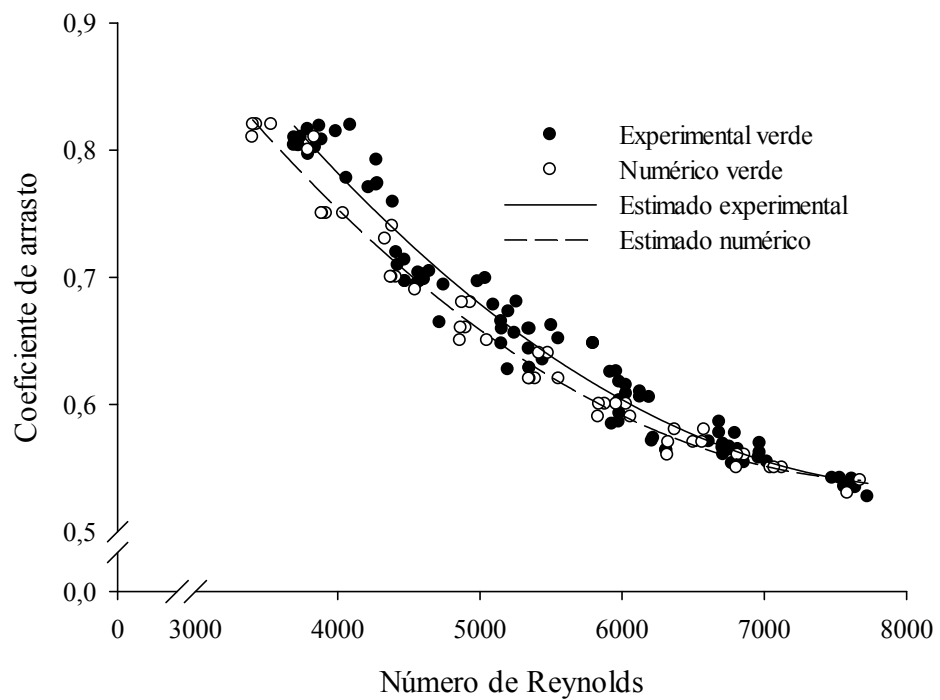


Figura 18 – Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de *Reynolds* para o clone 31 verde.

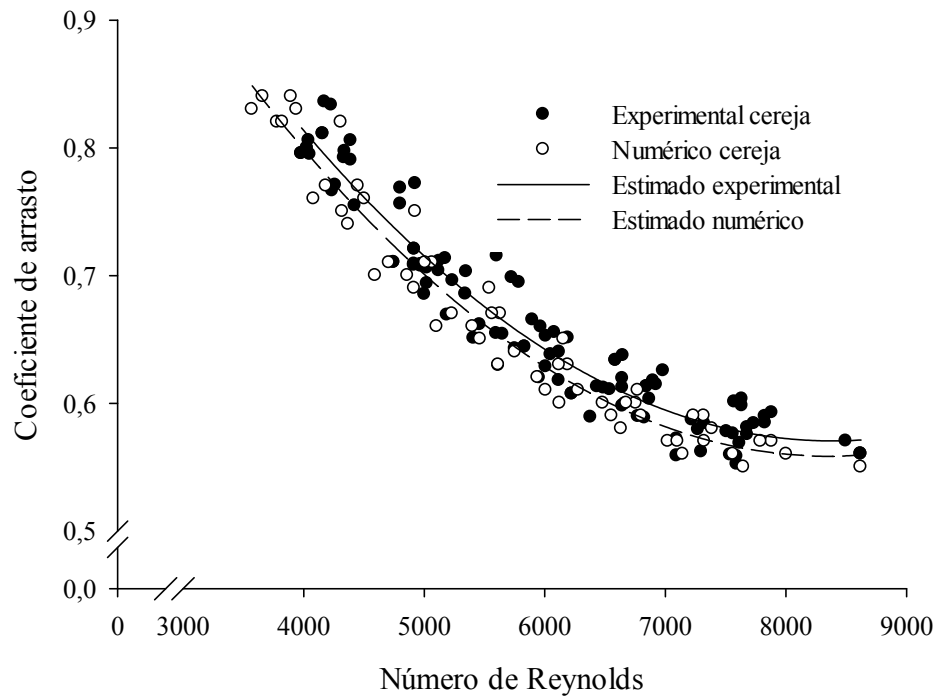


Figura 19 – Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de *Reynolds* para o clone 74 cereja.

