

TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA SECAGEM DE FRUTOS DE CAFÉ**Marilia Assunta Sfredo**

Universidade Federal de Uberlândia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Caixa Postal 593 – 38400-902 – Uberlândia - MG
masfredo@celante.com

José Romário Limaverde

Universidade Federal de Uberlândia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Caixa Postal 593 – 38400-902 – Uberlândia - MG
jrlimaverde@ufu.br

José Roberto Delalibera Finzer

Universidade Federal de Uberlândia e Universidade Regional Integrada – URI – Campus de Erechim – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Caixa Postal 593 – 38400-902 – Uberlândia - MG
jrdfinzer@ufu.br

Resumo. Neste trabalho, efetuou-se a secagem em batelada de frutos de café em secador de bandejas vibradas e em leito fixo. A amplitude e a frequência de vibração foram: $A_x=0,211.10^{-3}m$ e $A_y=0,945.10^{-3}m$; 60Hz. O conjunto completo consiste em um túnel vertical de secagem, no qual foram dispostas duas bandejas de alumínio contendo café para realização da secagem. A umidade inicial dos frutos de café foi aproximadamente 66% (bu) e ao final da secagem 11%. O monitoramento da secagem foi efetuado pela quantificação da massa do conjunto bandeja-café. A partir destes dados obteve-se a cinética de secagem e os coeficientes de calor e massa, além da difusividade efetiva da água no interior dos frutos de café. Em todos os cálculos considerou-se o encolhimento dos frutos de café durante a secagem. A vibração atuou no sentido de aumentar a taxa de secagem, a difusividade efetiva e conseqüentemente a transferência de calor e massa. O tempo de secagem no sistema vibrado e à temperatura dos frutos de 45°C foi aproximadamente 11% menor do que no sistema não vibrado. A difusividade efetiva da água nos frutos de café variou entre $0,1x10^{-10}$ e $1x10^{-10}m^2/s$ (temperatura de 45°C) e entre $0,3x10^{-10}$ e $3x10^{-10}m^2/s$ (temperatura de 60°C).

Palavras chave: café, secagem, vibração, transferência de massa, difusividade efetiva.

1. Introdução

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de melhorar a qualidade dos frutos de café e em atividades relacionadas ao cultivo da planta. Entretanto, são poucas as pesquisas relacionadas ao processamento do produto pós-colheita (secagem dos frutos e torrefação e moagem dos grãos de café), sendo até hoje desenvolvidos de forma empírica, sem uma sólida fundamentação científica (Dutra et al., 1999).

Assim, o Brasil como maior produtor mundial participando com cerca de 25% das exportações, foi reconhecido por muito tempo como um produtor em quantidade, mas não em qualidade, apesar de produzir na região do Triângulo Mineiro o “Café do Cerrado”, considerado por especialistas como um dos melhores cafés do mundo, pelas suas características de aroma e de sabor e pelo excelente equilíbrio entre corpo e acidez. A secagem, a qual precede a operação de colheita, é uma etapa fundamental no processamento de frutos de café. Assim, para obter uma bebida de alta qualidade como a do café tipo *gourmet* é necessário um bom controle das etapas de colheita e secagem, evitando a presença de frutos verdes, a ocorrência de fermentações e altas temperaturas (acima de 45°C) durante o processamento (Camargo e Telles Júnior, 1953; Matiello, 1991).

O uso da vibração mecânica na secagem com o intuito de aperfeiçoar a transferência de calor e massa é um tema de grande interesse na engenharia de processo. A vibração proporciona uma secagem mais uniforme de materiais aglomerantes e a eliminação de zonas mortas no equipamento, resultando em operações mais higiênicas para produtos alimentícios pela redução no risco de crescimento de microrganismos (Finzer e Kieckbush, 1992; Montedo, 1992).

Destacada a relevante importância da secagem no processamento do café e da vibração na operação de secagem, o objetivo deste trabalho foi obter subsídios para promover a melhoria do sabor e aroma de bebidas provenientes de cafés

arábica através de uma secagem controlada dos frutos associada à vibração. Um segundo objetivo deste trabalho foi comparar a secagem dos frutos de café em secador de bandejas vibradas operando em duas temperaturas diferentes: a 45°C (temperatura recomendada pela literatura) e a 60°C (uma condição extrema), quantificando-se os coeficientes convectivos de transferência de calor e de massa e a difusividade efetiva de umidade ao longo de toda secagem.

2. Descrição e operação do secador de bandejas vibradas

A secagem em secadores mecânicos apresenta algumas vantagens em relação à secagem em terreiros (mais utilizada nas fazendas brasileiras): redução do tempo de secagem, diminuição das interferências climáticas na qualidade do café, redução da área dos terreiros e da mão de obra, em contrapartida necessita de maiores gastos com energia e equipamentos (Matiello, 1991). Segundo Vicent (1987), os secadores mais utilizados na secagem de café são os secadores verticais. A Figura (1) apresenta o secador de bandejas vibradas empregado neste trabalho para secar os frutos de café cerejea.

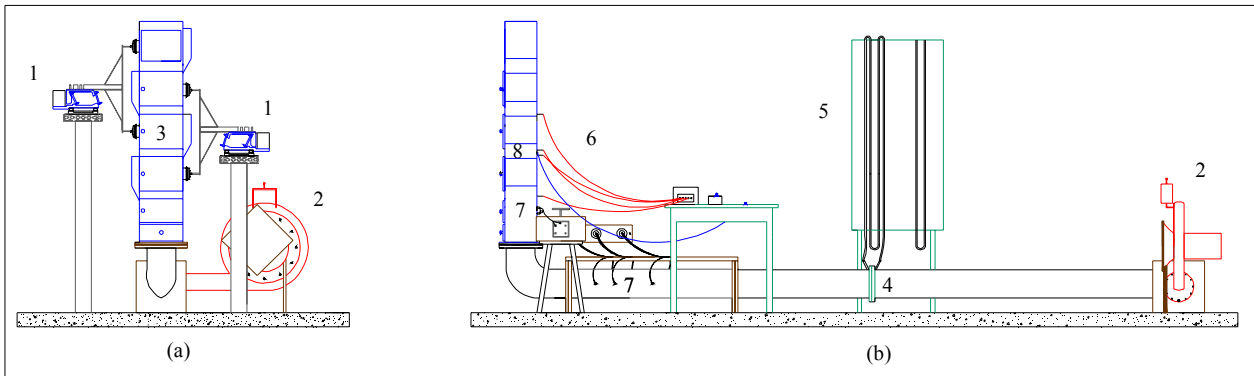


Figura 1 - Vistas frontal (a) e lateral (b) do secador de bandejas (escala 1:55).

1: vibradores; 2: soprador; 3: túnel vertical; 4: medidor de orifício; 5: manômetro; 6: termopares; 7: resistências elétricas para aquecimento do ar; 8: resistência elétrica interna.

