

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA
AGRÍCOLA**

**QUEDA DE PRESSÃO ESTÁTICA ATRAVÉS DE UMA MASSA DE
FRUTOS DE AMENDOIM (*Arachis hypogaea* L.) E OS PRINCIPAIS
FATORES QUE A INFLUENCIAM**

QUEDA DE PRESSÃO ESTÁTICA ATRAVÉS DE UMA MASSA DE FRUTOS DE AMENDOIM (*Arachis hypogaea L.*) E OS PRINCIPAIS FATORES QUE A INFLUENCIAM.

629.1.022.1 Neves, Elisabinda das

1218p Queda de pressão estática

de frutos de amendoim (A)

os principais fatores que

Grande, 1996.

103f. : il.

Trabalho - Universidade Federal

BIOGRAFIA DO AUTOR

ELETISANDA DAS NEVES, filha de Severino Cândido da Neves e Maria José das Neves, nasceu em Taguatinga - Distrito Federal, em 15 de novembro de 1966.

Em 1992, graduou-se em Engenharia Agrícola, pela Universidade Federal da Paraíba, campus de Campina Grande.

Em março de 1993 ingressou no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, em nível de Mestrado, na Universidade Federal da Paraíba, campus de Campina Grande.

Eletisanda das Neves

Engenheira Agrícola

**QUEDA DE PRESSÃO ESTÁTICA ATRAVÉS DE UMA MASSA DE
FRUTOS DE AMENDOIM (*Arachis hypogaea L.*) E OS PRINCIPAIS
FATORES QUE A INFLUENCIAM**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba em cumprimento às exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração : Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas.

Orientador : Prof. Dr. José Helvecio Martins, Universidade Federal de Viçosa - UFV.

Co-Orientador : Prof. M.Sc. Mozaniel Gomes da Silva,

Universidade Federal da Paraíba - UFPB.

Campina Grande - PB

Março -1996



N518q Neves, Eletisanda das.
Queda de pressão estática através de uma massa de frutos de amendoim (*Arachis hypogaea* L.) e os principais fatores que a influenciam / Eletisanda das Neves. - Campina Grande, 1996.
103 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.

1. Amendoim - (*Arachis Hipogaea* L.) - Frutos. 2. Armazenamento de Produtos Agrícolas. 3. Pressão Estática - Queda. 4. Dissertação - Engenharia Agrícola. I. Martins, José Helvecio. II. Silva, Mozaniel Gomes da. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título


CDU 631.563.9(043)


Eletisanda das Neves


**QUEDA DE PRESSÃO ESTÁTICA ATRAVÉS DE UMA MASSA DE FRUTOS
DE AMENDOIM (*Arachis hypogaea* L.) E OS PRINCIPAIS FATORES QUE A
INFLUENCIAM**

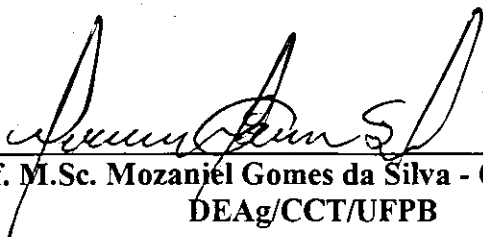
Dissertação defendida e aprovada, em 14 de março de 1996

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. José Helvecio Martins - Orientador
DEA/UFV/Viçosa - MG


Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida - Examinador
DEAg/CCT/UFPB


Prof. Dr. Ítalo Ataíde Notaro - Examinador
DEAg/CCT/UFPB


Prof. M.Sc. Mozaniel Gomes da Silva - Co-Orientador
DEAg/CCT/UFPB

Campina Grande - PB
Março - 1996

À Ruth, secretária da Coordenação de Pós-Graduação de Engenharia Agrícola, pela compreensão nos momentos de dificuldade, colaboração e amizade.

À amiga Lindéia Araújo do curso de Engenharia Química, pela valiosa ajuda durante a execução do experimento.

À amiga Ana Goldfarb do curso de mestrado em Armazenamento, pela valiosa ajuda, apoio e incentivo.

Aos colegas do curso de mestrado em Armazenamento, em especial a minha turma (Kátia Cristina, Rosânia e Carlos Alberto), pelas horas de boa convivência e grande amizade.

Aos colegas do curso de mestrado em Irrigação, especialmente ao colega Messias Firmino de Queiroz, pelo exemplo de amizade.

Aos colegas do curso de graduação em Engenharia Agrícola, pela boa convivência.

Ao Laboratório de Meteorologia e Sensoriamento Remoto (LMSR), por conceder os dados de pressão atmosférica.

Ao Laboratório de Engenharia Elétrica, pelo conserto do equipamento utilizado no experimento.

Enfim, à todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para o êxito deste trabalho; o meu muito obrigado.

"A Severino e Maria José , meus pais
A José, João, Leôncio, Edime, meus irmãos.
Pelas suas presenças em minha vida"
Ofereço.

"A José Carlos Gomes, amigo cuja presença me traz alegria, cujo silêncio me transmite paz, cuja escuta inspira confiança, cuja lembrança infunde coragem... pelo grande carinho, amizade e grande incentivo nos momentos difíceis"

Dedico.

Eletisanda das Neves

Epígrafe

“Você deve se conformar, se não pôde realizar uma obra. Mas nunca se conforme se não tentou realizá-la.

Uma coisa é o insucesso do apostolado e outra, muito diferente, é o insucesso do apóstolo. Não tenha medo do primeiro e não sobrecarregue sua consciência com a responsabilidade do segundo.”

Obrigada DEUS ! Pelo sucesso alcançado da realização desta obra.

SUMÁRIO

Página

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	19
CAPÍTULO II - REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1. Efeito do teor de umidade.....	24
2.2. Efeito da espessura da camada.....	30
2.3. Efeito do método de enchimento.....	38
2.4. Efeito da percentagem de impurezas.....	41
2.5. Efeito da temperatura do ar.....	49
2.6. Efeito do fluxo de ar.....	50
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1. Equipamento.....	53
3.2. Matéria prima.....	57
3.3. Propriedades físicas.....	58
3.4. Teor de umidade.....	61
3.5. Espessura da camada.....	62
3.6. Método de enchimento.....	63
3.7. Teor de impurezas.....	63
3.8. Temperatura do ar.....	64
3.9. Fluxo de ar.....	64
3.10. Delineamento experimental.....	65

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1. Propriedades físicas das grãos.....	67
4.2. Efeito do teor de umidade.....	69
4.3. Efeito da espessura da camada.....	76
4.4. Efeito do método de enchimento.....	81
4.5. Efeito do teor de impurezas.....	86
4.6. Efeito da temperatura do ar.....	91
4.7. Efeito do fluxo de ar.....	93
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES.....	95
CAPÍTULO VI- RECOMENDAÇÕES.....	97
CAPÍTULO VII- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1- Características agronômicas e tecnológicas do amendoim cultivar BR-1.....	58
2- Propriedades físicas dos frutos de amendoim.....	68
3- Características físicas dos frutos de amendoim para um teor de umidade de 10% b.u. (médias de 100 frutos).....	69
4- Análise de variância da queda de pressão estática através de uma massa de frutos amendoim casca, com 0% de teor de impureza, espessura da camada de 1,0m, método de enchimento livre e temperatura do ar de 26,7°C.....	73
5- Teste de comparação das médias da pressão estática em função do teor de umidade e do fluxo de ar, usando o Teste de Tukey.....	75
6- Teste das médias da interação do teor de umidade e fluxo de ar pelo Teste de Tukey.....	76
7- Análise de variância da queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, com 0% de impureza, teor de umidade de 10% b.u., método de enchimento livre e temperatura do ar 26,7°C.....	78

- 8- Teste de comparação das médias da pressão estática em função da espessura da camada e do fluxo de ar, usando o Teste de Tukey para um teor de umidade de 10% b.u.....80
- 9- Teste das médias de interação da espessura da camada e fluxo de ar pelo Teste de Tukey, para um teor de umidade de 10% b.u.....81
- 10- Variação da massa específica aparente e da porosidade da massa de frutos amendoim, em relação aos métodos e enchimento, para um teor de umidade de 10% b.u.....83
- 11- Análise de variância da queda de pressão estática através da massa de frutos amendoim, com 0% de impureza, 10% teor de umidade, espessura de 1,0m e temperatura do ar de 26,7⁰C, em função dos métodos de enchimento utilizados.....84
- 12- Teste de comparação das médias de pressão estática em função do método de enchimento e do fluxo de ar, usando o Teste de Tukey, para um teor de umidade de 10% b.u.....85
- 13- Teste das médias de interação do método de enchimento e fluxo de ar pelo Teste de Tukey, para um teor de umidade de 10% b.u.....86
- 14- Análise de variância da queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, com 10% b.u. de teor de umidade, espessura da camada de 1,0m temperatura do ar de 26,7⁰C.....89

- 15- Teste de comparação das médias de pressão estática em função da percentagem de impurezas e do fluxo de ar, usando o Teste de Tukey, para um teor de umidade de 10 % b.u.....90
- 16- Teste das médias de interação da percentagem de impureza e fluxo de ar pelo Teste de Tukey, para um teor de umidade de 10% b.u..... 91
- 17- Análise de variância da queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, com 0% de impureza, teor de umidade de 10% b.u., espessura da camada de 1,0m e método de enchimento livre.....93

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1- Visão geral do equipamento experimental.....	56
2- Queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim (mm ca/m) em função do fluxo de ar para vários teores de umidade (%b.u.).....	70
3- Variação da massa específica aparente dos frutos de amendoim, em função do seu teor de umidade.....	71
4- Variação da porosidade da massa de frutos de amendoim, em função do teor de umidade.....	72
5- Queda de pressão estática (mm ca/m) em função do fluxo de ar para várias espessuras da camada (m) de frutos amendoim.....	77
6- Queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim (mm ca/m) em função do fluxo de ar para diferentes de métodos de enchimento.....	82
7- Queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim (mm ca/m) em função do fluxo de ar para percentagens de impureza...87	

- 8- Variação da massa específica aparente da massa de frutos de amendoim em função da percentagem teor de impurezas, para um teor de umidade 10% b.u.....88
- 9- Variação da porosidade da massa de frutos de amendoim, em função do percentagem de impurezas, para um teor de umidade de 10% b.u.....88
- 10- Queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim (mm ca/m) em função do fluxo de ar para temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$), para um teor de umidade de 10% b.u.....92

