

CAPÍTULO 5

VIBRAÇÃO APLICADA À SECAGEM DOS FRUTOS DE CAFÉ

Neste capítulo são abordados os fundamentos da vibração, enfatizando o equacionamento para o movimento harmônico (Seção 5.1); os instrumentos mais utilizados para promover a vibração em equipamentos (Seção 5.2); uma revisão sobre a utilização da vibração para aperfeiçoar processos relacionados à Engenharia Química e de Alimentos (Seção 5.3) e a determinação experimental da intensidade vibracional imposta às bandejas do secador no decorrer da secagem dos frutos de café, enfatizando os equipamentos e a metodologia empregados nas medidas e a variação da amplitude e do adimensional de vibração em função do conteúdo de umidade (Seção 5.4).

A avaliação e o uso da vibração mecânica no comportamento dinâmico de materiais particulados é um tema de grande interesse na engenharia de processo, destacando-se: aglomeração de partículas, carga e descarga de silos, classificação com peneiras vibratórias, filtração, fluidização, granulação, transporte em dutos, extração, adsorção, revestimento e, sobretudo a secagem, onde se concentra o maior número de aplicações, cerca de 90% das aplicações de leitos vibrados (PAKOWSKI; MUJUMDAR; STRUMILLO, 1984; FINZER; KIECKBUSCH, 1992).

Pesquisas envolvendo a vibração no intuito de otimizar condições de processo têm sido desenvolvidas por inúmeros pesquisadores, entre elas pode-se citar o desenvolvimento de um modelo matemático envolvendo os parâmetros predominantes na filtração sob vibração (MELLOWES, 1985); a secagem de materiais particulados em leito inclinado e vibro-fluidizado, combinando aquecimento por radiação e convecção (HASATANI; ITAYA; MIURA, 1991); o estudo do recobrimento de comprimidos utilizando um leito vibro-jorrado bidimensional (SOUZA, 1997); a secagem de fatias de cebola em leito vibro-fluidizado (FINZER, 1984); o desenvolvimento de um secador de leito vibro-jorrado aplicado à secagem de cubos de batata e grãos de soja (FINZER, 1989); o estudo da secagem de grãos de café em secador de bandejas vibradas (MENEZES, 1996; FREITAS, 1998) e a implementação de um sistema de vibração eletromagnética no aperfeiçoamento do secador de café com bandejas vibradas (BANZATTO, 2000). Alguns trabalhos referentes à secagem de café em leito

vibrado são indicados a seguir: Finzer, Menezes e Limaverde (1997); Finzer e colaboradores (1998); Menezes e colaboradores (1998); Sfredo, Finzer e Limaverde (2005).

5.1 – Fundamentos da Vibração

Há duas classes de vibração: natural e forçada. A primeira ocorre quando um sistema oscila sob a ação de suas próprias forças, ou seja, não existe atuação de forças externas e o corpo vibra em uma de suas frequências naturais, sendo estas, propriedades de um sistema dinâmico estabelecido pela distribuição de massa e tenacidade. Já a vibração forçada exige uma excitação provocada por forças externas que levam o sistema a vibrar na mesma frequência da excitação. O movimento oscilatório pode se comportar de duas formas: regularmente, como o pêndulo de um relógio ou irregularmente, como em um terremoto. Se o movimento oscilatório ocorre em intervalos de tempos iguais, ele é denominado periódico, sendo o tempo de repetição τ denominado de período de oscilação e o seu recíproco, $f = 1/\tau$, chamado de frequência (THOMSON; DAHLEH, 1998).

O movimento harmônico é uma forma de movimento periódico e pode ser visualizado através da Figura 5.1, que apresenta um corpo com determinada massa, suspenso por uma mola. Neste corpo é fixada uma fonte luminosa e um filme sensível à luz, que se move constantemente e registra o movimento oscilatório, expresso pela Equação (5.1), onde x representa o deslocamento do corpo na direção vertical (THOMSON; DAHLEH, 1998).

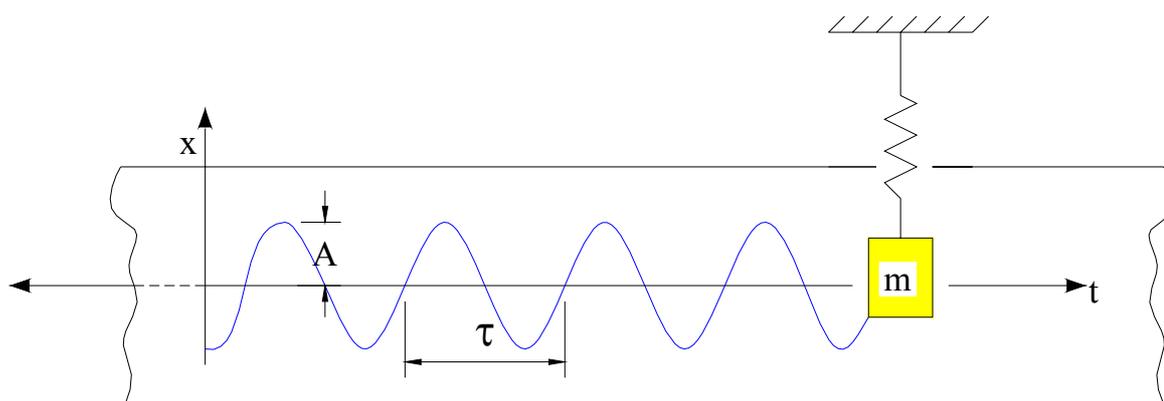


Figura 5.1 – Registro do movimento harmônico (adaptado de Thomson e Dahleh, 1998).

$$x = A \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{\tau} \quad (5.1)$$

Sendo: A a amplitude vibracional, medida a partir da posição de equilíbrio da massa

(m); t o tempo (s) e τ o período de vibração (s). Uma distinção deve ser feita entre a amplitude e o curso (*stroke*), que são termos comuns na literatura sobre vibração. Curso é a distância pico a pico percorrida durante um ciclo vibracional. A amplitude é a metade do curso (CHEAH *et al.*, 1988).

O movimento harmônico é freqüentemente representado como a projeção de uma linha reta, a qual se move sobre um círculo com velocidade angular constante, como indica a Figura 5.2.

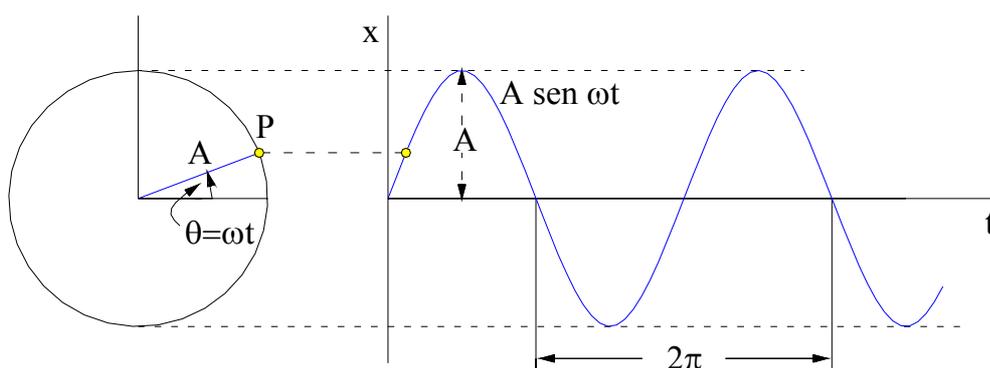


Figura 5.2 – Movimento harmônico representado como uma projeção de um ponto movendo-se em um círculo (adaptado de Thomson e Dahleh, 1998).

O deslocamento é dado pela Equação (5.2). O movimento é repetido quando $t = \tau$ e como o movimento harmônico repete-se a cada 2π radianos tem-se a Equação (5.3), sendo ω a freqüência angular (1/s) e f a freqüência (Hz), THOMSON; DAHLEH (1998).

$$x = A \text{ sen } \omega t \quad (5.2)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} = 2\pi f \quad (5.3)$$

A velocidade e a aceleração do movimento harmônico são obtidas através da diferenciação da Equação (5.2), indicadas pelas Equações (5.4) e (5.5).

$$\dot{x} = \omega A \text{ cos } \omega t \quad (5.4)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 A \text{ sen } \omega t \quad (5.5)$$

A Figura 5.3 mostra a relação entre o deslocamento, a velocidade e a aceleração no movimento harmônico com relação à variação do tempo e do vetor fase.

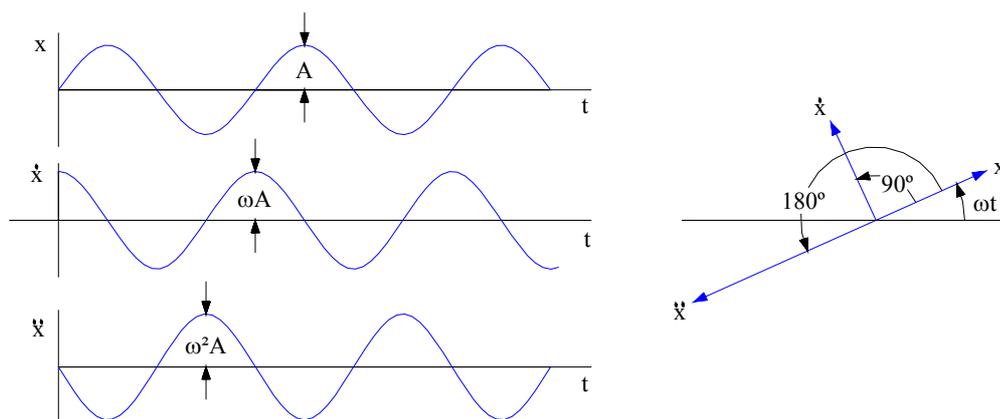


Figura 5.3 – Relação entre o deslocamento, a velocidade e a aceleração no movimento harmônico (adaptado de Thomson e Dahleh, 1998).

A frequência da vibração forçada depende apenas da força imposta ao sistema. A amplitude, todavia, depende tanto da grandeza da força de oscilação quanto da razão entre a frequência aplicada e a frequência natural do sistema. Quando esta razão iguala-se a 1, a amplitude de vibração torna-se muito grande e atinge-se a condição denominada ressonância (ECCLES, 1990). Assim, o fenômeno da ressonância ocorre quando a frequência externa coincide com a frequência natural do sistema (ECCLES, 1990; THOMSON; DAHLEH, 1998). Nesta condição o sistema vibra com uma amplitude máxima, pois ocorre a absorção máxima de energia do sistema excitador (FINZER; KIECKBUSH, 1992). Na excitação de um meio constituído por partículas, a ressonância está diretamente relacionada à forma da superfície do leito e a condição para que ela ocorra é definida como uma condição em que o leito se expande rapidamente até atingir um pico de altura, associada à maior porosidade, desenvolvendo-se ondas intensas na superfície (ECCLES, 1990).

5.2 – Instrumentos de Geração de Vibração

O movimento de partículas sob vibração é promovido por dispositivos geradores da ação vibratória. Esses vibradores são classificados em: vibrador mecânico de inércia (vibração ocorre por rotação de massas desequilibradas); vibrador excêntrico (recomendado para geração de forças de excitação intensas e de baixa frequência); vibrador pneumático ou hidráulico (recomendado para promoção de alta frequência de vibração); vibrador sonoro (para material na forma de pó) e vibrador eletromagnético (o qual é utilizado no trabalho atual). Este último pode ser considerado o melhor dispositivo de geração de vibração, sendo amplamente utilizado nas máquinas que operam a alta frequência de vibração (alimentadores, dosadores e peneiras vibratórias).

A Figura 5.4 ilustra o princípio de operação de um tipo de vibrador eletromagnético formado por um indutor, pelo induzido e por um sistema elástico. O indutor é alimentado pela rede elétrica e ao aumentar o fluxo magnético o induzido é atraído pelo indutor. Quando o fluxo diminui o induzido retrocede pela ação do sistema elástico (FINZER; KIECKBUSCH, 1992).

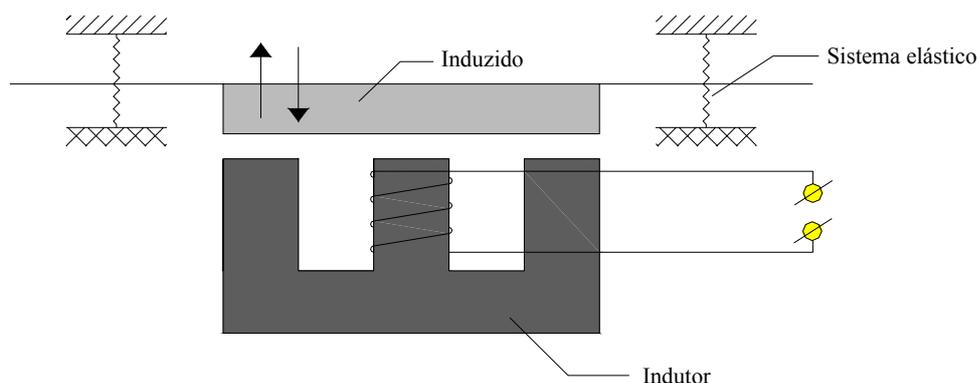


Figura 5.4 – Vibrador eletromagnético (adaptado de Freitas, 1998).

Os leitos podem ser vibrados verticalmente, horizontalmente ou em ângulo com relação ao eixo do leito de sólidos. A forma da onda pode ser senoidal ou de outras formas (GUPTA; MUJUMDAR, 1980). Um esquema de vibrador eletromagnético utilizado em transportadores vibratórios é apresentado na Figura 5.5.

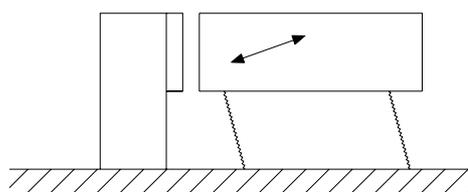
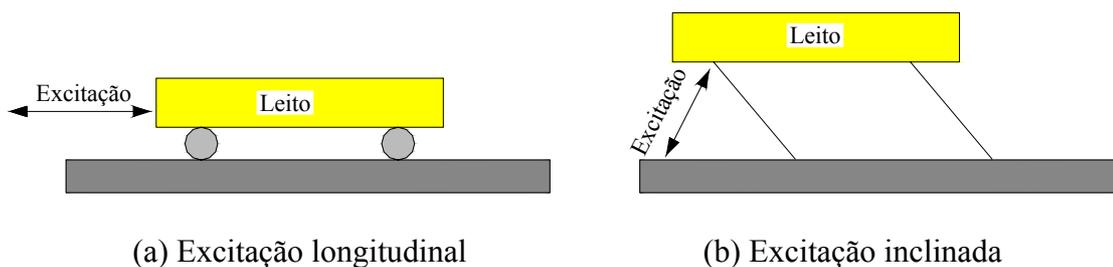


Figura 5.5 – Sistema eletromagnético (adaptado de Martins, 2001).

Neste sistema a excitação ocorre em função do campo eletromagnético gerado pelo excitador. Este campo provoca uma força variável com forma de onda senoidal, triangular, retangular ou outras. Quando a excitação é longitudinal como apresenta a Figura 5.6(a) o material move-se apenas por deslizamento, ou seja, sempre em contato com o suporte e, conseqüentemente, a força normal será sempre positiva. Quando a força de excitação é aplicada formando um ângulo com a horizontal, como mostra a Figura 5.6(b), a peça pode mover-se através de pequenos saltos sobre o suporte. Quando a excitação possui forma de onda senoidal, o suporte também tem um comportamento senoidal, ou seja, as características de excitação do vibrador tendem a ser mantidas pelo suporte (MARTINS, 2001).



(a) Excitação longitudinal (b) Excitação inclinada
 Figura 5.6 – Modos da aplicação da excitação (adaptado de Martins, 2001).

5.3 – Utilização da Vibração em Processos

Os leitos de partículas submetidos à influência da vibração na direção vertical apresentam uma variedade de regimes de comportamento. A Figura 5.7 apresenta três regimes de operação diferentes: leito vibrado (A), leito vibro-fluidizado (B) e leito fluidizado vibrado (C), utilizando um gráfico da perda de pressão no leito em função da velocidade do ar. Na Figura 5.7, u_{mvf} é a velocidade incipiente de vibro-fluidização e u_{mf} a velocidade inicial de fluidização (FINZER, 1989).

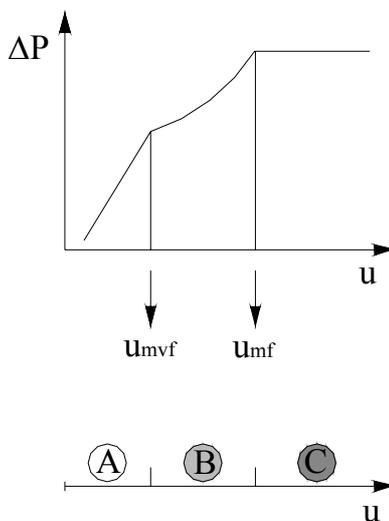


Figura 5.7 – Classificação dos regimes de leitos submetidos à vibração (adaptado de Finzer, 1989).

Estes comportamentos estão relacionados ao adimensional Γ dado pela Equação (5.6), o qual é definido como a razão entre a máxima aceleração vibracional e a aceleração da gravidade. A forma mais simplificada para o cálculo do adimensional de vibração é dada pela Equação (5.7).

$$\Gamma = \frac{\text{Max}|-A\omega^2\text{sen}(\omega t)|}{g} \tag{5.6}$$

$$\Gamma = \frac{A\omega^2}{g} \quad (5.7)$$

Sendo: Γ o adimensional de vibração; ω a aceleração vibracional ou frequência angular de vibração (1/s); g a aceleração da gravidade (m/s^2).

O leito é denominado vibrado (sem escoamento de ar) quando $\Gamma > 1$ e se $\Gamma < 1$, geralmente, ocorre uma compactação do leito. Essa situação é indicada na Figura 5.7 (A) e ocorre quando a aceleração vibracional aplicada ao leito é suficientemente alta para provocar um estado correspondente à fluidização particulada. Os leitos vibro-fluidizados (B) correspondem aos leitos aerados onde o ar escoia com velocidade inferior à velocidade mínima de fluidização (u_{mf}), mas superior à u_{mf} e a vibração produz $\Gamma > 1$. Para situações em que a velocidade for maior do que u_{mf} , independentemente da aceleração vibracional, tem-se o leito fluidizado vibrado (THOMAS *et al.*, 1987; FINZER, 1989; FINZER; KIECKBUSCH, 1992; THOMSON; DAHLEH, 1998).

O valor do adimensional de vibração é utilizado, na literatura especializada, como um parâmetro para caracterizar o efeito da vibração sobre o comportamento dinâmico de um leito submetido à ação de forças vibracionais. Contudo, a sua própria definição indica que para um mesmo valor de Γ são possíveis várias combinações entre a amplitude e a frequência, sugerindo a possibilidade da obtenção de comportamentos fluidodinâmicos distintos para um mesmo valor do adimensional de vibração. Este fato pode explicar a não concordância entre resultados obtidos por diferentes autores. Desta forma, a utilização de Γ como um parâmetro universal deve ser complementada com valores da amplitude ou da frequência de vibração para melhor caracterização do efeito vibracional sobre o comportamento fluidodinâmico do leito (DALEFFE; FREIRE, 2004a; DALEFFE; FREIRE, 2004b).