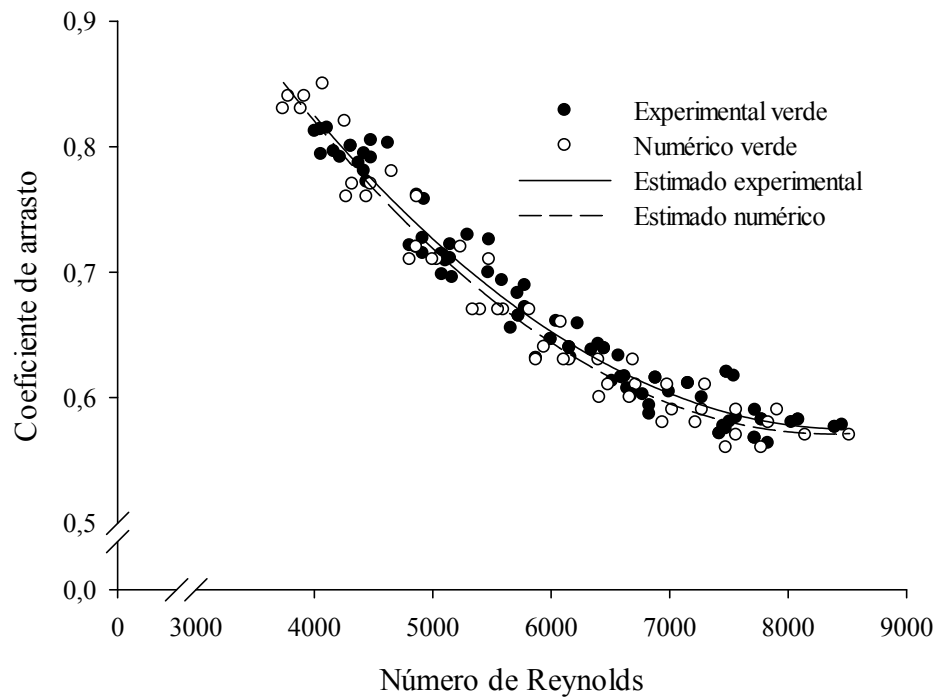


Figura 20 – Comportamento do coeficiente de arrasto ao variar o número de *Reynolds* para o clone 74 verde.

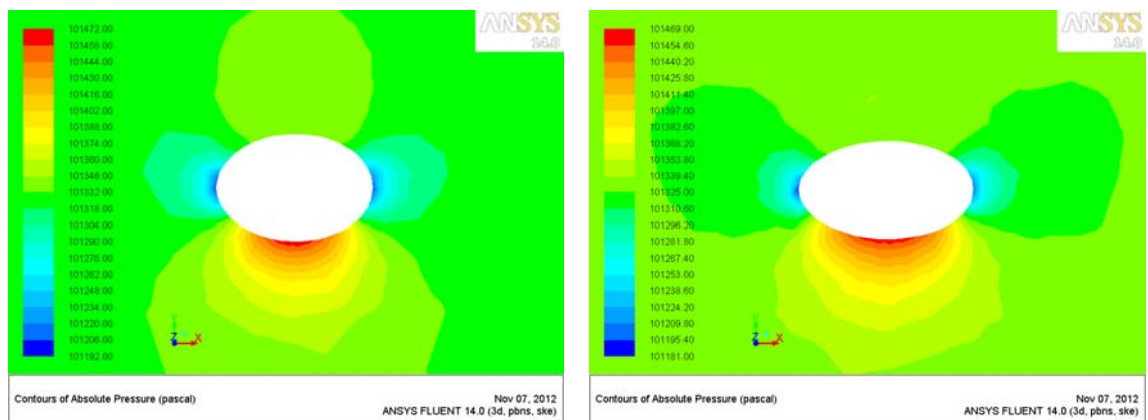
Evidencia-se na Tabela 6 o valor maior de 3,45 % de erro entre o coeficiente de arrasto experimental e o numérico para o clone 31 verde no ponto de umidade de 0,13 b.s. Portanto, os modelos apresentados nesta tabela têm um erro relativo inferior a 5 %, o que é aceitável para produtos agrícolas.

Evidencia-se, também na Tabela 6, um coeficiente de arrasto médio em torno de 0,68. Este valor é diferente do obtido por vários pesquisadores, isto é, de 0,44. Pode-se afirmar que esta diferença significativa refere-se a aproximações da geometria do produto.

Tabela 6 – Resumo dos coeficientes de arrasto experimentais e numéricos e os erros entres eles para os clones estudados