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi estudar os fatores que influenciam na queda de pressão estática em frutos de amendoim, variedade BR-1, pertencente ao grupo Spanish, produzida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-CNPA/EMBRAPA, plantada nas regiões denominadas Brejo e Agreste no Estado da Paraíba. Avaliou-se neste trabalho os efeitos do teor de umidade (8,0; 12,3; 20,0; 30,4 e 45,4% b.u.), espessura da camada (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 m), método de enchimento da coluna de secagem (livre, jorro e elevador de canecas), percentual de impurezas (0, 6, 10 e 15 %), temperatura do ar de secagem (26,7; 42,42; 51,25; 71,1 e 85,1°C) e taxa de fluxo de ar (7,27; 21,88; 44,86; 62,85 e 85,85 m³/min.m²) sobre a queda de pressão estática de uma massa de frutos de amendoim. Os resultados obtidos permitiram concluir que para os frutos de amendoim, variedade BR-1, houve um acréscimo na pressão estática com o aumento do teor de umidade, espessura da camada e da taxa de fluxo de ar. Porém, à medida em que os percentuais de impurezas da própria cultura, com granulometria maior que a dos frutos, foram adicionada à massa do produto observou-se uma redução na queda de pressão estática. Ficou evidenciado que, para a faixa de temperatura de 26,7 a 85,1°C, ocorreram variações na queda de pressão estática, atingindo um valor mínimo de 0,58 mm ca/m para uma temperatura do ar de 85,1°C e um máximo de 2,80 mm ca/m para uma temperatura do ar de 51,25°C, considerando uma taxa de fluxo de ar de 7,27 m³/min.m². Dos três métodos de enchimento utilizados, o método elevador de canecas foi o que resultou em maior queda de pressão estática, devido à altura de queda utilizada no enchimento da coluna, que pode ter causado maior compactação na massa de frutos de amendoim.

ABSTRACT

The objective of this work was to study the factors that influence the static pressure drop throughout a mass of peanuts, strain BR-1, belonging to the Spanish group, produced by Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-CNPA/EMBRAPA, planted in the Brejo and Agreste regions in the State of Paraíba-Brazil. The effects of moisture contents (8.0, 12.3, 20.0, 30.4, and 45.4%), layer thickness (0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 m), drying column filling method (free, gush, and bucket elevator), impurity percentage (0, 6, 10, and 15%), drying air temperature (26.7, 42.42, 51.25, 71.1, and 85.1 °C), and airflow rate (7.27, 21.88, 44.86, 62.85, and 85.85 m³/min.m²) were evaluated. The results allowed to conclude that, for BR-1 peanuts variety, there was an increase in the static pressure drop with increasing moisture content levels, layer thickness, and airflow rates. However, as increasing percentages of impurities of the crop with dimensions greater than the peanuts were added to the product mass, it was observed variations in static pressure drop for the temperature range of 26.1 to 85.1 °C, reaching a minimum of 0.58 mm of water column/m for an air temperature of 85.1 °C, and a maximum of 2.80 mm of water column/m for an air temperature of 51.25 °C, at an airflow rate of 7.27 m³/min.m². Of the three filling methods used, the bucket elevator was the one that resulted in the greatest static pressure drop due to the product drop height utilized, that may have caused greater compacting of the peanuts mass.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O conhecimento da resistência ao fluxo de ar quando este atravessa uma massa de produtos agrícolas é de fundamental importância em projetos de equipamentos para o seu processamento e armazenamento. Quando o ar é forçado a atravessar uma camada de produto granular, a resistência ao fluxo, também denominada pressão estática, desenvolve-se como resultado da perda de energia por atrito e turbulência, gerados no meio poroso. É imprescindível que o ar possua uma certa pressão para poder vencer tal resistência com a vazão desejada. A perda de pressão do fluxo de ar através da massa de produtos agrícolas depende do teor de umidade, espessura da camada do produto, método de enchimento do silo, teor de impurezas no meio, fluxo de ar, características físicas do produto e porosidade da massa granular, sendo portanto de fundamental importância o conhecimento destes fatores e suas relações e/ou interação para a simulação matemática dos processos de secagem, limpeza, classificação, transporte, armazenamento e industrialização.

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) é uma planta dicotiledônea, da família Leguminosae, subfamília Papilionoideae, gênero *Arachis*, de considerável importância econômica, cultivada em todas as regiões do Brasil. Possui elevado valor nutritivo, sendo amplamente utilizada na alimentação humana e animal, tornando-se uma excelente matéria prima para as indústrias de alimentos.

Segundo **EMBRAPA (1995)**, no período de 1994/95, foram cultivados 100.000 hectares com amendoim na região Nordeste, com uma produção de cerca de 150.000 toneladas.

A espécie cultivada, *Arachis hypogaea L.*, está dividida em três grupos: Virgínia, Valência e Spanish. Neste trabalho estudou-se a cultivar BR-1, que pertence ao grupo Spanish, produzida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária- CNPA/EMBRAPA de Campina Grande-PB. A mesma produz em média 1.700 kg de amendoim em casca por hectare, quando cultivado em sequeiro e 3.000 kg/ha quando irrigado (**EMBRAPA, 1995**). No estado da Paraíba a cultivar BR-1 é plantada nas regiões denominadas Brejo e Agreste.

A colheita do amendoim é feita a partir de 89 dias após a emergência, quando as folhas se tornam amarelas e os grãos ficam com a casca fina e com manchas marrons nas partes internas (**EMBRAPA, 1995**), ou quando estes atingem um teor de umidade em torno de 45% b.u..

Os métodos de remoção de parte da água contida nos grãos de amendoim a um nível que o produto possa ser armazenado com segurança (8 - 10% de umidade, b.u.), são a secagem natural (na planta) ou em terreiro, quando as condições climáticas locais permitem a sua realização, e a secagem artificial em secadores mecânicos com ventilação natural ou forçada através da massa de frutos, por meio de ventiladores, independentemente das condições atmosféricas reinantes no momento da secagem.

Diante das necessidades do conhecimento prévio da pressão estática a ser vencida pelo sistema motor ventilador em sistemas de aeração e secagem, decorrente da resistência apresentada pela massa porosa ao fluxo de ar, este trabalho teve por objetivo avaliar o efeito dos seguintes fatores

sobre a queda de pressão em uma massa de frutos de amendoim, variedade
BR-1:

- 1.1. Teor de umidade;
- 1.2. Espessura da camada ;
- 1.3. Método de enchimento;
- 1.4. Percentagem de impurezas;
- 1.5. Temperatura do ar de secagem;
- 1.6. Fluxo de ar;

CAPÍTULO II

REVISÃO E LITERATURA

A estocagem do amendoim pode ser feita tanto do produto em casca como em sementes. A armazenagem em casca é a mais indicada quando se deseja estocar sementes para o próximo plantio. Este armazenamento pode ser realizado em sacos de náilon ou em silos armazenadores, preferencialmente com sistemas de aeração que permitem prevenir o aquecimento e o umedecimento dos grãos, preservando a qualidade do produto.

Um bom sistema de secagem e armazenagem influi no processo de comercialização, pois tem certo controle sobre a movimentação da produção bem como sobre os preços dos produtos na entressafra. Deve possuir características técnicas tais que, ao longo do período de armazenagem, as propriedades dos produtos sejam mantidas até haver o processamento e sua utilização.

- Estudos realizados por Muir (1973) e Stewart (1975) citados por **GUNASEKARAN et al. (1983)** mostram que as variações diurnas e periódicas nas condições ambientais induzem gradientes de temperatura dentro de grandes massas de grãos. Tais gradientes causam correntes de convecção de ar intergranular, as quais carregam umidade de um lugar para outro, ocasionando umidade elevada em regiões localizadas. Para Hukill (1953) e Converse (1973) citados por **GUNASEKARAN et al.**

(1983) estas variações favorecem o aumento na atividade de microorganismos e insetos, aumentando o risco de deterioração da massa ensilada.

Quando o grão é armazenado, seu teor de umidade e sua temperatura iniciais podem ser relativamente uniformes dentro do silo, mas isto não garante, necessariamente, uma armazenagem segura e prolongada (Gough, 1985) citado por SILVA et al. (1993). Mudanças de temperatura, sazonais ou causadas pela variação dia-noite e a radiação solar, são fatores que levam a parte externa do grão a perder ou ganhar calor, induzindo à criação de gradientes de temperatura na massa de grãos (Obaldo, 1990) citado por SILVA et al. (1993). Uma vez que o grão não é bom condutor de calor, a parte externa da massa de grãos aproxima-se da temperatura do ambiente e o centro da massa mantém sua temperatura original. Os gradientes de temperatura causam diferenças na densidade do ar nos espaços intergranulares e, conseqüentemente, correntes convectivas de circulação de ar são estabelecidas nos silos. O ar frio é mais denso, desloca o ar quente que sobe através da massa de grãos. Como a condutividade térmica do grão é muito menor que a do ar, o ar frio que penetrará na massa de grãos quente irá aumentar sua temperatura até à temperatura ao redor dos grãos (MOHSENIN, 1980). O ar quente sobe, repetindo-se o processo, e um ciclo de fluxo de ar é criado no silo. Este movimento pode carregar umidade e calor, ou ambos, de uma região de alta temperatura para uma região de baixa temperatura (HALL, 1980).

Geralmente, em condições de clima tropical, o grão é colhido com um teor de umidade acima do ideal para o armazenamento. Antes de serem armazenados, os grãos devem ser secados ou conservados a frio. Como o processo de conservação a frio eleva o custo do projeto, costuma-se utilizar a secagem por um processo de ventilação natural ou forçada. A

secagem artificial por meio de secadores com ventilação forçada é comumente utilizada em razão da rapidez e segurança no atendimento da produção agrícola que chega à unidade armazenadora.

Paralelamente com a secagem utiliza-se o processo de aeração que visa manter o grão a uma temperatura suficientemente baixa para assegurar uma boa conservação.

A determinação da resistência ao fluxo de ar apresentada pela massa de grãos, medida pela queda de pressão estática, é ponto de partida para o desenvolvimento de projetos de secagem e aeração. Tal fato evidencia-se porque alguns projetistas avaliam a queda na pressão através da massa de grãos utilizando os dados obtidos por **SHEDD (1953)**. De acordo com Lasseran (1981) citado por **SILVA (1992)**, faz-se necessária a escolha adequada de ventiladores para fornecer uma certa vazão de ar sob determinada pressão, sendo que o seu desempenho depende principalmente desses dois parâmetros. A vazão está relacionada com a pressão, sendo que o aumento de uma implica na redução da outra.