O movimento de partículas em um transportador vibratório é mais complexo do que o movimento de partículas sendo fluidizadas somente com vibração vertical. No transportador vibratório as partículas têm um deslocamento horizontal e vertical ao mesmo tempo. O deslocamento vertical é o menos complexo. A Figura 5.8 mostra que a vibração aplicada ao sólido pode não ser vertical e que a base plana sob vibração pode não ser horizontal sendo, γ é o ângulo entre a base plana sob vibração e o plano horizontal e θ é a ângulo entre a direção da vibração e o plano horizontal (CHEAH *et al.*, 1988). Segundo Martins (1997), o ângulo de inclinação máximo da base ou suporte, usual em transportadores vibratórios, é $\gamma = 8^\circ$.

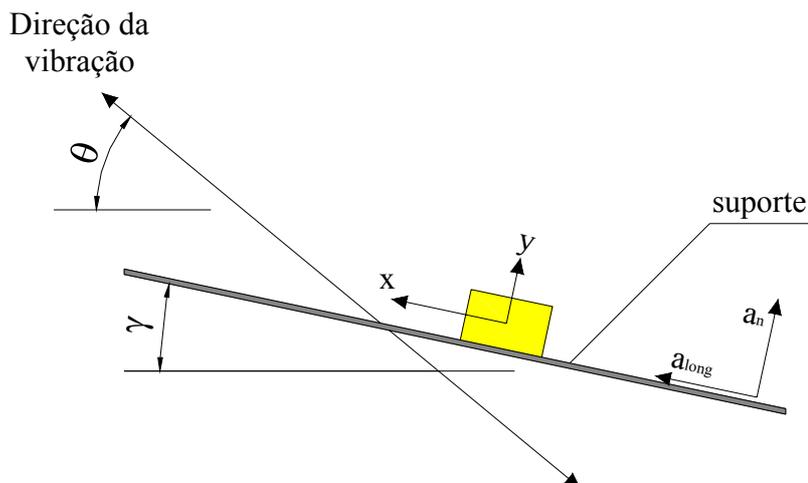


Figura 5.8 – Esquema de uma partícula sobre a base plana de um transportador vibratório (adaptado de Cheah *et al.*, 1988).

Segundo Cheah e colaboradores (1988), no caso apresentado na Figura 5.8, o adimensional de vibração é dado pela Equação (5.8). Há uma similaridade entre a Equação (5.7) e a Equação (5.8): se $\theta = 90^\circ$ e a base plana for horizontal, $\gamma = 0^\circ$, a Equação (5.8) é reduzida à Equação (5.7).

$$\Gamma = \frac{A\omega^2 \sin(\theta - \gamma)}{g \cos(\gamma)} \quad (5.8)$$

Assim como para a Equação (5.7), existem duas condições para a Equação (5.8), descritas a seguir (CHEAH *et al.*, 1988).

- Para $\Gamma < 1$ as partículas não têm energia suficiente para escoarem em vô livre e deslocam-se sobre a superfície do transportador.
- Para $\Gamma > 1$ as partículas adquirem, freqüentemente, a condição de vô livre.

Segundo Cheah e colaboradores (1988), o movimento das partículas na direção horizontal é muito mais complexo do que na direção vertical, devido às várias modalidades que pode assumir, incluindo o movimento deslizante para frente, o movimento deslizante para trás, os movimentos deslizantes para frente e para trás combinados e o salto para frente (vô livre).

Segundo Martins (2001), a aceleração do suporte pode ser decomposta em duas componentes, uma na direção longitudinal ao suporte (a_{long}) e a outra na direção normal (a_n). Esta última provoca a variação da força normal (N) e faz com que o material perca o contato

com o suporte, fase essa denominada de salto. Nessa fase obtém-se a maior eficiência do transporte, pois o atrito que se opõe ao movimento relativo entre o material e o suporte não existe (devido à perda de contato entre ambos).

O movimento do material sobre o suporte pode apresentar-se de quatro modos distintos descritos a seguir (MARTINS, 2001):

- salto: ocorre quando o material perde o contato com o suporte;
- deslizamento para trás: o material desliza para trás em relação ao suporte;
- deslizamento para frente: o material desliza para frente em relação ao suporte;
- repouso relativo: o material se move junto com o suporte sem ocorrência de movimento relativo entre ambos.

Segundo Martins (2001), o mecanismo que descreve o movimento do suporte é obtido a partir do acionamento externo aplicado ao material. A Figura 5.9 mostra as trajetórias do suporte e do material, decompostas em quatro períodos descritos a seguir.

- período 1 (entre t_0 e t_1): fase de aceleração do suporte (para frente). O material acelera junto ao suporte, sem deslizamento.
- período 2 (entre t_1 e t_2): desaceleração do suporte e vôo do material, com condições iniciais de t_1 .
- período 3 (entre t_2 e t_3): aceleração do suporte no retorno. O material continua em vôo com as condições iniciais t_1 .
- período 4 (entre t_3 e t_4): desaceleração do suporte. O material efetuou contato com o suporte e pode apresentar um pequeno deslocamento para trás.

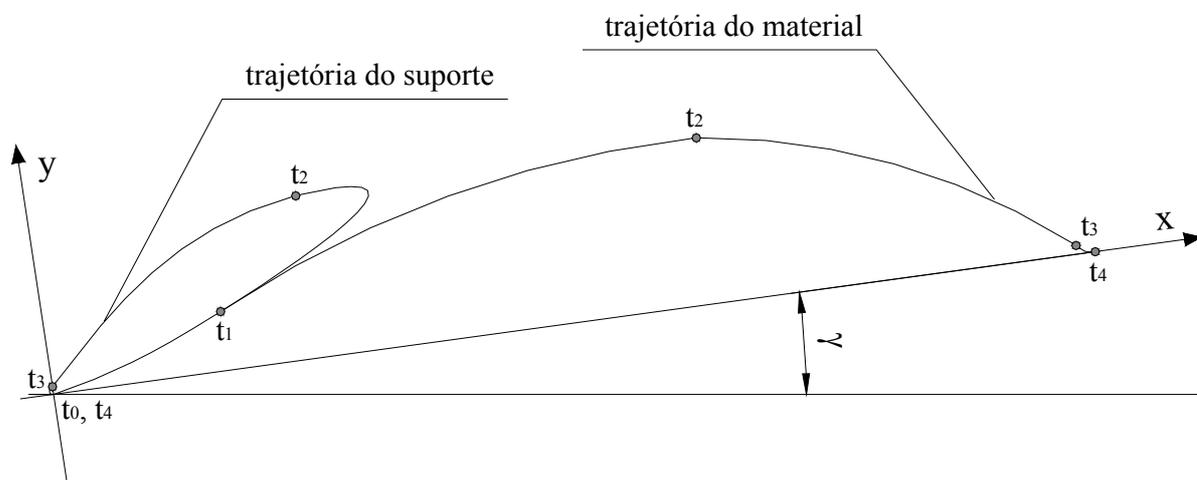


Figura 5.9 – Perfil de deslocamento do suporte e do material (adaptado de Martins, 1997).

Martins (1997) observou que com a utilização do vibrador eletromagnético (o qual consiste no mesmo utilizado no trabalho atual) o material começa a ser transportado através de saltos quando a força de excitação atinge 40% de seu valor máximo (o dial de controle do vibrador possui dez divisões e o autor considerou que cada divisão corresponde a um décimo da força de excitação). Neste ponto a aceleração normal ao suporte ultrapassava a aceleração da gravidade.

A Figura 5.10 apresenta os perfis de deslocamento do suporte (experimental) e do material (simulado) em condições diferentes de inclinação e excitação do suporte.

Na Figura 5.10 x_m , x_t , y_m e y_t indicam o deslocamento do material (m) e do suporte (t) na direção x e y, respectivamente. O coeficiente de atrito entre o material e o suporte foi de 0,465.

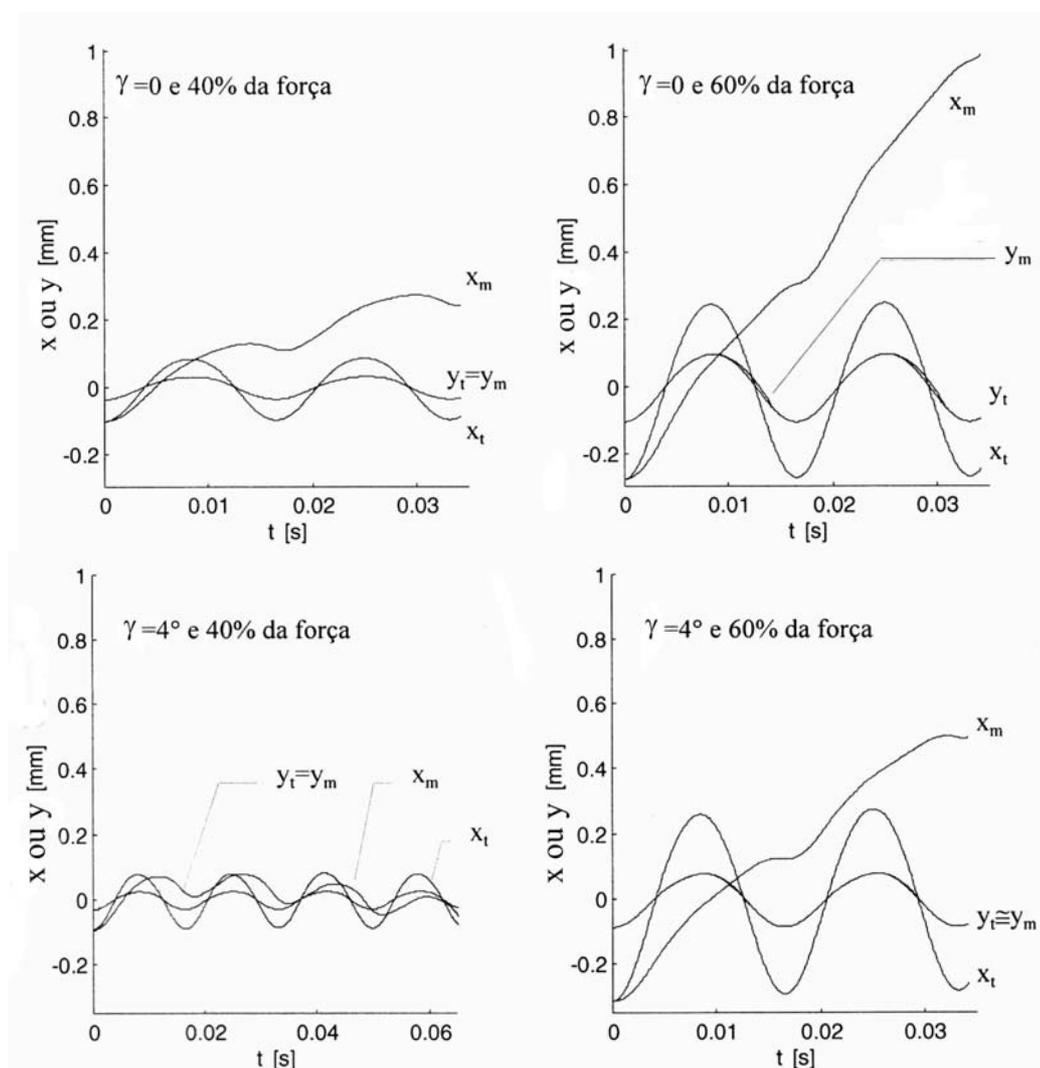


Figura 5.10 – Perfil de deslocamento, na direção x e y, variando γ e força de excitação (MARTINS, 1997).

Martins (1997) verificou que o aumento do ângulo de inclinação do suporte diminui o deslocamento do material na direção x , chegando até ocorrer o deslocamento para trás (40% da força e $\gamma = 4^\circ$) e também diminui a fase de salto do material. O autor observou ainda que aumentando o coeficiente de atrito aumentava o deslocamento do material na direção x , o que já era esperado pois o movimento é função direta do coeficiente de atrito.

Segundo Erdész e Szalay (1988), existem basicamente duas reações diferentes para o movimento das partículas em um sistema vibrado, dependendo da componente normal da força N (perpendicular ao plano do elemento transportador):

- $N > 0$: a partícula não decola do plano, mas desliza para trás ou para frente sobre ele;
- $N = 0$: a partícula decola do plano assumindo uma trajetória acima dele e após um determinado tempo volta a colidir com o plano.

Sfredo, Finzer e Limaverde (2005) determinaram o valor da força normal ao plano (N , força exercida pelo plano na direção contrária à da força peso) atuando em uma partícula de café cereja no fundo da bandeja de um secador de leite fixo submetido à vibração. O valor encontrado foi $-0,18$ N.

O valor negativo da força resultante na direção vertical indica que no instante em que a partícula recebe o impulso de vibração ela se separa 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 N . Nesta situação não existe a influência do atrito estático, já que o fruto não está em contato com a bandeja. Esta condição em que um leito separa-se do fundo do vaso vibrado assumindo uma trajetória livre foi descrito por Thomas e colaboradores (1987), através da analogia de um corpo plástico.

Segundo Thomas e colaboradores (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, decolam irregularmente e suas trajetórias são simplesmente aquelas das partículas individuais, atuando independentemente uma das outras. As partículas também colidem com a base do vaso e umas com as outras (ver Figura 5.11). O leito periodicamente decola da base do vaso e volta a colidir com a mesma ao completar um ciclo, como mostra a Figura 5.11.

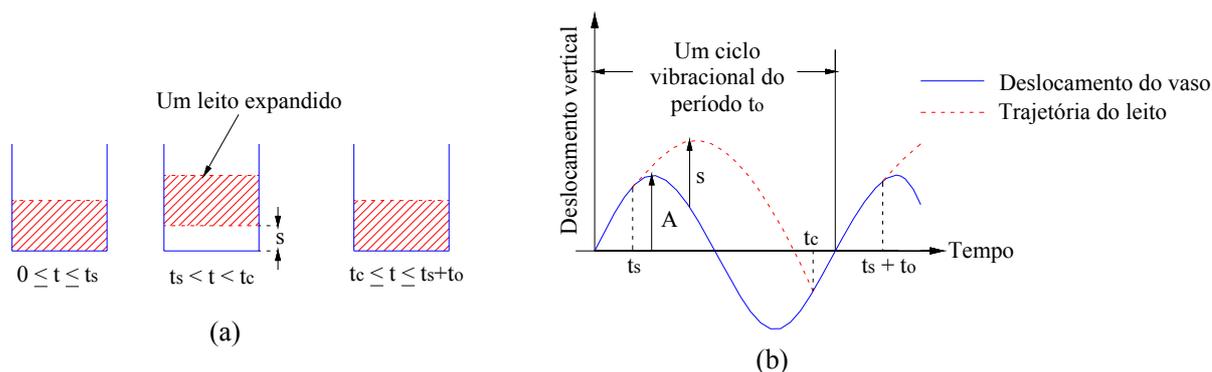


Figura 5.11 – (a) Movimento de um leito de partículas vibrado modelado como um corpo plástico poroso, sendo “s” a altura em que o leito é deslocado. (b) O leito decola no tempo t_s e colide com a base do vaso em t_c (adaptado de Thomas *et al.*, 1987).

O menor valor do produto $A\omega^2$, que causará a separação do leito da bandeja (para $\omega t = \pi/2$) é igual à $A\omega^2 = g$. Para o leito ser separado, Γ deve ser maior ou igual a um. Valores de Γ menor do que a unidade não são desejáveis na secagem porque tornam o leito mais denso. As condições ótimas para a transferência de calor e massa ocorrem na faixa de aceleração de $\Gamma = 2$ a 6 g. Nesta faixa, o leito torna-se mais solto e as partículas são intensamente misturadas (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Segundo Gupta e Mujumdar (1980), o leito começa a perder a sua homogeneidade com acelerações vibracionais maiores do que 4 g. Entretanto, o efeito da vibração é atenuado com o aumento da altura do leito. O leito torna-se mais homogêneo, quando submetido à vibração, em porosidades menores. Contudo, esse fenômeno não ocorre para velocidades do ar muito baixas.

Os leitos vibro-fluidizados com aplicação de vibração na direção vertical são amplamente utilizados em vários processos físicos e químicos, tais como, secagem de medicamentos e alimentos, revestimento de partículas e granulação. Entretanto, a aplicação da vibração na direção horizontal também pode ser benéfica aos processos industriais. Um exemplo é o processo de secagem de medicamentos e alimentos em que algumas vezes não é necessário fluidizar as partículas, as quais apenas necessitam secar à velocidades superficiais do gás menores do que a velocidade de mínima fluidização e a vibração horizontal atuaria no transporte das partículas (ZHOU *et al.*, 2002).

Zhou e colaboradores (2001) estudaram a queda de pressão no leito vibro-fluidizado com excitação vibracional nas direções horizontal e vertical e concluíram que o efeito da vibração horizontal na queda de pressão é significativo para velocidades superficiais do gás

menores do que a velocidade de mínima fluidização (u_{mf}), enquanto que o efeito da vibração vertical no comportamento da fluidização existe mesmo em velocidades superficiais do gás maiores do que u_{mf} .

Segundo Roberts (1984), a maioria das aplicações de vibrações verticais na fluidização de leitos com materiais granulares utilizam freqüências entre 2 e 100 Hz e amplitudes de vibração tais que a faixa de aceleração mantenha-se entre 0 e 10 g.

Segundo Satija e Zucker (1986), o tipo de secador vibro-fluidizado mais popular consiste em um transportador de bandejas vibradas. A vibração aplicada à bandeja possui uma componente na direção vertical e outra na direção horizontal. A componente vertical ajuda na fluidização do material enquanto a componente horizontal realiza o transporte do material ao longo da bandeja. Devido à componente vertical ser maior do que a horizontal, a velocidade do ar necessária à fluidização diminui, resultando em menor elutriação de partículas finas e permitindo o uso de materiais alimentados com ampla distribuição de tamanho.

A porosidade do leito está diretamente relacionada à intensidade de vibração (Γ), como indicado na Figura 5.12. A expansão do leito é mais dependente da amplitude de vibração do que da freqüência. Para a aceleração vibracional constante, a maior expansão do leito pode ser obtida para maiores amplitudes e menores freqüências (FINZER, 1984).

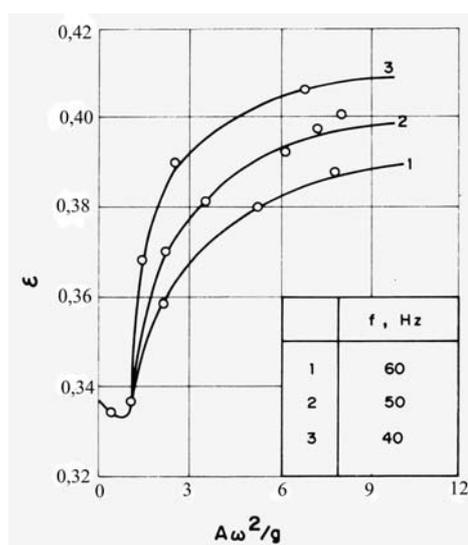


Figura 5.12 – Porosidade do leito em função da intensidade de vibração (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Segundo Daleffe e Freire (2004b), o aumento da freqüência de vibração, juntamente com o emprego de altas amplitudes, tende a expandir o leito, reduzindo a queda de pressão.

Já, para baixas amplitudes, o aumento da frequência tende a compactar o leito. A faixa de amplitude empregada foi de 3 a 21 mm e a frequência variou entre 3,44 e 18,20 Hz, gerando adimensionais de vibração 1, 2 e 4 g.

Com respeito ao efeito de segregação de partículas em leito vibro-fluidizado, Daleffe e Freire (2004a) informaram que entre dois leitos vibro-fluidizados sob mesma aceleração vibracional, o que opera com maior amplitude de vibração promove melhor mistura de partículas, sendo a melhor condição apresentada para minimizar a segregação, independentemente da distribuição de tamanho das partículas.