O secador é constituído por um túnel vertical (3) com dimensões 0,33m x 0,205m x 1,53m, que comporta duas bandejas em seu interior. As bandejas possuem dimensões 0,245m x 0,160m x 0,180m e consistem em câmaras de alumínio com fundo e tampa formatos por tela de abertura de 4mm, diâmetro do fio de 0,5mm e número de malhas igual a 7, possibilitando o escoamento axial do ar. A distância entre as bandejas no interior do secador é de 0,095m. As bandejas estão dispostas no interior de estruturas de aço-carbono, acopladas, cada uma, a uma haste ligada ao vibrador eletromagnético (1). Os dois vibradores (CE – NE Alimentadores), possuem dial de controle que permite modificar a amplitude vibracional. O ar de secagem, admitido por um soprador (2) com motor de 3 hp e rotação de 3500 rpm, escoava através de uma tubulação com 4,50m de comprimento e 0,20m de diâmetro. No interior do tubo cilíndrico foi instalado um medidor de orifício (4), com manômetro (5) acoplado para medir a vazão de ar alimentado no secador. Próximo à entrada do túnel de secagem, um conjunto de quatro resistências (7) é responsável pelo aquecimento do ar de entrada no secador. Uma das resistências é conectada a um variador de tensão elétrica para permitir o ajuste fino da temperatura e as outras três resistências são conectadas diretamente à rede elétrica (110V e 220V). Entre as duas bandejas foi instalada uma resistência elétrica (8), conectada à rede elétrica (220V) e em série com um variador de tensão para controle da temperatura de reaquecimento do ar, regenerando seu potencial de secagem antes da alimentação da bandeja superior. A temperatura do ar de secagem foi monitorada utilizando-se quatro termopares (6) de cobre-constantan, previamente calibrados, instalados no interior do secador nas posições de entrada e saída de cada bandeja e acoplados a um indicador de temperatura ECIL modelo Jotta Pj-lh. Para medir a temperatura dos grãos de café utilizou-se um calorímetro cilíndrico com diâmetro de 0,03m e altura de 0,05m, contendo um termopar de cobre-constantan previamente calibrado em seu interior. Frutos de café eram introduzidos na câmara, esperava-se alguns segundos até estabilizar a temperatura e efetuava-se a leitura da temperatura dos frutos.

2.1. Determinação dos parâmetros vibracionais

A amplitude de vibração foi determinada utilizando dois acelerômetros, conectados ao suporte de aço-carbono que continha as bandejas, o qual recebia os impulsos vibratórios provenientes do vibrador. Os acelerômetros estavam conectados a dois amplificadores de sinal Brüel & Kjaer, que recebiam os sinais de tensão e os enviavam para um osciloscópio TEKTRONIX TD3340A. A frequência de operação dos vibradores é 60 Hz. A amplitude de vibração foi determinada nas direções x e y. Os sinais enviados do amplificador para o osciloscópio foram medidos em mV, onde cada 100mV corresponde a uma amplitude de 0,1mm (conversão estabelecida no amplificador). As amplitudes médias de vibração para a direção x e y foram: 0,211mm e 0,945mm. Os valores de amplitude média e frequência f (Hz) foram utilizados para o cálculo da aceleração, dada pela Eq. (2) a qual é obtida através da diferenciação da Eq. (1).

$$x = A \sin(\omega t) \tag{1}$$

$$\ddot{x} = -A\omega^2 \sin(\omega t) \tag{2}$$

Nas equações acima A é a amplitude média (m); ω é a frequência angular, $\omega = 2\pi f$; t é o tempo (s). A aceleração vibracional foi utilizada para determinar o adimensional de vibração dado pela Eq. (3), o qual é definido como a razão entre a máxima aceleração vibracional e a aceleração gravitacional. A forma simplificada para cálculo do adimensional de vibração é dada pela Eq. (4) (Thomas et al., 1987; Thomson e Dahleh, 1998).

$$\Gamma = \frac{\text{Max} | -A\omega^2 \sin(\omega t) |}{g} \tag{3}$$

$$\Gamma = \frac{A\omega^2}{g} \tag{4}$$

Os valores de Γ_x e Γ_y calculados pela Eq. (4) são: 3,06 e 13,7 e indicam que a aceleração vibracional é 3,06 e 13,7 vezes maior do que a gravitacional nas direções x e y, respectivamente. A Figura (2) mostra as forças atuando sobre um fruto de café localizado no fundo da bandeja, para o início da secagem. Através dela pode-se perceber a complexidade do sistema e visualizar as diferentes influências atuando sobre ele. As forças são originadas pela ação da gravidade e pelo contato do fruto com um sólido: fruto-bandeja; fruto-fruto. Além das forças, a variação da massa dos frutos ao longo do tempo e o atrito com os frutos vizinhos também têm influência sobre este sistema.

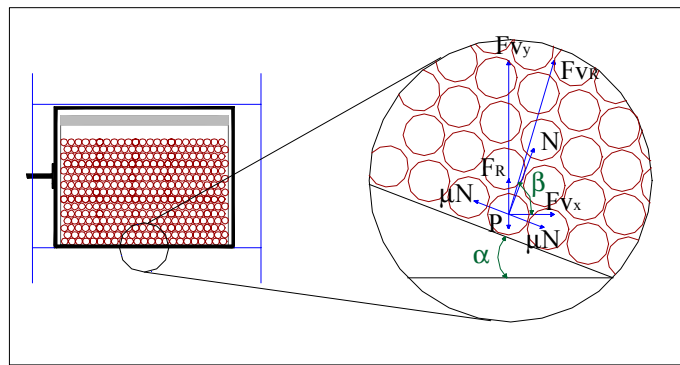


Figura 2 - Forças atuando em um fruto de café localizado no fundo da bandeja.

Conforme a Figura (2), a força vibracional, para um fruto de café de massa média $m = 1,44 \times 10^{-3}$ kg localizado no fundo da bandeja, nas direções x e y é dada por: $F_{vx} = m\ddot{x}$ e $F_{vy} = m\ddot{y}$. A força vibracional resultante é expressa por $F_{VR} = \sqrt{F_{vx}^2 + F_{vy}^2}$ e $P = mg$ fornece a força peso. Os valores para as respectivas forças são: $F_{vx} = 0,0432$ N; $F_{vy} = 0,1934$ N; $F_{VR} = 0,1982$ N; $P = 0,01411$ N. A força resistiva do ar é calculada através da Eq. (5), segundo McCabe et al. (1993).

$$F_R = \frac{C_D v^2 \rho_{ar} A_s}{2} \tag{5}$$

Onde: C_D é o coeficiente de arraste do ar obtido em função do número de Reynolds (para $Re \cong 2440$, $C_D = 0,44$), segundo McCabe et al. (1993); $\rho_{ar} = 0,9833$ kg/m³; $v = 3,84$ m/s; $A_s = 4,7251 \times 10^{-4}$ m², obtendo-se assim uma força resistiva do ar igual a $F_R = 1,5072 \times 10^{-3}$ N. A força normal (N) foi obtida por balanço de forças, considerando que $\Sigma F_y = 0$. Os ângulos α e β são: 2,30° e 74,06°.

