

ADRIANO DIVINO LIMA AFONSO

GRADIENTE DE PRESSÃO ESTÁTICA EM CAMADAS DE FRUTOS DE CAFÉ  
(*Coffea arabica* L.) COM DIFERENTES TEORES DE UMIDADE

Tese Apresentada à Universidade  
Federal de Vicosa, como Parte das  
Exigências do Curso de Engenharia  
Agrícola, para Obtenção do Título de  
"Magister Scientiae".

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
JANEIRO - 1994

*A vocês, que acreditaram em mim,  
dedico este trabalho:  
meus pais, Jayme e Wanda, e  
meus irmãos.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jayme e Wanda, pelo exemplo de vida.

A Letícia Evelyn Oliva Godoy, pela paciência, compreensão e pelo carinho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela oportunidade de realizaresteste curso apelo suporte financeiro.

À professora Sandra Maria Couto Moreira, pela amizade e pela segura orientação.

Ao professor Juarez de Sousa e Silva, pela amizade, orientação e participação ativa e direta neste trabalho.

Ao professor José Antônio Marques Pereira, pelos conselhos.

Ao professor Laede Maffia de Oliveira, especialmente, pela orientação.

Ao professor Daniel Marçal de Queiroz, pelo incentivo, pela amizade, colaboração e boa vontade constante.

Ao professor Adílio Flauzino Lacerda Filho, pela amizade, pelo crédito e pela orientação profissional.

Ao funcionário do CENTREINAR, Francisco Carlos Alves Neto, pelo auxílio na construção do dispositivo de teste.

Aos funcionários do DEA, Lamantino Pinto de Miranda e Sebastião Jorge Rodrigues, pelo auxílio na condução do experimento.

Aos professores Mauri Martins Teixeira, Tetuo Hara, Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Dely Oliveira Filho, Paulo César Correa e Marco Antônio Oliva Cano, pela amizade e pelos conselhos.

Aos amigos e professores do Departamento de Engenharia Agrícola e a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

## BIOGRAFIA

ADRIANO DIVINO LIMA AFONSO, filho de Jayme Afonso Ribeiro e Wanda Lima Ribeiro, nasceu na cidade de Araxá, Estado de Minas Gerais, no dia 6 de junho de 1965.

Em janeiro de 1991, graduou-se em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa.

Em março de 1991, ingressou no Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

Em agosto de 1993, submeteu-se à defesa de tese, logrando aprovação.

## CONTEÚDO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS .....	viii
EXTRATO .....	x
1 . INTRODUÇÃO .....	1
2 . REVISÃO DE LITERATURA .....	5
2.1 Conceitos Básicos .....	5
2.2 Ventiladores .....	6
2.3 Fatores que Influenciam o Gradiente de Pressão .....	8
2.4 Modelos Usados para Expressar o Gradiente de Pressão Estática .....	11
2.4.1 Modelos Empíricos .....	11
2.4.2 Modelos Teóricos .....	16
3 . MATERIAL E MÉTODOS .....	23
3.1 Dispositivo de Teste .....	23
3.2 Realização dos Testes .....	25
3.3 Análise Estatística dos Dados .....	29
4 . RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31

4.1	Efeitos da Profundidade da Camada e da Densidade do Fluxo de Ar.....	33
4.2	Estimativa dos Parâmetros dos Modelos de Regressão.....	35
4.2.1	Teor de Umidade.....	37
4.2.2	Massa Especifica Global.....	42
4.3	Resistência do Café ao Fluxo de Ar Comparada com a de Outros Produtos.....	44
4.4	Estimativa dos Parâmetros do Modelo de SHEDD e do Modelo de HUKILL e IVES.....	46
5.	RESUMO E CONCLUSões. ....	48
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>51</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a, b, c, d, k, n$  - constantes que dependem do produto e do tratamento;
- $a_1, a_2$  - constantes que dependem da profundidade da camada de produto, m;
- $b_1$  - constante que depende do teor de umidade do produto, adimensional;
- $C_f$  - fator de atrito,  $C_f(Re)$ ;
- $c_1$  - constante que depende do fluxo de ar, adimensional;
- $d_p$  - diâmetro equivalente da partícula, m;
- $d_1$  - constante que depende da porosidade da massa de produto, adimensional;
- $D$  - diâmetro, mm;
- $g$  - fator de conversão,  $kg.kgf^{-1}.s^{-2}$ ;
- $h$  - profundidade da camada de produto, m;
- $H$  - altura da elevação do fluido, m de coluna de fluido;
- $I$  - fração de impurezas do produto, decimal;
- $P$  - pressão estática, Pa;
- $\Delta P$  - gradiente de pressão estática,  $Pa.m^{-1}$ ;
- Pot - potência, W;

- $Q$  - densidade do fluxo de ar,  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  
 $q$  - vazão do fluido,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  
 $Re$  - número de Reynolds, adimensional;  
 $a$  - área da seção transversal do tubo de transição,  $\text{m}^2$ ;  
 $S$  - área da seção transversal da coluna,  $\text{m}^2$ ;  
 $U$  - teor de umidade do produto, % b.u.;  
 $U_s$  - teor de umidade do produto, decimal (b.s.);  
 $v$  - velocidade média do perfil,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### *Símbolos Gregos:*

- $\mu$  - viscosidade do ar, Pa.s;  
 $\epsilon$  - porosidade da massa de produto, decimal;  
 $\rho$  - massa específica do ar,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  
 $\rho_{ap}$  - massa específica global do produto,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  
 $\rho_r$  - massa específica real do produto,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  
 $O$  - fator de forma da partícula, adimensional;  
 $\gamma$  - peso específico do fluido,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ .

## EXTRATO

AFONSO, Adriano Divino Lima, M.S., Universidade Federal de Vicosa, janeiro de 1994. Gradiente de Pressão Estática em Camadas de Frutos de Café (Coffea arabica L.) com Diferentes Teores de Umidade. Professora Orientadora: Sandra Maria Couto Moreira. Professores Conselheiros: Juarez de Sousa e Silva e Paulo César Correa.

Em virtude da carência de informações sobre o gradiente vertical de pressão estática em uma massa granular de café em coco, com diferentes teores de umidade, este trabalho objetivou estimar os parâmetros de um modelo que pudesse explicar o comportamento da pressão estática em função da densidade do fluxo de ar, do teor de umidade, da massa específica global e da profundidade da camada do produto.

Grãos de café em coco da variedade Catuaí, colhidos manualmente, com teor de umidade médio inicial de 1,89 b.s., foram submetidos à secagem em terreiro até que atingissem os teores de umidade desejados para o experimento. Para a realização do experimento, foi construído um dispositivo constituído basicamente de um ventilador centrífugo, uma

câmara plenum e uma coluna de teste, na qual o produto foi colocado de maneira que não ocorresse compactação.

Foram realizados testes com o café em coco que apresentava os seguintes teores de umidade: 0,14; 0,16; 0,20; 0,30; 0,45; 0,67; 0,91; 1,46 e 1,89 b.s.. Utilizaram-se valores de densidade do fluxo de ar compreendidos nos intervalos de 1 a 30  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Pelos coeficientes de determinação ajustados, concluiu-se que a variável teor de umidade do café em coco não teve influência significativa para o gradiente de pressão estática e que a densidade do fluxo de ar, em todos os testes, foi a variável que mais contribuiu para a variação da pressão estática em função da profundidade da camada de grãos. Observou-se, também, que, apesar da variável teor de umidade não contribuir para o ajuste do modelo, o café tímido lavado apresentou menor resistência ao fluxo de ar do que o café seco. Comparado aos outros produtos agrícolas, o café em coco ofereceu menor resistência à passagem do ar através de sua massa granular.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil, em 1960, era responsável por 70% do mercado cafeeiro mundial. Em 1989, apesar de continuar sendo o maior produtor e exportador mundial, sua participação foi de apenas 28% do café comercializado mundialmente, representando 5,18% do valor global da exportação brasileira (IBC, 1989). A menor participação do Brasil no mercado cafeeiro mundial deve-se, principalmente, à qualidade inferior do produto brasileiro e ao seu alto custo de produção.

O café, no Brasil, um dos poucos produtos agrícolas cujo preço é com base em parâmetros qualitativos, variando significativamente o valor com a sua qualidade, sendo que esta é afetada nas várias etapas do processamento, principalmente na secagem e no armazenamento.

O Brasil, basicamente, é conhecido como produtor de café "não-lavado" (via seca). Com esse procedimento, obtém-se o café de terreiro, que, dependendo de uma série de fatores, pode resultar em um produto de boa ou de má qualidade. Em virtude da necessidade de longo tempo para a secagem do café

em terreiros, além de grandes áreas e de condições climáticas adequadas, é preciso usar secadores mecânicos, para aumentar a capacidade de secagem e evitar a rápida deterioração do produto.

A utilização de secadores mecânicos apresenta diversas vantagens, em relação aos outros sistemas de secagem; porém, grandes esforços tecnológicos devem ser dispendidos para se obterem sistemas de secagem energeticamente mais eficientes e que forneçam um produto final de melhor qualidade, permitindo maior competitividade do café brasileiro no mercado internacional (PINTO, 1992). Estima-se que, na fase de secagem, o consumo de energia supere 50% do total de energia consumida em todo o processo produtivo.

O uso de tulhas para auxiliar a secagem do café ou tulhas para descanso, dotadas de ventilação, é uma maneira de melhorar a eficiência energética dos secadores (em cerca de 50%), além de melhorar a qualidade do café no final do processo de secagem (BÁRTHOLO et alii, 1989).

O principal objetivo da aeração é homogeneizar a temperatura da massa de grãos, evitando a migração da umidade e a conseqüente deterioração do produto. Esta técnica influencia diretamente a conservação da qualidade do produto durante o período de armazenamento.

Em ambos os sistemas, de secagem e aeração, o ar é forçado, por um ventilador, a fluir através do produto. O sucesso desses sistemas depende da uniformidade da distribuição do ar dentro da massa de grãos. No projeto adequado desses sistemas, o conhecimento da resistência do

produto à passagem do fluxo de ar, quantificada pelo gradiente de pressão estática, é um fator importante.

O gradiente de pressão estática está diretamente ligado à otimização do uso da energia nos sistemas de secagem e de aeração, pois a potência cedida ao ar pelo ventilador é diretamente proporcional ao gradiente de pressão estática oferecido pelo sistema.

A pressão estática disponível no ventilador é uma das especificações do secador. É utilizada na avaliação do desempenho de sistemas de secagem, pois está relacionada com o consumo de energia.

A resistência à passagem do fluxo de ar através dos produtos agrícolas granulares tem sido objeto de estudo desde o início do século, resultando em modelos matemáticos que explicam o gradiente de pressão estática em uma massa de grãos. Na maioria das investigações, foram estudadas as resistências ao fluxo de ar, na direção vertical, em produtos sem impurezas e para faixas limitadas de densidade do fluxo de ar.

A resistência à passagem de ar oferecida por uma massa de grãos de café em coco é pouco conhecida e tem influência direta sobre a eficiência energética dos sistemas de secagem e de aeração. Em função disto, este trabalho tem como objetivos:

- medir e modelar a variação da pressão estática em função da densidade do fluxo de ar, do teor de umidade, da massa específica global e da profundidade da camada de café em coco;

- estimar, para o café em coco, os coeficientes do modelos propostos por SHEDD (1953) e por HUKILL e IVES (1955), que expressam o gradiente de pressão estática em função da densidade de fluxo de ar.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. *Conceitos Básicos*

3 armazenamento seguro de produtos biológicos, por um longo período, requer condições de temperatura e umidade adequadas. A secagem é a técnica mais utilizada para atingir esse objetivo. Nessa técnica, normalmente é utilizado ar forçado através dos grãos e, dependendo da vazão e da temperatura desse ar, os sistemas de ventilação para produtos agrícolas se classificam em:

A - Secagem a alta temperatura: a densidade de fluxo do ar através dos grãos pode ser superior a  $60,0 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  e a temperatura do ar pode ser superior a  $10^\circ\text{C}$  acima da ambiental, dependendo do tempo de residência do produto com o ar de secagem;

B - Secagem com ar natural: as densidades do fluxo de ar variam de  $0,3$  a  $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  e o potencial de secagem do ar natural é usado para remover a umidade do grão;

C - Secagem a baixa temperatura: quando o ar ambiente é aquecido até  $10^{\circ}\text{C}$  acima de sua temperatura original, por uma fonte suplementar de energia, antes de atravessar a massa de grãos, sendo a densidade do fluxo do ar superior a  $60,0 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;

D - Aeração: baixas densidades do fluxo de ar ( $0,06$  a  $0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) e à temperatura ambiente. O objetivo principal é diminuir e manter homogênea a temperatura da massa de grãos armazenada.

E - Seca-aeração: combinação dos sistemas secagem a alta temperatura e aeração (com densidade do fluxo de ar variando de  $1,0$  a  $5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ), com os objetivos de reduzir o consumo de energia, aumentar a capacidade de secagem e reduzir substancialmente os danos causados pela exposição do produto, por maior tempo, a altas temperaturas.

## 2.2. Ventiladores

Nos sistemas aeração e secagem, em que se usa a ventilação forçada, há a necessidade de um ventilador que proporcione um gradiente energético para promover o movimento do ar pela massa do produto. Ventiladores são máquinas que, por meio de um rotor dotado de pás adequadas, acionado por um motor, permitem a transformação da energia mecânica do rotor nas formas de energia que o ar é capaz de assumir, ou seja, energia potencial de pressão e energia cinética. Com a energia adquirida, o ar flui através da camada de produto.

Os ventiladores são classificados, segundo sua forma construtiva, em:

A - Centrífgos, quando o ar entra paralelo ao eixo do ventilador e sai perpendicular a este;

B - Axiais, quando o ar entra e sai paralelamente ao eixo do ventilador.

A escolha do tipo de ventilador para as condições preestabelecidas depende de certas características, como número de rotações por minuto do rotor, diâmetro de saída do rotor, vazão de ar, altura de elevação, potência e rendimento.

A altura de elevação representa o desnível energético entre dois pontos e é expressa em altura de coluna de fluido, normalmente milímetros de coluna de água (mmCA).

A potência é a energia cedida para efetuar trabalho na unidade de tempo. A potência de um fluido é dada pela expressão:

$$\text{Pot} = \gamma \cdot q \cdot H \quad \text{eq. 1}$$

O ar, quando forçado a fluir por uma massa de grãos, encontra resistências que provocam um gradiente de pressão estática, que pode ser determinado por manômetros. A pressão estática do ar sofre um gradiente contínuo em razão do atrito do ar com os grãos e à turbulência. Por esse motivo, a pressão total fornecida ao ar tem de ser maior que o gradiente de pressão ocorrido no sistema.

A seleção apropriada de um ventilador depende, também, do volume de ar requerido e da diferença de pressão contra a qual é preciso operar para movimentar o ar através da massa de grãos. A pressão total aplicada ao ar indica a energia total recebida pelo ar, capacitando-o a escoar ao longo de tubulações ou dutos e a vencer as resistências oferecidas

pelas chapas perfuradas e pela camada do produto. Dessa maneira, pode-se dividir a pressão total em duas parcelas:

$$P_{\text{Total}} = P_{\text{Estática}} + P_{\text{Dinâmica}} \quad \text{eq. 2}$$

Os ventiladores usados no processamento dos produtos agrícolas são, no máximo, de baixa pressão (até  $0,08 \text{ kgf.cm}^{-2}$  ou  $800 \text{ mmCA}$ ).