Como resultado da aplicação da vibração podem ser observadas as seguintes mudanças nos parâmetros de escoamento, em relação aos leitos fluidizados convencionais: decréscimo da velocidade mínima de fluidização, aumento inicial da perda de pressão no leito devido à compactação, diminuindo em seguida, e o aumento (ou oscilação) da porosidade do leito, que inicialmente sofre um decréscimo (ERDÉSZ; MUJUMDAR, 1986).

Segundo Gupta e Mujumdar (1980), a vibração melhora o escoamento das partículas, pois ajuda na diminuição de forças de atração interpartículas e assim, melhora a qualidade da fluidização. Isto é observado para leitos formados por partículas finas (1 a 5 μm) com tendência à aglomeração e por materiais úmidos com tendência à pegajosidade entre as partículas.

No escoamento de materiais particulados coesivos, em alimentadores vibrados, para uma mesma amplitude de vibração, a melhor taxa de escoamento ocorre sob condições de operação com baixa frequência. Já, para materiais não coesivos, a maior taxa de descarga ocorre sob alta frequência (ROBERTS, 1984).

As vantagens do uso da vibração sobre os leitos fluidizados convencionais são: o controle mais fácil do tempo de residência das partículas pela manipulação dos parâmetros vibracionais e, em sistemas contínuos pode ser alcançada uma condição de escoamento pistonado; diminuição da quantidade de ar para a fluidização (cerca de 20 a 40% da u_{mf} em um leito convencional); redução das dimensões dos equipamentos; secagem mais uniforme e eficiente de materiais aglomerantes; eliminação das zonas mortas dentro do equipamento, resultando em operações mais higiênicas e uniformes para produtos alimentícios, pela redução no risco de crescimento de microrganismos (GUPTA; MUJUMDAR, 1980; ERDÉSZ, 1991; MONTEDO, 1992); a vibração, quando corretamente aplicada, diminui a resistência de

materiais particulados ao escoamento e o coeficiente de atrito com a parede (ROBERTS, 1984); a energia vibracional transferida para as partículas na forma de impulsos propaga-se no volume do leito, assim a direção e a intensidade do fluxo de massa e da circulação das partículas podem ser selecionadas e controladas pelos parâmetros de vibração (amplitude, frequência, ângulo de inclinação da força de excitação) ERDÉSZ (1991); a vibração melhora a qualidade da fluidização de materiais irregulares e coesivos; evita problemas como canais preferenciais, ausência de fluidização e fracionamento do leito (*slug flow*); em leitos fluidizados, a vibração melhora a cinética de secagem (SILVA-MORIS; ROCHA, 2003); a vibração tende a eliminar o efeito de segregação causado pelo escoamento do ar através do leito; a vibração, em conjunto com a velocidade do ar (admitida perpendicularmente ao leito), torna possível o ajuste dos parâmetros de processo às propriedades do material como, por exemplo, manter a mesma amplitude e frequência de vibração no decorrer da secagem e diminuir a velocidade de escoamento do ar, visto que, inicialmente, os sólidos úmidos necessitam de maiores velocidades do ar para fluidizarem (BROD; PARK; ALMEIDA, 2004).

Quando se deseja que ocorra movimento dos sólidos no leito, o efeito da amplitude é mais importante que a frequência de vibração e explica a observação de vários pesquisadores que constataram que a transferência de calor e massa ocorre com maior intensidade em um leito vibratório, para maiores valores da amplitude de vibração, sendo mantido constante o adimensional $A\omega^2/g$. Isto se deve ao movimento mais acentuado dos sólidos ao operar com maior amplitude de vibração (FINZER, 1989).

Quando usada corretamente, vibrações podem reduzir significativamente a rigidez de uma massa de sólidos, assim como o atrito com a parede de contenção dos mesmos. O resultado facilita a fluidização do material. Em transportadores pneumáticos ocorre redução do consumo de potência, através de aplicação de vibração na parede da tubulação, devido à redução de atrito entre as partículas e a tubulação (AKIYAMA; NAITO; KANO, 1986).

Segundo Roberts (1984), as forças resistivas entre o material particulado e as superfícies adjacentes podem ser reduzidas pela aplicação de vibrações mecânicas. A extensão dessa redução é uma função da intensidade da vibração aplicada. A direção da vibração em relação à direção da deformação cisalhante é importante: quando essas duas direções coincidem, pode ser obtida diminuição das forças resistivas.

As desvantagens da utilização de processos vibro-fluidizados são descritas a seguir

(ERDÉSZ; SZALAY, 1988):

- A estabilidade e o comportamento dos sistemas dependem fortemente dos parâmetros do material, os quais podem se alterar durante o processo desestabilizando o sistema. Entre esses parâmetros estão: conteúdo de umidade, tamanho de partícula, distribuição de tamanho das partículas e as características de fricção durante o transporte.

- A necessidade de isolamento vibracional, visto que a vibração é transmitida também para o piso da instalação.

- Se os elementos de montagem do equipamento sob vibração não são suficientemente rígidos poderá ocorrer uma vibração harmônica superior levando ao aumento do nível de ruído e diminuindo a eficiência da operação.

Beeckmans e MacWilliam (1986) estudaram os efeitos da estabilização de um leito fluidizado sob vibração horizontal. O método consiste em fornecer vibração horizontal para o material no leito por meio do movimento livre de hastes suspensas no próprio leito, e que transmitem vibrações de um vibrador acoplado. Os aspectos relevantes constatados, com relação aos leitos convencionais foram: a porosidade é muito reduzida; a velocidade mínima de fluidização diminui; a viscosidade é significativamente incrementada (devido a velocidade de fluidização estar abaixo da u_{mf} no leito não vibrado).

A aceleração vibracional tem efeito no coeficiente de dispersão, observado em um estudo em leito horizontal e $0,8 \leq \Gamma \leq 11$. Uma correlação para a mistura axial (longitudinal) em um leito vibro-fluidizado operando continuamente é dada pela Equação (5.9), sendo E_z o coeficiente de dispersão. Já para outro estudo com leito inclinado (3 a 8° na horizontal) e $1 \leq \Gamma \leq 1,8$ não foi observado o efeito da aceleração vibracional no coeficiente de dispersão (GUPTA; MUJUMDAR, 1980).

$$E_z = 2,1 \times 10^{-5} (A\omega^2/g)^{2,2} \quad (5.9)$$

Segundo Gupta e Mujumdar (1980), os resultados apresentados na literatura, em relação ao efeito da altura do leito na taxa de secagem de leitos vibro-fluidizados, são conflitantes. Enquanto alguns pesquisadores informam que há aumento da taxa de secagem com o aumento da altura do leito, outros afirmam o contrário e ainda outros reportam que há uma condição ótima para a altura do leito. A correlação apresentada pela Equação (5.10) mostra que a taxa de secagem aumenta com o aumento da aceleração vibracional, velocidade

do ar no leito (u_0), altura do leito (h) e temperatura do ar (T_g). Não foi incluído o efeito do tamanho da partícula.

$$\frac{dX}{dt} = \left(0,8 \left(\frac{A\omega^2}{g} \right) - 2,3 \right) (0,02T_g - 6,16)(1,0 - 8,9h)(1,9u_0 - 0,65) \quad (5.10)$$

Há indícios que a influência da vibração na taxa de secagem também depende do regime de secagem, isto é, taxa constante ou decrescente. Para o período de taxa constante, a taxa de secagem diminui com a frequência e aumenta com a amplitude, para um mesmo valor da aceleração vibracional. Para a taxa de secagem decrescente o aumento da taxa com a amplitude foi percebido somente para altas frequências. O conteúdo de umidade crítico é reduzido com a aplicação da vibração (GUPTA; MUJUMDAR, 1980).

A vibração na secagem de materiais particulados vem sendo estudada por vários pesquisadores.

Finzer (1984) desenvolveu um protótipo de secador de leito vibro-fluidizado para secagem de anéis de cebola, operando com amplitude vibracional de 2,60; 4,33 e 5,63 mm e frequência de 13,3 e 18 Hz. Os resultados apontaram que a utilização da vibração diminuiu o tempo de secagem, quando comparado com secagem em leito estático, principalmente operando-se com maior amplitude vibracional.

Le Maguer e Mazza (1985) estudaram o mecanismo de secagem de cenoura em cubos em um secador de leito vibro-fluidizado e estimaram o coeficiente de difusão da água na cenoura durante a desidratação, porém não informaram a amplitude e frequência vibracional empregadas no secador.

Satija e Zucker (1986) estudaram o efeito da vibração e de outros parâmetros no tempo de residência médio e na distribuição do tempo de residência de partículas granulares em um secador de leito vibro-fluidizado e concluíram que o tempo de residência médio aumenta com a operação em amplitudes de vibração altas.

Finzer (1989) desenvolveu um secador de leito vibro-jorrado onde a taxa de circulação das partículas é controlada pela imposição de vibração vertical ao leito. A faixa de amplitude utilizada na secagem de cubos de batata e grãos de soja foi entre 2 mm e 5 mm e a frequência variou de 0 a 18 Hz. O escoamento das partículas seguiu o modelo pistonado com

baixo grau de dispersão e a taxa de circulação das partículas apresentou o valor máximo na condição de ressonância.

Kage e colaboradores (2001) estudaram o efeito da direção (vertical, horizontal e oblíqua) e frequência de vibração sobre a eficiência de revestimento e aglomeração entre partículas onde a vibração na direção vertical produziu a melhor eficiência e qualidade de revestimento.

Soponronnarit e colaboradores (2001) projetaram, construíram e testaram um secador vibro-fluidizado em escala comercial (2,5 a 5,0 t/h) e desenvolveram um modelo matemático que determinou os melhores parâmetros de operação para a secagem de arroz, onde a frequência e a amplitude de vibração ótimas foram 7,3 Hz e 5 mm, respectivamente. Os autores constataram uma expressiva diminuição do consumo de energia em relação ao secador de leito fluidizado convencional. O consumo de energia pelos motores do soprador e do vibrador foi, aproximadamente, 55% do consumo do motor do soprador sem o uso da vibração.

Silva-Moris e Rocha (2003) estudaram a fluidodinâmica de um leito vibro-fluidizado na secagem de ácido adípico (densidade 1340 kg/m^3 e tamanho de partícula entre 75 e 600 μm) e concluíram que as intensidades de vibração moderadas ($\Gamma = 0,45$ para $A = 0,01 \text{ mm}$ e $\Gamma = 0,9$ para $A = 0,02 \text{ mm}$) foram mais eficientes quanto à circulação das partículas no estado aglomerado (ácido adípico úmido). Os menores valores para u_{mvf} foram obtidos para menores valores de Γ e a queda de pressão no leito diminuiu mais do que para o leito convencional com valores de $\Gamma < 1$.

Das, Das e Bal (2004) estudaram as condições de secagem em um secador vibratório com infravermelho em escala de laboratório para a secagem de grãos (arroz) empregando frequência e amplitude de vibração de 22 Hz e 10 mm, respectivamente; intensidade de radiação de 3100 e 4290 W/m^2 e altura do leito de 12 e 16 mm.

5.4 – Determinação dos Parâmetros Vibracionais na Secagem de Frutos de Café

Como visto no Capítulo 4, a secagem dos frutos de café foi realizada com aplicação de vibração nas bandejas do secador. O conhecimento dos parâmetros vibracionais na secagem dos frutos de café é fundamental para a compreensão dos fenômenos que ocorrem durante esta operação e, principalmente do comportamento dinâmico do leito. Para isso é

necessário determinar a amplitude vibracional aplicada a cada bandeja e ao alimentador vibratório. A metodologia e os equipamentos utilizados na determinação da amplitude são descritos a seguir.

5.4.1 – Determinação da Amplitude de Vibração

A determinação da amplitude de vibração foi realizada utilizando-se um acelerômetro acoplado a um osciloscópio analógico. A obtenção dos dados de frequência e amplitude nos ensaios não pôde ser efetuada simultaneamente ao processo de secagem devido à impossibilidade de conexão do acelerômetro nas bandejas durante o funcionamento do secador. Para simular a condição de cada experimento, a massa de café úmido foi quantificada dividindo-se o *hold-up* do material no secador por 4,5, já que parte dos frutos de café estavam na esteira transportadora. Como a massa de café decresce durante a secagem, foram utilizadas partículas metálicas esféricas (massa média de 13,7 g), dentro de um recipiente de polietileno com a função de simular o efeito da massa de frutos de café sobre a bandeja. As partículas metálicas foram removidas, periodicamente, de acordo com a perda de massa dos frutos de café (conforme curva de secagem).

A Figura 5.13 mostra um exemplo da metodologia utilizada para simular a carga na bandeja e a perda de massa durante as medidas da amplitude vibracional.

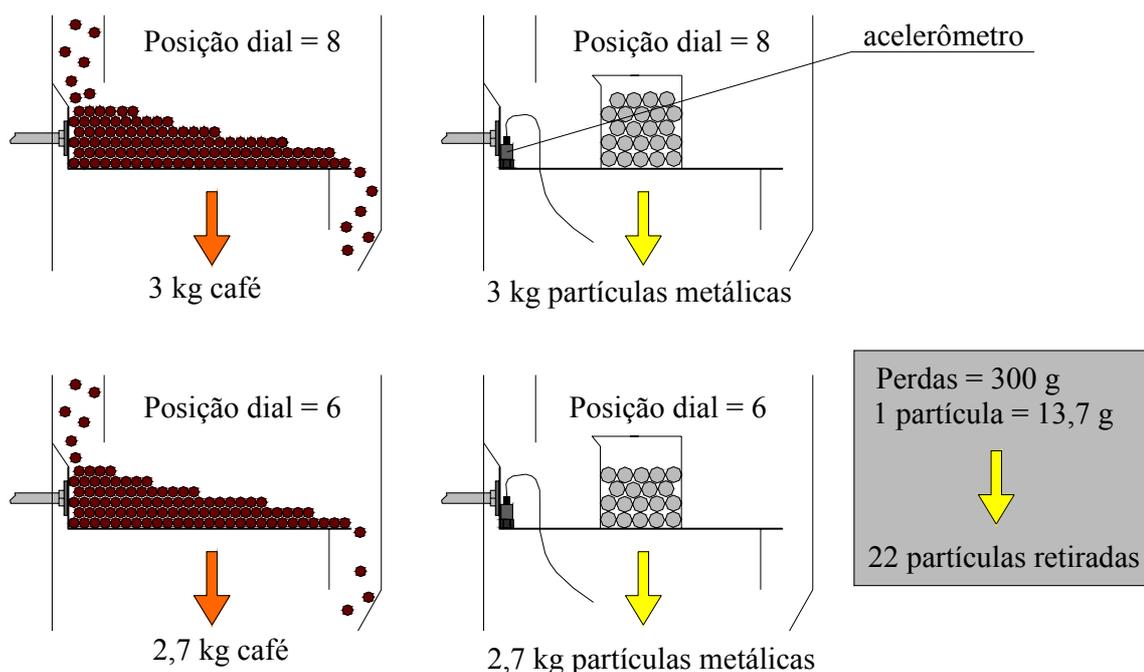


Figura 5.13 – Simulação da carga na bandeja e da perda de massa durante as medidas da amplitude vibracional.

Como citado anteriormente, as medidas de amplitude de vibração foram realizadas utilizando-se um acelerômetro acoplado a um osciloscópio analógico. A descrição desses equipamentos será efetuada a seguir.

5.4.1.1– Acelerômetro Piezoelétrico e Osciloscópio Analógico

O acelerômetro utilizado para efetuar as medidas é da marca PCB Piezotronics, modelo 353B02, possui altura de 30,2 mm, e diâmetro de 12,57 mm, massa de 10 g, sensibilidade de $2,058 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$, faixa de medida $\pm 2453 \text{ m/s}^2$, faixa de frequência 1 a 7000 Hz, faixa de temperatura de operação de -54 a $+121^\circ\text{C}$ (Manual de instalação e operação do acelerômetro).

Para a realização das medidas de vibração fixou-se o acelerômetro na posição central da bandeja próximo à conexão do eixo ao vibrador. Entretanto, para que o acelerômetro envie os sinais elétricos, posteriormente convertidos à aceleração, é necessária a sua conexão, através de um cabo coaxial padrão a um condicionador de sinal. O condicionador de sinal tem a função de transferir tensão ao acelerômetro e também de enviar os impulsos elétricos emitidos pelo acelerômetro a um equipamento de leitura e/ou aquisição dos dados. O condicionador de sinal utilizado neste trabalho é da marca PCB modelo 480C02.

O equipamento utilizado para a leitura dos sinais emitidos pelo condicionador de sinal foi o osciloscópio analógico MINIPA modelo MO-1225. A conexão do conjunto acelerômetro-condicionador de sinal com o osciloscópio foi feita através de um cabo BNC, fixado na *exit input* do osciloscópio e na *out put* do condicionador de sinal. A Figura 5.14 ilustra o esquema de montagem dos equipamentos para medida de vibração.

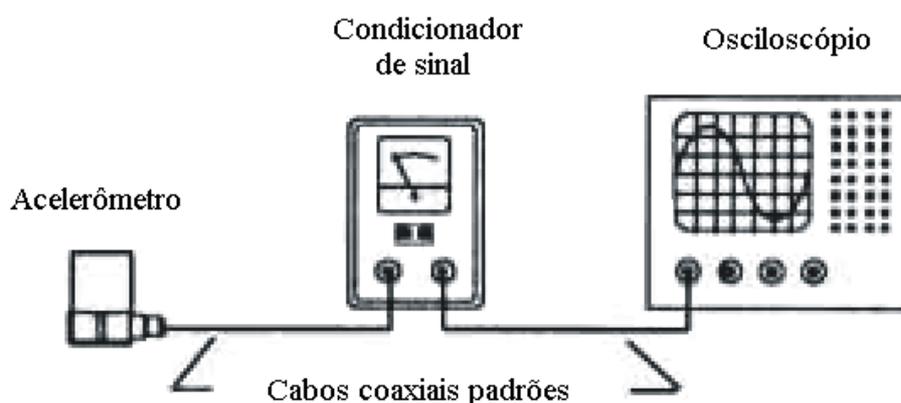


Figura 5.14 – Esquema de montagem do acelerômetro, condicionador de sinal e osciloscópio (www.pcb.com).

Para efetuar as medidas fixou-se o acelerômetro piezoelétrico com cera especial sobre a bandeja, acionou-se o condicionador de sinal (na posição *on*), ajustou-se o nível de *trigger* (responsável pela varredura de sinal que mostra a onda senoidal na tela do osciloscópio), as escalas e as posições horizontal e vertical e, realizaram-se as medidas efetuando-se leituras, na tela do osciloscópio, do número de divisões que a onda senoidal abrangia, pico a pico. A escala de tensão permite a leitura de V ou mV, como mostra a Figura 5.15. sendo a posição indicada na escala é 10 mV/div (mostrada pela ranhura na maior saliência do dial, posicionada no numeral 10).



Figura 5.15 – Escala de tensão do osciloscópio analógico.

A Figura 5.16 apresenta como a leitura dos valores de tensão deve ser efetuada na tela do osciloscópio.

