



Resistência de café em coco e despulpado ao fluxo de ar

Daniilo J. P. da Silva¹, Sandra M. Couto², Abraão B. Peixoto¹, Ana E. O. dos Santos² & Stella M. J. Vieira²

RESUMO

Determinaram-se, neste trabalho, expressões para descrever: (1) variações da massa específica, aparente e real, e porosidade do café (coco e despulpado) em função do teor de umidade do produto e (2) o comportamento dos valores de resistência ao fluxo de ar em colunas de café (coco e despulpado) em função do teor de umidade do produto, intensidade do fluxo e profundidade na coluna. Para café despulpado, as massas específicas, reais e aparentes, e porosidade, são funções lineares do teor de umidade; massas específicas aumentam com o teor de umidade do produto e a porosidade diminui. Para café coco (passa), as duas massas específicas são funções quadráticas do teor de umidade do produto. A porosidade é, praticamente, independente do teor de umidade do produto; para os mesmos teores de umidade: os valores das duas massas específicas do café em coco são inferiores aos do café despulpado; os valores de porosidade do café em passa são superiores àqueles para o café despulpado. Em termos de comportamento dos valores da pressão estática na coluna do produto, conclui-se que a pressão no café despulpado é sempre maior que no passa, para todas as profundidades e para o produto, nos três teores de umidade.

Palavras-chave: teor de umidade, massa específica, porosidade, pressão estática

Airflow resistance of pulped and dried cherry coffee bed

ABSTRACT

In this study expressions to describe (1) variations of unit and bulk density and porosity of the coffee (dried cherry and pulped) as a function of the product moisture content and (2) the behavior of the values of airflow resistance in coffee columns (dried cherry and pulped) as a function of the product moisture content, airflow intensity and depth in the coffee column were investigated. For pulped coffee, unit and bulk density and porosity are linear functions of moisture content; densities increase with the product moisture content while the porosity decreases. For dried cherry coffee: unit and bulk densities are quadratic functions of the product moisture content that present minimum values in the moisture content range investigated. The porosity is, practically, independent of the product moisture content; for the same moisture contents: the unit bulk density values of dried cherry coffee are smaller than those for pulped coffee; the porosity values of dried cherry coffee are greater than those for the pulped coffee. In terms of the behavior of the static pressure values in the product column, it was observed that the pressure in the pulped coffee is always larger than in the dried cherry coffee for all the column depths and three moisture contents.

Key words: moisture content, density, porosity, static pressure

¹ Departamento de Tecnologia de Alimentos/UFV, CEP: 36571-000 – Viçosa – MG. Fone: (31) 3899-1915/1927 E-mail: daniilojpsilva@yahoo.com.br; abraão@bahia.net.br

² Departamento de Engenharia Agrícola/UFV, CEP: 36571-000 – Viçosa – MG. Fone: (31) 3899-1927 E-mail: scouto@mail.ufv.br; anaelisaos@bol.com.br; Stella@insecta.ufv.br

INTRODUÇÃO

Para se obter um armazenamento eficiente de grãos agrícolas, a granel, o produto deve ser submetido a operações de secagem e de aeração. A execução desses processos prolonga o período de armazenamento e evita a deterioração do produto, resultante de sua atividade biológica.

Nesses processos, uma massa de ar é, geralmente, forçada a passar pelo produto agrícola; o ar, encontrando resistência do produto granular à sua passagem, escoar pelos espaços intergranulares. A resistência ao escoamento de ar, oferecida por uma massa de grãos, é conhecida, frequentemente, como perda de pressão, ou perda de carga ou, ainda, pressão estática a ser vencida. A resistência ao fluxo de ar em sistemas de secagem e aeração depende de diversos fatores, como: intensidade do fluxo de ar, altura da camada de grãos, presença de impurezas no produto, tamanho, forma, teor de umidade e distribuição dos grãos na massa granular e rugosidade do produto. O método de enchimento da coluna de grãos, a sua compactação e a direção do fluxo de ar influenciam, também, na resistência de um produto à passagem de um fluxo de ar. Nesses sistemas, as chapas perfuradas, os dutos perfurados e as tubulações, são responsáveis por um aumento da queda de pressão (Calderwood, 1973; Haque et al., 1978; Jayas, 1987; Brooker et al., 1992).

Quando se trata dos principais parâmetros envolvidos na quantificação da resistência que uma massa de grãos impõe ao escoamento de ar, tem-se três propriedades físicas de grande importância, que são: porosidade, massa específica real e aparente que, em geral, são funções do teor de umidade do produto e da presença de impurezas na amostra.

Mohsenin (1978) define a porosidade de uma massa granular como a quantidade de espaços vazios ocupados pelo ar nos espaços intergranulares, podendo variar de 30 a 50%.