O somatório das forças resulta em $N = -0,18025$ N. O valor negativo da força normal indica que no instante em que a partícula recebe o impulso de vibração ela separa-se do fundo da bandeja, assumindo uma trajetória própria e a força necessária para mantê-la junto ao fundo da bandeja possui o mesmo valor em módulo do que a força normal. Este fenômeno em que um leito separa-se do fundo do vaso vibrado assumindo uma trajetória livre foi descrito por Thomas et al. (1987), através da analogia de um corpo plástico. Segundo Thomas et al. (1987) quando a aceleração vibracional excede a aceleração da gravidade, ou seja, $\Gamma > 1$, as partículas dentro de um vaso submetido a uma vibração senoidal externa, saltam irregularmente e suas trajetórias são simplesmente aquelas das partículas individuais, atuando independentemente uma das outras. Estas partículas também colidem com a base do vaso e uma com as outras. As partículas que estão sob uma camada de seis partículas movem-se como uma massa e sendo assim, o leito periodicamente decola da base do vaso e colide com a mesma durante um ciclo.

3. Secagem dos frutos de café

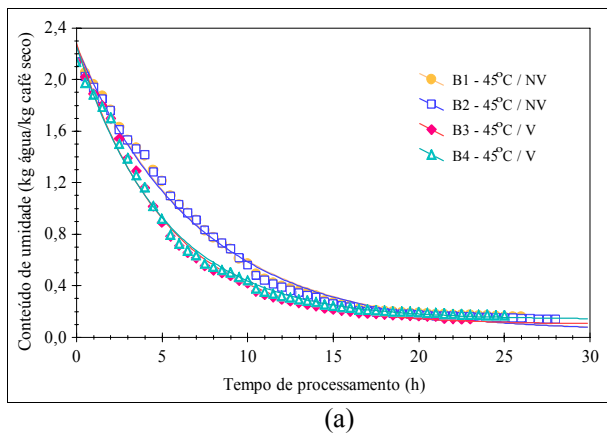
As etapas do processamento dos frutos de café anteriores à secagem são a colheita e a seleção. Os frutos foram colhidos “a dedo”, como recomenda Barca (1998), onde somente os frutos maduros foram retirados do cafeeiro. A colheita foi realizada em duas etapas, estabelecendo-se o intervalo de uma semana entre as duas. A primeira colheita forneceu a matéria prima para os Ensaios 1 e 2 e a segunda para os Ensaios 3 e 4. O café arábica, variedade Catuaí, foi colhido na Fazenda Santa Terezinha, no município de Araguari, localizado no Cerrado Mineiro, que segundo Cardoso (2001), é uma das três regiões no Brasil, onde se encontram os melhores cafés para produção de café *gourmet*. Após a colheita realizaram-se as etapas de lavagem e retirada das impurezas (folhas, paus, frutos verdes e em estado de maturação avançado). As principais características dos frutos de café cereja e do leite são: densidade aparente, $\rho_a=668,5 \text{ kg/m}^3$; densidade absoluta, $\rho_{abs}=1079,5 \text{ kg/m}^3$; porosidade do leite, $\varepsilon = 0,38$. A secagem dos frutos de café foi efetuada em quatro ensaios nos quais duas variáveis foram modificadas: vibração das bandejas e temperatura dos frutos de café, indicadas na Tabela (1).

Tabela 1. Variáveis modificadas durante os ensaios de secagem.

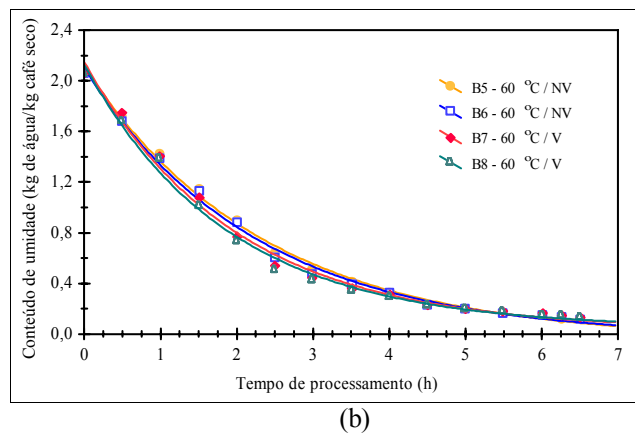
Ensaio	Bandejas	T (°C)	Vibração*			
			$A \times 10^3 \text{ (m)}$		Γ	
			x	y	x	y
1	1 e 2	45	-	-	-	-
2	3 e 4	45	0,211	0,945	3,06	13,70
3	5 e 6	60	-	-	-	-
4	7 e 8	60	0,211	0,945	3,06	13,70

*Não existindo carga sobre as bandejas.

Como mostra a Tabela (1), em cada ensaio foram processados frutos de café em duas bandejas. Os Ensaios 1 e 2 foram realizados conjuntamente, alternando-se os experimentos de duas em duas horas (as bandejas 1 e 2 eram mantidas em repouso enquanto as bandejas 3 e 4 eram admitidas no secador). As bandejas 1 e 2 (Ensaio 1) foram inseridas no secador, nas posições superior e inferior, respectivamente, e a cada 30 min tiveram suas posições invertidas, sendo que o ciclo de inversões completava-se em duas horas de secagem. Então as bandejas 3 e 4 (Ensaio 2) iniciavam seu período de secagem obedecendo a mesma metodologia adotada para o Ensaio 1, porém operando com as bandejas vibradas. A cada inversão das bandejas eram realizadas as seguintes medidas: massa de café úmido em cada bandeja (kg café úmido), temperatura dos frutos (°C), temperatura do ar de secagem na entrada e na saída das bandejas (°C) e temperatura de bulbo seco e bulbo úmido (°C). A secagem era finalizada quando a massa de café atingia aproximadamente 12% de umidade (base úmida), recomendada por Matiello (1991). As curvas de secagem dos frutos de café são mostradas na Figura (3).



(a)



(b)

Figura (3a) Curva de secagem para os Ensaios 1 e 2. Figura (3b) Curva de secagem para os Ensaios 3 e 4.

A Eq. (7) consiste em uma equação genérica para ajuste dos pontos experimentais de cada uma das curvas de secagem, sendo os parâmetros “a”, “b” e “c” indicados na Tabela (2). Para todas as equações o segundo número indica a bandeja a qual a curva se refere, por exemplo, 7.1 refere-se à Eq. (6) para a bandeja 1. Na Eq. (6) X é o conteúdo de umidade em base seca (kg água/kg café seco) e t é o tempo em segundos.

$$X = a + be^{\left(\frac{-t}{c}\right)} \tag{6}$$

Tabela 2. Parâmetros para as equações de ajuste das curvas de secagem (I.C. = 95%).

Eq.	r ²	a	b	c
6.1	0,994219	0,046739	2,221321	25602,867
6.2	0,993368	0,046138	2,210744	25494,264
6.3	0,993786	0,099850	2,178382	18514,288
6.4	0,994615	0,139282	2,115661	18342,204
6.5	0,996227	-0,048650	2,161415	8452,621
6.6	0,996334	-0,025038	2,125819	8085,815
6.7	0,992692	0,029818	2,118560	7108,204
6.8	0,993536	0,046683	2,080587	6784,927

I.C.: intervalo de confiança; r²: coeficiente de correlação.