### 2.3. Fatores que Influenciam o Gradiente de Pressão

Segundo BROOKER et alii (1974) e JAYAS (1987), a resistência oferecida pelo produto à passagem do fluxo de ar, em dada localização no silo, é afetada pelas seguintes variáveis: teor de umidade do produto, aspectos físicos da variedade, quantidade e tamanho das impurezas presentes na massa, método utilizado para o enchimento do silo (compactação dos grãos), direção do fluxo de ar, distribuição das impurezas e profundidade da camada do produto.

A porosidade da massa de grãos (percentual de espaço vazio em uma massa de grãos) é um fator importante no projeto de equipamentos de aeração e de secagem, estando associada à resistência ao escoamento de ar através da massa do produto. De acordo com THOMPSON e ISAACS (1967), com a informação sobre a porosidade, o projetista poderá calcular o número de trocas de ar que serão efetuadas em um lote de grãos por unidade de tempo.

De acordo com CASTRO (1991), a massa específica aparente do café diminui com a redução de seu teor de umidade. Essa redução da massa específica poderá alterar a rugosidade,

a forma, o tamanho dos grãos, a porosidade da massa de café e, também, o gradiente de pressão estática.

CHANG et alii (1981) observaram aumento na massa específica aparente de 5 a 9% para o trigo, de 6 a 10% para o milho e de 11 a 12,5% para o sorgo quando espalhadores de grãos foram utilizados no silo. Esse inareamento na massa específica aparente aumentou a resistência à passagem do fluxo de ar em, aproximadamente, 55 a 67% para o trigo e mais que o dobro para o milho. De acordo com JAYAS et alii (1987b), quando um espalhador de grãos é utilizado no carregamento de um silo, partículas com formas semelhantes a um paralelepípedo, como o milho, têm tendência a permanecer em posição de repouso sobre a superfície. Dessa forma, há decréscimo na área aberta dos poros intergranulares, perpendicular ao fluxo de ar, aumentando, assim, o gradiente de pressão estática através da camada.

Em suas investigações com canola, JAYAS (1987) observou redução no gradiente de pressão estática com o aumento do teor de umidade do produto. Isso foi explicado pela redução da massa específica e pelo aumento do índice de porosidade com o aumento do teor de umidade do produto. Esse autor afirma, ainda, que o gradiente de pressão estática não foi afetado significativamente por uma variação de 1,5°C na temperatura e de 10% na umidade relativa do ar.

YANG et alii (1990), determinando o gradiente de pressão estática através de camadas de impurezas do milho, concluíram que a massa específica do produto tem efeito significativo sobre a resistência ao fluxo de ar.

Em seu experimento, GRAMA et alii (1984) concluíram que a resistência à passagem do fluxo de ar aumenta quando impurezas são adicionadas ao produto e que a resistência varia inversamente com o tamanho das impurezas.

Segundo JAYAS e MUIR (1991), a resistência à passagem do fluxo de ar, na maioria dos produtos agrícolas, tem sido pesquisada considerando a direção vertical do fluxo de ar. Afirmam, ainda, que os modelos matemáticos desenvolvidos para explicar o gradiente de pressão estática em silos com grãos baseiam-se na isotropia do sistema (a resistência à passagem do fluxo de ar é constante em todas as direções). Contudo, dados experimentais têm mostrado um comportamento anisotrópico, isto é, a resistência oferecida pelo produto ao fluxo de ar varia com a sua direção.

SOKHANSANJ et alii (1990) determinaram o efeito do teor de umidade, da variedade de sementes de lentilha, da metodologia de enchimento da coluna e da direção do fluxo de ar através de uma camada do produto sobre o gradiente de pressão estática. Observaram que o aumento de um ponto percentual de umidade na lentilha resultou em decréscimo de 2/40 na resistência  $h$  passagem do ar, e que a resistência ao fluxo de ar na direção horizontal foi, aproximadamente, a metade da resistência na direção vertical.

JAYAS et alii (1987a) estudaram a resistência oferecida pela canola  $h$  passagem do fluxo de ar nas direções vertical e horizontal. A resistência horizontal foi de 50 a 70% inferior  $h$  resistência vertical. Resultados semelhantes foram obtidos por KUMAR e MUIR (1985), quando concluíram que a resistência ao fluxo de ar na direção horizontal foi de 63 e 47% inferior

à resistência do ar na direção vertical para o trigo e a cevada, respectivamente.

LAMOND e SMITH (1982) observaram que sementes de cevada, quando lançadas de uma certa altura, tenderam a se posicionar com o seu maior eixo na horizontal. Concluíram que as diferentes porosidades e configurações de caminhos intergranulares são, provavelmente, responsáveis pelas diferentes resistências (horizontal e vertical). A forma não simétrica da maioria dos produtos agrícolas, como o milho, segundo KAY et alii (1989), sugere que deve haver diferentes resistências ao fluxo de ar nas direções horizontal e vertical.

Greenkorn, citado por KAY et alii (1989), em sua discussão sobre fluxo de ar através dos poros intergranulares, menciona a importância de quatro parâmetros para relacionar gradiente de pressão estática e velocidade superficial do ar em um meio anisotrópico. Os parâmetros são porosidade, permeabilidade, tortuosidade e conectividade do meio. Se esses parâmetros forem diferentes em cada direção, então haverá diferentes resistências à passagem do fluxo de ar.

## ***2.4. Modelos Usados para Expressar o Gradiente de Pressão Estática***

### ***2.4.1. Modelos Empíricos***

O gradiente de pressão estática de uma camada de grãos ou sementes, quando atravessada por um fluxo de ar, é comumente estimado por meio de curvas empíricas, relacionando fluxo de ar e pressão estática (GRAMA et alii, 1984).

HENDERSON (1943), em seu trabalho relacionado com o gradiente de pressão estática em uma camada de milho, apresentou a seguinte equação para descrever a resistência à passagem do fluxo de ar:

$$Q = a_1 \cdot P^{a_2} \quad \text{eq. 3}$$

em que os valores de  $a_1$  e  $a_2$  dependem da profundidade da camada de grãos.

SHEDD (1951 e 1953) estudou o gradiente de pressão estática provocado pela passagem de ar através de diversos produtos agrícolas e apresentou, graficamente, os dados de pressão estática versus fluxo de ar em uma escala log-log para vários grãos. Essas curvas são conhecidas como "Curvas de Shedd" e são largamente utilizadas por projetistas para estimar a variação da pressão estática através de uma massa de grãos, quando atravessada por um fluxo de ar, como ocorre nos processos de aeração e secagem. Se as curvas apresentadas fossem retas, a relação entre pressão estática e fluxo de ar poderia ser expressa por equações da forma:

$$Q = a \cdot \frac{P^b}{h} \quad \text{eq. 4}$$

Em virtude da convexidade das "Curvas de Shedd", a Equação (4) tal como descrita, pode adaptar a curva para somente um intervalo limitado de fluxo de ar e, se usada para calcular pressões estáticas acima ou abaixo do intervalo, pode conduzir a resultados com erros consideráveis (SHEDD, 1953).

HUKILL e IVES (1955) e HUKILL e SHEDD (1955), ao estimarem a não-linearidade das "Curvas de Shedd", sugeriram a seguinte equação para expressar a pressão estática e o fluxo de ar de diversos produtos agrícolas:

$$\frac{P}{h} = \frac{a \cdot Q^2}{\ln(1 + b \cdot Q)} \quad \text{eq. 5}$$

Essa equação ajusta-se bem aos dados determinados por SHEDD (1953), mas apresenta o inconveniente de o fluxo de ar não poder ser expresso explicitamente como uma função do gradiente de pressão (JAYAS, 1987).

BROOKER (1969) sugere o uso de vários segmentos de linha retas, com diferentes constantes a e b da Equação (4), para cada segmento, com a finalidade de minimizar os erros em decorrência da convexidade das curvas.

HUNTER (1983) sugeriu um modelo quadrático para descrever a relação entre pressão estática e fluxo de ar.

$$\frac{P}{h} = c \cdot Q + d \cdot Q^2 \quad \text{eq. 6}$$

A principal razão para a utilização da Equação (6) é a simplicidade, comparada com a Equação (5), quando aplicada ao estudo de distribuição não-uniforme do fluxo de ar em silos.

HUNTER (1983) comenta, ainda, que as relações seguintes podem ser usadas para converter as constantes a e b da Equação (5) nas constantes c e d da Equação (6), para aplicação em modelos matemáticos.

$$c = 1,12 \cdot \frac{a}{b} \quad \text{eq. 7}$$

$$d = 0,346 \cdot b \quad \text{eq. 8}$$

HAQUE et alii (1982), trabalhando com grãos de trigo, milho e sorgo, após plotarem os dados de gradiente de pressão estática versus os dados de teores de umidade, para determinadas densidades do fluxo de ar, observaram uma relação linear entre o gradiente de pressão estática e o teor de umidade. Concluíram que a equação envolvia um termo de ordem linear para o teor de umidade e um de ordem quadrática para a densidade de fluxo de ar. Obtiveram, então, a seguinte expressão:

$$\frac{P}{h} = a \cdot Q + b \cdot Q^2 + c \cdot Q \cdot U \quad \text{eq. 9}$$

Esse modelo apresentou coeficientes de correlação quadrática acima de 0,99 para os três produtos.

A Equação (9), basicamente, é semelhante à Equação de Ergun, e pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{P}{h} = b_1 \cdot Q + b \cdot Q^2 \quad \text{eq. 10}$$

em que a constante  $b_1$  é função do teor de umidade na forma:

$$b_1 = a + c \cdot U \quad \text{eq. 11}$$

O gradiente de pressão estática através de uma camada de milho misturado com diferentes frações de impurezas foi

estudado por HAQUE et alii (1978). Eles modificaram a Equação (5), acrescentando à expressão um termo de ordem linear para a fração de impurezas e obtiveram a seguinte equação:

$$\frac{P}{h} = \frac{a \cdot Q^2}{\ln(1 + b \cdot Q)} \cdot (1 + c_1 \cdot I) \quad \text{eq. 12}$$

em que o valor de  $c_1$  é uma constante para um determinado valor do fluxo de ar.

HAQUE et alii (1978) propuseram, também, uma equação simplificada relacionando gradiente de pressão estática, fluxo de ar e fração de impurezas, na seguinte forma:

$$\frac{P}{h} = a \cdot Q + b \cdot Q^2 + c \cdot Q \cdot I \quad \text{eq. 13}$$

As Equações (12) e (13), segundo os autores, são úteis para se estimar o fluxo de ar não-uniforme em silo de grãos com distribuição também não-uniforme de impurezas.

Os modelos empíricos são adequados a projetos de sistemas de aeração e secagem em camadas profundas, mas não são precisos, pois não se entende a importância de todas as variáveis que afetam o gradiente de pressão estática. Os modelos não contêm termos como porosidade da camada, viscosidade e massa específica do ar e todas as variáveis que afetam consideravelmente o gradiente de pressão total em uma camada profunda. Contudo, inúmeras expressões semiteóricas e teóricas, contendo determinados coeficientes, têm sido apresentadas com o objetivo de explicar o comportamento do gradiente de pressão estática.

### 2.4.2. Modelos Teóricos

Com objetivos de enriquecer este trabalho e colaborar para futuros experimentos, apresenta-se, a seguir, uma ampla revisão bibliográfica dos modelos teóricos utilizados para expressar o gradiente de pressão estática em uma camada profunda de grãos.

A Equação de Ramsin, de acordo com MATTHIES e PETERSEN (1974), pode ser considerada o ponto inicial de toda a investigação teórica do cálculo da resistência da passagem do ar em material granular estocado. Ramsin sugeriu a seguinte equação :

$$P = d_1 \cdot h \cdot Q^{2-n} \quad \text{eq. 14}$$

em que  $d_1$  é uma constante que depende da porosidade da massa de um determinado produto, dada pela expressão:

$$d_1 = a \cdot \frac{1}{E^4} \quad \text{eq. 15}$$

Para avaliar a constante  $d_1$ , deve-se utilizar o valor mínimo da porosidade porque, procedendo assim, maior gradiente de pressão estática será calculado. A Equação (14), portanto, segundo MATTHIES e PETERSEN (1974), é especialmente segura para estimar a resistência do produto à passagem do ar porque indica o limite superior de resistência.

Em estudo sobre escoamento de um fluido através de camadas fixas de sólidos granulares, ERGUN (1952) confirmou esta observação feita por Reynolds em 1900: a perda da energia total de uma camada compactada necessita ser tratada como a

soma das perdas da energia viscosa e da cinética. Esse autor observou que os valores de densidades de fluxos de ar em camadas fixas de materiais biológicos estavam localizados principalmente na zona de transição entre o fluxo turbulento e o fluxo laminar. A resistência total na camada do produto foi, então, tratada como a soma das resistências separadas (fluxos laminar e turbulento). Quando as equações de gradiente de pressão para fluxo laminar (Equação de Blake-Kozeny) e para o fluxo turbulento (Equação de Burke-Plummer) são somadas, o resultado é a Equação de Ergun:

$$P = 150 \cdot \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot m \cdot \frac{h}{d_p^2} \cdot \frac{Q}{g} + 1,75 \cdot \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \cdot r \cdot \frac{h}{d_p} \cdot \frac{Q^2}{g} \quad \text{eq. 16}$$

PATTERSON et alii (1971), apesar de considerarem a Equação de Ergun simples para ser utilizada, uma vez que os diferentes parâmetros são conhecidos, modificaram-na visto que era difícil determinar o valor da porosidade da camada de grãos. Acrescentaram à Equação (16) uma relação entre a porosidade e a massa específica dos grãos e obtiveram a seguinte expressão:

$$\frac{P}{h} = a \cdot (M \cdot Q + N \cdot Q^2) \quad \text{eq. 17}$$

em que os valores de M e N são dados por:

$$M = 150 \cdot \frac{(1 - \epsilon / \rho_{ap})^2}{(\epsilon / \rho_{ap})^3} \cdot \frac{\mu}{(d_p^2 \cdot g)} \quad \text{eq. 18}$$

$$N = 1,75 \cdot \frac{(1 - e / \rho_{ap})^2}{(e / \rho_{ap})^3} \cdot \frac{\rho}{(d_p \cdot g)} \quad \text{eq. 19}$$

$$e = E \cdot \rho_{ap} \quad \text{eq. 20}$$

BERN e CHARITY (1975) estudaram o efeito da massa específica aparente de grãos de milho sobre a resistência à passagem do fluxodear. O aumento da massa específica resultou no aumento da resistência. Os autores sugeriram a seguinte versão para a Equação de Ergun:

$$\frac{P}{h} = a + b \cdot \frac{(\rho_{ap} / \rho_r)^2}{[1 - (\rho_{ap} / \rho_r)]^3} \cdot Q + c \cdot \frac{(\rho_{ap} / \rho_r)}{[1 - (\rho_{ap} / \rho_r)]^3} \cdot Q^2 \quad \text{eq. 21}$$

Esse modelo é adotado pela ASAE Technical Data D272 (ASAE, 1987) para descrever a relação entre gradiente de pressão estática, densidade do fluxo de ar e massa específica aparente do milho.