Couto et al. (1999), estudando a porosidade de amostras com frutos de café (variedades catuaí e timor) contendo o produto verde e cereja, verificaram que a porosidade variou de 38,8 a 53,0%, valores estes que se encontram na mesma faixa da maioria dos grãos agrícolas. Os valores de porosidade aumentaram com o teor de água até um valor máximo e, a seguir, decresceram.

Chandasekar & Viswanathan (1999), estudando propriedades físicas de café descascado das espécies arábica e robusta, concluíram que os valores de porosidade diminuíram com o aumento do teor de água na faixa de 9,9 a 30,6% b.u.

Hall et al. (1972) investigaram, durante a secagem, o efeito da redução do teor de umidade de grãos de milho nos valores da massa específica real e porosidade. Dois lotes, inicialmente nas faixas de 52–61% b.s. e de 32–35% b.s., tiveram suas umidades reduzidas para valores entre 6–10% b.s. A massa específica real aumentou com reduções no teor de umidade do produto; entretanto, a porosidade diminuiu com decréscimo na umidade do grão, até um valor mínimo (entre 17 a 24% b.s.) e, a seguir, cresceu com decréscimo no teor de umidade.

Brusewitz (1975) detectou que, para uma faixa de umidade de 15–45% b.u., os valores de massa específica real de diversos grãos decresceram com aumento no teor de umida-

de do produto, porém a massa específica aparente diminuiu com acréscimo no teor de umidade, até certo valor e, a seguir, cresceu com o aumento no teor de umidade. Dos grãos testados, os de soja foram os únicos que tiveram, durante o intervalo testado, suas massas específicas aparentes crescentes com o decréscimo no teor de umidade.

Sinha (1973), estudando sementes de linho, constataram que, devido à compactação, o aumento da massa específica aparente do produto ocasionou um acréscimo da ordem de 50%, ou mais, na resistência à passagem de ar pela massa de sementes. Uma redução de 25% na resistência à passagem de ar, foi verificada quando o produto se encontrava a teores de umidade maiores.

Shedd (1951), avaliando a variação da resistência ao escoamento de ar em função do teor de umidade de grãos de milho, concluiu que o produto, a teores de umidade acima de 20% b.u., oferece uma resistência menor que quando o milho está mais seco. Resposta semelhante foi encontrada por Haque et al. (1982), trabalhando com milho, sorgo e trigo, a teores de umidade entre 12,4 e 25,3% b.u. e densidades de fluxo de ar na faixa de 0,6 a 13,2 m³ min⁻¹ m⁻².

Afonso (1994) investigou a variação da pressão estática ao longo de uma coluna de café em coco, em função da densidade do fluxo de ar, do teor de umidade, da massa específica aparente e da profundidade da camada do produto e concluiu que a massa específica aparente do café em coco é maior quando este se encontra a um teor de umidade mais elevado e, neste caso, a resistência oferecida pelo produto à passagem do fluxo de ar é menor.

Nos sistemas de aeração, seca-aeração e secagem, geralmente o produto se encontra limpo e, alguns dos fatores que conseqüentemente influenciam a resistência ao fluxo de ar durante esses processos, como a presença de impurezas, tornam-se desprezíveis. Os fluxos de ar usados nos processos de secagem, aeração e seca-aeração, encontram-se em diferentes faixas. Na secagem, os fluxos variam de 0,3 a 60 m³ min⁻¹ m⁻², na aeração de 0,06 a 0,12 m³ min⁻¹ m⁻² e, na seca-aeração, de 1,0 a 5,0 m³ min⁻¹ m⁻².

O objetivo geral do presente trabalho é fornecer subsídios para se desenvolver e aperfeiçoar o transporte hidráulico, o projeto de máquinas, as metodologias relacionadas à limpeza, à separação, à secagem e ao armazenamento do café. Os objetivos específicos são: (a) determinar expressões que descrevam as variações da massa específica, aparente e real, e porosidade do café em coco e do café despulpado, em função do teor de umidade do produto e (b) obter equações para descrever o comportamento dos valores de resistência ao fluxo de ar em camadas de café (em coco e despulpado) em função do teor de umidade do produto, intensidade do fluxo e profundidade na coluna.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no setor de Armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. O produto utilizado nos experimentos foi o café (*Coffea arabica* L.), variedade

catuaí, em variadas situações (cereja, passa e despulpado) e em teores diferentes de umidade, cedido por produtores da região de Viçosa e Araçuaia.

Teor de umidade dos frutos de café

As etapas às quais os frutos de café foram submetidos para a obtenção de amostras a diferentes teores de umidade para as determinações das propriedades físicas, são expostas a seguir. Para determinar a umidade do material em qualquer fase do experimento, utilizou-se o método de estufa, segundo Brasil (1992) a temperatura de 103 ± 2 °C, por 24 h. Para obtenção de amostras com teores de umidade menores, o produto foi colocado em secadores de fluxo de ar e disposto em camadas finas e submetido a temperatura de 45 °C. As propriedades físicas dos frutos de café foram determinadas em cinco ou mais teores de umidade diferentes.