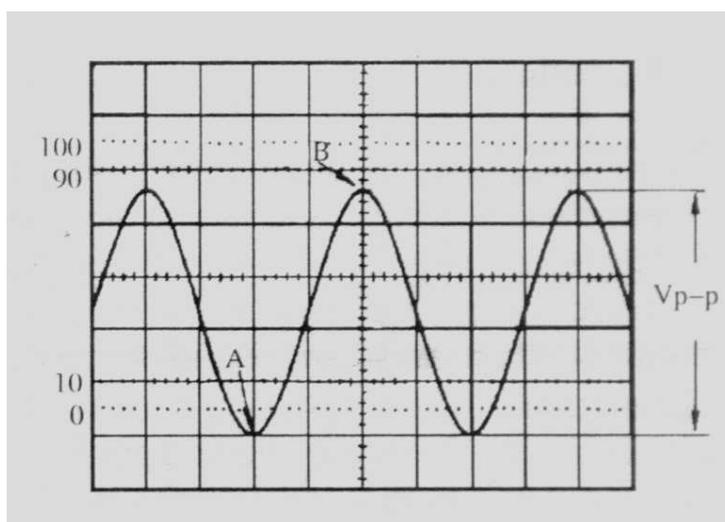


Figura 5.16 – Leitura de tensão no osciloscópio analógico (Manual do osciloscópio).

Para determinar os valores de tensão deve-se quantificar o número de divisões, pico a pico (V_{p-p}), da onda que aparece na tela do osciloscópio. Para encontrar o valor de tensão

correspondente à indicação na curva, multiplica-se a escala vertical utilizada pelo número de divisões determinado na tela do osciloscópio. O valor da aceleração correspondente é obtido por proporcionalidade, onde 2,058 mV (certificado de calibração do acelerômetro) corresponde a 1 m/s^2 , que é a própria sensibilidade do acelerômetro.

A escala de tempo permite a leitura de s, ms e μs , como mostra a Figura 5.17, sendo a posição na escala 10 ms/div.



Figura 5.17 – Escala de tempo do osciloscópio analógico.

A leitura dos valores de tempo (período) é feita no eixo horizontal como mostra a Figura 5.18.

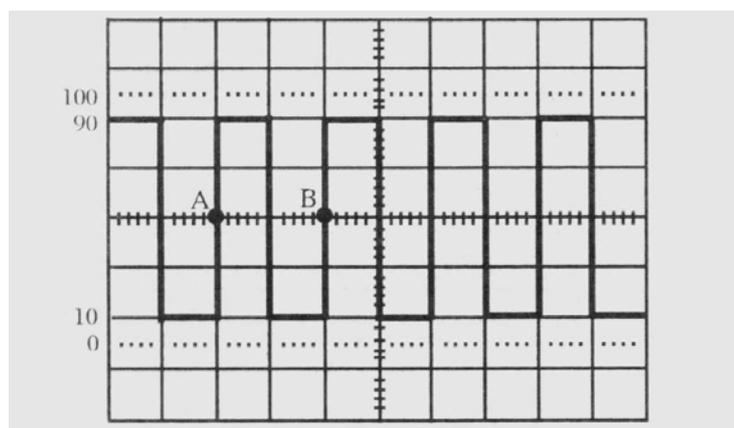


Figura 5.18 – Leitura do período no osciloscópio analógico (Manual do osciloscópio).

Para a determinação do período de vibração é preciso determinar o número de divisões, na escala horizontal, em um período da curva (na Figura 5.18, do ponto A ao B), e multiplicar o número de divisões pela escala utilizada. A frequência é o inverso do período.

A amplitude vibracional foi determinada a partir dos valores de aceleração obtidos por proporcionalidade à tensão.

Como descrito anteriormente (Equação (5.5)) sabemos que: $\ddot{x} = -\omega^2 A \text{sen}\omega t$. No pico máximo $\text{sen}\omega t = -1$, logo, $\ddot{x} = \omega^2 A$. A frequência angular é dada por $\omega = 2\pi f$, onde f é a frequência do sistema e equivale a 60 Hz. Assim, a amplitude de vibração, em milímetros, é obtida como função da aceleração pela Equação 5.11. O valor da aceleração foi obtido com a leitura da tensão no osciloscópio analógico.

$$A = \frac{1000\ddot{x}}{(2\pi f)^2} \quad (5.11)$$

A Figura 5.19 mostra o formato da onda senoidal na tela do osciloscópio obtido durante uma medida experimental. A resolução do osciloscópio é de 1 mV, na escala vertical e de 0,02 μs , na escala de tempo.

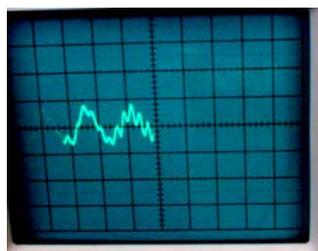


Figura 5.19 – Aspecto da onda senoidal na tela do osciloscópio analógico MO-1225.

A onda fotografada na tela do osciloscópio apareceu somente com dois picos, porém, durante a leitura, a onda visualizada pelo olho humano aparece em toda a extensão do eixo horizontal. Esse fenômeno é devido à diferença de velocidade com que o olho humano e o cérebro captam e processam as imagens, em relação à câmera fotográfica. Na verdade o olho humano visualiza uma sucessão de ondas na tela do osciloscópio, enquanto que a câmera fotográfica registra a imagem apenas em um instante, que provavelmente representa uma fração de segundo. Weber (1973) informou que são transcorridos 0,3 s entre o instante em que o olho humano percebe uma imagem e que a mensagem atinge seu cérebro, contribuindo para o tempo de atraso inerente às tomadas de decisão do ser humano.

5.4.1.2 – Amplitude de Vibração Vertical em Função do Conteúdo de Umidade

A amplitude de vibração na direção vertical foi determinada para todos os experimentos de secagem, tanto do primeiro quanto do segundo planejamento de secagem. Os resultados foram obtidos com o acelerômetro fixo na Posição 2, indicada na Figura 5.20. As outras posições foram marcadas para indicar o local de fixação do acelerômetro nas bandejas

para os ensaios de determinação do amortecimento da vibração ao longo da bandeja, cujos resultados serão discutidos mais adiante.

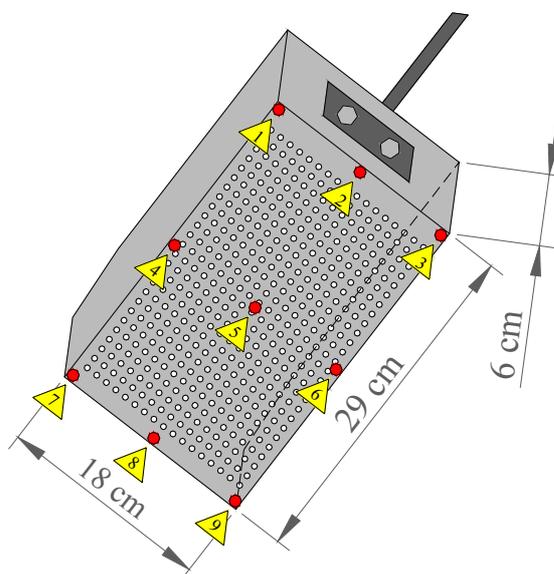


Figura 5.20 – Posições de fixação do acelerômetro nas bandejas.

As bandejas do secador são inclinadas no sentido descendente com ângulo médio em relação à horizontal $3,0^\circ \pm 1,25^\circ$ (B1: $\gamma = 1,3^\circ$; B2: $\gamma = 3,0^\circ$; B3: $\gamma = 3,3^\circ$; B4: $\gamma = 4,3^\circ$). Essa inclinação favorece o transporte dos frutos de café sobre a bandeja.

As Figuras 5.21 a 5.31 mostram os resultados experimentais, para o primeiro planejamento de secagem, de amplitude de vibração na direção vertical aplicada às bandejas e ao alimentador vibratório. Os símbolos AV; B1; B2; B3 e B4, que aparecem na legenda dos gráficos, indicam o alimentador vibratório e as Bandejas 1; 2; 3 e 4, respectivamente.

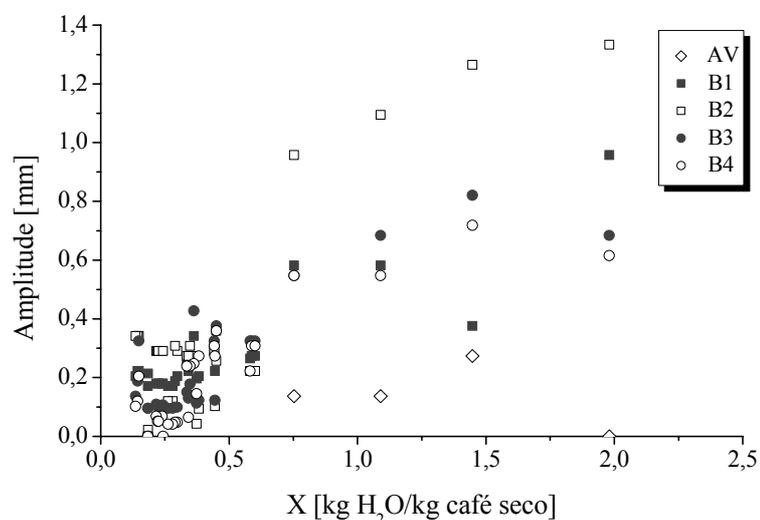


Figura 5.21 – Amplitude de vibração para o Experimento 1.

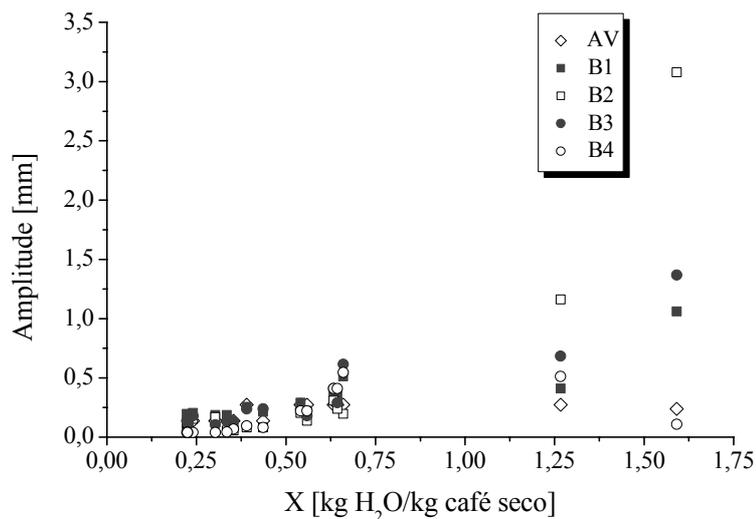


Figura 5.22 – Amplitude de vibração para o Experimento 2.

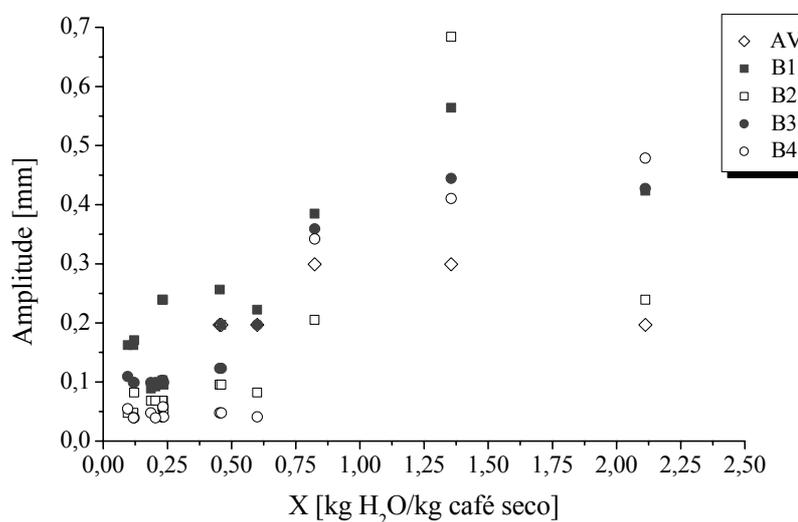


Figura 5.23 – Amplitude de vibração para o Experimento 3.

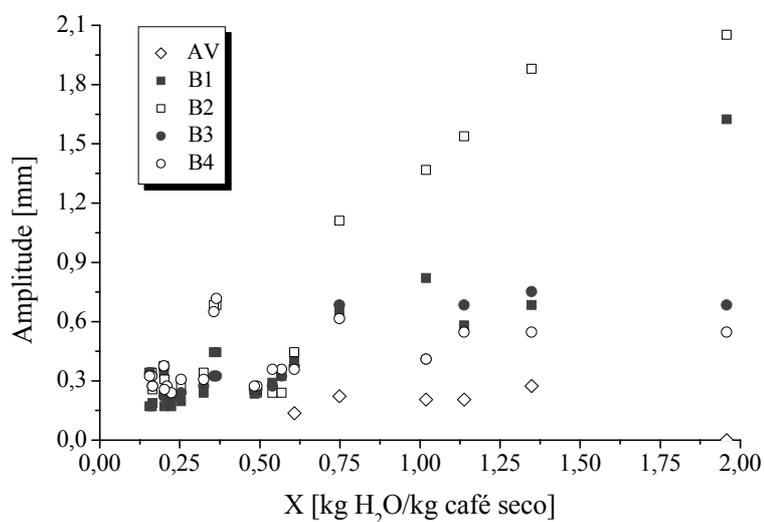


Figura 5.24 – Amplitude de vibração para o Experimento 4.

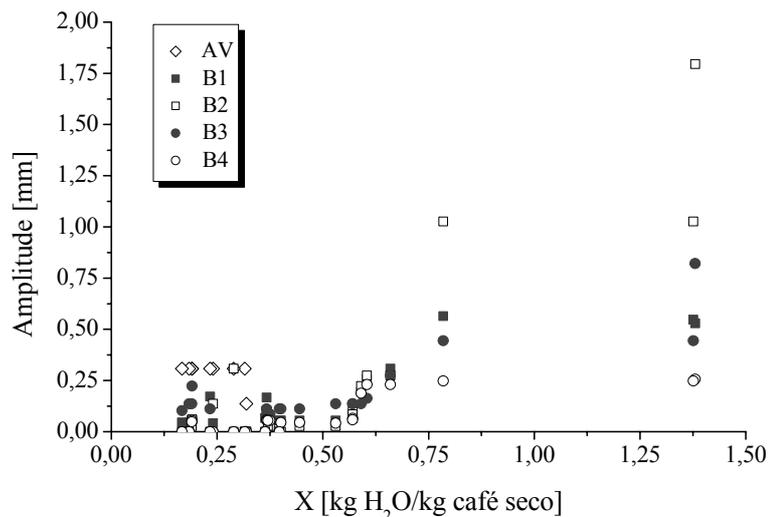


Figura 5.25 – Amplitude de vibração para o Experimento 5.

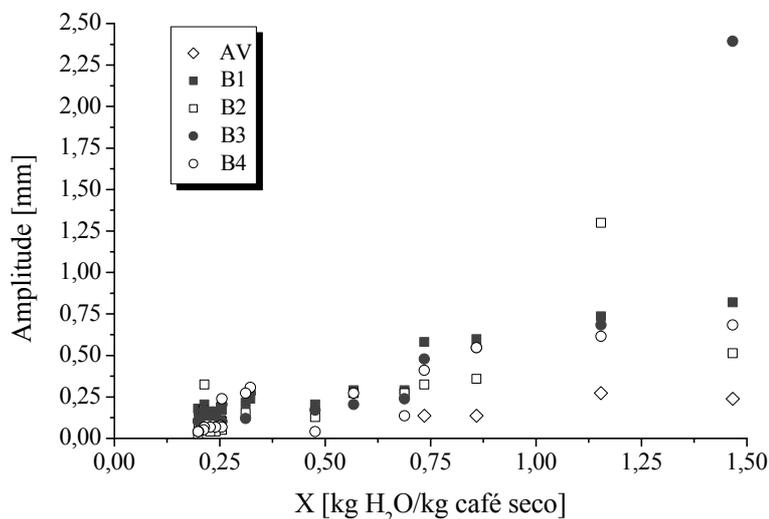


Figura 5.26 – Amplitude de vibração para o Experimento 6.

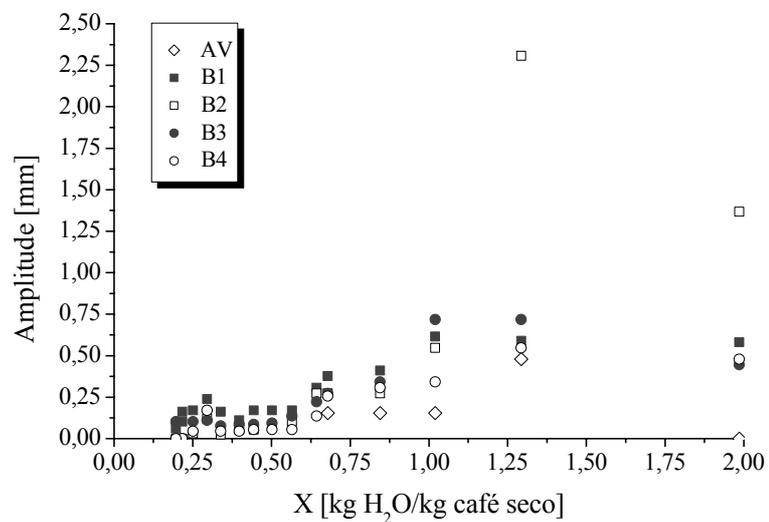


Figura 5.27 – Amplitude de vibração para o Experimento 7.

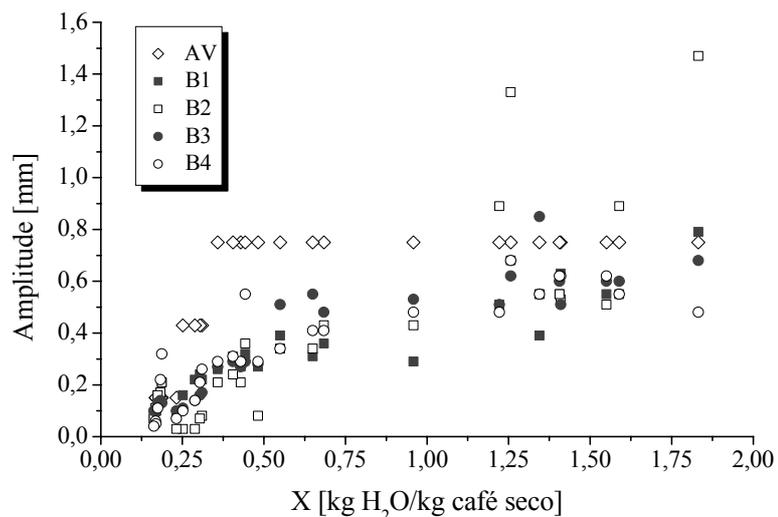


Figura 5.28 – Amplitude de vibração para o Experimento 7 (2005).

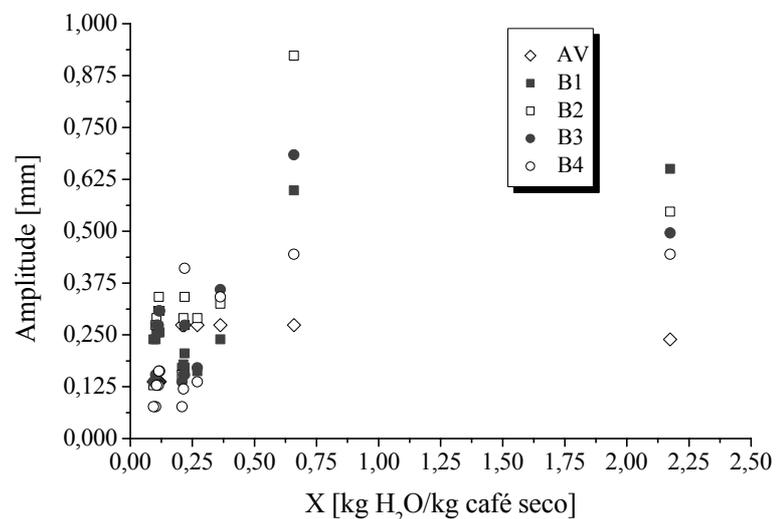


Figura 5.29 – Amplitude de vibração para o Experimento 8.