Clone	Umidade (b.s)	Vel. Terminal (m s⁻¹)	Cd exp.	Cd num.	Erro (%)
83 cereja	1,99	12,85	0,555	0,561	1,05
	1,11	12,50	0,600	0,597	0,40
	0,85	10,80	0,654	0,647	1,00
	0,58	10,68	0,646	0,640	0,94
	0,37	10,67	0,668	0,661	1,08
	0,21	9,60	0,698	0,690	1,19
	0,15	9,88	0,693	0,685	1,18
83 verde	1,59	11,27	0,652	0,652	0,02
	1,04	10,80	0,650	0,650	0,02
	0,70	10,77	0,672	0,671	0,08
	0,43	10,35	0,723	0,719	0,44
	0,23	9,72	0,760	0,754	0,74
	0,12	8,47	0,798	0,789	1,06
31 cereja	1,76	12,50	0,563	0,554	1,62
	1,20	11,63	0,593	0,583	1,68
	0,81	10,80	0,638	0,624	2,19
	0,52	10,47	0,724	0,700	3,25
	0,32	9,92	0,694	0,674	2,89
	0,13	9,07	0,740	0,714	3,44
31 verde	1,64	11,78	0,578	0,570	1,49
	1,09	11,07	0,604	0,591	2,05
	0,73	11,00	0,634	0,618	2,52
	0,40	10,70	0,658	0,639	2,80
	0,28	9,80	0,701	0,678	3,17
	0,13	8,87	0,747	0,721	3,45
74 cereja	1,87	12,87	0,573	0,561	2,15
	1,21	11,60	0,614	0,600	2,19
	0,80	11,27	0,627	0,613	2,17
	0,52	10,98	0,646	0,633	2,14
	0,31	10,35	0,692	0,678	2,04
	0,15	9,25	0,729	0,715	1,96
	0,13	9,05	0,720	0,706	1,98
74 verde	1,64	12,15	0,591	0,583	1,27
	1,09	11,75	0,610	0,601	1,40
	0,73	11,05	0,642	0,633	1,40
	0,40	10,30	0,682	0,673	1,27
	0,28	9,35	0,727	0,719	1,05
	0,13	9,08	0,723	0,715	1,08

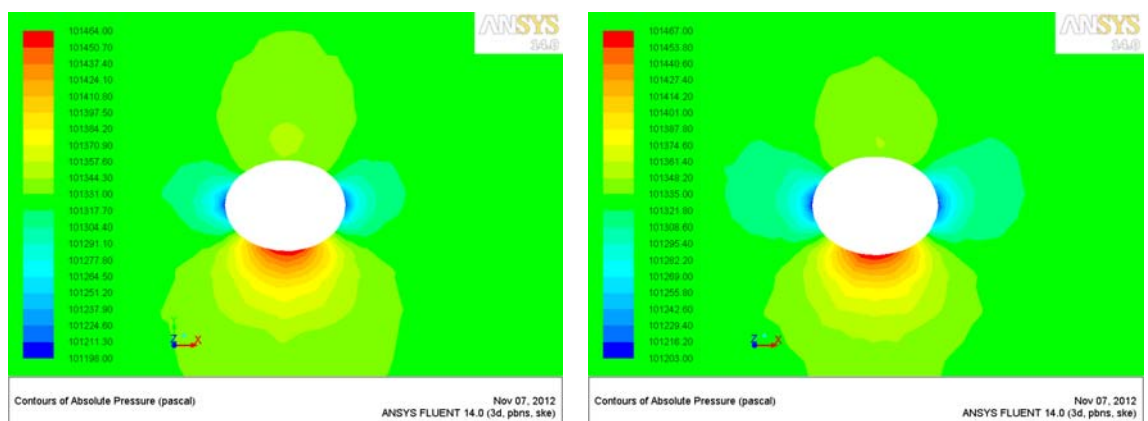
Da Figura 21 a 23 apresentam-se os contornos de pressão absoluta para os frutos de café para cada clone e estágio de maturação com o teor de água inicial para uma velocidade de 12 m s^{-1} e relação de aspecto (b/a) variável. Observa-se, em todos os casos, uma distribuição de pressões similar, com o ponto de maior pressão na parte frontal do fruto, onde primeiro incidem os vetores de velocidade, passando ao ponto de menor pressão no lateral do fruto devido ao aumento da velocidade nesta zona. Já as diferenças entre valores de pressão são pequenas pelo fato do tamanho do fruto de café também ser pequeno e não oferecer alta resistência ao escoamento do fluido.



(a)

(b)

Figura 21 – Distribuição de pressão absoluta para o clone 83 e velocidade de 12 m s^{-1} . a) cereja $b/a=0,72$, b) verde $b/a=0,56$.



(a)

(b)

Figura 22 – Distribuição de pressão absoluta para o clone 31 e velocidade de 12 m s^{-1} . a) cereja $b/a=0,82$, b) verde $b/a=0,78$.