Massa específica real e aparente

A massa específica real dos grãos de café foi determinada usando-se a metodologia de complementação do volume (Moreira et al., 1985), em que o tolueno foi o líquido complementar de volume. Esta metodologia foi desenvolvida para grãos de dimensões pequenas; assim, algumas adaptações tiveram de ser realizadas. Na metodologia desenvolvida por Moreira et al. (1985), para a determinação de valores de massa específica real com, no mínimo, duas casas decimais, necessitava-se utilizar uma balança semi-analítica ($\pm 0,001$ g) para a determinação da massa e balões volumétricos de capacidade de 10 mL ($\pm 0,04$ mL) que, em geral, comportam de 20 a 100 grãos, conforme o tipo de produto testado. Tendo em vista que para grãos de café o balão volumétrico é inviável, devido ao pequeno diâmetro do seu gargalo, neste trabalho o balão foi substituído por um recipiente de gargalo maior que teve, antes da sua utilização, o volume determinado.

Para determinação da massa específica aparente das amostras de grãos de café, utilizou-se uma balança de peso hectolítrico, com capacidade para um litro, da marca Dallemole. As determinações das massas específicas, real e aparente, foram realizadas em três repetições.

Porosidade

A determinação da porosidade do café foi obtida após as determinações das massas específicas aparente (ρ) e real (ρ_g). A porosidade foi calculada segundo Moreira et al. (1985), pela Eq. (1) mostrada logo abaixo:

$$\Phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_g} \quad (1)$$

em que:

- Φ – porosidade da amostra granular, decimal
- ρ_g – massa específica real, ou densidade de um único grão. Relação entre a massa de um grão e seu volume, kg m^{-3}
- ρ – massa específica aparente, ou densidade de uma massa de grãos. Relação entre a massa de uma

amostra granular e o volume ocupado por ela, kg m^{-3} .

As massas específicas, real e aparente, e porosidade foram obtidas para café em passa a sete teores de umidade (11,0; 13,7; 15,0; 15,2; 25,0; 30,1; 45,0% b.u.) e, para café despulpado, a cinco teores de umidade (14,46; 15,0; 25,5; 34,3; 45,0% b.u.).

Resistência ao fluxo de ar

Nos testes para determinação da resistência do produto ao fluxo de ar, utilizou-se a montagem construída por Afonso (1994), na qual foram realizadas algumas adaptações. Os elementos principais da montagem resultante podem ser visualizados na Figura 1.

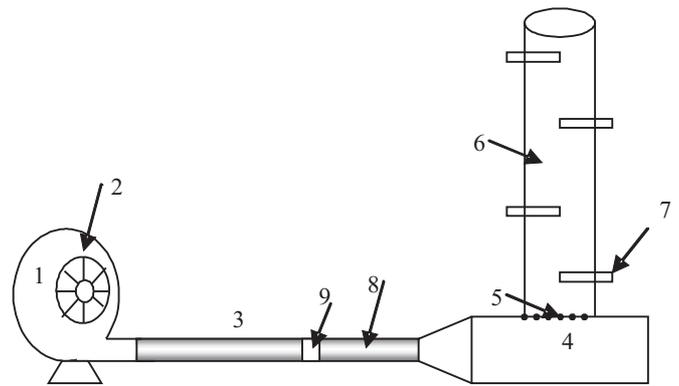


Figura 1. Principais elementos da montagem usada na determinação da resistência do café ao fluxo de ar

- 1 – Ventilador do tipo centrífugo de pás retas – Motor de 0,55 kw a 3460 rpm
- 2 – Diafragma para variação do fluxo de ar na coluna de grãos
- 3 – Tubo de transição (PVC, diâmetro = 98 cm). Função: conduzir o ar insuflado pelo ventilador até o plenum
- 4 – Plenum com função de homogeneizar a pressão
- 5 – Piso perfurado feito com tela fina de malha quadrada sobre uma chapa de aço perfurada ($D = 5$ mm), fixa no fundo da coluna
- 6 – Coluna circular (chapa galvanizada) com altura de 1m e diâmetro de 30,5 cm (seção transversal = $0,0731 \text{ m}^2$)
- 7 – Tomadas de pressão estática: 9 pontos (dispostas em torno da coluna, espaçadas verticalmente 10 cm e uma no plenum)
- 8 – Tomada para leitura do fluxo de ar incidente na coluna e
- 9 – Homogeneizador do fluxo de ar posicionado a 25 cm do ponto de tomada das velocidades do ar.

Para evitar o vazamento de ar, a coluna foi aparafusada ao plenum com uma junta de borracha e vazamentos em outros pontos, foram identificados com espuma de sabão e vedados com gel de silicone adequado.

Procedimento experimental para determinação da resistência ao fluxo de ar

Os testes para determinação da variação da pressão estática na coluna de café (resistência ao fluxo de ar) foram realizados com diferentes produtos, profundidades de leitura de pressão e densidades de fluxo de ar. Um resumo dos valores usados para essas grandezas pode ser visto na Tabela 1.