KAY et alii (1989) utilizaram a Equação (21) para calcular a resistência oferecida pelo milho ao fluxo de ar nas direções horizontal e vertical. Concluíram que a resistência horizontal variou de 45 a 58% em relação a resistência vertical  $h$  passagem do fluxo de ar, para densidade de fluxo de ar abaixo de  $6 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$  e acima deste valor, respectivamente.

Matthies, citado por BARKER-ARREMA et alii (1969), publicou um significativo estudo sobre o gradiente de pressão

estática através de uma camada compactada de produtos agrícolas e propõe a seguinte equação:

$$\frac{P}{h} = k \cdot C_f \cdot \frac{1}{\varepsilon^4} \cdot \frac{h}{d_p} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot Q^2 \quad \text{eq. 22}$$

A constante  $k$  depende da forma, tamanho da partícula e da característica superficial do produto. A utilização da Equação (22) é complicada por causa do fator de atrito, além de basear-se no conhecimento do gradiente de pressão através de uma camada de esferas.

Leva, citado por BAKKER-ARKEMA et alii (1969), desenvolveu uma relação para fluxos de ar laminar e turbulento através de uma camada compactada de partículas esféricas e não-esféricas. A equação foi baseada na Lei de Hagen-Poiseville para fluxo laminar isotérmico e na análise do fator de atrito modificado para fluxo turbulento. A equação é a seguinte:

$$P = C_f \cdot \frac{2}{\phi^{3-n}} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^{3-n}}{\varepsilon^3} \cdot \frac{h}{d_p} \cdot \frac{Q^2}{g} \quad \text{eq. 23}$$

A Equação (23), para gradiente de pressão estática de uma camada fixa, tem a mesma desvantagem prática da Equação (22), pois requer o conhecimento do fator forma da partícula.

YANG e WILLIAMS (1990) desenvolveram uma equação de gradiente de pressão como uma função da densidade de fluxo de ar e da massa específica do produto. O ar que atravessa a camada de grãos, foi considerado como se estivesse fluindo de um grupo de tubos paralelos cilíndricos e de tamanhos iguais, tal que a superfície interna total e o volume interno

livre dos tubos fossem iguais à superfície total da partícula e à porosidade, respectivamente. Obtiveram a seguinte expressão:

$$\frac{P}{h} = 3 \cdot \frac{C_p}{d_p} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \rho \cdot Q^2 \quad \text{eq. 24}$$

em que o valor de  $C_p$  é dado por:

$$C_p = a \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{(Re + b)} \quad \text{eq. 25}$$

Após a determinação dos valores das constantes  $a$  e  $b$  e a substituição da Equação (25) e da Equação de Reynolds na Equação (24), obtém-se uma equação similar à apresentada por ERGUN (1952):

$$\frac{P}{h} = a \cdot \frac{\mu}{d_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot Q + b \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{(d_p \cdot \varepsilon^3)} \cdot \rho \cdot Q^2 \quad \text{eq. 26}$$

A Equação (26) requer valores precisos do diâmetro equivalente do grão, da porosidade (por meio das massas específicas aparente e real) e da temperatura do ar que flui através do produto.

Segundo YANG e WILLIAMS (1990), se a temperatura, a pressão e o tamanho da partícula forem praticamente constantes, todos os termos da Equação (26), com exceção da porosidade e da densidade do fluxo de ar, podem ser agrupados com os coeficientes constantes  $a$  e  $b$ , fornecendo a seguinte equação:

$$\frac{P}{h} = a + b \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot Q + c \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot Q^2 \quad \text{eq. 27}$$

YANG et alii (1990), ao estudarem o gradiente de pressão estática em camadas de impurezas inferiores a 6,4 mm, removidas do milho, utilizaram a Equação (27). Observaram que as impurezas de menor tamanho foram responsáveis pelos maiores gradientes, e que a massa específica aparente das impurezas teve um efeito significativo sobre a resistência à passagem do fluxo de ar.

BAKKER-ARREMA et alii (1969), quando utilizaram a Equação (16) para calcular a resistência à passagem do fluxo de ar em diferentes camadas de cerejas, observaram que os valores da equação e os experimentais não coincidiam. Contudo, uma razão constante existia entre eles, sugerindo a seguinte modificação na equação:

$$P = k \cdot \left[ 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot m \cdot \frac{h}{d_p} \cdot \frac{Q}{g} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot r \cdot \frac{h}{d_p} \cdot \frac{Q^2}{g} \right] \quad \text{eq. 28}$$

em que  $k$  é uma constante específica para o produto.

Os dados experimentais e as equações que os representam têm sido, tradicionalmente, utilizados no dimensionamento de ventiladores necessários para sistemas de secagem a baixa temperatura e para aeração de produtos biológicos estocados. Uma outra utilidade das equações tem sido o desenvolvimento de modelos matemáticos, que explicam a distribuição de pressões e fluxos de ar não-uniforme em silos. Alguns modelos matemáticos desenvolvidos (BROOKER, 1961; JINDAL e THOMPSON,

1972; MARCHANT, 1976; SPENCER? 1969) explicam a distribuição da pressão estática em silo como meio isotrópico. Outros (LAI, 1980; JAYAS e MUIR, 1991), entretanto, apresentaram modelos matemáticos para explicarem a distribuição de pressão estática e fluxo de ar em silo como meio anisotrópico.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Setor de Armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais.

O produto utilizado no experimento foi o café (*Coffea arabica* L. ), em coco, da variedade Catuaí, procedente da Fazenda Santo Antônio, situada no município de Araponga, Minas Gerais. Foi realizada uma lavagem para eliminar os grãos de café chochos, as cascas e as folhas do lote de café.

Para a obtenção do produto com diferentes teores de umidade, secou-se o café em terreiro de cimento.

#### 3.1. Dispositivo de Teste

Construiu-se um dispositivo para a obtenção dos dados experimentais. Um esquema do dispositivo de teste é mostrado nas Figuras 1 e 2, sendo composto, basicamente, das seguintes partes:

(a) Coluna (no 1 - Figura 1) - construída em chapa galvanizada, com seção circular transversal de  $0,0731 \text{ m}^2$  ( $D = 305 \text{ mm}$ ). Para que o efeito do contato entre o grão e a parede do depósito pudesse ser ignorado, o diâmetro da coluna foi projetado de tal forma que fosse no mínimo 16 vezes maior que o diâmetro do produto (Bern et alii citado por YANG e WILLIAMS, 1990). A coluna, câmara de repouso para o produto, tem capacidade estática de  $0,142 \text{ m}^3$ . Um fluxo constante de ar, em sentido ascendente, atravessa verticalmente a camada do produto;

(b) Tomadas de pressão estática (nº 2 - Figura 1) - um total de 16 tubos de cobre ( $D = 5,0 \text{ mm}$ ), espaçados verticalmente em  $100 \text{ mm}$ , foram colocados radialmente em torno da coluna;

(c) Piso perfurado (nº 3 - Figura 1) - uma chapa de aço perfurada, com furos circulares ( $D = 5,0 \text{ mm}$ ), fixa no fundo da coluna;

(d) Câmara plenum (nº 4 - Figura 1) - para reduzir a perda da pressão do fluxo de ar e transformar parte da pressão dinâmica do ar em pressão estática. Assim, o ar vence a resistência imposta pelo produto à sua passagem na coluna;

(e) Tubo de transição (nº 5 - Figura 1) - tubo de PVC ( $D = 98,0 \text{ mm}$ ) responsável pela condução do ar insuflado pelo ventilador até a câmara plenum. Neste tubo, está localizado o homogeneizador de fluxo de ar e os orifícios por onde se obtém o perfil de velocidade do ar.

(f) Homogeneizador do fluxo de ar (nº 6 - Figura 1) - estabelece um perfil de fluxo de ar constante no interior do

tubo de transição. Foi construído e posicionado de acordo com a **NAFM** (1952);

(g) Ventilador (nº 7 - Figura 1) - tipo centrífugo de pás retas, acionado por um motor de 0,75 cv a 3.460 rpm, que sugçiona o ar ambiente e promove a sua insuflação na coluna;

(h) Diafragma (no 8 - Figura 1) - fixo ao distribuidor de entrada de ar do ventilador, possibilita a variação da vazão de ar que atravessara a camada de produto na coluna.

Entre a câmara plenum e a coluna foi colocada uma borracha macia, com o objetivo de evitar a perda de ar do interior do dispositivo para o ambiente externo. A coluna é rigidamente fixa à câmara plenum por meio de parafusos.

### *3.2. Realização dos Testes*

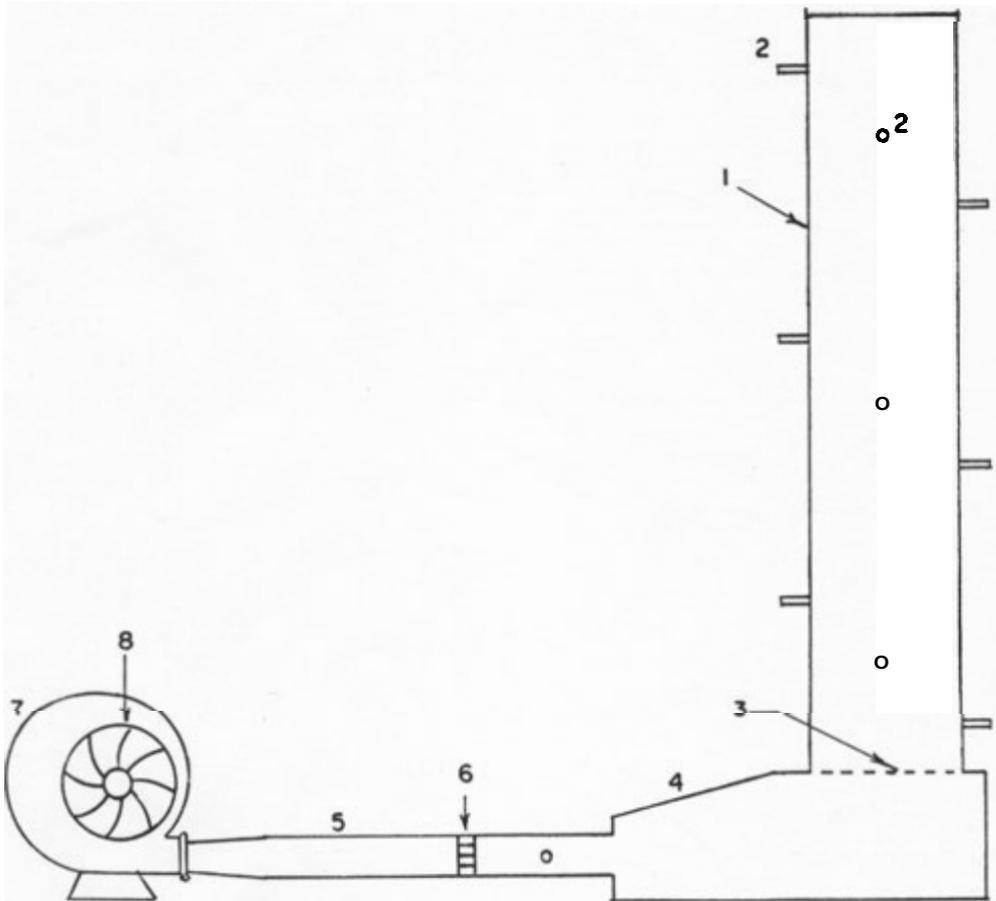
A quantidade total de café para a realização dos testes era, aproximadamente, o dobro da capacidade estática da coluna.

As amostras para a determinação do teor de umidade e da massa específica aparente do produto foram coletadas no lote de café, de forma aleatória, antes da realização de cada teste.

As massas específicas do produto foram determinadas utilizando-se uma balança de peso hectolítrico, de volume de 1000 cm<sup>3</sup>, com seis repetições.

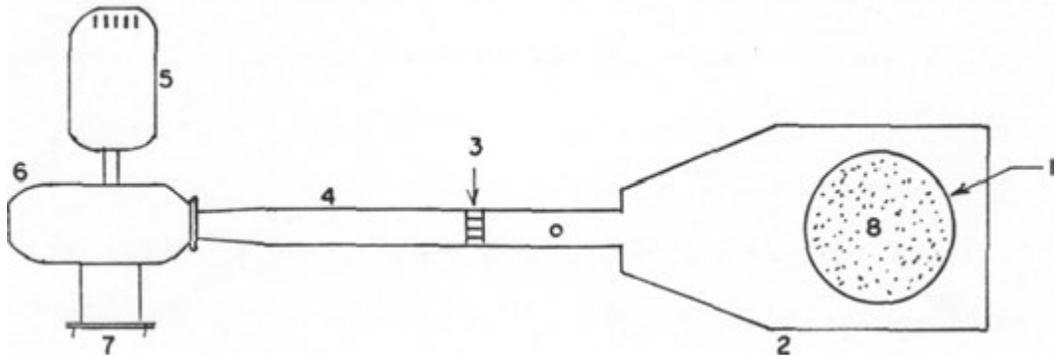
Os teores de umidade do produto foram obtidos pelo método da estufa, com circulação de ar natural, 103 ± 1°C por 12 horas, com quatro repetições.

As condições do ar ambiente próximo do diafragma do ventilador foram determinadas com o auxílio de um psicrômetro.



- |                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| 1 - coluna                      | 5 - Tubo de Transição |
| 2 - Tomadas de Pressão Estática | 6 - Homogeneizador    |
| 3 - Piso Perfurado              | 7 - ventilador        |
| 4 - Câmara Plenum               | 8 - Diafragma         |

**FIGURA 1 - Esquema do Dispositivo Utilizado para Determinar o Gradiente de Pressão Estática Através de Camadas de Cafe.**



- |                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| 1 - Coluna            | 5 - Motor          |
| 2 - Câmara Plenum     | 6 - Ventilador     |
| 3 - Homogeneizador    | 7 - Diafragma      |
| 4 - Tubo de Transição | 8 - Piso Perfurado |

**FIGURA 2** - Vista Superior do Dispositivo de Teste.

Para a caracterização do lote de café, amostras foram retiradas quando este apresentava elevado teor de umidade. Três amostras de aproximadamente 1000g cada uma foram inspecionadas visualmente e classificadas em três categorias: café em oooo; café despulpado; e impurezas (casca e pergaminho). Três outras amostras de aproximadamente 500g foram obtidas para caracterizar o tamanho dos grãos de café. Para isso, utilizou-se uma única peneira de furos circulares, com diâmetros de 9,52 mm, separando o produto em duas categorias: produto que ficou retido na peneira e produto que passou pela peneira.

Foi determinada a curva característica do ventilador, pressão estática versus vazão de ar, de acordo com a metodologia proposta pela NAFM (1952). Utilizou-se, para o levantamento do perfil de pressão dinâmica, um Tubo de Pitot apropriado.

