

## CAPÍTULO 6

### ESTUDO DA DISPERSÃO NA SECAGEM DE FRUTOS DE CAFÉ

Neste capítulo são abordados os fundamentos do escoamento não ideal em equipamentos, enfatizando a distribuição do tempo de residência (Seção 6.1); os modelos para escoamento não ideal (Seção 6.2); a dispersão no escoamento de sólidos (Seção 6.3) e a determinação da dispersão dos frutos de café no secador de bandejas vibradas com reciclo, enfatizando o coeficiente de dispersão e o número de Péclet (Seção 6.4).

#### **6.1– Fundamentos do Escoamento Não Ideal**

Há dois tipos de escoamento ideais de um fluido no interior de um reator: o escoamento pistonado e o escoamento com mistura perfeita. Apesar de proporcionarem comportamentos muito diferentes, a maioria dos projetos de equipamentos utiliza um dos dois tipos de escoamento, principalmente porque são considerados ideais e simples no tratamento matemático (LEVENSPIEL, 1972). O escoamento pistonado ocorre quando a velocidade do fluido é uniforme em toda a seção transversal do equipamento e, portanto, cada porção do fluido que alimenta o vaso escoar sem misturar-se com outras porções de fluido que foram admitidas no vaso antes ou depois. Ao contrário do escoamento pistonado, na mistura perfeita assume-se que o conteúdo do vaso é completamente homogêneo, em escala molecular, ou seja, não há diferenças entre as várias partes do vaso e as propriedades da corrente de saída são idênticas às propriedades do fluido no interior do vaso (HIMMELBLAU; BISCHOFF, 1968).

Considerando-se um escoamento pistonado, todos os elementos de um material abandonariam o equipamento após terem permanecido no seu interior por exatamente o mesmo tempo, isto é, coincidindo com o tempo de residência médio. O outro limite de comportamento é a mistura perfeita, onde a alimentação a qualquer instante determinado mistura-se completamente com o material já existente no sistema. Entretanto, em um sistema real, há provavelmente um desvio do comportamento ideal de escoamento, resultando em uma distribuição do tempo de residência de porções do material no sistema, e o regime de mistura não é pistonado nem de mistura perfeita. Diferentes porções do fluido terão diferentes

“idades” dentro do equipamento (ALKHADDAR *et al.*, 2001).

Esses desvios podem ser causados pela formação de canais preferenciais, pela presença de regiões estagnadas no equipamento ou pela reciclagem de fluido (HIMMELBLAU; BISCHOFF, 1968; LEVENSPIEL, 1972). A formação de canais preferenciais é caracterizada pelo escoamento consideravelmente mais rápido de algumas porções do fluido em relação ao escoamento principal. As regiões de estagnação ou de espaço morto representam regiões onde o contato entre as fases é extremamente prejudicado e diminuem o volume efetivo ou utilizável do equipamento. A reciclagem de fluido consiste em direcionar uma certa quantidade de fluido da descarga para a entrada do vaso (HIMMELBLAU; BISCHOFF, 1968).

Sistemas de escoamentos reais foram inicialmente modelados por P. V. Danckwerts em 1953 sobre as bases da análise da distribuição do tempo de residência. Geralmente, os modelos não ideais são desenvolvidos a partir de modelos ideais, considerando os desvios dos sistemas reais e podem ser divididos em modelos de um ou múltiplos parâmetros. Estes modelos variam em complexidade e o modelo de um único parâmetro é freqüentemente adequado para representar sistemas tubulares (TORRES; OLIVEIRA, 1998).

### **6.1.1– Distribuição do Tempo de Residência**

O escoamento de fluido pode ser descrito por diferentes aproximações: teoria da mecânica dos fluidos ou teoria da distribuição do tempo de residência (DTR). O conceito de distribuição do tempo de residência é amplamente aplicado nos processos químicos e na atualidade despertou um interesse significativo no campo ambiental e da poluição, assim como em várias aplicações biotecnológicas. Em geral, pode-se dizer que a análise da DTR é uma aproximação empírica ainda simples para descrever processos que envolvem escoamento de fluidos, dispersões e materiais particulados. No campo alimentício, a análise da DTR tem sido aplicada para avaliar os efeitos de parâmetros de processamento nas características de escoamento. Entretanto, na indústria de alimentos, a DTR teve sua ampla aplicação no processamento asséptico, visto que estes estudos têm um forte impacto sobre a otimização, avaliação de processos e sobre o diagnóstico de desempenho quando equipamentos de processo estão em operação (TORRES; OLIVEIRA, 1998).

Para Steffani e Platzer (2002), os tempos de residência são o resultado de uma

complexa interação do material em escoamento, segundo um perfil de velocidade e, dos mecanismos macroscópicos e microscópicos de distribuição de substâncias. A quantificação da contribuição dessas influências leva a uma aproximação mesoscópica. Os modelos microscópicos são caracterizados pela utilização de métodos teóricos, com balanços usando equações diferenciais e discretização multidirecional. Os modelos mesoscópicos, cujo exemplo é o modelo da dispersão, são caracterizados pela utilização de métodos semi-empíricos, baseados em perfis de velocidade, coeficiente de dispersão efetivo e discretização uni ou bidimensional. Os modelos macroscópicos, cujo exemplo é o modelo de tanques em série, são caracterizados pela utilização de métodos empíricos, baseados em uma conexão formal entre a entrada e a saída do sistema, com discretização unidimensional. A distribuição do tempo de residência é uma ferramenta amplamente utilizada para investigar o comportamento de reatores e apresenta um enfoque macroscópico (“caixa preta”), frente à modelagem.

Segundo Himmelblau e Bischoff (1968), o tempo de residência é o tempo em que a porção de fluido permanece no equipamento, ou seja, o tempo decorrido entre o momento de entrada da porção de fluido até o instante em que a mesma abandona o equipamento. Já o conceito de “idade” do fluido consiste no tempo decorrido entre a entrada da porção de fluido no equipamento e um dado instante. Portanto, a idade do fluido é menor ou igual ao tempo de residência.

A variação nos tempos de residência do material no equipamento é mais bem descrita pelas funções de distribuição do tempo de residência  $I(t)$ ,  $E(t)$  e  $F(t)$ . A função  $I(t)$  fornece a fração de material retida no equipamento, sendo definida de tal maneira que:  $I(t) dt$  fornece a fração do material retida no equipamento, desde o momento de entrada, para um diferencial de tempo  $dt$  transcorrido. A função  $I(t)$ , sendo contínua, é normalizada fazendo-se com que o somatório de todas as frações seja igual à unidade (área sob a curva igual um), como mostra a Equação (6.1). Na Equação (6.1) o tempo  $t = 0$  refere-se a um tempo inicial arbitrário e não exatamente ao início do escoamento do fluido no equipamento (VANĚČEK; MARKVART; DRBOHLAV, 1966; HIMMELBLAU; BISCHOFF, 1968).

$$\int_0^{\infty} I(t)dt = 1 \quad (6.1)$$

De maneira análoga à função  $I(t)$ , pode-se definir a distribuição do tempo de residência ou distribuição de idade de saída do fluido  $E(t)$ , cuja expressão matemática é

indicada na Equação (6.2) e a normalização de sua distribuição na Equação (6.3). A função  $E(t)$  representa a fração (em massa) do material na descarga, cujo tempo de residência situa-se entre  $t$  e  $t+dt$ . A unidade das funções  $I(t)$  e  $E(t)$  é fração de idades por unidade de tempo (VANĚČEK; MARKVART; DRBOHLAV, 1966; HIMMELBLAU; BISCHOFF, 1968; LEVENSPIEL, 1972; ROBINSON; TESTER, 1986). A curva  $E(t)$  é a distribuição adequada para verificar a ocorrência do escoamento não ideal (LEVENSPIEL, 1972).

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (6.2)$$

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \quad (6.3)$$

Segundo Vaněček, Markvart e Drbohlav (1966), a Equação (6.4) define a função  $E(t)$ .

$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (6.4)$$

A função  $F(t)$  representa a fração em massa do material na corrente de saída e que permaneceu no equipamento por um intervalo de tempo  $\leq t$ . Evidentemente,  $F(0) = 0$  e  $F(\infty) = 1$  (VANĚČEK; MARKVART; DRBOHLAV, 1966; RAMASWAMY *et al.*, 1995).

Segundo Vaněček, Markvart e Drbohlav (1966), partindo da definição de  $E(t)$ , obtém-se a Equação (6.5).

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad (6.5)$$

As considerações para as curvas  $I$ ,  $E$  e  $F$  são válidas apenas para a condição de contorno de vaso fechado, ou seja, o fluido entra e sai do equipamento uma única vez, ocorrendo escoamento pistonado no lado externo do equipamento até seus contornos. Isto significa que não há escoamento, difusão ou redemoinhos na entrada ou na saída do equipamento. Somente a condição de contorno de vaso fechado fornece uma curva de escoamento idêntica à função  $E$  (LEVENSPIEL, 1972). A maioria das instalações experimentais cumpre esta exigência, visto que as tubulações de entrada e saída são, freqüentemente, muito menores do que o vaso, e também por ser o escoamento turbulento muito mais expressivo do que o fluxo difusivo (HIMMELBLAU; BISCHOFF, 1968).

A relação entre as funções  $I(t)$ ,  $F(t)$  e  $E(t)$  pode ser obtida por meio de um balanço de material, como mostrada na Equação (6.6), onde  $H$  é a massa de material contida no leito (*hold-up*) e  $G$  é a taxa de escoamento do material (VANĚČEK; MARKVART; DRBOHLAV, 1966).

$$1 - F(t) = \frac{H}{G} I(t) \quad (6.6)$$

Segundo Vaněček, Markvart e Drbohlav (1966), utilizando as Equações (6.4), (6.5) e (6.6), conhecida uma das funções, as outras duas podem ser determinadas. Da Equação (6.6), obtém-se a Equação (6.7), a qual é útil para verificar a validade da função experimental  $F(t)$ .

$$\frac{G}{H} \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt = 1 \quad (6.7)$$

Em um sistema em escoamento contínuo nem todas as partículas permanecem no equipamento com o mesmo tempo. Algumas movem-se mais lentamente do que outras. As partículas próximas à parede ou em espaço morto movem-se mais lentamente do que aquelas que percorrem um caminho preferencial. Assim, há uma distribuição de tempo de residência através das seções do equipamento, com porções do material permanecendo mais ou menos tempo do que o tempo médio de residência ( $t_m$ ), definido pela Equação (6.8). Esta equação requer que duas condições sejam satisfeitas: a densidade do material em escoamento seja constante e não haja retorno de material para o ponto de alimentação (VANĚČEK; MARKVART; DRBOHLAV, 1966; RAMASWAMY *et al.*, 1995).

$$t_m = \frac{H}{G} \quad (6.8)$$

Sendo:  $H$  o *hold-up* no equipamento (kg) e  $G$  a vazão mássica de fluido (kg/s).

O tempo de residência depende, além da taxa de escoamento e do *hold-up*, das propriedades mecânicas das partículas e dos parâmetros geométricos do equipamento (BROD; PARK; ALMEIDA, 2004).

Gráficos da função  $F(t/t_m)$ , característicos do comportamento de materiais, associados com a permanência no sistema, são mostrados na Figura 6.1. Se o tempo de residência é estritamente uniforme para todas porções da corrente,  $t_m$  é o tempo de residência verdadeiro, e a variação da função  $F(t/t_m)$  é mostrada na curva “a” da Figura 6.1. Este caso,

corresponde ao escoamento pistonado. Devido à variação dos tempos de residência de diferentes porções da corrente, a forma da função  $F(t/t_m)$  pode apresentar-se como mostrado nas curvas “b” e “d” da Figura 6.1.

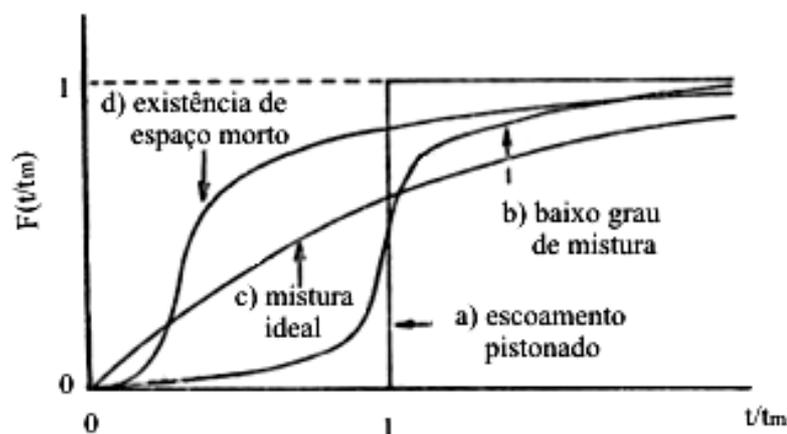


Figura 6.1 – A função distribuição  $F(t/t_m)$ : a) escoamento pistonado; b) baixo grau de mistura; c) mistura ideal; d) escoamento com espaço morto (adaptado de Vaněček, Markvart e Drbohlav, 1966).

A Figura 6.2 mostra gráficos da função  $t_m E(t/t_m)$  correspondendo aos casos de  $F(t/t_m)$ , representados na Figura 6.1.

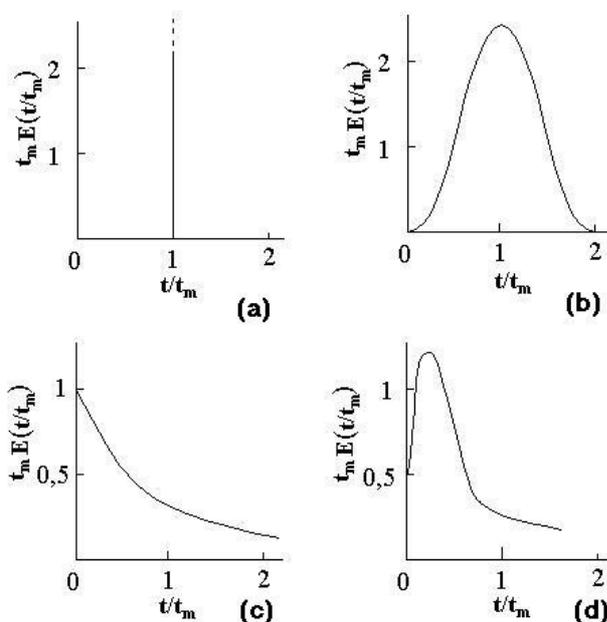


Figura 6.2 – Gráficos da função  $t_m E(t/t_m)$  correspondendo aos gráficos de  $F(t/t_m)$ , representados na Figura 6.1; a – escoamento pistonado; b – baixo grau de mistura; c-mistura ideal; d - existência de espaço morto (VANĚČEK; MARKVART; DRBOHLAV, 1966).

Além do escoamento pistonado, um caso de especial importância é o de mistura ideal: nele o material que entra é imediatamente misturado com o material contido no meio, e

a mistura resultante tem, em todos os pontos, a mesma composição da corrente de saída. Da condição  $E(t) = I(t)$ , que corresponde à definição matemática de mistura ideal e das Equações (6.6) e (6.8) obtém-se as Equações (6.9), (6.10) e (6.11). O termo exponencial da Equação (6.10) representa a curva “c” da Figura 6.2, decaimento exponencial (VANĚCĚK; MARKVART; DRBOHLAV, 1966).

$$1 - F(t) = t_m E(t) \quad (6.9)$$

$$E(t) = \frac{1}{t_m} e^{-\left(\frac{t}{t_m}\right)} \quad (6.10)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{t_m}\right)} \quad (6.11)$$

Assim, segundo Vaněček, Markvart e Drbohlav (1966), para um equipamento com o conteúdo idealmente misturado, utilizando a Equação (6.11), verifica-se que 63% do material possui tempo de residência  $t < t_m$  (ver as curvas “c” das Figuras 6.1 e 6.2).

### 6.1.2 – Determinação Experimental da Curva E

Sabendo-se o que está acontecendo dentro de um recipiente, isto é, possuindo uma descrição completa da distribuição de velocidade para um fluido e um sólido em escoamento, pode-se prever o comportamento do sistema, o qual pode ser um reator em leito fluidizado ou um secador. Em muitos casos, não é necessário dispor das informações completas do escoamento, mas conhecer o tempo que partículas individuais permanecem no recipiente, ou, mais precisamente, qual a distribuição do tempo de residência do material que está escoando. Esta informação pode ser determinada facilmente por um método de investigação amplamente usado: o teste de estímulo-resposta (LEVENSPIEL, 1972).

#### 6.1.2.1 – Injeção e Detecção das Partículas Marcadas

Na determinação do tempo de residência, partículas marcadas são introduzidas no sistema e quantificadas as concentrações destas partículas na descarga. As entradas típicas para a determinação do tempo de residência são as entradas em degrau, pulso, senoidal, rampa e seqüência aleatória. Embora informações similares possam ser obtidas com as diferentes técnicas, as duas últimas não são freqüentemente usadas. A razão principal para o emprego

das entradas em degrau, pulso ou senoidal na análise da distribuição do tempo de residência é a conveniência e a facilidade da análise matemática. Além disso, é mais fácil estabelecer a resposta da saída para um determinado modelo quando estas funções são utilizadas como entrada (LEVENSPIEL, 1972; RAMASWAMY *et al.*, 1995).

A Figura 6.3 mostra como é a resposta de concentração na saída do equipamento para entradas em degrau e pulso, que são mais utilizadas nos estudos envolvendo partículas (LEVENSPIEL, 1972).

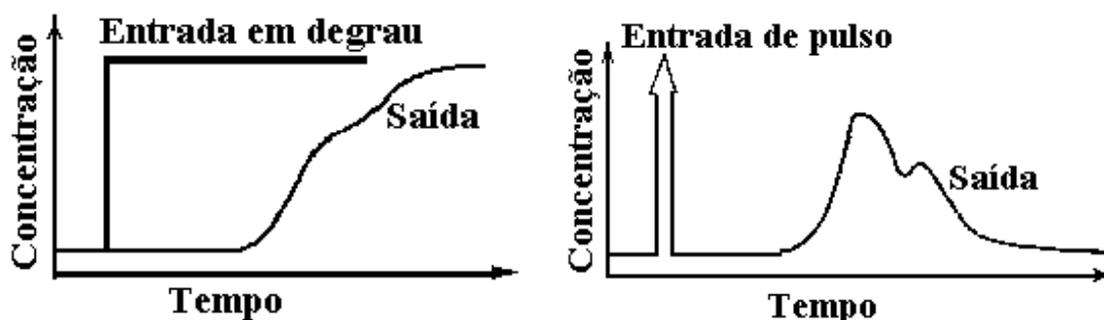


Figura 6.3 – Técnicas de estímulo em degrau e pulso (adaptado de Levenspiel, 1972).

Na Figura 6.3 (entrada em degrau) a partir do tempo  $t$  a alimentação de sólido de entrada passa a conter uma concentração uniforme,  $C_0$ , do sólido marcado. Na Figura 6.3 (entrada de pulso) ocorre injeção instantânea, no tempo  $t$ , de uma massa “ $m$ ” do sólido marcado na concentração  $C_0$  (LEVENSPIEL, 1972).

Segundo Vaněček, Markvart e Drbohlav (1966), para investigação do escoamento na secagem em leitos fluidizados existem dois procedimentos apropriados: entrada em pulso e entrada em degrau. O procedimento para a entrada em pulso é descrito a seguir.

- em  $t = 0$ , introduz-se na corrente de entrada uma quantidade “ $m$ ” de traçador e observa-se a variação da fração mássica  $w(t)$  do traçador na corrente de saída. A duração da introdução do traçador deve ser desprezível em comparação com o tempo de residência médio. Pode-se mostrar que as Equações (6.12), (6.13) e (6.14), são aplicáveis (VANĚČEK; MARKVART; DRBOHLAV, 1966; NAUMAN, 1981; RENAUD; THIBAUT; ALVAREZ, 2001).

$$m = G \int_0^{\infty} w(t) dt \tag{6.12}$$

$$E(t) = \left[ \frac{G}{m} \right] w(t) \tag{6.13}$$

$$t_m = \int_0^{\infty} E(t) t dt \quad (6.14)$$

Se a taxa mássica,  $G$ , de escoamento do material é conhecida, a Equação (6.12) pode ser usada para confirmar a determinação de  $w(t)$ . Se a taxa de escoamento  $G$  não pode ser medida diretamente, ela pode ser determinada pela Equação (6.12). Com o valor conhecido de  $G$ , pode-se determinar a forma da função  $E(t)$  pela Equação (6.13). Pela Equação (6.14), o tempo de residência médio pode ser encontrado. A Equação (6.8), que define o tempo de residência, permite calcular o material retido no secador  $H$  (*hold-up*). Se for desejado determinar a função distribuição do tempo de residência  $F(t)$ , as Equações (6.5) e (6.13) podem ser utilizadas (BANZATTO, 2000; RENAUD; THIBAUT; ALVAREZ, 2001).

Na verdade, a determinação experimental da distribuição do tempo de residência do fluido não fornece diretamente a curva  $E$ , mas sim uma curva  $C$ , obtida a partir da injeção, em pulso, de “ $m$ ” unidades de um traçador (kg ou mol) na corrente de entrada do equipamento. A concentração e o tempo das partículas do traçador na corrente de saída fornecem a curva  $C$ . Com a realização de um balanço de material no equipamento obtém-se a área sob a curva  $C$  ( $A_C$ ), dada pela Equação (6.15), a média (representa o tempo de residência médio) e a variância da curva  $C$  ( $\sigma^2$ ) dadas pelas Equações (6.16) e (6.17), respectivamente (LEVENSPIEL, 1972; LEVENSPIEL, 2000).

$$A_C = \int_0^{\infty} C(t) dt \quad (6.15)$$

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} tC(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (6.16)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} - t_m^2 \quad (6.17)$$

Se a curva de distribuição  $C(t)$  é conhecida somente em intervalos de tempo discretos  $t_i$ , então as Equações (6.15), (6.16) e (6.17) serão expressas na forma discreta como mostra as Equações (6.18), (6.19) e (6.20), sendo:  $C_i$  a concentração de partículas marcadas ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $t_i$  o tempo gasto para cada partícula percorrer o túnel de secagem;  $m$  a massa de partículas marcadas (kg);  $q$  a vazão volumétrica do fluido ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e  $V$  o volume ocupado pelo fluido em

$m^3$  (LEVENSPIEL, 1972; RENAUD; THIBAUT; ALVAREZ, 2001).

$$A_c \cong \sum C_i \Delta t_i = \frac{m}{q} \quad (6.18)$$

$$t_m \cong \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{V}{q} = \frac{H}{G} \quad (6.19)$$

$$\sigma^2 \cong \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - t_m^2 \quad (6.20)$$

A variância ( $\sigma^2$ ) fornece o quadrado do espalhamento da distribuição, tem como unidade (tempo)<sup>2</sup> e é útil para relacionar curvas experimentais com uma família de curvas teóricas. A Figura 6.4 representa a média e a variância para duas curvas C distintas (LEVENSPIEL, 1972).

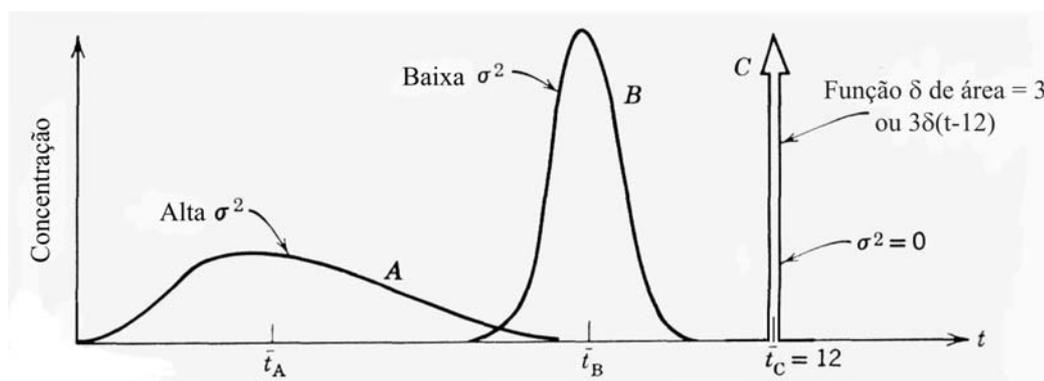


Figura 6.4 – Média e variância de uma distribuição C (adaptado de Levenspiel, 1972).

Segundo Torres e Oliveira (1998), para caracterizar completamente uma função arbitrária de distribuição é necessário o conhecimento de todos os momentos em torno da média, contudo, somente os momentos até o quarto nível são considerados relevantes. O primeiro momento é o tempo de residência médio, o segundo é a variância, o terceiro é a assimetria, indicada na Equação (6.21) e o quarto é a curtose, Equação (6.22).

$$\psi \cong \frac{\sum t_i^3 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - 3t_m \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} + 2t_m^3 \quad (6.21)$$

$$\kappa \cong \frac{\sum t_i^4 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - 4t_m \frac{\sum t_i^3 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} + 6t_m^2 \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - 3t_m^4 \quad (6.22)$$

Segundo Alhamdam e Sastry (1998) o teste assimetria mede o grau de assimetria da distribuição, onde um valor negativo indica que a distribuição está deslocada para a direita, um valor positivo a distribuição está deslocada para a esquerda e zero indica uma distribuição simétrica. O teste curtose mede a intensidade do pico de uma distribuição amostral ou quão intensa é a cauda dessa distribuição. Um valor negativo indica um pico achatado, o valor positivo indica um pico agudo e zero indica uma distribuição normal.

Langrish, Papadakis e Baker (2002) avaliaram a dispersão de partículas de areia com três tamanhos diferentes, escoando em um secador rotativo de cascata, pela utilização de um parâmetro denominado extensão percentual dos tempos de residência ( $\Xi$ ), definido pela Equação (6.23).

$$\Xi = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{\bar{t}} \times 100 \quad (6.23)$$

Sendo:  $t_{\max}$  e  $t_{\min}$  os valores máximos e mínimos do tempo de residência e  $\bar{t}$  a média aritmética entre  $t_{\max}$  e  $t_{\min}$ ,  $(t_{\max} + t_{\min})/2$ . Smolders e Baeyens (2000) utilizaram a mesma definição para espalhamento do tempo de residência de areia em um leito fluidizado circulante e encontraram valores para  $\Xi$  de 160 a 380, onde para menores valores do número de Péclet (ver Equação (6.27)) maior a extensão percentual dos tempos de residência.

Segundo Levenspiel (2000), o procedimento para encontrar a curva  $E(t)$  a partir da curva  $C(t)$  consiste em alterar a escala de concentração, de modo que a área sob a curva  $C(t)$  seja igual à unidade (normalização), isto é, dividir as leituras de concentração por  $m/q$ , como mostra a Equação (6.24). Entretanto, a relação entre as curvas  $C(t)$  e  $E(t)$  somente mantém-se de forma exata para a condição de contorno de vaso fechado.

$$E(t) = \frac{C(t)}{m/q} \quad (6.24)$$

Substituindo-se  $m/q$ , na Equação (6.24), pela Equação (6.15) obtém-se a Equação (6.2), que define a curva  $E(t)$ , em modo contínuo, em função da curva  $C(t)$  obtida experimentalmente (FOGLER; BROWN, 1992).

Um impulso perfeito de traçador é um conceito ideal. Desvios mínimos da idealidade podem ser obtidos na prática fazendo o tempo de injeção tão curto quanto possível. Um degrau perfeito é mais fácil de desenvolver do que um pulso perfeito, mas o segundo método

é preferido para testes comerciais visto que o sistema em processamento é perturbado por tempos curtos. Finalmente, com respeito ao sinal e resposta, o degrau produz uma curva integral que tem que ser derivada para obter-se a curva E, introduzindo assim mais erros computacionais ou eventualmente mascarando alguns efeitos, tais como cauda (TORRES; OLIVEIRA, 1998).

Injeções pulso ou degrau de traçador deverão sempre ser testadas para serem suficientemente ideais, mas este fato é freqüentemente não mencionado em trabalhos publicados. Se a injeção do traçador não é ideal, técnicas especiais são necessárias para a análise da resposta do traçador, e portanto, a medida da resposta da injeção é requerida para desenvolver uma análise não ideal da injeção (TORRES; OLIVEIRA, 1998). Segundo Harris, Davidson e Thorpe (2002), os experimentos de DTR com sólidos são particularmente mais difíceis de realizar com imparcialidade, quando comparados com sistemas líquidos e gasosos. A escolha das partículas traçadoras, o método de introdução e detecção do pulso, a caracterização das condições de contorno e das condições de escoamento no sistema contribuem para a falta de imparcialidade experimental.

Os requerimentos básicos para selecionar um traçador que será utilizado nos experimentos de DTR são: ter aproximadamente a mesma densidade e viscosidade; ser miscível e ter propriedades físicas similares àquelas do fluido sob investigação; ser precisamente detectável em pequenas quantidades, para que sua introdução não afete o padrão de escoamento das principais correntes de fluido; ter sua concentração facilmente monitorada e o sinal gravado ser proporcional à concentração do traçador; não deve ocorrer sorção do traçador pelas paredes do equipamento. Essas condições são necessárias para que a medida seja representativa da mistura que ocorre no equipamento (HIMMELBLAU; BISCHOFF, 1968; TORRES; OLIVEIRA, 1998).

A precisão da resposta depende fortemente do tipo e da concentração do traçador. Por outro lado, para determinações da DTR, métodos de detecção precisos são importantes, e a resposta deverá ser proporcional à concentração do traçador, para que a análise possa ser feita diretamente sobre a resposta do sinal (TORRES; OLIVEIRA, 1998).

Existem numerosas técnicas para estudar e investigar a DTR em escoamento em duas fases. Essas técnicas incluem a observação visual, fotografia, feixe de laser, vídeo, traçador radioativo e resposta magnética. A principal desvantagem da observação visual manual é a

subjetividade e vulnerabilidade do erro e da fadiga humana depois de realizar um número de experimentos. Além disso, é difícil visualizar partículas em fluidos opacos e em vasos de escoamento não transparentes, além da dificuldade de monitoramento e rastreamento de mais do que uma partícula com o tempo. Entretanto, a dificuldade óbvia é que algumas destas outras técnicas citadas acima não são universais para todas as montagens experimentais (RAMASWAMY *et al.*, 1995). Muitos desses métodos não são diretamente aplicáveis para situações reais de processo, e sendo assim técnicas mais simples e menos onerosas podem também ser aplicadas, como é o caso da observação visual (TORRES; OLIVEIRA, 1998).

Geralmente observa-se a presença de cauda em curvas de DTR e vários modelos têm sido apresentados para explicar essa anomalia. A cauda assume um importante papel na estimativa precisa dos parâmetros do modelo. Efeitos de caudas podem aumentar a partir de uma injeção inadequada ou indicar regimes de escoamento laminar ou pouco turbulento. Várias soluções têm sido propostas na literatura para superar este problema: truncamento da curva de saída e aproximação da cauda após o ponto de truncamento a um decaimento exponencial; estimativa dos parâmetros de outras seções da curva de DTR; correções empíricas das curvas de DTR; uso das técnicas de transformada de Laplace, que permite a linearização da curva de DTR (TORRES; OLIVEIRA, 1998).

Nem sempre é possível quantificar o comportamento dos sólidos diretamente. Para tais determinações, o material alimentado é marcado de uma maneira adequada e a concentração do traçador (porção marcada) é medida na corrente de descarga. O método de marcação deve ser escolhido tal que as propriedades físicas de relevância das condições de escoamento não sejam alteradas. Um bom método é utilizar um traçador radioativo. Uma técnica atual para quantificar a DTR de partículas, utiliza traçadores formados por partículas ativados por pulsos de luz de alta intensidade. O traçador é detectado usando uma unidade de fotoampliação, sensível à luz. Contudo a técnica é adequada para tempos de residência inferiores a três minutos, pois as partículas perdem a ativação (HARRIS; DAVIDSON; THORPE, 2002). A técnica é adequada para fluidização rápida, na qual a DTR situa-se no intervalo de 0 a 20 segundos. Em muitas situações, o material pode ser revestido com um corante. Como um meio menos favorável, pode-se adicionar uma substância estranha, cujas propriedades físicas possam afetar as condições de escoamento da mesma maneira que aquelas do material investigado. É desejável que a fração de material estranho adicionado seja pequena (AMBLER *et al.*, 1990). Souza (1997) utilizou um detector de sinais eletromagnéticos para determinar experimentalmente as distribuições de tempo de ciclos de

comprimidos escoando em um sistema vibro-jorrado, onde o traçador é uma partícula magnética.

### 6.2– Modelos para o Escoamento Não Ideal

Uma variedade de modelos pode ser utilizada para caracterizar o escoamento não ideal no interior de equipamentos, sendo úteis para representar o escoamento em vasos reais, para realizar o aumento de escala (*scale up*) e para diagnosticar problemas de escoamento no interior de vasos. O diagrama apresentado na Figura 6.5 indica alguns modelos que podem ser utilizados para descrever o comportamento de um fluido com escoamento laminar no interior de um equipamento. Apenas um ponto deve ser localizado no diagrama, ponto este correspondente ao tipo de fluido utilizado (caracterizado pelo número de Schmidt); às condições de escoamento (caracterizadas pelo número de Reynolds); esses dois adimensionais expressos pelo número de Bodenstein (Bo) e à geometria do sistema, caracterizada pela razão L/d, sendo L o comprimento do tubo e d o seu diâmetro (LEVENSPIEL, 1972; LEVENSPIEL, 2000).

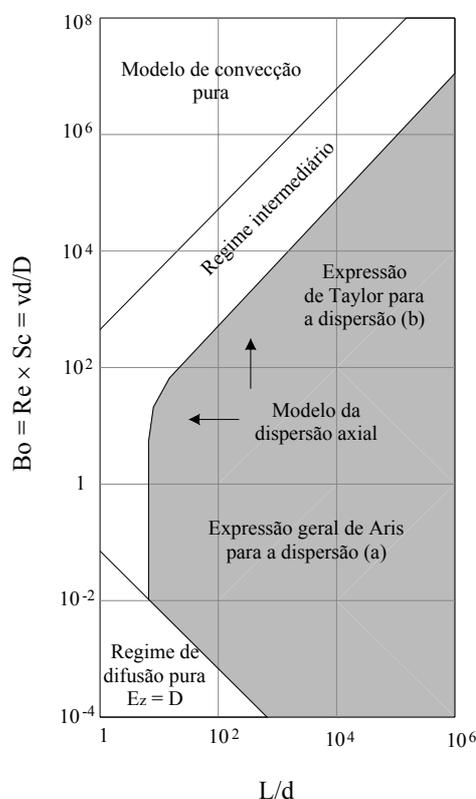


Figura 6.5 – Diagrama para determinação do modelo de escoamento a ser utilizado; (a)

$$E_z = D + \frac{v^2 d^2}{192D} ; (b) E_z = \frac{v^2 d^2}{192D} \text{ (Adaptado de Levenspiel, 2000).}$$

Os fluidos gasosos encontram-se, provavelmente, no regime de dispersão, enquanto os líquidos podem estar no regime de dispersão ou no regime de convecção pura. Os líquidos muito viscosos, tais como polímeros encontram-se, provavelmente, no regime de convecção pura (LEVENSPIEL, 2000).

### 6.2.1 – O Modelo de Dispersão Axial

Segundo Sax (1974), os primeiros estudos de dispersão foram relacionados com a dispersão de poluentes na atmosfera. A equação Gaussiana da Dispersão é freqüentemente usada para prever a distribuição de concentração nas imediações de uma fonte individual de poluentes. Apesar do estudo atual ser relacionado com a dispersão de partículas sólidas em fase densa, a Equação da Dispersão é ilustrativa para quantificação da dispersão. A equação gaussiana é mostrada a seguir (Equação (6.25)) indicando os três fatores: central (primeiro fator, não exponencial), lateral (exponencial entre colchetes) e vertical (exponencial entre chaves).

$$C(x, y, z, h) = \frac{Q}{2\pi E_x E_y u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{E_x}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \bar{h}}{E_y}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y + \bar{h}}{E_y}\right)^2\right] \right\} \quad (6.25)$$

Sendo: C a concentração numa posição (x, y, z) para uma altura efetiva de uma fonte ( $\bar{h}$ ), (massa/volume); Q a vazão da fonte (massa/tempo);  $\bar{h} = h + \Delta h$ , sendo h a altura física da chaminé e  $\Delta h$  a elevação da corrente após a descarga (comprimento);  $E_x$  (coeficiente de dispersão horizontal) e  $E_y$  (coeficiente de dispersão vertical) relacionam-se com o espalhamento do material, são funções da distância a partir da fonte de emissão (z), dependem da estabilidade atmosférica, e a estimativa dos mesmos depende de registros meteorológicos (SAX, 1974).

A Figura 6.6 mostra que a dispersão da fumaça emitida constantemente na atmosfera por uma chaminé tem uma concentração média, a qual pode ser aproximada por uma função gaussiana. Esta forma de função pode ser predita a partir da teoria da difusão. Entretanto, a partir da observação, a fumaça dispersa-se muito mais rapidamente do que seria esperado utilizando coeficientes difusivos. Neste caso, a diferença de dispersão da fumaça pode ser de três mil vezes. Pela utilização da teoria da difusão para gases, a largura do pico seria de 30 cm, enquanto que a observação indica largura de um quilômetro. A explicação para essa

enorme discrepância é o vento. Na difusão a mistura ocorre devido ao movimento Browniano e na dispersão ocorre porque o vento está conduzindo a fumaça. Desta forma, a dispersão é muito mais rápida do que a difusão devido ao escoamento (CUSSLER, 1997).

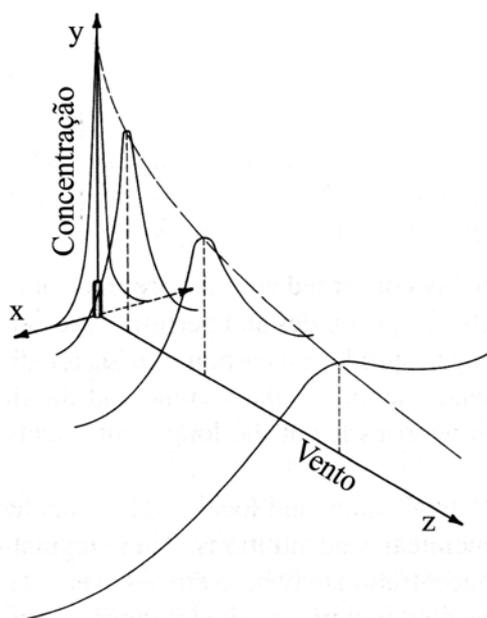


Figura 6.6 – Dispersão da fumaça com emissão contínua (CUSSLER, 1997).

O coeficiente de dispersão é independente da estrutura química do fluido, ou seja, não depende do peso ou da estrutura molecular, possuindo os mesmos valores para, por exemplo, monóxido de carbono, dioxinas ou fumaça. Contudo, ao contrário do coeficiente de difusão, o coeficiente de dispersão depende fortemente da posição, tendo diferentes valores para diferentes posições. Apesar da dispersão parecer-se com a difusão e ser descrita pelo mesmo tipo de equações, o efeito causado é muito diferente, principalmente porque a origem física é totalmente diferente (CUSSLER, 1997).

A dispersão é uma forma de mistura, e a níveis microscópicos ela envolve a difusão de moléculas. Assim, a dispersão pode ser descrita com o mesmo equacionamento matemático da difusão. A difusão e a dispersão têm origens físicas muito distintas e ocorrem a escalas de tempo, velocidade e espaço absolutamente diferentes (CUSSLER, 1997; SAHOO; ROETZEL, 2002).