Em cada teste, o enchimento da coluna de café foi feito com o produto em queda livre de um funil situado a 1 m de altura, a partir do fundo da coluna. Neste procedimento,

Tabela 1. Valores dos parâmetros testados na determinação da resistência de uma coluna de café ao fluxo de ar

Produto	Teor de Umidade (% b.u.)	Profundidade (m)	Densidade de Fluxo ($m^3 s^{-1} m^{-2}$)
Passa	10,3; 23,0; 32,6	0,155; 0,360; 0,560; 0,755; 0,950	0,206; 0,382; 0,402
Despulpado	12,7; 23,5; 22,5; 45,0	0,155; 0,360; 0,460; 0,560; 0,660; 0,755; 0,850; 0,950	0,165; 0,253; 0,263
Cereja	71,8	0,035; 0,135; 0,235; 0,335; 0,430; 0,525; 0,625	0,258; 0,402; 0,413

procurou-se trabalhar com a mesma compactação do produto na coluna. As velocidades do ar foram obtidas com o auxílio de um anemômetro de fio quente, devidamente calibrado, e a equação da continuidade foi usada para calcular as vazões de ar.

A leitura da pressão estática em cada ponto foi feita conforme metodologia descrita por Afonso (1994), utilizando-se de dois manômetros de tubos inclinados, tendo um deles uma resolução 0,2 mm de água e o outro de 0,5 mm de água. O manômetro de resolução 0,2 mm de água foi utilizado para fluxos abaixo de $0,2 m^3 s^{-1} m^{-2}$. Durante as leituras de pressão, somente a tomada de pressão que estava sendo usada permanecia aberta. Para cada combinação de “tipo de café-teor de umidade-densidade de fluxo de ar-profundidade na coluna”, foram realizadas três determinações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Massas específicas, real e aparente, e porosidade

Os valores médios, juntamente com aqueles provenientes das três repetições, obtidos para as massas específicas, real e aparente, e para a porosidade do café em coco (passa) e despulpado a diferentes teores de umidade, são apresentados na Figura 2. Os valores determinados para a massa específica aparente variaram de 389,7 a 609,9 $kg m^{-3}$, para café despulpado, e de 353,1 a 456,0 $kg m^{-3}$, para café passa. A massa específica real do café despulpado variou de 798,1 a 1052,4 $kg m^{-3}$, enquanto a do café passa oscilou de 724,7 a 930,9 $kg m^{-3}$. As porosidades do café despulpado e em passa variaram de 42,0 a 51,1% e de 47,5 a 51,9%, respectivamente. As massas específicas, aparente e real, do café despulpado, crescem linearmente com o teor de umidade do produto; entretanto, existe uma relação quadrática para expressar a

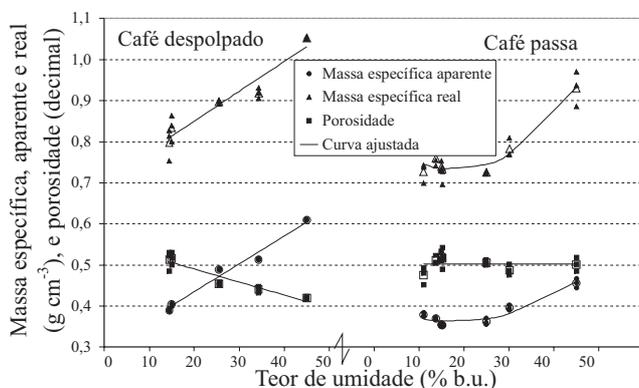


Figura 2. Variação da massa específica ($kg m^{-3}$), real e aparente, e porosidade (decimal) do café, em função do teor de umidade

variação dessas grandezas para o café em passa. Esses valores são semelhantes e apresentam o mesmo comportamento daqueles encontrados por Couto et al. (1999) e Afonso Júnior (2001), para a mesma faixa de umidade. Já a porosidade das amostras diminui com o aumento do teor de umidade do produto, no caso do café despulpado. Comportamentos semelhantes foram encontrados por Chandasekar & Viswanathan (1999), estudando propriedades físicas de café descascado das espécies arábica e robusta, cujos valores de porosidade diminuíram com o aumento do teor de umidade, na faixa de 9,9 a 30,6% b.u. Por outro lado, a porosidade do café em passa parece não variar com o teor de umidade; esses resultados estão de acordo com os encontrados por Couto et al. (1999).

Observa-se, também, para os mesmos valores de umidade, que o café em coco apresenta porosidade superior à café despulpado.

O comportamento dos valores da massa específica, real e aparente, e da porosidade do produto em função do seu teor de umidade, pode ser representado, respectivamente, pelas Eq. (2), (3) e (4), ajustadas (regressão) para o produto despulpado, e (5), (6) e (7), para café em passa. Cada uma das equações é acompanhada do coeficiente de determinação e a faixa de validade de cada uma delas pode ser observada na Tabela 1.