Para cada teste, o lote de café foi homogeneizado e, à temperatura ambiente, colocado dentro da coluna, utilizando a metodologia proposta por SHEDD (1951) e usada por CALDERWOOD (1973), HAQUE et alii (1982) e JAYAS (1987).

A leitura da pressão estática, em cada ponto de tomada de pressão, foi feita por meio de dois micromanômetros diferenciais de tubos inclinados. Somente a tomada de pressão que estava sendo lida naquele momento permanecia aberta, as restantes eram fechadas.

Para o levantamento do perfil de velocidade do ar no interior do tubo de transição, foi utilizado um anemômetro de fio quente com precisão de  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ . Através da velocidade média do perfil, foram obtidos os valores de vazão e de densidade do fluxo de ar na coluna, utilizando as Equações (29) e (30), respectivamente.

$$q = V \cdot s \quad \text{eq. 29}$$

$$Q = \frac{q}{s} \quad \text{eq. 30}$$

Após cada teste, o produto retornava ao terreiro, com o objetivo de reduzir o teor de umidade. Dessa forma, nove testes foram realizados antes que o produto atingisse o teor de umidade de equilíbrio com as condições atmosféricas do local.

Foram realizados testes com valores de densidade do fluxo de ar próximos de 5, 10, 15, 20, 25 e 30  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Quando o produto apresentou um teor de umidade inferior ao ponto de meia-seca (0,45 b.s.), realizou-se, também, leituras de pressão estática para valores de densidades do fluxo de ar próximos de 1 e 3  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Esses valores foram obtidos com a variação da abertura do diafragma.

### 3.3. Análise Estatística dos Dados

Para a análise de regressão, os testes foram classificados em dois grupos: (1) testes com o café em coco com teor de umidade acima do ponto de meia-seca (com seis valores de densidades de fluxo de ar); (2) testes com o café em coco com teor de umidade abaixo do ponto de meia-seca (com oito valores de densidades do fluxo de ar).

Foi realizada, também, análise de regressão global envolvendo todos os testes e excluindo aqueles com o café em coco quando esse apresentava com teor de umidade abaixo do ponto de meia-seca, nos quais foram utilizados valores de densidades do fluxo de ar inferiores a 5  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Por meio da análise de regressão não-linear, determinou-se o melhor modelo estimado que descrevesse os dados de gradiente de pressão estática, em função da densidade do fluxo de ar, do teor de umidade do café, da massa específica aparente e da profundidade da camada do produto. Os modelos estatísticos testados para descrever os dados experimentais foram:

$$\hat{P}_j = b_0 (\hat{Q}_{1j})^{b_1} (\hat{U}_{s2j})^{b_2} (\hat{\rho}_{ap3j})^{-b_3} (\hat{h}_{4j})^{b_4} + u_j \quad \text{mod. A}$$

$$\Delta \hat{P} = b_0 (\hat{Q}_{1j})^{b_1} (\hat{U}_{s2j})^{b_2} (\hat{\rho}_{ap3j})^{-b_3} + u_j \quad \text{mod. B}$$

em que  $u_j$  é erro aleatório, pressupostamente normal e independentemente distribuído, com média zero e variância  $\sigma^2$ .

O grau de ajuste dos modelos estimados aos dados experimentais foi avaliado pela magnitude dos coeficientes de determinação ajustados.

Os parâmetros estimados e os coeficientes de determinação ajustados para o Modelo (B) são apresentados no Apêndice C.

Foram estimados os parâmetros a e b para o café em coco dos modelos propostos por SHEDD (1953) e por HUKILL e IVES (1955).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios do teor de umidade (b.s.) e da massa específica global do café em coco ( $\text{kg.m}^{-3}$ ), obtidos durante a realização dos testes, são apresentados no Quadro 1.

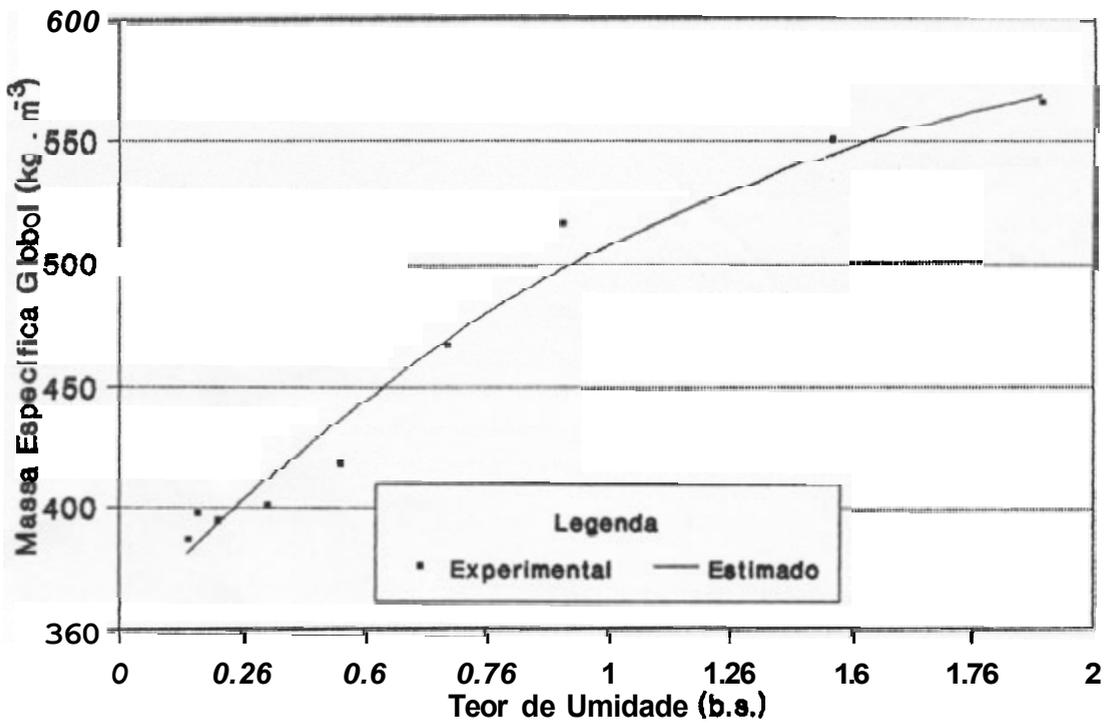
A equação obtida por meio da análise de regressão, que melhor se ajustou aos dados dos teores de umidade e das massas específicas (tendo um coeficiente de determinação ajustado,  $R^2$ , de 0,97), foi:

$$\rho_{ap} = 354,6 + 204 * U_s - 47,9 * U_s^2 \quad \text{eq. 31}$$

Na Figura 3 são mostrados os pontos experimentais e a curva estimada pela Equação (31). Verifica-se que, com o aumento do teor de umidade do café em coco, há acréscimo da sua massa específica global, o que está de acordo com CASTRO (1991). Observa-se, ainda, que, durante a secagem do café em coco abaixo do seu ponto de meia-seca (0,45 b.s.), a variação da sua massa específica global foi pequena comparada à secagem acima do ponto de meia seca.

**QUADRO 1 - Valores Médios de Teor de Umidade e Massa Específica Global Obtidos Durante os Testes com o Cafe em Coco**

Teste (Nº)	Teor de Umidade (b.s.)	Massa Esp. Global ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
1	1,89	566,7
2	1,46	550,5
3	0,91	516,9
4	0,67	466,9
5	0,45	418,1
6	0,30	400,8
7	0,20	394,7
8	0,16	391,6
9	0,14	387,6



**FIGURA 3 - Variação da Massa Específica Global do Cafe em Coco em Função do Teor de Umidade.**

A curva característica do ventilador centrífugo utilizado nos testes é encontrada na Figura 1B, do Apêndice B.

Os dados da temperatura e umidade relativa do ar ambiente, próximo da entrada de ar do ventilador, são apresentados no Apêndice B, nos Quadros 1B e 2B. Em cada teste, as variações da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente foram inferiores a  $1,5^{\circ}\text{C}$  e a 10%, respectivamente. Por essa razão, não houve necessidade de correções nos valores do volume específico do ar, para o cálculo da densidade do fluxo de ar (JAYAS, 1987).

O café em coco apresentou, em média, 1,4% de impurezas e 2,9% de grãos despolidos. O diâmetro médio dos grãos de café em coco foi 81,4% superior a 9,52  $\mu\text{m}$ . Os dados que caracterizam o café em coco são apresentados nos Quadros 5B e 6B, do Apêndice B.

#### *4.7. Efeitos da Profundidade da Camada e da Densidade do Fluxo de Ar*

Os efeitos da profundidade da camada de café em coco e da densidade do fluxo de ar sobre a pressão estática, para o teste realizado com o produto a um teor de umidade de 0,45 b.s., são ilustrados na Figura 4.

Observou-se em todos os testes realizados o mesmo comportamento apresentado pela Figura 4, ou seja, a pressão estática é praticamente linear à profundidade da camada de café, para cada densidade do fluxo de ar. Entre as densidades do fluxo de ar, em um mesmo teste, verificou-se uma inclinação crescente das curvas, sendo maior para aquela que representava o maior fluxo de ar.

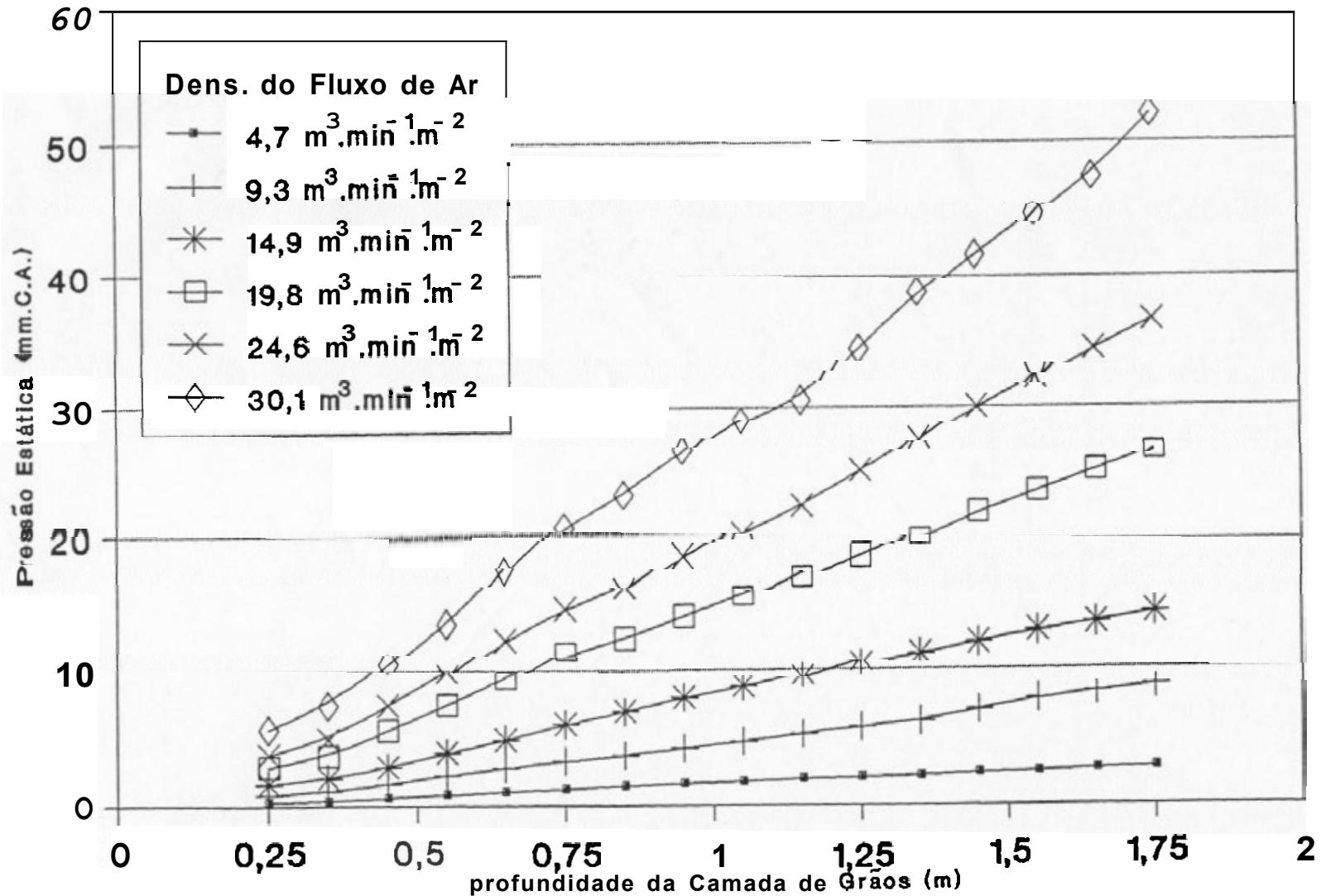


FIGURA 4 - Efeitos da Profundidade da camada de Grãos e da Densidade do Fluxo de Ar sobre a Pressão Estática, para o Café em Coco com 0,45 (b.s.) de Teor de Umidade.

Os valores obtidos experimentalmente dos dados de pressão estática para todos os testes em diferentes teores de umidade são apresentados no Apêndice A.

#### 4.2. Estimativa dos Parâmetros dos Modelos de Regressão

O modelo ajustado na análise de regressão que explica a variação da pressão estática em função da densidade do fluxo de ar e da profundidade da camada de café em coco, em cada nível de teor de umidade, é apresentado a seguir:

$$\hat{P} = b_0 \hat{Q}^{b1} \hat{h}^{b4} \quad \text{modelo 1}$$

No Quadro 2, encontram-se as estimativas dos parâmetros da regressão para o Modelo (1).

O Modelo (1), com base nos dados de pressão estática obtidos experimentalmente, apresentou, em todos os níveis de teores de umidade, um coeficiente de determinação ajustado superior a 0,99. Com a exclusão da variável profundidade da camada da grãos do modelo (segunda linha do Quadro 2), a contribuição da densidade do fluxo de ar foi superior a 0,75 em todos os níveis de teores de umidade. Esse comportamento era esperado, visto que, observando a Figura 4, as curvas são mais sensíveis à variação da densidade do fluxo de ar.

A densidade do fluxo de ar é, portanto, a responsável pela maior variação da pressão estática quando o ar atravessa uma camada de grãos.