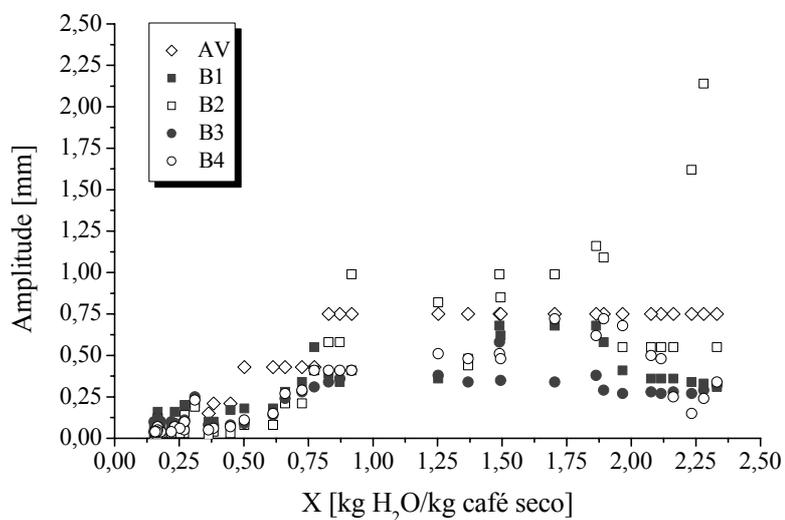


Figura 5.30 – Amplitude de vibração para o Experimento 8 (2005).

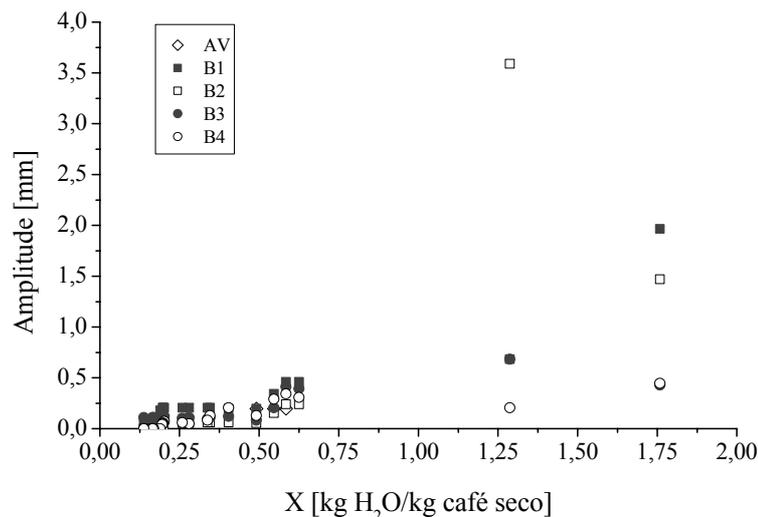


Figura 5.31 – Amplitude de vibração para o Experimento 9.

Os pontos experimentais das Figuras 5.21 a 5.31 indicam que a vibração das bandejas diminuiu consideravelmente com a diminuição do conteúdo de umidade dos frutos de café. A redução média foi de 85% do valor da amplitude inicial. Esta redução deve-se à expressiva diminuição da massa de frutos de café em consequência da redução do conteúdo de umidade, o que possibilitou que o escoamento das partículas ocorresse com facilidade. Além disso, a estrutura celular dos frutos de café é alterada com a secagem. No início os frutos de café, constituídos por quase 70% de água, absorvem parte da energia vibracional e, assim escoam com dificuldade, necessitando maior amplitude de vibração para escoarem sobre as bandejas. Os frutos de café são constituídos de uma polpa mucilaginosa que reveste os grãos e tem características de fluidos, absorvendo, irreversivelmente, a energia vibracional, o que dificulta a transmissão de vibração entre partículas. Ao final da secagem, os frutos de café adquirem uma casca rígida, sendo maior a efetividade da energia vibracional transmitida, necessitando-se de menor amplitude para manter o escoamento sobre a bandeja.

Outro fator que contribui para a redução da amplitude vibracional é a diminuição da pegajosidade dos frutos de café durante a secagem. A quantidade de sólidos solúveis que difundem para a superfície do café no início da secagem, simultaneamente com a água evaporada, torna as partículas pegajosas, com características de materiais coesivos, aderindo às bandejas, à correia transportadora, ao tubo de reciclo e entre si.

A Tabela 5.1 apresenta os valores médios de amplitude de vibração, ponderados pelo conteúdo de umidade (média ponderada), para cada bandeja em três diferentes faixas de umidade, para os experimentos do primeiro planejamento de secagem.

Tabela 5.1 – Dados de amplitude média de vibração (mm), primeiro planejamento de secagem (safra 2003).

Experimento	Bandeja	X [kg H ₂ O/kg café seco]		
		3,0-1,0	1,0-0,43	0,43-0,10
1	B1	0,68	0,34	0,21
	B2	1,25	0,36	0,22
	B3	0,73	0,35	0,15
	B4	0,63	0,34	0,12
	Média	0,82	0,35	0,18
2	B1	0,77	0,33	0,14
	B2	2,23	0,19	0,09
	B3	1,06	0,33	0,13
	B4	0,29	0,31	0,05
	Média	1,09	0,29	0,10
3	B1	0,48	0,28	0,15
	B2	0,41	0,13	0,06
	B3	0,43	0,22	0,10
	B4	0,45	0,15	0,04
	Média	0,44	0,20	0,09
4	B1	1,02	0,38	0,28
	B2	1,78	0,47	0,41
	B3	0,65	0,38	0,28
	B4	0,52	0,39	0,40
	Média	0,99	0,40	0,34
5	B1	0,54	0,22	0,06
	B2	1,41	0,30	0,05
	B3	0,63	0,21	0,08
	B4	0,25	0,15	0,02
	Média	0,71	0,22	0,05
6	B1	0,78	0,42	0,18
	B2	0,86	0,29	0,13
	B3	1,64	0,36	0,15
	B4	0,65	0,31	0,13
	Média	0,98	0,34	0,15
7	B1	0,59	0,29	0,15
	B2	1,46	0,19	0,04
	B3	0,59	0,21	0,07
	B4	0,47	0,16	0,05
	Média	0,78	0,21	0,08
8	B1	0,65	0,60	0,21
	B2	0,55	0,92	0,28
	B3	0,50	0,68	0,23
	B4	0,44	0,44	0,21
	Média	0,54	0,66	0,23
9	B1	1,42	0,37	0,18
	B2	2,37	0,18	0,04
	B3	0,54	0,28	0,11
	B4	0,34	0,27	0,07
	Média	1,17	0,28	0,10

Os dados apresentados na Tabela 5.1 indicam que há uma diminuição da amplitude vibracional com o decréscimo da umidade dos frutos de café. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato da vibração ser aplicada para permitir o escoamento dos frutos de café nas bandejas, e como a massa de café diminui ao longo da secagem, ocorrendo também encolhimento dos frutos de café e diminuição da sua pegajosidade, o escoamento é facilitado, então a vibração aplicada às bandejas deve diminuir. A necessidade de diminuição da intensidade vibracional durante a secagem foi reportada por Finzer e colaboradores (2003) para secagem de frutos de café, com a frequência de vibração sendo reduzida de 10,7 para 8 Hz.

Caso a amplitude de vibração ultrapasse os valores médios indicados, o escoamento dos frutos de café é intensificado, ocorrendo o fracionamento do leito em escoamento e a homogeneidade do leito é suprimida. Neste caso, parte da bandeja ficaria desprovida de partículas e assim, ocorreria o escoamento preferencial de ar naquela região.

A Tabela 5.2 apresenta o quadro de análise de variância (ANOVA), que foi desenvolvido no *software* STATISTICA 5.0, para verificar a influência dos fatores significativos e das interações entre os fatores na amplitude de vibração média das bandejas, com intervalo de confiança de 95%. A amplitude de vibração média (ponderada pelo conteúdo de umidade) foi analisada nas três faixas de conteúdo de umidade citadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.2 – Análise de variância (ANOVA).

Efeitos	A [mm]				A [mm]			A [mm]		
	3,0 – 1,0 kg H ₂ O/kg café seco				1,0-0,43 kg H ₂ O/kg café seco			0,43-0,1 kg H ₂ O/kg café seco		
	GL	SQ	F	<i>p-level</i>	SQ	F	<i>p-level</i>	SQ	F	<i>p-level</i>
T	1	0,003	0,04	0,8529	0,016	0,84	0,4569	0,000	0,02	0,8956
T ²	1	0,015	0,20	0,6962	0,0003	0,01	0,9160	0,005	0,41	0,5862
M	1	0,000	0,00	1,0000	0,003	0,17	0,7196	0,011	0,93	0,4364
M ²	1	0,014	0,19	0,7069	0,017	0,91	0,4408	0,002	0,15	0,7369
Q	1	0,138	1,87	0,3050	0,024	1,26	0,3787	0,000	0,01	0,9476
Q ²	1	0,166	2,25	0,2723	0,062	3,26	0,2127	0,024	2,00	0,2929
Erro	2	0,148	-	-	0,038	-	-	0,024	-	-
Total	8	0,484	-	-	0,162	-	-	0,067	-	-

De acordo com os resultados indicados na Tabela 5.2, verifica-se que nenhuma das variáveis influenciou significativamente o valor médio da amplitude de vibração, em nenhum dos três intervalos de conteúdo de umidade analisados. Esses resultados mostram que a variação da temperatura, da massa e da vazão não alterou significativamente a amplitude vibracional que deve ser aplicada às bandejas para que ocorra escoamento dos frutos de café.

Entretanto, pela observação visual, percebeu-se que o escoamento era muito sensível aos valores de amplitude de vibração aplicados às bandejas, principalmente ao final da secagem, onde uma pequena variação de amplitude acarretava em escoamento excessivo ou paralisação do mesmo.

A determinação da amplitude de vibração para o segundo planejamento de secagem foi realizada adotando-se a mesma metodologia descrita para o primeiro planejamento de secagem.

As Figuras 5.32 a 5.41 mostram os resultados experimentais de amplitude de vibração na direção vertical aplicada às bandejas e ao alimentador vibratório, para o segundo planejamento de secagem. Os símbolos AV; B1; B2; B3 e B4, que aparecem na legenda dos gráficos, indicam o alimentador vibratório e as Bandejas 1; 2; 3 e 4, respectivamente.

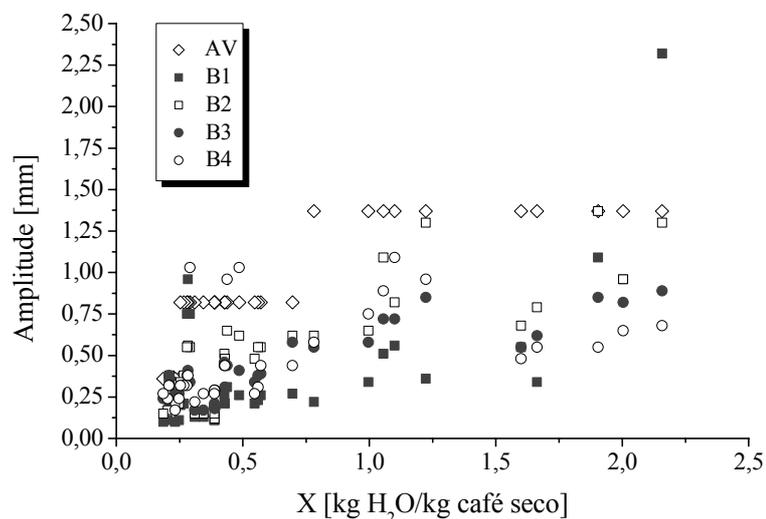


Figura 5.32 – Amplitude de vibração para o Experimento 1.

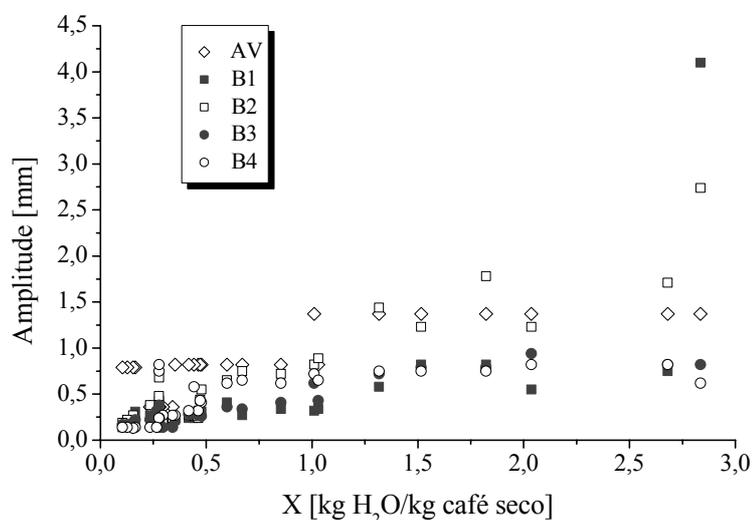


Figura 5.33 – Amplitude de vibração para o Experimento 2.

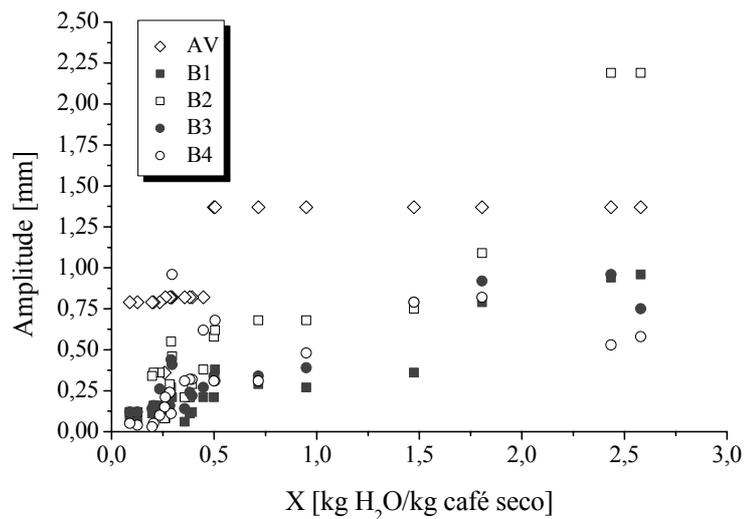


Figura 5.34 – Amplitude de vibração para o Experimento 3.

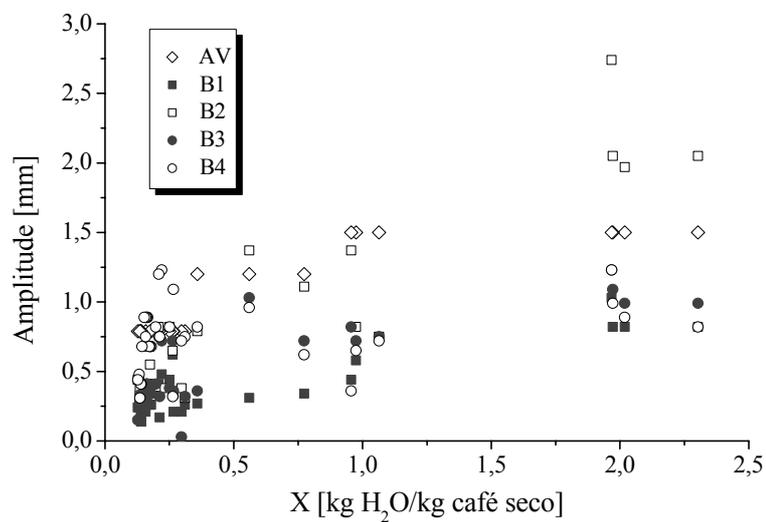


Figura 5.35 – Amplitude de vibração para o Experimento 4.

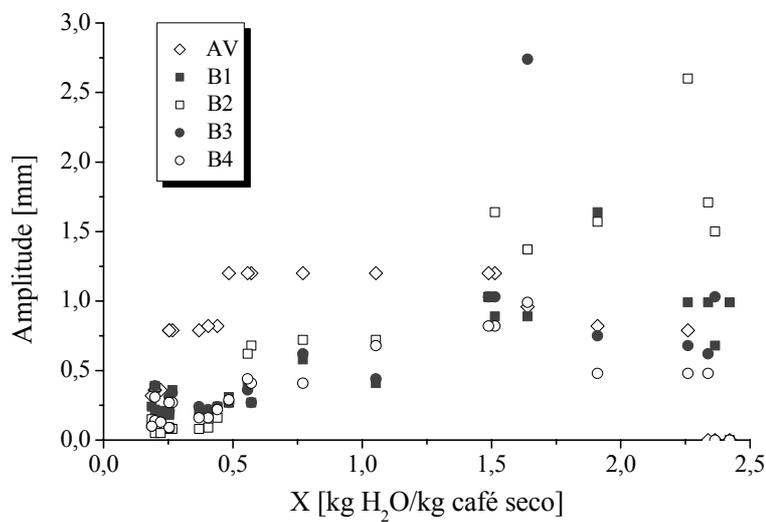


Figura 5.36 – Amplitude de vibração para o Experimento 5.

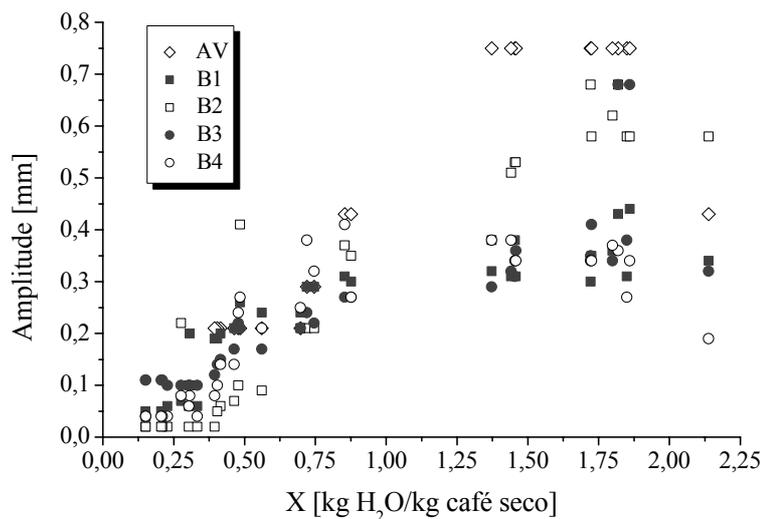


Figura 5.37 – Amplitude de vibração para o Experimento 5 (2005).

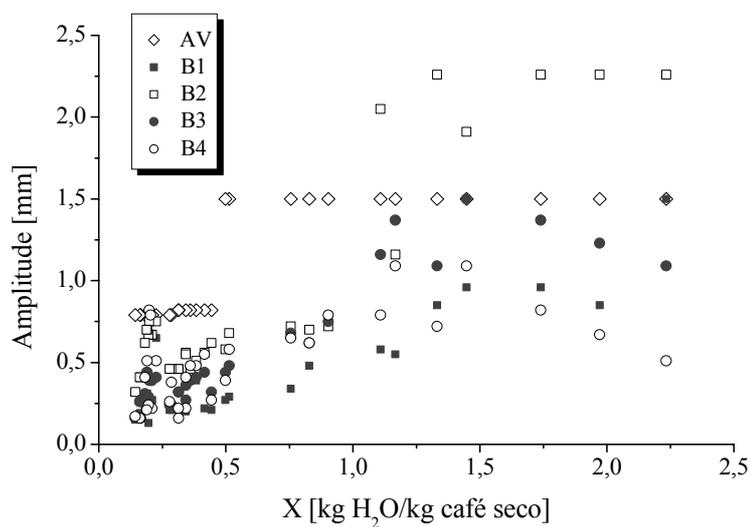


Figura 5.38 – Amplitude de vibração para o Experimento 6.