Café despulpado

$$\text{Massa específica aparente: } \rho = 0,007.U + 0,299 \quad (R^2 = 0,98) \quad (2)$$

$$\text{Massa específica real: } \rho_g = 0,007.U + 0,704 \quad (R^2 = 0,94) \quad (3)$$

$$\text{Porosidade: } \Phi = -0,003.U + 0,554 \quad (R^2 = 0,92) \quad (4)$$

Café passa

$$\text{Massa específica aparente: } \rho = 0,0001.U^2 + 0,0046.U + 0,403 \quad (R^2 = 0,93) \quad (5)$$

$$\text{Massa específica real: } \rho_g = 0,0003.U^2 + 0,01.U + 0,821 \quad (R^2 = 0,96) \quad (6)$$

$$\text{Porosidade: } \Phi = 0,50 \quad (\text{constante}) \quad (7)$$

Nota-se, das Eq. (2) a (4) que as massas específicas, real e aparente, e a porosidade do café despulpado, são funções lineares do teor de umidade; à medida que o teor de umidade do produto aumenta, as massas específicas também aumentam e a porosidade diminui; entretanto, não foram satisfatórios os ajustes de funções lineares para representar a relação entre esses três parâmetros para o café coco (passa) e o teor de umidade. Neste caso, a porosidade é praticamente independente do teor de umidade e os valores das massas específicas, aparente e real respondem, de forma quadrática, às alterações no teor de umidade do produto. As equações ajustadas para as massas específicas, aparente e real, apresentam valores mínimos para teores de umidade do produto (passa) iguais a 17,8 e 18,1% b.u., respectivamente.

Resistência ao fluxo de ar

Os valores médios, provenientes de 3 repetições, juntamente com aqueles obtidos nas três determinações, para pressão estática (Pa) em função da profundidade da camada de grãos (m), densidade do fluxo de ar ($m^3 s^{-1} m^{-2}$) e teor de umidade (% b.u.) do café coco (passa) e despulpado, são apresentados nas Figura 3.

O comportamento dos valores da pressão estática (Pa) na coluna de café, em função do teor de umidade (% b.u.), profundidade na coluna (m) e densidade de fluxo ($m^3 s^{-1} m^{-2}$), para o café passa e despulpado, foi obtido a partir do ajuste dos dados experimentais (regressão linear) e as equações resultantes são representadas nesse trabalho, na seguinte forma genérica: $aU + bU^2 + cP + dP^2 + eF + fF^2 + gUF + hFP + iUP + j$ em que, a, b, c, d, e, f, g, h, i e j são os coeficien-

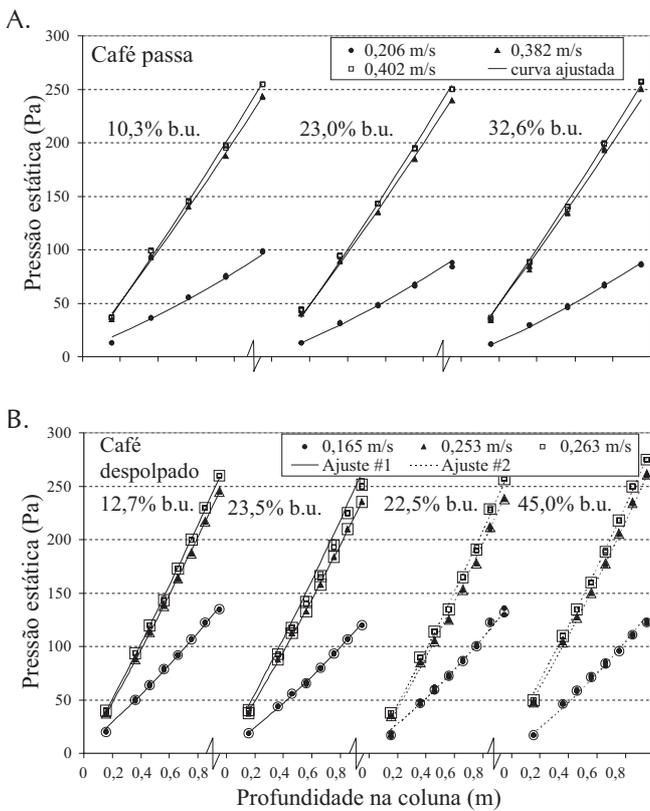


Figura 3. Valores de pressão estática (Pa), em função da profundidade da camada (m) e densidade do fluxo de ar ($m^3 s^{-1} m^{-2}$) para (A) café passa a diferentes teores de umidade e (B) café despulpado, a diferentes teores de umidade, sem impurezas (ajuste#1) e com impurezas (ajuste#2)

tes das regressões e U, F e P representam, teor de umidade, densidade de fluxo e profundidade da camada de café na coluna, respectivamente.

Os coeficientes das equações ajustadas, acompanhados dos respectivos coeficientes de determinação (R^2) encontram-se na Tabela 2.