São apresentados, na Figura 5, as curvas de gradiente de pressão estática versus densidade do fluxo de ar para o produto a teores de umidade 0,14 e 1/89 (b.s.), que correspondem aos teores de umidade extremos utilizados nos

**QUADRO 2 - Estimativa dos Parâmetros de Regressão e do Coeficiente de Determinação Ajustado de Acordo com o Modelo 1**

Teor de Umidade (b. s.)	Estimativa dos Parâmetros			
	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>4</sub>	R <sup>2</sup>
1,89	0,3267910	2,0063944	1,1125317	0,993
	0,3581301	1,9625835	---	0,758
	123,7872620	---	1,1194792	0,490
1,46	0,2682556	2,1047621	1,0641317	0,998
	0,2463479	2,1117582	---	0,770
	150,4784090	---	1,0700350	0,495
0,91	0,7254632	1,7710838	1,0704117	0,995
	0,7035508	1,7615433	---	0,743
	136,1895600	---	1,0641575	0,533
0,67	0,4138032	1,9463263	1,1079912	0,995
	0,4370974	1,9154060	---	0,750
	136,6193390	---	1,1139135	0,523
0,45	1,1468420	1,6224909	1,0578594	0,999
	1,0647049	1,6265383	---	0,748
	131,8010560	---	1,0568647	0,539
0,30	1,3105202	1,5585375	1,0397129	0,995
	1,2879410	1,5474405	---	0,806
	96,7526245	---	1,0458660	0,431
0,20	0,9618819	1,6752357	1,0367851	0,999
	0,9306272	1,6664162	---	0,810
	100,1318050	---	1,0374346	0,421
0,16	0,7312073	1,8025408	0,9504379	0,997
	0,6829594	1,8017931	---	0,839
	104,2237400	---	0,9543435	0,364
0,14	0,9264673	1,7677078	1,0143614	0,998
	0,8749164	1,7658825	---	0,832
	112,4151460	---	1,0171976	0,365

testes. Observou-se uma variação nos valores do gradiente de pressão estática para uma mesma densidade do fluxo de ar. O café mais úmido apresentou uma menor resistência à passagem do ar que quando seco. A variação do gradiente de pressão estática para o café úmido foi 60 a 80% inferior, em relação ao café seco.

A redução do gradiente de pressão estática é explicada pelos aumentos do volume específico e do volume dos poros intergranulares, com o aumento do teor de umidade do café, o que está de acordo com JAYAS (1987).

#### 4.2.1. Teor de Umidade

O modelo ajustado que descreve a variação da pressão estática em função da densidade do fluxo de ar, do teor de umidade e da profundidade da camada de café em coco é apresentado a seguir:

$$\hat{P} = b_0 \hat{Q}^{b1} \hat{U}_s^{b2} \hat{h}^{b4} \quad \text{modelo 2}$$

As estimativas dos parâmetros de regressão e do coeficiente de determinação ajustado para o Modelo (2), encontram-se nos Quadros 3 e 4, correspondendo, respectivamente, aos teores de umidade abaixo e acima do ponto de meia-seca do café (0,45 b.s.).

No Quadro 5 estão os parâmetros estimados e os coeficientes de determinação ajustados na análise de regressão global, ou seja, análise envolvendo todos os testes, excluindo aqueles com o café abaixo do ponto de meia-seca, nos quais foram utilizados valores de densidades do fluxo de ar inferiores a  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ .

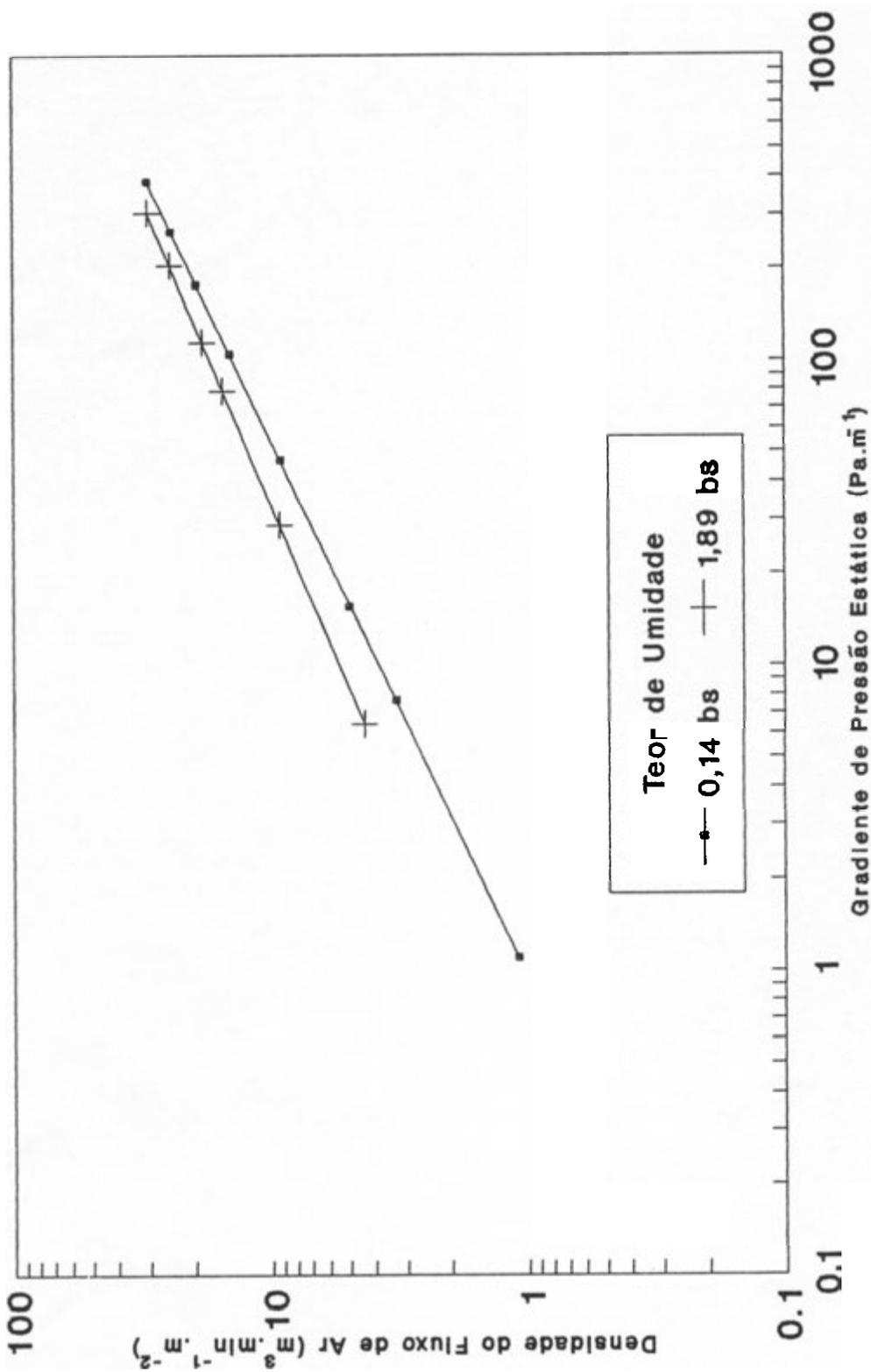


FIGURA 5 - Variação da Pressão Estática com a Densidade do Fluxo de Ar Através da Massa Granular de Café em Coko com 0,14 e 1,89 (b.s.) de Teor de Umidade.

QUADRO 3 - Estimativa dos Parâmetros de Regressão e dos Coeficientes de Determinação Ajustados para o Cafe em Coco com Teor de Umidade Abaixo do Ponto de Meia-Seca, de Acordo com o Modelo 2

Estimativa dos Parâmetros				
$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_4$	$\bar{R}^2$
0,9097742	1,7080460	0,0029994	0,9897401	0,984
0,5797427	1,7871761	0,0019990	---	0,804
0,8783706	1,7287149	---	1,0051737	0,984
39,9338226	---	0,0016716	1,5399637	0,399
0,8731626	1,7112436	---	---	0,805
103,4442290	---	0,0000761	---	-0,004
109,8873440	---	---	1,0105019	0,404

QUADRO 4 - Estimativa dos Parâmetros de Regressão e dos Coeficientes de Determinação Ajustados para o Cafe em Coco com Teor de Umidade Acima do Ponto de Meia-Seca, de Acordo com o Modelo 2

Estimativa dos Parâmetros				
$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_4$	$\bar{R}^2$
0,5098833	1,9002781	0,0773602	1,0817776	0,992
0,4827326	1,8820629	0,0320108	---	0,753
0,4828482	1,9001350	---	1,0825510	0,992
135,9148710	---	0,0189028	1,0791092	0,512
0,4737827	1,8883648	---	---	0,753
128,7951350	---	0,0089518	---	0,003
135,7501980	---	---	1,0839653	0,512

QUADRO 5 - Estimativa dos Parâmetros e dos Coeficientes de Determinação Ajustados na Análise de Regressão Global, de Acordo com o Modelo 2

Estimativa dos Parâmetros				
$b_0$		$b_2$	$b_4$	$\bar{R}^2$
0,5497022	1,8346720	0,0009992	0,9996172	0,986
0,6346686	1,7964687	0,0043634	---	0,750
0,6407773	1,8179569	---	1,0464916	0,986
139,6602780	---	0,0010047	1,0526581	0,511
0,0000008	5,3053532	---	---	0,692
131,8769990	---	0,0000884	---	0,013
139,5350190	---	---	1,0510330	0,512

Analisando os coeficientes de determinação ajustados, dos Quadros 3 e 4, verificou-se que a variável densidade do fluxo de ar é a variável que mais contribuiu para o ajuste do modelo e que a exclusão da variável teor de umidade do modelo não afetou o coeficiente de determinação. Assim, a resistência oferecida pelo café em coco à passagem do fluxo de ar, de acordo com o Modelo (2), não depende significativamente do teor de umidade do produto (apesar da variável teor de umidade não contribuir significativamente para o ajuste do modelo, verificou-se na Figura 5 uma variação do gradiente de pressão estática devido ao efeito do teor de umidade do café em coco).

A Figura 6 compara as curvas obtidas para o produto a teores de umidade de 0,14 e 1,89 b.s., de acordo com o Modelo (1), e a curva representando o Modelo (2), quando a variável teor de umidade C desprezada (terceira linha do Quadro 5). Observa-se que a curva do Modelo (2) pode ser considerada

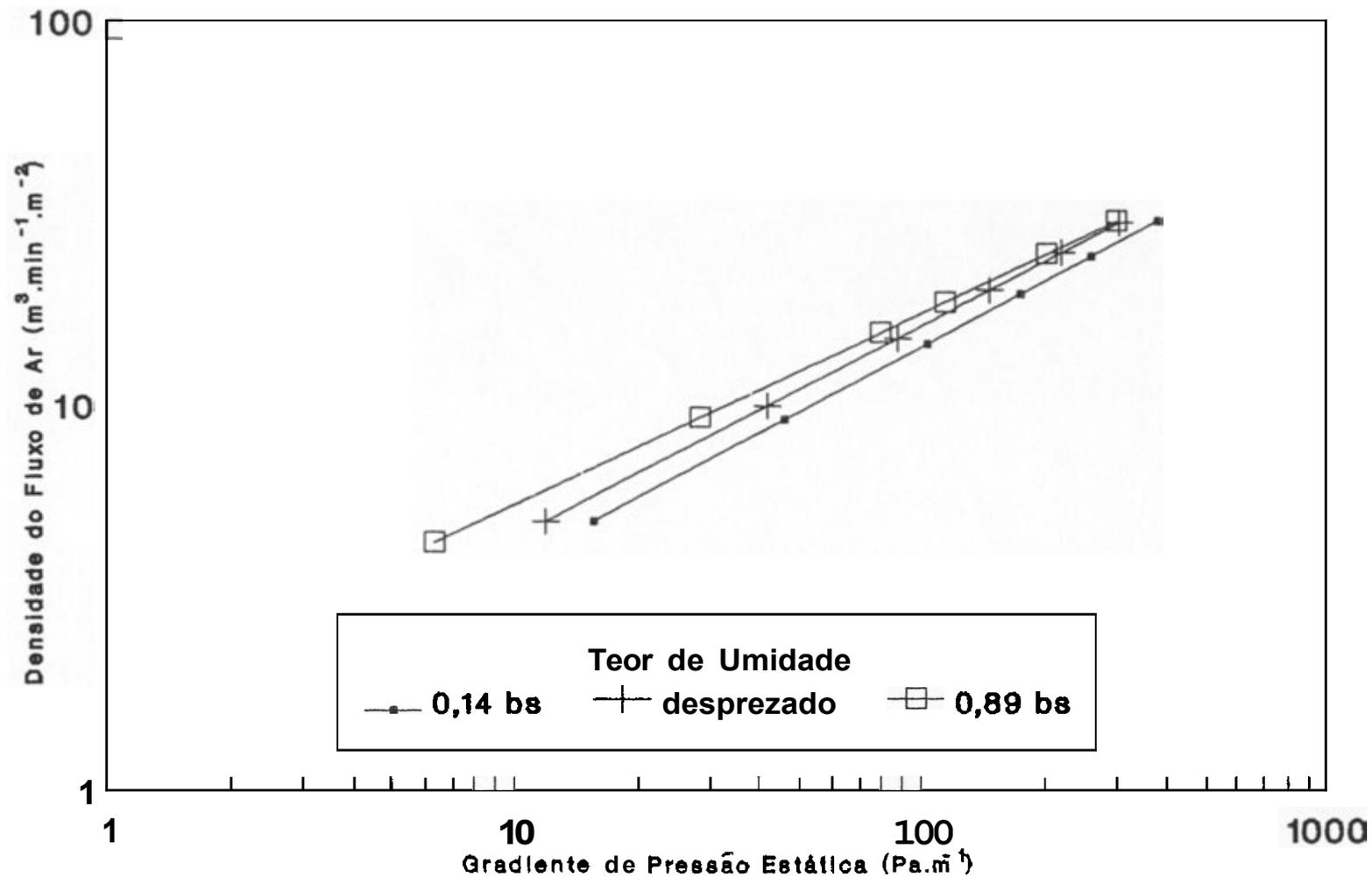


FIGURA 6 - Comparação entre as Curvas de 0,14 e 1,89 [b.s.] de Teor de umidade, de Acordo com o Modelo 1, e a Curva Quando a Variável Teor de Umidade é Desprezada, de Acordo com o Modelo 2.

como uma curva média representativa dos teores de umidade, sendo expressa pela seguinte equação:

$$P = 0,641 * Q^{1,818} * h^{1,046} \quad \text{eq. 32}$$

A Equação (32) pode ser utilizada para dimensionamento dos sistemas de secagem ou de seca-aeração de café em coco.

#### 4.2.2. Massa Específica Global

O modelo de regressão ajustado que explica a variação da pressão estática em função da densidade de fluxo de ar, da massa específica global e da profundidade da camada de café em coco é mostrado a seguir:

$$\hat{P} = b_0 \hat{Q}^{b_1} \hat{p}^{b_2} \hat{h}^{b_3} \quad \text{modelo 3}$$

Os parâmetros estimados da regressão e os coeficientes de determinação ajustados para o Modelo (3) encontram-se nos Quadros 6 e 7, correspondendo, respectivamente, aos teores de umidade abaixo e acima do ponto de meia-seca do produto.

O Quadro 8 apresenta os parâmetros estimados e os coeficientes de determinação ajustados na análise de regressão global.

Analisando os coeficientes de determinação ajustados apresentados nos Quadros 6 e 7, observa-se que a variável massa específica contribuiu negativamente para o ajuste do modelo, quando o café apresentava-se a um teor de umidade abaixo do ponto de meia-seca, e que, novamente, a densidade do fluxo de ar foi a variável que mais contribuiu para o ajuste do modelo.