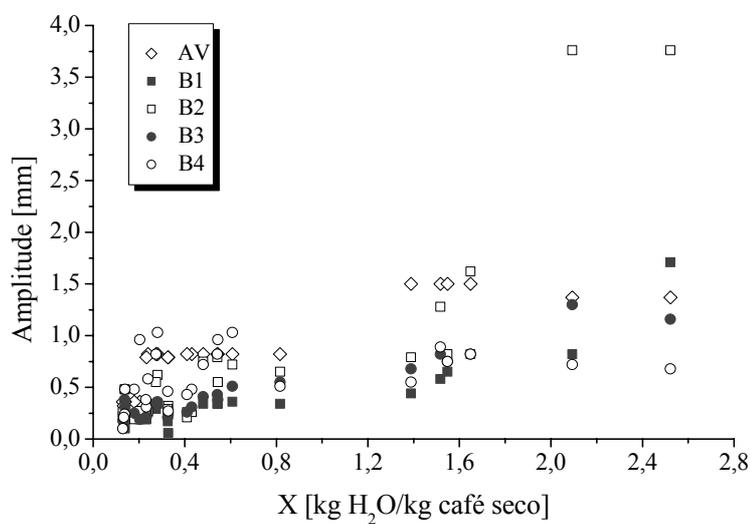


Figura 5.39 – Amplitude de vibração para o Experimento 7.

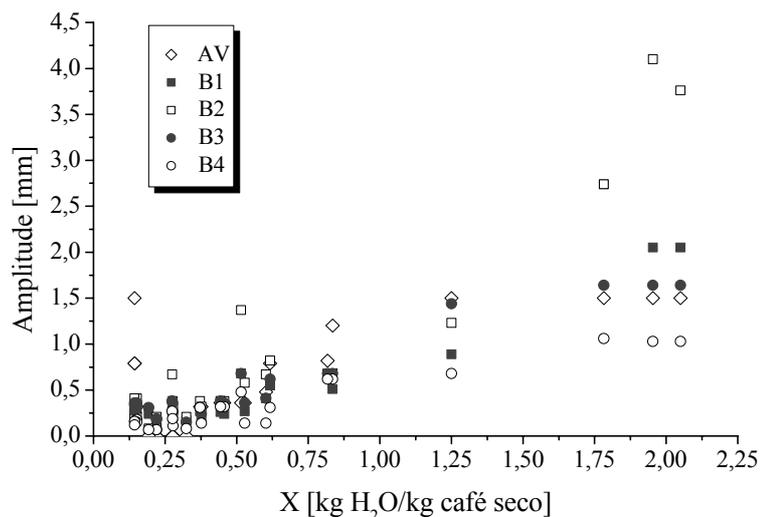


Figura 5.40 – Amplitude de vibração para o Experimento 8.

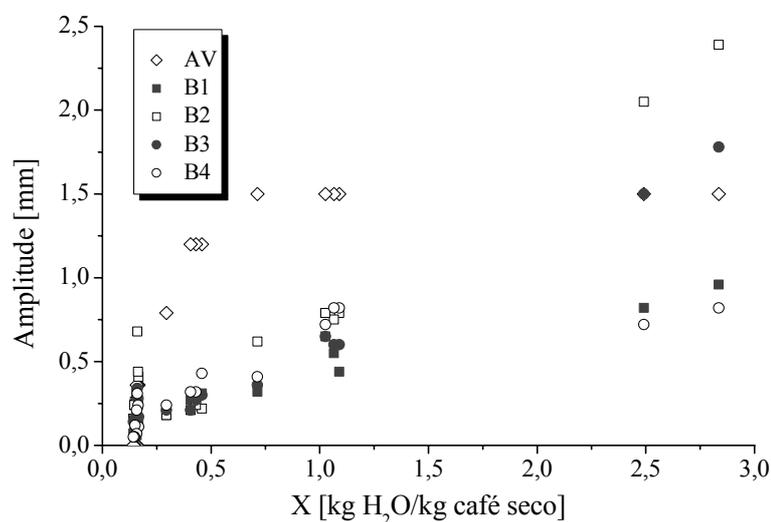


Figura 5.41 – Amplitude de vibração para o Experimento 9.

A amplitude de vibração foi reduzida durante a secagem em cerca de 85% do valor inicial, para todos os experimentos, confirmando a tendência observada nos experimentos do primeiro planejamento de secagem. Entretanto, para o segundo planejamento, os valores de amplitude de vibração foram bem maiores (em média, 30% maiores para $3,0 > X \geq 1,0$; 35% para $1,0 > X \geq 0,43$ e 50% para $0,43 > X \geq 0,1$), quando comparados com o primeiro planejamento de secagem. Esse fenômeno deve-se ao fato de que os frutos de café no ano de 2004 (variedade Mundo Novo) apresentaram grande quantidade de sólidos solúveis difundindo para a superfície do fruto durante a secagem, o que aumentou a pegajosidade e dificultou o escoamento dos frutos de café sobre as bandejas.

A Tabela 5.3 apresenta os valores de amplitude de vibração médios, ponderados pelo conteúdo de umidade (média ponderada), para cada bandeja em três diferentes faixas de umidade.

Tabela 5.3 – Dados de amplitude média de vibração (mm), segundo planejamento de secagem (safra 2004).

Experimento	Bandeja	X [kg H ₂ O/kg café seco]		
		3,0-1,0	1,0-0,43	0,43-0,10
1	B1	0,95	0,27	0,27
	B2	1,05	0,60	0,31
	B3	0,76	0,48	0,29
	B4	0,69	0,59	0,35
	Média	0,86	0,49	0,30
2	B1	1,33	0,32	0,25
	B2	1,66	0,55	0,30
	B3	0,78	0,33	0,22
	B4	0,74	0,54	0,31
	Média	1,13	0,44	0,27
3	B1	0,81	0,27	0,14
	B2	1,69	0,61	0,28
	B3	0,86	0,34	0,22
	B4	0,65	0,46	0,26
	Média	1,00	0,42	0,22
4	B1	0,86	0,44	0,30
	B2	2,03	1,14	0,49
	B3	1,04	0,80	0,38
	B4	0,95	0,61	0,76
	Média	1,22	0,75	0,48
5	B1	0,97	0,38	0,24
	B2	1,61	0,53	0,11
	B3	1,02	0,38	0,24
	B4	0,65	0,37	0,18
	Média	1,06	0,42	0,19
6	B1	0,96	0,44	0,28
	B2	2,07	0,68	0,55
	B3	1,25	0,59	0,35
	B4	0,78	0,59	0,38
	Média	1,26	0,58	0,39
7	B1	0,92	0,34	0,21
	B2	2,27	0,63	0,33
	B3	0,97	0,45	0,26
	B4	0,73	0,75	0,51
	Média	1,22	0,54	0,33
8	B1	2,02	0,48	0,23
	B2	3,15	0,70	0,31
	B3	1,60	0,55	0,28
	B4	0,97	0,40	0,16
	Média	1,94	0,53	0,24
9	B1	0,76	0,31	0,17
	B2	1,69	0,40	0,28
	B3	1,26	0,32	0,19
	B4	0,78	0,39	0,18
	Média	1,12	0,36	0,20

Os resultados da Tabela 5.3 indicam que a amplitude de vibração foi maior para a Bandeja 2, apesar de sua inclinação ser de 3°, enquanto que a inclinação da Bandeja 1 é de 1,3°. Em quase todos os experimentos, a Bandeja 4 apresentou os menores valores de amplitude vibracional, principalmente para o início da secagem. Ao final da secagem e em período intermediário, os menores valores de amplitude aconteceram na Bandeja 1, apesar de sua menor inclinação.

A Tabela 5.4 apresenta o quadro de análise de variância (ANOVA), que foi desenvolvido no *software* STATISTICA 5.0, para verificar a influência dos fatores significativos e das interações entre os fatores na amplitude de vibração média das bandejas, com intervalo de confiança de 95%. A amplitude de vibração média (ponderada pelo conteúdo de umidade) foi analisada nas três faixas de conteúdo de umidade citadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.4 – Análise de variância (ANOVA).

Efeitos	A [mm]				A [mm]			A [mm]		
	3,0 – 1,0 kg H ₂ O/kg café seco				1,0-0,43 kg H ₂ O/kg café seco			0,43-0,1 kg H ₂ O/kg café seco		
	GL	SQ	F	<i>p-level</i>	SQ	F	<i>p-level</i>	SQ	F	<i>p-level</i>
M	1	0,277	2,73	0,1972	0,001	0,08	0,7903	0,000	0,01	0,9351
M ²	1	0,002	0,02	0,8972	0,029	2,28	0,2283	0,017	2,05	0,2480
Q	1	0,001	0,01	0,9249	0,029	2,33	0,2246	0,015	1,76	0,2764
Q ²	1	0,139	1,36	0,3272	0,007	0,57	0,5051	0,015	1,76	0,2762
MQ	1	0,014	0,14	0,7317	0,003	0,24	0,6582	0,001	0,07	0,8040
Erro	3	0,305	-	-	0,038	-	-	0,026	-	-
Total	8	0,738	-	-	0,107	-	-	0,074	-	-

De acordo com os resultados indicados na Tabela 5.4, verifica-se que nenhuma das variáveis influenciou significativamente o valor médio da amplitude de vibração, em nenhum dos três intervalos de conteúdo de umidade analisados. Esses resultados mostram que a variação da massa e da vazão não alterou significativamente a amplitude vibracional que deve ser aplicada às bandejas para que ocorra escoamento dos frutos de café. Entretanto, pela observação visual, percebeu-se que o escoamento era muito sensível aos valores de amplitude de vibração aplicados às bandejas, principalmente ao final da secagem, onde uma pequena variação de amplitude acarretava em escoamento excessivo ou paralisação do mesmo.

5.4.1.3 – Determinação da Amplitude na Direção Vertical ao Longo da Bandeja

O estudo do amortecimento da vibração ao longo da bandeja foi realizado apenas para o Experimento 3 do primeiro planejamento de secagem, cujas condições operacionais

foram: temperatura do fruto de 40°C; massa inicial de 13,5 kg café e vazão de ar de 8,0 kg ar/min.

A determinação da amplitude vertical em diferentes pontos das bandejas facilitará a compreensão fenomenológica do escoamento dos frutos de café sobre as mesmas. As posições em que o acelerômetro foi fixado em cada bandeja estão indicadas na Figura 5.20 da Seção 5.4.1.2. Utilizou-se a mesma metodologia experimental e de cálculo adotada para a determinação da amplitude de vibração na posição central (2).

As Figuras 5.42 a 5.45 mostram os resultados de amplitude de vibração ao longo da bandeja.

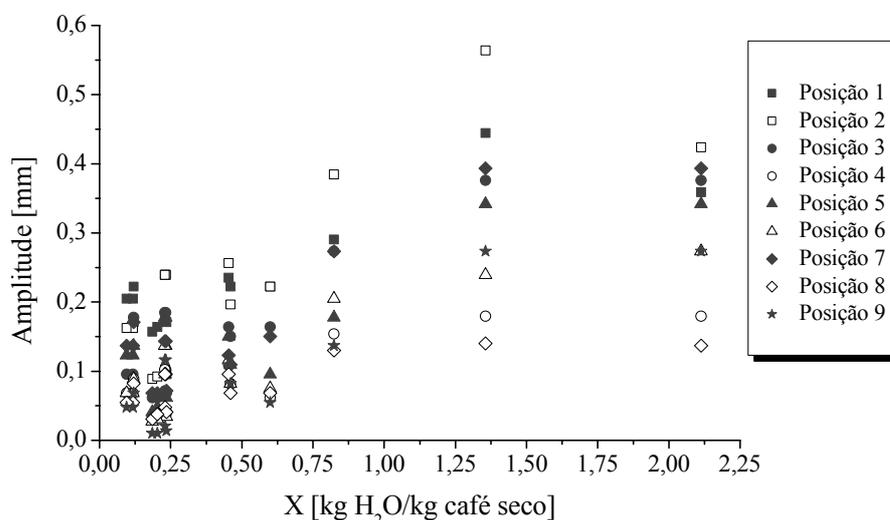


Figura 5.42 – Amplitude vibracional para a Bandeja 1.

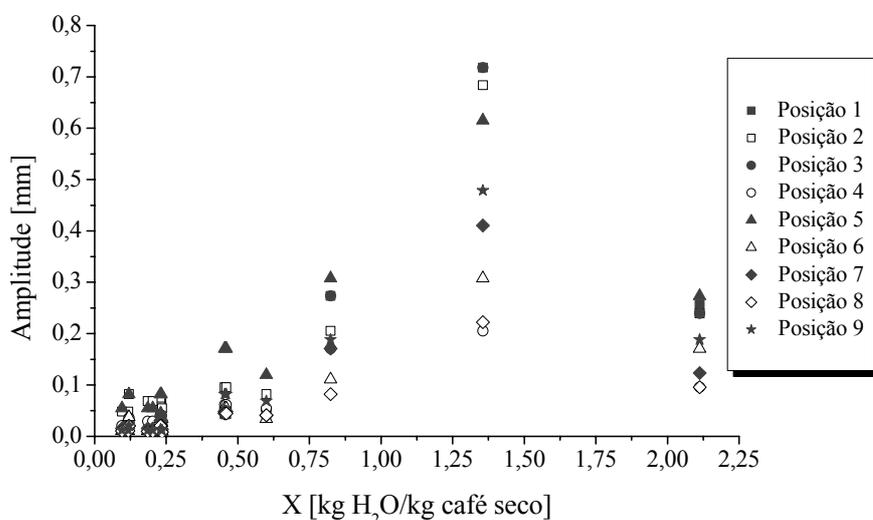


Figura 5.43 – Amplitude vibracional para a Bandeja 2.

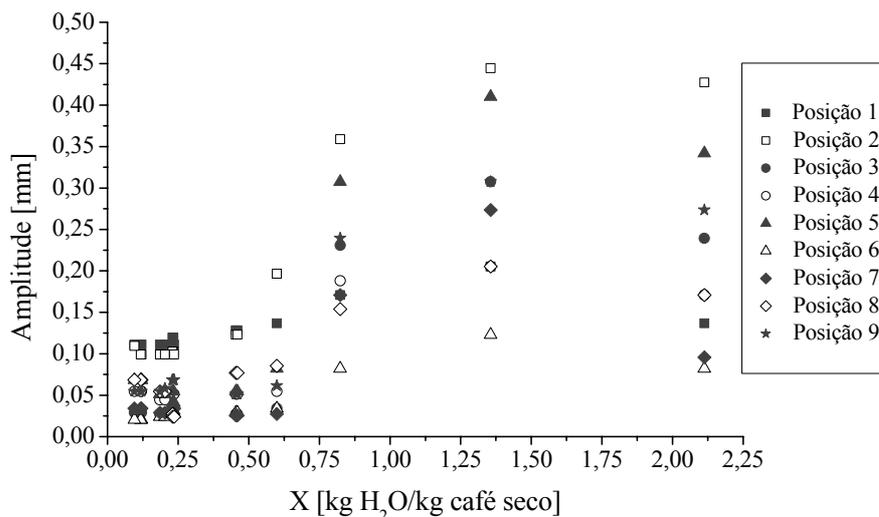


Figura 5.44 – Amplitude vibracional para a Bandeja 3.

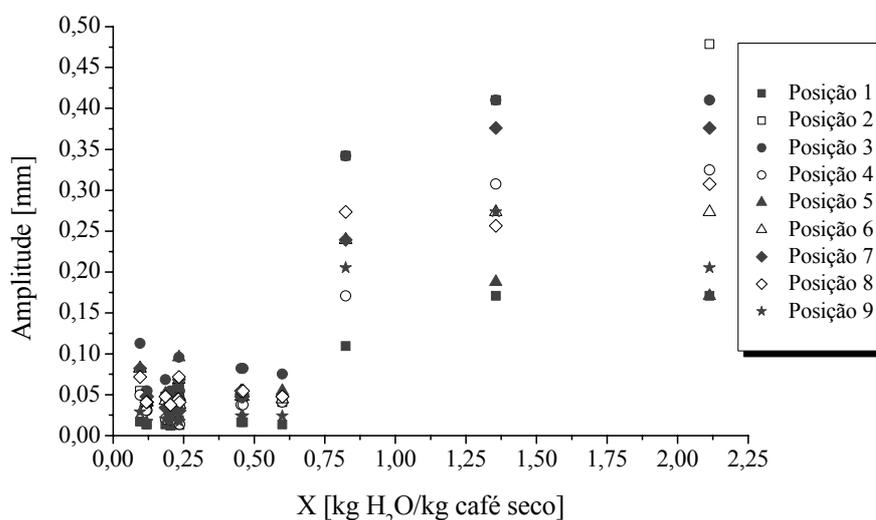


Figura 5.45 – Amplitude vibracional para a Bandeja 4.

A análise dos dados obtidos na Figura 5.42 possibilita verificar que a intensidade vibracional é mais intensa na proximidade do eixo e no centro da bandeja. Na descarga da bandeja (posição 8), tem-se a menor amplitude de vibração. Isso pode refletir a menor rigidez da Bandeja 1, na Posição 8, já que nas extremidades laterais, a dobra da chapa de aço carbono a torna mais rígida. Isso se constitui em uma tendência, entretanto esse comportamento não pode ser generalizado para todas as bandejas, sobretudo, por não serem idênticas, não sendo construídas com mecânica de precisão.

As Figuras 5.46 a 5.49 apresentam o comportamento da amplitude vibracional média ao longo das bandejas. A superfície tridimensional foi plotada em função das dimensões das bandejas (comprimento e largura).

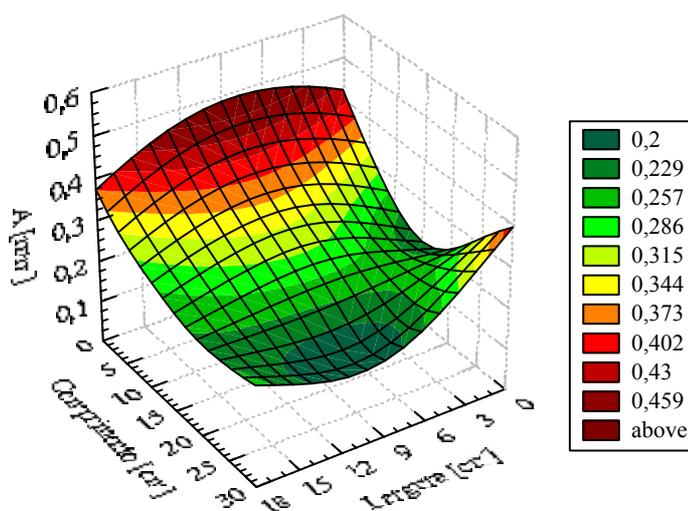


Figura 5.46 – Amplitude vibracional média para a Bandeja 1.