Roetzel e Balzereit (1997) fizeram uma análise detalhada do modelo de dispersão axial, muito utilizado para estudar o comportamento de fluidos escoando em equipamentos de processo na indústria química e de alimentos. A obtenção da equação que descreve o modelo

da dispersão axial é efetuada por analogia ao fenômeno de difusão, que é descrito pela Primeira Lei de Fick da Difusão. Esta lei define a difusividade mássica como um fator de proporcionalidade entre o fluxo difusivo de massa e o gradiente de concentração, em analogia com a Lei de Fourier da Condução de Calor, que descreve a proporcionalidade entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura. A equação da difusão binária, na ausência de difusão térmica, de pressão e forçada é determinada combinando-se a Primeira Lei de Fick, em coordenadas estacionárias, com a Equação da Continuidade para um componente em uma mistura binária.

O processo de dispersão em escoamento incompressível com mistura completa nas direções perpendiculares à direção principal do escoamento é descrito pela equação da difusão unidimensional para densidade e difusividade do fluido constantes, na qual a difusividade (para difusão de moléculas) é substituída por um coeficiente de dispersão ( $E_z$ ), como mostra a Equação (6.26), que é a Equação da Dispersão (LEVENSPIEL, 1972; ROETZEL; BALZEREIT, 1997).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} \quad (6.26)$$

O parâmetro  $E_z$ , que caracteriza unicamente o grau de mistura completa durante o escoamento, é denominado coeficiente de dispersão axial ou longitudinal para distinguir a mistura na direção do escoamento da mistura na direção radial ou lateral. Essas duas quantidades podem ser bastante diferentes em magnitude, como por exemplo, no escoamento laminar em tubos, onde a mistura axial acontece principalmente devido aos gradientes de velocidade, enquanto que a mistura radial ocorre apenas por difusão molecular (LEVENSPIEL, 1972). O coeficiente de dispersão representa o processo de espalhamento do pulso à medida que atravessa o sistema, assim, um  $E_z$  grande significa um espalhamento rápido da curva de traçador, um  $E_z$  pequeno significa espalhamento lento e  $E_z = 0$  indica escoamento pistonado (LEVENSPIEL, 2000).

Pela definição de parâmetros adimensionais expressos nas Equações (6.27), (6.28), (6.29) e (6.30), obtém-se a Equação (6.31), onde:  $Pe$  é o número de Péclet;  $v$  é a velocidade do fluido (m/s);  $L$  é o comprimento da seção de teste (m);  $E_z$  é o coeficiente de dispersão axial ou longitudinal ( $m^2/s$ );  $x$  é comprimento adimensional;  $z$  é o comprimento de escoamento (m);  $\Theta$  é o tempo adimensional;  $c$  é a concentração adimensional (ROETZEL; BALZEREIT, 1997).

$$Pe = \frac{vL}{E_z} \quad (6.27)$$

$$x = \frac{z}{L} \quad (6.28)$$

$$\Theta = t \frac{v}{L} \quad (6.29)$$

$$c = \frac{C}{C^*}, \text{ com } C^* = \frac{\int_0^\infty C dt}{t_m} \quad (6.30)$$

$$\frac{\partial c}{\partial \Theta} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{\partial c}{\partial x} \quad (6.31)$$

As condições inicial e de contorno são indicadas a seguir, de acordo com Danckwerts (1953) e Roetzel e Balzereit (1997).

$$\Theta = 0, 0 \leq x \leq 1: \quad c = 0 \quad (6.32a)$$

$$\Theta > 0, x = 0: \quad c - \frac{1}{Pe} \frac{\partial c}{\partial x} = f(\Theta) \quad (6.32b)$$

$$\Theta > 0, x = 1: \quad \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (6.32c)$$

A taxa em que a transferência de massa ocorre através do plano em  $x = 0$ , pela combinação do escoamento convectivo com a dispersão, deve ser igual à taxa em que a massa é transportada para o sistema. O resultado é uma queda súbita da concentração na entrada do sistema, mesmo para transporte de massa no estado estacionário, então  $f(\Theta) = C^*$  (pode ser qualquer função transiente para a concentração na entrada do sistema). Isto é característico de um sistema fechado com dispersão negligenciável fora das fronteiras do equipamento (ROETZEL; BALZEREIT, 1997).

A Equação (6.31), utilizando as condições de contorno, Equação (6.32), é resolvida analiticamente no domínio de Laplace, cuja solução é expressa na Equação (6.33), onde:  $a = Pe/2$ ;  $b = -iw$ ,  $b \in \mathbb{R}$  e  $w = \sqrt{a^2 + 2as}$  (ROETZEL; BALZEREIT, 1997).

$$c_s(x,s) = \frac{a \operatorname{sen} [b(1-x)] + b \cos [b(1-x)]}{\frac{a^2 - b^2}{2a} \operatorname{sen}(b) + b \cos(b)} e^{ax} f(s) \quad (6.33)$$

Como não há fórmula de transformação inversa avaliável para obter a Equação (6.33) no domínio do tempo,  $c(x,\Theta)$ , Roetzel e Balzereit (1997) aplicaram a técnica de integração direta pelo método dos resíduos para efetuar a inversão da transformada  $c_s(x,s)$ , considerando  $f(s) = 1$  (entrada pulso de Dirac ( $\delta$ ): para  $x = 0$ ,  $f(\Theta) = \delta(\Theta)$ ), para obter a solução da Equação (6.31) no domínio do tempo. A resposta na saída do sistema ( $x = 1$ ) para um pulso de Dirac representa a distribuição do tempo de residência do fluido como mostra a Equação (6.34).

$$E(\Theta) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{b_j^2 \left[ 2 \cos b_j + \frac{Pe}{b_j} \operatorname{sen} b_j \right]}{b_j^2 + \frac{Pe^2}{4} + Pe} e^{\frac{Pe}{2} \left( \frac{Pe + b_j^2}{4 + Pe} \right) \Theta} \quad (6.34)$$

A Figura 6.7 apresenta alguns exemplos de curvas geradas a partir da Equação (6.34), para diferentes valores de Péclet (ROETZEL; BALZEREIT, 1997).

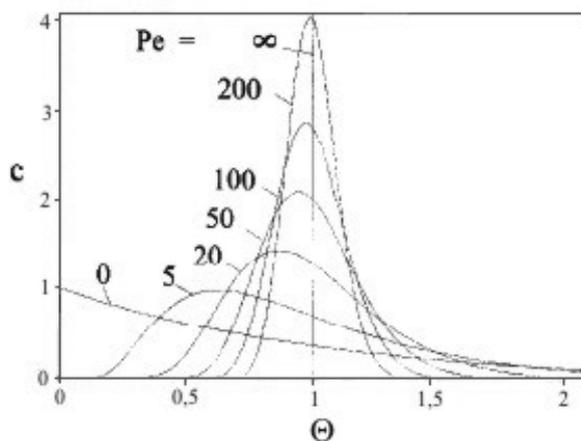


Figura 6.7 – Resposta de concentração adimensional calculada analiticamente a partir do modelo da dispersão para um sistema com condição de contorno de vaso fechado (ROETZEL; BALZEREIT, 1997).

Este modelo representa melhor os escoamentos que não se desviam em demasia do escoamento pistonado, ou seja,  $1/Pe < 0,01$ , pois o modelo da dispersão prevê uma distribuição simétrica do traçador em qualquer instante. Para o caso de grande desvio do escoamento pistonado,  $1/Pe > 0,01$ , a resposta ao pulso é espalhada, pois passa pelo ponto de observação de modo suficientemente lento para provocar uma mudança na sua forma, fornecendo uma curva  $E(t)$  não simétrica. Para valores de  $1/Pe > 1$  e para os casos indicados

na Figura 6.8, é questionável a utilização do modelo da dispersão (LEVENSPIEL, 2000).

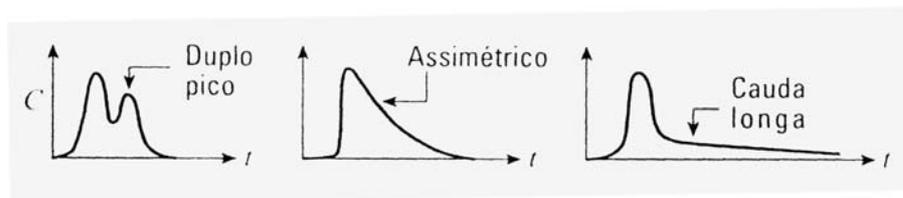


Figura 6.8 – Formas da curva  $C(t)$  em que o modelo da dispersão não é recomendado (LEVENSPIEL, 2000).

Martin (2000) apresentou a solução analítica da Equação (6.31) para condições de contorno de vaso fechado publicada inicialmente por H. A. Thomas e J. E. McKee no periódico *Sewage Works Journal* (v. 16, n. 1) em 1944. A Equação (6.35) expressa a solução de Thomas e McKee na forma adimensional.

$$E(\Theta) = 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{Pe \alpha_i e^{Pe/2 \{1 - \Theta(\alpha_i^2 + 1)/2\}}}{Pe(\alpha_i^2 + 1) + 4} \left\{ \alpha_i \cos\left(\frac{Pe}{2} \alpha_i\right) + \text{sen}\left(\frac{Pe}{2} \alpha_i\right) \right\} \quad (6.35)$$

Sendo,  $\alpha_i$  as raízes positivas da Equação (6.36).

$$\tan\left(\frac{Pe}{2} \alpha_i\right) = \frac{2\alpha_i}{(\alpha_i^2 - 1)} \quad (6.36)$$

Outros modelos podem ser utilizados para prever a resposta de um pulso de traçador, como por exemplo, o modelo de tanques em série e o modelo da convecção pura. Este último, indicado também no diagrama da Figura 6.5, assume que cada elemento de fluido desliza sobre seu vizinho, sem haver interação pela difusão molecular. Desta forma, a dispersão dos tempos de residência é causada somente por variações na velocidade do fluido (LEVENSPIEL, 2000).

Para uma entrada em fluxo (que gera um perfil parabólico de velocidade) e uma medida planar (na qual quantifica-se a concentração na seção transversal em um dado instante), a curva de resposta ao pulso, para escoamento laminar em tubos com perfil parabólico de velocidade, é expressa na Equação (6.37), considerando a viscosidade  $\mu = \infty$  devido ao efeito da cauda longa e  $t_m = V/q$  (LEVENSPIEL, 2000).

$$E(t) = \frac{t_m}{2t^2}, \text{ para } t \geq \frac{t_m}{2} \quad (6.37)$$

### 6.2.2 – Modelos e Correlações para a Distribuição do Tempo de Residência

Uma análise completa das curvas de DTR requer um tratamento apropriado dos dados brutos e o subsequente ajuste dos modelos para os dados experimentais. Vários métodos podem ser aplicados para obter os parâmetros característicos dos modelos da DTR e as técnicas avaliáveis para a estimativa dos parâmetros podem ser divididas na análise do tempo ou no domínio de Laplace. O primeiro é mais comumente utilizado, ou pelo uso da análise das características da curva da DTR, ou análise dos momentos, ou ajuste da curva pela otimização não linear (TORRES; OLIVEIRA, 1998).

Objetivando a obtenção de parâmetros que possam ser utilizados na modelagem do escoamento dos grãos, foram testados modelos de dispersão. Os coeficientes de dispersão são caracterizados pela distribuição do tempo de residência do material que está escoando (ROETZEL; BALZEREIT, 1997), a qual freqüentemente é uma distribuição Gaussiana. A Equação (6.38) consiste no Modelo de Dispersão de Taylor, originalmente aplicado para o escoamento de fluidos em tubulações para regime laminar. A Equação (6.39) consiste no Modelo de Dispersão Livre, originalmente aplicado para a dispersão de gases, provenientes de chaminés (CUSSLER, 1997). Menezes (1996) utilizou os modelos aludidos no escoamento de café pergaminho e verificou que o modelo de dispersão livre aplicou-se bem ao escoamento do café.

$$C = \frac{m}{\sqrt{4 \pi E_z t}} \cdot e^{-\frac{(L - vt)^2}{4 E_z t}} \quad (6.38)$$

$$C = \frac{m}{8\sqrt{\pi^3 \cdot E_z \cdot t^3}} \cdot e^{-\frac{(L - vt)^2}{4 E_z t}} \quad (6.39)$$

Segundo Van den Broeck (1990), Taylor encontrou, no escoamento em uma tubulação de raio R, que o coeficiente de dispersão  $E_z$  é inversamente proporcional ao coeficiente de difusão molecular (D) de partículas suspensas em um fluido, como indicado pela Equação (6.40).

$$E_z = \frac{(Rv)^2}{48 D} \quad (6.40)$$

Para escoamento entre dois planos paralelos, obtém-se a Equação (6.41), (VAN DEN

BROECK, 1990).

$$E_z = \frac{(Rv)^2}{210 D} \quad (6.41)$$

Esta situação é semelhante ao escoamento sobre uma bandeja vibrada e, assim, mais fundamental para avaliação de um “coeficiente de dispersão” no escoamento de sólidos.

A Equação (6.42) permite estimar coeficientes de dispersão para areia e apatita em leito fluidizado longitudinal (NILSSON, 1988).

$$E_z = \frac{0,056 \left[ 0,01(h - 0,05) + 0,00165 \rho_g (u_0 - u_{mf}) \right] v^{0,23}}{d_p^{0,5}} \quad (6.42)$$

Sendo:  $h$  a altura do leito;  $\rho_g$  a densidade do gás;  $u_0$  e  $u_{mf}$  as velocidades do gás e a mínima de fluidização;  $v$  a velocidade das partículas;  $d_p$  o diâmetro médio de Sauter da partícula. Alternativamente, tem-se a Equação (6.43), apresentada por Fyhr, Kemp e Wimmerstedt (1999).

$$E_z = \frac{1,49 \left[ 0,01(h - 0,05) + 0,00165 \rho_g (u_0 - u_{mf}) \right] v^{0,23}}{u_{mf}^{1/3}} \quad (6.43)$$

Resultados típicos de  $E_z$  são da ordem de  $1 \times 10^{-4}$  a  $20 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Para a secagem de apatita em secador de leito fluidizado e utilizando a técnica de traçador, Fyhr, Kemp e Wimmerstedt (1999), obtiveram valores de  $E_z$  de  $8 \times 10^{-4}$  e  $14 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, para velocidades de escoamento dos sólidos de 0,008 e 0,012 m/s, respectivamente. Na secagem de café pergaminho em múltiplas bandejas vibradas, obteve-se valores de  $E_z$  de  $6 \times 10^{-4}$  a  $15 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, utilizando o modelo da Dispersão de Taylor linearizado (MENEZES; FINZER; OLIVEIRA, 1998).

Pydisetty, Krishnaiah e Varma (1989) indicam uma correlação (Equação 6.44) para o coeficiente de dispersão de partículas no processamento de cobre em leito fluidizado, utilizando níquel como traçador, onde  $E_z$  situou-se na faixa de  $0,35 \times 10^{-4}$  a  $2,36 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s para o processamento de cobre com diâmetro de  $4 \times 10^{-4}$  m, operando com  $u_0/u_{mf}$  na faixa de 1,2 a 2,1. Os mesmos autores informaram que o coeficiente de dispersão diminui com o aumento do tamanho da partícula de  $10^{-2}$  para  $3,5 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s para uma alteração de  $10^{-3}$  para  $3 \times 10^{-3}$  m no diâmetro da partícula.

$$E_z = 0,17 \frac{(u_0 - u_{mf})}{u_{mf}^{1/3}} \quad (6.44)$$

Sendo:  $E_z$  dado em  $\text{cm}^2/\text{s}$  e  $u_0$  e  $u_{mf}$  em  $\text{cm}/\text{s}$ .

Pydisetty, Krishnaiah e Varma (1989) determinaram  $E_z$  para um leito fluidizado espiral no processamento de areia, ilmenita e mostarda encontrando valores entre  $1,32 \times 10^{-4}$  a  $16,93 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

O número de Péclet é útil para previsão do grau de mistura em meios porosos. Quando o número de Péclet é da ordem de grandeza da porosidade ( $\epsilon$ ), a difusão molecular é predominante; quando  $Pe$  é da ordem de 1, a difusão ainda predomina em pequena escala, porém a convecção térmica é da mesma ordem de grandeza em escala ampliada; quando  $Pe$  é da ordem de  $\epsilon^{-1}$ , a convecção tende a predominar; e a convecção é predominante quando  $Pe$  é da ordem de  $\epsilon^{-2}$  (AURIAULT; ADLER, 1995).

Smolders e Baeyens (2000) apresentaram uma correlação (Equação (6.45)) para número de Péclet em função do fluxo de circulação dos sólidos  $G_A$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) e da velocidade superficial de gás ( $\text{m}/\text{s}$ ), para mistura de sólidos (areia) em um leito fluidizado circulante.

$$Pe = 2,4 + \frac{18,3}{\left(\frac{G_A}{u}\right)^{0,8}} \quad (6.45)$$

Diversos estudos têm sido realizados considerando a dispersão e a DTR, com: adsorção de  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2$  em silicato adsorvente, operando em correia sem fim (PHELPS; RUTHVEN, 2001); adsorção de umidade em alumina em leito fluidizado (ABOUZEID; FUERSTENAU; SASTRY, 1980); escoamento de sólidos em leito fluidizado ascendente (SMOLDERS; BAEYENS, 2000); transferência de calor em leito fluidizado com areia e apatita, utilizando similaridade entre transferência de calor e massa (NILSSON, 1988); extrusão de farinha de arroz (GAUTAM; CHOUDHURY, 1999); extrusão de farinha de soja misturada com farinha de batata doce (IWE *et al.*, 2001).

Inúmeras pesquisas têm sido realizadas, nas mais diversas áreas da engenharia química e de alimentos, envolvendo a determinação da distribuição do tempo de residência, para sistemas líquidos (ROETZEL; BALZEREIT, 1997; TORRES; OLIVEIRA, 1998; TORRES; OLIVEIRA; FORTUNA, 1998; SAHOO; ROETZEL, 2002), sistemas pastosos

(SINGH; RIZVI, 1998; IWE *et al.*, 2001) e sistemas particulados (ABOUZEID; FUERSTENAU; SASTRY, 1980; PYDISSETY; KRISHNAIAH; VARMA, 1989; AMBLER *et al.*, 1990; HAN; MAI; GU, 1991; WEI; ZHU, 1996; FYHR; KEMP; WIMMERSTEDT, 1999; GAUTAM; CHOUDHURY, 1999; ALKHADDAR *et al.*, 2001; RENAUD; THIBAUT; ALVAREZ, 2001; HARRIS; DAVIDSON; THORPE, 2002; LANGRISH; PAPADAKIS; BAKER, 2002; MADHIYANON; SOPONRONNARIT; TIA, 2002).

Vários pesquisadores têm se concentrado também na determinação da distribuição do tempo de residência em sistemas de processamento asséptico de alimentos particulados (CHANDARANA; UNVERFERTH, 1995; RAMASWAMY *et al.*, 1995; ALHAMDAN; SASTRY, 1998), visto que as agências governamentais dos Estados Unidos, que regulam a produção de alimentos estáveis de baixa acidez têm indicado que os tempos de residência das partículas devem ser conhecidos com um alto nível de confiança para garantir a segurança destes alimentos (CHANDARANA; UNVERFERTH, 1995; ALHAMDAN; SASTRY, 1998). O mesmo pode ser estendido para a secagem de café, já que as partículas com menor tempo de residência terão uma umidade mais alta permitindo o desenvolvimento de fungos, e aquelas com tempo de residência maior secarão excessivamente podendo apresentar trincas e permitir o desenvolvimento de microrganismos que prejudicam as qualidades organolépticas da bebida de café.

Satija e Zucker (1986) determinaram experimentalmente o tempo de residência médio e o coeficiente de dispersão para partículas de tamanho médio de  $0,72 \times 10^{-3}$  m escoando em um secador de leito vibro-fluidizado. A amplitude de vibração foi a variável que mais influenciou o tempo de residência médio e o coeficiente de dispersão: para um aumento na amplitude de vibração de 0,478 cm para 0,635 cm, o tempo de residência médio diminuiu de 22,9 min para 12,4 min e o coeficiente de dispersão aumentou de  $7 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s para  $26,2 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. O efeito da velocidade do ar (1,31 cm/s a 1,96 cm/s) no tempo de residência médio foi insignificante e o coeficiente de dispersão também foi pouco sensível à alteração desta variável. O aumento da vazão mássica de sólidos (de 908,3 g/min para 1363,3 g/min) causou uma diminuição no tempo médio de residência de 25,1 min para 18,8 min.

Han, Mai e Gu (1991) determinaram o tempo de residência médio e o coeficiente de dispersão de trigo em secador vibro-fluidizado operando em sistema contínuo. Os valores do coeficiente de dispersão variaram entre  $0,29 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s;  $0,78 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s e  $1,07 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, para um adimensional de vibração  $\Gamma$  de 1,64; 2,08 e 2,53 (a frequência foi de 25 Hz),

respectivamente. Ao contrário do coeficiente de dispersão, o aumento da intensidade vibracional diminuiu o tempo de residência das partículas de trigo no secador.

Wei e Zhu (1996) determinaram o número de Péclet para um sistema com leito fluidizado circulante em sistema gás-sólido (ar e alumina com diâmetro de partícula de 54  $\mu\text{m}$  e 1810  $\mu\text{m}$ ) e constataram que a direção do escoamento possui notável influência na dispersão dos sólidos. Quando o escoamento é no sentido gravitacional, a dispersão de sólidos não é acentuada e o modelo de escoamento aproxima-se do pistonado ( $Pe$  em torno de 100), já no escoamento contra a gravidade, devido à dispersão ser mais acentuada, o escoamento afasta-se do modelo pistonado, com valores de número de Péclet entre 1,8 e 10.

Gautam e Choudhury (1999) estudaram o efeito da configuração da rosca do extrusor sobre o número de Péclet na extrusão de farinha de arroz e obtiveram valores de  $Pe$  na faixa de 3,62 a 8,71.

Smolders e Baeyens (2000) estudaram a movimentação de areia em um leito fluidizado com circulação e obtiveram  $Pe$  na faixa de 5,59 a 26,20 e concluíram que o número de Péclet diminui com o aumento da razão entre o fluxo mássico de sólidos e a velocidade superficial do gás.

Chen e colaboradores (2001) caracterizaram a mistura axial e radial em um leito fluidizado com circulação sólido-líquido (esferas de vidro-água) e concluíram que o número de Péclet aumenta com o aumento da velocidade superficial do líquido e diminui com o aumento do *hold up* de sólidos. Os valores para Péclet axial foram de 7,5 a 13 e os valores para Péclet radial estiveram na faixa de 32 a 50.

Brod, Park e Almeida (2004) determinaram o tempo de residência médio e o coeficiente de dispersão de casca de ovo moída em um secador vibro-fluidizado utilizando o modelo de dispersão axial e concluíram que o tempo de residência diminui com a diminuição da amplitude de vibração e que um pequeno aumento na vazão de ar provoca um grande aumento no tempo de residência. Por outro lado, para baixas vazões de ar e de sólidos o tempo de residência aumenta. A combinação de altas vazões de ar e de sólidos causa diminuição do tempo de residência.

A DTR para escoamento em estado estacionário aproxima-se da distribuição de uma mistura ideal quando a taxa de reciclo é expressiva (BUFFHAM; NAUMAN, 1984). Esta

informação é importante no trabalho atual de secagem de café, no qual será efetuado o reciclo total dos sólidos que abandonam o secador, durante todo tempo de secagem.

A distribuição do tempo de residência para as partículas sólidas é muito importante para o cálculo correto da redução de umidade em secadores. Uma partícula pode deixar a câmara de secagem muito rapidamente, porém, outras podem ficar muito tempo no secador. É comprovado que os tempos de residência para partículas individuais não são iguais. O produto que sai do secador é composto de partículas com histórias de secagem diferentes (KEEY, 1978). O desempenho de unidades ampliadas pode ser previsto usando modelos de escoamento e correlações, obtidas pelo uso do princípio de similaridade, juntamente com os resultados experimentais provenientes da unidade reduzida (FINZER, 1989).

O conhecimento da distribuição do tempo de residência é primordial também para resolver as equações diferenciais de transferência de calor e massa para descrever completamente os perfis de temperatura e umidade ao longo de um secador para ambas as fases sólida e gasosa. Dentro do secador, operando com escoamento dos sólidos, há três fenômenos de transporte principais e que ocorrem simultaneamente: escoamento de sólidos úmidos, troca de calor entre o gás e os sólidos e transferência de massa na forma de vapor de água do sólido para o gás. A quantidade total de calor e massa transferida durante o escoamento dos sólidos pelo secador depende expressivamente da área superficial e do tempo de contato entre as duas fases (RENAUD; THIBAUT; ALVAREZ, 2001).

### **6.3 – Dispersão no Escoamento de Sólidos**

Todas as considerações feitas na Seção 6.1 e 6.2.1, bem como toda a matemática envolvida, são válidas apenas para o caso de escoamento de gases e líquidos em estado estacionário, ou seja, vazão mássica de fluido e *hold-up* constantes. Entretanto, a secagem de sólidos não se aplica a esses conceitos, possuindo freqüentemente vazão mássica e *hold-up* variáveis em função do tempo (processo dinâmico).

A mistura de sólidos é mais complicada do que a de fluidos, principalmente porque o escoamento de materiais particulados gera facilmente uma condição de segregação, mesmo para pequenas diferenças de tamanho e densidade. Além disso, não há um ponto de partida definido, ao contrário dos fluidos que, no caso mais simples, têm como ponto de partida a equação de Navier-Stokes. Para sólidos existem várias alternativas para descrever o problema:

descrições contínuas e descrições discretas (dinâmicas da partícula, simulações de Monte Carlo, computações celulares). Para sólidos (não coesivos) escoando em estado estacionário em vasos circulares as linhas de corrente coincidem com as linhas padrão de escoamento. Entretanto, se o vaso não for circular ocorre aumento das taxas de mistura, sendo possível até a ocorrência de caos (OTTINO, 2000).

Algumas considerações para descrever a dispersão na secagem de sólidos foram propostos por Vaněček, Markvart e Drbohlav (1966) e são descritas a seguir.

### 6.3.1 – Distribuição do Tempo de Residência de Sólidos Durante a Secagem

Na secagem de materiais sólidos em batelada, operando em leito de jorro ou fluidizado, o tempo de secagem é o mesmo para todas as partículas. Na operação contínua de secagem o tempo de residência das partículas individuais pode variar consideravelmente. Uma partícula pode percorrer muito rapidamente a distância entre a entrada e a saída do secador e deixa-lo sem que tenha completado sua secagem. Contudo outra situação também pode ocorrer onde a partícula permanece no secador por um período de tempo muito maior do que o necessário para a secagem completa. Desta forma, a corrente de material seco que abandona o secador é formada por partículas que permaneceram no secador por variados períodos de tempo. A importância prática disto é que o desempenho do processo é afetado pela dispersão dos tempos de residência das partículas (VANĚČEK; MARKVART; DRBOHLAV, 1966; BUFFHAM; MASSON, 1993).

Há uma diferença no escoamento do agente de secagem (fase contínua) e do material particulado (fase dispersa). O agente de secagem pode ser misturado tão homoganeamente que terá uma composição uniforme (conteúdo de umidade) em todo o seu volume. Para o material particulado, mesmo depois de completa mistura existem partículas com diferentes conteúdos de umidade. Cada partícula preserva sua individualidade e, do ponto de vista de uma única partícula, a secagem é um processo em batelada (dinâmico), mesmo em um secador operando continuamente. Se as correntes de material úmido e seco, bem como o *hold-up* no secador, são constituídas por um grande número de partículas, pode-se tratar a fase descontínua dispersa como um meio contínuo (VANĚČEK; MARKVART; DRBOHLAV, 1966).

Como o material e o agente de secagem formam duas fases distintas (sólida e gasosa), a taxa de escoamento deve ser tratada separadamente, embora uma influencie na

outra, visto que, durante a secagem, a massa (conteúdo de umidade) é transferida da fase sólida para a fase gasosa (VANĚCĚK; MARKVART; DRBOHLAV, 1966).

O conhecimento do comportamento hidrodinâmico do leito vibro-fluidizado é importante para a modelagem dos secadores vibro-fluidizados. As características hidrodinâmicas empregadas nestes modelos são: o tempo médio de residência e a distribuição do tempo de residência (DTR), sendo função das variáveis de operação do secador como a velocidade do ar; a amplitude e a frequência de vibração e a taxa de alimentação de sólidos (SATIJA; ZUCKER, 1986).

Para compreensão do comportamento do secador de bandejas vibradas com reciclo utilizado neste trabalho, foi desenvolvido um estudo do comportamento hidrodinâmico de frutos de café no secador pela determinação da distribuição do tempo de residência dos frutos de café durante a secagem. A metodologia utilizada e os resultados obtidos são discutidos a seguir.

#### **6.4 – Dispersão dos Frutos de Café no Secador de Bandejas Vibradas com Reciclo**

Em um sistema contínuo, a distribuição do tempo de residência, entre outras dependências, é função da taxa de alimentação dos sólidos no secador. Entretanto, o secador utilizado neste trabalho não operou em regime contínuo, mas sim em batelada com reciclo. Desta forma, a taxa de alimentação dos sólidos consiste na vazão mássica de escoamento dos frutos de café no interior do secador. A metodologia para obtenção da vazão mássica de frutos de café está descrita a seguir.

##### **6.4.1 – Vazão Mássica dos Frutos de Café**

A vazão mássica foi determinada coletando-se, durante um minuto, a massa de frutos de café que escoava na tubulação de PVC (ver Figura 4.1). Os frutos de café, prestes a serem descarregados no alimentador vibratório, eram coletados em um recipiente plástico e sendo a massa quantificada em balança OHAUS, modelo TS4000D com resolução de 0,01 g e capacidade para 4 kg. Após determinação da massa, os frutos de café eram dispostos no alimentador vibratório do secador.

As Figuras 6.9 a 6.19 apresentam os dados de vazão mássica e desvio padrão em função do conteúdo de umidade para os experimentos do primeiro planejamento de secagem.

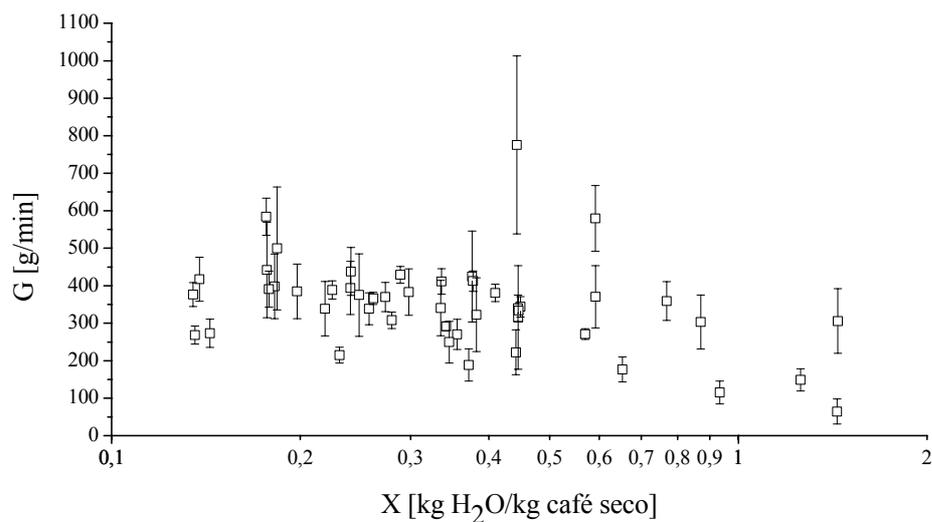


Figura 6.9 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 1.

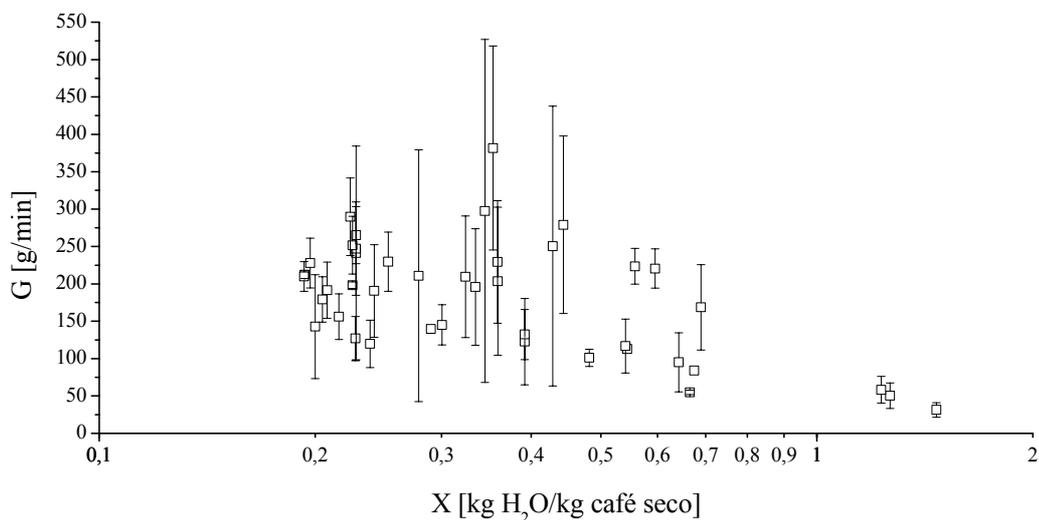


Figura 6.10 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 2.

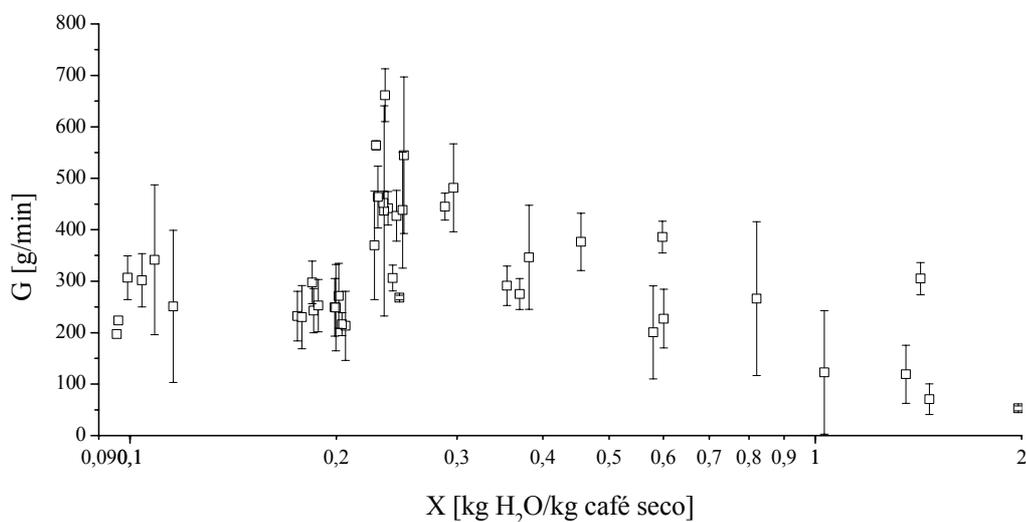


Figura 6.11 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 3.

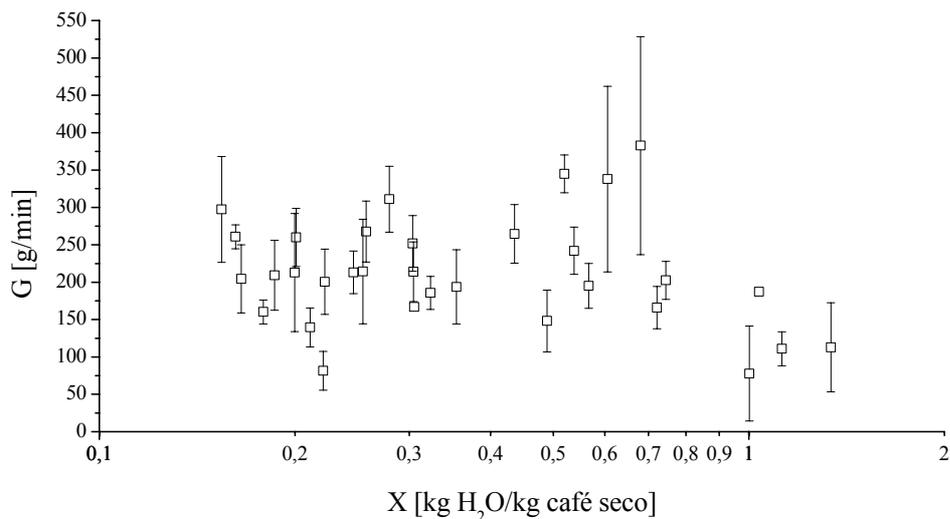


Figura 6.12 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 4.

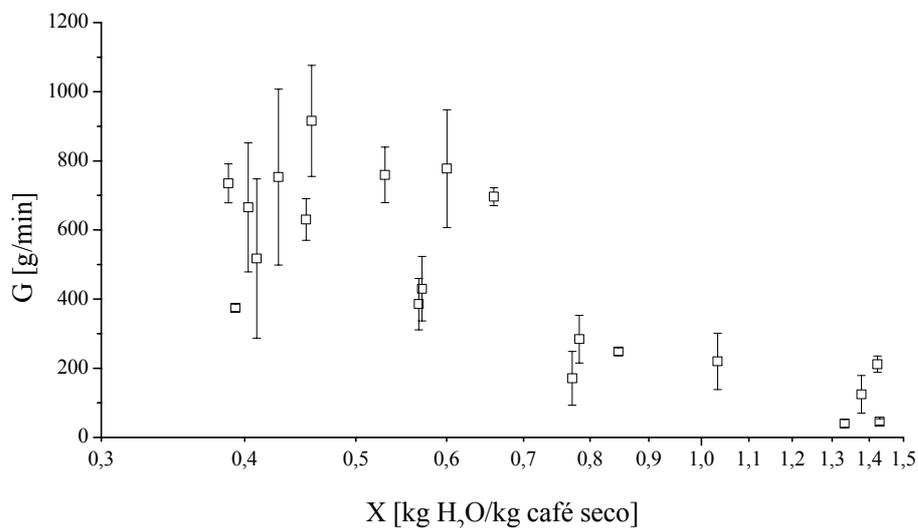


Figura 6.13 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 5.

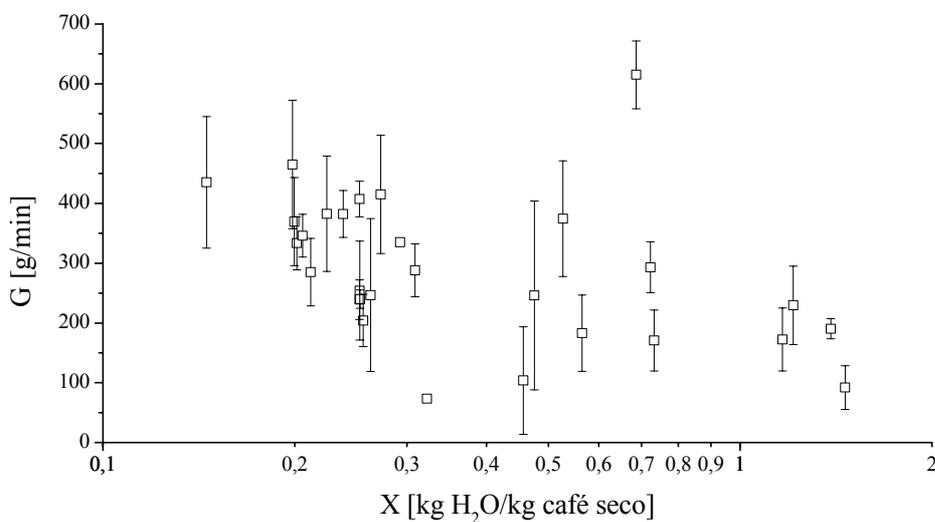


Figura 6.14 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 6.