QUADRO 6 - Estimativa dos Parâmetros de Regressão e dos Coeficiente de Determinação Ajustados para o Cafe em Coco com Teor de Umidade Abaixo do Ponto de Meia-Seca, de Acordo com o Modelo 3

Estimativa dos Parâmetros				
$b_0$	$b_1$	$-b_3$	$b_4$	$\bar{R}^2$
2,4026518	2,2504702	0,6248333	2,4064884	0,927
6,7847700	1,9889278	0,6258963	---	0,805
0,8783706	1,7287149	---	1,0051737	0,984
76,2154846	---	0,0029652	1,0015745	0,404
0,8731626	1,7112436	---	---	0,805
	---	---	---	---
109,8873440	---	---	1,0105019	0,404

QUADRO 7 - Estimativa dos Parâmetros de Regressão e dos Coeficiente de Determinação Ajustados para o Cafe em Coco com Teor de Umidade Acima do Ponto de Meia-Seca, de Acordo com o Modelo 3

Estimativa dos Parâmetros				
$b_0$	$b_1$	$-b_3$	$b_4$	$\bar{R}^2$
0,5094900	1,9005165	0,0089736	1,0815697	0,992
0,4997711	1,8670607	0,0019991	---	0,752
0,4828482	1,9001350	---	1,0825510	0,992
144,0144350	---	0,0097509	1,0779409	0,512
0,4737827	1,8833648	---	---	0,753
14,0000000	---	0,0000009	---	0,009
135,7501980	---	---	1,0839653	0,512

QUADRO 8 - Estimativa dos Parâmetros e dos Coeficientes de Determinação Ajustados na Análise de Regressão Global, de Acordo com o Modelo 3

Estimativa dos Parâmetros				
$b_0$	$b_1$	$-b_3$	$b_4$	$\bar{R}^2$
0,8137972	0,0193003	0,0302810	1,0425358	0,986
1,1937037	1,8009005	0,1037940	---	0,750
0,6407773	1,8179569	---	1,0464916	0,986
0,0000008	5,3053532	---	---	0,692
139,5350190	---	---	1,0510330	0,512

Não foi utilizado, em um mesmo modelo, as variáveis massa específica global e teor de umidade, pois a massa específica global do café em coco é dependente seu do teor de umidade.

#### 4.3. Resistência do Café ao Fluxo de Ar Comparada com a de Outros Produtos

A resistência à passagem do ar através dos grãos de café em coco, com 0,16 (b.s.) de teor de umidade, é comparada com a de outros produtos agrícolas na Figura 7. Os valores plotados dos gradientes de pressão estática para os produtos agrícolas são os recomendados pela ASAE Standard D272.1 (ASAE, 1984), (enchimento sem compactação e produto seco).

Dependendo da densidade do fluxo de ar, a pressão estática em uma coluna vertical de café em coco é de dezessete a seis vezes menor que a do milho. Comparado com a soja, que apresenta uma configuração física semelhante, a resistência dos grãos de café em coco à passagem do ar é de quatorze a

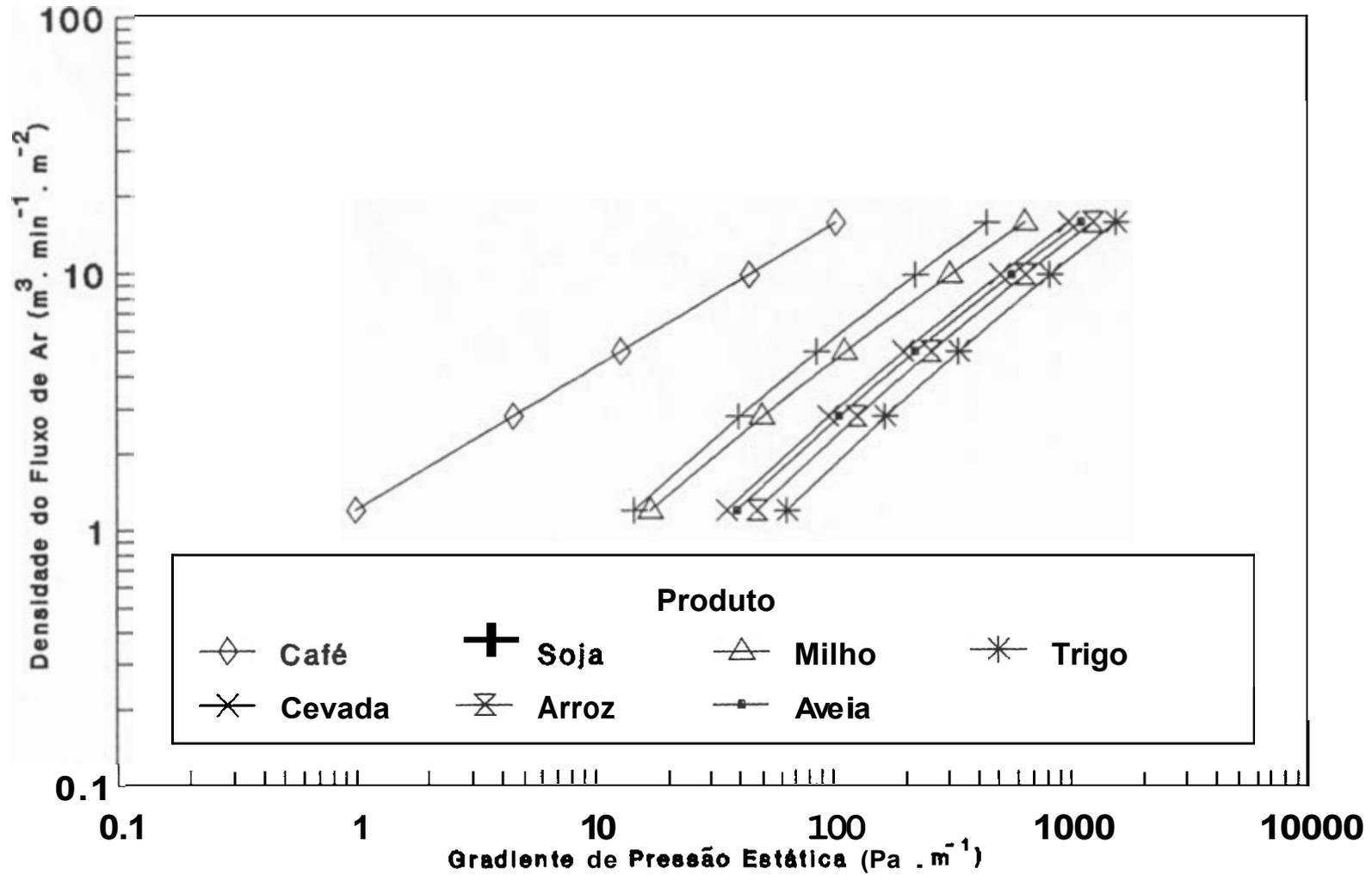


FIGURA 7 - Variação da Pressão Estática do Café em Coco (0,16 b.s.) e de Outros Produtos Agrícolas, de Acordo com a ASAE Standard D272.1 (ASAE 1984).

quatro vezes menor. Isso pode ser explicado pelo maior volume específico dos grãos de café em coco, resultando em um volume maior dos poros intergranulares, o que oferece menor resistência à passagem do ar.

Esse resultado mostra que sistemas projetados com dados de gradiente de pressão estática de outros produtos agrícolas para secar e aerar café são superdimensionados, com baixa eficiência energética do sistema de ventilação.

#### 4.4. Estimativa dos Parâmetros do Modelo de SHEDD e do Modelo de HUKILL e IVES

Nos Quadros 9 e 10 são apresentados os coeficientes estimados  $a$  e  $b$ , para o café em coco, dos modelos propostos, respectivamente, por SHEDD (Equação 4) e por HUKILL e IVES (Equação 5).

Os intervalos de densidade do fluxo de ar utilizados para a obtenção dos coeficientes são de 1 a 30  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  para o café em coco com teor de umidade abaixo do ponto de meia-seca, e de 5 a 30  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  para café em coco com teor de umidade acima do ponto de meia-seca. O grau de ajuste,  $R^2$ , dos dados aos modelos, em todos os níveis de teores de umidade, foi superior a 0,99.

QUADRO 9 - Coeficientes Estimados a e b para o Café em Coko, do Modelo Proposto por SHEDD (Equação 4)

Teor de Umidade (b.s.)	$Q \left( \frac{\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}}{\Delta P \left( \frac{\text{mm C.A.}}{\text{m}} \right)} \right)$		$Q \left( \frac{\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}}{\Delta P \left( \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right)} \right)$	
	a	b	a	b
0,14	a = 3,52	b = 0,59	a = $1,5 \times 10^{-2}$	b = 0,59
0,16	a = 3,54	b = 0,61	a = $1,5 \times 10^{-2}$	b = 0,61
0,20	a = 3,76	b = 0,62	a = $1,5 \times 10^{-2}$	b = 0,62
0,30	a = 4,06	b = 0,61	a = $1,7 \times 10^{-2}$	b = 0,61
0,45	a = 3,81	b = 0,61	a = $1,6 \times 10^{-2}$	b = 0,61
0,67	a = 4,87	b = 0,53	a = $2,4 \times 10^{-2}$	b = 0,53
0,91	a = 5,08	b = 0,52	a = $2,6 \times 10^{-2}$	b = 0,52
1,46	a = 4,92	b = 0,51	a = $2,5 \times 10^{-2}$	b = 0,51
1,89	a = 5,63	b = 0,49	a = $3,1 \times 10^{-2}$	b = 0,49

QUADRO 10 - Coeficientes Estimados a e b para o Café em Coko, do Modelo Proposto por HUKILL e IVES (Equação 5)

Teor de Umidade (b.s.)	$Q \left( \frac{\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}}{\Delta P \left( \frac{\text{mm C.A.}}{\text{m}} \right)} \right)$		$Q \left( \frac{\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}}{\Delta P \left( \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right)} \right)$	
	a	b	a	b
0,14	a = $1,7 \times 10^{-2}$	b = 3,90	a = 4,56	b = $2,5 \times 10^{-2}$
0,16	a = $0,7 \times 10^{-2}$	b = 1,49	a = 4,71	b = $2,5 \times 10^{-2}$
0,20	a = $1,1 \times 10^{-3}$	b = 0,20	a = 3,65	b = $1,8 \times 10^{-2}$
0,30	a = $8,9 \times 10^{-3}$	b = 1,42	a = 4,84	b = $1,9 \times 10^{-2}$
0,45	a = $2,8 \times 10^{-2}$	b = 4,13	a = 5,24	b = $1,5 \times 10^{-2}$
0,67	a = $1,9 \times 10^{-2}$	b = 0,45	a = 5,00	b = $1,3 \times 10^{-6}$
0,91	a = $3,7 \times 10^{-2}$	b = 4,07	a = 4,23	b = $7,4 \times 10^{-3}$
1,46	a = $4,1 \times 10^{-2}$	b = 3,32	a = 5,55	b = $1,4 \times 10^{-4}$
1,89	a = $4,0 \times 10^{-2}$	b = 3,81	a = 3,45	b = $5,9 \times 10^{-3}$

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

A qualidade final do café é afetada nas varias etapas de seu processamento, principalmente na secagem e no armazenamento. Durante esses processos, o ar é forçado, por um ventilador, a fluir através do produto. O conhecimento da resistência do produto à passagem do fluxo de ar torna-se um fator importante para o projeto adequado desses sistemas.

Este trabalho foi desenvolvido objetivando modelar a variação da pressão estática, ao longo de uma coluna vertical de café em coco, em função da densidade do fluxo de ar, do teor de umidade, da massa específica global e da profundidade da camada do produto.

Grãos de café em coco, da variedade Catuaí, colhidos manualmente, com teor de umidade médio inicial de 65,3% b.u., foram submetidos à secagem, em terreiro, até que atingissem as umidades desejadas para o experimento. Para a realização dos testes, foi construído um dispositivo de teste, constituído de um ventilador centrífugo (dotado de um diafragma para regular a variação da vazão de ar na entrada),

uma câmara plenum e uma coluna com pontos de tomadas de pressão estática. A carga do produto na coluna foi efetuada de maneira que não ocorresse a compactação no seu interior.

Foram realizados testes com os seguintes teores de umidade: 0,14; 0,16; 0,20; 0,30; 0,45; 0,67; 0,91; 1,46 e 1,89 b.s.. Nos testes, utilizaram-se valores de densidades de fluxo de ar na faixa de 1 a 30  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Para se obter os modelos ajustados que melhor descrevessem os dados de gradiente de pressão estática, utilizou-se a análise de regressão não-linear. O grau de ajustamento dos modelos estimados aos dados experimentais foi avaliado pela magnitude do coeficiente de determinação ajustado.

Nas condições em que o trabalho foi conduzido e segundo os resultados obtidos, concluiu-se que:

a) o café em coco com teor de umidade mais elevado apresentou menor resistência à passagem do fluxo de ar através de sua massa granular;

b) em todos os testes, a variável densidade do fluxo de ar foi a que mais contribuiu para o aumento da pressão estática ao longo da camada vertical de café;

c) a relação entre pressão estática, densidade do fluxo de ar e profundidade da camada de grãos pode ser expressa por:  $\hat{P} = b_0 Q^{\hat{b}_1} h^{\hat{b}_4}$ , em que os valores de  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_4$  são parâmetros que variam de acordo com o teor de umidade do café em coco;

d) analisando os coeficientes de determinação, a variável teor de umidade do produto não contribuiu significativamente para o ajuste do modelo. Porém,

observou-se que o café em coco seco ofereceu maior resistência à passagem do ar. A expressão  $P = 0,641 Q^{1,818} H^{1,046}$  pode ser utilizada para dimensionamento de sistemas de secagem ou de seca-aeração;

e) comparado com outros produtos agrícolas, o café em coco apresenta menor gradiente de pressão estática para a mesma densidade do fluxo de ar; e

f) os modelos propostos por SHEDD (1953) e por HUKILL e IVES (1955) podem ser utilizados para determinar o gradiente de pressão estática em uma camada de café em coco.

## **BIBLIOGRAFIA**

## BIBLIOGRAFIA

ASAE. American Society of Agricultural Engineers., Agricultural Engineers Yearbook. St. Joseph, Michigan, 1984 - 1985. 796p.

Agricultural Engineers Yearbook. St. Joseph, Michigan, 1987. 682p.

BAKKER-ARKEMA, F.W.; PATTERSON, R.J.; BICKERT, W.G. Static pressure-airflow relationships in packed beds of granular biological materials such as cherry pits. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 12(1):134-136, 140, 1969.

BÁRTHOLO, G.F.; MAGALHÃES FILHO, A.A.R.; GUIMARÃES, P.T.G.; CHALFOUN, S.M. Cuidados na colheita, no preparo e no armazenamento de café. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, MG, 14(162):33-44, 1988.

BERN, S.J. & CHARITY, L.F. Air flow resistance characteristics of corn as influenced by bulk density. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1975. (Paper 75-3510)

BROOKER, D.B. Pressure patterns in grain-drying systems established by numerical methods. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 4(1):72-74, 77, 1961.

\_\_\_\_\_. Computing air pressure and velocity distribution when air flows through a porous medium and nonlinear velocity-pressure relationships exist. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 12(1):118-120, 1969.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Drying cereal grains. Westport, CT, The AVI Publishing Company, Inc., 1974. 265p.