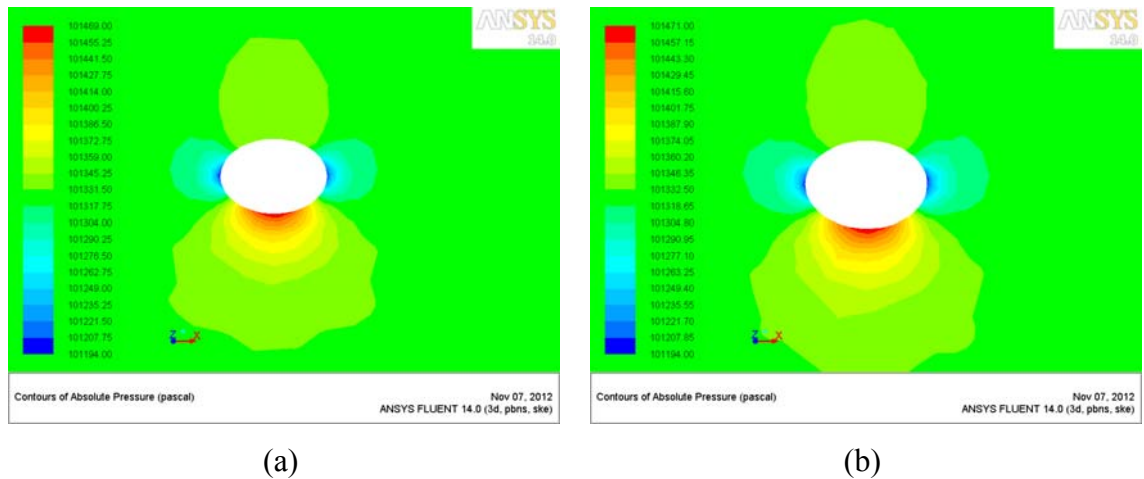
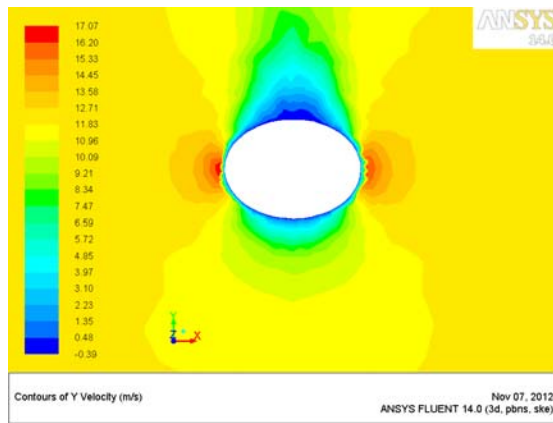


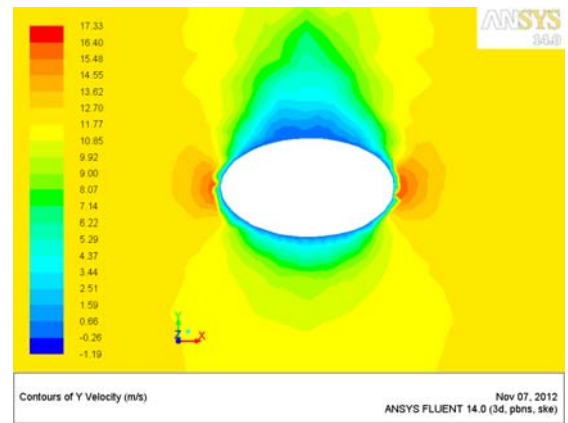
Figura 23 – Distribuição de pressão absoluta para o clone 74 e velocidade de 12 m s^{-1} . a) cereja $b/a=0,7$, b) verde $b/a=0,72$.

Da Figura 24 a 26 apresentam-se os contornos de velocidade para os frutos de café para cada clone e estágio de maturação com o teor de água inicial para uma velocidade de 12 m s^{-1} e ralação de aspecto variável. Evidencia-se como a velocidade na zona frontal do fruto tem valores mínimos, passando a aumentar nas laterais, o que justifica a diminuição da pressão anteriormente relatada. Já na parte traseira encontram-se os menores valores de velocidade. A distribuição de velocidades é muito similar em todos os casos devido à forma do fruto de café, para o clone 83 verde a velocidade tem um valor maior quando comparada com os outros, isto é devido a que o fruto apresenta uma forma mais alongada em relação aos outros, ou seja, uma relação de aspecto menor.

Outro aspecto importante na análise dos contornos de velocidade é o aparecimento de uma camada bem definida na fronteira do fruto, denominada camada limite. Na parte inferior e superior do fruto ocorre o descolamento desta camada. Este processo é um dos mais importantes encontrados na análise numérica devido ao interesse na área agrícola por estudos de secagem, o que possibilita fazer estudos mais específicos com cada produto ao longo da secagem.