Analisando as curvas da Figura (3a), verifica-se que as curvas referentes às bandejas 1 e 2, praticamente são coincidentes, assim como as curvas das bandejas 3 e 4. Com relação à aplicação de vibração (Ensaio 2), observa-se que esta atuou no sentido de diminuir o tempo de secagem. Ao final da secagem, 27 horas, o conteúdo de umidade média das bandejas 1 e 2, foi de 13,2%(bu). Com 24 horas de secagem, para as bandejas 3 e 4, a umidade média foi de 13,0%(bu). O término da secagem pode ocorrer quando os frutos de café atingirem 13,0 a 13,5% de umidade, pois o café perde, posteriormente mais de 1 a 2% de umidade para o ambiente, durante o armazenamento (Matiello, 1991). Assim, a vibração possibilitou que a secagem ocorresse com uma defasagem de 3 horas em relação ao sistema não vibrado. As curvas de secagem apresentadas na Figura (3b) mostraram pequena defasagem, para os sistemas vibrados e não vibrados, para um tempo total de secagem de 6,5 horas, isto é, a operação a maior temperatura atenuou a influência da vibração no tempo de secagem. As umidades médias finais foram: 11,6% (vibrado) e 12,3% (não vibrado).

3.1 Cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor

Para o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor foram utilizadas as Equações (7) e (8), que fornecem o fluxo de calor no sistema (Nonhebel e Moss, 1971). A combinação destas duas equações resulta na Eq. (9), onde dX/dt é a taxa de secagem (kg água/kg café seco.s); S é a massa de café seco (kg) dada na Tabela (3); λ é a entalpia da água na temperatura do fruto (kJ/kg água) (ASHRAE, 1985); T_{ar} e T_{fc} são a temperatura média do ar (K) e a temperatura dos frutos (K), respectivamente; A_s é a área superficial dos frutos de café (m²), a qual varia em função do conteúdo de umidade dos mesmos. Banzatto (2000) estudou o encolhimento dos frutos de café durante a secagem e apresentou a Eq. (10) que expressa a área específica dos frutos de café (A') em g/cm² em função do conteúdo de umidade (X), possibilitando o cálculo da área superficial dos frutos de café (A_s) em m² pela Eq. (11), onde H é a massa de café úmido ao longo de toda secagem dada pela Eq. (12). Os parâmetros "a", "b" e "c" estão indicados na Tabela (3). A Tabela (4) apresenta a massa de café seco para cada ensaio realizado e a umidade inicial desta massa de café.

$$q=h(T_{ar}-T_{fc}) \tag{7}$$

$$q=\frac{-dX}{dt}\left(\frac{S\lambda}{A_s}\right) \tag{8}$$

$$h=\frac{\left(\frac{-dX}{dt}\right)S\lambda}{A_s(T_{ar}-T_{fc})} \tag{9}$$

$$A'=6,86(0,45X+0,13)^{0,45} \tag{10}$$

$$A_s=\frac{A'H}{10} \tag{11}$$

$$H=a+bc^{\left(\frac{-1}{c}\right)} \tag{12}$$

Tabela 4. Massa de sólido seco e conteúdo de umidade inicial dos frutos de café em cada bandeja.

Bandejas	1	2	3	4	5	6	7	8
S (kg café seco)	1,07974	1,17878	1,08430	1,13578	1,03018	1,02743	1,02929	1,02956
X ₀ (kg água/ kg café seco)	2,13687	2,13687	2,13687	2,13687	2,05879	2,05879	2,05879	2,05879

Tabela 3. Parâmetros para a Eq. (12) obtidos a partir do ajuste dos dados experimentais de massa de café (I.C. = 95%).

Eq.	r^2	a	b	c
12.1	0,994442	1125,8173	2401,5261	25717,361
12.2	0,993589	1228,7849	2609,0176	25600,095
12.3	0,993845	1190,4570	2363,2148	18561,158
12.4	0,994720	1290,1746	2404,9795	18427,032
12.5	0,996292	977,3350	2228,9141	8474,660
12.6	0,996334	999,0753	2186,2990	8085,815
12.7	0,992763	1057,8463	2182,3431	7124,282
12.8	0,993598	1075,6261	2143,6577	6799,872

As Figuras (4) e (5) apresentam a temperatura média do ar de secagem e a temperatura dos frutos de café em função do conteúdo de umidade dos frutos de café ao longo de toda a operação de secagem.

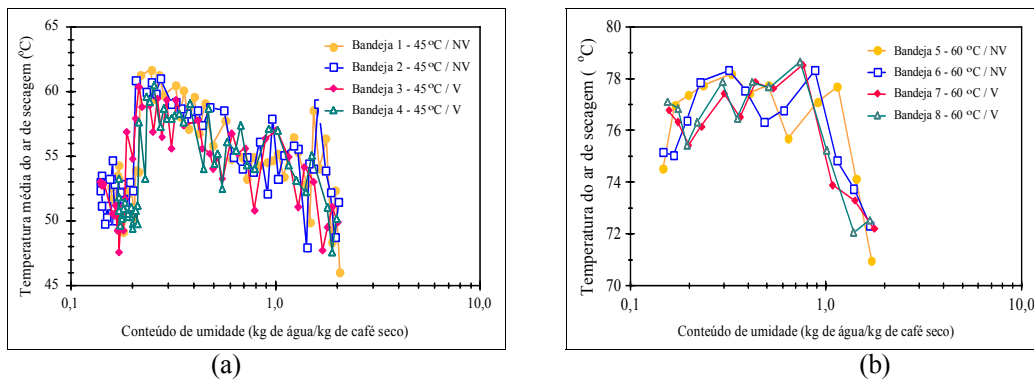


Figura (4a) Temperatura média do ar para os Ensaios 1 e 2. Figura (4b) Temperatura média do ar para os Ensaios 3 e 4.

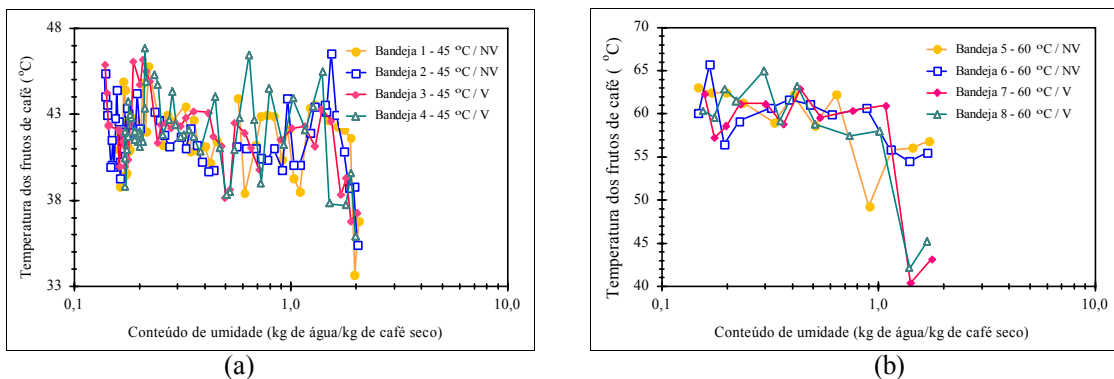


Figura (5a) Temperatura dos frutos para os Ensaios 1 e 2. Figura (5b) Temperatura dos frutos para os Ensaios 3 e 4.

Com a resolução da Eq. (9), obtém-se o coeficiente convectivo de transferência de calor. Os resultados calculados para os pontos experimentais da curva de secagem são apresentados na Figura (6).