- CALDERWOOD, D.L. Resistance to airflow of rough, brown and milled rice. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 16(3):525-527, 532, 1973.
- CASTRO, L.H. Efeito do despulpamento, em secador de leito fixo sob alta temperatura, no consumo de energia e na qualidade do café (Coffea arabica L.). Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1991. 61p. (Tese de M.S.)
- CHANG, C.S.; SHACKELFORD, L.E.; LAI, F.S.; MARTIN, C.R.; MILLER, B.S. Bulk properties of corn as affected by multiple-point grain spreaders. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 24(6):1632-1636, 1981.
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress, 48(2):89-94, 1952.
- GRAMA, S.N; BERN, C.R.; HURBURGH JR., C.R. Airflow resistance of mixtures of shelled and fines. Transactions of the ASAE St. Joseph, Michigan, 27(1):268-272, 1984.
- HAQUE, E; FOSTER, G.H.; CHUNG, D.S.; LAI, F.S. Static pressure drop across a bed of corn mixed with fines. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 21(5):997-1000, 1978.
- HAQUE, E.; AHMED, Y.N.; DOYOE, C.W. Static pressure drop in fixed beds of grain as affected by grain moisture content. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 25(4):1095-1098, 1982.
- HENDERSON, S.M. Resistance of shelled corn and bin walls to air flow. J. Agricultural Engineering, 24(11):367-369, 1943.
- HUKILL, W.V. & IVES, N.C. Radial airflow resistance of grain. J. Agricultural Engineering, 36(5):332-335, 1955.
- HUKILL, W.V. & SHEDD, C.K. Nonlinear airflow in grain drying. J. Agricultural Engineering, 36(6):362-366, 1955
- HUNTER, A.J. Pressure difference across an aerated seed bulk for some common duct and store cross-sections. J. Agricultural Engineering, 28(5):437-450, 1983.
- IBC - INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ. Anuário Estatístico do Café, Rio de Janeiro, RJ, n.19, 1989. 77p.
- JAYAS, D.S. Resistance of bulk canola oilseed to airflow. Saskatoon, University of Saskatchewan, 1987. (Ph.D. Dissertation)
- JAYAS, D.S.; SOKHANSANJ, S.; MOYSEY, E.B.; BARBER, E.M. The effect of airflow direction on the resistance of canola (Rapeseed) to airflow. Canadian Agricultural Engineering, 29(2):189-192, 1987a.

- \_\_\_\_\_. Distribution of foreign material in canola bins filled using a spreader or spout. Canadian Agricultural Engineering, 22(2):183-188, 1987b.
- JAYAS, D.S. & MUIR, W.E. Airflow-pressure drop data for modeling fluid flow in anisotropic bulks. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 34(1):251-254, 1991.
- JINDAL, V.K. h THOMPSON, T.L. Air pressure patterns and flow paths shaped piles of sorghum using forced convection. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 15(4):737-741, 1972.
- KAY, R.L.; BERN, C.J.; HURBURGH JR., C.R. Horizontal and vertical airflow resistance of shelled corn at various bulk densities. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 32(2):733-736, 1989.
- KUMAR, A. h MUIR, W.E. Airflow resistance of wheat and barley. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1985. (Paper 85-3515)
- LAI, F.S. Three-dimensional flow of air through nonuniform grain beds. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 23(3):729-734, 1980.
- LAMOND, W.J. h SMITH, E.A. Modeling low temperature drying of grain in anisotropic beds. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 3, Proceedings..., Birmingham, s. ed., 1982. não paginado.
- MARCHANT, J.A. The prediction of airflows in crop drying systems by the finite element method. J. Agricultural. Eng. Res., 21:417-429, 1976.
- MATTHIES, H.J. & PETERSEN, H. New data for calculating the resistance to air flow of stored granular materials. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 17(6):1144-1149, 1974.
- NAFM - NATIONAL ASSOCIATION OF FAN MANUFACTURES. Standards. definitions, terms and test codes for centrifugal, axial and propeller fans. 2. ed. Detroit, Michigan. 1952. (Inc. Bulletin n.110)
- PINTO, F.A.C. Projeto de um secador de fluxos contraco~~nta~~ / concorrentes e análise de seu desempenho na secagem de café (Coffea arabica, L). Vicosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1992. 57p. (Tese - MS)
- PATTERSON, R.J; BAKKER-ARKEMA, F.W.; BICKERT, W.G. Static pressure-airflow relationships in packed beds of granular biological materials such as grain 11. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 4(1):172-174, 178, 1971.
- SHEDD, C.K. Some new data on resistance of grains to airflow. J. Agricultural Engineering, 32(9):493-495, 1951.

- \_\_\_\_\_. Resistance of grains and seeds to airflow. J. Agricultural Engineering, **34(9):616-619, 1953.**
- SOKHANSANJ, S; FALACINSKI, A.A.; SOSULSKI, F.W.; JAYAS, D.S.; TANG, J. Resistance of bulk lentils to airflow. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, **33(4):1281-1285, 1990.**
- SPENCER, H.B. Pressure drop in on-floor duct drying systems. J. Agricultural Engineering, **14(2):165-172, 1969.**
- THOMPSON, R.A & ISAACS, G.W. Porosity determinations of grains and seeds with an air-comparison pycnometer. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, **10(5):693-696, 1967.**
- YANG, X. & WILLIAMS, D.L. Airflow resistance of grain sorghum as affected by bulk density. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, **33(6):1966-1970, 1990.**
- YANG, X.; BERN, C.J.; HURBURGH JR., C.R. Airflow resistance of cleanings removed from corn. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, **33(4):1299-1302, 1990.**

## APÉNDICES

## APÊNDICE A

QUADRO 1A- Valores da Pressão Estática(mmCA) Obtidos em Função da Densidade de Fluxo de Ar e da Profundidade da Camada de Café a 0,14 b.s. de Teor de Umidade

Profundidade da Camada (m)	Densidade do Fluxo de Ar (m .min <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )							
	1,1	3,3	5,0	9,2	14,5	19,5	24,4	30,2
0,25	0,1	0,2	0,4	0,8	1,8	3,2	5,1	7,0
0,35	0,1	0,3	0,6	1,2	2,4	4,2	7,4	10,0
0,45	0,1	0,5	0,8	1,6	3,4	6,5	10,6	14,0
0,55	0,1	0,6	1,1	2,2	4,7	9,0	14,0	19,0
0,65	0,2	0,7	1,4	2,6	5,7	10,5	16,5	23,0
0,75	0,2	0,9	1,6	3,1	6,8	12,5	20,0	27,5
0,85	0,2	1,0	1,8	3,5	7,8	14,0	22,5	31,0
0,95	0,3	1,1	2,1	4,0	8,8	16,0	25,5	34,5
1,05	0,3	1,2	2,3	4,5	9,7	17,5	28,0	38,0
1,15	0,3	1,4	2,5	5,0	10,6	19,0	31,0	41,0
1,25	0,4	1,5	2,8	5,4	11,5	21,0	34,0	45,5
1,35	0,4	1,6	3,0	5,9	12,5	22,7	37,0	49,0
1,45	0,5	1,7	3,2	6,4	13,5	24,5	39,5	53,0
1,55	0,5	1,8	3,4	6,8	14,5	26,0	42,5	57,0
1,65	0,6	2,0	3,7	7,4	15,3	27,5	45,5	62,0
1,75	0,6	2,1	4,0	8,0	16,3	30,0	49,0	66,0

**QUADRO 2A- Valores da Pressão Estática (mmCA) Obtidos em Função da Densidade do Fluxo de Ar e da Profundidade da Camada de Cafe a 0,14 b.s. de Teor de Umidade**

Profundidade da Camada (m)	Densidade do Fluxo de Ar ( $m \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$ )							
	1,2	2,8	5,0	9,9	15,7	20,2	24,8	30,5
0,25	0,1	0,2	0,5	1,1	1,6	3,2	4,3	6,5
0,35	0,1	0,3	0,7	1,5	2,3	4,7	6,5	9,5
0,45	0,2	0,4	0,9	2,1	3,2	6,6	9,0	13,5
0,55	0,2	0,6	1,3	2,9	4,3	9,1	12,6	18,5
0,65	0,2	0,8	1,6	3,4	5,2	11,0	14,5	21,5
0,75	0,3	0,8	1,8	4,0	6,2	12,5	17,0	25,5
0,85	0,3	0,9	2,0	4,6	7,0	14,0	19,5	29,0
0,95	0,4	1,0	2,2	5,2	7,7	16,0	22,0	33,0
1,05	0,4	1,2	2,4	5,7	8,4	17,5	24,0	36,0
1,15	0,4	1,3	2,7	6,2	9,3	19,0	26,0	39,5
1,25	0,5	1,4	2,9	6,8	10,4	21,0	27,5	43,0
1,35	0,5	1,5	3,1	7,4	11,1	22,5	30,5	45,0
1,45	0,5	1,6	3,3	7,9	12,0	24,0	33,0	47,5
1,55	0,6	1,7	3,6	8,4	12,8	26,0	35,0	51,0
1,65	0,6	1,8	3,9	8,9	13,6	27,2	37,0	55,0
1,75	0,6	2,0	4,2	9,5	14,2	29,0	39,5	58,0

**QUADRO 3A- Valores da Pressão Estática (mmCA) Obtidos em Função da Densidade do Fluxo de Ar e da Profundidade da Camada de Café a 0,20 b.s. de Teor de Umidade**

Profundidade da Camada (m)	Densidade do Fluxo de Ar ( $m \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$ )							
	1,2	3,0	4,8	9,6	14,7	20,6	24,9	29,6
0,25	0,0	0,1	0,4	0,8	1,6	2,8	3,9	5,5
0,35	0,0	0,2	0,5	1,1	2,3	3,9	5,6	7,5
0,45	0,1	0,3	0,7	1,6	3,3	5,7	8,1	10,8
0,55	0,1	0,4	0,9	2,2	4,3	7,6	10,9	14,0
0,65	0,1	0,4	1,1	2,5	5,2	9,0	13,0	16,5
0,75	0,2	0,5	1,3	3,0	6,2	10,7	14,5	19,5
0,85	0,2	0,6	1,5	3,4	6,9	12,2	16,5	22,0
0,95	0,2	0,7	1,7	3,8	7,9	14,0	18,7	25,0
1,05	0,2	0,7	1,9	4,2	8,8	15,0	21,0	28,0
1,15	0,3	0,8	2,2	4,7	9,8	16,5	23,5	31,5
1,25	0,3	0,9	2,4	5,3	10,6	18,5	25,5	34,5
1,35	0,4	1,0	2,6	5,8	12,3	20,0	28,0	37,5
1,45	0,4	1,0	2,7	6,2	13,2	21,5	30,0	41,0
1,55	0,4	1,1	2,8	6,6	13,8	22,5	32,0	43,5
1,65	0,4	1,2	3,1	7,1	14,5	24,0	34,0	47,0
1,75	0,5	1,3	3,3	7,6	15,5	26,0	36,5	50,0

**QUADRO 4A- Valores da Pressão Estática (mmCA) Obtidos em Função da Densidade do Fluxo de Ar e da Profundidade da Camada de Café a 0,30 b.s. de Teor de Umidade**

Profundidade da Camada (m)	Densidade do Fluxo de Ar ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )							
	1,8	3,0	5,0	10,2	15,5	20,2	25,1	30,0
0,25	0,0	0,1	0,2	0,8	1,5	2,5	3,9	4,2
0,35	0,0	0,2	0,4	1,1	2,0	3,3	5,0	6,5
0,45	0,0	0,3	0,6	1,8	3,0	5,2	7,9	9,5
0,55	0,2	0,4	0,8	2,4	4,1	7,4	11,1	13,0
0,65	0,2	0,5	1,0	2,9	5,2	9,3	13,7	16,0
0,75	0,2	0,6	1,2	3,3	6,1	10,8	15,0	18,5
0,85	0,3	0,6	1,3	3,8	7,0	11,5	17,0	21,0
0,95	0,3	0,7	1,6	4,4	8,0	13,0	19,5	24,0
1,05	0,3	0,8	1,8	5,0	8,8	14,5	21,5	26,5
1,15	0,4	0,9	1,9	5,4	9,8	16,0	23,8	29,0
1,25	0,4	1,0	2,0	6,0	11,0	18,0	26,0	31,5
1,35	0,5	1,1	2,2	6,6	11,9	19,5	28,0	34,0
1,45	0,5	1,2	2,4	7,2	12,8	20,5	30,0	37,0
1,55	0,6	1,3	2,6	7,6	13,7	21,5	32,0	39,5
1,65	0,6	1,3	2,8	8,2	14,3	23,5	34,5	41,5
1,75	0,7	1,4	3,0	8,9	15,0	25,5	37,0	44,5

**QUADRO 5A- Valores da Pressão Estática (mmCA) Obtidos em Função da Densidade do Fluxo de Ar e da Profundidade da Camada de Café a 0,45 b.s. de Teor de Umidade**

Profundidade da Camada (m)	Densidade do Fluxo de Ar ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )					
	4,7	9,3	14,9	19,8	24,6	30,1
0,25	0,3	0,8	1,6	2,8	3,7	5,5
0,35	0,4	1,1	2,0	3,6	4,8	7,2
0,45	0,6	1,6	2,8	5,4	7,2	10,5
0,55	0,8	2,2	3,8	7,2	9,6	13,5
0,65	1,0	2,7	4,7	9,1	12,4	17,5
0,75	1,2	3,2	5,8	11,4	14,5	21,0
0,85	1,4	3,6	6,7	12,5	16,0	23,5
0,95	1,6	4,1	7,7	14,0	18,5	26,5
1,05	1,7	4,6	8,5	15,5	20,5	29,0
1,15	1,9	5,1	9,4	17,0	22,5	30,5
1,25	2,0	5,6	10,7	18,5	25,0	34,5
1,35	2,1	6,0	11,4	20,0	27,5	38,5
1,45	2,3	6,8	12,2	22,0	30,0	41,5
1,55	2,4	7,6	13,0	23,5	32,0	44,5
1,65	2,6	8,1	13,5	25,0	34,5	47,5
1,75	2,7	8,5	14,2	26,5	36,5	52,0

QUADRO 6A- Valores da Pressão Estática (mmCA) Obtidos em Função da Densidade do Fluxo de Ar e da Profundidade da Camada de Café a 0,67 b.s. de Teor de Umidade

Profundidade da Camada (m)	Densidade do Fluxo de Ar ( $m \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-2}$ )					
	4,9	10,6	15,8	20,1	24,6	30,4
0,25	0,2	0,8	1,4	2,3	3,3	5,2
0,35	0,4	1,2	2,0	3,2	4,7	7,6
0,45	0,5	1,7	2,9	4,7	7,0	11,0
0,55	0,8	2,3	4,0	6,6	9,7	15,0
0,65	1,0	3,0	5,2	9,0	13,0	19,5
0,75	1,1	3,6	6,2	10,5	14,7	23,0
0,85	1,3	4,1	7,1	12,2	16,5	26,0
0,95	1,5	4,5	8,1	13,6	18,5	30,0
1,05	1,7	5,2	9,2	14,0	21,0	33,0
1,15	1,8	5,9	10,3	15,0	24,0	35,0
1,25	2,0	6,6	11,4	16,5	26,5	38,5
1/35	2,2	7,1	12,6	18,0	29,0	42,5
1,45	2,4	7,7	13,1	19,5	31,5	46,5
1,55	2,6	8,2	13,7	21,0	33,5	50,0
1,65	2,8	8,8	14,5	22,5	36,0	55,0
1,75	2,9	9,4	15,5	24,7	38,5	59,0