O cálculo da potência do ventilador é função da vazão de ar, pressão estática total e eficiência do ventilador. Convencionalmente, essa pressão é determinada por meio de equações ou gráficos que relacionam a queda de pressão por unidade de espessura da camada do produto com o fluxo de ar, ou seja, com a vazão do ar por unidade de área.

2.1. Efeito do teor de umidade

O efeito do teor de umidade na queda de pressão através de uma camada de grãos poderá aumentar ou diminuir, dependendo das características físicas do grão.

De acordo com **SILVA et al. (1993)**, em testes realizados com grãos de milho utilizando um fluxo de ar de $8,6 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$, a pressão estática não sofreu alterações significativas, variando o teor de umidade dos grãos. Para taxas de fluxo de ar superiores a $13,6 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$, houve variações mais acentuadas na pressão estática com a variação do teor de umidade.

AKTRIDIS e SIATRAS (1979) trabalharam com sementes de abóbora com teores de umidade variando de 30,5 a 6,9%, base úmida, e fluxos de ar na faixa de 1,6 a $31,5 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$. Concluíram que utilizando uma taxa de fluxo de ar acima de $10 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ a queda de pressão diminuiu com o decréscimo de umidade até um mínimo e em seguida passou a aumentar. Abaixo de $10 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ uma variação no teor de umidade não influenciou significativamente na queda de pressão.

HAQUE et al. (1982), analisando a queda de pressão em sementes de milho, sorgo e trigo com teores de umidade variando de 12,4 a 25,3%, concluíram que a resistência ao fluxo de ar decresceu com o aumento do teor de umidade dos grãos. Apresentaram um modelo estatístico linear relacionando o teor de umidade do produto com a pressão estática.

PATTERSON et al. (1971) estudaram a relação entre a pressão estática e fluxo de ar através de uma camada de milho e feijão, analisando o efeito do teor de umidade do produto sobre a queda de pressão através do meio poroso. Concluíram que os dois tipos de grãos estudados reagiram diferentemente a variações do teor de umidade. A pressão estática aumentou com a elevação do teor de umidade para o caso de grãos de milho, ao contrário do que ocorreu com grãos de feijão.

JAYAS et al. (1987) estudaram o efeito do teor de umidade na queda de pressão para duas variedades de canola (Tobin e Westar),

concluindo que um aumento na umidade resultou na redução da queda de pressão.

Nellist e Rees, citados por **SILVA (1992)**, analisando a queda de pressão em sementes de hortaliças, feijão e milho, concluíram que a resistência oferecida pela massa granular ao fluxo de ar foi menor para sementes reumedecidas do que para sementes secas.

Siebenmorgen e Jindal, citados por **SILVA e DALPASQUALE (1993)**, estudando o efeito do teor de umidade na pressão estática através de uma camada de grãos, concluíram que elevando-se o teor de umidade do produto em 1%, a resistência apresentada ao fluxo de ar decresceu em, aproximadamente, 3,7%.

SHEDD (1951) conduziu testes com grãos de milho sob várias condições de teor de umidade e material estranho, aveia a três diferentes teores de umidade, arroz com casca a dois diferentes teores de umidade e livre de impureza, soja e cravo de variedades Red e Alsike, fazendo-se o enchimento do silo pelo método de enchimento livre e pelo método de enchimento compactado. Concluiu que o teor de umidade do grão foi um fator importante, uma vez que o grão úmido não compacta tão firmemente quanto o grão seco e a resistência ao fluxo de ar foi menor com o grão úmido .

JAYAS et al. (1991 a) estudaram a resistência ao fluxo de ar através de um leito de sementes de linho, em função do teor de umidade, direção do fluxo de ar e presença de material estranho. Com teores de umidade variando de 12 a 6,9%, base úmida, concluíram que com o aumento no teor de umidade de 6 para 9%, a queda de pressão através da massa de semente de linho, para o fluxo de ar horizontal, decresceu em torno de 14%, para todos os fluxos de ar utilizados.

Com um novo aumento no teor de umidade para 12%, a resistência ao fluxo de ar não teve variação significativa. Por outro lado, para fluxos de ar na direção vertical, a variação na resistência ao fluxo de ar não foi considerável, com relação à variação do teor de umidade. Observaram também que um aumento no teor de umidade de 6 para 9%, proporcionou um decréscimo na massa específica das sementes de linho de, aproximadamente, 664 para 654 kg/m³. Um novo aumento no teor de umidade para 12% não resultou em variação considerável na massa específica. Com o mesmo aumento no teor de umidade (6 para 12%), a porosidade aumentou ligeiramente de 42,5 para 43,5%. Esse decréscimo na massa específica e o aumento na porosidade indicaram que, com um aumento no teor de umidade, as amostras com 9 e 12% de teor de umidade apresentaram menor compactação do que aquelas com 6% de teor de umidade. Essas amostras menos compactadas, forneceram menor queda de pressão através da massa de grãos. Este efeito foi observado para o fluxo de ar na direção horizontal mas não para o fluxo de ar na direção vertical.

STEELE (1974) estudou a queda de pressão estática em sementes de amendoim, variedade 61R, em função do teor de umidade, que variou de 62,5 a 8,7% b.u, e com fluxos de ar variando de 1,5 a 30,5 m³/min.m², utilizando uma coluna com altura aproximada de 1,22 m. Concluiu que a resistência ao fluxo de ar através de sementes de amendoim aumentou linearmente com o teor de umidade.

Shedd, citado por **CALDERWOOD(1973)**, concluiu que a resistência ao fluxo de ar em arroz com casca foi reduzida em 24% quando o teor de umidade aumentou de 13,4% para 20,7% b.u.

PATIL e WARD (1988) determinaram a resistência ao fluxo de ar em sementes de colza (variedade Tower), para um fluxo de ar variando de

0,17 a 0,32 m³/s.m² As amostras foram condicionadas para níveis de umidade na faixa de 19,6 a 6,5% (base úmida). Concluíram que a massa específica decresceu linearmente com um aumento no teor de umidade e que as sementes apresentaram uma menor resistência à passagem do fluxo de ar para teores de umidade mais elevados.

O efeito da umidade sobre a queda de pressão é diferente para diferentes produtos. O decréscimo na queda de pressão com o aumento no teor de umidade confirma as observações de **SHEDD (1951)** para o milho, **PATTERSON et al. (1971)** para o feijão marinho, e **AKTRIDIS e SIATRAS (1979)** para sementes de abóbora a baixo fluxos de ar. O decréscimo na queda de pressão com aumento no teor de umidade pode ser causado pelo fato de que, para teores de umidade elevados, as sementes em geral não sofrem grande compactação, oferecendo menor resistência ao fluxo de ar.

GUNASEKARAN e JACKSON (1988) trabalharam com grãos de sorgo com níveis de umidade variando entre 23 a 16,5% b.u. e taxa de fluxo de ar variando de 0,05 a 0,30 m³/s.m². Concluíram que a resistência ao fluxo de ar aumentou com o decréscimo do teor de umidade .

A massa específica do grão decresceu de 724 para 663 kg/m³ quando o teor de umidade aumentou de 16,5 para 23% b.u. **SHEDD (1953)** observou uma massa específica de 760 kg/m³ para o sorgo a 13%. Este valor elevado da massa específica associado ao teor de umidade baixo, pode também ter causado uma elevada queda de pressão observada por **SHEDD (1953)**. Portanto, pode ser inferido que teores de umidade baixos (e valores de massa específica elevados) elevam a queda de pressão através da massa de grãos em qualquer taxa de fluxo de ar fornecida .

SOKHANSANJ et al. (1990) estudaram o efeito do teor de umidade na resistência ao fluxo de ar para duas variedades de sementes de lentilhas (Laird e Eston). Os teores de umidade variaram de 19,9 a 10,4% b.u. Concluíram que um aumento no teor de umidade das lentilhas, variedade Laird, de 9,5 pontos percentuais causou um decréscimo na queda de pressão de, aproximadamente, 22,5%. Novas análises dos dados mostraram que, para sementes de lentilhas, variedade Laird, um acréscimo no teor de umidade de 1% causou um decréscimo de, aproximadamente, 2,3% na queda de pressão para taxas de fluxo de ar entre 0,0028 e 0,2930 m³/s.m², e um decréscimo de, aproximadamente, 3,0% na queda de pressão para taxas de fluxo de ar entre 0,2930 e 0,5926 m³/s.m². Para a variação total do fluxo de ar, a queda de pressão decresceu, em média, 2,4% para um aumento no teor de umidade de 1 ponto percentual. Esta redução na queda de pressão foi devido ao decréscimo na massa específica e um aumento na porosidade com o aumento do teor de umidade.

FARMER et al. (1981) analisaram a resistência ao fluxo de ar em sementes de grama, variedade Bluestem, em função de três diferentes períodos de colheita, teores de umidade variando de 79 a 17% b.s., graus de pureza de 10 a 17% e massa específica de 50 a 120 kg/m³. Compararam os resultados com sementes armazenadas com grau de pureza de 63% e colhidas anteriormente. Concluíram que, para uma massa específica de 50 kg/m³, a resistência ao fluxo de ar foi mais acentuada para as sementes que apresentaram menores teores de umidade (17,5 e 42,6% b.s.). Entretanto, para os teores de umidade de 47,8 e 78,6% b.s., e massa específica de 80 kg/m³, não houve diferenças acentuadas na queda de pressão estática.

2.2. Efeito da espessura da camada

Para que o ar possa atravessar um meio poroso é imprescindível que seja aplicada uma pressão adequada para vencer a resistência que lhe será oferecida, com uma vazão desejada. Essa resistência é função de vários fatores, dos quais destaca-se a espessura da coluna de produto. No entanto, outros parâmetros encontram-se interdependentemente ligados entre si, como massa específica e características físicas do produto (forma, tamanho, espaço intergranular).

O efeito da massa específica varia de acordo com a espessura da camada de produto, pelo menos para células de grandes diâmetros. A massa específica pode ser modificada após certas operações de aeração, que provoca uma ligeira secagem e uma compactação da massa do produto. Nos silos armazenadores, constata-se uma grande compactação nos primeiros dias após o seu enchimento, sendo que posteriormente o fenômeno evolui mais lentamente Lasseran (1981) citado por SILVA (1992).