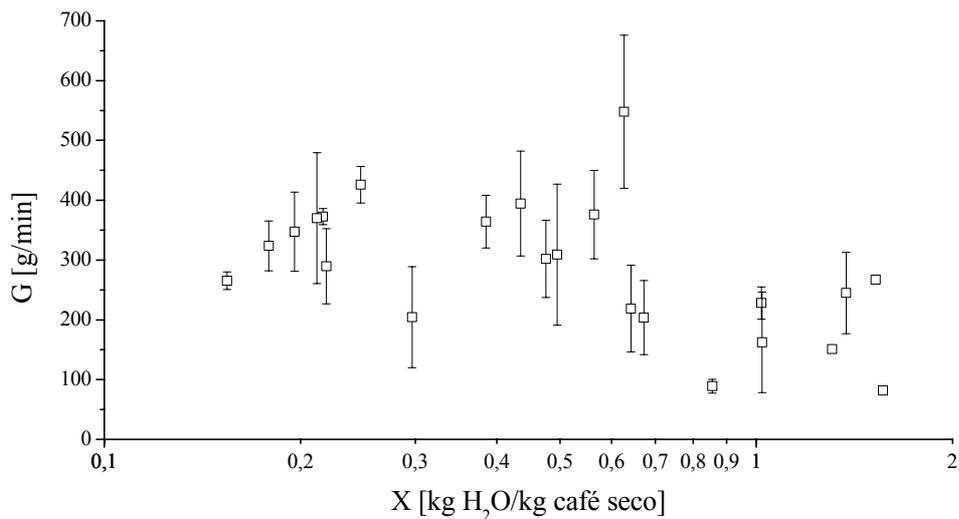


Figura 6.15 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 7.

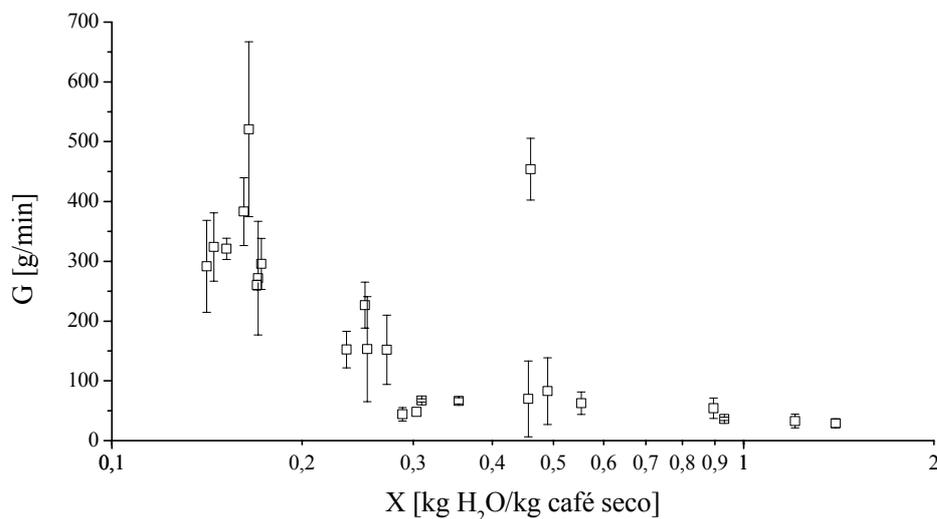


Figura 6.16 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 7 (2005).

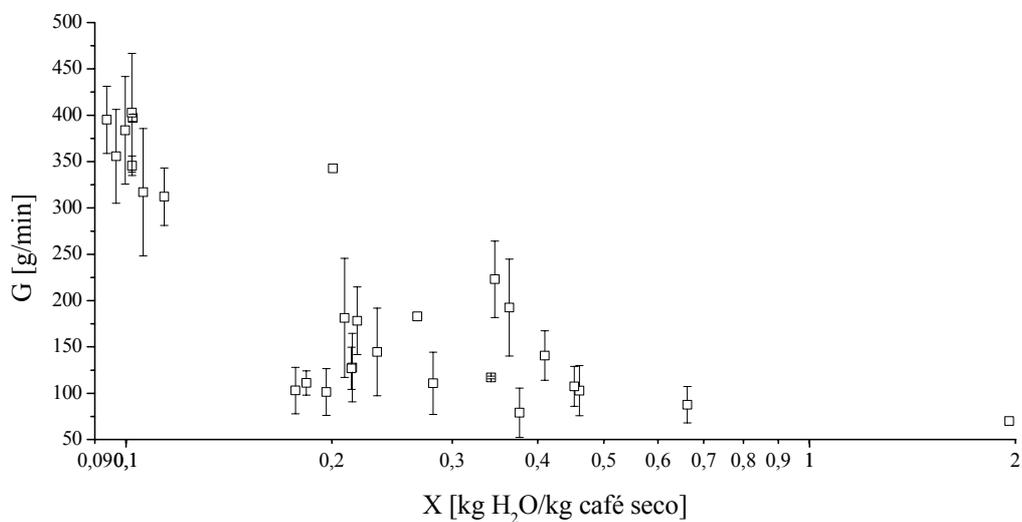


Figura 6.17 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 8.

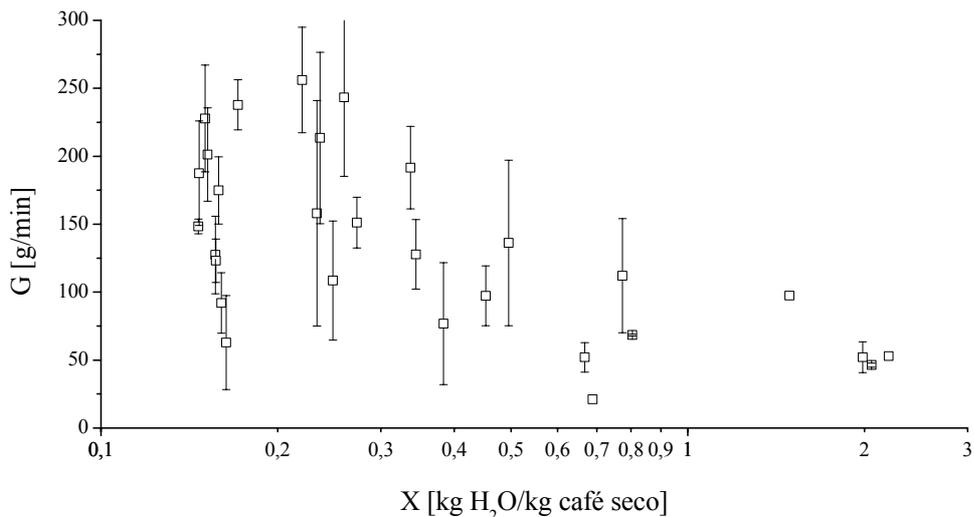


Figura 6.18 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 8 (2005).

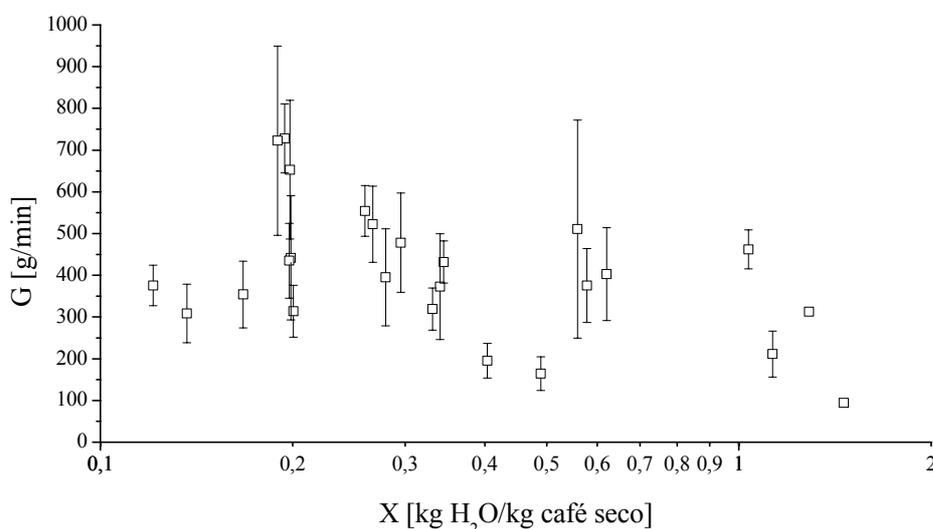


Figura 6.19 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 9.

Pelas Figuras 6.9 a 6.19 é possível verificar o comportamento da vazão de frutos de café em função do conteúdo de umidade no decorrer da secagem. Os valores altos de desvio padrão indicam que o sistema é bastante instável. Essa instabilidade é o reflexo de um processo dinâmico e sensível às alterações causadas pela rápida perda de massa que ocorre no início da secagem; pela contração volumétrica; pela diminuição da densidade *bulk*; pela diminuição da esfericidade e, principalmente, pela grande redução da intensidade vibracional das bandejas, após o início da secagem e da pegajosidade dos frutos de café.

O comportamento é extremamente complexo. No início da secagem os frutos de café absorvem parte da energia vibracional e, assim escoam com dificuldade, necessitando maior amplitude de vibração para promoção do escoamento. Os frutos de café ainda são constituídos

de uma polpa mucilaginosa que reveste os grãos. Essa polpa tem características de fluido absorvendo, irreversivelmente, a energia vibracional, o que dificulta a transmissão de vibração entre partículas.

Ao final da secagem, o escoamento ocorre com maior facilidade devido a: ausência de pegajosidade dos frutos de café; diminuição da massa das partículas e redução do amortecimento da vibração dos frutos de café devido à rigidez adquirida na secagem.

A vazão mássica inicial aumenta com a diminuição do conteúdo de umidade até aproximadamente 0,20 a 0,40 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco. Nesse ponto a vazão oscila em torno de um valor médio até o final da secagem. O aumento da vazão mássica dos frutos de café é cerca de 300% de seu valor inicial, levando-se em consideração que no início da secagem os frutos de café possuem maior massa do que ao final.

Os experimentos com menor vazão mássica foram aqueles realizados com as variedades Mundo Novo e Acaiá do Cerrado, com exceção dos Experimentos 1 e 9 (níveis mínimo e máximo para as condições operacionais de vazão de ar e massa de frutos de café), os quais foram realizados com a variedade Mundo Novo e apresentaram as maiores vazões mássicas, juntamente com os experimentos efetuados com a variedade Catuai (Experimentos 5; 6 e 7). Os frutos de café das variedades Mundo Novo e Acaiá apresentaram maior pegajosidade; maior diâmetro da partícula e menor esfericidade, o que dificulta o escoamento.

As Figuras 6.20 a 6.29 apresentam os dados de vazão mássica e desvio padrão em função do conteúdo de umidade para os experimentos do segundo planejamento de secagem.

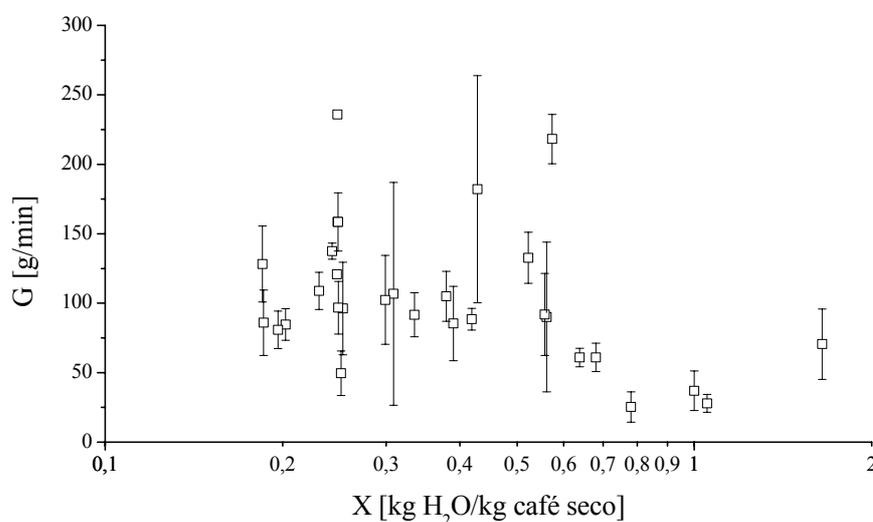


Figura 6.20 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 1.

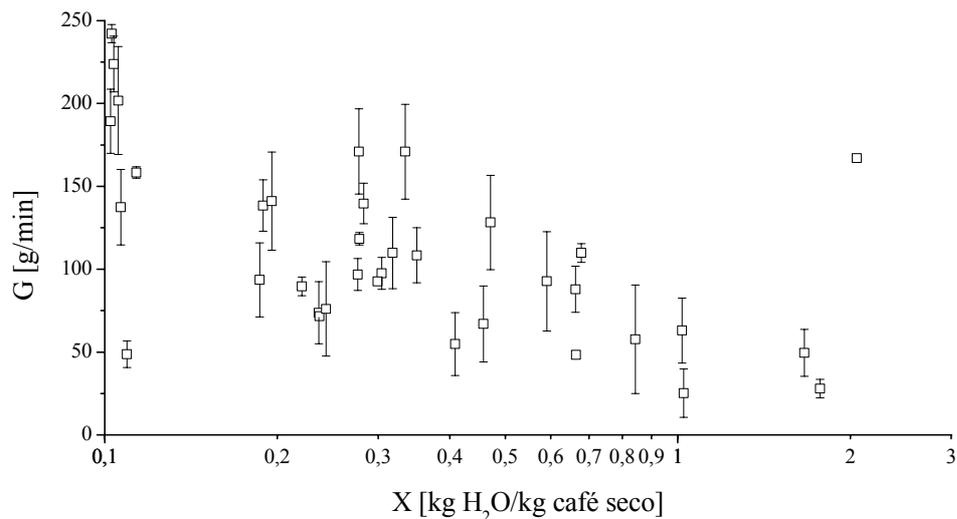


Figura 6.21 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 2.

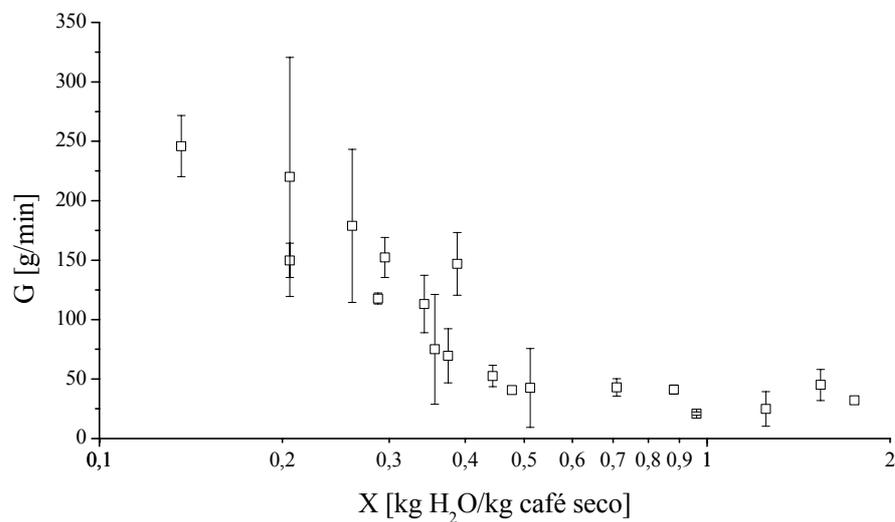


Figura 6.22 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 3.

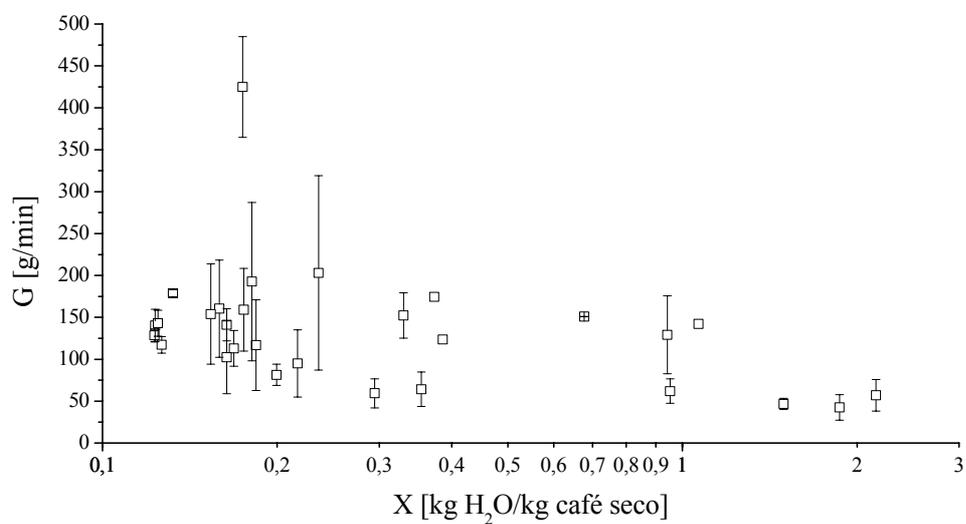


Figura 6.23 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 4.

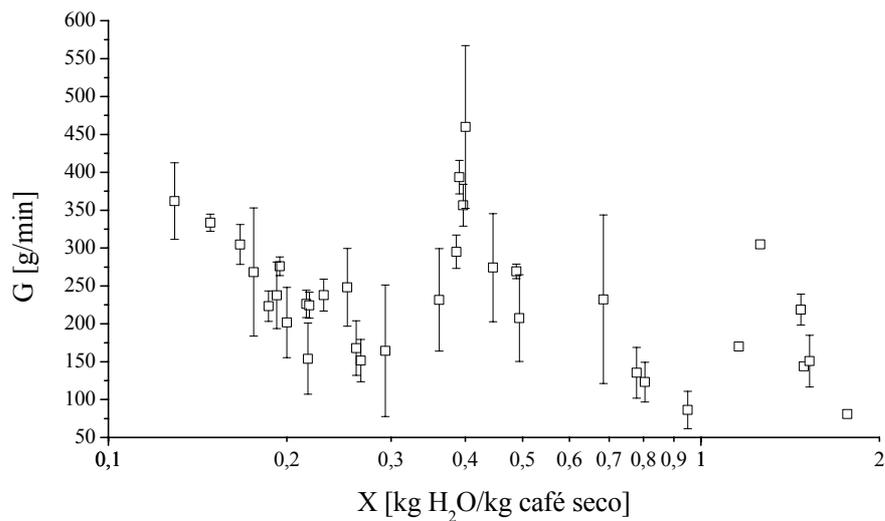


Figura 6.24 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 5.

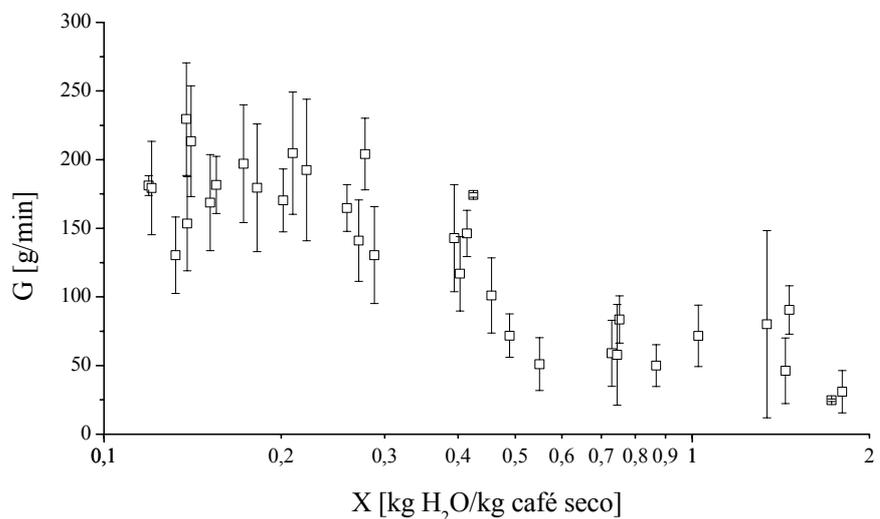


Figura 6.25 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 5 (2005).

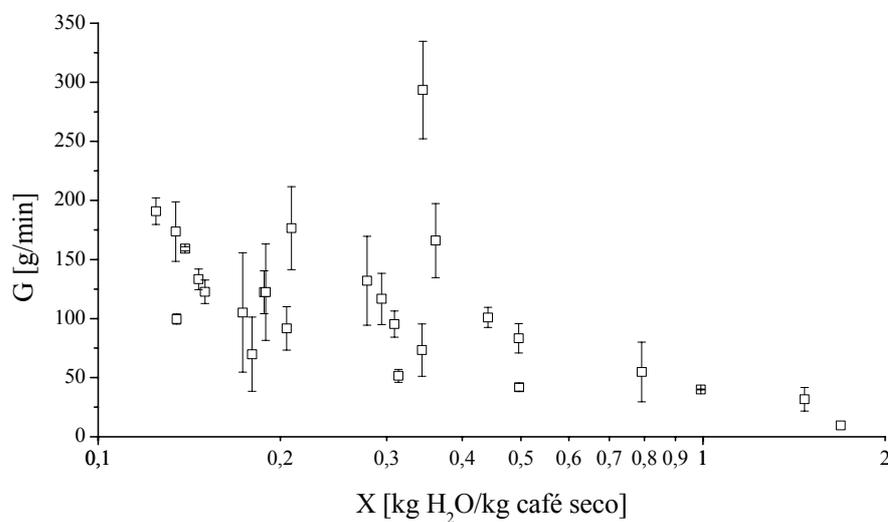


Figura 6.26 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 6.

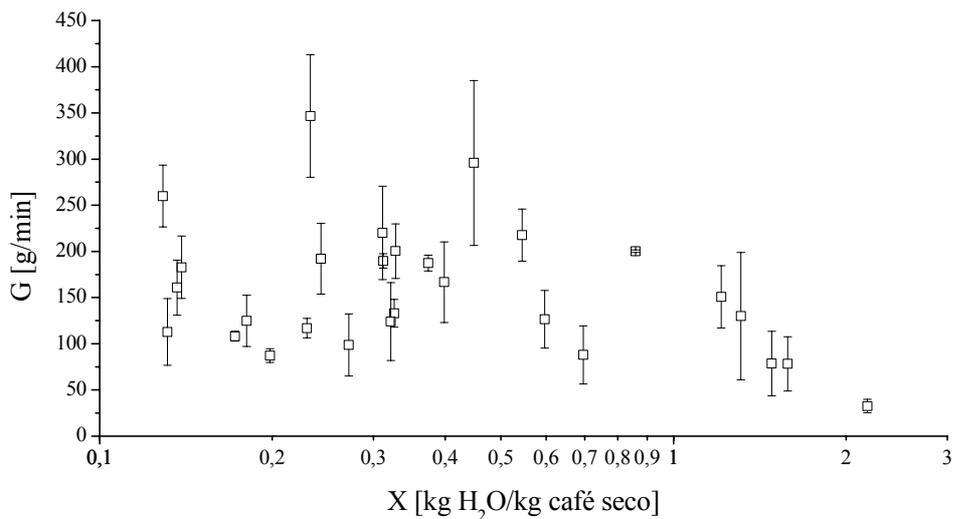


Figura 6.27 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 7.

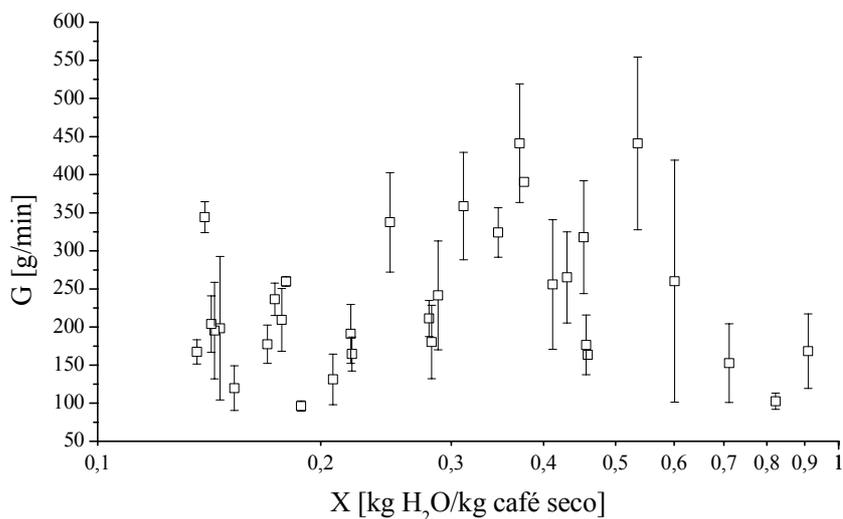


Figura 6.28 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 8.

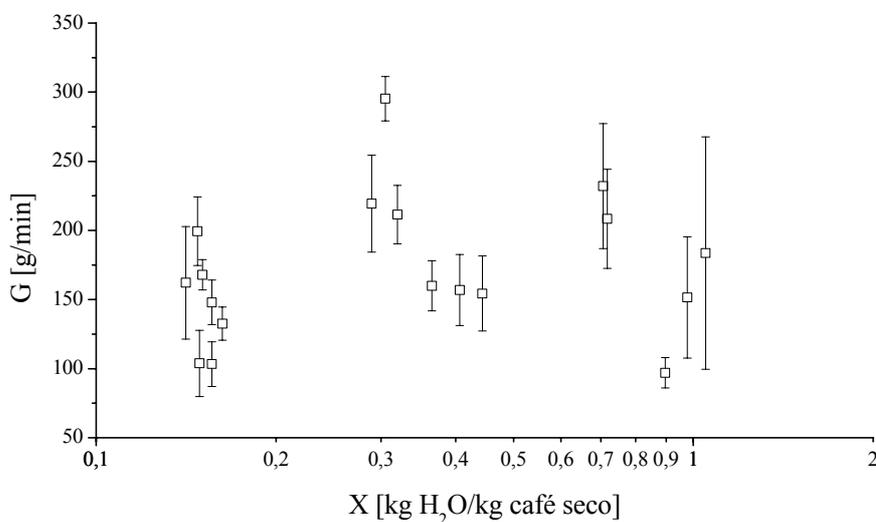


Figura 6.29 – Vazão mássica dos frutos de café: Experimento 9.

Os valores de vazão mássica de frutos de café no secador para o segundo planejamento de secagem, em alguns experimentos, tenderam a aumentar com a diminuição do conteúdo de umidade do início da secagem até 0,25 a 0,40 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco. A partir desse conteúdo de umidade os dados de vazão mássica oscilaram em torno de 150 a 250 g/min. Esses valores são próximos das vazões mássicas dos experimentos realizados com a variedade Mundo Novo, no primeiro planejamento de secagem, confirmando a influência que essa variável exerce no escoamento dentro do secador.

Segundo Roberts (1984), no escoamento de materiais particulados coesivos (o que representa a condição inicial da secagem de frutos de café), em alimentadores vibrados, a maior taxa de escoamento ocorre sob condições de operação com alta amplitude de vibração. Já, para materiais não coesivos (representa a condição final da secagem), a maior taxa de descarga ocorre sob alta frequência. Esse comportamento foi observado durante a secagem, visto que no início da operação o escoamento só ocorria sob alta amplitude vibracional, apesar da alta frequência empregada no trabalho atual (a frequência de 60 Hz é considerada bastante alta em relação aos trabalhos encontrados na literatura). Ao final da secagem, quando os frutos de café têm a pegajosidade suprimida, a amplitude vibracional pôde ser reduzida substancialmente e mesmo assim foram obtidas vazões mássicas bastante altas, a frequência de vibração não foi pesquisada por ser constante nos vibradores utilizados.

Desta forma, o comportamento do escoamento dos frutos de café sobre a bandeja direciona a ação de intensificar ou diminuir a amplitude de vibração imposta ao sistema. O resultado dessa sistemática são reflexos diretos na dispersão que ocorre durante a secagem enquanto os frutos de café escoam pelas bandejas perfuradas e pelos vertedouros (que ligam as bandejas entre si). Para verificar o comportamento do leito no interior do secador foi determinada a distribuição do tempo de residência dos frutos de café, descrita a seguir.

#### **6.4.2 – Distribuição do Tempo de Residência dos Frutos de Café Durante a Secagem**

O conhecimento da distribuição do tempo de residência dos frutos de café no interior do secador é fundamental para caracterizar o escoamento no túnel de secagem. O comportamento é complexo e dinâmico, com alteração do conteúdo de umidade dos frutos de café a cada instante e, conseqüentemente, da densidade, do volume, do *hold up*, da vazão mássica do material processado e de outras características. Além disso, a operação de secagem ocorre em um sistema vibrado, onde a intensidade vibracional imposta às bandejas

do secador promove o escoamento do leito.

Para caracterizar o comportamento dos frutos de café em escoamento no secador utilizou-se o método de estímulo-resposta. Para isso, em um instante  $t = 0$ , foram adicionados, em pulso, no alimentador vibratório, 100 frutos de café marcados, os quais consistiam nas partículas traçadoras para o estudo da DTR dos frutos de café no secador de bandejas vibradas com reciclo. No mesmo instante da introdução do pulso no secador foi acionado um cronômetro digital para medir o tempo em que as partículas marcadas permaneciam no secador.

A Figura 6.30 apresenta um esquema explicativo da sistemática adotada para a determinação da distribuição do tempo de residência dos frutos de café e da indicação do mecanismo da dispersão que ocorre no interior do secador durante a secagem. Após a descarga do secador a retirada de amostras de frutos de café foi efetuada por catação.

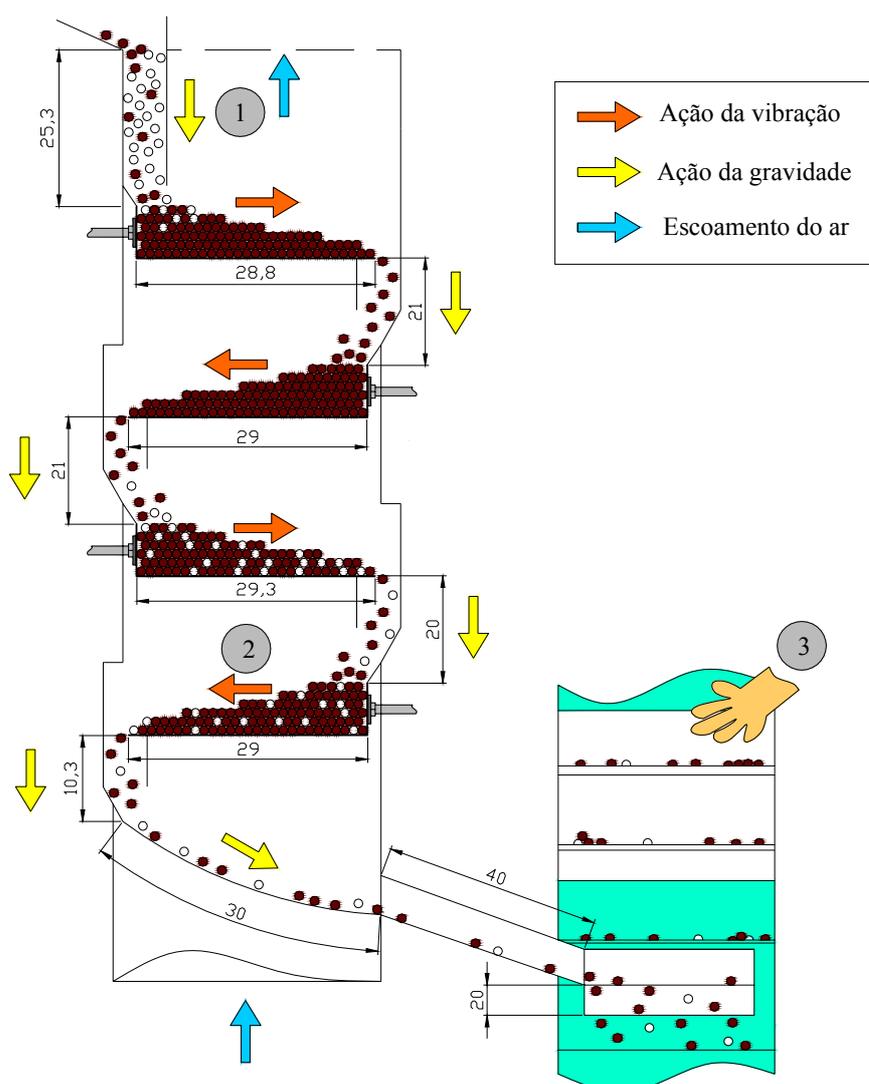


Figura 6.30 – Esquema do escoamento dos frutos de café no túnel de secagem.

A situação 1, apresentada na Figura 6.30, indica a introdução do pulso de partículas marcadas (esferas brancas) na saída do alimentador vibratório (entrada do secador). O conjunto de partículas escoam rapidamente pelo vertedouro, sob a ação gravitacional, e logo inicia sua dispersão na Bandeja 1.

A situação 2 mostra a dispersão das partículas marcadas nas bandejas, no vertedouro e na calha de descarga do secador. O efeito de mistura nos vertedouros deve ser mínimo, pois as partículas escoam apenas pela ação da gravidade. Ao posicionarem-se novamente no leito, o efeito de mistura deverá ser mais intenso, visto que as partículas são sobrepostas umas sobre as outras e aquelas que não escoam rapidamente sobre a superfície do leito serão encobertas pelos novos frutos de café oriundos do vertedouro a cada instante. As partículas que escoam próximo às paredes e no fundo das bandejas têm, provavelmente, a menor velocidade de escoamento. Apesar de estarem em contato direto com a bandeja e receberem a maior intensidade vibracional, o atrito e o efeito da pegajosidade (início do processo) diminui o grau de mistura e a velocidade de escoamento. Por isso os frutos de café apresentarão uma ampla distribuição de tempos de residência, principalmente pelas várias trajetórias que as partículas poderão percorrer no interior do secador. Por exemplo, um fruto de café que escoou rapidamente pela Bandeja 1 pode não ter o mesmo comportamento na bandeja seguinte, assim como outra partícula pode escoar rapidamente ou então vagorosamente em todas as bandejas.

A velocidade de escoamento na calha de descarga do secador é bastante alta devido à inclinação e à ação da gravidade. Portanto, o escoamento nesta região não causará efeito expressivo de mistura. Ao abandonarem a calha de descarga, os frutos de café caem na esteira transportadora e ali também não sofrerão dispersão. Dessa forma, pode-se adotar a condição de contorno de vaso fechado, para a modelagem matemática da dispersão neste secador, já que nas fronteiras do túnel de secagem ocorre escoamento pistonado.

Os frutos de café marcados que passavam pelo ponto de observação (esteira, após a saída do túnel de secagem) foram recolhidos manualmente e contabilizados em função do tempo, como mostra a Figura 6.30, situação 3. A concentração de partículas marcadas foi determinada pela Equação (6.46).

$$C = \frac{n_p \times m_p}{G \times \Delta t} \quad (6.46)$$

Sendo:  $n_p$  o número de partículas por intervalo de tempo;  $m_p$  a massa (g) de uma

partícula, estimada pela Equação (E.1), indicada no Apêndice E; G (g/min) a vazão mássica de frutos de café no secador e  $\Delta t$  o intervalo de tempo (min).

Com os dados de concentração em função do tempo foi possível determinar os seguintes parâmetros: o tempo médio de residência ( $t_m$ ) das partículas marcadas no secador pela Equação (6.19); a velocidade média ( $v$ ) de escoamento dos frutos de café pela Equação (6.47), sendo  $L = 3,037$  m; a variância ( $\sigma^2$ ) pela Equação (6.20); a assimetria ( $\psi$ ) pela Equação (6.21); a curtose ( $\kappa$ ) pela Equação (6.22) e a extensão percentual dos tempos de residência ( $\Xi$ ) pela Equação (6.23).

$$v = \frac{L}{t_m} \tag{6.47}$$

Os valores dos parâmetros citados acima, para o primeiro planejamento de secagem, são apresentados nas Tabelas 6.1 a 6.3.

Tabela 6.1 – Valores dos momentos em torno da média que caracterizam as curvas de DTR em função do conteúdo de umidade e velocidade dos frutos de café para o primeiro planejamento de secagem: T = 40°C.

Exp.	DTR	t [h]	X [bs]	G [g/min]	$v \times 10^4$ [m/s]	$t_m$ [min]	$\sigma^2$ [min <sup>2</sup> ]	$\psi$ [min <sup>3</sup> ]	$\kappa$ [min <sup>4</sup> ]	$\Xi$ [-]
1	1	9,25	0,8850	115,37	26,74	18,93	51,35	356,66	13315,95	147,84
	2	16,25	0,5391	370,55	37,97	13,33	55,78	744,78	18504,85	150,24
	3	20,22	0,4400	222,44	68,88	7,35	16,72	63,75	1204,02	144,16
	4	29,00	0,3625	188,78	34,80	14,54	66,96	934,08	26116,41	153,21
	5	33,27	0,3171	291,85	43,66	11,59	64,55	1483,39	59133,10	171,64
	6	39,17	0,2782	307,90	48,23	10,49	56,92	846,22	22861,19	164,73
	7	44,67	0,2338	392,82	68,43	7,40	33,45	389,44	9600,36	162,59
	8	52,92	0,1692	441,89	59,92	8,45	33,31	362,33	8583,08	167,97
	9	57,00	0,1378	268,50	45,20	11,20	28,26	212,64	3836,42	143,88
2	1	9,23	0,7707	186,00	42,38	11,94	35,78	204,45	3818,50	137,22
	2	14,17	0,5585	116,77	47,78	10,59	18,14	62,48	1037,98	140,83
	3	21,42	0,3969	128,50	37,52	13,49	65,38	748,98	19458,57	160,10
	4	26,08	0,3642	381,68	49,41	10,24	29,14	249,16	5105,00	154,35
	5	33,03	0,2758	122,33	29,10	17,39	50,45	424,71	11990,16	142,14
	6	38,25	0,2411	190,55	33,53	15,10	79,16	1317,82	44511,82	160,92
	7	44,92	0,2171	235,54	39,24	12,90	41,83	349,66	7348,45	149,64
	8	50,17	0,2067	179,10	25,12	20,15	144,17	3114,74	135414,34	162,38
3	1	1,08	1,7075	55,37	5,25	96,50	1373,92	40678,75	5430120,84	133,03
	2	8,33	0,8943	122,70	37,64	13,45	21,72	252,87	135,93	137,27
	3	15,20	0,5384	227,25	23,41	21,62	81,80	705,72	21237,22	129,25
	4	22,82	0,3908	291,01	40,05	12,64	23,49	131,40	2904,67	149,69
	5	27,07	0,3127	481,50	44,32	11,42	26,71	610,57	5346,91	147,38
	6	30,90	0,2627	564,00	59,21	8,55	10,68	87,54	238,06	138,67
	7	36,40	0,2127	562,50	61,88	8,18	20,79	215,85	3379,19	154,22
	8	39,62	0,1938	305,92	30,21	16,76	93,62	2655,34	77729,72	151,71
	9	42,98	0,1759	284,00	23,52	21,52	67,36	3431,87	43501,82	153,50
	10	47,82	0,1593	216,32	29,44	17,19	40,11	958,04	15853,80	172,62
	11	52,82	0,1474	301,84	37,22	13,60	52,27	595,93	15052,76	151,10

Pela análise das Tabelas 6.1 a 6.3 verifica-se que o tempo médio de residência dos frutos de café com conteúdo de umidade acima de 1,0 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco (Experimentos 3; 5; 6; 7; 8 e 8 safra 2005) é bastante alto, entretanto, há uma diminuição expressiva a partir desse conteúdo de umidade chegando à redução entre 80 e 90% do valor inicial (o mesmo grau de redução foi obtido nas intensidades de vibração).