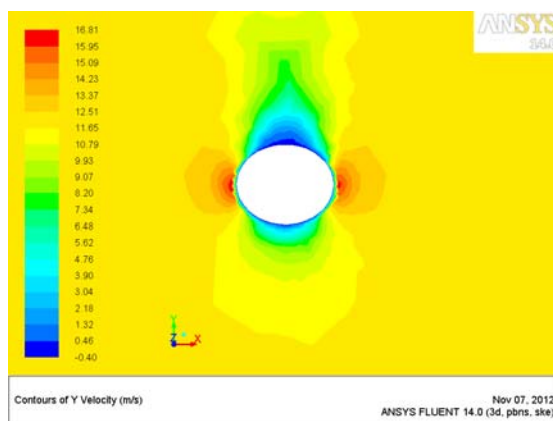


(a)

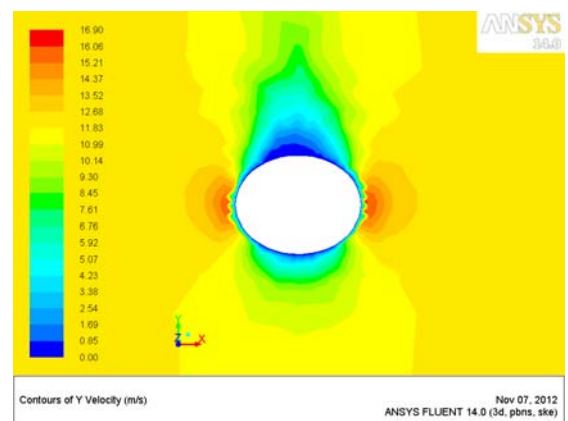


(b)

Figura 24 – Distribuição de velocidades para o clone 83 e velocidade de 12 m s^{-1} . a) cereja $b/a=0,72$, b) verde $b/a=0,56$.

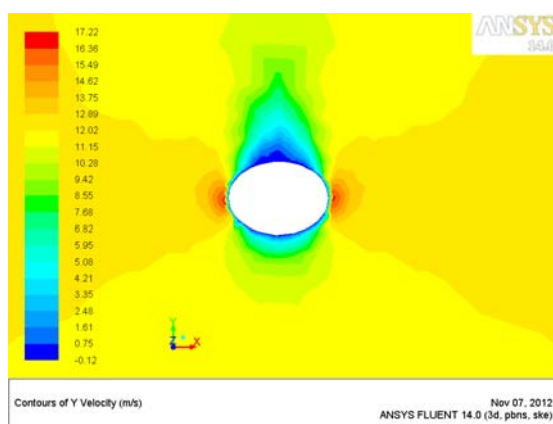


(a)

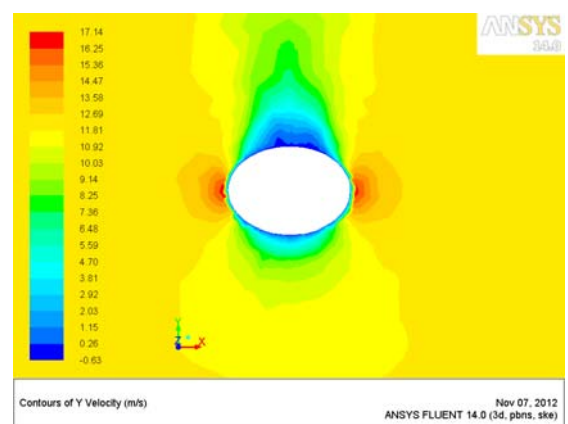


(b)

Figura 25 – Distribuição de velocidades para o clone 31 e velocidade de 12 m s^{-1} . a) cereja $b/a=0,82$, b) verde $b/a=0,78$.



(a)



(b)

Figura 26 – Distribuição de velocidades para o clone 74 e velocidade de 12 m s^{-1} . a) cereja $b/a=0,7$, b) verde $b/a=0,72$.

Na Figura 27, percebe-se que a quantidade de movimento de camadas de fluido adjacentes perto do fruto é reduzida a zero pela ação combinada de forças viscosas e de pressão, ocorrendo a separação.