Stierniman et al., citados por SILVA (1992), desenvolvendo trabalho com arroz, a fim de determinar a resistência apresentada ao fluxo de ar em diferentes profundidades, utilizaram sementes com teores de umidade variando de 8 a 14% b.u. e material estranho misturado à massa de grãos. Eles observaram que o fluxo de ar decresce linearmente com a espessura da camada de grãos, quando se usa escala logarítmica. Ajustaram ainda uma equação para o fluxo de ar em função da espessura da camada de arroz, para uma pressão atmosférica de 101,6 mm ca, da forma:

$$Q = 78 L^{-0,52} \quad (2.1)$$

em que

L = espessura da camada de arroz, m;

Q = fluxo de ar, m³/min.m².

SHEDD (1951) conduziu testes com milho sob várias condições de teor de umidade e material estranho, com aveia a três diferentes teores de umidade, arroz com casca a dois diferentes teores de umidade e livre de impureza, soja e cravo de variedades Red e Alsike. Todos os grãos foram testados com o silo cheio por dois métodos diferentes os quais foram chamados de enchimento livre e enchimento compactado. Concluiu que para as medições de pressão feitas a cada metro de profundidade, a resistência ao fluxo de ar aumentou proporcionalmente com a profundidade da camada de grãos.

SHEDD (1953), ao estudar a relação entre a perda de carga e o fluxo de ar para uma camada fixa de grãos, propôs a seguinte equação:

$$Q = a (P)^b \quad (2.2)$$

em que

Q = fluxo de ar, m³/min.m²;

P = queda de pressão por unidade de altura de grãos, mm ca/m;

a, b = parâmetros variáveis para cada tipo de produto.

A equação (2.2) apresenta o inconveniente de ser apropriada apenas para certas faixas de fluxos de ar, sendo, por isso, necessários vários valores de a e b para abranger a área de interesse da engenharia.

A fim de minimizar os inconvenientes da equação (2.2), Shedd e Hukill, citados por **DALPASQUALE (1993)**, apresentaram a seguinte equação:

$$P = \frac{aQ^2}{n(1 + bQ)} \quad (2.3)$$

em que as variáveis têm os mesmos significados da equação 2.2.

Há ainda outros modelos mais complexos que levam em consideração outros parâmetros como massa específica e teor de impurezas.

De acordo com Lasseran (1981) citado por SILVA (1992), sendo o ar impulsionado a uma velocidade constante em um meio poroso, a perda de pressão causada é proporcional à altura da massa granular. Tal perda de pressão pode ser determinada pela equação:

$$DP = P \times L \quad (2.4)$$

em que

L = altura da camada de grãos, m;

DP = perda total de pressão devido ao grão, mm ca;

P = perda de pressão por metro de altura, mm ca/m.

JAYAS et al. (1987), trabalhando com duas variedades de canola, Tobin (*Brassica campestris*) e Westar (*Brassica napus*), com teores de umidade variando de 6,5 a 14% b.u. e fluxo de ar na faixa de 0,0004 a 0,1584 m³/min.m², concluíram que a pressão estática em um leito de canola aumentou linearmente com o acréscimo da profundidade da coluna de sementes, até uma altura de 1,5 metros.

GUNASEKARAN et al. (1983), analisando a resistência ao fluxo de ar em sementes de arroz com casca para uma faixa de fluxo de ar variando de 0,001 a 0,3 m³/min.m², observaram que o aumento na queda de pressão através do leito de grãos foi proporcional à espessura de cada camada do produto, até uma altura de 30 centímetros. Finalmente, com os dados obtidos ajustaram uma relação linear em escala logarítmica da forma:

$$\log(Q) = \log(a) + b \times \log(P) \quad (2.5)$$

em que

Q = taxa de fluxo de ar, m³/min.m²;

P = queda de pressão, mm ca/m;

a,b = constantes características do produto.

WILHELM et al. (1983), estudando a queda de pressão em colunas de feijão de diversas variedades e ervilha em vagem, observaram que a relação entre pressão estática e espessura da camada e fluxo de ar foi linear para os produtos analisados, usando escala logarítmica. A inclinação desta linha foi constante entre os testes realizados para um dado produto, entretanto, a interseção apresentou uma substancial variação para cada produto.

GUNASEKARAN e JACKSON (1988) trabalharam com grãos de sorgo com teores de umidade de 16,5 ; 18,5 e 23%, base úmida, e espessura da camada de 1,5 a 12 m. Concluíram que a resistência ao fluxo de ar aumentou com a profundidade da camada e aumento na taxa de fluxo de ar. Foi observado que a queda de pressão aumenta mais rapidamente

com aumento nas velocidades do ar do que com aumento nas profundidades da camada. As linhas para diferentes profundidades da camada são quase paralelas, indicando inclinação quase constante. Observaram também que, duplicando a profundidade da camada de 1,5 para 3,0 cm, a uma taxa de fluxo de ar de $0,1 \text{ m}^3/\text{s.m}^2$, duplicou a queda de pressão de 30 para 60 Pa. Porém, duplicando a taxa de fluxo de ar de 6,0 para $12 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ para 1,5 cm de espessura da camada, a queda de pressão elevou de 30 para 70 Pa .

HUSAIN e OJHA (1969) estudaram a resistência ao fluxo de ar através da massa de três variedades indianas de arroz com casca (Dular, Taichungnative-1, Patnai-23) .

Esses autores desenvolveram uma correlação geral relacionada à pressão estática, taxas de fluxo de ar e espessura da camada de grãos, e ainda estudaram a distribuição da pressão ao longo da coluna de grãos no silo.

De posse dessas observações apresentaram a seguinte equação:

$$P = \frac{k}{Q^n} \quad (2.6)$$

em que

P = Pressão estática, mm ca;

Q = taxa de fluxo de ar, $\text{m}^3/\text{min.m}^2$;

$k = m L + c$;

$n = d L + e$;

L = espessura da camada de grãos, m;

m, c, d, e = constantes.

HUSAIN e OJHA (1969) avaliaram os parâmetros k e n para diferentes espessuras da camada e para diferentes variedades, concluindo-se que esses parâmetros variaram linearmente com espessura da camada na faixa de 70 a 130 cm. As equações ajustadas da pressão estática, em função da taxa de fluxo de ar e espessura da camada são apresentadas a seguir.

$$P = (0,032d - 1,32)Q^{2,14-0,0089L} \text{ (Dular)} \quad (2.7)$$

$$P = (0,045d - 1,32)Q^{1,52-0,0035L} \text{ (Taichungnative-1)} \quad (2.8)$$

$$P = (0,046d - 1,99)Q^{2,11-0,0076L} \text{ (Patnai-23)} \quad (2.9)$$

Stirniman et al., citado por **HUSAIN e OJHA (1969)**, conduziram testes sobre a resistência ao fluxo de ar através da massa de arroz com casca em um silo profundo e encontraram que a taxa de fluxo de ar por unidade de área da seção transversal do silo, diminui linearmente com a espessura da camada de arroz com casca em escala logarítmica a diferentes pressões estática.

HENDERSON (1943) estudou a resistência ao fluxo de ar através da massa de grãos de milho e das paredes do silo, incluindo fatores tais como compactação, presença de milho quebrado e material estranho, e alguns tipos de aberturas no fundo perfurado do silo sobre o fluxo de ar. Concluiu que a taxa de fluxo de ar pode ser expressa em função da queda de pressão estática pela equação :

$$Q = k(P)^c \quad (2.10)$$

em que

Q = taxa de fluxo de ar, $m^3/\text{min.m}^2$;

P = queda de pressão, mm ca;

k e c = constantes que dependem da espessura da camada de produto.

Os valores de k e c foram determinados para várias espessuras da camada na faixa de 0,305 m a 2,400 m. Assim, ajustaram-se as seguintes equações para estimar k e c em função da espessura da camada de produto:

$$k = 58,9L^{-0,66} \quad (2.11)$$

$$c = 0,562L^{0,089} \quad (2.12)$$

em que L é a espessura da camada do produto, em metro

HUSAIN e OJHA (1969) obtiveram novos ajustes para os parâmetros k e c da equação 2.10 e propuseram as seguintes expressões:

$$Q = \frac{58,9P^{0,562}L^{0,089}}{L^{0,66}} \quad (2.13)$$

Esta equação foi novamente aproximada para:

$$Q = \frac{59P^{0,63}}{L^{0,66}} \quad (2.14)$$

em que

Q = taxa de fluxo de ar, m³/min.m²;

P = queda de pressão, mm ca;

L = espessura da camada de grãos, m.

Esses mesmos autores concluíram ainda que a pressão estática (P) não é unicamente uma função da taxa de fluxo de ar (Q), mas também da percentagem de aberturas (p) na base da coluna de grãos no silo e pode ser expressa por:

$$Q = 3000P^{0,52p} \quad (2.15)$$

Observaram também que o gradiente de pressão ao longo da coluna de grãos no silo era uma linha reta e a inclinação variava com a percentagem de aberturas na base da coluna de grãos .

McEwen et al., citado por **HUSAIN e OJHA (1969)**, em estudos de secagem de trigo em camadas espessas, concluíram que :

(a) A queda de pressão (ΔP) através da coluna de trigo varia com o número de Reynold's (Re) de acordo com a seguinte equação:

$$P = k(Re)^n \quad (2.16)$$

em que n é igual a 1 para fluxo laminar e 2 para fluxo turbulento, e k constante que depende do produto.

(b) A queda de pressão é proporcional à espessura da camada (L), de acordo com a expressão:

$$\Delta P = L^{0,95} \quad (2.17)$$

(c) A queda de pressão estática em função do diâmetro equivalente
(d) do produto pode ser dada pelas seguintes expressões:

$$\Delta P = kd^{-3,16} \quad (\text{para o trigo}) \quad (2.18)$$

$$\Delta P = kd^{-2,85} \quad (\text{para a aveia}) \quad (2.19)$$

(d) A queda de pressão estática em função da porosidade (ϵ) é:

$$\Delta P = k\epsilon^{-2,75} \quad (2.20)$$

O parâmetro k nas equações 2.18, 2.19 e 2.20 é definido como uma constante que depende do produto.

SHELDON et al. (1969) determinaram a resistência ao fluxo de ar em sementes de milho e trigo para a faixa de 0,003 a 0,3 m³/min.m². Os dados de pressão estática foram obtidos para espessuras da camada variando de 0,15 a 3,0 m. Concluíram que a resistência ao fluxo de ar aumenta mais rapidamente com o fluxo de ar do que com a espessura da camada de grãos. Deste modo, duas vezes a espessura da camada de grãos proporcionou mais do que duas vezes a resistência .