Segundo Renaud, Thibault e Alvarez (2001), o tempo médio de residência ao longo da secagem tende a diminuir com a diminuição do conteúdo de umidade. Contudo, no trabalho atual, não ocorre uma diminuição linear com o conteúdo de umidade. Os tempos médios de residência são alterados devido às várias influências que atuam na dinâmica do leito: intensidade de vibração; conteúdo de umidade; vazão mássica; pegajosidade; densidade; esfericidade e tamanho de partículas. O comportamento fenomenológico do escoamento é complexo, sobretudo pela ampla faixa de umidade do café processado e pela necessidade constante de alterar-se a intensidade vibracional das bandejas para manter o escoamento dos frutos de café no secador.

Tabela 6.2 – Valores dos momentos em torno da média que caracterizam as curvas de DTR em função do conteúdo de umidade e velocidade dos frutos de café para o primeiro planejamento de secagem: T = 45°C.

Exp.	DTR	t [h]	X [bs]	G [g/min]	v×10 <sup>4</sup> [m/s]	t <sub>m</sub> [min]	σ <sup>2</sup> [min <sup>2</sup> ]	ψ [min <sup>3</sup> ]	κ [min <sup>4</sup> ]	Ξ [-]
4	1	9,50	0,7069	190,41	46,00	11,00	64,83	1544,88	54894,93	173,41
	2	14,42	0,4853	242,08	49,92	10,14	31,64	266,97	5796,46	151,67
	3	20,83	0,3525	185,74	27,98	18,09	201,79	5692,60	301070,33	175,28
	4	26,25	0,2624	214,32	45,83	11,04	40,09	350,97	7821,82	156,15
	5	28,60	0,2362	213,12	38,71	13,08	186,66	5900,80	301090,45	182,18
	6	32,42	0,2054	200,56	40,12	12,62	30,12	162,01	2749,93	137,60
	7	38,92	0,1742	209,18	36,82	13,75	84,62	1547,91	49891,86	164,77
5	1	1,92	1,3216	124,47	9,98	50,71	432,11	21587,71	1767040,89	130,68
	2	14,50	0,4501	703,11	91,74	5,52	10,59	74,50	993,66	165,80
	3	16,25	0,4095	753,00	97,00	5,22	8,46	41,79	422,36	155,40
	4	21,67	0,3080	883,00	91,72	5,52	6,61	11,31	106,46	147,70
	5	25,58	0,2506	907,47	94,11	5,38	8,13	18,11	186,64	151,26
	6	26,83	0,2345	589,50	100,65	5,03	6,27	15,61	116,38	145,75
	7	30,92	0,1891	471,21	74,46	6,80	14,11	54,72	611,41	147,33
6	1	3,00	1,2868	190,17	6,93	73,04	792,60	16613,25	1778505,62	134,39
	2	7,87	0,7097	213,00	37,52	13,49	70,06	1255,51	41383,47	163,69
	3	15,75	0,4041	74,32	18,55	27,28	205,74	4025,78	182547,43	138,25
	4	19,72	0,3256	341,56	46,90	10,79	32,06	275,55	6222,54	154,59
	5	24,17	0,2606	407,26	65,75	7,70	11,78	42,49	449,94	127,75
	6	25,58	0,2440	204,16	27,75	18,24	88,53	1241,51	42067,33	155,54
	7	28,92	0,2144	382,65	52,41	9,66	27,67	172,61	2748,93	150,95

Os valores indicados nas Tabelas 6.1 a 6.3 permitem a predição do formato das

curvas de DTR ( $C(t)$ ) antes mesmo de serem apresentadas. Os valores de variância são altos no início e depois diminuem, indicando que as curvas possuem maior espalhamento e pico mais achatado no início e depois se tornam mais agudas. Os valores de assimetria são todos positivos e indicam forte deslocamento para a esquerda. É importante ressaltar que a curtose mede, além do formato agudo ou achatado do pico, a extensão da cauda. Por isso, para algumas curvas de DTR em que o valor da curtose é menor, mas o formato do pico é mais agudo, deve-se observar, também, a extensão da cauda.

Nas Tabelas 6.1 a 6.3, pode-se observar que para valores menores de velocidade de escoamento dos frutos de café ( $v$ ) são obtidos os maiores valores dos momentos em torno da média, mesmo para tempos de secagem intermediários e finais.

Tabela 6.3 – Valores dos momentos em torno da média que caracterizam as curvas de DTR em função do conteúdo de umidade e velocidade dos frutos de café para o primeiro planejamento de secagem:  $T = 50^{\circ}\text{C}$ .

Exp.	DTR	t [h]	X [bs]	G [g/min]	$v \times 10^4$ [m/s]	$t_m$ [min]	$\sigma^2$ [min <sup>2</sup> ]	$\psi$ [min <sup>3</sup> ]	$\kappa$ [min <sup>4</sup> ]	$\Xi$ [-]
7	1	3,55	1,2659	172,50	33,22	15,24	18,56	43,48	1158,66	119,01
	2	8,92	0,6633	218,67	32,31	15,67	49,84	623,91	16197,93	140,99
	3	19,00	0,2242	372,47	54,77	9,24	28,63	217,32	4123,6	164,63
7 2005	1	9,33	0,6150	62,50	18,64	27,15	112,38	1031,26	41968,77	129,90
	2	14,33	0,2819	44,13	16,00	31,64	192,55	2554,02	128487,06	145,25
	3	18,25	0,2302	226,65	46,28	10,94	20,33	126,46	1733,01	124,95
	4	22,25	0,1834	295,62	58,95	8,59	9,55	40,25	477,37	127,99
	5	27,25	0,1354	291,49	45,07	11,23	37,07	440,07	10728,18	153,97
8	1	1,33	1,6540	70,00	7,58	66,79	735,98	15479,86	1452670,86	120,31
	2	7,58	0,6377	87,50	22,42	22,57	241,19	8607,27	535154,78	165,56
	3	13,75	0,3593	192,33	39,30	12,88	46,71	371,40	8040,43	150,99
	4	14,78	0,3392	117,00	22,77	22,23	87,32	1633,02	63215,79	142,69
	5	19,50	0,2699	125,20	20,36	24,86	216,56	3422,46	151805,53	156,79
	6	35,17	0,1092	383,73	44,61	11,35	36,88	384,73	7523,45	152,63
8 2005	1	2,00	1,6618	52,03	4,26	118,93	1881,24	77467,52	11459050,45	114,77
	2	11,75	0,4475	97,30	17,33	29,21	249,41	5017,99	264978,55	152,77
	3	15,42	0,3289	127,80	23,36	21,67	105,22	2022,90	83901,85	151,22
	4	19,25	0,2465	157,99	29,81	16,98	53,80	469,21	12473,93	131,11
	5	24,25	0,1828	201,25	30,19	16,77	66,03	986,62	33344,51	141,42
	6	30,25	0,1425	127,35	20,35	24,87	94,55	1717,55	70669,62	139,19
	7	32,92	0,1319	148,35	18,07	28,01	64,63	650,48	22976,22	117,55
9	1	3,13	1,2685	313,00	22,73	22,27	57,70	26,51	6973,39	144,36
	2	5,08	0,9371	211,33	31,11	16,27	49,70	708,67	20207,64	156,08
	3	8,75	0,5561	510,68	82,00	6,17	8,07	21,00	204,82	136,99
	4	16,17	0,2728	400,38	65,43	7,74	17,87	95,26	1198,37	149,11
	5	26,97	0,1482	308,58	71,10	7,12	10,22	47,65	504,54	143,89

No início da secagem, as velocidades de escoamento dos frutos de café são baixas e as curvas de DTR possuem variância, assimetria e curtose altas, entretanto a extensão

percentual dos tempos de residência não é tão intensa, quando comparada às demais curvas de DTR. Esse comportamento pode ser observado na primeira DTR dos Experimentos 3; 5; 6; 8 e 8 (safra 2005), cujo conteúdo de umidade, em que a DTR foi realizada, é maior em relação aos outros experimentos. Para esse caso, as curvas são mais espalhadas, com pico mais achatado e menor extensão da cauda em relação aos menores tempos de residência das partículas marcadas. Isso explica os menores valores de extensão percentual dos tempos de residência ( $\Xi$ ) e esse comportamento pode ocorrer devido à alta vibração no início da secagem, que apesar da maior pegajosidade, maior massa e menor velocidade das partículas, impede a formação de canais preferenciais e zonas mortas no secador, confirmando as afirmações de vários autores de que a vibração melhora o escoamento de materiais particulados.

Ao final da secagem, com velocidade de escoamento alta a variância, a assimetria e a curtose diminuem, em relação à inicial, mas a extensão percentual dos tempos de residência permanece alta. Esse efeito está relacionado à diminuição da vibração, cerca de 85% do valor inicial. Desta forma, apesar da redução da massa, da pegajosidade e do volume, o escoamento dos frutos de café ocorre com comportamento de existência de espaço morto e canais preferenciais (presença de cauda longa deslocada para a direita).

Outra influência que dificulta o escoamento é a diminuição da esfericidade dos frutos de café. Um exemplo desse comportamento é a DTR 8 do Experimento 2, que ao final da secagem apresentou maior variância, assimetria, curtose e extensão dos tempos de residência, apresentando uma cauda mais longa em relação às outras DTRs. A variedade de café utilizada neste experimento é a Mundo Novo, a qual possui a menor esfericidade (0,90-0,80).

O Experimento 5 (Tabela 6.2) apresentou os menores valores de tempo médio de residência, variância, assimetria e curtose. A explicação para esse comportamento diferenciado dos demais é a ausência de pegajosidade (mesmo no início da secagem) e o menor diâmetro de partícula e maior esfericidade da variedade Catuaí. Apesar de apresentar altas velocidades e menores valores dos momentos em torno da média, a extensão percentual dos tempos de residência não diminuiu, o que comprova a influência da vibração no sentido de melhorar o escoamento, ou seja, uma amplitude vibracional menor faz com que a diferença entre os valores máximos e mínimos dos tempos de residência aumente, aumentando a extensão da cauda da curva de DTR.

Em geral, os experimentos realizados com a variedade Catuaí (Experimentos 5; 6 e 7) apresentaram os menores valores dos momentos em torno da média. Os maiores valores foram obtidos nos experimentos com a variedade Mundo Novo (Experimentos 1; 2; 3 e 4) comprovando que a maior esfericidade, o menor diâmetro da partícula e também a menor pegajosidade favoreceu o escoamento dos frutos de café sobre as bandejas vibradas. O Experimento 6 foi o que apresentou os maiores valores de variância, assimetria e curtose, apesar de requerer as maiores amplitudes de vibração. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato da vazão de ar empregada na secagem ser a de menor nível (7 kg ar/min) e a massa inicial a de maior nível (13,5 kg). Assim, há indícios de que a contribuição da força de arraste do ar também exerce influência no escoamento dos frutos de café.

Todas as considerações efetuadas acima podem ser comprovadas pela visualização das curvas de DTR para o primeiro planejamento de secagem apresentadas nas Figuras 6.31 a 6.60, as quais encontram-se na Seção 6.4.2.1 a seguir.

As Tabelas 6.4 a 6.6 apresentam os valores dos momentos em torno da média em função do tempo de secagem, do conteúdo de umidade do café, da vazão e da velocidade de escoamento dos frutos de café, para o segundo planejamento de secagem.

Tabela 6.4 – Valores dos momentos em torno da média que caracterizam as curvas de DTR em função do conteúdo de umidade e velocidade dos frutos de café para o segundo planejamento de secagem: M = 10 kg.

Exp.	DTR	t [h]	X [bs]	G [g/min]	$v \times 10^4$ [m/s]	$t_m$ [min]	$\sigma^2$ [min <sup>2</sup> ]	$\psi$ [min <sup>3</sup> ]	$\kappa$ [min <sup>4</sup> ]	$\Xi$ [-]
1	1	13,53	0,6110	60,50	17,90	28,27	135,71	1675,33	74679,68	142,00
	2	24,33	0,3434	107,09	25,26	20,04	67,36	892,32	30987,73	137,21
	3	30,00	0,2654	133,66	27,16	18,64	44,54	371,44	10423,78	133,68
	4	34,08	0,2285	155,23	34,80	14,55	47,00	472,70	12827,84	143,73
	5	36,75	0,2104	107,73	22,36	22,64	95,44	1352,43	45347,13	139,46
	6	40,00	0,1934	90,40	23,68	21,38	126,95	1926,09	71012,91	146,20
	7	44,00	0,1779	89,24	22,82	22,18	93,37	1172,37	40323,08	146,71
2	1	14,92	0,5610	92,78	28,74	17,61	37,98	381,11	8780,66	122,70
	2	25,17	0,3067	95,90	29,14	17,37	36,35	313,70	8019,32	126,04
	3	28,58	0,2543	111,03	30,69	16,49	111,69	2497,76	100990,93	158,88
	4	30,42	0,2308	78,96	27,16	18,64	35,88	351,54	9692,28	123,78
	5	35,42	0,1797	93,92	24,57	20,60	55,85	363,99	10365,60	131,26
	6	40,00	0,1458	151,89	22,93	22,07	62,91	337,13	11420,67	129,94
	7	43,33	0,1271	216,06	40,88	12,38	35,24	362,64	8315,87	143,22
3	1	14,58	0,6570	42,97	15,21	32,27	531,18	17649,72	1203012,12	169,83
	2	21,00	0,4525	54,79	26,53	19,08	58,12	956,71	28485,64	135,05
	3	24,58	0,3769	71,61	28,34	17,86	68,15	1056,57	33289,57	140,40
	4	28,17	0,3043	74,59	29,19	17,34	61,48	928,48	31861,04	148,23
	5	36,00	0,1557	149,84	36,44	13,89	39,45	375,31	8490,34	138,93
	6	41,33	0,0986	143,89	28,21	17,94	34,28	209,53	4380,53	108,50

A variedade de café utilizada nos experimentos do segundo planejamento de secagem foi a Mundo Novo e, na safra de 2004, apresentou-se bastante pegajosa e com maior diâmetro de partícula. Essas duas características influenciaram no escoamento dos frutos de café, sendo visível a influência no tempo médio de residência (Tabelas 6.4 a 6.6), que em geral, apresentou valores maiores do que nos experimentos do primeiro planejamento de secagem.

Entretanto, no segundo planejamento pode-se observar uma diminuição no tempo médio de residência com a redução no conteúdo de umidade dos frutos de café, a qual foi menos perceptível no primeiro planejamento de secagem, devido à grande variação dos tempos de residência ao final da secagem.

Tabela 6.5 – Valores dos momentos em torno da média que caracterizam as curvas de DTR em função do conteúdo de umidade e velocidade dos frutos de café para o segundo planejamento de secagem:  $M = 12$  kg.

Exp.	DTR	t [h]	X [bs]	G [g/min]	$v \times 10^4$ [m/s]	$t_m$ [min]	$\sigma^2$ [min <sup>2</sup> ]	$\psi$ [min <sup>3</sup> ]	$\kappa$ [min <sup>4</sup> ]	$\Xi$ [-]
4	1	9,42	0,8798	129,15	10,45	48,45	575,65	6443,94	712629,24	159,43
	2	22,50	0,2835	65,04	14,18	35,69	374,88	8124,17	510972,24	159,82
	3	27,58	0,2185	81,42	17,11	29,58	184,42	3322,82	174781,87	145,17
	4	31,25	0,1884	149,31	45,82	11,05	30,61	414,47	9719,09	145,70
	5	36,58	0,1604	114,36	33,74	15,00	50,24	361,08	7836,25	136,10
	6	40,33	0,1480	153,87	30,87	16,40	67,27	578,32	15387,96	135,02
	7	44,33	0,1390	143,10	33,25	15,22	26,72	148,31	2789,65	132,58
5	1	3,83	1,4601	187,81	8,59	58,93	1197,21	47345,67	4813487,19	153,53
	2	7,35	0,9604	89,86	14,70	34,44	379,95	10209,68	692051,85	165,21
	3	13,58	0,5121	272,44	17,85	28,35	613,44	16076,99	1145468,08	176,19
	4	18,25	0,3616	365,53	49,27	10,27	24,96	197,31	4066,92	149,69
	5	20,42	0,3195	251,76	38,68	13,09	67,71	809,73	21967,85	160,71
	6	26,00	0,2299	245,72	48,33	10,47	18,07	85,03	1140,75	123,35
	7	32,00	0,1903	190,06	33,49	15,11	70,87	837,54	22842,49	128,00
	8	36,50	0,1801	308,11	35,32	14,33	70,70	1139,83	36348,61	112,19
5 2005	1	5,25	1,3816	55,27	7,68	65,88	2081,81	123395,79	18178389,95	177,88
	2	12,17	0,7327	84,76	19,15	26,43	174,20	3318,32	158388,31	150,96
	3	17,42	0,4475	113,13	24,12	20,98	73,10	1020,84	33929,02	133,30
	4	22,08	0,3463	142,87	26,03	19,45	56,46	952,95	33191,60	141,00
	5	26,17	0,2780	204,11	28,14	17,99	57,46	598,61	16718,61	134,67
	6	32,75	0,1995	170,32	35,23	14,37	41,70	358,83	9884,79	141,81
	7	38,25	0,1550	174,30	35,28	14,35	22,30	118,05	1990,67	118,86
	8	42,33	0,1306	153,41	30,89	16,39	25,91	150,50	2685,42	111,79
6	1	15,42	0,4720	86,43	19,06	26,55	189,65	4209,51	217192,58	156,46
	2	21,33	0,3472	88,80	34,92	14,50	31,56	158,72	2969,57	124,33
	3	27,42	0,2610	138,19	33,70	15,02	48,34	425,25	11164,82	152,59
	4	36,50	0,1827	132,29	33,14	15,27	61,14	805,14	23272,61	154,30
	5	40,33	0,1614	73,26	25,37	19,95	77,33	1386,19	54445,67	145,34
	6	45,75	0,1393	130,35	25,63	19,75	85,63	1402,24	55558,31	148,41
	7	48,92	0,1296	179,43	30,97	16,34	88,70	1866,05	69699,14	154,73

Os valores dos momentos em torno da média apresentados nas Tabelas 6.4 a 6.6 indicam que as curvas de DTR apresentam uma distribuição espalhada, com forte deslocamento para a esquerda e com picos agudos, porém com presença de cauda longa deslocada à direita. A única exceção é a DTR 1 do Experimento 7, que possui deslocamento para a direita (valor negativo da assimetria). Esse comportamento foi devido ao aumento na vazão mássica durante a realização da DTR, pelo próprio sistema, sem intervenção do operador, fazendo com que o maior número de partículas abandonasse o secador após o tempo médio de residência.

As curvas de DTR com menor velocidade de escoamento dos frutos de café apresentaram valores de variância, assimetria e curtose maiores do que aquelas com velocidade maior, ou seja, a menor velocidade de escoamento torna a curva mais espalhada, com pico mais achatado e deslocamento para a esquerda.

Tabela 6.6 – Valores dos momentos em torno da média que caracterizam as curvas de DTR em função do conteúdo de umidade e velocidade dos frutos de café para o segundo planejamento de secagem:  $M = 14$  kg.

Exp.	DTR	t [h]	X [bs]	G [g/min]	$v \times 10^4$ [m/s]	$t_m$ [min]	$\sigma^2$ [min <sup>2</sup> ]	$\psi$ [min <sup>3</sup> ]	$\kappa$ [min <sup>4</sup> ]	$\Xi$ [-]
7	1	6,75	1,2114	165,89	5,85	86,47	1334,63	-2919,86	4340433,68	167,98
	2	23,33	0,3204	133,00	16,37	30,93	479,26	17897,11	1285678,04	175,21
	3	29,33	0,1644	191,99	28,94	17,49	78,40	756,66	24648,20	149,70
	4	35,33	0,1222	87,11	15,59	32,47	359,92	11149,17	688958,37	160,84
	5	43,92	0,0928	130,73	16,71	30,29	274,76	4709,40	249190,84	144,51
8	1	8,00	0,8674	102,19	31,30	16,17	61,85	842,92	21980,23	149,70
	2	13,58	0,4402	190,67	29,27	17,29	27,92	139,01	3422,13	125,27
	3	15,25	0,4061	255,87	37,53	13,49	21,45	92,62	1429,39	112,38
	4	18,83	0,3434	324,15	41,00	12,34	29,66	360,84	9098,38	141,45
	5	21,50	0,3048	358,85	50,09	10,11	22,88	190,21	3224,62	137,58
	6	26,17	0,2506	180,42	35,42	14,29	72,14	863,30	20480,88	146,02
	7	35,25	0,1804	259,84	40,83	12,40	48,94	619,04	15026,98	156,69
	8	46,00	0,1346	195,35	30,06	16,84	16,08	43,68	689,59	86,21
9	1	10,08	0,8082	97,01	21,88	23,13	45,47	0,76	4583,83	103,60
	2	14,08	0,5043	157,33	19,64	25,77	316,85	8249,33	416342,32	144,70
	3	20,33	0,3019	221,51	36,19	13,99	47,10	591,43	16526,84	158,05
	4	26,17	0,1994	147,94	28,53	17,74	42,53	314,04	6727,89	117,64
	5	35,08	0,1235	167,92	30,11	16,81	20,95	107,23	1737,18	104,64

A extensão percentual dos tempos de residência apresentou-se maior para os valores de velocidade de escoamento menores, ou seja, a cauda das curvas com menor velocidade foi mais longa. Contudo, ao final da secagem, houve uma redução neste parâmetro para alguns experimentos (Experimentos 3; 4; 5; 7 e 8) porque, devido à pegajosidade intensa dos frutos de café, os valores de amplitude vibracional foram maiores para os experimentos do segundo

planejamento de secagem e contribuíram para a melhoria no escoamento dos frutos de café.

Todas as considerações efetuadas acima podem ser comprovadas pela visualização das curvas de DTR para o segundo planejamento de secagem mostradas nas Figuras 6.61 a 6.93, as quais encontram-se na Seção 6.4.2.1 a seguir que, além das curvas de DTR, apresenta o ajuste de modelos para determinação do coeficiente de dispersão dos frutos de café.

#### **6.4.2.1 – Determinação do Coeficiente de Dispersão dos Frutos de Café**

A determinação da velocidade média de escoamento dos frutos de café para cada curva de distribuição do tempo de residência é necessária para se obter o coeficiente de dispersão dos frutos de café durante a secagem. Como indicado previamente, existem vários modelos e correlações que fornecem o coeficiente de dispersão a partir da curva  $C(t)$ .

Entretanto, nem todos os modelos são aplicáveis às condições de escoamento deste trabalho. Na verdade, originalmente, todos os modelos foram desenvolvidos para escoamento de substâncias gasosas ou líquidas. Na literatura são encontrados inúmeros trabalhos que abordam a dispersão de gases e líquidos. Há também estudos da dispersão de sólidos em meio líquido e em meio sólido. Contudo, o tamanho das partículas empregadas nestes trabalhos é bastante reduzido quando comparado ao tamanho de um fruto de café.

Somente Alhamdan e Sastry (1998) estudaram partículas de alimentos e inertes com dimensão característica de 1 cm, mas escoando em meio líquido e Souza (1997) que determinou a distribuição do tempo de ciclos no recobrimento de comprimidos com diâmetros de  $5,56 \times 10^{-3}$  m;  $7,18 \times 10^{-3}$  m e  $8,89 \times 10^{-3}$  m, em leito vibro-jorrado. Assim, acredita-se que o trabalho atual é de grande importância tecnológica, sobretudo, pela ampliação da disposição de dados e discussão para processamento de partículas de maior tamanho.

A escolha do modelo foi fundamentada no trabalho desenvolvido por Menezes (1996), o qual estudou a dispersão de café pergaminho (ver Figura 3.8) em secador de bandejas vibradas ( $A = 1,5$  mm e  $f = 5$  e  $6$  Hz) e obteve uma boa aproximação entre os modelos linearizados da Dispersão de Taylor (Equação 6.38) e da Dispersão Livre (Equação 6.39) e os dados experimentais.

Assim, os modelos escolhidos foram: o Modelo da Dispersão de Taylor (originalmente desenvolvido para escoamento em tubulações circulares) e o Modelo da

Dispersão Livre (originalmente desenvolvido para dispersão de gases na atmosfera a partir de chaminés) na sua forma original e não linearizados como no trabalho de Menezes (1996).

Além do menor esforço computacional, a razão para a utilização técnica de regressão não-linear para a representação matemática do comportamento da distribuição do tempo de residência dos frutos de café é a presença de cauda longa e forte assimetria na curva  $C$ , e por isso não é recomendada a utilização do modelo da dispersão axial (ver Figura 6.8).

Segundo Alkhaddar e colaboradores (2001) a técnica de regressão não-linear aproximada tem consideráveis vantagens na estimativa dos parâmetros do modelo da dispersão axial e deve ser utilizada para caracterizar a distribuição do tempo de residência. Esta técnica fornece informações sobre a adequabilidade da descrição do modelo e é menos sensível aos efeitos de cauda da distribuição do tempo de residência.

Os modelos da Dispersão de Taylor e da Dispersão Livre foram ajustados aos dados de concentração de partículas em função do tempo utilizando-se a função de ajuste com modelo não linear do *software* STATISTICA 5.0. Os parâmetros obtidos com o ajuste foram o coeficiente de dispersão ( $E_z$ ) e a constante  $K$ . Por isso, as Equações (6.38) e (6.39) foram reescritas de forma a obter um modelo com apenas dois parâmetros ( $E_z$  e  $K_T$  ou  $K_L$ ), como mostram as Equações (6.48) e (6.49).

$$C = \frac{K_T}{\sqrt{E_z t}} e^{\left(-\frac{(L-vt)^2}{4E_z t}\right)} \quad (6.48)$$

$$C = \frac{K_L}{\sqrt{E_z t^3}} e^{\left(-\frac{(L-vt)^2}{4E_z t}\right)} \quad (6.49)$$

Na Equação (6.48)  $K_T$  representa, segundo Menezes (1996), os parâmetros do sistema, como a massa total que constitui o pulso de entrada ( $m$ ) e a área da seção transversal das bandejas, normal à direção do escoamento, como mostra a Equação (6.50).

$$K_T = \frac{m}{\pi R^2 \sqrt{4\pi}} \quad (6.50)$$

Na Equação (6.49)  $K_L$  representa apenas a intensidade da fonte de emissão dos gases,

que neste caso é a massa total do pulso dividida por constantes como mostra a Equação (6.51) (CUSSLER, 1997).

$$K_L = \frac{m}{8\sqrt{\pi^3}} \quad (6.51)$$

Além dos dois modelos utilizados para ajuste das curvas de DTR, empregou-se uma modificação do modelo da Dispersão Livre, onde o tempo elevado ao cubo foi substituído pelo tempo elevado a um número “n”, que representa mais um parâmetro a ser estimado na equação de ajuste. A equação com três parâmetros tende a melhorar o coeficiente de correlação do ajuste.

A decisão de modificar a potência do tempo (t) deve-se à percepção de que esse termo atua diretamente na altura do pico da curva. Na maioria das vezes o ajuste dos outros modelos não fornecia uma curva suficientemente aguda para representar adequadamente os dados experimentais. A equação do Modelo da Dispersão Livre, com a modificação na potência do tempo, é apresentada na Equação (6.52). A constante  $K_n$  possui a mesma fórmula matemática da Equação (6.51) para  $K_L$ .

$$C = \frac{K_n}{\sqrt{E_z t^n}} e^{\left(-\frac{(L-vt)^2}{4E_z t}\right)} \quad (6.52)$$

As Equações (6.48), (6.49) e (6.52) foram ajustadas aos dados experimentais de concentração de partículas marcadas em função do tempo para determinação do coeficiente de dispersão ( $E_z$ ), das constantes  $K_T$ ,  $K_L$  e  $K_n$  e do valor de “n” empírico.

As curvas geradas por essas equações estão representadas nas Figuras 6.31 a 6.60, juntamente com os dados experimentais de concentração em função do tempo, para o primeiro planejamento de secagem.

As curvas plotadas são referentes ao modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais de concentração de partículas marcadas em função do tempo. Para a grande maioria das curvas, o modelo com maior coeficiente de correlação foi o Modelo da Dispersão Livre Modificado. Os valores do coeficiente de correlação estão apresentados nas Tabelas 6.7 a 6.9. Para algumas curvas plotadas isoladamente, foram indicados os três modelos de dispersão a fim de comparar graficamente o melhor ajuste.

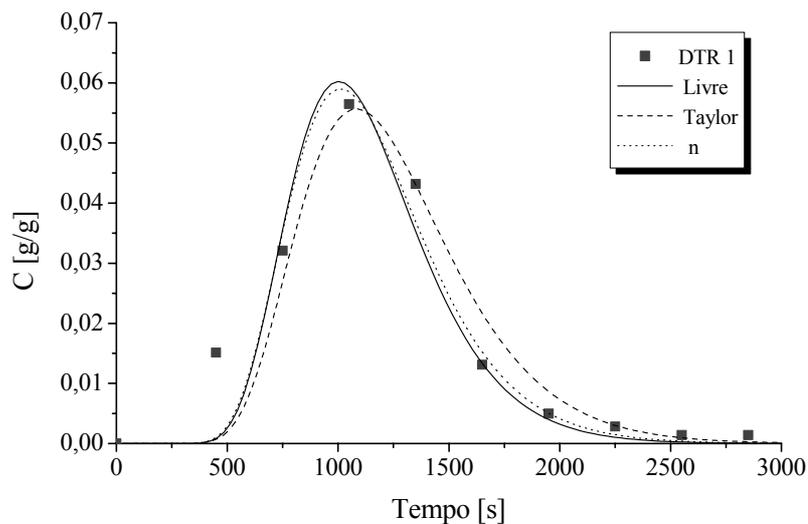


Figura 6.31 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 1: DTR 1.

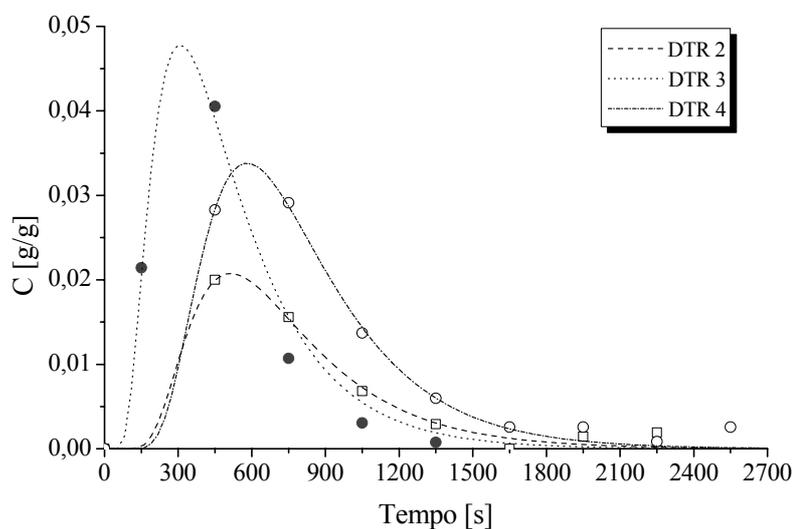


Figura 6.32 – DTR para o Experimento 1 □: DTR 2; ●: DTR 3; ○: DTR 4.

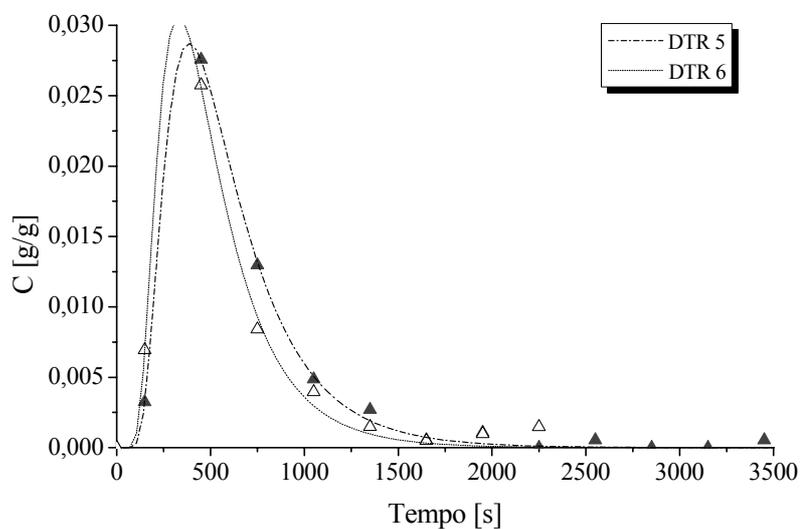


Figura 6.33 – DTR para o Experimento 1 ▲: DTR 5; △: DTR 6.

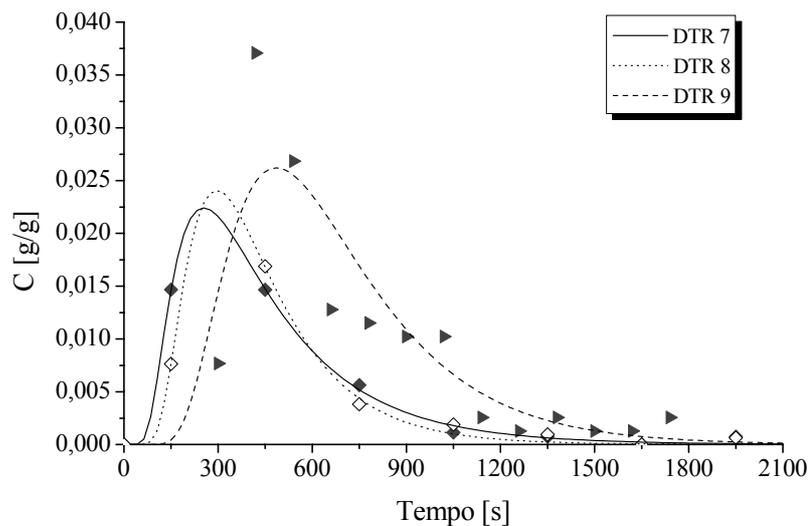


Figura 6.34 – DTR para o Experimento 1 ◆: DTR 7; ◇: DTR 8; ►: DTR 9.

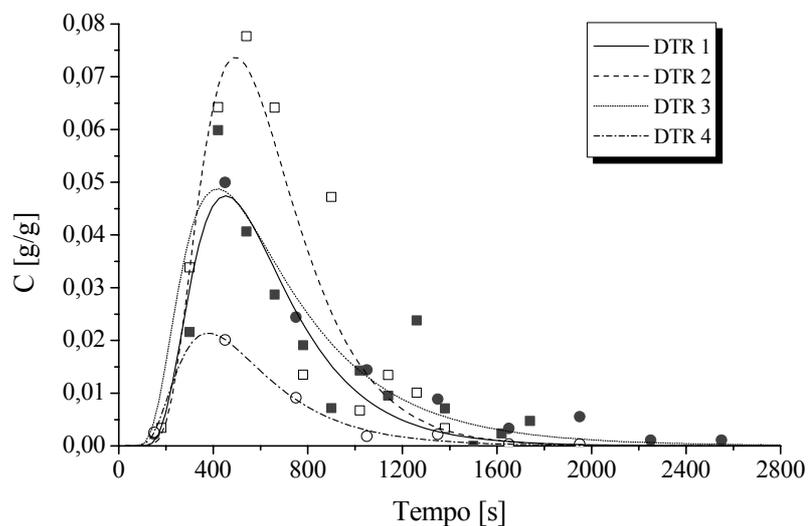


Figura 6.35 – DTR para o Experimento 2 ■: DTR 1; □: DTR 2; ●: DTR 3; ○: DTR 4.

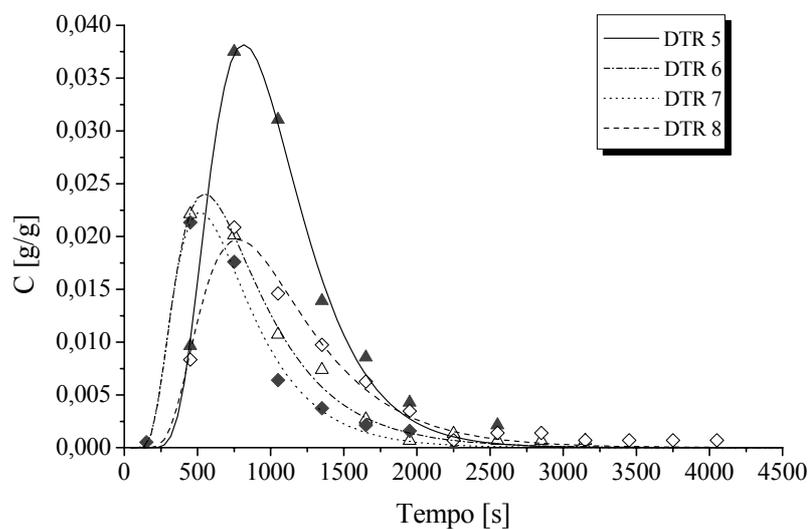


Figura 6.36 – DTR para o Experimento 2 ▲: DTR 5; △: DTR 6; ◆: DTR 7; ◇: DTR 8.

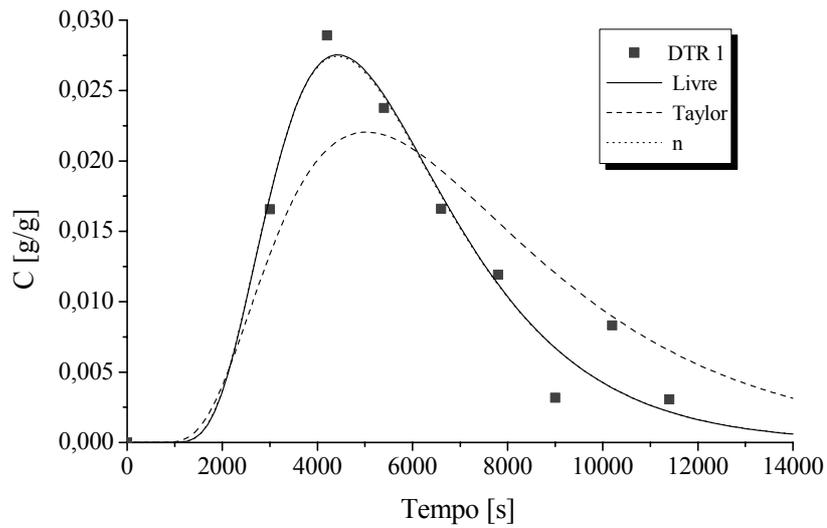


Figura 6.37 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 3: DTR 1.

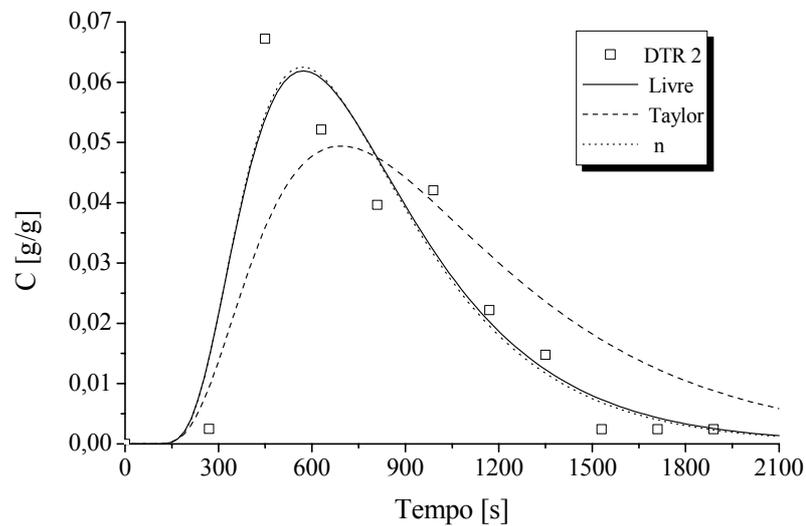


Figura 6.38 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 3: DTR 2.