No caso do café despulpado, testou-se um lote sem impurezas e outro com impurezas. Era de interesse investigar a influência do fator impureza do lote de café despulpado nos valores da pressão estática; entretanto, não se conseguiu retirar as impurezas do café quando este se encontrava a teores de umidade mais altos. Teste de média (Newman Keuls, a 5% de probabilidade) foi utilizada para se comparar as pressões no produto despulpado com impurezas (23,5% b.u.) e sem impurezas (22,5% b.u.); os resultados, porém, mostraram que para uma densidade de fluxo de $0,165 m^3 s^{-1} m^{-2}$ em quase todas as profundidades, as pressões na coluna de café com impurezas foram maiores que aquelas para a coluna sem impurezas; exceção se faz para uma profundidade de 0,155 m, quando as pressões nas duas colunas de café são estatisticamente iguais mas, para densidades de fluxo de 0,25 e $0,26 m^3 s^{-1} m^{-2}$, as pressões nas diferentes profundidades da coluna de café sem impurezas, exceto 0,85 e 0,95 m, foram maiores que na coluna com impurezas; isto não era esperado; entretanto, suspeita-se que as impurezas possam ter bloqueado, de alguma forma, as entradas das tomadas de pressão estática.

Se a equação ajustada para o café passa for usada para estimar os valores das pressões para valores fixos de densidade de fluxo e profundidade de tomada de pressão, observar-se-á que, para cada uma das profundidades e (a) densidades de fluxos iguais a $0,206$ e $0,382 m^3 s^{-1} m^{-2}$, a pressão na camada do produto a 10,3% b.u. será maior que no café a 23,0 e a 32,6% b.u. Por sua vez, a pressão na camada do produto a 23,0% b.u. é maior que no café a 32,6% b.u. e (b) densidade de fluxo igual a $0,402 m^3 s^{-1} m^{-2}$: a pressão na camada do produto a 10,3% b.u. é aproximadamente igual àquela no café a 23,0% b.u.; outrossim, a pressão na camada do produto a 10,3 e 23,0% b.u. é maior que no café a 32,6% b.u.; este mesmo comportamento foi observado por Afonso (1994), estudando gradiente de pressão estática em camadas de frutos de café a diferentes teores de umidade.

As equações ajustadas para o café passa e despulpado (sem impurezas), foram usadas dentro de uma faixa comum de teor de umidade e densidade de fluxo, para se estimar valores de

Tabela 2. Coeficientes das equações quadráticas ($aU + bU^2 + cP + dP^2 + eF + fF^2 + gUF + hFP + iUP + j$) ajustadas para descrever o comportamento da pressão estática em função do teor de umidade (U), profundidade na coluna (P) e densidade do fluxo (F) para o café em coco (passa) e despulpado, com as respectivas faixas de validade.

Produto	Faixa de validade			Coeficientes das equações ajustadas para pressão estática										
	Umidade (% b.u.)	Profundidade (m)	Fluxo ($m^3 s^{-1} m^{-2}$)	a	b	c	d	e	f	g	h	i	J	R ²
Café passa	10,3 - 32,6	0 - 0,95	0,21 - 0,40	-1,12	0,012	-113,82	23,34	547,76	-980,62	1,38	898,44	-	-57,26	0,99
Café despulpado Sem impurezas	12,7 - 23,5	0 - 0,95	0,16 - 0,26	-1,31	-	95,71	27,63	-651,14	1202,38	6,62	1355,89	-1,26	83,23	0,99
Café despulpado Com impurezas	22,5 - 45,0	0 - 0,95	0,16 - 0,26	-2,14	-	-135,05	37,00	1224,67	1984,53	12,02	1409,46	-	158,14	1,00

pressão em função da profundidade da coluna do produto, visando algumas comparações. As faixas de validade, são: de 12,7 a 23,5% b.u., para o teor de umidade, de 0,21 a 0,26 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ para a densidade de fluxo. Valores de pressão estática para alguns teores de umidade e densidades de fluxo de ar pertencentes às faixas comuns para o café passa e despulpado, são apresentados na Figura 4, na qual se observa que a pressão no café despulpado é sempre maior que no passa; isto pode ser explicado pelo valor da porosidade, que é menor no café despulpado, o que implica em um aumento da pressão estática. Para todas as profundidades e para o produto nos três teores de umidade, a pressão no café passa e despulpado aumenta com a densidade do fluxo e, para um teor de umidade, as diferenças nos valores de pressão para café passa e despulpado, tornam-se maiores à medida que a profundidade aumenta; por exemplo, para um teor de umidade de 12,7% b.u., ao se comparar pressões quando os fluxos de 0,21 e 0,26 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ são usados, ter-se-á que os valores de pressão para o café despulpado são 2,33 e 2,75 vezes maiores que aqueles para o produto passa, para as profundidades de 0,115 e 0,95 m, respectivamente.