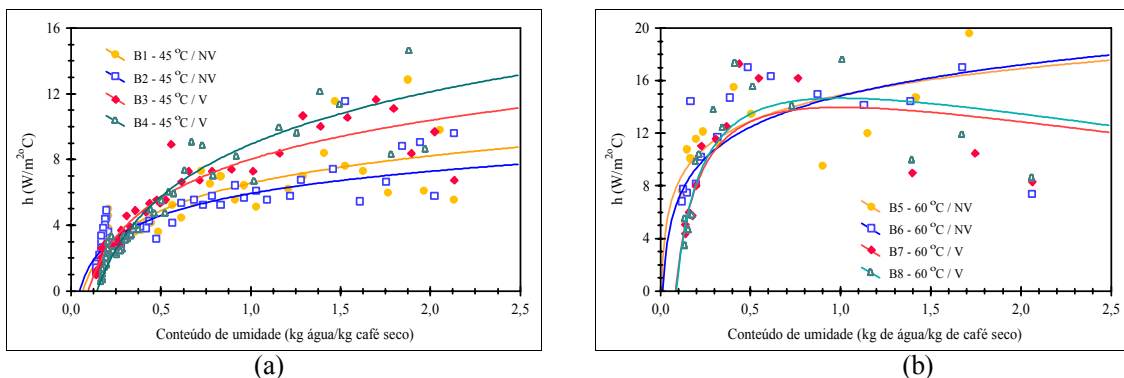


Figura (6a) Transferência de calor para os Ensaios 1 e 2. Figura (6b) Transferência de calor para os Ensaios 3 e 4.

As Equações (13) e (14) representam as curvas do coeficiente convectivo de transferência de calor em função do conteúdo de umidade. Os parâmetros estão relacionados na Tabela (5). Para todas as equações o segundo número indica a bandeja a qual a curva se refere, por exemplo, 13.1 refere-se à Eq. (13) para a bandeja 1.

$$h=a+b(\ln X) \tag{13}$$

$$h=a+b(\ln X^2) \tag{14}$$

Tabela 5. Parâmetros para as equações de ajuste das curvas do coeficiente de transferência de calor (I.C.=95%).

Equações	r ²	a	b
13.1	0,722892	6,560828	2,404046
13.2	0,807100	5,937578	1,943370
13.3	0,906186	8,023593	3,408223
13.4	0,898624	8,932986	4,604537
13.5	0,722306	14,912803	2,884940
13.6	0,871127	14,836216	3,409708
13.7	0,600458	13,976096	-2,294426
13.8	0,653016	14,670817	-2,490465

Os resultados dos coeficientes de transferência de calor, apresentados na Figura 6, para as temperaturas dos frutos de café de 45 e 60°C, com e sem vibração, indicam que na secagem a menor temperatura fica bem destacada a influência da vibração sobre o coeficiente de transferência de calor. Nas etapas mais avançadas de secagem, quando a resistência interna à transferência de massa passa a dominar o processo de secagem, as quatro curvas se aproximam em torno de uma região única. Isto também acontece para a secagem de cubos de batatas com 10x10⁻³m de aresta (Finzer e Kieckbush, 1992). Ao efetuar a secagem na temperatura do fruto de 60°C (Figura (6b)), observa-se que não houve influência da vibração no sentido de aumentar o coeficiente de transferência de calor indicando que uma difusão mais intensa de solúveis no início da secagem no sistema vibrado, seguida de uma secagem rápida destas substâncias, pode ter provocado a formação de uma camada menos permeável à umidade (“*case harding*”).

3.2 Cálculo da umidade de equilíbrio entre os frutos de café e o ar de secagem

A umidade de equilíbrio (X_{eq}) entre o fruto e o ar de secagem é expressa pela Eq. (15), a qual é uma equação de ajuste dos dados experimentais de umidade de equilíbrio em função do potencial de adsorção (coeficiente de correlação r²=0,999346), determinados por Linhares (1997). O potencial de adsorção (Ad), expresso em J/kg água foi calculado através da Eq. (16), de acordo com Ono e Yoshida (1985).

$$X_{eq}=0,2885072+4,97 \times 10^{-5} (Ad)^{0,5} \ln (Ad)-0,001041(Ad)^{0,5} + \frac{69017037}{Ad^2} \tag{15}$$

$$Ad = \frac{R}{n} T_{ar} \ln \left(\frac{1}{\varphi_m} \right) \tag{16}$$

Na Eq. (16), n é a massa molecular da água (18,0148x10⁻³ kg/mol); R é a constante dos gases ideais (8,314 J/molK); T_{ar} é a temperatura média do ar (K); φ_m é a umidade relativa média do ar dada pela Eq. (17), onde φ_e e φ_s são as umidades relativas do ar na entrada e na saída das bandejas. A umidade relativa do ar na entrada da bandeja foi determinada pela Eq. (18) onde p_s é a pressão parcial (kPa) do vapor de água no ar na condição de saturação, obtida através da tabela de propriedades termodinâmicas do ar úmido saturado (ASHRAE, 1985) na temperatura do ar de secagem na entrada da bandeja e p_v é a pressão parcial (kPa) do vapor de água no ar e foi determinada pela Eq. (19), onde P é a pressão atmosférica de Uberlândia (93,03 kPa) e Y_e é a umidade absoluta do ar de secagem na entrada das bandejas (kg água/kg ar seco), obtida pela Eq. (20). Nesta equação T_w e T_d são as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco (K) e Y_w é a umidade absoluta (kg água/ kg ar seco) do ar de secagem na temperatura de bulbo úmido obtida através da Eq. (21), onde p_w é a pressão parcial (kPa) do vapor de água no ar na temperatura de bulbo úmido, calculada através da equação de Antoine segundo Walas (1985).

$$\varphi_m = \frac{\varphi_e + \varphi_s}{2} \tag{17}$$

$$\varphi_e = \frac{p_{v_e}}{p_{s_e}} \tag{18}$$

$$Y_e = 0,62198 \left(\frac{pv_e}{P-pv_e} \right) \quad (19)$$

$$Y_e = \frac{2501 - (2,381T_w)Y_w - (T_d - T_w)}{2501 + 1,805T_d - 4,186T_w} \quad (20)$$

$$Y_w = 0,62198 \left(\frac{pw_e}{P-pw_e} \right) \quad (21)$$

A umidade relativa do ar na saída da bandeja, necessária para o cálculo da umidade relativa média do ar de secagem (Eq. 17) foi obtida pela Eq. (22), onde ps_s é a pressão parcial (kPa) do vapor de água no ar na condição de saturação, obtida através da tabela de propriedades termodinâmicas do ar úmido saturado (ASHRAE, 1985) na temperatura do ar de secagem na saída da bandeja e pv_s é a pressão parcial do vapor de água no ar e foi determinada pela Eq. (23), onde P é a pressão atmosférica de Uberlândia (93,03 kPa) e Y_s é a umidade absoluta (kg água/ kg ar seco) do ar de secagem na saída das bandejas (kg água/kg ar seco), obtida pela Eq. (24), onde Q é a vazão de ar no secador ($Q=0,1325$ kg ar/s).

$$\phi_s = \frac{pv_s}{ps_s} \quad (22)$$

$$Y_s = 0,62198 \left(\frac{pv_s}{P-pv_s} \right) \quad (23)$$

$$Y_s = Y_e + \left(\frac{-dX}{dt} \right) S \left(\frac{Y_e + 1}{Q} \right) \quad (24)$$