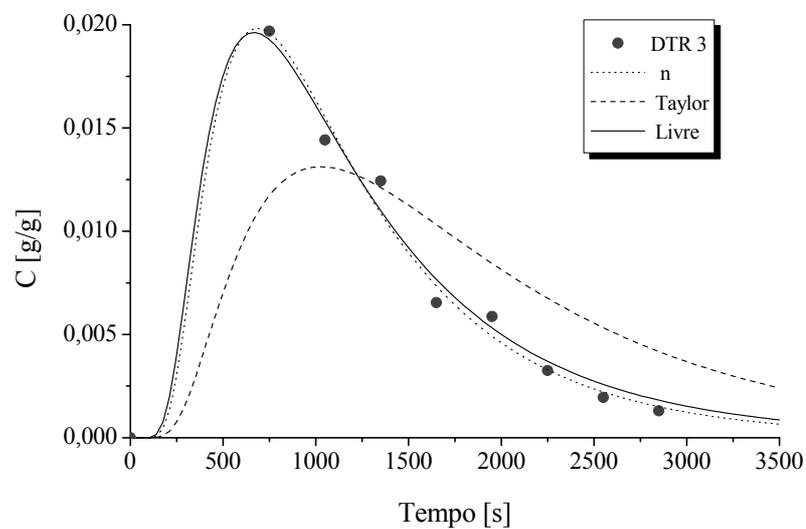


Figura 6.39 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 3: DTR 3.

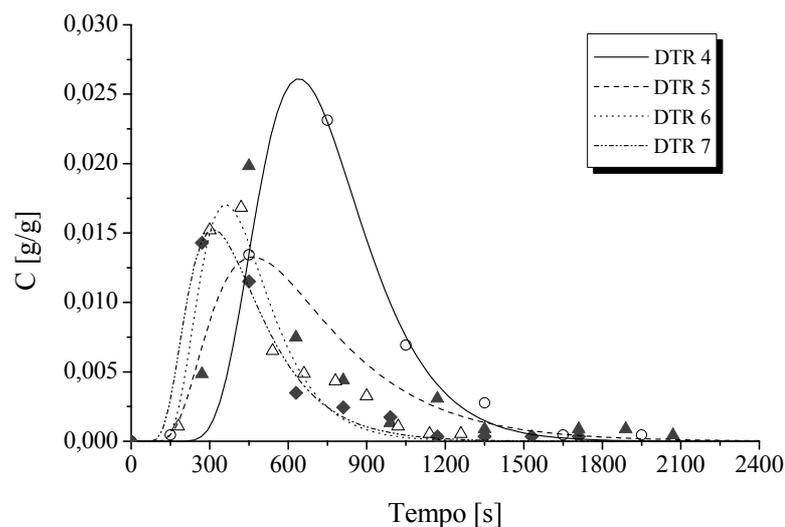


Figura 6.40 – DTR para o Experimento 3 ○: DTR 4; ▲: DTR 5; △: DTR 6; ◆: DTR 7.

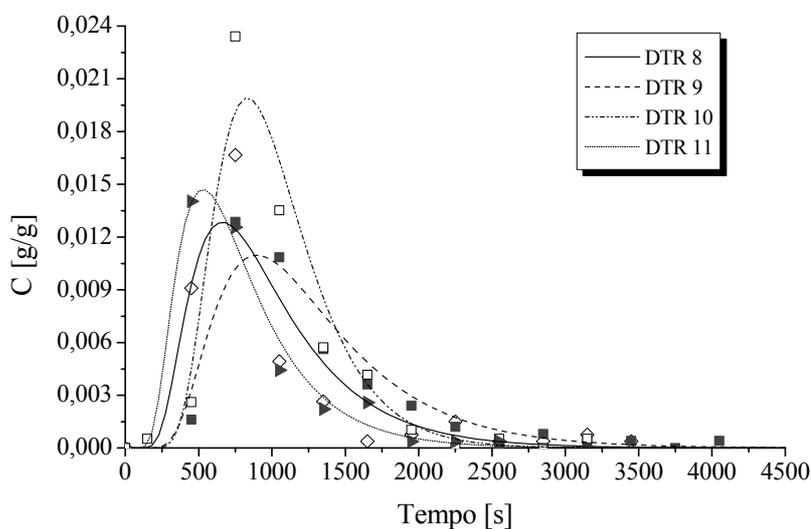


Figura 6.41 – DTR para o Experimento 3 ◇: DTR 8; ■: DTR 9; □: DTR 10; ►: DTR 11.

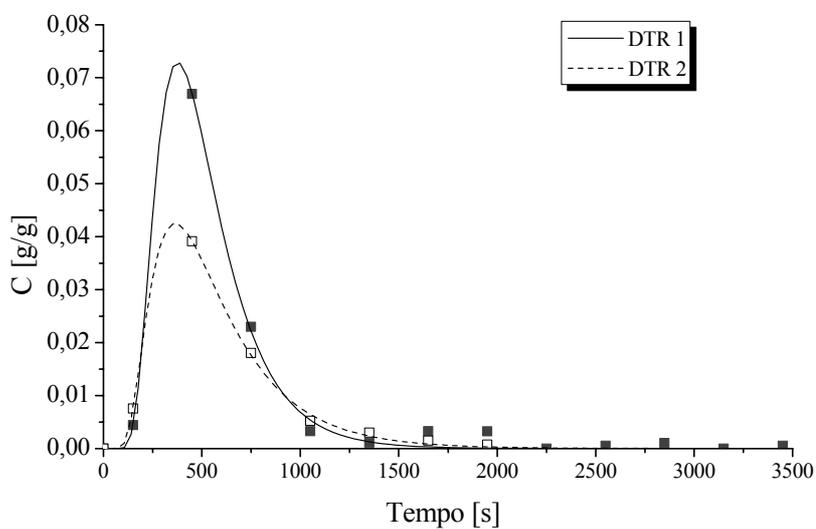


Figura 6.42 – DTR para o Experimento 4 ■: DTR 1; □: DTR 2.

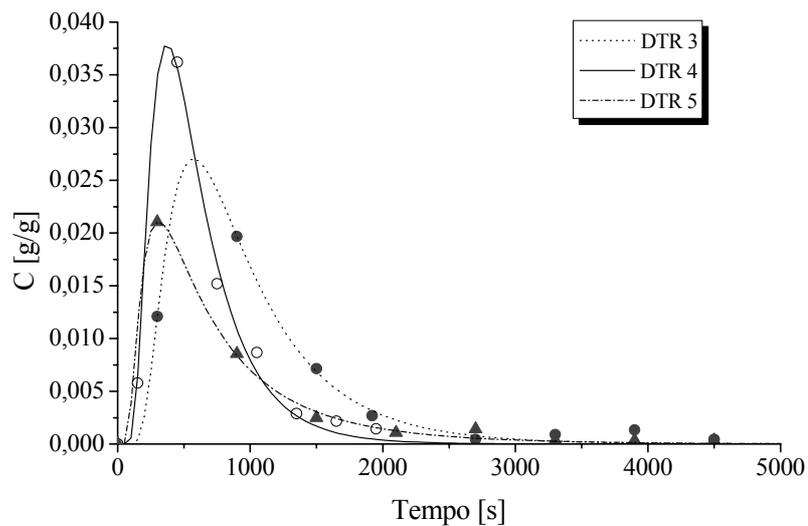


Figura 6.43 – DTR para o Experimento 4 ●: DTR 3; ○: DTR 4; ▲: DTR 5.

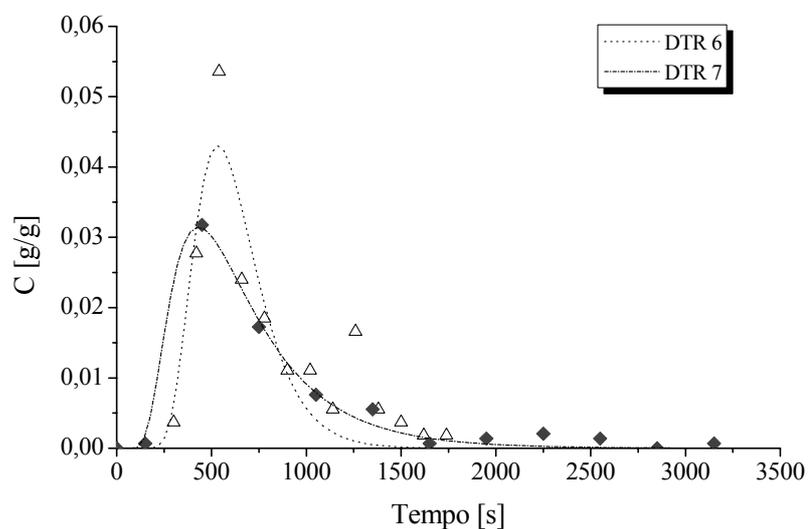


Figura 6.44 – DTR para o Experimento 4 Δ: DTR 6; ◆: DTR 7.

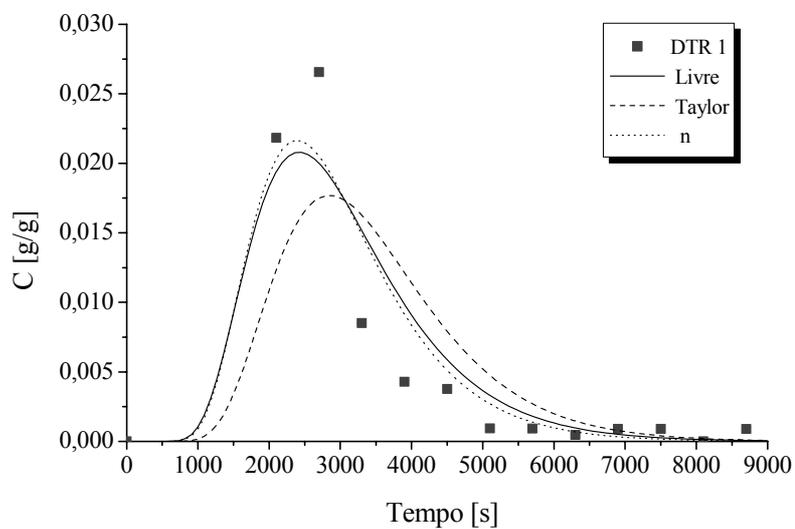


Figura 6.45 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 5: DTR 1.

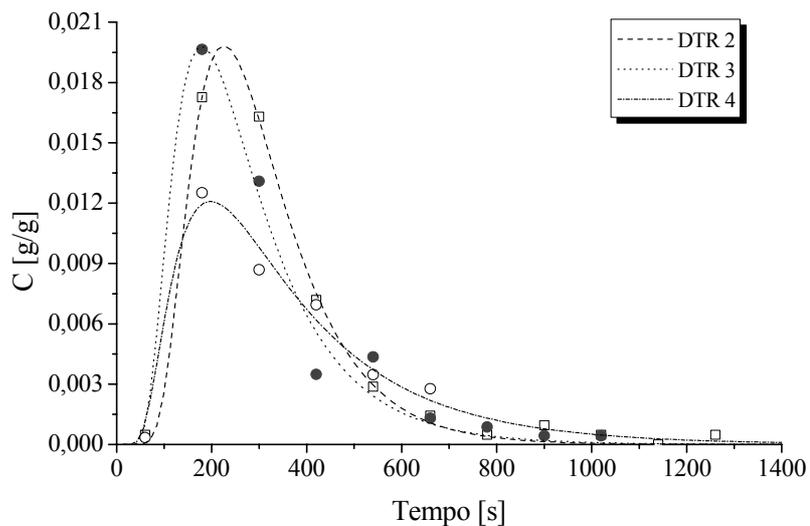


Figura 6.46 – DTR para o Experimento 5 □: DTR 2; ●: DTR 3; ○: DTR 4.

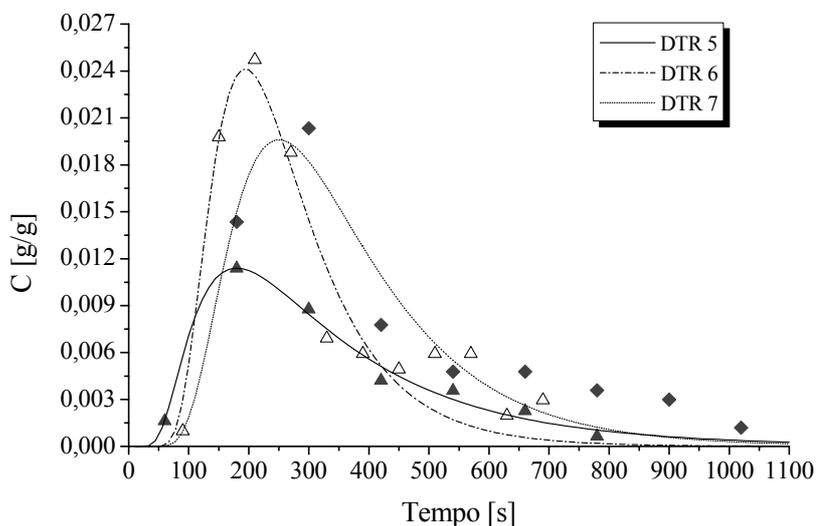


Figura 6.47 – DTR para o Experimento 5 ▲: DTR 5; Δ: DTR 6; ◆: DTR 7.

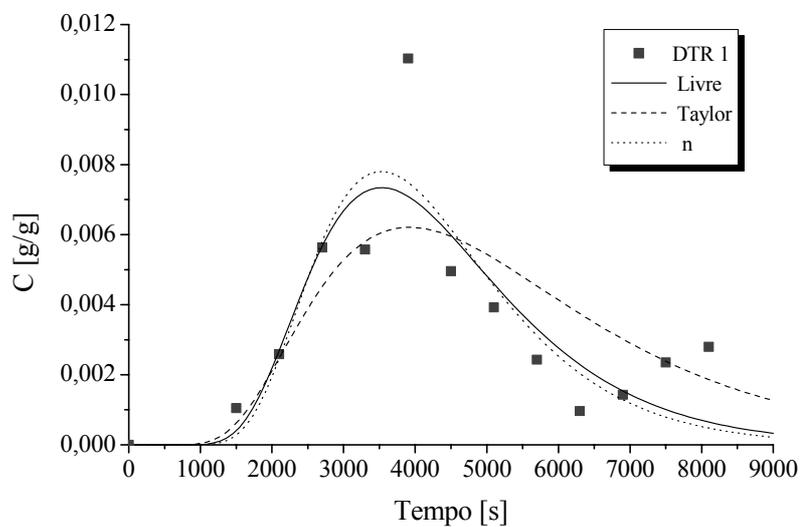


Figura 6.48 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 6: DTR 1.

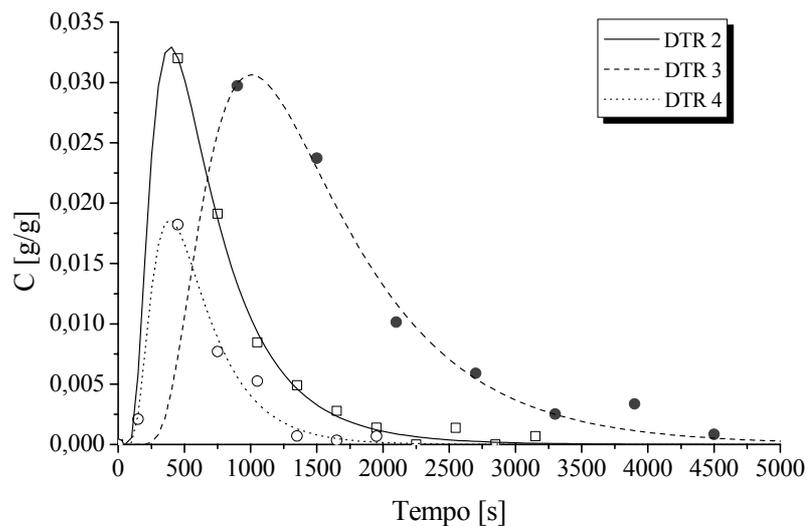


Figura 6.49 – DTR para o Experimento 6 □: DTR 2; ●: DTR 3; ○: DTR 4.

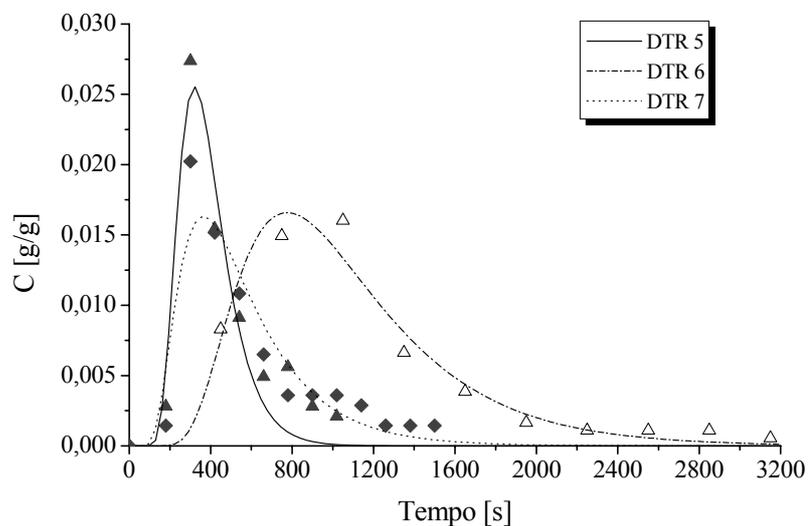


Figura 6.50 – DTR para o Experimento 6 ▲: DTR 5; Δ: DTR 6; ◆: DTR 7.

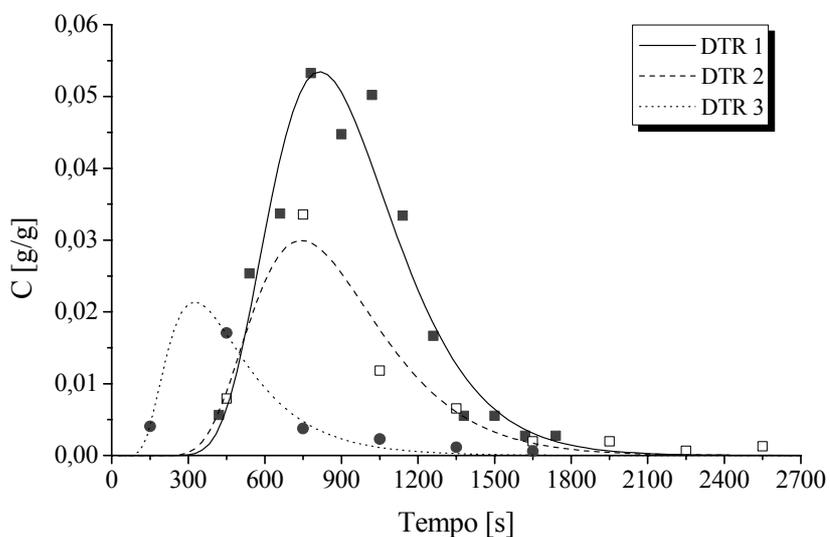


Figura 6.51 – DTR para o Experimento 7 ■: DTR 1; □: DTR 2; ●: DTR 3.

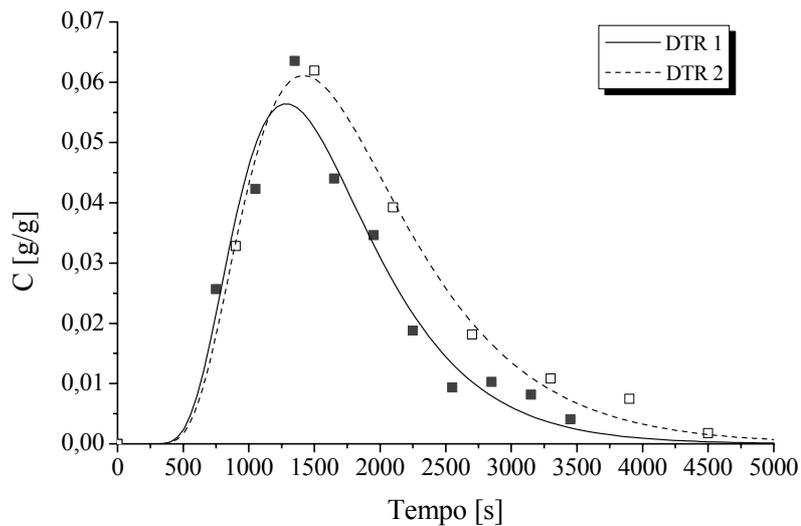


Figura 6.52 – DTR para o Experimento 7 (2005) ■: DTR 1; □: DTR 2.

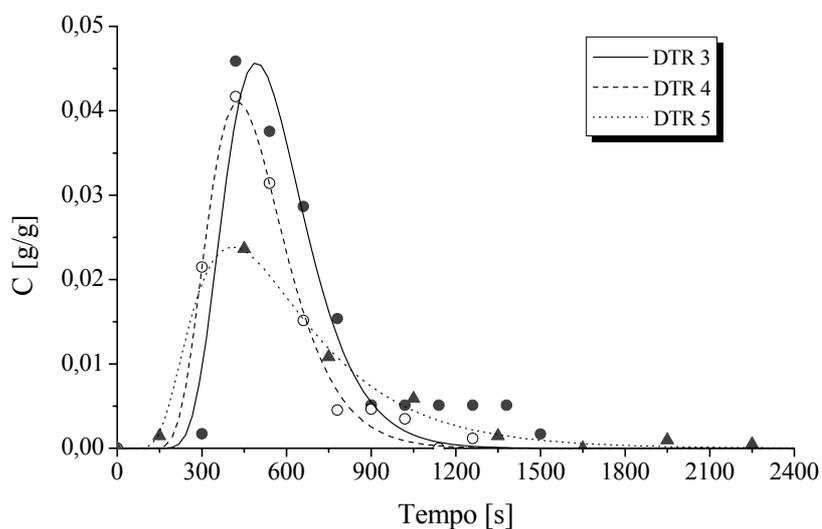


Figura 6.53 – DTR para o Experimento 7 (2005) ●: DTR 3; ○: DTR 4; ▲: DTR 5.

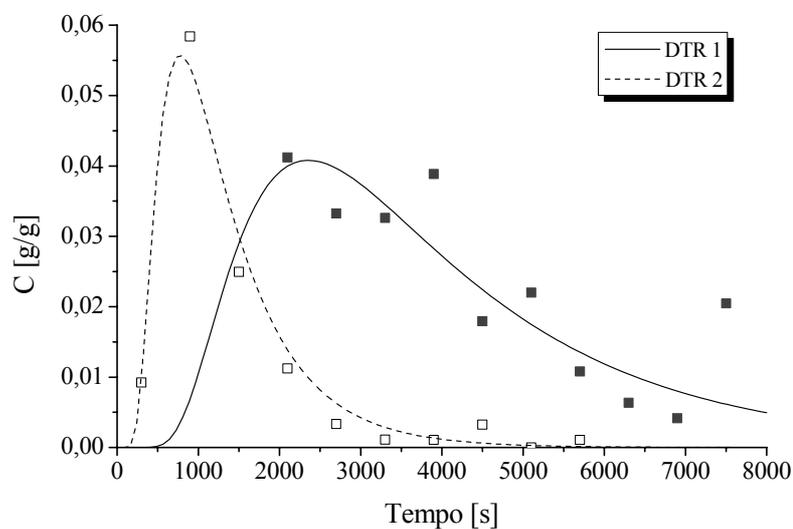


Figura 6.54 – DTR para o Experimento 8 ■: DTR 1; □: DTR 2.

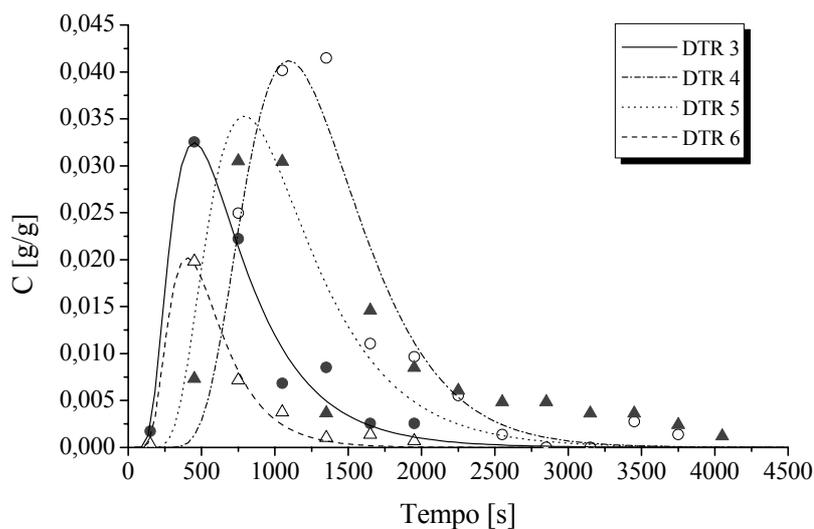


Figura 6.55 – DTR para o Experimento 8 ●: DTR 3; ○: DTR 4; ▲: DTR 5; Δ: DTR 6.

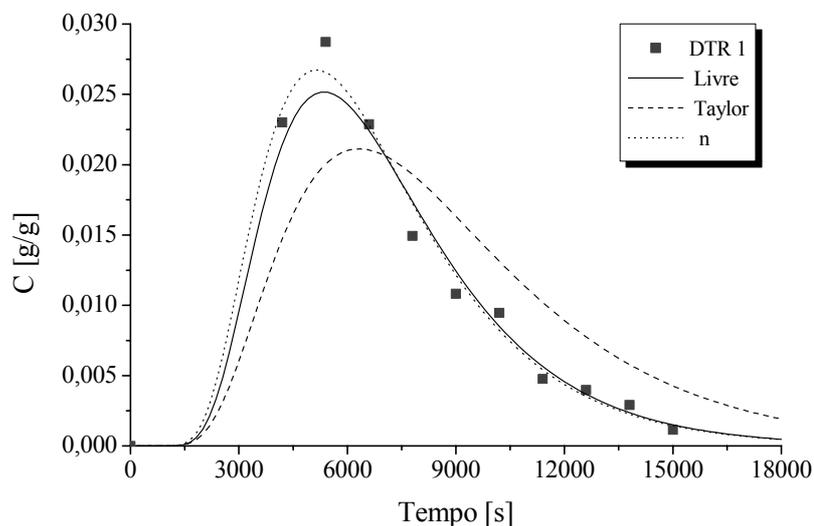


Figura 6.56 – DTR para o Experimento 8(2005).

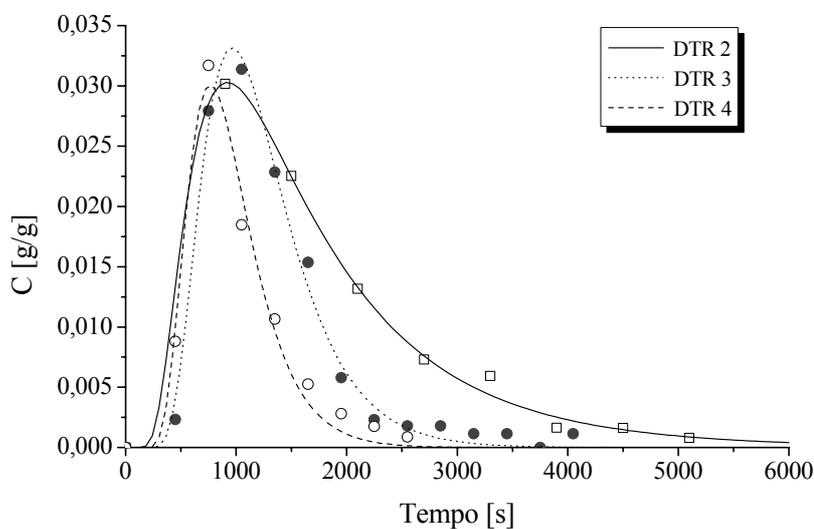


Figura 6.57 – DTR para o Experimento 8(2005) □: DTR 2; ●: DTR 3; ○: DTR 4.

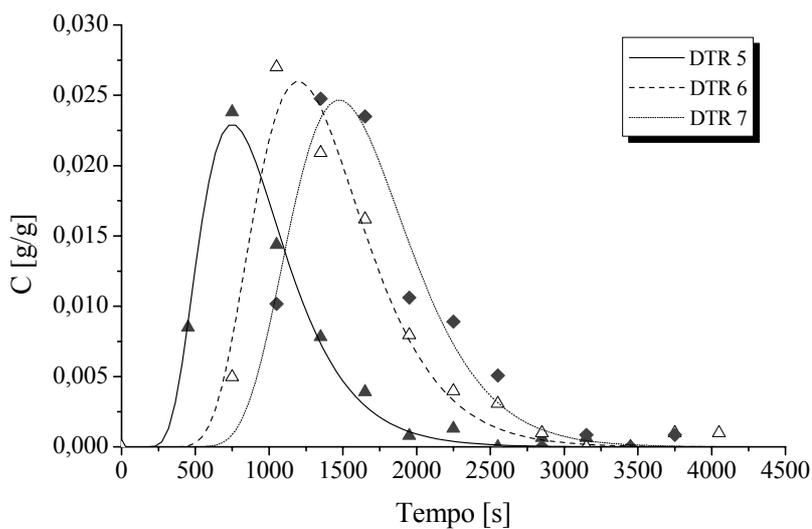


Figura 6.58 – DTR para o Experimento 8(2005) ▲ : DTR 5; Δ: DTR 6; ◆: DTR 7.

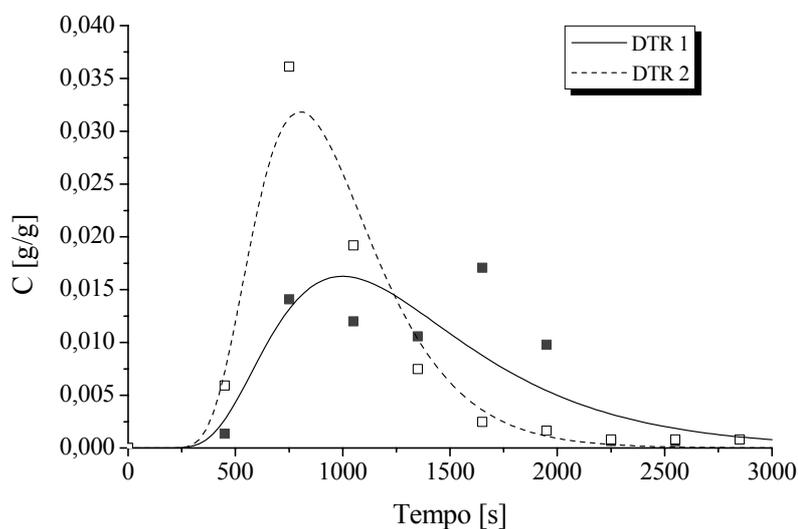


Figura 6.59 – DTR para o Experimento 9 ■: DTR 1; □: DTR 2.

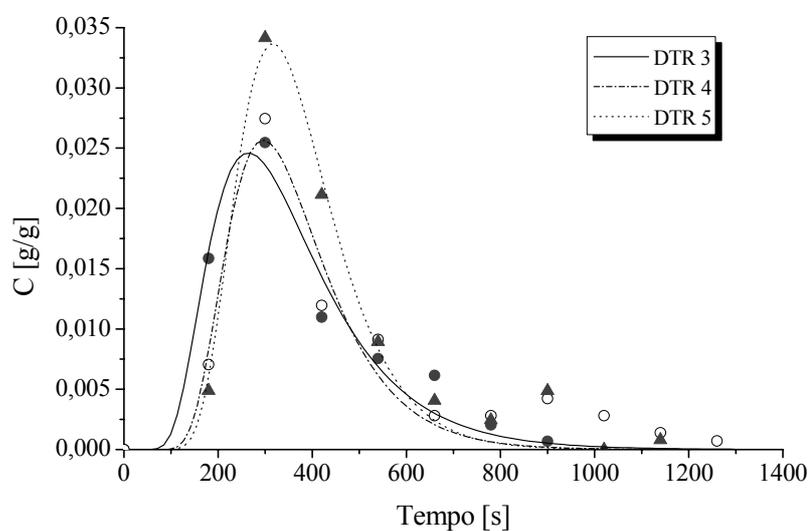


Figura 6.60 – DTR para o Experimento 9 ●: DTR 3; ○: DTR 4; ▲: DTR 5.

Todas as curvas de distribuição do tempo de residência apresentaram deslocamento para a esquerda com a presença de cauda, indicando, segundo Levenspiel (1972) e Alhaddam e Sastry (1998), a presença de espaço morto no secador. Para Alkhammad e colaboradores (2001), a cauda longa da distribuição do tempo de residência está associada à dispersão que ocorre entre as porções de fluido que se movem mais lentamente e mais rapidamente.

Aumentando-se a intensidade de vibração, a vazão de frutos de café é intensificada, o que diminuía a influência das zonas mortas. Contudo, neste caso, o tempo de secagem se amplia devido ao menor tempo de permanência dos frutos de café no secador. Essa informação é importante por questões de homogeneidade da distribuição do conteúdo de umidade nos frutos de café na descarga do secador e também como subsídio para realizar aperfeiçoamentos na geometria de secadores, para melhorar o escoamento e o desempenho das unidades.

As curvas ajustadas pelo Modelo da Dispersão Livre Modificado (com maior coeficiente de correlação indicado nas Tabelas 6.10 a 6.12) estão representadas nas Figuras 6.61 a 6.93, juntamente com os dados experimentais de concentração em função do tempo, para o segundo planejamento de secagem. Para algumas curvas plotadas isoladamente, foram indicados os três modelos de dispersão a fim de comparar graficamente o melhor ajuste.

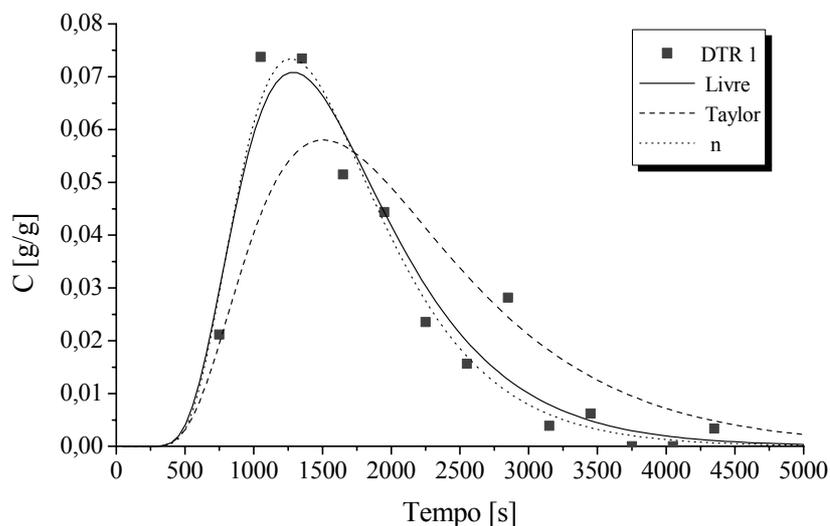


Figura 6.61 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 1.

O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais de concentração em função do tempo foi o Modelo da Dispersão Livre Modificado, exceto para algumas curvas de DTR obtidas no início da operação de secagem, onde o melhor ajuste foi obtido com o Modelo da Dispersão de Taylor.

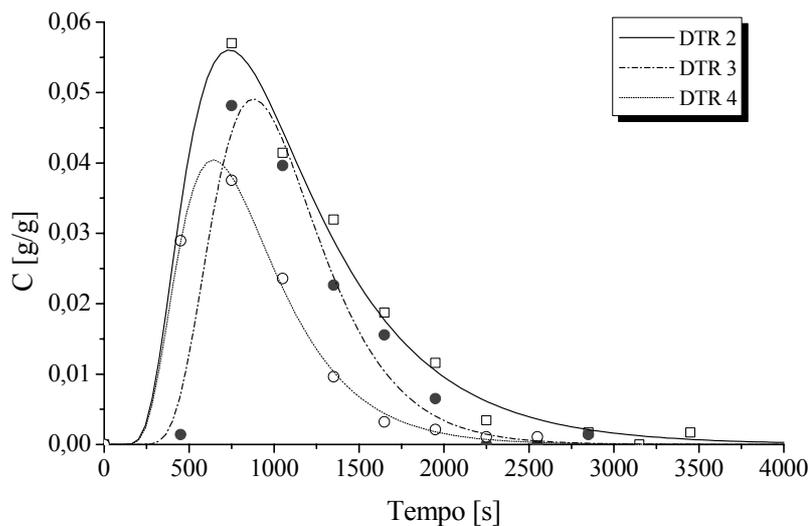


Figura 6.62 – DTR para o Experimento 1 □: DTR 2; ●: DTR 3; ○: DTR 4.

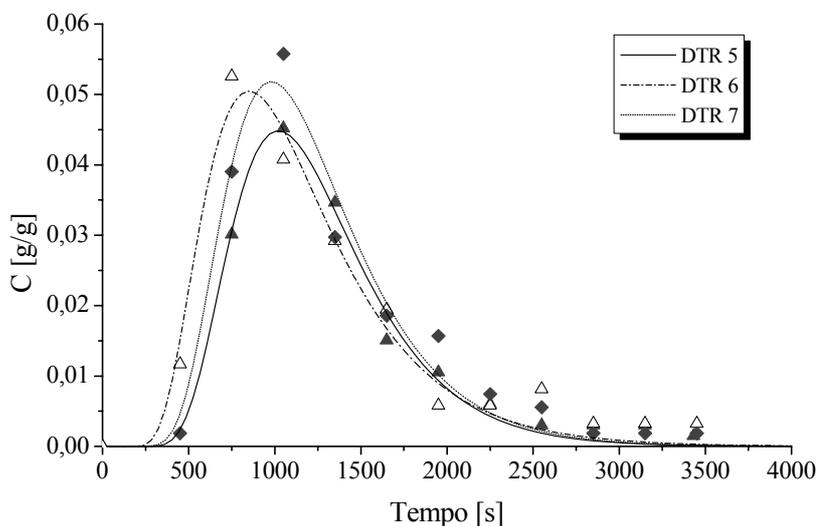


Figura 6.63 – DTR para o Experimento 1 ▲: DTR 5; Δ: DTR 6; ◆: DTR 7.

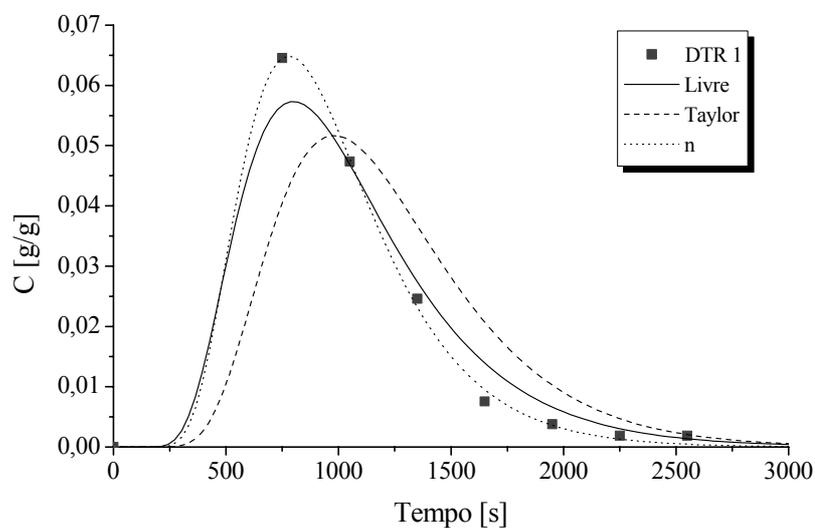


Figura 6.64 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 2.