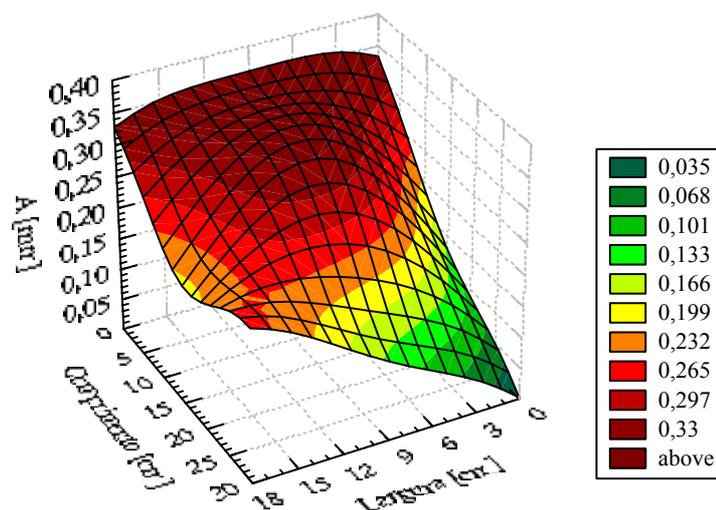


Figura 5.47 – Amplitude vibracional média para a Bandeja 2.

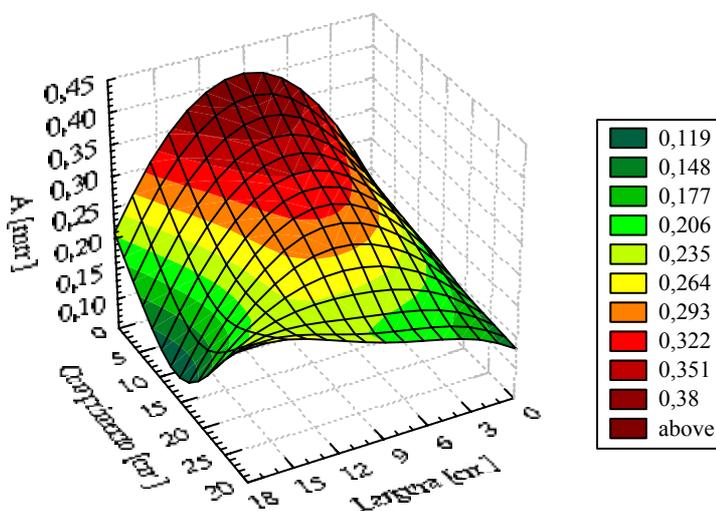


Figura 5.48 – Amplitude vibracional média para a Bandeja 3.

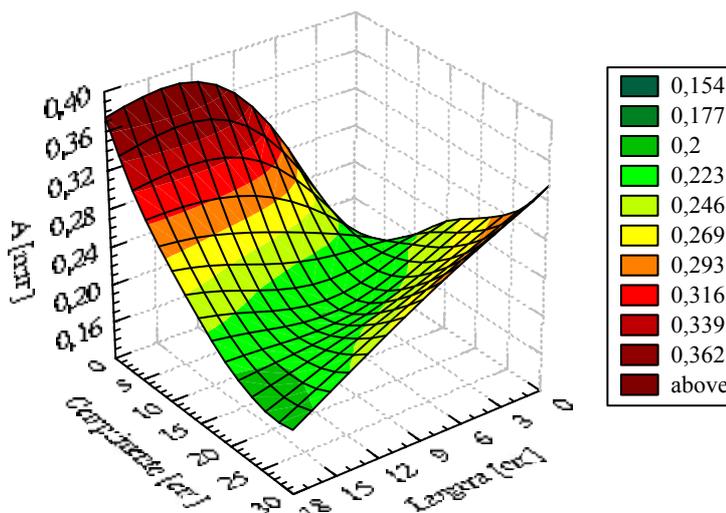


Figura 5.49 – Amplitude vibracional média para a Bandeja 4.

A Figura 5.46 indica que o comportamento da amplitude vibracional na Bandeja 1 tende a diminuir no sentido do comprimento da bandeja, atingindo um valor mínimo na Posição 8, indicada na Figura 5.20. Já, para a Bandeja 2 (Figura 5.47) a atenuação da amplitude ocorre com menor intensidade ao longo da bandeja, sendo menor apenas na Posição 7. A Bandeja 3 apresentou um comportamento próximo da Bandeja 2, entretanto a variação na direção da largura foi maior, onde o ponto de menor amplitude de vibração localiza-se próximo da Posição 6. A Bandeja 4 apresentou um comportamento bem diferente das demais, com duas regiões opostas onde a amplitude foi menor (Posição 1 e 9).

5.4.1.4 – Cálculo do Adimensional de Vibração (Γ)

Os vibradores eletromagnéticos utilizados neste trabalho produzem uma força de excitação inclinada tendo uma componente da direção x (horizontal) e outra na direção y (vertical). Como a amplitude de vibração foi determinada apenas na direção y, devido às características do acelerômetro utilizado nas medidas, não é possível determinar a resultante e o ângulo de excitação. Desta forma o adimensional de vibração foi determinado para a direção y, utilizando-se a Equação (5.8) com as seguintes considerações: $\theta = 90^\circ$ e γ variando entre $1,3$ e $4,3^\circ$, de acordo com a inclinação de cada bandeja.

As Figuras 5.50 a 5.60 mostram a variação do adimensional (Γ) de vibração em função do conteúdo de umidade, para cada bandeja e o valor médio, para os experimentos realizados no primeiro planejamento de secagem. A reta horizontal de cor laranja, nas Figuras 5.50 a 5.60, representa $\Gamma = 1$ e Γ_m indica o adimensional de vibração médio.

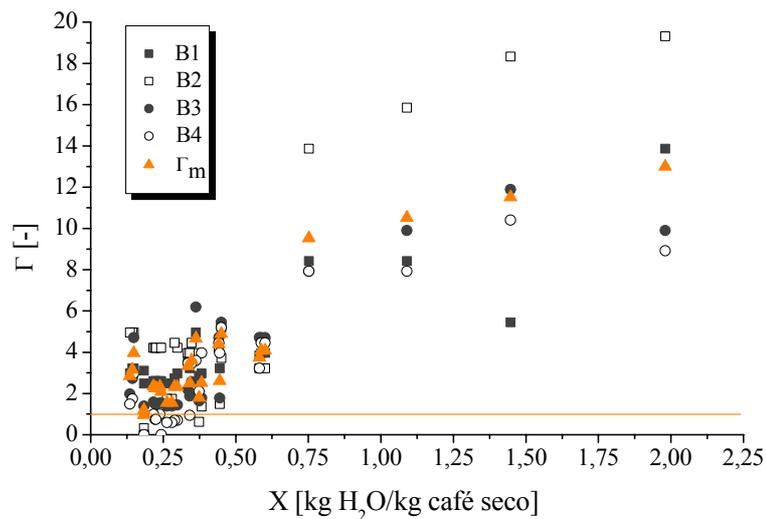


Figura 5.50 – Adimensional de vibração para o Experimento 1.

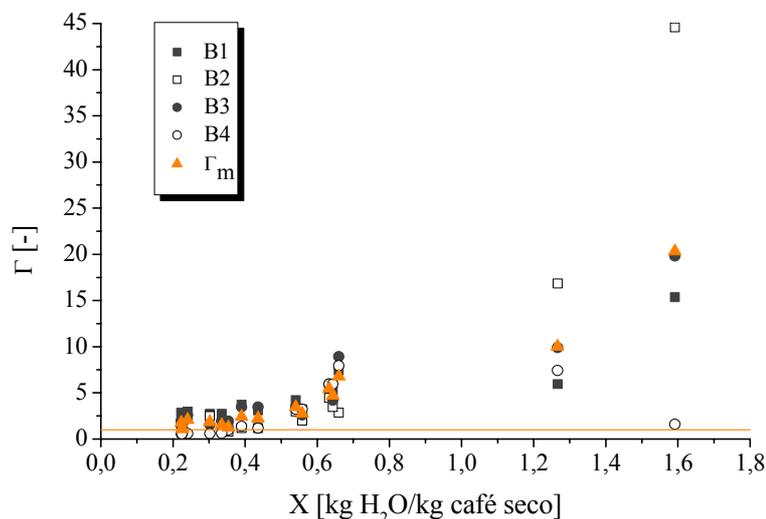


Figura 5.51 – Adimensional de vibração para o Experimento 2.

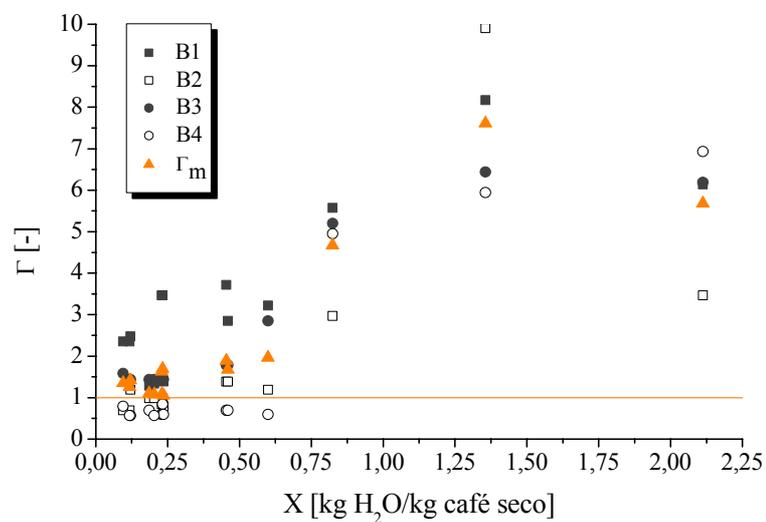


Figura 5.52 – Adimensional de vibração para o Experimento 3.

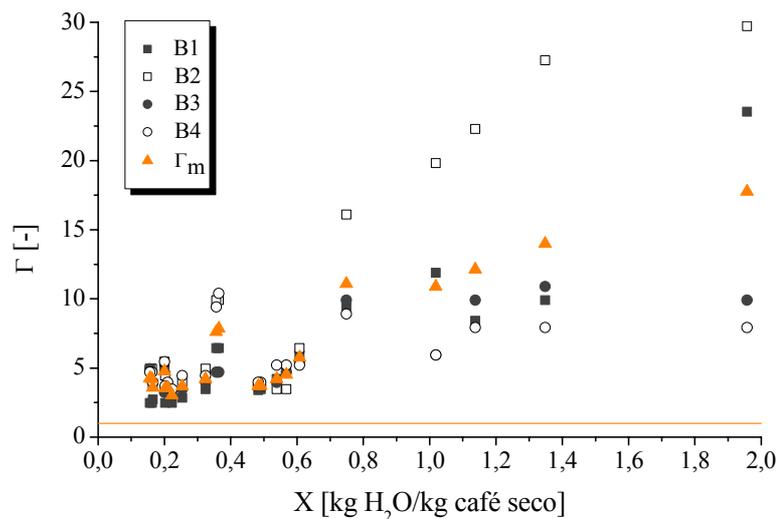


Figura 5.53 – Adimensional de vibração para o Experimento 4.

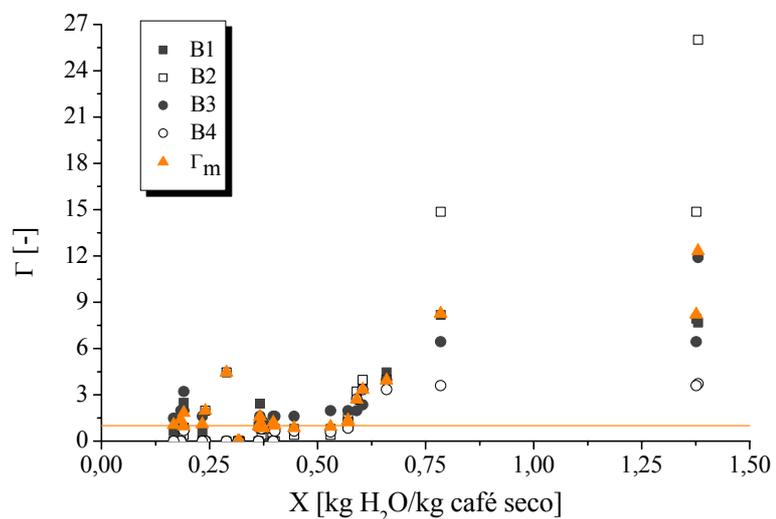


Figura 5.54 – Adimensional de vibração para o Experimento 5.

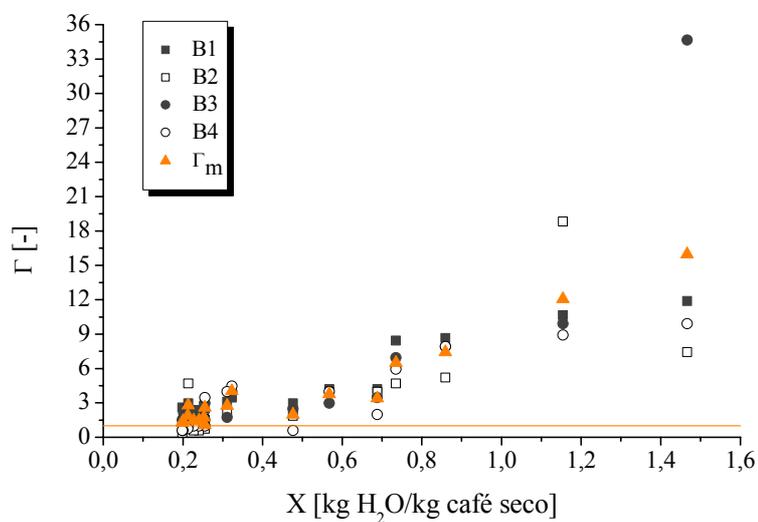


Figura 5.55 – Adimensional de vibração para o Experimento 6.

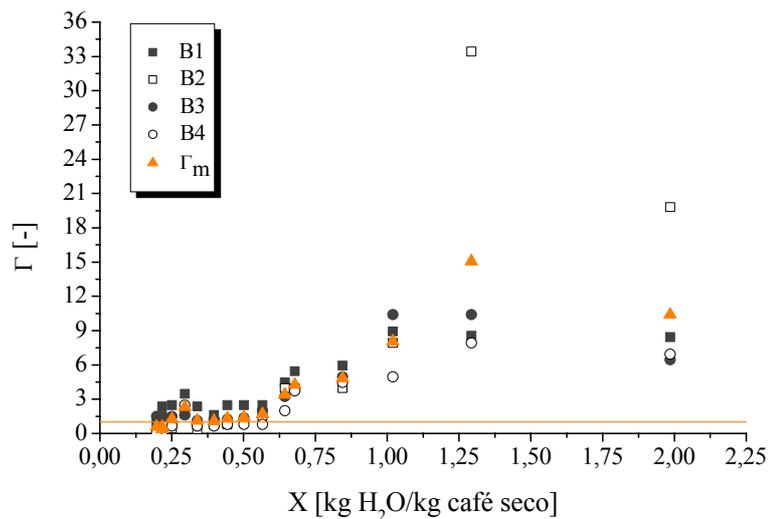


Figura 5.56 – Adimensional de vibração para o Experimento 7.

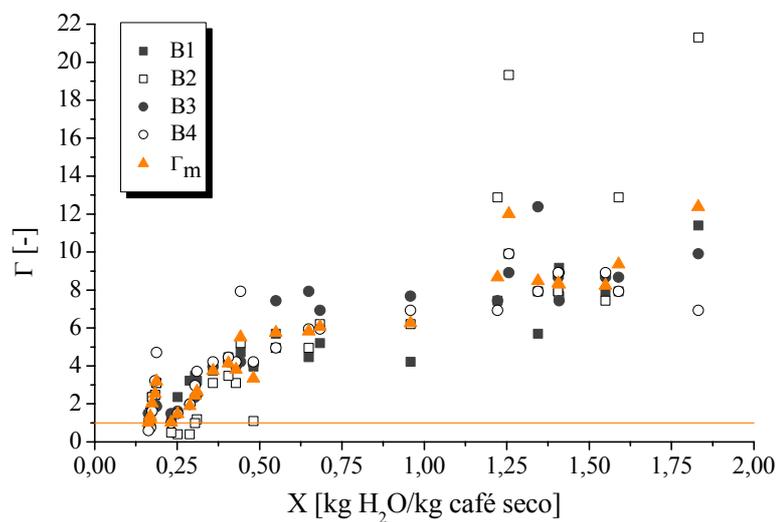


Figura 5.57 – Adimensional de vibração para o Experimento 7 (2005).

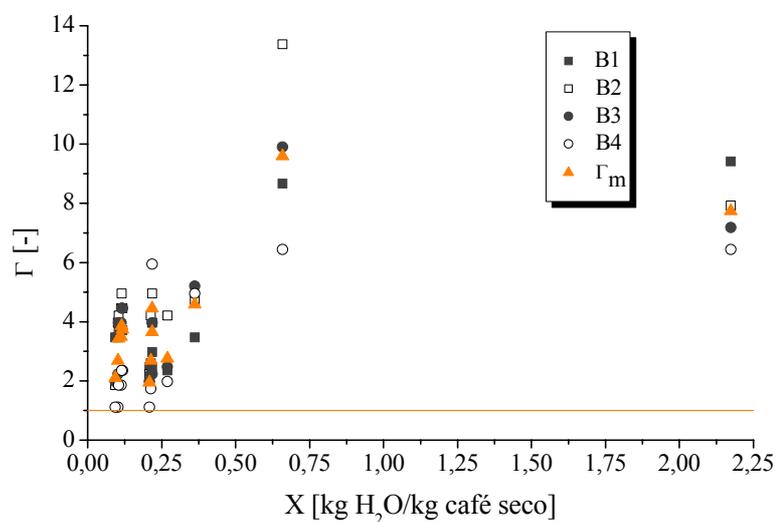


Figura 5.58 – Adimensional de vibração para o Experimento 8.

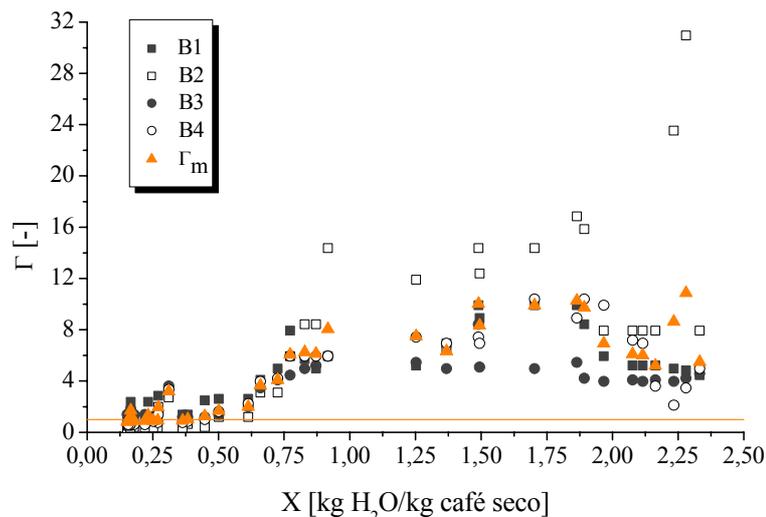


Figura 5.59 – Adimensional de vibração para o Experimento 8 (2005).

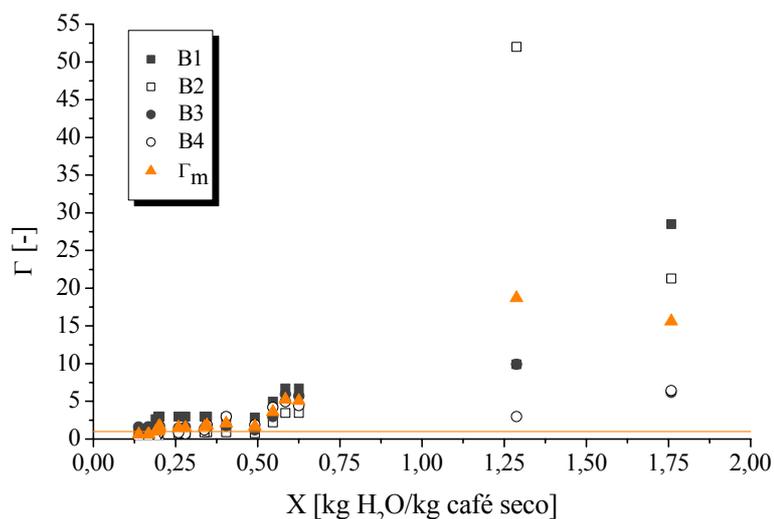


Figura 5.60 – Adimensional de vibração para o Experimento 9.