2.3. Efeito do método de enchimento

JAYAS et al. (1987) estudaram a resistência ao fluxo de ar apresentada por sementes de canola (Rapeseed) variedades Tobin (*Brassica campestris*) e Westar (*Brassica napus*). As colunas de testes foram cheias utilizando-se dois métodos: 1) método de bica, que simula o enchimento livre, no qual as sementes foram lançadas em um funil com altura de queda zero e 2) método de jorro, onde as sementes foram lançadas a partir de uma altura de, aproximadamente, 20 cm com o auxílio de uma peneira, resultando em um enchimento mais compacto. Observaram que o método de jorro resultou em pressões 2,3 vezes maior

para a variedade Tobin com 6,5% de umidade, comparada com o método de bica, para teor de umidade e fluxo de ar semelhantes. Finalmente, concluíram que, considerando o efeito do método de enchimento no estudo do fluxo de ar em colunas de canola, o método de jorro apresentou maior adensamento da massa porosa em relação ao método de bica.

SILVA e DALPASQUALE (1993) investigaram a perda de carga em camadas fixas de guar, procedendo o enchimento das colunas de duas formas diferentes, permitindo avaliar a influência desses métodos na pressão estática. No primeiro caso a coluna foi montada parceladamente, e no segundo caso, a coluna foi montada e posteriormente procedeu-se ao carregamento. Concluíram que, considerando os coeficientes das equações de Shedd e Hukill, os modelos descreveram o processo com maior segurança na situação de enchimento parcelado, que é uma prática mais condizente com a situação real de trabalho por não considerar a ocorrência de compactação nas camadas inferiores. Em razão dos baixos coeficientes de determinação apresentados para a situação de enchimento não parcelado, propuseram o seguinte modelo:

$$P_e = c_0 + c_1\bar{Q} + c_2H + c_3Q^2 + c_4H^2 + c_5H \times Q \quad (2.21)$$

em que

P_e = pressão estática, mm ca;

Q = fluxo de ar, $m^3/\text{min}.m^2$;

H = altura da camada de grãos, m;

c_i = coeficientes de regressão ($i = 0, \dots, 5$).

SHEDD (1951) conduziu testes para determinar a resistência ao fluxo de ar em grãos de milho sob várias condições de teor de umidade e material estranho, aveia a três diferentes teores de umidade, arroz com casca a dois diferentes teores de umidade e livre de impureza, soja e cravo de variedades Red e Alsike. Os testes para todos os grãos foram realizados com o silo cheio por dois métodos diferentes, denominados de enchimento livre e enchimento compactado. Concluiu que o método do enchimento do silo tem uma grande influência sobre a resistência ao fluxo de ar através da massa de grãos. Verificou também que o método de enchimento compactado apresentou maior resistência à passagem do fluxo de ar em sementes de milho, quando comparado com o método de enchimento livre

JAYAS et al. (1991b) determinaram a resistência ao fluxo de ar através da massa de sementes de canola, variedade Tobin (*Brassica campestris*), com a presença de material estranho. As colunas de testes foram cheias utilizando-se dois métodos: 1) enchimento livre, onde a canola foi lançada dentro de um funil móvel e depois deixada fluir com altura de queda de aproximadamente, zero e 2) enchimento em jorro, no qual as amostras foram lançadas a partir de uma altura de, aproximadamente, 80 cm em forma de “chubarada”, resultando em um enchimento compactado. As massas específicas da canola foram 700 e 775 kg/m³ para o enchimento livre e enchimento compactado, respectivamente. Concluíram que o método de enchimento livre proporcionou maior porosidade da massa de grãos do que o método de enchimento em jorro, devido à menor massa específica proporcionada pelo método de enchimento livre. Verificaram também que a relação entre a queda de pressão e fluxo de ar foi, aproximadamente, linear apresentando um $R^2 > 0,97$ para todos os testes, sendo os valores obtidos pelo método de

enchimento livre, aproximadamente a metade daqueles observados para o método de enchimento em jorro.

SOKHANSANJ et al. (1990) estudaram o efeito do método de enchimento na resistência ao fluxo de ar para duas variedades de sementes de lentilhas (Laird e Eston). Concluíram que o enchimento em jorro resultou em um aumento na queda de pressão. O aumento na queda de pressão foi maior para taxas de fluxo de ar baixas do que a taxas de fluxo de ar elevadas. Além disso, o enchimento em jorro resultou em um aumento de 814 para 887 kg/m³ na massa específica da lentilha Laird e um decréscimo em sua porosidade de, aproximadamente, 5% comparado com o enchimento livre. A compactação e a redução na porosidade contribuíram para um aumento na queda de pressão, mas esse aumento não pode ser explicado exclusivamente por variações na massa específica e porosidade .

2.4. Efeito do teor de impurezas

Os principais fatores que afetam a queda de pressão estática através de uma massa de grãos são: velocidade e viscosidade do ar, massa específica, e porosidade da massa de grãos, além da geometria e rugosidade superficial do produto. A massa de grãos contendo grande quantidade de pó e fragmentos do produto, apresenta maior resistência ao fluxo de ar.

SHEDD (1951) conduziu testes com milho sob várias condições de teor de umidade e material estranho, sendo aveia a três diferentes teores de umidade, arroz com casca, a dois diferentes teores de umidade e livre de impureza, soja e cravo (variedades Red e Alsike). Os teste para todos

os grãos foram realizados com o silo cheio por dois métodos diferentes, denominados de enchimento livre e enchimento compactado. O autor concluiu que quanto maior o percentual de impurezas, maior era a resistência ao fluxo de ar através da camada de sementes utilizadas nos testes, considerando-se os dois métodos de enchimentos estudados (livre e compactado).

SHEDD (1953), estudando o comportamento de diferentes tipos de grãos à passagem do fluxo de ar, concluiu que as impurezas e fragmentos misturados à massa porosa tendem a aumentar a resistência ao escoamento do ar, se possuírem granulometria menor que o grão, e a diminuí-la se a granulometria for maior.

SILVA (1992) ajustou uma equação desenvolvida por Haque et al., na tentativa de equacionar a influência das impurezas na perda de carga, a partir de modificações da equação proposta por Hukill e Shedd em 1955 e apresentaram o seguinte modelo para grãos de arroz em casca e milho:

$$P = A \times Q + B \times Q^2 + C \times Q \times F \quad (2.22)$$

em que

P = perda de carga, mm ca/m;

Q = fluxo de ar, m³/min.m²;

F = nível de impurezas, decimal;

A,B,C = constantes características do produto: A = 463,667;

B = 7.363,038; C= 22.525,819.

Analisando a influência da concentração de impurezas na resistência ao fluxo de ar em leitos de arroz com casca, **SIEBENMORGEN** e

JINDAL (1987), utilizando velocidades do ar da ordem de 0,013 a 0,387 m/s e concentrações de material fino variando na faixa de 12 a 24%, concluíram que, em geral, quando os teores de impurezas aumentavam a massa específica decrescia. Baseados em análise de regressão linear, sugeriram uma equação para descrever as relações entre pressão, níveis de impurezas, fluxo de ar e teores de umidade, através de um leito poroso de arroz com casca. A equação proposta é da forma:

$$P = V(A \times F + B \times U + C \times \rho + D \times V) \quad (2.23)$$

em que

P = perda de carga, mm ca/m;

V = velocidade do ar, m/s;

F = nível de impurezas, %;

U = teor de umidade do produto, % base seca;

ρ = massa específica, kg/m³;

A,B,C,D = coeficientes de regressão.

Visando definir os efeitos de vários percentuais e tipos de impurezas de diferentes frações, adicionadas a uma massa de grãos de milho, **GRAMA et al. (1984)** concluíram que à medida em que o meio poroso era submetido a níveis mais elevados de materiais finos, a resistência à passagem do ar aumentava. Deduziram ainda que a queda de pressão do ar tornou-se mais elevada à medida em que o tamanho das partículas de impurezas decrescia.

Foster, citado por **BROOKER et al. (1974)**, investigou a resistência ao fluxo de ar em sementes de milho contendo vários

percentuais de materiais finos. Com a presença de 1% de materiais finos, verificou um aumento na resistência alcançando um máximo quando esse teor foi da ordem de 30 a 40%. A queda de pressão máxima observada foi o dobro daquela verificada quando ele trabalhou com milho limpo.

JAYAS et al. (1991 a) analisaram a resistência ao fluxo de ar para sementes de linho com percentuais de palha e finos nos níveis de 0, 5, 10 e 15% da massa total. Concluíram que a adição de finos em um nível de 5% da massa granular, resultou em um aumento gradual na massa específica. Aumentando a presença de finos de 0 para 15%, observaram uma variação na massa específica do linho de 654 para 677 kg/m³ (aproximadamente 3,5% de aumento). As variações correspondentes na porosidade foram pequenas. Por outro lado, um aumento total em materiais finos de 0 para 15% resultou em um aumento de 140 a 155% na resistência ao fluxo de ar.

Ainda de acordo com **JAYAS et al. (1991 a)**, o efeito interativo da palha e finos sobre a queda de pressão estática foi quantificado pela avaliação de um fator multiplicador para a resistência ao fluxo de ar em sementes de linho limpas. O fator multiplicador foi definido em função da presença de palhas, finos e das taxas de fluxo de ar, sendo descrito pela equação :

$$F = \frac{(\Delta P / L)_{\text{corrigido}}}{(\Delta P / L)_{\text{limpo}}} = [1 + (A + B \times V)y + (C + D \times V)z] \quad (2.24)$$

em que

F = fator multiplicador;

y = % de palha na amostra;

z = % de finos na amostra;

ΔP = queda de pressão, Pa;

L = profundidade da coluna de grãos, m;

V = taxa de fluxo de ar, m³/s.m².

Os coeficientes A, B, C e D são determinados para fluxos de ar nas direções vertical e horizontal, separadamente.

JAYAS et al. (1991b) determinaram a resistência ao fluxo de ar através da massa de sementes de canola, variedade Tobin (*Brassica campestris*), com a presença de palha e materiais finos, para um fluxo de ar variando de 0,0004 a 0,758 m³/min.m². Concluíram que dependendo da taxa de fluxo de ar, a resistência ao fluxo de ar através da massa de grãos com presença de materiais finos foi 2,3 a 3,1 vezes a resistência através da massa da canola limpa, enquanto a resistência ao fluxo de ar através da massa com palha foi 0,12 a 0,15 vezes a resistência através da massa de canola limpa.