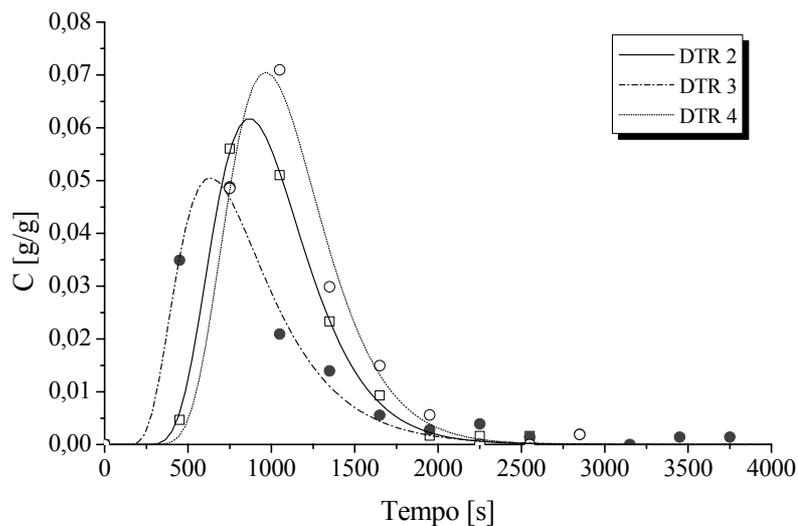


Figura 6.65 – DTR para o Experimento 2 □: DTR 2; ●: DTR 3; ○: DTR 4.

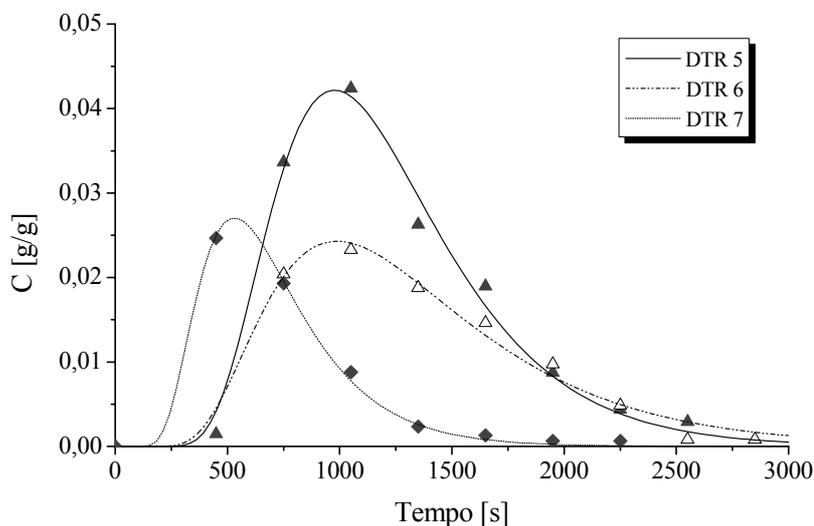


Figura 6.66 – DTR para o Experimento 2 ▲: DTR 5; Δ: DTR 6; ◆: DTR 7.

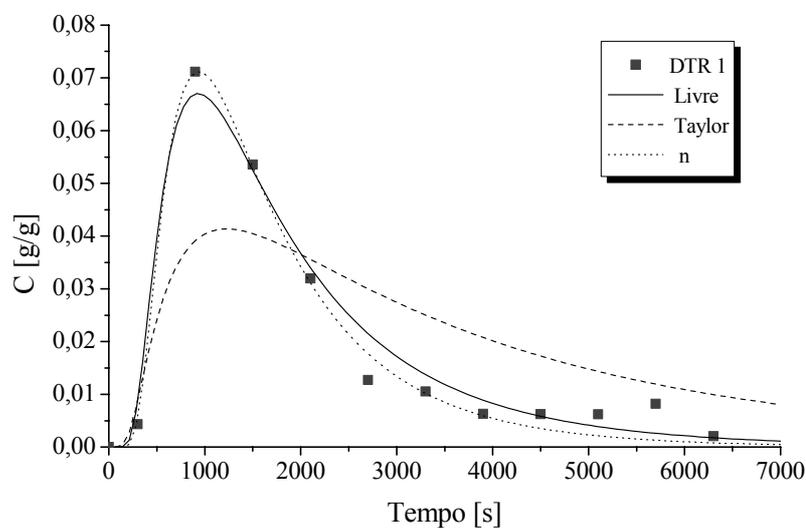


Figura 6.67 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 3.

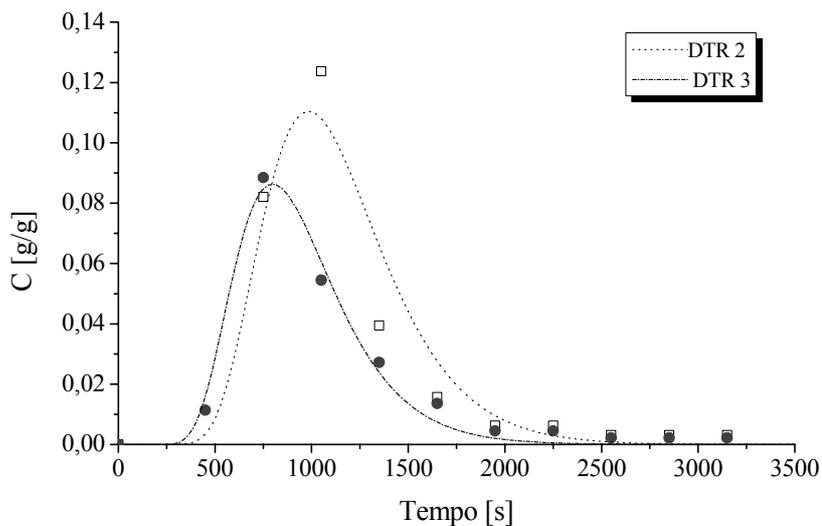


Figura 6.68 – DTR para o Experimento 3 □: DTR 2; ●: DTR 3.

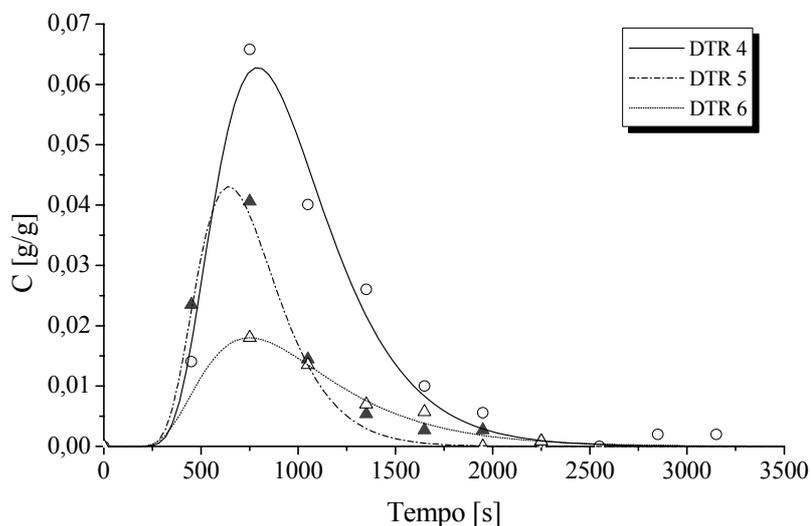


Figura 6.69 – DTR para o Experimento 3 ○: DTR 4; ▲: DTR 5; △: DTR 6.

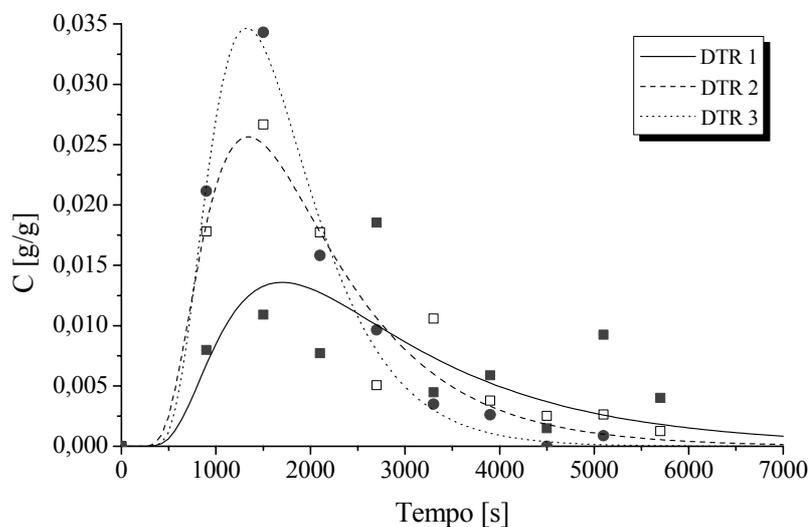


Figura 6.70 – DTR para o Experimento 4 ■: DTR 1; □: DTR 2; ●: DTR 3.

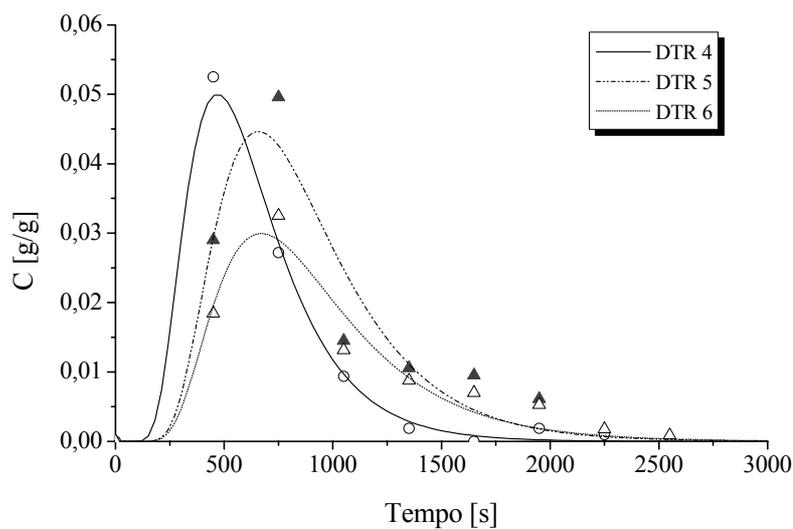


Figura 6.71 – DTR para o Experimento 4 ○: DTR 4; ▲: DTR 5; △: DTR 6.

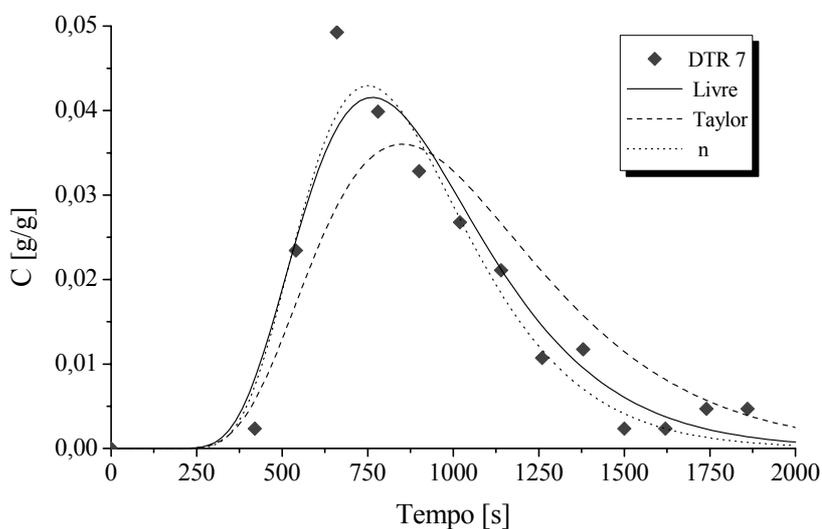


Figura 6.72 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 4.

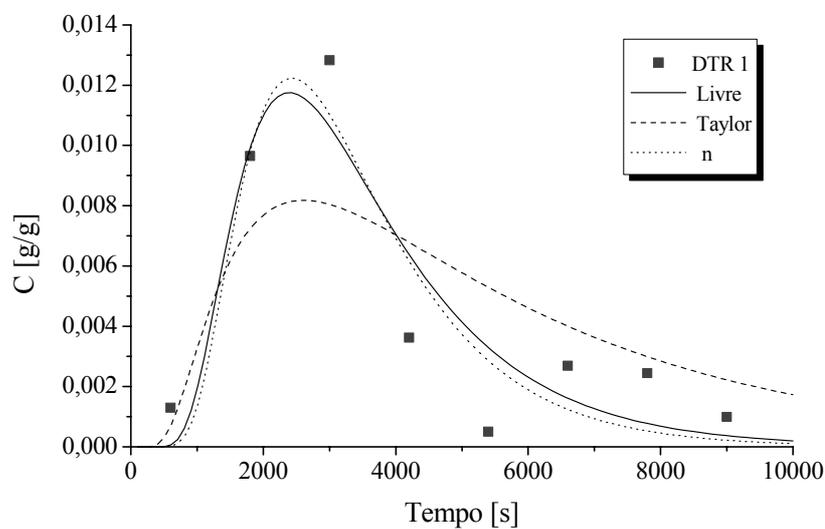


Figura 6.73 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 5.

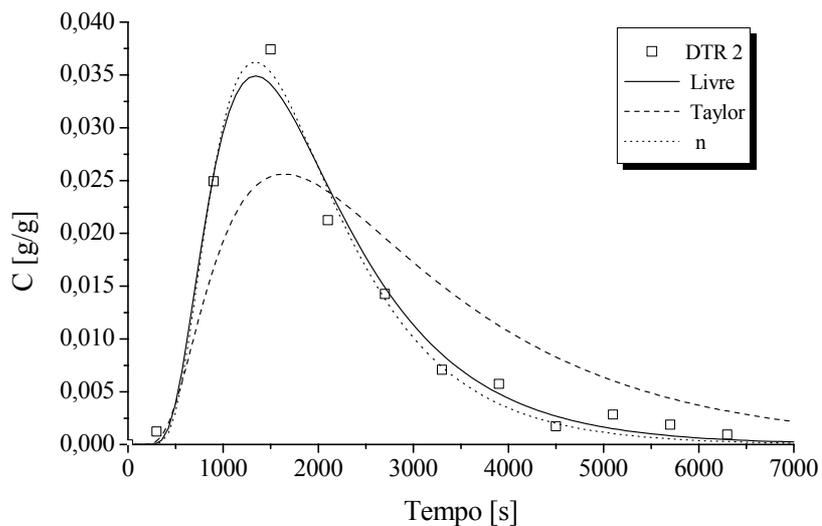


Figura 6.74 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 5.

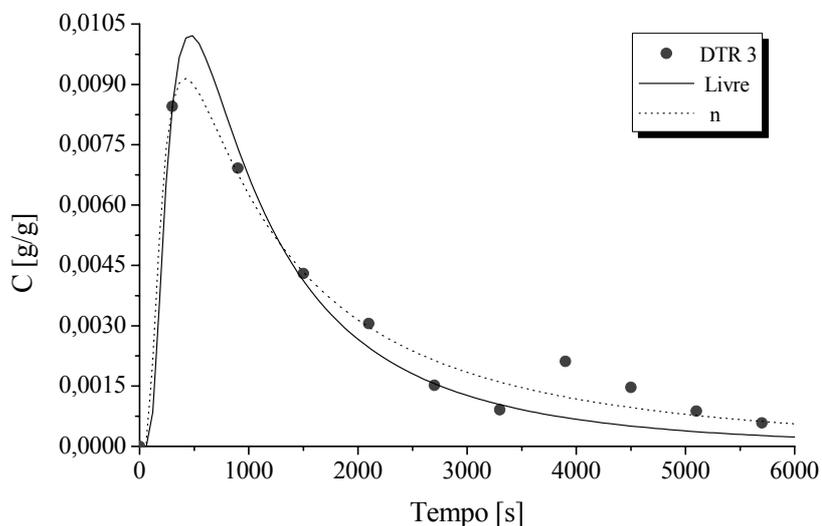


Figura 6.75 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 5.

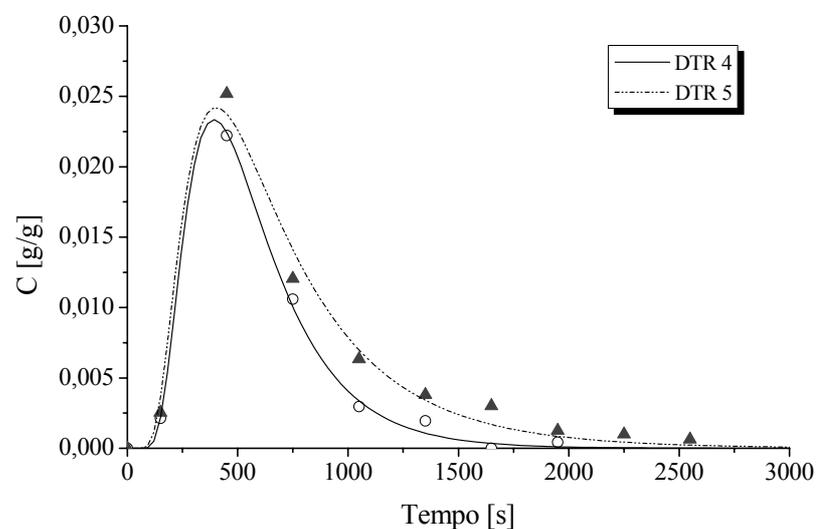


Figura 6.76 – DTR para o Experimento 5 ○: DTR 4; ▲: DTR 5.

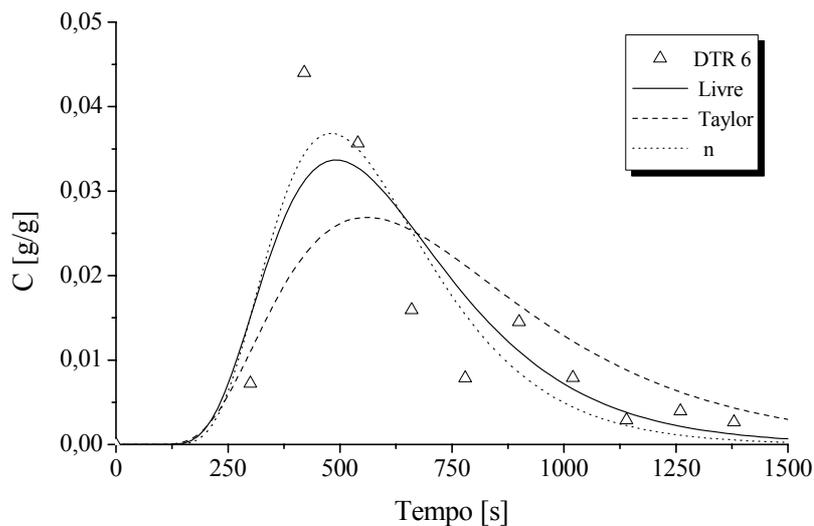


Figura 6.77 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 5.

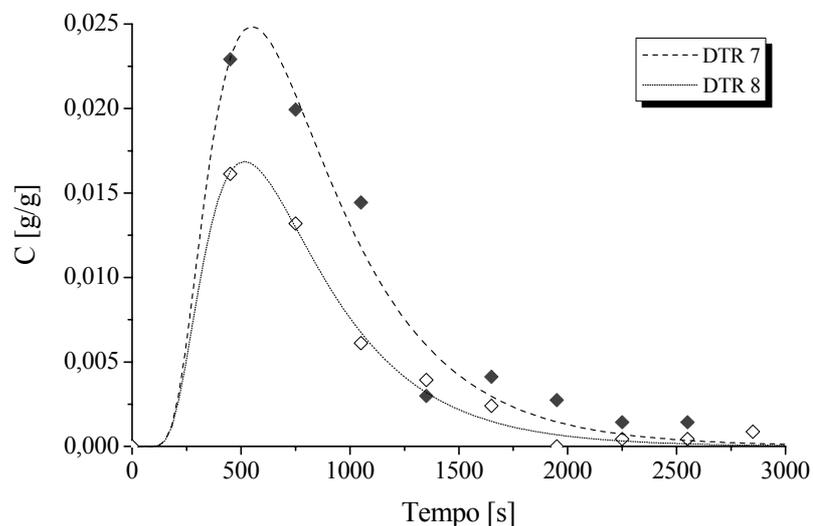


Figura 6.78 – DTR para o Experimento 5  $\blacklozenge$ : DTR 7;  $\diamond$ : DTR 8.

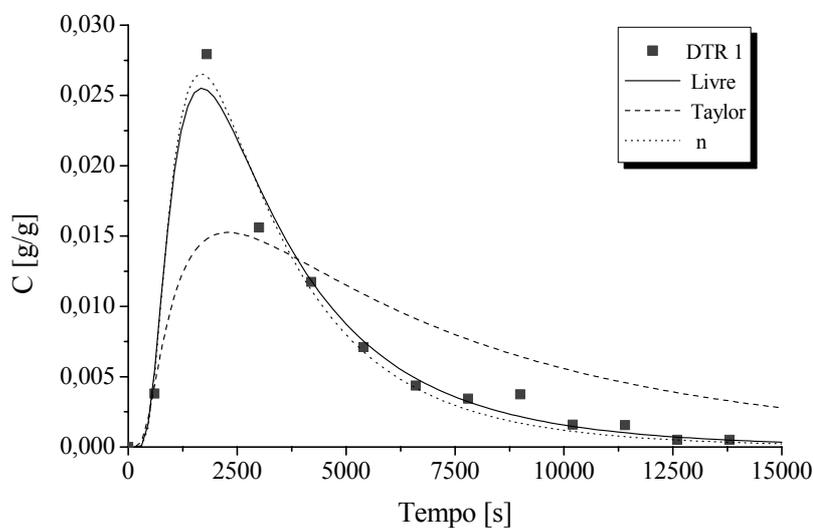


Figura 6.79 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 5 (2005).

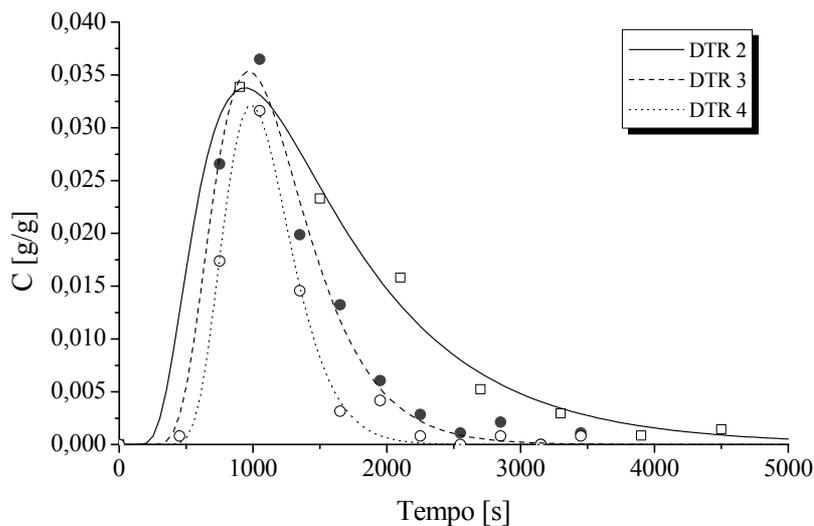


Figura 6.80 – DTR para o Experimento 5 (2005) □: DTR 2; ●: DTR 3; ○: DTR 4.

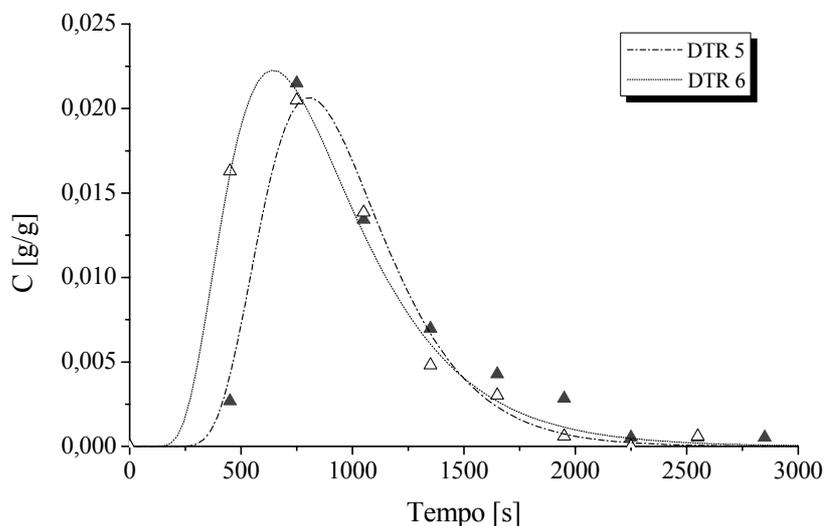


Figura 6.81 – DTR para o Experimento 5 (2005) ▲: DTR 5; Δ: DTR 6.

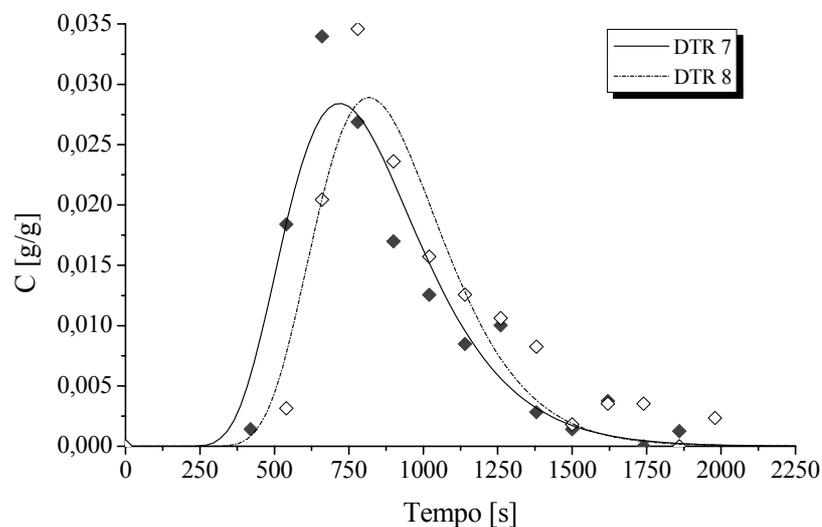


Figura 6.82 – DTR para o Experimento 5 (2005) ◆: DTR 7; ◇: DTR 8.

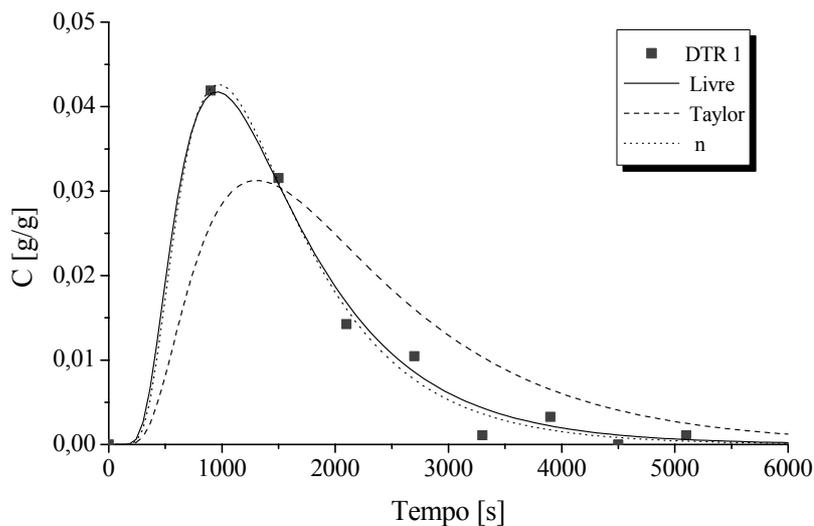


Figura 6.83 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 6.

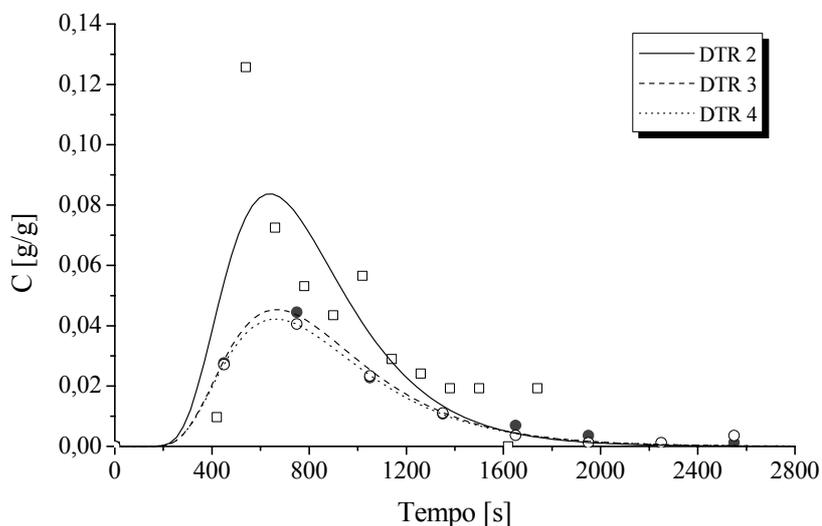


Figura 6.84 – DTR para o Experimento 6  $\square$ : DTR 2;  $\bullet$ : DTR 3;  $\circ$ : DTR 4.

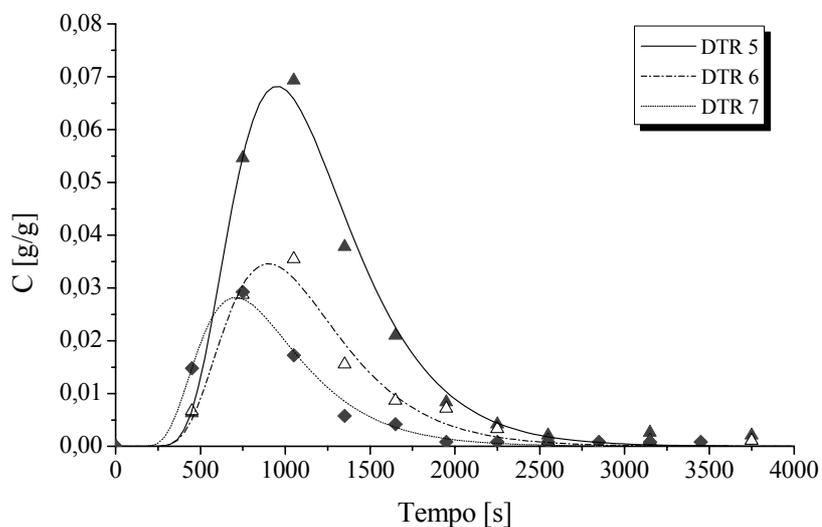


Figura 6.85 – DTR para o Experimento 6  $\blacktriangle$ : DTR 5;  $\triangle$ : DTR 6;  $\blacklozenge$ : DTR 7.

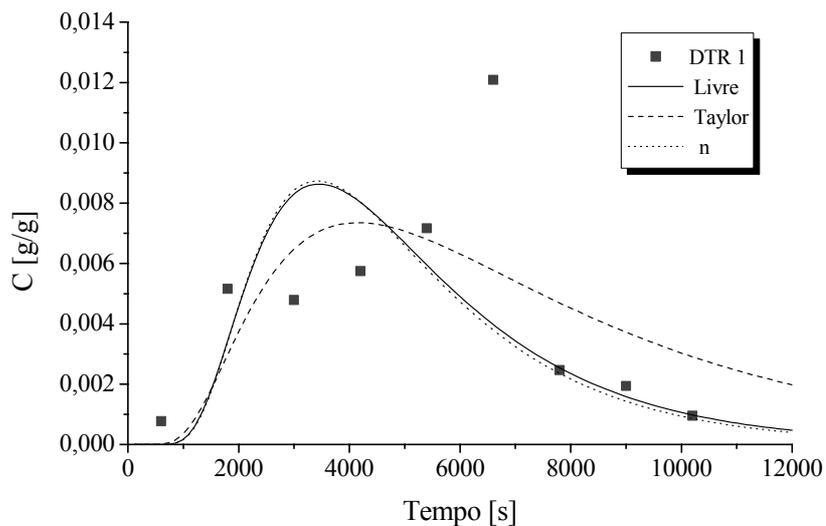


Figura 6.86 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 7.

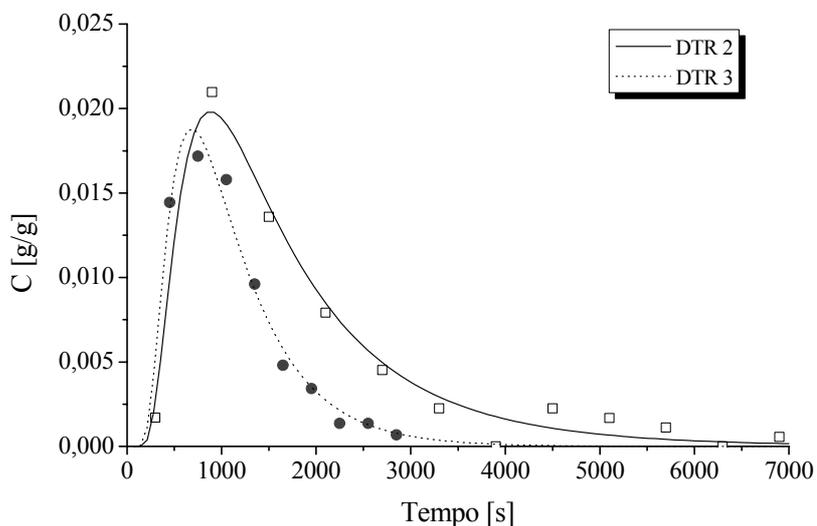


Figura 6.87 – DTR para o Experimento 7 □: DTR 2; ●: DTR 3.

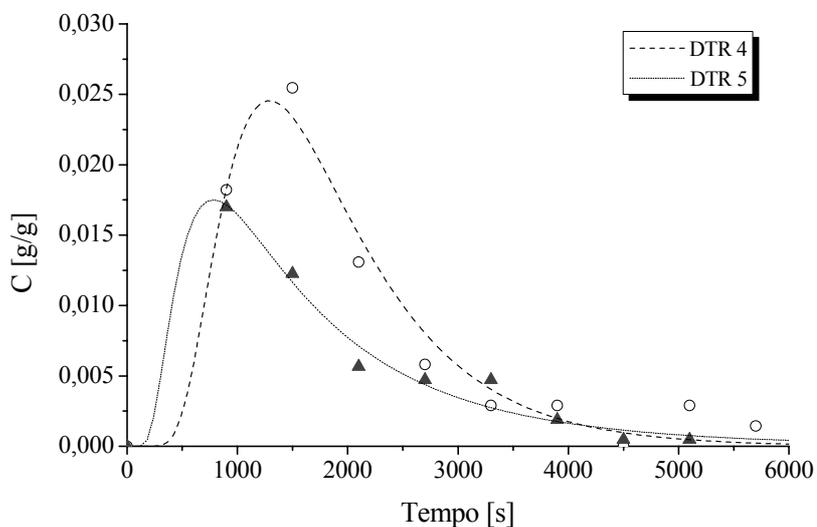


Figura 6.88 – DTR para o Experimento 7 ○: DTR 4; ▲: DTR 5.

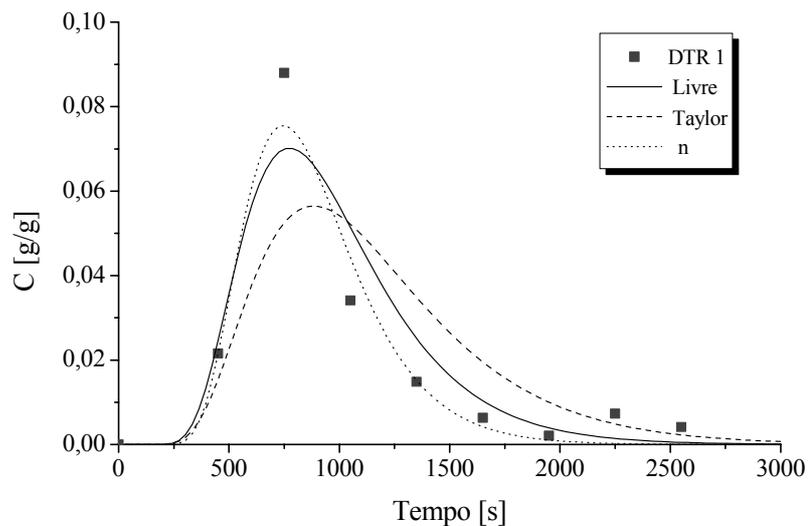


Figura 6.89 – Distribuição do tempo de residência para o Experimento 8.

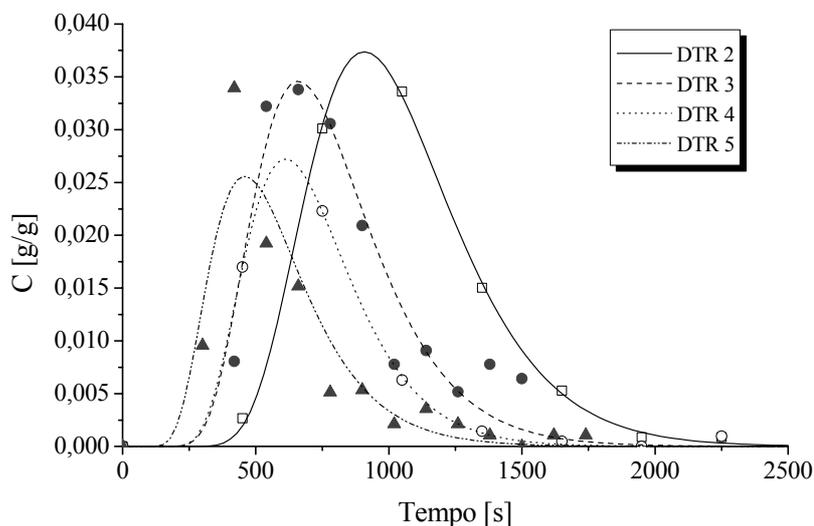


Figura 6.90 – DTR para o Experimento 8 □: DTR 2; ●: DTR 3; ○: DTR 4; ▲: DTR 5.

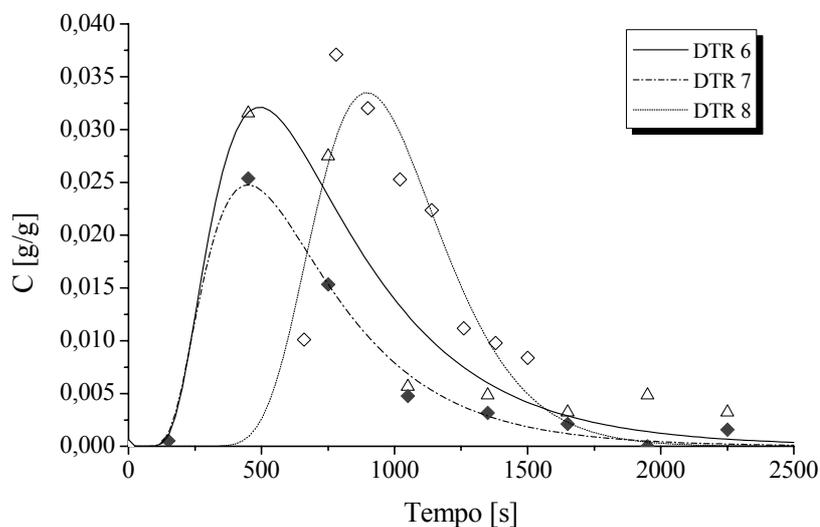


Figura 6.91 – DTR para o Experimento 8 Δ: DTR 6; ◆: DTR 7; ◇: DTR 8.