Com o cálculo da umidade de equilíbrio entre o ar de secagem e o fruto de café (Eq. 15) pode-se obter o adimensional de umidade, dado pela Eq. (25), onde X_o é a umidade inicial dos frutos de café em base seca (ver Tabela (4)). Os resultados estão mostrados na Figura (7).

$$X^o = \frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} \quad (25)$$

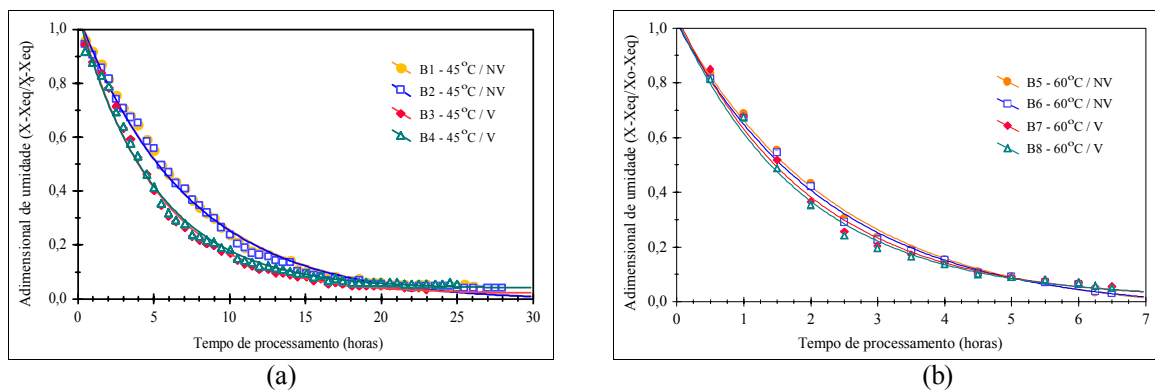


Figura (7a) – Umidade adimensional para os Ensaios 1 e 2. Figura (7b) – Umidade adimensional para os Ensaios 3 e 4.

3.3 Cálculo do coeficiente de transferência de massa

A Eq. (26) fornece o coeficiente de transferência de massa em função da taxa de secagem (dX/dt), da massa de café seco (S), da área superficial dos frutos (A_s) e da diferença entre a umidade absoluta do ar na superfície do café (Y_{sup}) e da umidade absoluta do ar de secagem (Y_{ar}). O coeficiente de transferência de massa pode também ser obtido pela Eq. (27), dividindo-se a Eq. (9) pela Eq. (26).

$$k_y = \frac{\left(\frac{-dX}{dt} \right) S}{A_s (Y_{sup} - Y_{ar})} \quad (26)$$

$$k_Y = \frac{h(T_{ar} - T_{fc})}{\lambda(Y_{sup} - Y_{ar})} \quad (27)$$

A umidade absoluta do ar (Y_{ar}) é obtida através da média aritmética da umidade absoluta de entrada e de saída das bandejas, calculadas anteriormente pelas Eq. (20) e (24). A umidade absoluta na superfície do fruto de café (Y_{sup}), onde ocorre a transferência de massa, é dada pela Eq. (28), onde a pressão parcial do vapor de água no ar na superfície do fruto (pv) é obtida através da Eq. (29), substituindo-se a umidade relativa média do ar, a qual é calculada pela Eq. (30). Os valores do potencial de adsorção na superfície dos frutos de café (Ad_{fc}) são calculados substituindo-se os valores de umidade de equilíbrio (X_{eq}) da Eq. (15) pelos valores de umidade X (bs) (admite-se que o conteúdo de umidade na superfície do fruto é igual ao conteúdo de umidade média do fruto, consideração adotada também por Moreira et al. (1998)), como mostra a Eq. (31), cuja solução é dada pelo método de Newton-Rhapson.

$$Y_{sup} = 0,62198 \left(\frac{pv}{P-pv} \right) \quad (28)$$

$$pv = \phi_{sup} p_s \quad (29)$$

$$Ad_{fc} = \frac{R}{n} T_{fc} \ln \left(\frac{1}{\phi_{sup}} \right) \quad (30)$$

$$X = a + b(Ad_{fc})^{0,5} \ln(Ad_{fc}) + c(Ad_{fc})^{0,5} + \frac{d}{Ad_{fc}^2} \quad (31)$$

A Figura (8) apresenta os resultados calculados para o coeficiente de transferência de massa em função do conteúdo de umidade, ao longo de todo processo de secagem.

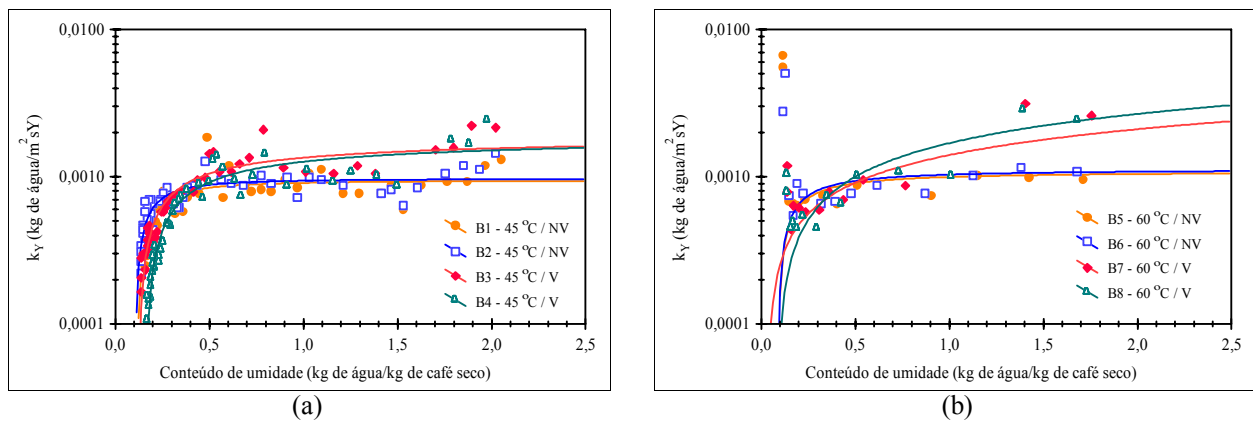


Figura (8a) Coeficiente de transferência de massa para os Ensaios 1 e 2. Figura (8b) Coeficiente de transferência de massa em função do conteúdo de umidade para os Ensaios 3 e 4.

Tanto para a operação à temperatura de 45°C como à 60°C os coeficientes de transferência de massa foram maiores no sistema vibrado do que os coeficientes no sistema não vibrado (ver Figura 8), até uma umidade dos frutos de aproximadamente 0,4 kg água/kg café seco. Nas etapas finais de secagem o coeficiente de transferência de massa foi menor para os ensaios realizados à temperatura de 45°C (vibrado e não vibrado), o que reflete a maior influência da resistência interna à transferência de massa ao operar em menor temperatura.