STEELE (1974) estudou o efeito da presença de material estranho e restos da cultura sobre a resistência ao fluxo de ar em amendoim, variedade 61R, utilizando 35 combinações de restos da cultura do amendoim e material estranho. Determinou que a relação entre a velocidade aparente do ar e a queda de pressão estática, para os diversos níveis de material estranho e restos da cultura presentes na massa granular é dada pela equação:

$$V = a (\Delta P)^{0,62} \quad (2.25)$$

em que

V = velocidade aparente do ar, m/min;

ΔP = queda de pressão estática, mm ca;

a = constante que depende do produto.

Analisando a resistência ao fluxo de ar através da massa de grãos de sorgo a uma taxa de fluxo de ar variando de 0,05 a 0,30 m³/s.m², **GUNASEKARAN e JACKSON (1988)**, utilizando velocidade do ar da ordem de 2 a 11,5 m/s e os grãos contendo, em média, 3% de material estranho, concluíram que, como os experimentos não foram executados utilizando grãos limpos, é difícil prognosticar o efeito real do material estranho sobre as quedas de pressões. Mas, desde que tanto materiais finos como de granulometria maior estiveram presentes na massa de grãos, o efeito real do material estranho dependeria do tipo de partícula presente em maior proporção na massa de grãos.

YANG et al. (1990) determinaram a resistência ao fluxo de ar em uma massa de sementes de milho misturadas com impurezas da própria cultura, removidas por peneiramento e aspiração. As impurezas foram divididas em frações e utilizadas nos testes de resistência ao fluxo de ar em uma coluna de 2,39 m de diâmetro. Aproximadamente 270 kg e 230 kg de material fino seco foram obtidos a uma umidade de 13,6 e 13,3% (b.u), respectivamente. A pressão estática foi medida para taxas de fluxo de ar variando de 0,06 a 30,5 m³/min.m². Concluíram que a resistência ao fluxo de ar para tamanhos individuais ou classes de tamanho de materiais finos pode ser estimada pela equação de Ergun modificada da seguinte forma:

$$\frac{P}{L} = \frac{A(1-\epsilon)^2 V}{\epsilon^3} + \frac{B(1-\epsilon)V}{\epsilon^3} \quad (2.26)$$

em que

P = queda de pressão, Pa;

L = espessura da camada, m;

V = velocidade aparente do fluido, m/min;

ε = porosidade, %;

A e B = constantes.

HAQUE et al. (1978) determinaram a queda de pressão estática através de uma coluna de milho misturado com materiais finos. Utilizaram 12 níveis de materiais finos variando de 1 a 50% e 13 taxas de fluxo de ar variando de 0,076 a 0,38 m³/s.m². O teor de umidade dos materiais finos era 11%, base úmida. Concluíram que a queda de pressão aumentou com o aumento das percentagens de materiais finos, para a mesma taxa de fluxo de ar.

Esses mesmos autores determinaram a queda de pressão estática através de uma coluna de milho misturado, com materiais finos distribuídos uniformemente, cheia pelo método de enchimento livre. A queda de pressão aumentou linearmente com o aumento das percentagens de materiais finos até, aproximadamente, 20%. Ajustaram a equação a seguir por meio de regressão não-linear para estimar a queda de pressão em função do fluxo de ar e percentagens de materiais finos :

$$\Delta P = C_1 Q + C_2 Q^2 + C_3 Q \times f \quad (2.27)$$

em que

ΔP = queda de pressão, mm ca/m;

Q = fluxo de ar, m³/s.m²;

f = teor de finos (%);

$C_1 = 436,667$;

$C_2 = 7.363,038$;

$$C_3 = 22.525,819.$$

HENDERSON (1943) estudou a resistência ao fluxo de ar através da massa de grãos de milho em função da compactação, presença de milho quebrado e material estranho, e alguns tipos de aberturas no fundo perfurado do silo. O aumento na resistência ao fluxo de ar foi devido à presença de material estranho, reduzindo a porosidade da massa de milho. A variação na redução da taxa de fluxo de ar para as várias quantidades de material estranho foi devido à mistura não uniforme. Embora as amostras retiradas depois dos testes indicaram uma distribuição não uniforme de material estranho.

SOKHANSANJ et al. (1990) estudaram o efeito da percentagem de materiais finos em níveis de 0 a 25% e taxas de fluxo de ar variando de 0,0028 a 0,5926 m³/s.m², através da massa de sementes de lentilhas, variedades Laird e Eston, sobre a pressão estática. Concluíram que a resistência ao fluxo de ar aumentou quando as frações de materiais finos aumentavam na amostra. Houve um aumento maior na queda de pressão quando se usou taxas de fluxo de ar na faixa de 0,0028 a 0,1537 m³/s.m². Para a faixa total de fluxo de ar com percentuais de finos nos níveis de 5, 10, 15, 20 e 25% em sementes de lentilhas, variedade Laird, observaram elevações de 14, 41, 77, 137 e 149%, respectivamente, na queda de pressão. Foi observado também que um aumento na fração de materiais de finos resultou em um aumento linear na resistência ao fluxo de ar para lentilhas da variedade Laird.

FARMER et al. (1981) analisaram a resistência ao fluxo de ar em sementes de grama, variedade Bluestem, em função de três diferentes períodos de colheitas, teores de umidade variando de 17 a 79% b.s., graus de pureza de 10 a 17%, e massa específica de 50 a 120 kg/m³.

Posteriormente, compararam os resultados com sementes armazenadas com grau de pureza de 63% e colhidas anteriormente. Concluíram que a impureza influencia na massa específica do produto a qual afeta a passagem de ar no meio poroso.

2.5. Efeito da temperatura do ar

De acordo com **ERGUN (1952)**, são vários os fatores a serem considerados no estudo da queda de pressão estática em meios porosos, dentre os quais destaca: taxa de fluxo de ar, viscosidade e densidade do fluido, grau de compactação e orientação dos sólidos e geometria das partículas. Os dois primeiros são relativos ao fluido em função da temperatura, enquanto que os dois últimos referem-se ao sólido.

THOMPSON e ISAACS (1966) observaram que durante a secagem com ar à temperatura ambiente, a massa específica do milho aumentou enquanto ocorreu uma redução na porosidade dos grãos.

GUSTAFSON e HALL (1972) estudaram a variação da porosidade e de massa específica do milho durante o processo de secagem em várias temperaturas. Observaram que a taxa de variação na massa específica real do milho tende a ser igual para toda a faixa de temperatura e teores de umidade iniciais analisados.

2.6. Efeito do fluxo de ar

Nos sistemas de aeração o ar é utilizado para o resfriamento e a manutenção dos grãos a uma temperatura suficientemente baixa para assegurar uma boa conservação. Quando o ar é insuflado através dos grãos, a resistência ao fluxo, denominada de queda de pressão ou pressão estática, desenvolve-se como resultado da perda de energia por atrito e turbulência.

De acordo com **BROOKER et al. (1974)**, a queda de pressão através dos grãos depende, dentre outros fatores, da taxa de fluxo de ar utilizada. Geralmente, as curvas de queda de pressão em função do fluxo de ar, quando se usa escala logarítmica, são representadas por segmentos de linhas retas e cada segmento pode ser expresso pela equação:

$$Q = a(P)^b \quad (2.28)$$

em que

Q = taxa de fluxo de ar, m³/min.m²;

P = pressão estática por unidade de espessura, mm ca/m;

a,b = constantes para as condições estabelecidas.

Hendrix, citado por **DAVIS e BAKER (1951)**, sugeriu que alguns dos fatores que podem afetar o valor numérico das constantes a e b da equação 2.28 são: tipo de produto, espessura da camada, massa específica, e teor de umidade.

SILVA et al. (1993), estudando a resistência ao fluxo de ar apresentada pelas sementes de milho com fluxo de ar variando de 8,6 a 44,4 m³/min.m², e teor de umidade variando de 21 a 10%, base úmida,

concluíram que quanto mais elevado o fluxo de ar utilizado, mais acentuada a resistência apresentada pelas sementes de milho para as condições estudadas.

AKRITIDIS e SIATRAS (1979), trabalhando com sementes de abóbora, verificaram um aumento desproporcional na pressão estática com um aumento no fluxo de ar, quando o teor de umidade foi mantido constante. Com fluxos de ar acima de $5 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ a pressão estática, em geral, aumentava mais rapidamente do que o aumento no fluxo de ar.

PATIL e WARD (1988) determinaram a resistência ao fluxo de ar de sementes de colza, variedade Tower, para taxas de fluxo de ar variando de $0,17$ a $0,32 \text{ m}^3/\text{s.m}^2$. As amostras foram condicionadas para 6 níveis de umidade na faixa de $6,46$ a $19,6\%$, base úmida. Concluíram que a queda de pressão por unidade de espessura aumentou mais rapidamente com o aumento no fluxo de ar, o que está de acordo com **SHEDD (1951)** para o milho e **PATTERSON et al. (1971)** para feijão marinho.

HUSAIN e OJHA (1969) estudaram a resistência ao fluxo de ar através da massa de três variedades indianas de arroz com casca (Dular, Taichungnative-1, Patnai-23). Utilizando taxas de fluxo de ar variando de 1 a $6 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$, concluíram que a pressão estática para o arroz com casca é uma função da taxa do fluxo de ar, da forma :

$$P = k (Q)^n \quad (2.29)$$

em que

P = pressão estática, mm ca;

Q = taxa de fluxo de ar, $\text{m}^3/\text{min.m}^2$;

k, n = constantes.

FARMER et al. (1981) analisaram a resistência ao fluxo de ar através da massa de sementes de grama, variedade Bluestem, em função de três diferentes períodos de colheitas, teores de umidade variando de 17 a 79% b.s., graus de pureza de 10 a 17% e massa específica de 50 a 120 kg/m³. Concluíram que para um mesmo teor de umidade, a massa específica foi o parâmetro que mais afetou a resistência ao fluxo de ar através da camada de sementes de grama, variedade Bluestem. Com teores de umidade e graus de pureza constantes o fluxo de ar variou inversamente com a massa específica .

ABRAMS e FISH (1982) analisaram as características da resistência ao fluxo de ar em uma massa de batatas doce empilhadas. Concluíram que poderiam utilizar a equação de SHEDD (1953), relacionando o fluxo de ar e queda de pressão (equação 2.2).