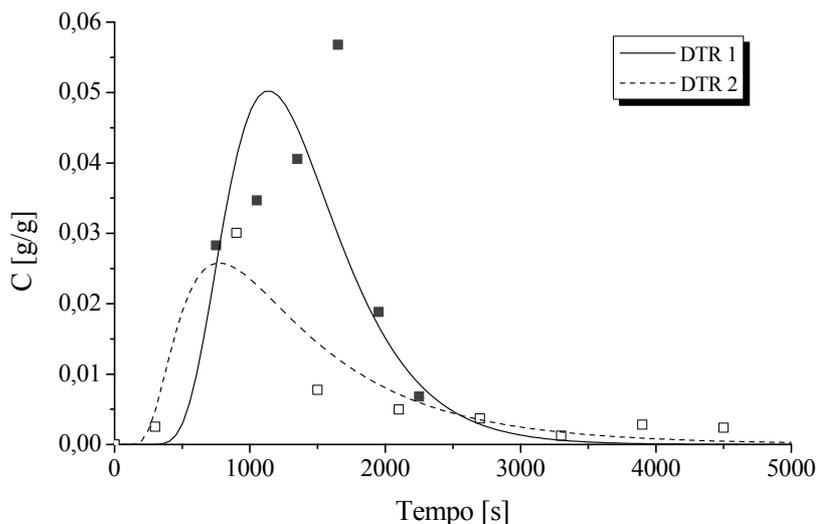


Figura 6.92 – DTR para o Experimento 9 ■: DTR 1; □: DTR 2.

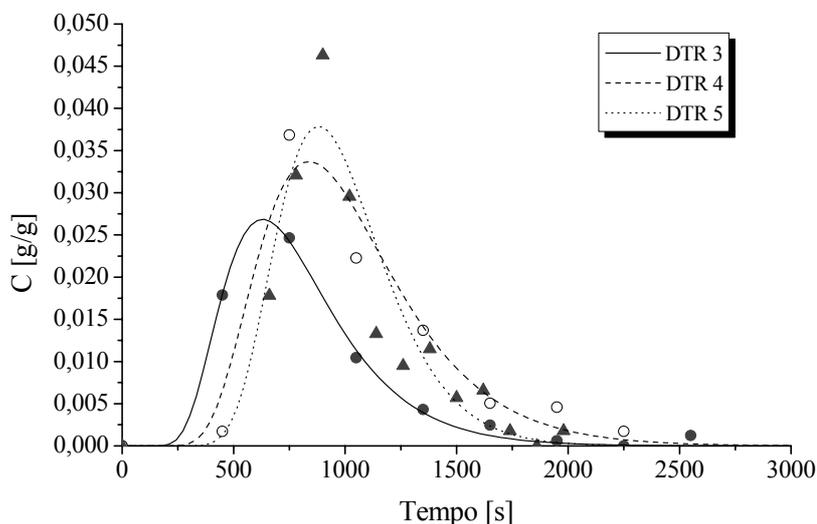


Figura 6.93 – DTR para o Experimento 9 ●: DTR 3; ○: DTR 4; ▲: DTR 5.

As Tabelas 6.7 a 6.9 apresentam os valores do coeficiente de dispersão, das constantes  $K_T$ ,  $K_L$  e  $K_n$ , bem como dos coeficientes de correlação dos modelos ajustados.

Os valores de coeficiente de dispersão ( $E_z$ ) apresentados nas Tabelas 6.7 a 6.9 foram avaliados de acordo com o maior coeficiente de correlação de ajuste dos três modelos analisados. Para a grande maioria dos experimentos, os maiores valores de coeficiente de correlação foram obtidos pelo Modelo da Dispersão Livre Modificado. Este modelo apresentou o índice “n” médio de 3,86, variando entre 2,6 e 7,4.

Pelas Tabelas 6.7 a 6.9 pode-se observar que os valores de  $E_z$  obtidos pelo ajuste do Modelo da Dispersão de Taylor foram, na sua maioria, mais altos do que os valores obtidos

pelo Modelo da Dispersão Livre Modificado. O desvio percentual médio com a utilização do Modelo da Dispersão de Taylor ao invés do Modelo da Dispersão Livre Modificado é de 69,52%. Já, os valores de  $E_z$  obtidos pelo Modelo da Dispersão Livre são mais próximos daqueles obtidos pelo Modelo Modificado, visto que, o valor de “n” esteve próximo de 3 para a maioria das curvas de DTR. O coeficiente de dispersão, em geral, foi maior para o Modelo da Dispersão Livre. O desvio percentual médio com a utilização do Modelo da Dispersão Livre em relação do Modelo Modificado é de 22,42%.

Tabela 6.7 – Coeficiente de dispersão e constantes das Equações (6.52), (6.53) e (6.56) para o primeiro planejamento de secagem: T = 40°C.

Exp.	DTR	Taylor			Livre			Livre modificado			
		$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_T$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_L$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_n$	n	$R^2$
1	1	3,85	0,0364	0,949	3,36	38,49	0,954	3,61	9,79	2,60	0,959
	2	24,04	0,0192	0,803	19,36	13,62	0,986	14,50	99,83	3,64	0,992
	3	46,58	0,0519	0,895	29,34	15,88	0,937	37,82	1,14	2,02	0,983
	4	22,43	0,0306	0,819	15,40	22,79	0,988	11,17	499,92	3,96	0,995
	5	23,83	0,0228	0,844	24,77	15,58	0,987	20,33	429,42	4,07	0,999
	6	37,48	0,0239	0,786	29,82	14,03	0,976	22,62	1342,82	4,50	0,995
	7	96,29	0,0266	0,884	40,65	9,04	0,997	43,87	4,83	2,78	0,998
	8	47,27	0,0190	0,838	31,32	8,77	0,986	24,26	361,64	4,24	0,995
	9	21,23	0,0231	0,734	15,12	13,88	0,887	8,32	309084,40	6,21	0,919
2	1	40,57	0,0477	0,679	20,59	25,95	0,859	13,97	1998,93	4,40	0,873
	2	16,48	0,0611	0,821	12,41	34,40	0,908	12,52	29,96	2,96	0,908
	3	35,81	0,0460	0,784	25,39	31,59	0,975	20,13	793,69	4,03	0,987
	4	13,25	0,0150	0,884	22,64	10,33	0,990	20,57	81,90	3,67	0,995
	5	8,12	0,0285	0,899	6,95	27,77	0,993	6,52	99,93	3,38	0,995
	6	24,98	0,0235	0,840	18,72	18,13	0,995	15,11	99,78	3,53	0,996
	7	23,14	0,0214	0,852	16,91	14,13	0,992	15,19	29,97	3,24	0,994
	8	15,72	0,0174	0,826	11,01	18,35	0,982	8,78	499,43	3,97	0,992
3	1	2,25	0,0243	0,826	1,44	119,00	0,967	1,45	119,00	3,00	0,967
	2	17,46	0,0565	0,828	13,30	39,92	0,942	12,98	59,80	3,13	0,942
	3	16,69	0,0182	0,785	17,01	22,53	0,991	14,98	49,99	3,24	0,991
	4	8,12	0,0167	0,945	6,48	11,92	0,996	6,01	49,93	3,44	0,997
	5	27,28	0,0121	0,676	17,83	7,48	0,870	17,35	9,96	3,09	0,875
	6	26,19	0,0128	0,784	19,23	5,94	0,937	12,76	3103,15	5,10	0,962
	7	41,69	0,0135	0,812	36,26	6,02	0,983	20,13	271,96	4,32	0,992
	8	21,07	0,0119	0,710	13,18	10,64	0,909	12,36	19,98	3,19	0,917
	9	11,48	0,0095	0,786	8,75	11,34	0,953	8,43	19,98	3,17	0,958
	10	7,45	0,0142	0,860	6,38	14,14	0,961	6,25	19,98	3,10	0,963
	11	22,75	0,0140	0,831	17,35	9,99	0,984	15,68	19,98	3,22	0,986

Para o início da secagem (alto conteúdo de umidade), a velocidade dos frutos de café apresentou valores baixos e, portanto, o  $E_z$  foi pequeno, chegando a valores próximos de  $1 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, ou seja, no início da secagem o escoamento aproxima-se do pistonado, com os

frutos de café escoando como um bloco e com pouca mistura entre as partículas, apesar da alta intensidade vibracional. Este comportamento reflete a grande influência da pegajosidade dos frutos de café sobre o escoamento no secador.

Os valores do coeficiente de dispersão apresentados na Tabela 6.7 aumentaram com o aumento da velocidade de escoamento dos frutos de café, principalmente quando o conteúdo de umidade é menor do que 0,4 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco, ou seja, para valores similares de velocidade, o coeficiente de dispersão é maior para o menor conteúdo de umidade. Exemplos desse comportamento são as curvas de DTR 3 e 7 para o Experimento 1 e as curvas de DTR 2 e 11 para o Experimento 3. O valor da velocidade é próximo (ver Tabela 6.1), mas o coeficiente de dispersão é maior para a curva resultante da operação com conteúdo de umidade menor. Duas variáveis podem ter exercido maior influência: a maior vazão mássica para as DTR 7 e 11 e a menor pegajosidade dos frutos de café.

Cussler (1997) afirma que o coeficiente de dispersão aumenta conforme o escoamento se torna mais rápido, contudo, no interior de uma tubulação, a dispersão é maior para escoamentos laminares do que para escoamentos turbulentos.

As curvas das DTRs 6 e 7 para o Experimento 3 (Figura 6.40) possuem velocidade e vazão mássicas muito próximas, mas o coeficiente de dispersão foi quase duas vezes maior para a DTR 7. Como os conteúdos de umidade também são próximos, suas características não foram muito alteradas. Desta forma, a única razão para o maior coeficiente de dispersão está nos valores de vibração (ver Figura 5.23), que foram menores para a DTR 7 (maior variância e extensão percentual dos tempos de residência), indicando que para mesmas condições e amplitude de vibração maior, o escoamento aproxima-se do pistonado, escoando rápido mas com ocorrência de pouca mistura entre as partículas. O mesmo ocorreu entre as DTRs 10 e 11 (Experimento 3) no qual a amplitude de vibração foi maior para a DTR 10 (ver Figura 5.23), apesar de maior cauda e extensão dos tempos de residência, o pico da curva de DTR 10 foi muito mais agudo, com valor de  $E_z$  menor, tendendo a escoamento pistonado com pouca dispersão axial.

Entretanto, para o Experimento DTR 3, a curva com menor variância e menor extensão apresentou maior  $E_z$ , apesar de erroneamente introduzir a idéia de escoamento pistonado. Neste caso, a pegajosidade é maior (maior conteúdo de umidade) e a componente vertical da vibração também, o que pode aumentar o efeito de mistura mesmo que o pulso de

traçador espalhe-se rapidamente pelo secador.

Os valores de coeficiente de dispersão apresentados na Tabela 6.8 nem sempre foram maiores para a maior velocidade de escoamento dos frutos de café. A DTR 5 do Experimento 4, por exemplo, apresentou o maior valor de  $E_z$  e uma das menores velocidades (ver Tabela 6.2). Enquanto que a DTR 6, para o mesmo experimento, obteve o menor coeficiente de dispersão com uma velocidade muito próxima à da DTR 5. O formato da curva da DTR 6 é estreito e com pico bastante agudo (baixa variância, assimetria e curtose), tendendo a escoamento pistonado. As curvas de DTR 5 e 6 são apresentadas nas Figuras 6.43 e 6.44, respectivamente.

Tabela 6.8 – Coeficiente de dispersão e constantes das Equações (6.52), (6.53) e (6.56) para o primeiro planejamento de secagem:  $T = 45^\circ\text{C}$ .

Exp.	DTR	Taylor			Livre			Livre modificado			
		$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_T$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_L$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_n$	n	$R^2$
4	1	19,70	0,0471	0,795	22,21	32,82	0,957	14,82	88568,56	5,57	0,997
	2	13,34	0,0299	0,888	25,43	21,06	0,996	23,63	82,28	3,45	0,999
	3	38,60	0,0262	0,816	18,75	23,01	0,991	15,50	283,38	3,75	0,996
	4	27,80	0,0324	0,828	26,11	20,25	0,989	23,03	164,89	3,68	0,995
	5	120,54	0,0341	0,836	39,37	14,47	0,998	44,11	9,63	2,87	0,998
	6	18,66	0,0300	0,686	12,51	19,85	0,838	6,05	12086700,00	7,18	0,881
	7	32,62	0,0277	0,779	24,63	20,24	0,973	17,39	1978,85	4,46	0,993
5	1	1,99	0,0135	0,791	2,32	44,80	0,919	2,12	280,00	3,47	0,936
	2	49,57	0,0173	0,867	38,46	5,07	0,993	28,61	49,97	3,84	0,998
	3	68,46	0,0180	0,800	76,81	5,49	0,982	44,84	50,03	3,86	0,987
	4	94,21	0,0157	0,885	51,79	3,67	0,974	62,37	0,76	2,41	0,984
	5	99,09	0,0139	0,858	61,03	3,38	0,986	68,67	1,10	2,58	0,991
	6	72,36	0,0216	0,729	42,56	5,30	0,917	24,87	1264057,00	7,39	0,945
	7	102,99	0,0225	0,746	40,19	6,26	0,936	27,46	174,92	4,18	0,945
6	1	2,36	0,0061	0,713	1,53	22,39	0,818	1,33	149,99	3,46	0,820
	2	29,39	0,0286	0,806	39,28	23,98	0,993	24,30	199,38	3,71	0,998
	3	13,76	0,0304	0,813	10,35	42,34	0,993	8,29	199,99	3,45	0,995
	4	20,53	0,0152	0,862	23,66	9,84	0,986	21,80	44,64	3,49	0,989
	5	30,37	0,0186	0,732	20,70	7,58	0,901	12,42	54556,10	6,02	0,943
	6	12,30	0,0145	0,856	9,66	14,20	0,976	9,19	29,99	3,22	0,977
	7	41,88	0,0164	0,721	24,98	7,81	0,917	23,14	19,97	3,31	0,927

O Experimento 5 apresentou os maiores valores de  $E_z$  de todo o planejamento de secagem, devido aos altos valores de vazão mássica e velocidade dos frutos de café. As maiores vazões mássicas provocaram um rápido espalhamento da curva e maior efeito de mistura, o qual pode ser observado nas DTRs 4 e 5. Entretanto, a maior velocidade dos frutos de café causou menor espalhamento da curva e conseqüentemente menor dispersão do que

para velocidades menores. Um exemplo deste comportamento pode ser observado nas DTRs 6 e 5 dos Experimentos 5 e 6 (ver Figuras 6.47 e 6.50), respectivamente. Uma explicação plausível se respalda no escoamento turbulento.

Os valores apresentados na Tabela 6.9 indicam que para maiores velocidades de escoamento (ver Tabela 6.3) obteve-se maior coeficiente de dispersão. Entretanto, a observação das curvas de DTR 3 e 6 (Experimento 8) indica que ao final da secagem, a dispersão foi menor mesmo para uma velocidade maior dos frutos de café. Neste caso, a menor amplitude de vibração (ver Figura 5.29) pode ter causado a diminuição do efeito de mistura, para a maior velocidade de escoamento. O mesmo ocorreu no Experimento 7 (2005) para as DTRs 4 e 5, onde a menor velocidade (ver Tabela 6.3) gerou um coeficiente de dispersão maior e uma curva mais espalhada (ver Figura 6.53).

Tabela 6.9 – Coeficiente de dispersão e constantes das Equações (6.52), (6.53) e (6.56) para o primeiro planejamento de secagem:  $T = 50^{\circ}\text{C}$ .

Exp.	DTR	Taylor			Livre			Livre modificada			
		$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_T$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_L$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_n$	n	$R^2$
7	1	4,56	0,0324	0,945	4,31	28,24	0,959	4,49	6,86	2,58	0,965
	2	7,83	0,0192	0,816	6,66	17,61	0,939	5,54	995,98	4,21	0,969
	3	1,68	0,0137	0,936	26,37	8,29	0,970	20,36	999,82	4,58	0,991
7 2005	1	6,04	0,0458	0,856	4,58	66,73	0,974	4,67	48,33	2,91	0,974
	2	6,51	0,0525	0,879	4,73	87,64	0,995	4,61	138,03	3,12	0,995
	3	13,50	0,0273	0,748	10,57	17,14	0,899	6,09	1989817,00	6,71	0,953
	4	11,48	0,0262	0,903	10,19	12,96	0,989	9,05	104,88	3,69	0,995
	5	20,30	0,0194	0,858	21,77	12,77	0,989	19,00	134,91	3,76	0,995
8	1	31,82	0,0912	0,705	4,25	142,00	0,850	4,28	140,00	3,00	0,850
	2	12,09	0,0481	0,829	13,10	65,27	0,985	12,74	99,99	3,13	0,988
	3	31,71	0,0330	0,815	22,36	21,20	0,980	20,21	65,72	3,36	0,982
	4	4,95	0,0285	0,873	4,54	36,86	0,964	4,48	49,99	3,09	0,965
	5	17,41	0,0494	0,755	12,16	32,15	0,841	7,34	72079,63	5,23	0,865
	6	24,32	0,0156	0,791	21,73	10,14	0,965	15,46	3029,80	4,85	0,991
8 2005	1	1,56	0,0216	0,825	1,26	137,00	0,985	1,31	519,00	3,29	0,991
	2	16,46	0,0324	0,820	12,25	46,73	0,998	11,85	58,45	3,06	0,998
	3	7,76	0,0252	0,884	6,63	30,73	0,990	5,69	458,92	3,78	0,995
	4	9,84	0,0224	0,861	7,79	20,97	0,979	6,48	687,66	4,04	0,988
	5	10,10	0,0173	0,884	8,30	16,17	0,988	7,04	303,40	3,88	0,995
	6	4,41	0,0163	0,877	3,81	23,31	0,967	3,01	5891,87	4,55	0,980
	7	2,45	0,0139	0,917	2,19	22,39	0,978	2,02	185,00	3,58	0,982
9	1	9,00	0,0150	0,787	6,93	16,75	0,758	7,16	9,94	2,85	0,768
	2	6,53	0,0211	0,866	5,98	20,30	0,969	5,73	49,95	3,27	0,976
	3	43,84	0,0225	0,834	28,15	7,00	0,969	25,48	19,97	3,37	0,970
	4	43,42	0,0189	0,704	26,57	7,53	0,890	13,09	1067189,00	7,06	0,948
	5	22,31	0,0218	0,807	17,77	8,80	0,944	11,30	35792,94	5,85	0,983

Os valores para coeficiente de dispersão (Modelo da Dispersão Livre Modificado) apresentados nas Tabelas 6.7 a 6.9 variaram entre  $1,31 \times 10^{-4}$  a  $68,67 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Os maiores valores de  $E_z$  foram obtidos para o Experimento 5, o qual foi realizado nas condições centrais do primeiro planejamento de secagem (temperatura do fruto de 45°C; carga de 12,5 kg café e vazão de ar de 8 kg/min). Os valores encontrados na literatura, para dispersão de sólidos, variam de  $1 \times 10^{-4}$  a  $20 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Chen e colaboradores (2001) obtiveram coeficiente de dispersão axial, para um leito fluidizado com circulação sólido-líquido (esfera de vidro e água), de  $13 \times 10^{-4}$  a  $24 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, enquanto que o coeficiente de dispersão radial esteve entre  $2,3 \times 10^{-4}$  e  $3,9 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

As Tabelas 6.10 a 6.12 apresentam os valores de  $E_z$ , das constantes  $K_T$ ,  $K_L$  e  $K_n$  e dos coeficientes de correlação dos modelos ajustados para o segundo planejamento de secagem.

Tabela 6.10 – Coeficiente de dispersão e constantes das Equações (6.52), (6.53) e (6.56) para o segundo planejamento de secagem: M = 10 kg.

Exp.	DTR	Taylor			Livre			Livre modificado			
		$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_T$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_L$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_n$	n	$R^2$
1	1	6,52	0,0592	0,856	5,08	90,58	0,963	4,59	494,22	3,47	0,965
	2	9,53	0,0429	0,858	12,74	55,26	0,990	11,27	268,16	3,47	0,994
	3	7,14	0,0349	0,893	6,06	36,56	0,977	5,35	506,03	3,77	0,981
	4	14,43	0,0354	0,902	10,92	27,30	0,998	10,85	29,51	3,02	0,998
	5	7,44	0,0326	0,841	6,19	41,51	0,979	4,59	3527,37	4,28	0,992
	6	13,68	0,0435	0,799	9,38	48,53	0,967	7,36	22,97,317	4,13	0,979
	7	8,47	0,0394	0,846	6,60	47,92	0,969	5,13	3194,67	4,21	0,980
2	1	6,54	0,0422	0,865	8,22	47,75	0,986	6,50	2254,81	4,15	0,999
	2	5,39	0,0394	0,927	5,05	40,20	0,996	4,48	337,07	3,63	0,999
	3	21,49	0,0430	0,814	14,44	36,66	0,974	9,05	11117,16	4,74	0,990
	4	4,27	0,0421	0,925	3,81	45,31	0,989	3,56	178,37	3,40	0,993
	5	7,18	0,0325	0,898	5,75	36,54	0,991	5,55	69,26	3,19	0,992
	6	8,32	0,0213	0,891	7,06	25,31	0,988	7,56	10,13	2,73	0,990
	7	17,61	0,0229	0,881	14,84	15,30	0,998	11,82	102,90	3,61	0,998
3	1	23,40	0,0790	0,763	12,95	118,11	0,983	10,40	1374,33	3,69	0,990
	2	4,46	0,0675	0,855	4,05	76,53	0,956	3,91	117,50	3,13	0,960
	3	8,34	0,0560	0,837	6,94	57,42	0,960	4,70	256698,80	5,49	0,989
	4	8,45	0,0447	0,883	7,21	43,91	0,980	6,02	1730,27	4,09	0,988
	5	10,61	0,0299	0,871	8,27	23,23	0,982	5,79	16574,50	5,03	0,990
	6	7,70	0,0128	0,842	9,85	14,67	0,979	8,77	116,03	3,62	0,985

Os valores de coeficiente de dispersão dos experimentos do segundo planejamento de secagem (Tabelas 6.10 a 6.12), em geral, foram menores do que para o primeiro planejamento, ou seja, as curvas de DTR apresentaram baixo grau de mistura e um espalhamento mais lento. A principal diferença entre os experimentos é a variedade de café

(Mundo Novo safra 2004), a qual possuía grande pegajosidade e maior diâmetro de partícula e apresentou menores valores de vazão mássica e velocidade de escoamento dos frutos de café.

Tabela 6.11 – Coeficiente de dispersão e constantes das Equações (6.52), (6.53) e (6.56) para o segundo planejamento de secagem: M = 12 kg.

Exp.	DTR	Taylor			Livre			Livre modificado			
		$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_T$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_L$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_n$	n	$R^2$
4	1	15,82	0,0197	0,496	5,94	34,17	0,375	6,06	28,21	2,95	0,385
	2	13,01	0,0274	0,784	6,96	45,39	0,951	6,23	166,33	3,36	0,953
	3	6,70	0,0284	0,887	4,91	44,22	0,990	4,53	192,67	3,40	0,992
	4	15,99	0,0411	0,870	19,62	27,65	0,992	14,02	116,38	3,49	0,997
	5	19,59	0,0417	0,735	10,74	30,26	0,916	9,69	100,99	3,37	0,925
	6	19,85	0,0278	0,796	12,05	22,62	0,952	9,94	233,56	3,71	0,959
	7	7,22	0,0287	0,854	6,05	24,68	0,958	5,24	366,15	3,82	0,965
5	1	8,06	0,0128	0,734	3,48	34,28	0,903	2,93	178,96	3,42	0,915
	2	10,42	0,0355	0,852	6,65	60,81	0,990	5,91	260,23	3,40	0,992
	3	-	-	-	30,63	13,35	0,970	47,12	0,95	2,20	0,985
	4	13,40	0,0170	0,907	20,89	11,29	0,996	19,38	73,06	3,61	0,998
	5	38,09	0,0236	0,785	26,87	15,74	0,979	23,65	94,38	3,57	0,990
	6	17,01	0,0270	0,719	12,18	15,38	0,871	10,00	351,00	4,00	0,897
	7	29,65	0,0259	0,803	18,70	18,79	0,980	15,07	100,00	3,52	0,980
	8	26,06	0,0162	0,825	21,21	12,14	0,993	15,64	100,01	3,67	0,995
5 2005	1	13,43	0,0305	0,782	7,45	88,18	0,985	6,82	322,85	3,34	0,988
	2	12,00	0,0331	0,845	10,65	46,48	0,994	10,55	50,07	3,02	0,994
	3	6,90	0,0251	0,874	6,20	30,19	0,984	4,82	1163,30	4,06	0,993
	4	3,82	0,0168	0,904	3,48	19,32	0,975	2,55	43107,20	5,23	0,993
	5	8,81	0,0142	0,841	7,08	14,34	0,959	5,13	10484,45	4,95	0,980
	6	14,22	0,0199	0,915	11,09	15,82	0,993	11,48	7,18	2,77	0,995
	7	6,98	0,0180	0,844	5,88	14,77	0,943	5,27	145,70	3,69	0,954
	8	5,40	0,0160	0,815	4,58	15,11	0,919	3,21	56923,87	5,45	0,943
6	1	11,60	0,0404	0,849	10,25	57,60	0,993	9,20	134,70	3,24	0,994
	2	10,22	0,0689	0,768	10,35	51,65	0,769	8,28	1461,16	4,03	0,777
	3	13,87	0,0375	0,885	10,17	30,00	0,993	9,33	102,95	3,37	0,994
	4	14,36	0,0353	0,863	10,65	28,63	0,993	9,43	167,00	3,54	0,996
	5	6,33	0,0482	0,906	5,62	55,02	0,991	5,32	186,37	3,35	0,995
	6	8,03	0,0257	0,881	7,08	30,20	0,976	5,61	527,77	3,85	0,984
	7	12,57	0,0222	0,850	9,82	20,18	0,981	8,38	237,90	3,74	0,993

O coeficiente de correlação foi maior para as curvas ajustadas pelo Modelo da Dispersão Livre Modificado, exceto para algumas curvas de DTR realizadas no início da secagem, cujo Modelo da Dispersão de Taylor apresentou os maiores valores de coeficiente de correlação. Entretanto, este modelo também não se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais (ver Figuras 6.70; 6.86 e 6.92). O Modelo da Dispersão Livre Modificado apresentou o índice “n” médio de 3,65, variando entre 2,20 e 5,45.

Pelas Tabelas 6.10 a 6.12 pode-se observar que os valores de  $E_z$  obtidos pelo ajuste do Modelo da Dispersão de Taylor foram, na sua maioria, mais altos do que os valores obtidos pelo Modelo da Dispersão Livre Modificado. O desvio percentual médio com a utilização do Modelo da Dispersão de Taylor ao invés do Modelo da Dispersão Livre Modificado é de 54,23%. Já, os valores de  $E_z$  obtidos pelo Modelo da Dispersão Livre são mais próximos daqueles obtidos pelo Modelo Modificado, visto que, o valor de “n” esteve próximo de 3 para a maioria das curvas de DTR. O coeficiente de dispersão, em geral, foi maior para o Modelo da Dispersão Livre. O desvio percentual médio com a utilização do Modelo da Dispersão Livre em relação do Modelo Modificado é de 15,94%.

Os coeficientes de dispersão variaram de  $2,55 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  (Experimento 5 safra 2005) a  $47,12 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  (Experimento 5), sendo que ambos foram realizados nas condições centrais do segundo planejamento de secagem (carga de 12 kg de café e vazão de 8 kg ar/min). Nessa mesma condição, obteve-se os maiores valores de  $E_z$ . O mesmo foi observado para o primeiro planejamento de secagem, o que indica que as condições operacionais de aproximadamente 12 kg de café e de vazão de ar de 8 kg ar/min provocam um rápido espalhamento do pulso de partículas marcadas e o maior efeito de mistura no secador.

Tabela 6.12 – Coeficiente de dispersão e constantes das Equações (6.52), (6.53) e (6.56) para o segundo planejamento de secagem:  $M = 14 \text{ kg}$ .

Exp.	DTR	Taylor			Livre			Livre modificado			
		$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_T$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_L$	$R^2$	$E_z \times 10^4$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_n$	n	$R^2$
7	1	3,96	0,0100	0,629	2,17	35,00	0,376	2,37	89,00	3,21	0,322
	2	20,36	0,0210	0,780	13,33	31,64	0,984	12,42	77,78	3,26	0,989
	3	20,26	0,0204	0,869	13,27	17,34	0,987	14,94	4,85	2,61	0,991
	4	10,79	0,0234	0,794	6,76	38,43	0,973	5,97	146,97	3,37	0,981
	5	24,81	0,0203	0,789	15,98	27,86	0,985	13,60	63,23	3,24	0,983
8	1	8,87	0,0512	0,777	7,24	52,29	0,910	6,11	742,88	3,83	0,952
	2	4,42	0,0229	0,956	4,00	22,61	0,999	3,99	21,35	2,98	0,999
	3	9,37	0,0233	0,787	7,08	17,17	0,901	6,40	157,81	3,67	0,945
	4	9,56	0,0179	0,925	7,52	12,38	0,996	6,49	115,97	3,69	0,999
	5	17,47	0,0191	0,774	12,78	11,68	0,861	11,57	98,81	3,71	0,934
	6	50,72	0,0377	0,714	25,76	23,84	0,944	17,15	181,48	3,65	0,956
	7	24,69	0,0222	0,817	21,21	15,12	0,983	18,22	93,50	3,59	0,993
	8	3,87	0,0181	0,827	3,37	18,48	0,915	3,21	81,82	3,45	0,928
9	1	5,62	0,0398	0,739	4,46	47,24	0,599	4,25	71,07	3,12	0,577
	2	24,25	0,0257	0,659	14,26	33,00	0,903	12,66	203,91	3,53	0,929
	3	13,54	0,0209	0,884	10,17	15,85	0,992	8,44	200,00	3,78	0,996
	4	7,76	0,0235	0,821	6,28	23,46	0,945	5,70	221,14	3,66	0,959
	5	3,77	0,0193	0,834	3,48	19,28	0,927	3,28	295,31	3,79	0,940

Como observado nos experimentos do primeiro planejamento de secagem, os valores do coeficiente de dispersão dos experimentos do segundo planejamento apresentaram comportamento ambíguo frente aos valores de velocidade e vazão mássica dos frutos de café. Como exemplo desse comportamento pode-se citar: a curva de DTR 3 (Experimento 1); DTRs 2 e 6 (Experimento 3); DTRs 2 e 3 (Experimento 4); DTRs 4 e 6 (Experimento 5); DTR 6 (Experimento 8) e DTR 5 (Experimento 9), onde um aumento na velocidade dos frutos de café provocou a diminuição do coeficiente de dispersão. Para as demais curvas de DTR o aumento da velocidade causou um aumento no coeficiente de dispersão.

Sendo assim, a utilização do coeficiente de dispersão para interpretar o comportamento dos frutos de café no secador não forneceu uma tendência do escoamento frente à velocidade e à diminuição do conteúdo de umidade ao longo da secagem.

Para melhor descrever o comportamento dos frutos de café, determinou-se o número de Péclet para cada curva de DTR, o qual considera os efeitos tanto da velocidade de escoamento quanto do coeficiente de dispersão. A metodologia de cálculo e os resultados do número de Péclet são descritos a seguir.

#### **6.4.2.2 – Determinação do Número de Péclet**

Com os dados de coeficiente de dispersão e velocidade de escoamento dos frutos de café obteve-se o número de Péclet, que foi calculado utilizando-se a Equação (6.27). No cálculo do adimensional  $Pe$  empregou-se o coeficiente de dispersão obtido pelo modelo que melhor ajustou-se aos dados experimentais, ou seja, o Modelo da Dispersão Livre Modificado. Em quatro experimentos foi utilizado o coeficiente de dispersão obtido pelo Modelo da Dispersão de Taylor porque apresentou o maior coeficiente de correlação, como discutido anteriormente.

As Figuras 6.94 a 6.96 mostram o comportamento do número de Péclet em função do conteúdo de umidade para o primeiro planejamento de secagem. Cada ponto no gráfico representa o número de Péclet para uma DTR realizada.

O número de Péclet, para os experimentos do primeiro planejamento de secagem (safra 2003), apresentados nas Figuras 6.94 a 6.96 variou entre 2,67 e 27,17. Os menores valores de  $Pe$  indicam maior índice de mistura, onde  $Pe = 0$  indica escoamento com mistura perfeita.

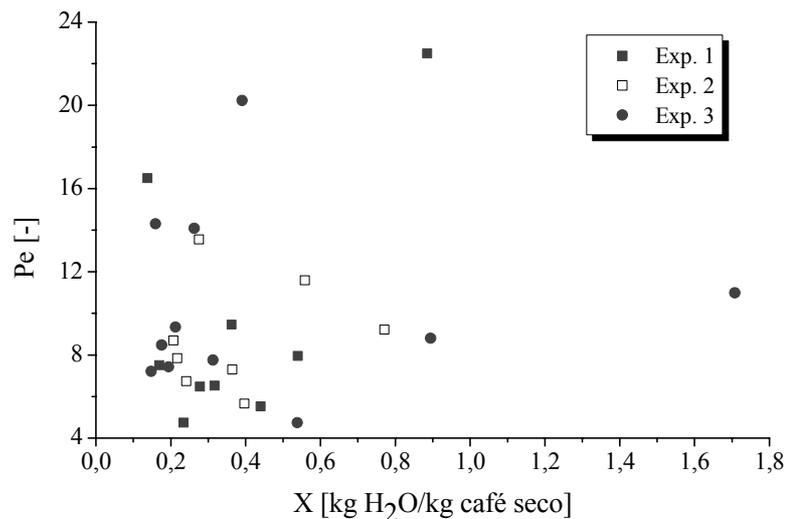
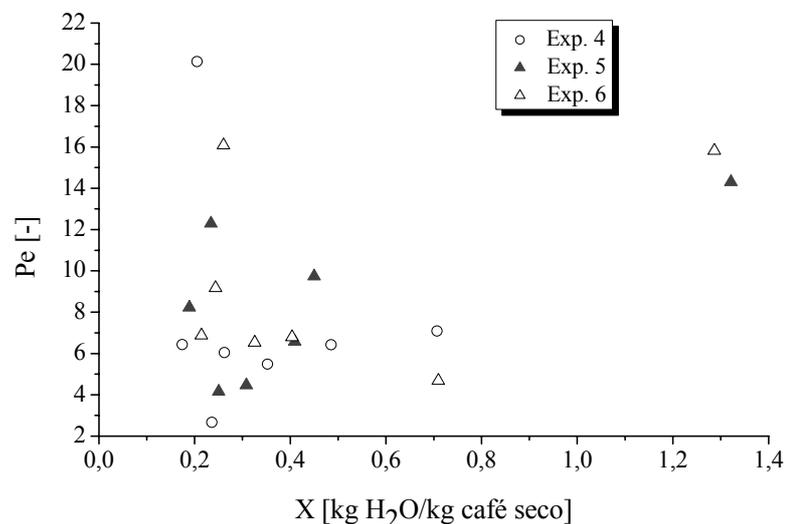


Figura 6.94 – Número de Péclet em função do conteúdo de umidade: T = 40°C.



Os menores valores para o número de Péclet (abaixo de 5, que pode ser considerado próximo do escoamento de mistura perfeita como mostra a Figura 6.7) foram obtidos nas curvas de DTR 7 (Experimento 1); DTR 3 (Experimento 2); DTR 3 (Experimento 3); DTRs 3 e 5 (Experimento 4); DTRs 4 e 5 (Experimento 5); DTR 2 (Experimento 6) e DTR 2 (Experimento 8 safra 2005). Com exceção da DTR 7 (Experimento 1) e as DTRs 5, todas as outras curvas de DTR foram realizadas com frutos de café com conteúdo de umidade entre 0,70 e 0,30 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco. Nesse intervalo as mudanças nas propriedades dos frutos de café e na intensidade de vibração ainda são intensas, porém os frutos de café não se encontram mais pegajosos e como a amplitude de vibração possui um valor intermediário, a mistura das partículas pode ter sido facilitada.

Os maiores valores de Pe indicam menor índice de mistura, onde  $Pe = \infty$  indica escoamento pistonado. Os maiores valores para o número de Péclet (acima de 20, que na Figura 6.7 indica um escoamento pistonado com dispersão axial) foram obtidos nas curvas de DTR 1 (Experimento 1); DTR 4 (Experimento 3); DTR 6 (Experimento 4); DTR 1 (Experimento 7); DTR 3 (Experimento 7 safra 2005) e DTRs 6 e 7 (Experimento 8 safra 2005). Esse comportamento foi verificado para conteúdos de umidade acima de 0,88 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco e abaixo de 0,25 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco, exceto para a DTR 4 (Experimento 3), ou seja, no início da secagem e ao final o escoamento aproxima-se do pistonado. No início da secagem esse comportamento deve-se à alta pegajosidade dos frutos de café e, ao final, à amplitude de vibração das bandejas, que possui valores muito baixos, diminuindo o efeito de mistura.

As Figuras 6.97 a 6.99 mostram o comportamento do número de Péclet em função do conteúdo de umidade, para o segundo planejamento de secagem. Cada ponto no gráfico representa o número de Péclet para cada uma das DTRs realizadas.

O número de Péclet, para os experimentos do segundo planejamento de secagem, apresentados nas Figuras 6.97 a 6.99, variou entre 1,15 e 31,00. A diferença entre os valores mínimo e máximo foi maior para este planejamento de secagem do que para o primeiro.

Os menores valores para o número de Péclet (abaixo de 5, que pode ser considerado próximo do escoamento de mistura perfeita como mostra a Figura 6.7) foram obtidos nas curvas de DTR 1 (Experimento 3); DTRs 3 e 5 (Experimento 5); DTR 1 (Experimento 5 safra 2005); DTRs 2 e 5 (Experimento 7) e DTR 2 (Experimento 9). Com exceção da DTR 1

(Experimento 5 safra 2005) e a DTR 5 (Experimento 7) com conteúdo de umidade de 1,38 e 0,09 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco, respectivamente, todas as outras curvas de DTR foram realizadas com frutos de café com conteúdo de umidade entre 0,70 e 0,30 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco. Nesse intervalo as mudanças nas propriedades dos frutos de café e na intensidade de vibração ainda são intensas, porém os frutos de café não se encontram mais pegajosos e como a amplitude de vibração possui um valor intermediário, a mistura das partículas pode ter sido facilitada.