As Equações (32), (33) e (34) representam as curvas do coeficiente de transferência de massa em função do conteúdo de umidade. Os parâmetros estão relacionados na Tabela (6). Para todas as equações o segundo número indica a bandeja a qual a curva se refere, por exemplo, 32.1 refere-se à Eq. (32) para a bandeja 1.

$$k_Y = a + \frac{b}{X^{1,5}} \quad (32)$$

$$k_Y = a + \frac{b}{X^{0,5}} \quad (33)$$

$$k_Y = a + bX^{0,5} \quad (34)$$

Tabela 6. Parâmetros para as equações de ajuste das curvas do coeficiente de transferência de massa (I.C.=95%).

Equação	r ²	a	b
33.1	0,6988	0,00094593	-3,703x10 ⁻⁵
33.2	0,7114	0,00097198	-3,221x10 ⁻⁵
34.3	0,8256	0,00206544	-0,0007178
34.4	0,8182	0,00210401	-0,0008387
34.5	0,7284	0,00109038	-0,0001873
34.6	0,4851	0,00113032	-0,0001930
35.7	0,6936	-0,0002845	0,00168985
35.8	0,8133	-0,0006741	0,00236705

3.4 Cálculo da difusividade efetiva de umidade

A equação da difusão para coeficiente de difusão constante e para uma partícula esférica em que o transporte difusivo ocorre apenas na direção radial é dada pela Eq. (35). Considerando que a esfera apresenta inicialmente uma distribuição de umidade uniforme (X_o) e uma condição superficial expressa pela Eq. (36), onde D é o coeficiente de difusão (m²/s), a solução analítica é mostrada na Eq. (37). Nesta equação Bi é o número de Biot expresso pela Eq. (38); R é a posição radial (m), β_n são as raízes da Eq. (39) (Crank, 1975). Na Eq. (37) r é o raio da esfera de mesmo volume do fruto de café calculado pela Eq. (40), a qual é resultante do ajuste do raio da partícula em função do conteúdo de umidade. O raio foi calculado a partir de dados experimentais das três dimensões de frutos de café (formato de elipse) ao longo da secagem, determinados por Banzatto (2000). Com as dimensões do café foi possível calcular o volume da elipse e iguala-lo ao volume da esfera (4πr³/3) obtendo-se o raio da esfera de mesmo volume do fruto de café. Esta consideração foi adotada também por Bichsel (1979), para o cálculo da difusividade da cafeína durante sua extração.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 X}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial X}{\partial R} \right) \tag{35}$$

$$-D \frac{\partial X}{\partial R} = \alpha (X - X_{eq}) \tag{36}$$

$$\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \frac{2Bi}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-D\beta_n^2 t / r^2}}{\{\beta_n^2 + Bi(Bi - 1)\}} \frac{\text{sen}\beta_n R / r}{\text{sen}\beta_n} \tag{37}$$

$$Bi = \frac{r\alpha}{D} \tag{38}$$

$$\beta_n \cot\beta_n + Bi - 1 = 0 \tag{39}$$

$$r = 0,006351 - \frac{0,001249}{\left[1 + e^{(18,127700X - 12,106992)} \right]^{0,065296}} \tag{40}$$

A Eq. (41) fornece a quantidade total de substância entrando ou saindo da esfera.

$$\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6Bi^2 e^{-\beta_n^2 Dt / r^2}}{\beta_n^2 \{\beta_n^2 + Bi(Bi - 1)\}} \tag{41}$$

Admitindo-se que a resistência externa à transferência de massa possa ser desprezível devido a alta velocidade do ar empregada na secagem (3,47 m/s), o número de Biot tende ao infinito e as raízes da Eq. (39) são dadas por nπ. Assim a Eq. (41) pode ser simplificada obtendo-se a Eq. (42) para o cálculo da difusividade efetiva da água no interior dos frutos de café (D_{ef}) em m²/s. Esta equação é empregada em vários trabalhos, como por exemplo: secagem para obtenção de pó de beterraba (Sobreira et al., 2000); secagem de grãos de soja (Souza et al., 2000), na secagem de urucum (Silva e Alsina, 1993) e na extração da cafeína do café verde para produção de café descafeinado (Bichsel, 1979).

$$\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t}{r^2}} \tag{42}$$

A Eq. (42) foi resolvida para cálculo do coeficiente de difusão efetivo utilizando-se $n=6$. Os dados calculados estão apresentados na Figura (9).

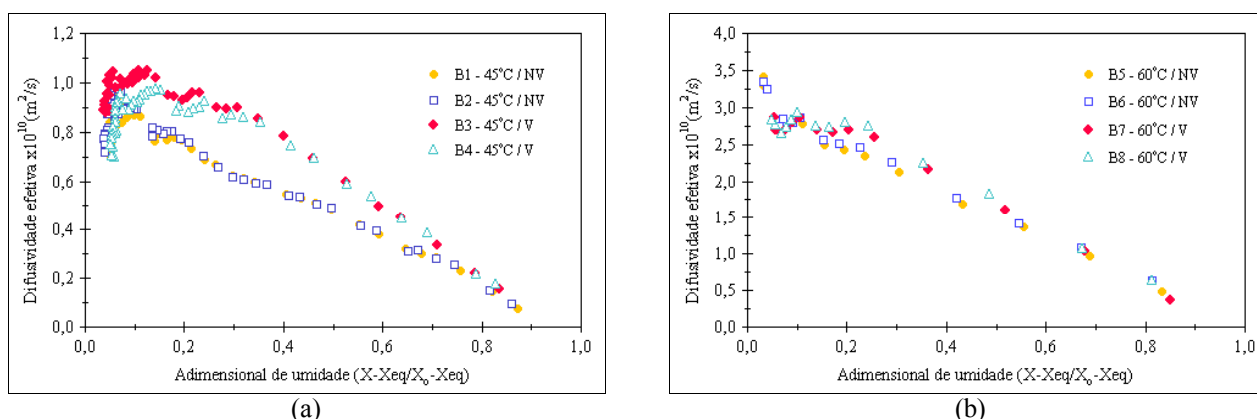


Figura (9a) – Difusividade efetiva para os Ensaios 1 e 2. Figura (9b) – Difusividade efetiva para os Ensaios 3 e 4.

A Figura (9a) mostra que o coeficiente de difusão efetivo aumenta inicialmente com a diminuição da umidade do fruto de café e altera esse comportamento (diminui com a diminuição da umidade) quando a massa de café atinge aproximadamente 0,4 kg água/kg café seco. Esta umidade coincide com a condição em que os frutos de café praticamente cessam o encolhimento. Este comportamento também foi observado na secagem de músculos de peixe, por Pinto e Tobinaga (1993) que observaram a influência do encolhimento na difusividade efetiva. Para os ensaios realizados à temperatura de 45°C a vibração aumentou o transporte difusivo nos frutos de café, favorecendo a secagem. Já para a secagem à temperatura dos frutos de café de 60°C (Figura (9b)) a vibração não foi relevante indicando que o efeito do aumento da temperatura se sobrepôs ao efeito da vibração, aumentando a difusividade efetiva da água nos frutos de café.

4. Conclusões

Quanto a atuação da vibração na secagem dos frutos de café pode-se concluir que ela diminui o tempo de secagem e aumenta a transferência de calor apenas para os ensaios realizados à temperatura dos frutos de 45°C. A vibração melhora a transferência de massa e aumenta a difusividade efetiva da água nos frutos de café até o conteúdo de umidade de aproximadamente 0,4 kg água/kg café seco, em todos os ensaios. Essa condição de umidade coincide com o período em que os frutos cessam o encolhimento e a resistência interna à transferência de massa passa a dominar o transporte de umidade.