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes experimentais deste trabalho foram desenvolvidos no período de setembro a dezembro de 1995, no Laboratório de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

3.1 Equipamento

Para avaliar as variações da pressão estática através da massa granular de frutos de amendoim, variedade BR-1, os testes para medições da pressão estática foram conduzidos com o uso de um equipamento experimental consistindo de colunas de tubos de PVC com 25 cm de diâmetro interno, moduladas nas dimensões de 50, 100, 150 e 200 cm de comprimento, com pontos de medições de pressão estática, perfis de velocidades e temperatura do ar, distribuídos verticalmente. Nos pontos de medições foram colocados pequenos tubos de PVC com comprimento de, aproximadamente, dois centímetros e diâmetro mínimo de 6,35 mm, evitando-se assim o efeito das paredes das colunas nas medições da

estática, tendo em vista que a tendência natural do ar é fluir pelas paredes das tubulações.

O ar foi insuflado na massa de frutos de amendoim por meio de um conjunto com motor de 1,0 CV e ventilador centrífugo dotado de diafragma, para controle dos fluxos de ar, ligado a um aeroduto com resistências elétricas e homogeneizadores de fluxo e um fundo de tela metálica perfurada com percentual de furos bem acima de 10% em relação à sua área total, evitando-se com isso, as perdas de pressão causadas pelo fundo de tela metálica perfurada. A Figura 1 mostra uma visão geral do equipamento experimental.



FIGURA 1 - Visão geral do equipamento experimental

No local dos testes experimentais foram instalados um termohigrógrafo para determinação da temperatura e da umidade relativa, e um barômetro para registrar as variações da pressão atmosférica.

As variações na pressão estática foram medidas por meio de um velômetro tipo Alnor - Série 6000-P* , com capacidade de 0 a 25 cm de coluna de água, aferido por meio de um Tubo de Pitot

3.2. Matéria prima

Foram utilizados frutos de amendoim, variedade BR-1, recém colhidos, provenientes de uma área agrícola pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (CNPQ/EMBRAPA) de Campina Grande-PB.

O produto foi submetido a uma limpeza manual para a retirada de impurezas trazidas do campo.

A seguir são apresentadas na Tabela 1 algumas características agronômicas e tecnológicas da cultivar do amendoim BR-1.

* A referência à marca ou nome de um produto não implica responsabilidade da UFPB a respeito da qualidade do mesmo.

TABELA 1 - Características agronômicas e tecnológicas do amendoim cultivar BR-1.

CARACTERÍSTICAS	AMENDOIM BR-1
Ciclo (dias após a emergência - dae)	89
Início da floração (dae)	22
Número de grãos/planta	27
Peso de 100 grãos (g)	148
Peso de 100 sementes (g)	48
Vagem chocha (%)	12
Sementes perfeitas (%)	84
Rendimento em casca (kg/ha)	1.700
Rendimento em sementes (kg/ha)	1.250
Rendimento em sementes (%)	72
Teor de óleo (%)	45
Teor de proteína (%) (N x 6,25)	38
Teor de carboidrato (%)	6,17
Teor de fibra (%)	3,83
Teor de cinzas (%)	2,67

FONTE: Folder EMBRAPA, Outubro/94, Campina Grande - PB

3.3. Propriedades físicas

A caracterização geométrica dos grãos foi determinada de acordo com algumas propriedades físicas deste produto. Para os frutos de amendoim foram determinados comprimento, largura, espessura, massa específica aparente, área, volume e porosidade, utilizando-se a metodologia usual de acordo com **MOHSENIN (1978)**. Para a determinação dessas

propriedades foram definidos: a) Volume Real como o volume ocupado pelo produto; b) Volume Aparente como o volume ocupado pelo produto mais o volume intersticial; c) Massa Específica Real como a relação entre uma certa massa do produto e seu volume real; d) Massa Específica Aparente como a relação entre uma certa massa do produto e o volume aparente correspondente; e) Porosidade como a relação entre o volume intersticial e o volume aparente expresso em termos percentuais. O módulo de granulometria e tamanho médio dos frutos de amendoim também foram analisados.

Na determinação da influência da espessura da camada, método de enchimento, temperatura do ar, impureza e fluxo de ar sobre a queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, foi fixado o teor de umidade de 10% b.u., por ser o valor ideal de umidade para o armazenamento dos frutos de amendoim.

Estabelecido o teor de umidade, foram selecionados 100 frutos do produto e feitas projeções de suas áreas frontal, lateral e de repouso, com auxílio de um retro-projetor de marca 3M, estabelecendo-se um fator de escala. Foram determinados o comprimento, a largura e espessura com o auxílio de um paquímetro Mitutoyo com precisão de 0,02 mm e a área do objeto, na posição de repouso, foi estimada por meio de um planímetro. Também foram determinados o raio da maior circunferência inscrita e o raio da maior circunferência que circunscreve o objeto na posição de repouso. O volume médio dos 100 frutos foi determinado através do método do picnômetro.

Com a obtenção destes dados, foram determinados a circularidade, esfericidade e o grau de esfericidade do produto, de acordo com o método

descrito por Curray, citado por CAVALCANTI MATA et al. (1986), onde a circularidade é definida como:

$$C = \frac{A_p}{A_c} \times 100 \quad (3.1)$$

em que

C = Circularidade, %;

A_p = Área do produto, mm²;

A_c = Área que circunscribe o produto, mm²;

A esfericidade dos frutos de amendoim foi determinada de acordo com MOHSENIN (1978), utilizando-se a definição :

$$E = \frac{d_i}{d_c} \times 100 \quad (3.2)$$

em que

E = Esfericidade, %;

d_i = Diâmetro da maior circunferência inscrita na projeção do objeto;

d_c = Menor diâmetro que circunscribe o objeto;

O grau de esfericidade é definido como a relação entre o volume do objeto e o volume da menor esfera que o circunscribe:

$$*GE = (b.c)/a^2 \quad (3.3)$$

em que

GE = Grau de esfericidade;

a = Comprimento do fruto (objeto), mm;

b = Largura do fruto, mm;

c = Espessura do fruto, mm;

A porosidade da massa granular do produto foi determinada para cada teor de umidade utilizado durante o experimento. O método utilizado foi o do Picnômetro de Comparação a Ar, constituído de dois cilindros semelhantes, medindo 200 mm de altura por 130 mm de diâmetro interno.

A massa específica aparente foi determinada utilizando-se um dos cilindros do picnômetro de volume conhecido, enchendo-o de amendoim com teores de umidade nos níveis avaliados procedendo-se, em seguida, à respectiva pesagem em uma balança de marca Filizola, relacionando-se o peso obtido com o volume do cilindro.

3.4. Teor de umidade

A influência do teor de umidade dos frutos de amendoim, variedade BR-1, na queda de pressão estática do ar quando insuflado através da massa do produto, foi avaliada para os teores de umidade de 8,0; 12,3; 20,0; 30,4 e 45,4% b.u., os quais foram obtidos por meio de secagem artificial à temperatura de 40°C e também por secagem ao ar a temperatura ambiente, a partir do teor de umidade inicial dos frutos de amendoim que foi de 45,4% b.u., (recém colhidos), nível em que tal produto atinge seu ponto de maturidade fisiológica (PMF) é realizada sua colheita. Após a colheita e beneficiamento, as amostras foram acondicionadas em sacos de plástico

(utilizando-se 3 sacos, um dentro do outro, para obter-se o máximo de hermeticidade) e armazenadas em câmara fria com temperatura controlada de 4°C, a fim de manterem seus teores de umidade até o início dos testes experimentais.

As determinações dos teores de umidade dos frutos de amendoim foram realizadas segundo as Regras para Análise de Sementes (BRASIL,1992), oficializada pelo Ministério da Agricultura (Portaria 547 de 10.11.67), submetendo-se as amostras à temperatura de $82^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, em estufa FANEM - modelo 315 SE com circulação de ar, durante o período de 72 horas, com 5 repetições.

3.5. Espessura da camada

O estudo da influência da espessura da camada do produto na resistência à passagem do fluxo de ar através da massa de frutos de amendoim, foi realizado utilizando as mesmas colunas de PVC descritas no item 3.1, as quais foram acopladas à câmara de distribuição de ar (plenum) de acordo com a altura requerida pelos testes experimentais. Os pontos para medições de pressão estática, perfis de velocidade e temperatura do ar foram distribuídos ao longo do eixo longitudinal das colunas, a 5 cm do topo e da base das colunas, bem como, no seu ponto médio. Esses pontos foram localizados a dois centímetros das paredes das colunas a fim de evitar os efeitos de bordas.

3.6. Método de enchimento

A análise da influência do método de enchimento das colunas de testes que foram cheias com frutos de amendoim, variedade BR-1, levou em consideração três métodos de enchimento: **a) método de bica**, que simula o enchimento livre, no qual os frutos de amendoim foram lançados com o auxílio de um funil sempre colocado a uma altura de queda zero; **b) método de jorro**, no qual os frutos foram lançados de uma altura aproximada de 20 cm com o auxílio de um balde, esperando-se com isto alcançar maior compactação da massa granular; **c) método elevador de canecas**, no qual frutos foram descarregados na coluna a partir de uma altura aproximada de 1,10 m.

3.7. Teor de impurezas

No estudo do efeito do percentual de material estranho presente na massa de frutos de amendoim, foram considerados como impurezas materiais como galhos, cascas, resíduos com granulometria maior que a dos frutos, provenientes do campo junto com o produto. Os frutos de amendoim totalmente limpos e manualmente selecionados foram considerados como padrão 0% de impurezas. Essa medida foi adotada na tentativa de considerar como impurezas os resíduos da própria planta. Os níveis de impurezas foram obtidos com a adição de 6, 10 e 15%, em peso, de material estranho em relação ao total da massa granular depositada em cada coluna. A mistura foi realizada em caixa de madeira de modo a obter-se uma mistura homogênea

de amendoim e impurezas. As impurezas foram trituradas em uma máquina para forrageiras com potência de 10HP.

3.8. Temperatura do ar

A influência da temperatura do ar sobre a pressão estática através da massa do produto foi analisada levando-se em consideração o comportamento de algumas propriedades físicas dos frutos de amendoim, e as variações de algumas propriedades do ar no processo de secagem sob diferentes condições de temperatura. Desta forma, a pressão estática foi determinada em função de 5 níveis de temperatura do ar de secagem, variando na faixa de 26,7°C a 85,1°C, obtidas por meio de resistências elétricas instaladas ao longo do aeroduto conectado ao plenum. As medições das temperaturas do ar foram feitas por meio de termopares conectado a um registrador digital de marca Electro Therm.

As amostras congeladas de frutos de amendoim, foram totalmente descongeladas antes de serem submetidas ao processo de secagem. No final de cada teste experimental foram determinados os respectivos teores de umidade.