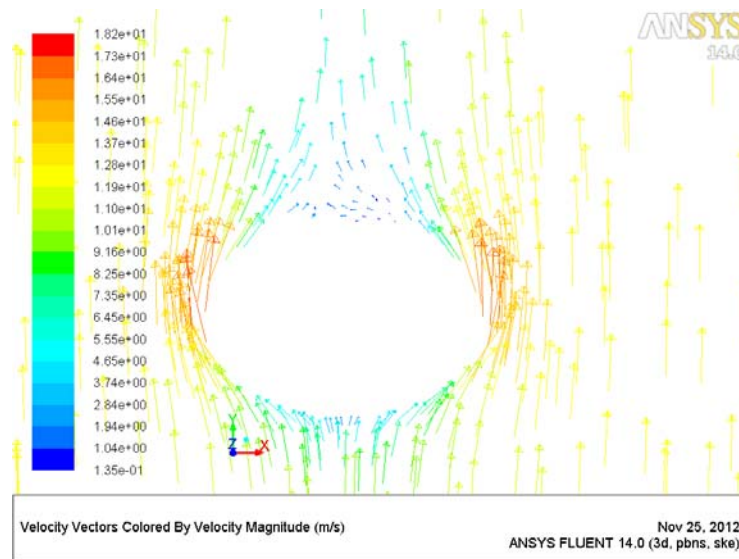
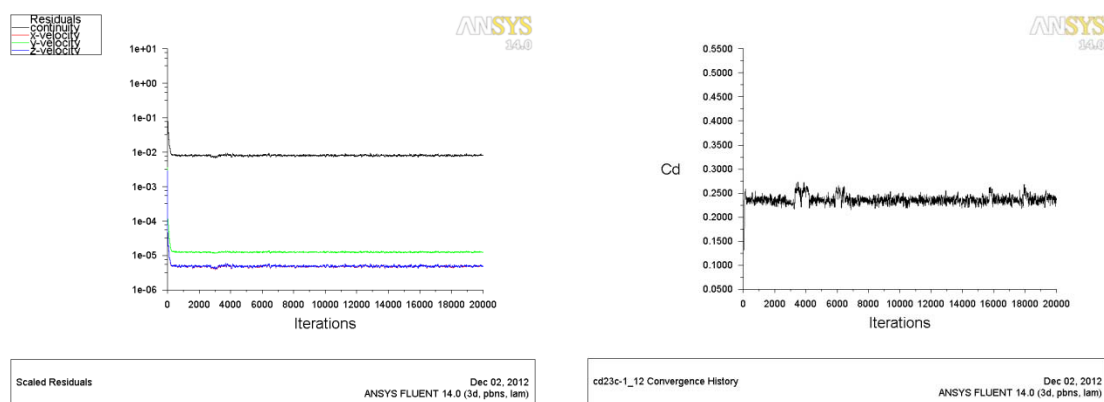


Figura 27 – Vectores de velocidades para o clone 83 cereja ($v=12 \text{ m s}^{-1}$; $b/a=0,72$).

O efeito turbulento não é significativo, embora tenha sido utilizado o modelo k-ε para evidenciar a turbulência. Fez-se um teste em regime laminar para verificar a adaptabilidade ao fenômeno físico em estudo e concluiu-se que não é possível utilizá-lo para o estudo do coeficiente de arrasto devido ao fato do número de *Reynolds* ser superior a 2500 – valor onde inicia a zona de transição de laminar a turbulento (FOX et al., 2006). Evidencia-se, na Figura 28, não ter sido possível a convergência e a instabilidade do coeficiente de arrasto em torno de valores fora da faixa para a geometria estudada.



(a)

(b)

Figura 28 – Gráficos de convergência gerados no teste de regime laminar para o clone 83 cereja ($v=12 \text{ m s}^{-1}$; $b/a=0,72$).; a) Resíduos, b) Coeficiente de arrasto.

O formato elipsoide escolhido representou o processo com uma exatidão aceitável, assim como foi enfatizado anteriormente na análise de erros dos coeficientes de arrasto e os contornos de velocidade e pressão estudados para cada um dos clones e estádios de maturação. Pode-se apreciar que a relação de aspecto (b/a) varia com o clone em estudo, mas observou-se que não tem uma significativa influência nos resultados.

4 CONCLUSÕES

Considerando os frutos de café com forma de elipsoide, determinou-se a influência do teor de água na velocidade terminal. Ao aumentar o teor de água a velocidade terminal cresce de forma não linear em todos os clones de café conilon e estádios de maturação estudados.

Encontrou-se um modelo comum para a velocidade terminal que representa a variação da mesma ao longo da secagem para todos os clones estudados com um nível de significância de 1 % para o teste de identidade.

Determinou-se experimentalmente em um túnel de vento horizontal o coeficiente de arrasto de cada clone, sendo encontrado o modelo comum que satisfaz o fenômeno com um nível de significância de 1 % para o teste de identidade. O coeficiente de arrasto apresentou um comportamento não linear, decrescendo ao aumentar o número de Reynolds.

Encontrou-se um modelo geral para determinar o coeficiente de arrasto que depende do teor de água do fruto de café durante a secagem que, por sua vez, elimina os tediosos procedimentos anteriores de erro e tentativa que se necessitavam para determiná-los.

O modelo numérico utilizado representou o processo adequadamente, com diferenças entre o coeficiente de arrasto experimental e o numérico inferiores a 5 %.

Foi possível determinar a distribuição de pressões e velocidades mediante a simulação numérica pelo fato da razão de aspecto ter uma mínima influência nas mesmas; isso significa que é possível utilizar a mesma razão de aspecto para todos os clones.