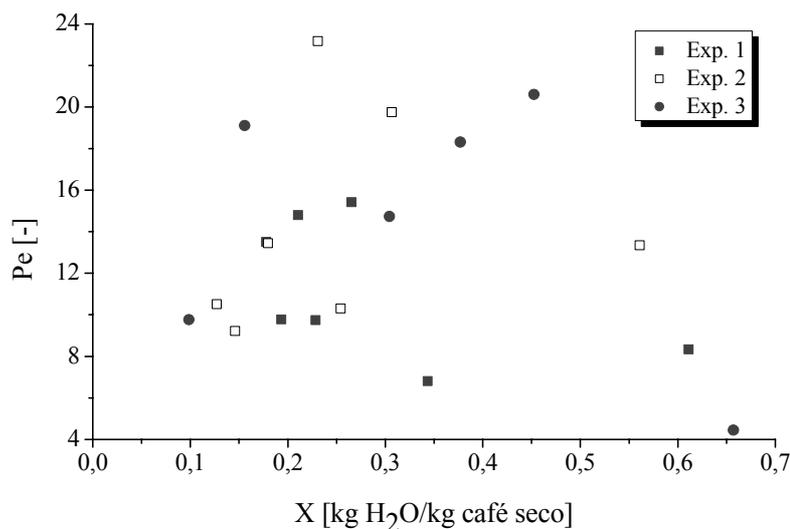


Figura 6.97 – Número de Péclet em função do conteúdo de umidade: M = 10 kg.

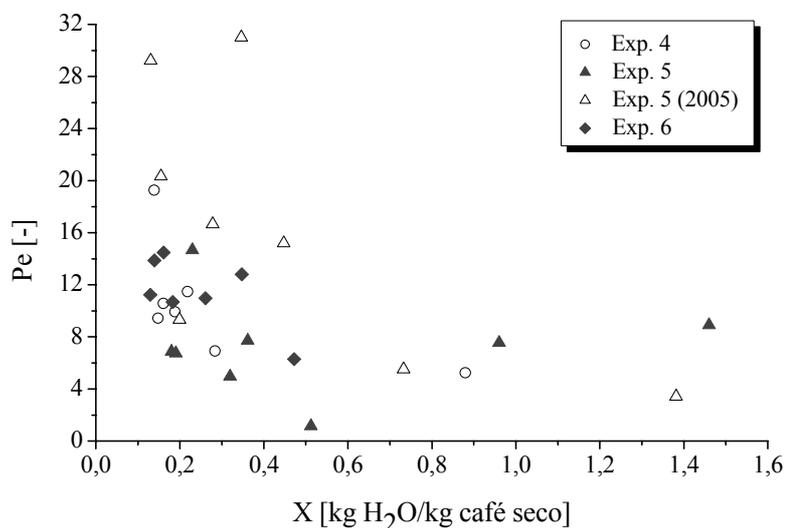


Figura 6.98 – Número de Péclet em função do conteúdo de umidade: M = 12 kg.

Os maiores valores de Pe indicam menor índice de mistura, onde  $Pe = \infty$  indica escoamento pistonado. Os maiores valores para o número de Péclet (acima de 20, que na Figura 6.7 indica um escoamento pistonado com dispersão axial) foram obtidos nas curvas de DTR 4 (Experimento 2); DTR 2 (Experimento 3); DTRs 4, 7 e 8 (Experimento 5 safra 2005);

DTR 2 e 8 (Experimento 8); DTR 5 (Experimento 9). Esse comportamento foi verificado para conteúdos de umidade abaixo de 0,45 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco, ou seja, ao final da secagem o escoamento aproxima-se do pistonado, visto que a amplitude de vibração das bandejas nesta etapa é menor, diminuindo o efeito de mistura.

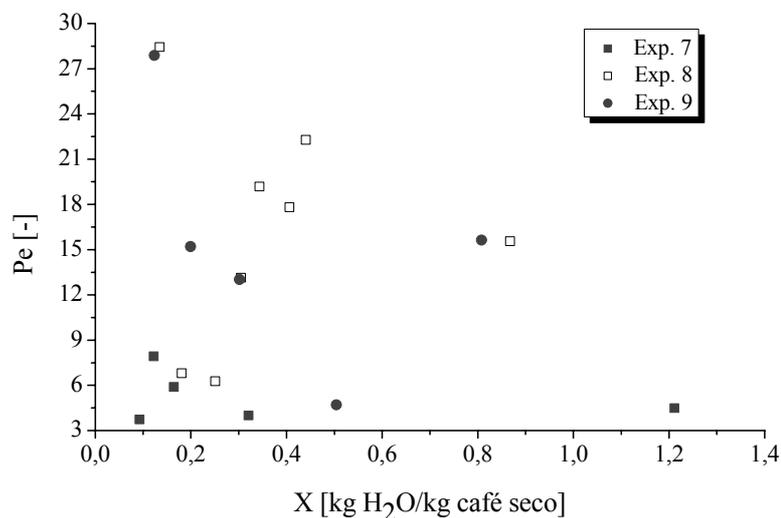


Figura 6.99 – Número de Péclét em função do conteúdo de umidade: M = 14 kg.

A análise das Figuras 6.94 a 6.99 mostra que o número de Péclét também não apresenta um comportamento definido em função do conteúdo de umidade. Durante a secagem, o número de Péclét aumenta e diminui sem apresentar uma relação direta com o aumento ou diminuição da velocidade de escoamento, apesar de ser função dessa variável. Na verdade, a intenção de explicar o comportamento do escoamento do leite em cada instante é bastante dificultada pelo fato de que os parâmetros envolvidos na dinâmica do escoamento não permanecem constantes durante a secagem.

Uma condição de vibração para diferentes condições de conteúdo de umidade, densidade, esfericidade, pegajosidade, velocidade pode provocar inúmeras situações diferentes de escoamento e isso acaba se refletindo nos valores do coeficiente de dispersão e no número de Péclét.

A Tabela 6.13 mostra os valores médios para o número de Péclét calculado a partir do coeficiente de dispersão do Modelo da Dispersão Livre Modificado, bem como o desvio padrão, para os experimentos do primeiro e do segundo planejamento de secagem.

Os maiores valores para o número de Péclét (primeiro planejamento de secagem), como mostra a Tabela 6.13, foram obtidos nos experimentos realizados com maior

temperatura dos frutos de café (Experimentos 7 a 9) e, conseqüentemente, do ar de secagem. Os altos valores de desvio padrão comprovam a grande variação do número de Péclet ao longo da secagem, para os dois planejamentos de secagem.

Tabela 6.13 – Valores médios de Péclet para os experimentos do primeiro e do segundo planejamento de secagem.

Experimento	Primeiro planejamento		Experimento	Segundo planejamento	
	Pe [-]	$\sigma$ [-]		Pe [-]	$\sigma$ [-]
1	9,69	5,92	1	11,70	3,11
2	8,82	2,61	2	14,26	5,26
3	10,31	4,37	3	14,50	6,27
4	8,09	5,67	4	10,40	4,47
5	8,54	3,84	5	7,32	3,80
6	9,42	4,65	5 (2005)	16,33	10,22
7	16,12	7,28	6	11,47	2,72
7 (2005)	14,55	6,63	7	5,81	1,93
8	8,21	3,85	8	16,19	7,51
8 (2005)	14,50	7,37	9	15,29	8,30
9	14,04	4,20	-	-	-

Os maiores valores para o número de Péclet do segundo planejamento de secagem foram obtidos sob as condições operacionais de maior e menor carga de café (10 e 14 kg) e maiores vazões mássicas (8 e 9 kg ar/min).

Os valores médios de Péclet na Tabela 6.13 apresentam a mesma ordem de grandeza, uma correlação não linear possibilita a previsão de condições de escoamento dos frutos de café no secador de bandejas vibradas, para simular a dispersão em diferentes condições de escoamento e diferentes dimensões do equipamento.

O número de Péclet é útil para previsão do grau de mistura em meios porosos. Quando o número de Péclet é da ordem de grandeza da porosidade ( $\varepsilon$ ), a difusão molecular é predominante; quando Pe é da ordem de um, a difusão ainda predomina em pequena escala, quando Péclet é da ordem de  $\varepsilon^{-1}$ , a convecção tende a predominar; e a convecção é predominante quando Pe é da ordem de  $\varepsilon^{-2}$  (AURIAULT; ADLER, 1995).

Os valores de porosidade dos frutos de café cereja, antes de iniciar-se a operação de secagem foram: 0,40 (Experimento 2 – Mundo Novo), 0,41 (Experimento 5 – Catuaí) e 0,41 (Experimento 8 – Acaiá). Para a relação entre Pe e “ $\varepsilon$ ” apresentada por Auriault e Adler (1995), temos que Pe médio (estimado pelo modelo da Dispersão Livre Modificado para os experimentos indicados acima, realizados no primeiro planejamento de secagem) é,

aproximadamente, da ordem da  $\varepsilon^{-2}$ . Os valores para o expoente da porosidade foram: 1,57 (Experimento 2), 2,34 (Experimento 5) e 2,36 (Experimento 8), indicando que a convecção predomina no escoamento de frutos de café no secador estudado. Para os valores extremos de  $Pe$ , máximo e mínimo, encontrados nos ensaios de secagem obteve-se  $Pe$  da ordem de  $\varepsilon^{-3,70}$  e  $\varepsilon^{-1,07}$ , respectivamente.

Os resultados de  $E_z$  e  $Pe$  são úteis para previsão da dispersão de frutos de café em secadores com escoamento contínuo, sobretudo, na realização de modelagem para previsão da homogeneidade do produto final, obtido após a secagem. A partir dos dados de coeficiente de dispersão é possível verificar o tipo de escoamento que ocorreu durante a secagem, como por exemplo, a utilização de equações e diagramas, originalmente desenvolvidos para gases e líquidos, para prever o comportamento de sólidos. Um exemplo disso está descrito a seguir.

O diagrama apresentado na Figura 6.5 foi desenvolvido para escoamento de substâncias gasosas e líquidas em tubulações circulares. Contudo, substituindo o coeficiente de difusão no número de Bodenstein pelo coeficiente de dispersão é possível determinar a região em que se encontram os frutos de café (escoando sobre as bandejas vibradas do secador).

Considerando-se a dimensão característica ( $d$ ) como sendo a largura das bandejas ( $18 \times 10^{-2}$  m) e  $L$  a distância percorrida pelos frutos de café no interior do secador (3,04 m) obtém-se  $L/d = 16,89$ .

Os valores máximos e mínimos para  $Bo$  ( $vd/E_z$ ), para o primeiro planejamento de secagem foram: 1,61 (Experimento 8 safra 2005) e 0,16 (Experimento 4) e para o segundo planejamento de secagem foram: 1,84 (Experimento 5 safra 2005) e 0,07 (Experimento 5).

A Figura 6.100 mostra a região no diagrama dos modelos de escoamento que abrange o escoamento dos frutos de café no secador. Os valores plotados referem-se ao segundo planejamento de secagem, já que os experimentos desse planejamento apresentaram os valores extremos e, portanto, abrangem todos os experimentos realizados.

A região em que os frutos de café encontram-se no diagrama da Figura 6.100 indica que os modelos de dispersão podem ser aplicados ao escoamento de frutos de café no secador de bandejas vibradas, apesar dos valores relativamente baixos de número de Péclet, para os quais a utilização desses modelos é bastante questionada.

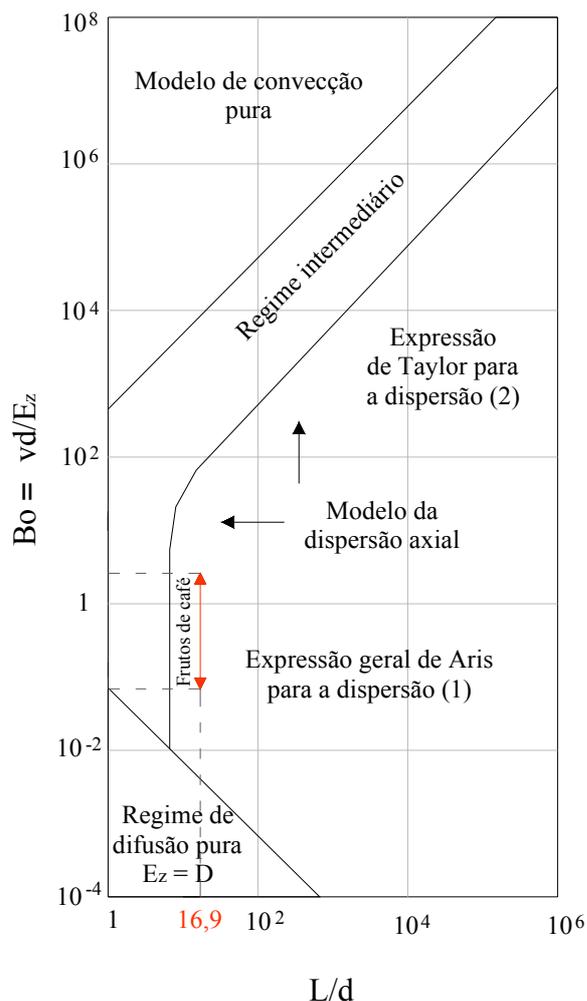


Figura 6.100 – Diagrama dos modelos de escoamento com indicação da região de escoamento dos frutos de café no secador (Adaptado de Levenspiel, 2000).

Uma sofisticação no equipamento possibilitaria diminuição da complexidade do escoamento. No caso de um secador de correia transportadora perfurada, os frutos de café transportados teriam escoamento pistonado, porém, devido à disposição em camadas, os frutos da camada inferior secariam mais rapidamente. Caso a correia fosse vibrada, ocorria mistura dos frutos de café (dispersão) e intensificaria a transferência de calor e massa.

Após a discussão dos resultados obtidos na secagem experimental dos frutos de café, da determinação da amplitude vibracional e da discussão sobre o comportamento dos frutos de café em escoamento no secador de bandejas vibradas, apresentam-se, a seguir, as principais conclusões obtidas neste estudo e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 7.1 – Quanto à Secagem dos Frutos de Café

##### 7.1.1 – Curvas de Secagem

As curvas de secagem dos frutos de café apresentam dois períodos de secagem distintos com taxa decrescente, característicos de materiais higroscópicos.

A dispersão do conteúdo de umidade médio dos frutos de café diminuiu no decorrer da secagem, sendo que a margem de erro no período final de secagem foi inferior a 10% e o valor do conteúdo de umidade aproxima-se do valor médio.

No primeiro planejamento de secagem (safra 2003), a única variável que influenciou significativamente o tempo de secagem é a temperatura do fruto de café, diminuindo, em média cerca de 26,77 h o tempo total de secagem, quando alterada do menor valor (40°C) para o maior (50°C).

No segundo planejamento de secagem (safra 2004), a massa de frutos de café alimentada no secador apresentou efeito significativo, diminuindo o tempo de secagem para mudança de período ( $t_m$ ) em 3,3 h quando alterada do menor valor (10 kg) para o maior (14 kg), ou seja, o aumento da altura do leito aumentou a taxa de secagem no primeiro período de secagem.

As variáveis estudadas no segundo planejamento de secagem não alteraram significativamente o tempo de secagem final dos frutos de café.

##### 7.1.2 – Temperatura dos Frutos de Café

O controle manual da temperatura dos frutos de café foi eficiente, sendo que para todos os experimentos realizados as temperaturas dos frutos situaram-se próximas do valor do *set point* estabelecido para cada experimento, com valor médio abaixo dos valores adotados

nos planejamentos experimentais e desvio padrão entre 0,6°C e 1,5°C.

### 7.1.3 – Distribuição do Conteúdo de Umidade dos Frutos de Café

A distribuição do conteúdo de umidade inicial dos frutos de café apresentou-se mais ampla do que as distribuições ao longo da secagem, sendo que as distribuições, de uma forma geral, não são simétricas, mas deslocadas para o conteúdo de umidade mais alto.

A maior vazão de ar de secagem (9 kg ar/min) contribuiu para a diminuição da ocorrência de frutos de café com conteúdo de umidade superior ao valor médio.

### 7.1.4 – Encolhimento

Os frutos de café encolhem de forma diferente nas três dimensões, sendo que a dimensão, na qual ocorre a maior contração volumétrica, é a espessura.

A variedade Mundo Novo apresentou maior diâmetro de partícula, seguida da variedade Acaiá e Catuaí. A redução volumétrica foi maior para a variedade com maior porcentagem de casca, ou seja, Acaiá (encolhimento de 52,5% e 60% de casca, em massa). A menor contração volumétrica foi obtida na variedade Catuaí (32,7%), que possui apenas 48,5% de casca (em massa). Em termos de rendimento, a variedade Catuaí representa a melhor opção na escolha da variedade.

A esfericidade dos frutos de café sofre pequena redução durante a secagem (máximo 11%) e a variedade com maior esfericidade é a Catuaí (0,93-0,85), seguida da Acaiá (0,91-0,82) e Mundo Novo (0,90-0,80).

A área específica dos frutos de café aumenta com a diminuição do conteúdo de umidade, sendo que a variedade Acaiá apresentou maior área específica.

A densidade *bulk* dos frutos de café da variedade Mundo Novo diminuiu, em média, 25 a 38% com a diminuição do conteúdo de umidade.

### 7.1.5 – Beneficiamento

A variedade Catuaí, de menores dimensões, foi a variedade que possibilitou a maior quantidade de grãos de café por umidade de massa de café coco, o que é importante em

termos de rendimento industrial e comercialização.

Na classificação quanto ao tamanho da fava, a maior fração de grãos de café ficou retida nas peneiras 18, 17 e 16, o que reflete a qualidade do café, visto que os grãos retidos nessas peneiras são maiores, inteiros e os mais apreciáveis e valorizados para comercialização.

Os menores valores de porcentagem de grãos retidos nas peneiras 18, 17 e 16 foram obtidos nos experimentos realizados com temperatura do fruto de 50°C, indicando que a rápida secagem diminui a porcentagem de grãos mais nobres.

A variedade Mundo Novo pode alcançar maior valor comercial, quanto ao tamanho do grão visto que, no segundo planejamento de secagem, a porcentagem média de grãos retidos nas peneiras 18, 17 e 16 foi de aproximadamente 80%.

A temperatura foi a variável, para o primeiro planejamento de secagem, que apresentou o maior efeito sobre a porcentagem de grãos retidos no fundo, ou seja, aumentando-se a temperatura do menor para o maior nível tem-se um aumento de 7,34% na porcentagem de grãos retidos no fundo.

No segundo planejamento de secagem, a alteração da massa de frutos de café e da vazão de ar do menor nível para o maior reduz 2,40% a porcentagem de grãos retidos no fundo. Neste caso, o melhor é operar com maior massa e maior vazão de ar. Os experimentos realizados com a menor vazão de ar (7 kg ar/min) geraram maiores quantidades de finos.

## **7.2 – Quanto à Vibração na Secagem dos Frutos de Café**

A vibração das bandejas diminui consideravelmente com a diminuição do conteúdo de umidade dos frutos de café. A redução média foi de 85% do valor da amplitude inicial, para o primeiro e segundo planejamento de secagem.

Ao final da secagem necessita-se menor amplitude vibracional para manter o escoamento dos frutos de café sobre a bandeja, devido à diminuição da pegajosidade dos frutos de café e à maior rigidez da casca do café, sendo maior a efetividade da energia vibracional transmitida.

As variáveis operacionais adotadas no primeiro planejamento de secagem não

influenciaram significativamente no valor médio da amplitude de vibração imposta às bandejas durante a secagem.

Os valores de amplitude de vibração, para o segundo planejamento, foram bem maiores, quando comparados com os valores obtidos no primeiro planejamento de secagem. A principal influência foi a maior pegajosidade dos frutos de café, safra 2004, variedade Mundo Novo. Portanto, frutos de café com maior pegajosidade necessitam de maior amplitude vibracional para escoarem sobre as bandejas do secador.

O valor da amplitude de vibração diminui ao longo da bandeja, sendo os maiores valores próximos ao eixo de conexão com o vibrador.

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.

A maior parte da secagem foi conduzida com  $\Gamma > 1$ . 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 atingem cerca de 0,5 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco o valor do adimensional de vibração aproxima-se da unidade para a maioria dos experimentos.  $\Gamma < 1$  indica que a contribuição da componente vertical torna-se pequena em relação à componente horizontal, visto que o ângulo de excitação diminui com a diminuição da vibração.

### **7.3 – Quanto à Dispersão dos Frutos de Café no Secador de Bandejas Vibradas**

#### **7.3.1 – Vazão Mássica dos Frutos de Café**

A vazão mássica inicial aumenta com a diminuição do conteúdo de umidade até aproximadamente 0,20 a 0,40 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco, após essa umidade, a vazão mássica encontra-se em torno de um valor médio. O aumento da vazão mássica dos frutos de café é cerca de 300% de seu valor inicial, levando-se em consideração que no início da secagem os frutos de café possuem maior massa do que ao final.

Os pontos experimentais de vazão mássica dos frutos de café apresentaram valores altos de desvio padrão indicando que o sistema é bastante instável. Essa instabilidade é o reflexo de um processo dinâmico e sensível às alterações causadas pela alteração de várias propriedades e características dos frutos de café, com a diminuição do conteúdo de umidade.

Ao final da secagem, o escoamento ocorre com maior facilidade devido a: ausência de pegajosidade dos frutos de café; diminuição da massa das partículas e redução do amortecimento da vibração dos frutos de café devido à rigidez adquirida na secagem.

### **7.3.2 – Distribuição do Tempo de Residência (DTR)**

O tempo médio de residência dos frutos de café com conteúdo de umidade acima de 1,0 kg H<sub>2</sub>O/kg café seco é bastante alto, entretanto, há uma diminuição expressiva a partir desse conteúdo de umidade chegando à redução entre 80 e 90% do valor inicial.

Os valores de variância, para as curvas de DTR, são altos no início e depois diminuem, indicando que as curvas possuem maior espalhamento e pico mais achatado no início e depois se tornam mais agudas. Os valores de assimetria são todos positivos e indicam forte deslocamento das curvas de DTR para a esquerda.

Os menores valores de extensão percentual dos tempos de residência ( $\Xi$ ) foram obtidos no início da operação de secagem, devido à alta vibração, que apesar da maior pegajosidade, maior massa e menor velocidade das partículas, impede a formação de canais preferenciais e zonas mortas no secador.

A menor pegajosidade, o menor diâmetro de partícula e a maior esfericidade (variedade Catuaí) favorecem o rápido escoamento dos frutos de café diminuindo os valores de tempo médio de residência, variância, assimetria e curtose das curvas de DTR.

As curvas de DTR, para o segundo planejamento de secagem, apresentam uma distribuição espalhada, com forte deslocamento para a esquerda e com picos agudos, porém com presença de cauda longa deslocada à direita.

A menor velocidade de escoamento aumenta os valores dos momentos em torno da média: variância, assimetria e curtose, e aumenta a extensão percentual dos tempos de residência, ou seja, aumenta a extensão da cauda das curvas de DTR.

### **7.3.3 – Coeficiente de Dispersão dos Frutos de Café**

Para a grande maioria dos experimentos, o modelo que melhor ajustou os dados experimentais (maior coeficiente de correlação) foi o Modelo da Dispersão Livre Modificado.

Este modelo apresentou o índice “n” médio de 3,86, variando entre 2,6 e 7,4.

O desvio percentual médio com a utilização do Modelo da Dispersão de Taylor, para os experimentos do primeiro planejamento de secagem, é de 69,52% em relação ao Modelo da Dispersão Livre Modificado. Para o Modelo da Dispersão Livre o desvio é de 22,42%.

Para o início da secagem (alto conteúdo de umidade), a velocidade dos frutos de café apresentou valores baixos e, portanto, o  $E_z$  foi pequeno, chegando a valores próximos de  $1 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, ou seja, no início da secagem o escoamento aproxima-se do pistonado, com os frutos de café escoando como um bloco e com pouca mistura entre as partículas.

Os valores para coeficiente de dispersão (Modelo da Dispersão Livre Modificado) variaram entre  $1,31 \times 10^{-4}$  a  $68,67 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Os maiores valores de  $E_z$  foram obtidos para o Experimento 5, o qual foi realizado nas condições centrais do primeiro planejamento de secagem (temperatura do fruto de 45°C; carga de 12,5 kg café e vazão de ar de 8 kg/min).

Os valores de coeficiente de dispersão dos experimentos do segundo planejamento de secagem, em geral, foram menores do que para o primeiro planejamento, ou seja, as curvas de DTR apresentaram baixo grau de mistura e um espalhamento mais lento.

O Modelo da Dispersão Livre Modificado apresentou, para os experimentos do segundo planejamento de secagem, índice “n” médio de 3,65, variando entre 2,20 e 5,45.

Os desvios percentuais médios com a utilização do Modelo de Dispersão de Taylor e do Modelo da Dispersão Livre foram menores para os experimentos do segundo planejamento de secagem: 54,23% e 15,94%, respectivamente.

Os coeficientes de dispersão, obtidos pelo Modelo da Dispersão Livre Modificado, variaram de  $2,55 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s a  $47,12 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

#### **7.3.4 – Número de Péclet**

O número de Péclet, para os experimentos do primeiro planejamento de secagem, variou entre 2,67 e 27,17. O número de Péclet, para os experimentos do segundo planejamento de secagem, variou entre 1,15 e 31,00.

Os maiores valores para o número de Péclet médio, no primeiro planejamento de

secagem, foram obtidos nos experimentos realizados com maior temperatura dos frutos de café.

Os valores máximos e mínimos para  $Bo$  ( $vd/E_z$ ), para o primeiro planejamento de secagem foram: 1,61 e 0,16 e, para o segundo planejamento de secagem, foram: 1,84 e 0,07. A utilização desse adimensional em um diagrama de modelos de escoamento indicou que os modelos de dispersão podem ser aplicados ao escoamento de frutos de café no secador de bandejas vibradas, apesar dos valores relativamente baixos do número de Péclet.

Como uma conclusão geral do trabalho atual pode-se inferir que a operação do secador com maior vazão de ar de secagem e maior massa dos frutos de café confere uma melhor qualidade do grão e menor tempo de secagem, considerando-se a utilização da temperatura dos frutos de café de 45°C. Nessa temperatura a qualidade dos grãos não é prejudicada e o tempo de secagem não é tão longo quanto na operação em temperatura de 40°C. Quanto à variedade dos frutos de café, o menor tempo de secagem, o maior rendimento da massa de grãos em relação à massa de casca e a maior facilidade ao escoamento no secador de bandejas vibradas foram obtidos operando-se com a variedade Catuaí. A única vantagem na utilização da variedade Mundo Novo está na alta porcentagem de grãos retidos nas peneiras 18 e 17. Contudo, o maior tempo de secagem, a maior intensidade vibracional e as dificuldades operacionais devido à alta pegajosidade conferidas por esta variedade não justificam sua utilização no secador de bandejas vibradas com reciclo empregado no trabalho atual.

#### **7.4 – Sugestões para Trabalhos Futuros**

- determinar o teor de açúcares na casca dos frutos de café secos para as variedades Catuaí, Mundo Novo e Acaiaí com a finalidade de comparar quantitativamente a pegajosidade dos frutos de café em diferentes variedades;
- determinar o teor de cafeína nos frutos de café para as diferentes variedades;
- monitorar microbiologicamente e quimicamente (conteúdo de umidade, cafeína, proteínas, açúcares, lipídios) os grãos armazenados por diferentes períodos de tempo, para verificar as alterações que ocorrem após a operação de beneficiamento;
- estudar a distribuição do conteúdo de umidade durante a secagem em função do

tamanho uniforme de partículas.

- determinar a densidade absoluta em função do conteúdo de umidade dos frutos de café;
- desenvolver um modelo matemático que represente a secagem dos frutos de café no secador de bandejas vibradas com reciclo;
- determinar a amplitude vibracional das bandejas na direção horizontal ( $x$ ) e encontrar a resultante e o ângulo de excitação para as diferentes intensidades vibracionais dos vibradores eletromagnéticos;
- determinar correlações para o número de Péclet em função da massa de frutos de café alimentada no secador e da vazão de ar de secagem;
- realizar um estudo de viabilidade econômica da utilização do secador de bandejas vibradas com reciclo na secagem de frutos de café;
- determinar os coeficientes de transferência de calor e massa na secagem de frutos de café para as diferentes variáveis operacionais;
- testar a secagem de outros produtos alimentícios no secador de bandejas vibradas com reciclo;
- implementar um sistema de controle automático de temperatura dos frutos de café e do escoamento dos frutos de café, com a finalidade de facilitar a operação do secador;
- estudar a secagem de café despulpado no secador de bandejas vibradas;
- efetuar a secagem dos frutos de café no secador de bandejas vibradas por etapas;
- realizar um estudo de ampliação de escala para a utilização do secador de bandejas vibradas na secagem de grandes quantidades de frutos de café.

## APÊNDICE A – Montagem e programação do sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados de temperatura do ar de secagem é composto por oito termopares previamente calibrados e uma borneira (módulo LR-7018) onde os termopares são conectados.

A Figura A.1 mostra os módulos do sistema de aquisição de dados, juntamente com os diais de controle dos vibradores.



Figura A.1 – Módulos de aquisição de dados e diais de controle dos vibradores.  
1: módulo LR-7018; 2: módulo LR-7520; 3: fio RS-485; 4: cabo RS-232; 5: fios dos termopares (vermelho (-) e azul (+)).

O módulo LR-7018 (ver indicação 1 na Figura A.1) é conectado a um conversor LR-7520 (ver indicação 2 na Figura A.1) por um fio RS-485 (ver indicação 3 Figura A.1). São necessários quatro fios RS-485 para ligar o módulo no conversor. Os fios saem do módulo LR-7018 (conectados nas entradas GND, +VS, Data- e Data+) e são conectados no conversor LR-7520 nas entradas GND, +VS, Data- e Data+. Após a conexão do módulo LR-7018 com o conversor (LR-7520), pode-se conecta-los a um microcomputador, através de um cabo RS-232 (ver indicação 4 na Figura A.1), que é conectado no conversor LR-7520 e a outra extremidade na porta de comunicação do microcomputador (COM 2).

Após a instalação do sistema de aquisição de dados, é necessário inicializar o módulo LR-7018, de acordo com as seguintes etapas:

- 1) Desligar o módulo da energia elétrica

- 2) Conectar o pino INIT\* com o pino GND no módulo LR-7018
- 3) Ligar o módulo na energia elétrica
- 4) Rodar o programa test.exe, que se encontra no seguinte diretório:  
C:/Soft/Nap7000s/.
- 5) Pressionar 2
- 6) Pressionar \$002 [Enter] e como resposta obtém-se !02080A40
- 7) Pressionar 2
- 8) Pressionar %0001080600 [Enter] e como resposta obtém-se !01
- 9) Desligar o módulo da energia elétrica
- 10) Desconectar pino INIT\* com o pino GND
- 11) Ligar o módulo na energia elétrica
- 12) Pressionar 2
- 13) Pressionar \$012 [Enter] e como resposta obtém-se !01080600
- 14) Pressionar 2
- 15) Pressionar \$01M [Enter] e receber como resposta !017017
- 16) Pressionar 2
- 17) Pressionar \$01F [Enter] e receber como resposta !01A1.3

As etapas 1 a 5 são necessárias para o reconhecimento e inicialização do módulo pelo computador.

As etapas 6 e 7 lêem o *status* do módulo com o pino INIT\* conectado ao pino GND e detectam que o módulo está no endereço 02, com taxa de transferência (*baud rate*) de 115200 bps (bits por segundo) e checagem da soma (*checksum*) habilitada.

A etapa 8 muda o endereço do módulo para 01, a taxa de transferência para 9600 bps e desabilita a checagem da soma.

As etapas 9 a 17, com o pino INIT\* desconectado, lêem, novamente, o *status* do módulo.

Todas as informações acima foram obtidas no manual de instalação e operação do módulo LR-7018: *User Manual – I-7000 Bus Converter*.

O módulo LR-7018 possui entrada analógica com oito canais e seletor *jumper*. Os tipos de entrada podem ser: mV, V ou mA (com resistor externo de 125 ohm). Essas entradas

são compatíveis com termopares tipo: J, K, T, E, R, S, B, N e C. É necessário escolher uma configuração adequada do *jumper* para a conexão correta dos fios dos termopares, como indica a Figura A.2 (User's Manual – I-7011, I-7018 – ICP CON).

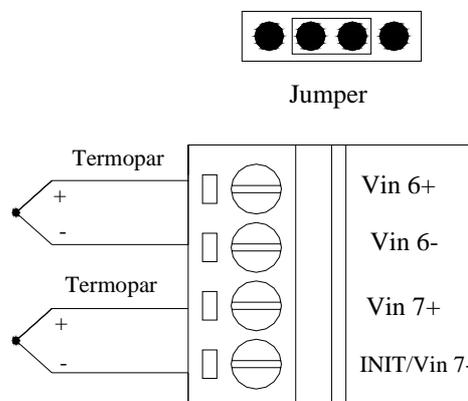


Figura A.2 – Seleção da configuração do *jumper*.

A configuração padrão (*default setting*) do módulo LR-7018 deve conter: endereço 01; entrada analógica Tipo 5; faixa de tensão de - 2,5 a + 2,5 V; taxa de transferência de 9600 bps; checagem da soma desabilitada; formato da unidade no sistema de engenharia e, o módulo estar com o *jumper* no modo INIT\*. Os comandos utilizados para configurar o endereço e o canal de cada termopar, a faixa de tensão, o sistema de unidades a ser utilizado e outras configurações necessárias, são encontrados no *User's Manual I-7018*. Um exemplo de comando para configuração é o código 0E, que configura o módulo de acordo com o tipo de entrada analógica que produz uma faixa de medida de - 210 a 760°C, compatível com o termopar Tipo J.

Após a instalação, inicialização e configuração dos módulos, o sistema de aquisição de dados está pronto para transmitir os sinais elétricos dos termopares até o microcomputador, que contém o software LabVIEW 6.1<sup>®</sup>, o qual é responsável por converter o sinal elétrico em valores de temperatura e gravar os dados de temperatura do ar ao longo da secagem. Mas para isso, é necessário criar um programa, em linguagem G (gráfica) para converter e gravar os dados em função do tempo, a chamada VI (*Virtual Instruments*).

A Figura A.3 apresenta a programação para efetuar a leitura e aquisição dos dados de temperatura do ar em um intervalo de tempo de 5 min. Os dados são salvos em um documento de texto (Bloco de Notas do Windows) no diretório programado pelo usuário, como por exemplo, C:\Marilia\Temperaturatest.txt, indicado na Figura A.3, no interior do retângulo de cor rosa.

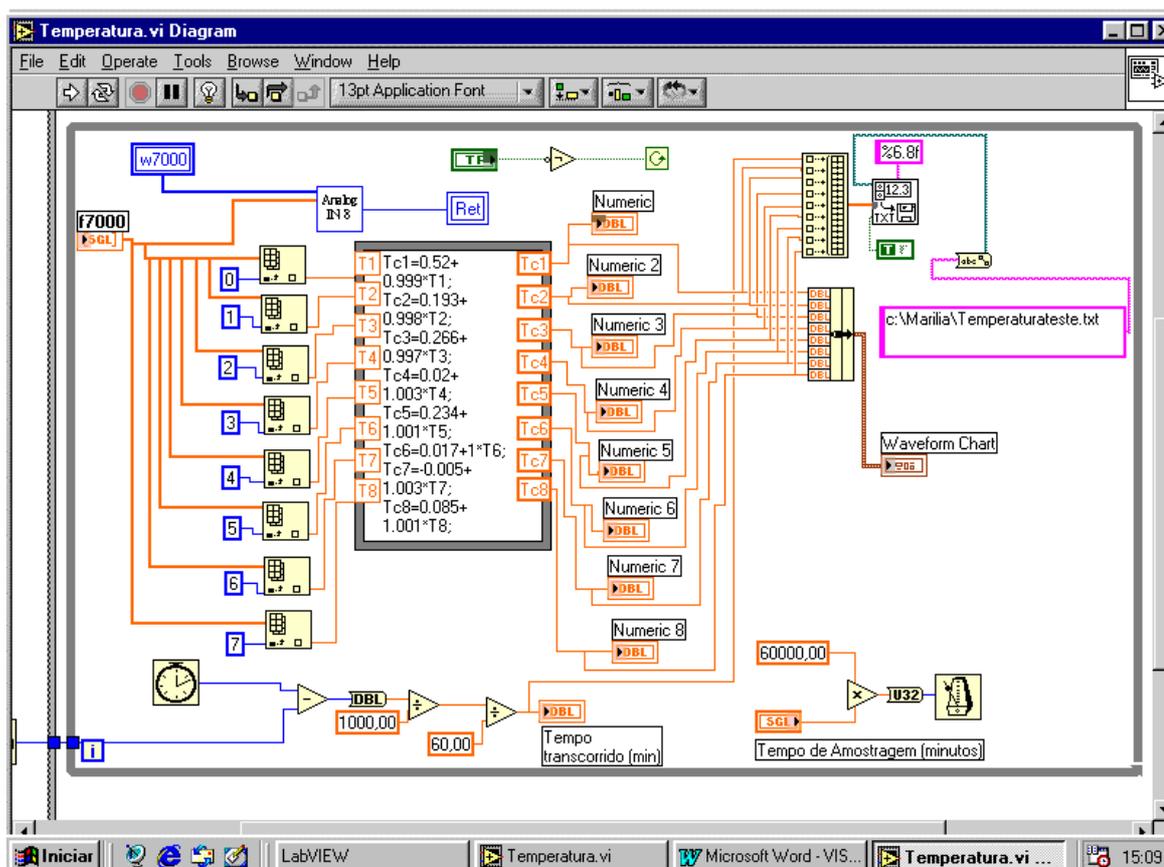


Figura A.3 – Tela de programação em linguagem G no software LabVIEW.

A programação em linguagem G está descrita a seguir, de forma sucinta:

1) Criam-se as saídas do sistema de aquisição de dados para cada termopar (canais de 0 a 7) dentro de retângulos azuis. Os valores da temperatura do ar para cada instante (T1 a T8 nos retângulos de cor laranja) são convertidos em temperatura corrigida pela equação de calibração dos termopares (Tc1 a Tc2) dentro do retângulo cinza. É informado para o programa que os valores de temperatura corrigida são do tipo numérico, que eles devem ser salvos no diretório especificado dentro do retângulo rosa e que um gráfico dos valores de temperatura corrigida deve ser construído, cuja especificação é *Waveform Chart*.

2) Cria-se um contador de tempo (ícone na forma de relógio) para que as medidas sejam realizadas e salvas ao longo do tempo. Como o software LabVIEW grava o tempo em mili segundos, foi necessário dividir por 60.000 para obter-se o tempo de amostragem em minutos.

A Figura A.4 mostra o gráfico com os valores de temperatura do ar (°C) em função do tempo (min) gerado no software LabVIEW, para um dia de secagem.

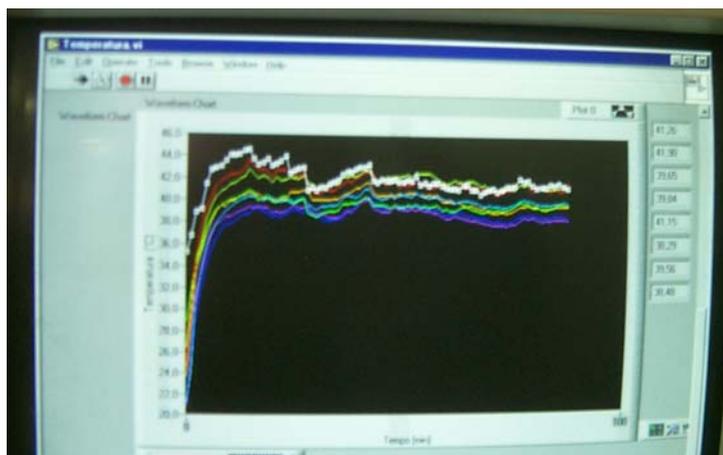


Figura A.4 – Gráfico de temperatura do ar de secagem em função do tempo gerado no *software* LabVIEW.

Na Figura A.4, cada curva de cor diferente representa a temperatura do ar de secagem para um termopar, em função do tempo.