QUADRO 7A- Valores da Pressão Estática (mmCA) obtidos em Função da Densidade do Fluxo de Ar e da Profundidade da Camada de Café a 0,91 b.s. de Teor de Umidade

Profundidade da Camada (m)	Densidade do Fluxo de Ar ( $m \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-2}$ )					
	5,1	10,3	15,8	20,7	24,6	30,0
0,25	0,2	0,4	1,4	2,4	3,2	4,2
0,35	0,4	0,6	2,0	3,4	4,7	6,1
0,45	0,6	0,9	3,1	5,6	6,5	10,0
0,55	0,9	1,2	4,2	8,0	10,6	13,0
0,65	1,1	1,6	5,1	10,3	14,2	17,5
0,75	1,3	1,9	6,8	12,8	16,5	21,0
0,85	1,5	2,2	7,6	13,5	18,0	23,0
0,95	1,7	2,4	8,1	15,5	20,5	26,5
1,05	1,9	2,8	9,4	17,5	23,0	29,5
1,15	2,1	3,1	10,5	19,0	24,5	32,5
1/25	2,3	3,4	11,6	21,0	27,5	36,0
1,35	2,5	3,7	12,4	22,5	29,5	38,5
1,45	2,8	4,0	13,4	24,5	31,7	42,0
1,55	2,9	4,2	14,0	26,0	33,8	45,0
1/65	3,0	4,4	14,7	27,0	36,5	48,0
1,75	3,3	4,8	15,5	29,5	39,0	54,0

**QUADRO 8A- Valores da Pressão Estática (mmCA) Obtidos em Função da Densidade do Fluxo de Ar e da Profundidade da Camada de Café a 1,46 b.s. de Teor de Umidade**

Profundidade da Camada (m)	Densidade do Fluxo de Ar ( $m \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-2}$ )					
	5,0	9,3	15,4	20,9	25,1	30,9
0,25	0,3	0,6	1,1	2,4	3,6	5,5
0,35	0,4	0,9	1,6	2,5	5,2	8,4
0,45	0,7	1,5	2,6	5,6	8,8	13,4
0,55	0,9	1,9	3,3	7,4	11,0	17,0
0,65	1,1	2,4	4,2	9,2	13,5	21,0
0,75	1,4	3,0	5,4	12,0	17,5	27,0
0,85	1,6	3,3	6,0	12,5	19,5	29,5
0,95	1,8	3,8	6,9	14,5	22,5	34,5
1,05	2,0	4,2	7,7	16,0	25,0	38,0
1,15	2,2	4,6	8,4	17,5	27,5	41,5
1,25	2,4	5,2	9,3	19,5	29,5	45,5
1,35	2,6	5,6	10,2	21,0	31,5	49,5
1,45	2,8	6,1	11,1	22,5	34,5	52,0
1,55	3,0	6,5	11,8	24,0	37,0	56,0
1,65	3,3	7,1	13,0	26,5	30,0	62,0
1,75	3,6	7,6	13,5	29,0	32,5	66,0

**QUADRO 9A- Valores da Pressão Estática (mmCA) Obtidos em Função da Densidade do Fluxo de Ar e da Profundidade da Camada de Café a 1,89 b.s. de Teor de Umidade**

Profundidade da Camada (m)	Densidade do Fluxo de Ar ( $m \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-2}$ )					
	4,4	9,3	15,5	18,6	24,8	30,2
0,25	0,2	0,4	1,1	1,8	2,5	3,9
0,35	0,3	0,6	1,6	2,6	3,8	5,0
0,45	0,5	0,8	2,8	4,5	6,6	9,1
0,55	0,7	1,0	3,6	5,8	8,4	13,6
0,65	0,8	1,4	4,8	7,8	11,4	18,5
0,75	1,0	1,7	6,0	9,6	14,2	22,7
0,85	1,1	1,9	6,7	10,8	15,0	25,0
0,95	1,3	2,2	7,6	12,5	17,5	29,0
1,05	1,4	2,4	8,4	13,5	19,5	32,2
1,15	1,6	2,7	9,6	15,0	21,5	35,5
1,25	1,7	2,9	10,2	16,5	23,5	39,0
1,35	1,8	3,2	11,4	18,0	25,5	42,2
1,45	2,0	3,4	12,0	19,5	27,5	46,0
1,55	2,1	3,6	12,5	20,5	29,5	48,3
1,65	2,3	3,8	13,0	22,0	31,7	52,0
1,75	2,4	4,1	14,0	23,5	33,5	57,0

## APÊNDICE B

QUADRO 1B - Temperatura do Ar próximo da Entrada de Ar do Ventilador Durante a Realização dos Testes

Teste Nº	Temperatura (°C)						Média (°C)	Desvio-Padrão
1	21,6	21,0	21,1	20,8	20,6	20,5	20,9	0,398
2	22,2	22,8	22,9	23,3	23,5	23,7	23,1	0,546
3	22,0	22,8	22,7	22,8	23,0	23,3	22,8	0,432
4	18,9	19,2	19,2	19,3	19,5	20,0	19,4	0,373
5	18,3	18,7	18,7	19,0	19,2	19,4	18,9	0,397
6	18,3	18,7	19,4	19,5	19,6	19,8	19,2	0,584
7	19,4	20,0	21,0	20,8	21,0	20,2	20,4	0,645
8	20,0	20,5	21,0	21,0	21,0	21,4	20,8	0,492
9	21,1	21,5	21,7	22,0	22,2	22,5	21,8	0,505

QUADRO 2B - Umidade Relativa do Ar próximo da Entrada de Ar do Ventilador Durante a Realização dos Testes

Teste Nº	Umidade Relativa (%)						Média (%)	Desvio-Padrão
1	53,5	56,0	58,0	60,0	63,0	63,0	58,9	3,826
2	60,0	60,0	61,0	58,0	58,0	58,0	59,2	1,329
3	68,0	65,0	65,0	67,0	68,0	67,0	66,7	1,366
4	68,0	68,0	68,0	67,0	66,0	65,0	67,0	1,265
5	78,0	75,0	75,0	75,0	73,0	73,0	74,8	1,835
6	82,0	81,0	78,0	78,0	77,0	75,0	78,5	2,588
7	75,0	75,0	68,0	69,0	70,0	72,0	71,5	3,017
8	75,0	76,0	72,0	72,0	73,0	70,0	73,0	2,191
9	78,0	76,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,7	1,211

**QUADRO 3B - Valores de Teores de Umidade Obtidos Durante os Testes com o Café em Coco**

Teste Nº	Teor de Umidade (% b.u.)				Media	Desvio- Padrão
	1	2	3	4		
1	66,4	64,3	65,1	65,2	65,3	0,85
2	59,4	59,4	59,3	59,1	59,3	0,13
3	48,3	46,7	48,1	47,4	47,2	0,76
4	39,0	41,4	39,3	41,1	40,2	1,25
5	30,4	31,2	30,5	31,4	30,9	0,51
6	22,4	22,6	23,9	24,2	23,3	0,90
7	17,1	17,2	16,1	17,0	16,9	0,52
8	13,7	14,4	14,3	12,9	13,8	0,69
9	11,9	12,1	11,9	12,3	12,1	0,19

**QUADRO 4B - Valores da Massa Específica Global Obtidos Durante os Testes com Café em Coco**

Teste Nº	Massa Específica Global (kg.m <sup>-3</sup> )						Media	Desvio- Padrão
	1	2	3	4	5	6		
1	576,2	566,0	571,7	562,5	558,1	565,4	566,7	6,47
2	549,0	561,1	546,9	551,5	549,2	545,2	550,5	5,63
3	514,3	515,9	514,8	520,9	517,9	517,4	516,9	2,43
4	470,9	464,8	462,6	463,0	465,2	474,8	466,9	4,89
5	417,7	418,1	412,4	426,2	415,2	419,1	418,1	4,64
6	401,2	403,0	393,1	401,1	403,0	403,3	400,8	3,89
7	401,2	392,3	395,0	392,5	390,3	396,9	394,7	3,93
8	396,2	398,2	399,5	395,8	394,6	401,3	397,6	2,52
9	389,0	384,5	390,5	393,2	384,5	383,5	387,5	3,93

**QUADRO 5B - Caracterização do Lote de Cafe em Coco Utilizado no Experimento**

	Caracterização do Café (%)			Média (%)
	1	2	3	
Café em coco	95,26	96,37	95,63	95,75
Cafe despulpado	3,24	2,43	2,93	2,87
Impurezas	1,50	1,20	1,44	1,38

Teor de umidade: 1,46 b.s.

**QUADRO 6B - Tamanho dos Grãos de Cafe em Coco Utilizado no Experimento**

	Tamanho dos Grãos de Café (%)			Media (%)
	1	2	3	
Maior 9,52mm	79,34	80,70	84,09	81,38
Menor 9,52mm	20,66	19,30	15,91	18,62

Teor de umidade: 1,46 b.s.

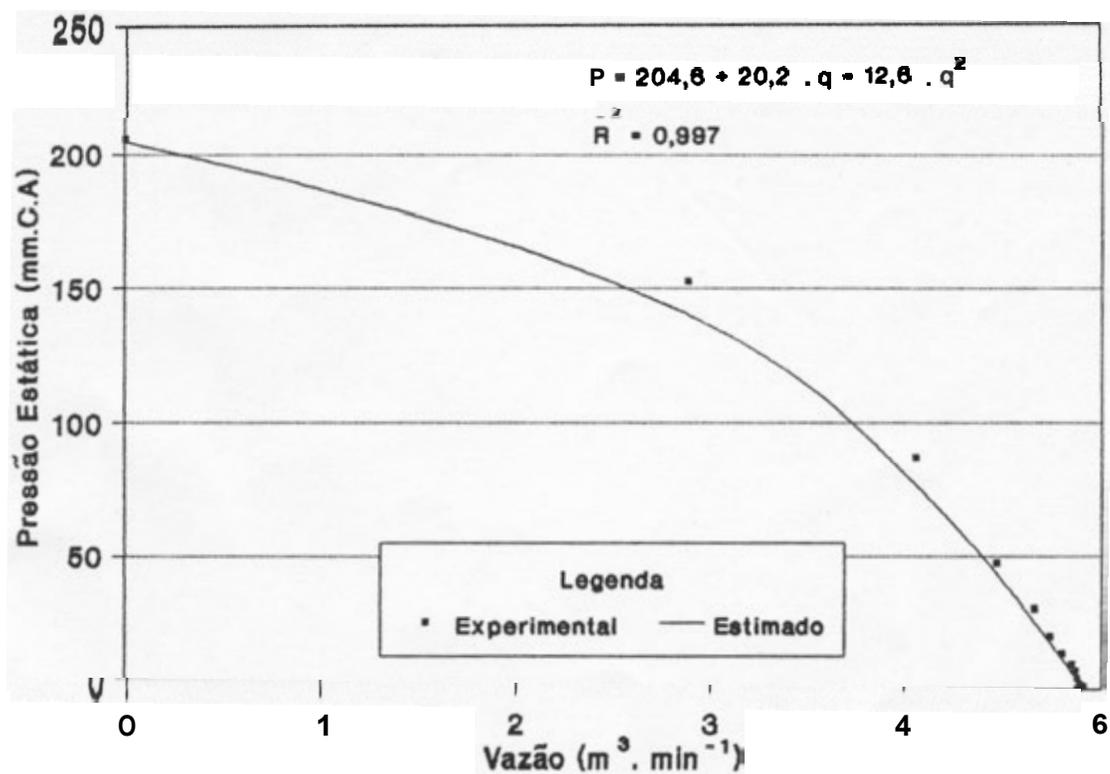


FIGURA 1B - Curva Característica do Ventilador Centrífugo Utilizado no Experimento.

## APÊNDICE C

QUADRO 1C - Estimativa dos Parâmetros da Regressão e dos Coeficientes de Determinação Ajustados para o Gradiente de Pressão Estática em Função da Densidade de Fluxo de Ar

Teor de Umidade (b.s.)	Estimativa dos Parâmetros		$\bar{R}^2$
	$b_0$	$b_1$	
1,89	0,3361213	1,9822779	0,962
1,46	0,2405474	2,1278296	0,987
0,91	0,7437287	1,7518597	0,977
0,67	0,3753200	1,9685011	0,980
0,45	1,0742435	1,6375113	0,994
0,30	1,1380253	1,5973196	0,985
0,20	0,9627914	1,6726208	0,999
0,16	0,7011906	1,8142710	0,996
0,14	0,9040480	1,7724876	0,997

**QUADRO 2C - Estimativa dos Parâmetros da Regressão e dos Coeficientes de Determinação Ajustados para o Gradiente de Pressão Estática em Função da Densidade de Fluxo de Ar e do Teor de Umidade Abaixo do Ponto de Meia-seca**

Estimativa dos Parâmetros			
$b_0$	$b_1$	$b_2$	$\bar{R}^2$
0,4597892	1,8360929	0,0019990	0,978
0,6498491	1,8164797	---	0,978
58,5119171	---	-0,3716315	0,104

**QUADRO 3C - Estimativa dos Parâmetros da Regressão e dos Coeficientes de Determinação Ajustados para o Gradiente de Pressão Estática em Função da Densidade de Fluxo de Ar e do Teor de Umidade Acima do Ponto de Meia-seca**

Estimativa dos Parâmetros			
$b_0$		$b_2$	$\bar{R}^2$
0,4597052	1,8745909	0,0015987	0,970
0,0003565	3,9826756	---	0,972
130,2722630	---	-0,0604255	0,072

**QUADRO 4C - Estimativa dos Parâmetros da Regressão e dos Coeficientes de Determinação Ajustados para o Gradiente de Pressão Estática em Função da Densidade de Fluxo de Ar e da Massa Específica Global para o Café em Coco com Teor de Umidade Abaixo do Ponto de Meia-seca**

---

Estimativa dos Parâmetros			
$b_0$	$b_1$	$-b_3$	$\bar{R}^2$
2,6280937	1,7170467	0,3387965	0,978
0,6498491	1,8164797	---	0,978
	---		

---

**QUADRO 5C - Estimativa dos Parâmetros da Regressão e dos Coeficientes de Determinação Ajustados para o Gradiente de Pressão Estática em Função da Densidade de Fluxo de Ar e da Massa Específica Global para o Café em Coco com Teor de Umidade Acima do Ponto de Meia-seca**

---

Estimativa dos Parâmetros			
$b_0$	$b_1$	$-b_3$	$\bar{R}^2$
1,8510408	1,8202524	0,1796504	0,971
0,0003565	3,9826756	---	0,972
	---		

---