A variação da pressão com a profundidade da coluna de café e com a densidade do fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$) para o produto cereja, determinada logo após a colheita do produto, quando este se encontrava com teor de umidade de 71,8% b.u., é apresentada na Figura 5, na qual podem ser visualizados os valores médios e os obtidos em cada uma das três determinações.

O comportamento dos valores da pressão estática (Pres-

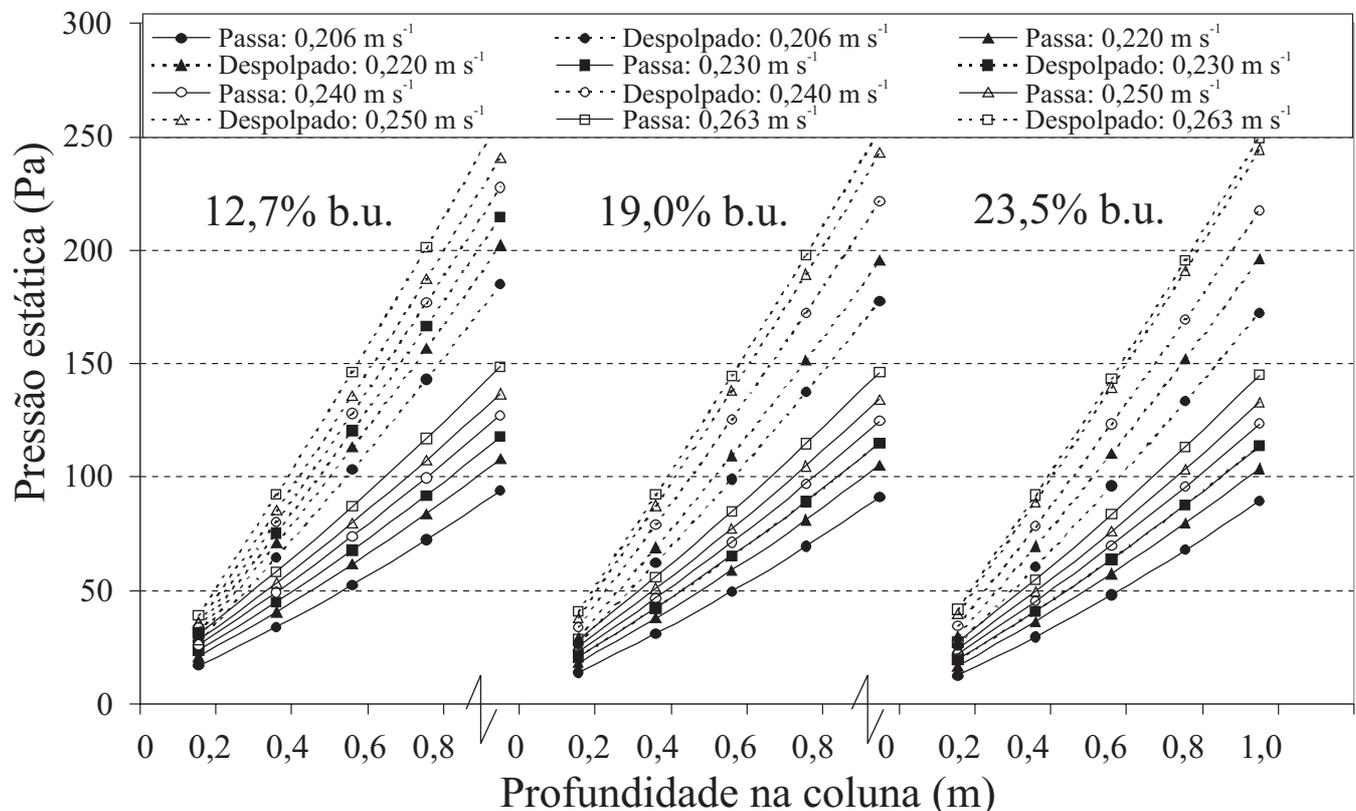


Figura 4. Valores médios da pressão estática, Pa, em função da profundidade das camadas de café (m) para alguns teores de umidade (% b.u.) e densidade de fluxos de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$), pertencentes a um intervalo comum, para o produto passa e despulpado.

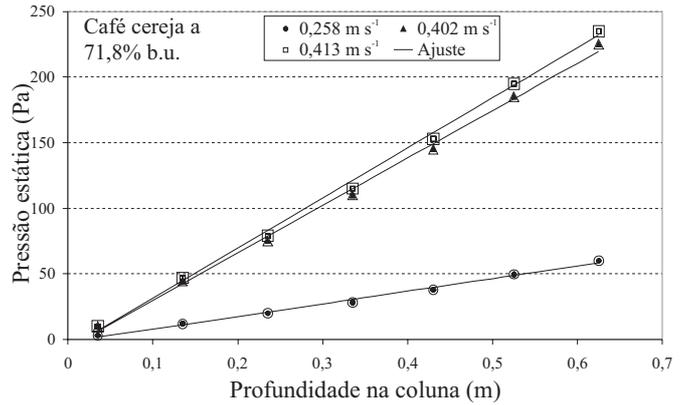


Figura 5. Valores de pressão estática, Pa (três determinações) em função da profundidade da camada de café cereja (m) e densidade do fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$) para o produto, logo após a colheita

são, Pa) na coluna de café cereja em função da profundidade na coluna (P, m) e da densidade de fluxo (F, $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$), pode ser expresso pela Eq. (8), ajustada por meio de análise de regressão linear, que se encontra acompanhada do coeficiente de determinação e de sua faixa de validade.