REFERÊNCIAS

- AFONSO JÚNIOR, P.; CORREA, P.; PINTO, F.; QUEIROZ, D. Aerodynamic properties of coffee cherries and beans. **Biosystems Engineering**, v. 98, n. 1, p. 39-46. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.010, 2007.
- ANDALIB, M.; ZHU, J.; NAKHLA, G. Terminal settling velocity and drag coefficient of biofilm-coated particles at high Reynolds numbers. **AIChE Journal**, v. 56, n. 10, p. 2598-2606. doi: 10.1002/aic.12184, 2010.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399 p.
- BROWN, P. P.; LAWLER, D. F. Sphere Drag and Settling Velocity Revisited. **Journal of Environmental Engineering**, v. 129, n. 3, p. 222. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:3(222), 2003.
- CARDONA-QUINTERO, Y. P.; OLIVEROS, C.; ARIAS-MATEUS, D. F.; DEVIA-CUBILLOS, A. Caracterización de la rugosidad de frutos del café variedad Colombia, en dos estados de desarrollo. **Cenicafé**, v. 59, n. 3, p. 204-213, 2008.
- CHEN, C.; LEE, C. **An experimental investigation on flow through a permeable structure**. Taiwan, 2010.
- CHENG, N. Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles. **Powder Technology**, v. 189, n. 3, p. 395-398. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.powtec.2008.07.006, 2009.
- CHHABRA, R. P.; AGARWAL, L.; SINHA, N. K. Drag on non-spherical particles: an evaluation of available methods. **Powder Technology**, v. 101, n. 3, p. 288-295. doi: 10.1016/S0032-5910(98)00178-8, 1999.
- CHRISTIANSEN, E. B.; BARKER, D. H. The effect of shape and density on the free settling of particles at high Reynolds numbers. **AIChE Journal**, v. 11, n. 1, p. 145-151. American Institute of Chemical Engineers. doi: 10.1002/aic.690110130, 1965.
- COUTO, S. M.; MAGALHÃES, A. C.; QUEIROZ, D. M. D.; BASTOS, I. T. Parâmetros relevantes na determinação da velocidade terminal de frutos de café. **Engenharia Agrícola**, n. 1993, p. 141-148, 2003.
- EISSA, A. H. A. Physical and aerodynamic properties of flaxseeds for proper separation by using airstream. **Journal of Food Process Engineering**, v. 34, n. 4, p. 983-1012. doi: 10.1111/j.1745-4530.2009.00526.x, 2011.
- FOX, R.; MCDONALD, A.; PRITCHARD, P. **Introdução à Mecânica dos Fluidos** (L. Editora, Ed.), 2006.
- GONÇALVES, N. D. F. **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas**. Universidade do Porto, 2010.

GÜRSOY, S.; GÜZEL, E. Determination of Physical Properties of Some Agricultural Grains. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 2, n. 5, p. 492-498, 2010.

HARTMAN, M.; TRNKA, O.; SVOBODA, K. Free Settling of Nonspherical Particles. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 33, n. 8, p. 1979-1983. doi: 10.1021/ie00032a012, 1994.

HAUHOUOT, O. M.; CRINER, B. R.; BRUSEWITZ, G. H.; SOLIE J.B. Selected physical characteristics and aerodynamic properties of cheat seed for the separation from wheat. **Agricultural Engineering International**, v. 2, p. 1-14, 2000.

KHODAEI, J.; AKHIJAHANI, H. S. Some Physical Properties of Rasa Grape (*Vitis vinifera* L.). **World Applied Sciences Journal**, v. 18, n. 6, p. 818-825. doi: 10.5829/idosi.wasj.2012.18.06.1473, 2012.

MARTINOVIC, D.; HORMAN, I.; DEMIRDZIC, I. Numerical and experimental analysis of wood drying process. **Wood science and technology**, v. 35, p. 143-156, 2001.

MASKELL, E. C. **A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel**. Aircraft Estab1, Farnborough. RAE Rep., 1963.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841 p.

OKAJIMA, A.; KIMURA, D.; KIWATA, T. The blockage effects for an oscillating rectangular cylinder at moderate Reynolds number. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 69-71, p. 997-1011. doi: 10.1016/S0167-6105(97)00223-7, 1997.

PETTYJOHN, E. S.; CHRISTIANSEN, E. B. Effect of particle shape on free-settling rates of isometric particles. **Chemical Engineering Progress**, v. 44, p. 157-172, 1948.

RAJABIPOUR, A.; TABATABAEEFAR, A.; FARAHANI, M. Effect of Moisture on Terminal Velocity of Wheat Varieties. **International Journal of Agriculture & Biology**, p. 10-13, 2006.

RAZAVI, S. M. A.; RAFE, A.; AKBARI, R. Terminal velocity of pistachio nut and its kernel as affected by moisture content and variety. **African Journal of Agricultural Research**, v. 2, n. 12, p. 663-666, 2007.

REGAZZI, A. Teste para verificar a identidade de modelos de regressão e a igualdade de parâmetros no caso de dados de delineamentos experimentais. **Revista Ceres**, v. 46, p. 383-409, 1999.