Quanto ao efeito da temperatura pode-se concluir que a temperatura mais elevada (60°C) diminui o tempo de secagem (aproximadamente 18 horas a menos), aumenta os coeficientes de transferência de calor e massa e a difusividade efetiva, tornando menos relevante o efeito da vibração na secagem dos frutos de café. Entretanto o café processado à altas temperaturas apresenta qualidades físicas e organolépticas inferiores aos cafés processados à temperatura de 45°C, prejudicando sua comercialização e degustação. A qualidade organoléptica dos cafés processados será apresentada em uma publicação futura.

5. Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio do CNPq, Processo 520980/95-6(NV).

6. Referências

- ASHRAE, 1985, "Fundamentals", ASHRAE Handbook, Atlanta.
- Banzatto, L. L., 2000, "Secador de Bandejas Vibradas: Controle do Escoamento dos Sólidos e Regeneração do Potencial do Ar de Secagem", Dissertação de Mestrado, Uberlândia, 90p.
- Barca, A. A. L., 1998, "Classificação de Café", 71p.
- Bichsel, B., 1979, "Diffusion Phenomena During the Decaffeination of Coffee Beans", *Fd. Chem.*, No. 4, pp. 53-62.
- Camargo, R. e Telles Jr., A.Q., 1953, "O Café no Brasil: sua Aclimação e Industrialização", *Série de Estudos Brasileiros*, Vol. 2, No. 4, Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, pp. 541-569.
- Cardoso, D., 2001, "Ascensão dos Cafés Tipo Gourmet", *Gazeta Mercantil*, B-4p.
- Crank, J., 1975, "The Mathematics of Diffusion", 2ª Ed., Ed. Clarendon Press-Oxford, London, 414p.
- Dutra, E. R., Oliveira, L. S. e Afonso, R. J. C. F., 1999, "Estudo do Processo Convencional de Torrefação de Café". In: *Anais da 6ª Jornada de Engenharia Química, UFU e UFMG, Uberlândia*, pp.151-154.

- Finzer, J.R.D. & Kieckbush, T.G., 1992, "Secagem em Sistemas com Vibração", In: Freire, J.T. e Sartori, D.J.M. Tópicos Especiais em Secagem, Vol. 1, Ed. UFSCar, São Carlos, pp. 87-127.
- Linhares, D.O., 1997, "Influência do Conteúdo de Umidade na Preservação de Grãos de Café", Relatório de IC, Universidade Federal de Uberlândia, 1997. 72p.
- Matiello, J.B., 1991, "O Café do Cultivo ao Consumo". São Paulo: Ed. Globo, 320p.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P., 1993, "Unit Operations of Chemical Engineering", 5ª Ed, Ed. McGraw-Hill, New York, 1130p.
- Montedo, O.R.K., 1992, "Coeficiente de Transferência de Calor de um Corpo Submerso (Cilindro ou Esfera) para um Leito Vibro-Fluidizado", Dissertação de Mestrado, Ed. UFSCar, São Carlos, 72p.
- Moreira, R., Villate, J.E., Sereno, A., 1998, "Heat and Mass Transfer Coefficients During Drying of Apple Cylinders by Natural Convection", Drying'98, Vol. A, pp. 796-803.
- Nonhebel, G. & Moss, A.A.H., 1971, "Drying of Solids in the Chemical Industry", Ed. Butterworths, London, 301p.
- Ono, T. & Yoshida, T., 1985, "Designing of Dryer in Tobacco Manufacturing Process", Drying'86, Vol.2, pp. 630-636.
- Pinto, L.A.A., Tobinaga, S., 1993, "Difusividade Efetiva de Umidade na Secagem de Músculos de Peixes", Anais do XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Vol. 2, Ouro Preto, pp. 466-476.
- Silva, G.F. & Alsina, O.L.S., 1993, "Secagem de Urucum em Leito de Jorro: Estudo do Modelo Difusional", Anais do XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Vol. 2, Ouro Preto, pp. 431-442.
- Sobreira, P.F., Singulani, R.C., Silveira, A.M., 2000, "Obtenção do Pó de Beterraba através de Secagem e Determinação de Parâmetros Operacionais", Anais do XXVIII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Teresópolis, pp. 381-387.
- Souza, A.M., Silva, D.R., Barrozo, M.A.S., 2000, "Influência da Distribuição da Velocidade do Ar na Secagem de Sementes em Leito Deslizante Contracorrente", Anais do XXVIII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Teresópolis, pp. 429-436.
- Thomas, B., Liu, Y.A., Chan R., Squires, A.M., 1987, "A Method for Observing Phase-Dependent Phenomena in Cyclic Systems: Application to Study of Dynamics of Vibrated Beds of Granular Solids", Powder Technology, No. 52, pp. 77-92.
- Thomson, W.T. & Dahleh, M.D., 1998, "Theory of Vibration with Applications", 5ª Ed., Ed. Prentice-Hall, New Jersey, 524p.
- Vincent, J. C., 1987, "Green Coffee Processing", In: Clarke, R. J. and Macrae, R. Coffea: Technology, Ed. Elsevier Applied Science Publishers, Vol. 2, pp. 1-33.
- Walas, S. M., 1985, "Phase Equilibria in Chemical Engineering", Ed. Butterworths, London, 671p.

MASS TRANSFER IN THE DRYING OF COFFEE BERRIES

Marilia Assunta Sfredo

Federal University of Uberlândia – Faculty of Chemical Engineering – P.O. Box 593 - 38400-902 – Uberlândia – MG – Brazil
masfredo@celante.com

José Romário Limaverde

Federal University of Uberlândia – Faculty of Chemical Engineering – P.O. Box 593 - 38400-902 – Uberlândia – MG – Brazil
jrlimaverde@ufu.br

José Roberto Delalibera Finzer

Federal University of Uberlândia – Faculty of Chemical Engineering – P.O. Box 593 - 38400-902 – Uberlândia – MG – Brazil
jrdfinzer@ufu.br

Abstract. *This work, presents batch drying of coffee berries in trays vibrated and fixed bed dryer. The amplitude and the frequency of vibration had been: $A_x=0.211 \times 10^{-3}m$ and $A_y=0.945 \times 10^{-3}m$; 60Hz. The full set consists of a vertical tunnel of drying, in which two aluminum trays with coffee berries to be dryer were introduced. The initial moisture content was approximately 66% (wb) and the final moisture content was about 11%. The monitoring of the drying was effectuated by quantification of the weight of the set tray-coffee. These data has enabled the determination of the drying kinetic heat and mass transfer coefficients and effective diffusivity. In all the calculations, the shrinkage of the coffee berries during the drying was considered. The vibration acted in the sense of increase the drying rate and the moisture effective diffusivity and consequently of heat and mass transfer coefficients. The drying time, in the vibrated system and to the temperature of the 45°C was approximately 11% smaller than in the system not vibrated. The moisture effective diffusivity was between 0.1×10^{-10} and $1 \times 10^{-10}m^2/s$ for temperature of 45°C and between 0.3×10^{-10} and $3 \times 10^{-10}m^2/s$ for temperature of 60°C.*

Keywords. *coffee, drying, vibration, mass transfer, effective diffusivity.*