Café cereja (Faixa de validade: U: 71,80% b.u.; F: 0,26-0,41 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$; P: 0-0,6 m)

$$\text{Pressão} = 6,32 - 378,61.P - 31,16.F + 1840,83.F.P \quad (R^2 = 0,99) \quad (8)$$

Nota-se que a pressão estática na coluna de café cereja aumenta com a densidade de fluxo de ar e com a profundidade na coluna.

Observa-se que em todos os testes a variável densidade do fluxo de ar foi a que mais contribuiu para o aumento da pressão estática ao longo da camada vertical de café. Afonso (1994) estudando gradiente de pressão estática em camadas de frutos de café a diferentes teores de umidade, relatou o mesmo comportamento.

CONCLUSÕES

1. A massa específica real e aparente é função linear do teor de umidade para o café despolpado e função quadrática do teor de umidade para o café coco (passa). Os valores de massa específica real e aparente do café coco, para os mesmos teores de umidade, são inferiores aos do café despolpado; já os valores de porosidade do café coco são superiores àqueles para o café despolpado.

2. A porosidade do café despolpado é função linear do teor de umidade; à medida que o teor de umidade do produto aumenta, a porosidade diminui; enquanto que a porosidade do café coco (passa) é, praticamente, independente do teor de umidade do produto.

3. O comportamento dos valores da pressão estática na coluna de café pode ser expresso por meio de uma função quadrática no teor de umidade, na profundidade da coluna e na densidade do fluxo de ar para o café coco (passa) e por meio de uma função linear da profundidade na coluna e da densidade de fluxo para o café cereja; enquanto para o café despolpado pode ser expresso por uma função linear no teor de umidade e quadrática na profundidade da coluna e na densidade de fluxo.

4. Para todas as profundidades e para o produto nos três teores de umidade, a pressão estática no café passa e despolpado aumenta com a densidade do fluxo e, para um dado teor de umidade, as diferenças nos valores de pressão para café em passa e despolpado se tornam maiores sempre que a profundidade aumenta.

LITERATURA CITADA

Afonso, A. D. L. Gradiente de pressão estática em camadas de fruto de café (*Coffea arabica* L.) com diferentes teores de umidade. Viçosa: UFV, 1994. 68p. Dissertação Mestrado

- Afonso Júnior, P. C. Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento. Viçosa: UFV, 2001. 384p. Tese Doutorado
- Brasil, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Regras para análise de sementes (RAS), Brasília, 1992. 365p.
- Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, F. W.; Haal, C. W. Drying and storage of grains and oilseeds. New York: AVI. 1992. 450p.
- Brusewitz, G. H. Density of rewetted high moisture grains. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.18, n.5, p.935-938, 1975.
- Calderwood, D. L. Resistance to airflow of rough, brown and milled rice. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.16, n.3, p.525-527, 532, 1973.
- Chandrasekar, V.; Viswanathan, R. Physical and thermal properties of coffee. Journal of Agricultural Engineering, n.73, p.227-234, 1999.
- Couto, S. M.; Magalhães, A. C.; Queiroz, D. M.; Bastos, I. T. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.3, n.1, p.61-68, 1999.
- Hall, G. E. Test-weight changes of shelled corn during drying. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.15, n.2, p.320-323, 1972.
- Haque, E.; Ahmed, Y. N.; Doyoe, C. W. Static pressure drop in fixed beds of grain as affected by grain moisture content. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.25, n.4, p.1095-1098, 1982.
- Haque, E.; Foster, G. H.; Chung, D. S. Static pressure drop across a bed of corn mixed with fines. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.21, n.5, p.997-1000, 1978.
- Jayas, D. S. Resistance of bulk canola oilseed to airflow. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1987, 203p. Doctoral Thesis
- Mohsenin, N. N. Physical properties of plant and animal materials. 2.ed. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1978. 742p.
- Moreira, S. M. C.; Chaves, M. A.; Oliveira, L. M. Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, v.9/10, n.1/2, p.22-24, 1985.
- Shedd, C. K. Some new data on resistance of grains to air flow. Journal of Agricultural Engineering, v.32 n.9, p.493-495. 1951.
- Sinha, R. N. Interrelations of physical, chemical and biological variables in the deterioration of stored grains. In: Sinha, R. N.; Muir, W. E. (ed.). Grain storage: part of system. Westport, 1973. p.15-47.