ROSENDAHL, L. Using a multi-parameter particle shape description to predict the motion of non-spherical particle shapes in swirling flow. **Applied Mathematical Modelling**, v. 24, n. 1, p. 11-25. doi: 10.1016/S0307-904X(99)00023-2, 2000.

SCHWANZ DA SILVA, F.; AFONSO, P. C.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. Influência do teor de umidade na velocidade terminal de grãos de sorgo e milheto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 2, n. 3, p. 1-4, 2003.

SIMPLÍCIO, M.; BRAGA, M. Parâmetros aerodinâmicos que influenciam na separação de amendoim. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 1, n. 83, p. 66-72, 1999.

TANG, P.; CHAN, H.; RAPER, J. Prediction of aerodynamic diameter of particles with rough surfaces. **Powder Technology**, v. 147, n. 1-3, p. 64-78. doi: 10.1016/j.powtec.2004.09.036, 2004.

TRAN-CONG, S. Drag coefficients of irregularly shaped particles. **Powder Technology**, v. 139, n. 1, p. 21-32. doi: 10.1016/j.powtec.2003.10.002, 2004.

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

CONCLUSÕES GERAIS

A área projetada, a área superficial, o volume e a porosidade aumentam com a elevação do teor de água para todos os clones, enquanto as massas específicas reais e aparentes crescem com o aumento da umidade dos frutos de café até um valor máximo e depois decrescem.

A forma dos frutos de café conilon é influenciada no processo de secagem, promovendo diminuição dos valores da esfericidade e circularidade a partir da redução do teor de água. Observou-se uma maior diminuição dos valores de esfericidade e circularidade no clone 32 verde com valores de 7,8 % e 11,34 %, respectivamente, e para o clone 31 verde, valores de 0,03 % e 0,62 %, respectivamente.

A contração volumétrica apresentou um comportamento não linear decrescente com a redução do teor de água da massa de frutos de café conilon. Os modelos de Bala e Woods (1984) adaptado, Corrêa et al. (2004) e o polinomial, ajustados aos valores experimentais para estimar o índice de contração volumétrica unitária e da massa dos frutos de café em função do teor de água representaram de forma satisfatória o fenômeno estudado, sendo o modelo polinomial, em todos os casos, o de melhor ajuste. Tendo isso em vista, o modelo polinomial descreve satisfatoriamente o comportamento de todas as propriedades físicas estudadas durante o processo de secagem, tendo coeficientes de regressão específicos para cada clone e estágio de maturação.

Realizou-se o teste de identidade, identificando a combinação e a propriedade física, ambas podendo ser representadas por um modelo comum.

Propriedades térmicas de frutos de café da espécie *Coffea canephora*, clone 32 da variedade clonal EMCAPA 8131, como a condutividade térmica, o calor específico e a difusividade térmica, foram determinadas para cinco níveis de conteúdo de umidade e dois estágios de maturação (verde e cereja).

O calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica para uma faixa de umidade de 0,133 a 1,634 b.s. foram determinados entre 1,431 a 3,615 $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$; 0,108 a 0,216 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ e $1,044 \times 10^{-7}$ a $1,671 \times 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, respectivamente, para os frutos de café conilon, obtendo um modelo de regressão comum para cada um deles.

Determinou-se que as propriedades térmicas do café conilon são dependentes do conteúdo de umidade. O calor específico e a condutividade térmica dos frutos de café conilon cresceram com o aumento do conteúdo de umidade, enquanto a difusividade térmica decresceu com o aumento do conteúdo de umidade.

Considerando os frutos de café com forma de elipsoide, determinou-se a influência do teor de água na velocidade terminal. Ao aumentar o teor de água a velocidade terminal cresce de forma não linear em todos os clones de café conilon e estádios de maturação estudados.

Encontrou-se um modelo comum para a velocidade terminal que representa a variação da mesma ao longo da secagem para todos os clones estudados com um nível de significância de 1 % para o teste de identidade.

Determinou-se experimentalmente em um túnel de vento horizontal o coeficiente de arrasto de cada clone, sendo encontrado o modelo comum que satisfaz o fenômeno com um nível de significância de 1 % para o teste de identidade. O coeficiente de arrasto apresentou um comportamento não linear, decrescendo ao aumentar o número de Reynolds.

Encontrou-se um modelo geral para determinar o coeficiente de arrasto que depende do teor de água do fruto de café durante a secagem que, por sua vez, elimina os tediosos procedimentos anteriores de erro e tentativa que se necessitavam para determiná-los.

O modelo numérico utilizado representou o processo adequadamente, com diferenças entre o coeficiente de arrasto experimental e o numérico inferiores a 5 %.

Foi possível determinar a distribuição de pressões e velocidades mediante a simulação numérica pelo fato da razão de aspecto ter uma mínima influência nas mesmas; isso significa que é possível utilizar a mesma relação de aspecto para todos os clones.