Os dados apresentados nas Figuras 5.50 a 5.60 indicam que o adimensional de vibração, da mesma forma que a amplitude, diminui expressivamente (em média cerca de 87%) com a redução no conteúdo de umidade dos frutos de café. No início da secagem, os valores do adimensional de vibração para cada bandeja diferem bastante entre si. Contudo, durante a secagem essa diferença diminui, fazendo com que o adimensional de vibração de cada bandeja aproxime-se do valor médio. Para alguns experimentos, no início da secagem os valores de Γ são menores (Experimento 3 e 7, por exemplo), aumentando em seguida.

Os valores de adimensional de vibração mostram que a maior parte da secagem é conduzida com $\Gamma > 1$ e, para os Experimentos 4 e 8, o adimensional de vibração é sempre maior do que 1. A tendência à condição de compactação do leito ($\Gamma < 1$) ocorre sempre ao

final da secagem e, principalmente, para as Bandejas 2 e 4. Quando os frutos de café atingiam cerca de 0,5 kg H₂O/kg café seco, o valor do adimensional de vibração aproximava-se da unidade para a maioria dos experimentos. Em alguns casos, este valor permanecia praticamente constante ou diminuía ligeiramente. Na verdade, $\Gamma < 1$ indica que a contribuição da componente vertical torna-se pequena em relação à componente horizontal, visto que o ângulo de excitação, segundo Martins (1997), diminui com a diminuição da vibração. Segundo Cheah e colaboradores (1988), nesta condição não há movimento de salto das partículas.

A Tabela 5.5 mostra os valores médios do adimensional de vibração para os experimentos do primeiro planejamento de secagem, para três faixas de conteúdo de umidade dos frutos de café. Os valores indicados são valores médios ponderados pelo conteúdo de umidade e Γ_m é a média ponderada de todas as medidas para cada experimento.

Tabela 5.5 – Média ponderada do adimensional de vibração para o primeiro planejamento de secagem, em três faixas de conteúdo de umidade dos frutos de café.

Experimento	X [kg H ₂ O/kg café seco]			Γ_m [-]
	3,0-1,0	1,0-0,43	0,43-0,10	
1	11,93	5,06	2,53	6,37
2	15,77	4,22	1,49	7,29
3	6,44	5,01	1,30	4,18
4	14,38	5,89	4,94	9,70
5	10,27	3,17	1,22	4,00
6	14,26	4,99	2,14	6,91
7	11,25	3,11	1,11	6,26
7 (2005)	9,55	5,43	2,51	7,50
8	7,74	9,60	3,40	6,12
8 (2005)	7,89	4,83	1,28	6,72
9	16,91	4,02	1,43	7,47

Esses dados são muito importantes tecnologicamente, podem ser utilizados para estudos de consumo energético na secagem de café. No início da secagem têm-se duas alternativas: utilizar mais energia vibracional para movimentar o café, a qual é reduzida cerca de 90% ao final da secagem ou então realizar a secagem preliminar em leito fixo, em estufas de secagem (o que em termos de higiene, é mais indicado do que a secagem em terreiro).

As Figuras 5.61 a 5.70 apresentam a variação do adimensional de vibração em função do conteúdo de umidade, para cada bandeja e o valor médio, para o segundo planejamento de secagem. A reta horizontal de cor laranja, nas Figuras 5.61 a 5.70, representa $\Gamma = 1$ e os triângulos de cor laranja representam o valor médio do adimensional de vibração.

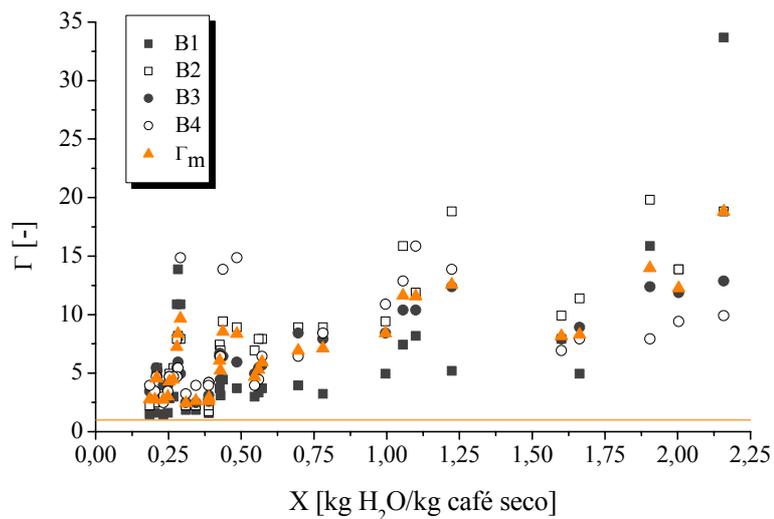


Figura 5.61 – Adimensional de vibração para o Experimento 1.

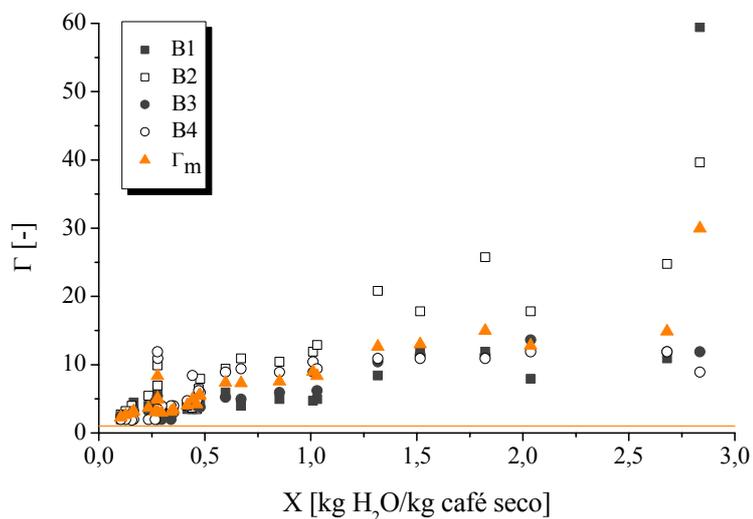


Figura 5.62 – Adimensional de vibração para o Experimento 2.

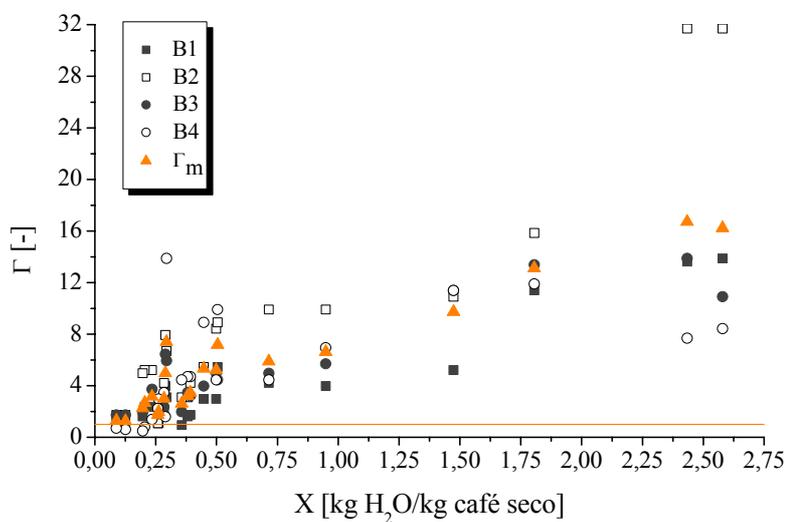


Figura 5.63 – Adimensional de vibração para o Experimento 3.

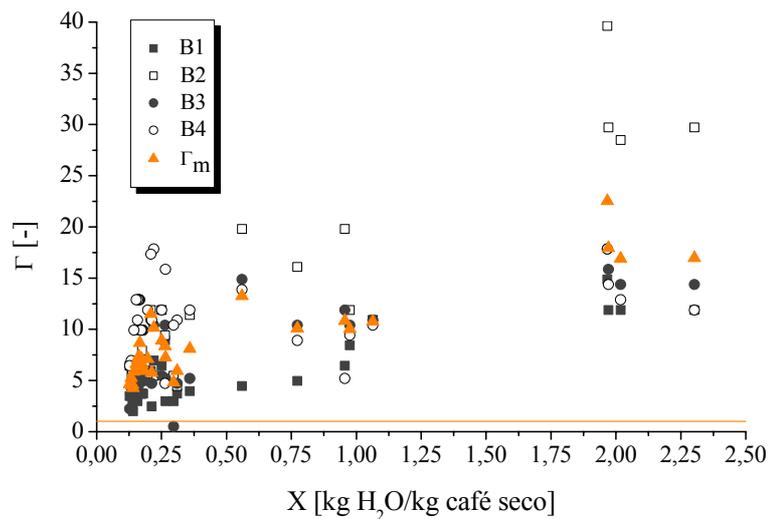


Figura 5.64 – Adimensional de vibração para o Experimento 4.

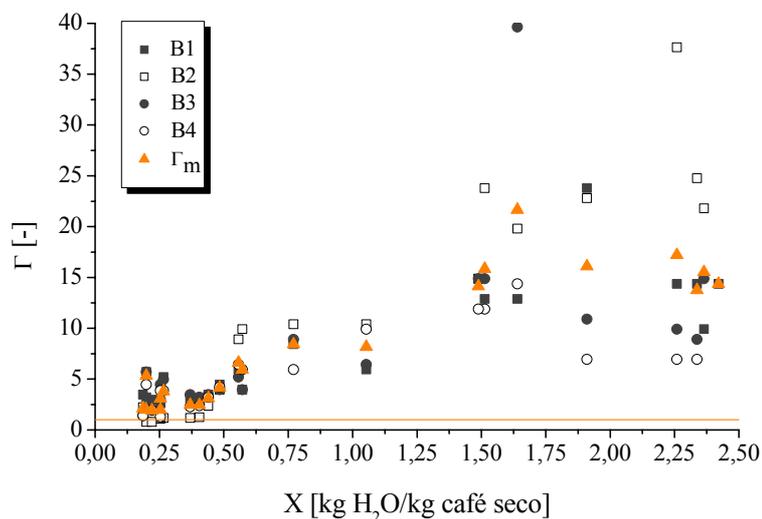


Figura 5.65 – Adimensional de vibração para o Experimento 5.

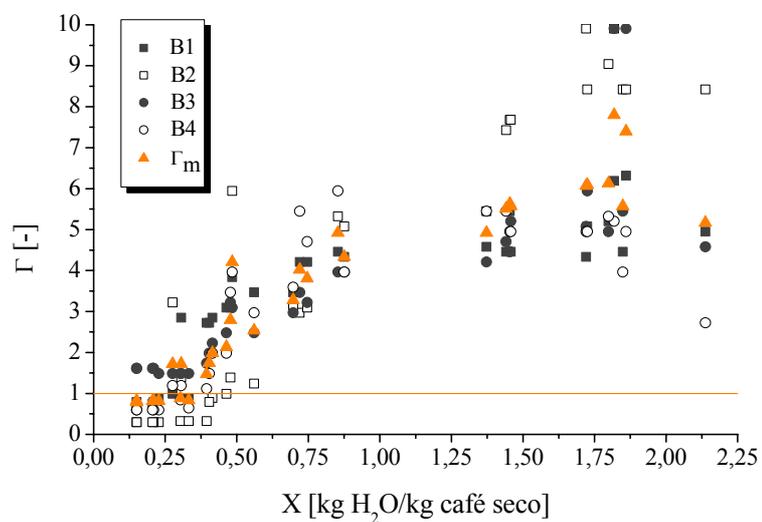


Figura 5.66 – Adimensional de vibração para o Experimento 5 (2005).

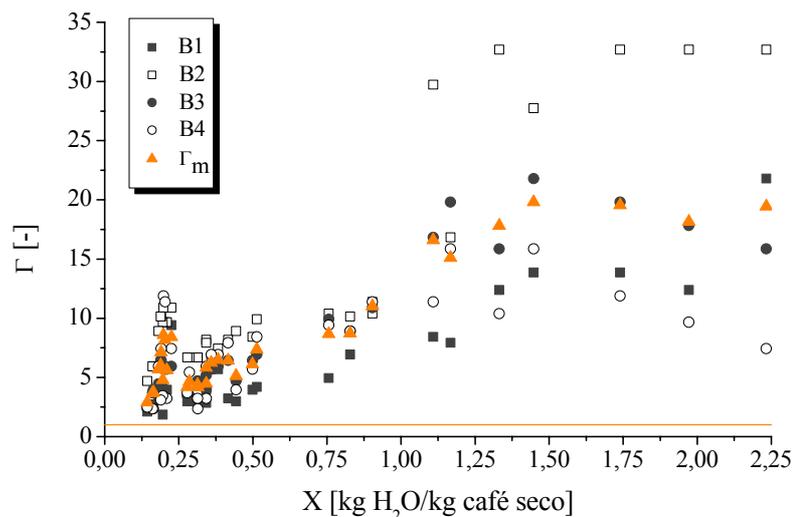


Figura 5.67 – Adimensional de vibração para o Experimento 6.

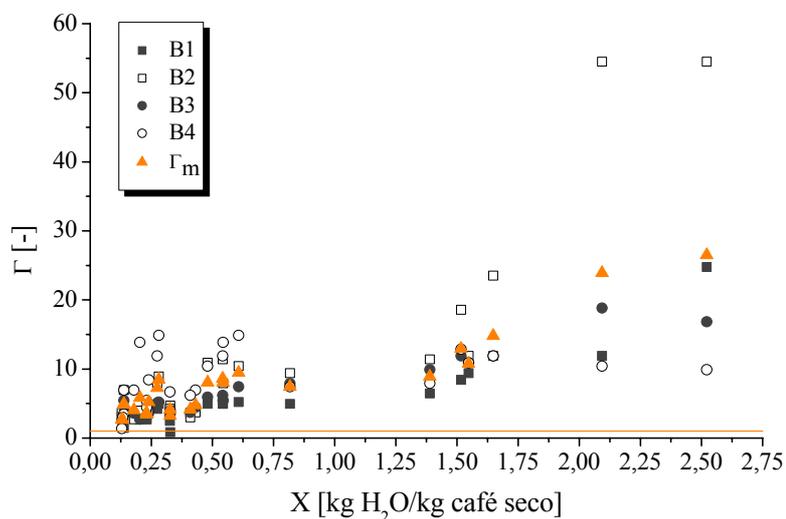


Figura 5.68 – Adimensional de vibração para o Experimento 7.

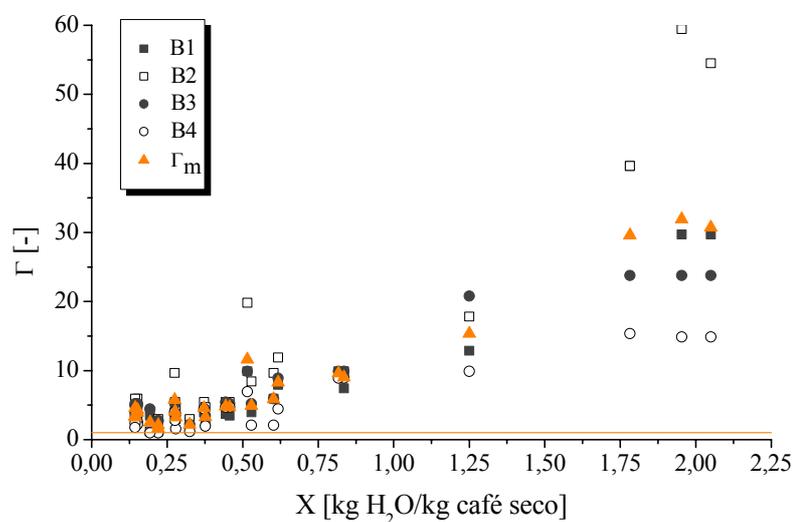


Figura 5.69 – Adimensional de vibração para o Experimento 8.

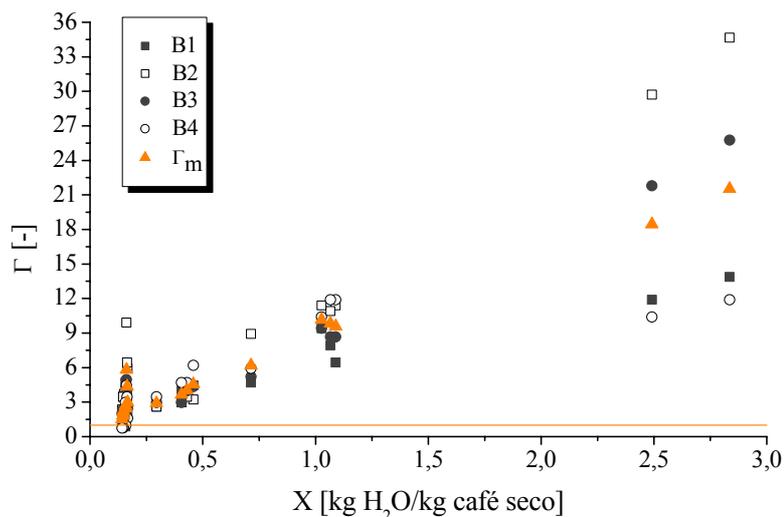


Figura 5.70 – Adimensional de vibração para o Experimento 9.

O adimensional de vibração diminuiu em média cerca de 87% com a redução do conteúdo de umidade dos frutos de café.

A Tabela 5.6 apresenta os valores médios do adimensional de vibração para os experimentos realizados no segundo planejamento de secagem para três intervalos de conteúdo de umidade e a média ponderada (pelo conteúdo de umidade) do adimensional de vibração (Γ_m) para todos os valores de amplitude.

Tabela 5.6 – Média ponderada do adimensional de vibração para o segundo planejamento de secagem, em três faixas de conteúdo de umidade dos frutos de café.

Experimento	X [kg H ₂ O/kg café seco]			Γ_m [-]
	3,0-1,0	1,0-0,43	0,43-0,10	
1	12,52	7,00	4,41	8,42
2	16,30	6,31	3,92	12,45
3	14,54	6,13	3,25	10,19
4	17,63	10,83	6,95	13,37
5	15,65	6,01	2,75	12,90
5 (2005)	6,03	3,71	1,31	4,97
6	18,33	8,33	5,63	13,13
7	17,72	7,83	4,74	13,35
8	28,04	7,67	3,51	16,25
9	16,27	5,14	3,00	12,42

Nesse estudo foi utilizado café da mesma variedade o que mostra uma tendência mais generalizada. Contudo, o comportamento é o mesmo do anterior, ao final da secagem, o adimensional de vibração reduz-se, ligeiramente, quando comparado com variedades mistas de café do primeiro planejamento de secagem. A necessidade de operar com maior intensidade vibracional reflete a característica da matéria-prima, a qual na ocasião da colheita,

no segundo planejamento de secagem, possuía grande quantidade de sólidos solúveis, o que conferia maior pegajosidade aos frutos de café.

A intensidade de vibração, discutida neste capítulo, tem a finalidade de promover o escoamento dos frutos de café no secador de bandejas vibradas. O comportamento do escoamento durante a secagem é discutido no Capítulo 6, apresentado a seguir.