3.9. Fluxos de ar

Na obtenção dos fluxos de ar foi utilizado um conjunto motor-ventilador centrífugo, com potência nominal de 1,0 CV, para impulsionar o

ar através da massa de frutos de amendoim. As diferentes taxas de fluxos (7,27; 21,88; 44,86; 62,85 e 85,85 m³/min.m²) foram obtidas por um mecanismo de controle de vazão de ar (diafragma). Esta faixa inclui os fluxos de ar normalmente indicados para operações de sistemas de secagem e aeração de grãos.

A vazão de ar (m³/min) foi obtida pela multiplicação da velocidade do ar (m/min) medida no aeroduto pela a área de sua seção transversal.

Em seguida, a vazão assim obtida foi dividida pela área da seção transversal da coluna de secagem para obtenção da taxa de fluxo de ar (m³/min.m²).

Nos testes de avaliação da influência do fluxo de ar na pressão estática, os demais parâmetros que afetam a queda de pressão foram mantidos constantes.

A velocidade do motor que impulsionava o ventilador foi mantida constante durante toda fase experimental por meio de um estabilizador de tensão evitando-se que, com possíveis flutuações na tensão da rede elétrica, ocorressem variações na rotação do motor e consequentes alterações no fluxo de ar.

Os fluxos de ar foram medidos com um anemômetro de palhetas, tipo Veb 8060 Dresden, com leituras de 0 a 1.000 m/min.

3.10. Delineamento experimental

Foi adotado um delineamento experimental do tipo fatorial (2 x 2), com 3 repetições, resultante da combinação de 5 níveis de fluxo de ar com 5

níveis de teores de umidade, 4 níveis de teores de impureza, 4 níveis de espessura da camada, 3 métodos de enchimento e 5 níveis de temperatura do ar. As análises de variância foram realizadas utilizando-se o programa computacional ASSISTAT (Assistência Estatística), desenvolvido na Área de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola do CCT-UEPB, adotando-se o Teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade para comparação das médias dos tratamentos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises dos dados experimentais para o estudo da queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim foram divididas em sete etapas. Inicialmente foram determinadas as propriedades físicas dos frutos para, em seguida, serem avaliadas as influências do teor de umidade, fluxo de ar, espessura da camada, teor de impurezas, método de enchimento e temperatura do ar, no gradiente de pressão estática através da massa de frutos de amendoim.

Os testes experimentais foram realizados de setembro a dezembro de 1995, período em que foram registrados valores médios de 26,7^oC para a temperatura do ar, 60,9% para a umidade relativa e 715,06 mm ca para a pressão atmosférica.

4.1. Propriedades físicas dos frutos de amendoim

As propriedades físicas dos frutos de amendoim, determinadas para teores de umidade variando de 45,4 a 8,0%, base úmida, são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

TABELA 2 - Propriedades físicas dos frutos de amendoim

TEOR DE UMIDADE (% b.u.)	POROSIDADE (%)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)
8,0	80,2	212
10,0	78,5	220
12,3	76,0	225
20,0	74,0	263
30,4	70,3	280
45,4	66,4	330

Observa-se na Tabela 2 que a porosidade aumentou com a redução do teor de umidade, apresentando um menor valor para o teor de umidade mais elevado, concordando com os autores Chung e Converse, e Wratten et al., citados por **CAVALCANTI MATA e FILHO (1984)**, que estudaram outros produtos agrícolas e constataram que a porosidade decresce e a massa específica aumenta com o aumento do teor de umidade.

Foram determinados também a forma e o tamanho dos frutos de amendoim, uma vez que essas características físicas são importantes no processamento e armazenamento de produtos agrícolas.

São apresentados na Tabela 3 os valores médios do comprimento, largura, espessura, área, raio maior, raio menor, volume, circularidade, esfericidade e grau de esfericidade de 100 frutos de amendoim, para um teor de umidade de 10% b.u.

TABELA 3 - Características físicas dos frutos de amendoim para um teor de umidade de 10% b.u. (médias de 100 frutos).

CARACTERÍSTICAS	VALORES MÉDIOS
Teor de Umidade, % base úmida	10,0
Comprimento, mm	35,7
Largura, mm	12,6
Espessura, mm	11,7
Área, mm ²	444,7
Volume, mm ³	1.400
Raio Maior, mm	204,9
Raio Menor, mm	57,6
Circularidade, %	33,03
Esfericidade, %	29,75
Grau de Esfericidade, %	13,78

4.2. Efeito do teor de umidade

O efeito do teor de umidade na queda de pressão estática através da massa do produto pode aumentar ou diminuir de acordo com suas características físicas.

A queda de pressão estática em função do fluxo de ar encontra-se representada em escala logarítmica na Figura 2. Observa-se que as curvas são praticamente paralelas e com convexidade ascendente, concordando com a literatura consultada. Cada curva consiste de 4 segmentos retos com

diferentes inclinações, de acordo com Sheldom et al., citados por AKRITIDIS (1979).

O teor de umidade da massa de frutos de amendoim, em seus diversos níveis, apresentou influência no perfil da pressão estática. De acordo com a Figura 2, a elevação do teor de umidade causou um acréscimo na pressão estática. Esse comportamento foi verificado para todos os níveis de teores de umidade estudados. A possível causa dessa ocorrência foi o efeito do teor de umidade na massa específica aparente e na porosidade da massa do produto.

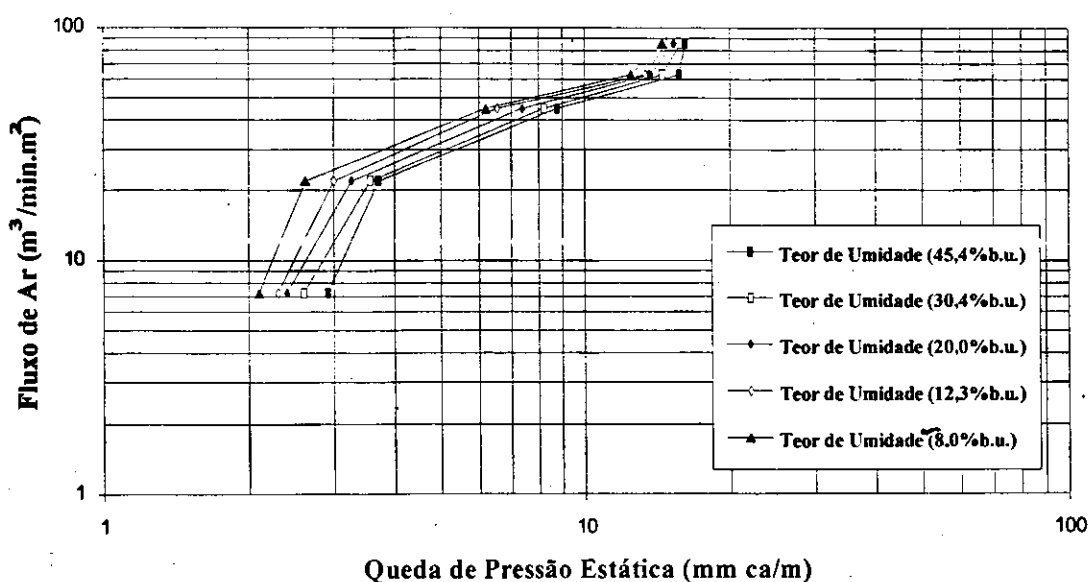


FIGURA 2- Queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim (mm ca/m) em função do fluxo de ar para vários teores de umidade (% b.u.)

O comportamento da massa específica aparente dos frutos de amendoim, em função do teor de umidade, é mostrado na Figura 3. Com o aumento do teor de umidade do produto de 8,0 para 12,3% b.u. verificou-se um aumento na massa específica aparente de 212 para 225 kg/m³. Um novo

aumento no teor de umidade de 12,3 para 20,0% b.u. causou um acréscimo na massa específica aparente de 225 para 263 kg/m³. Este mesmo comportamento foi observado para todos os teores de umidade estudados, com uma variação praticamente linear. Isto verifica-se devido ao aumento da massa específica do produto. A variação na massa específica aparente foi de 212 a 330 kg/m³ para uma faixa de umidade de 8,0 a 45,4% b.u..

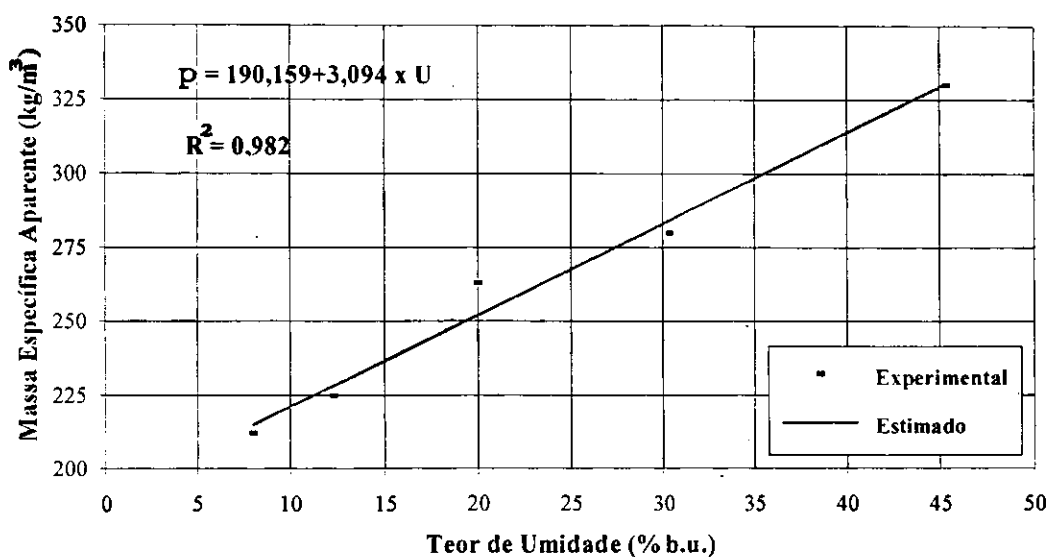


FIGURA 3- Variação da massa específica aparente dos frutos de amendoim em função do seu teor de umidade.

A influência do teor de umidade na porosidade da massa de frutos de amendoim é mostrada na Figura 4. Observa-se que com a elevação do teor de umidade ocorreu um decréscimo na porosidade do meio granular, em todos os níveis de umidade, causando maiores resistências à passagem do fluxo de ar. Esse decréscimo apresentou um comportamento linear, com $R^2 = 0,957$.

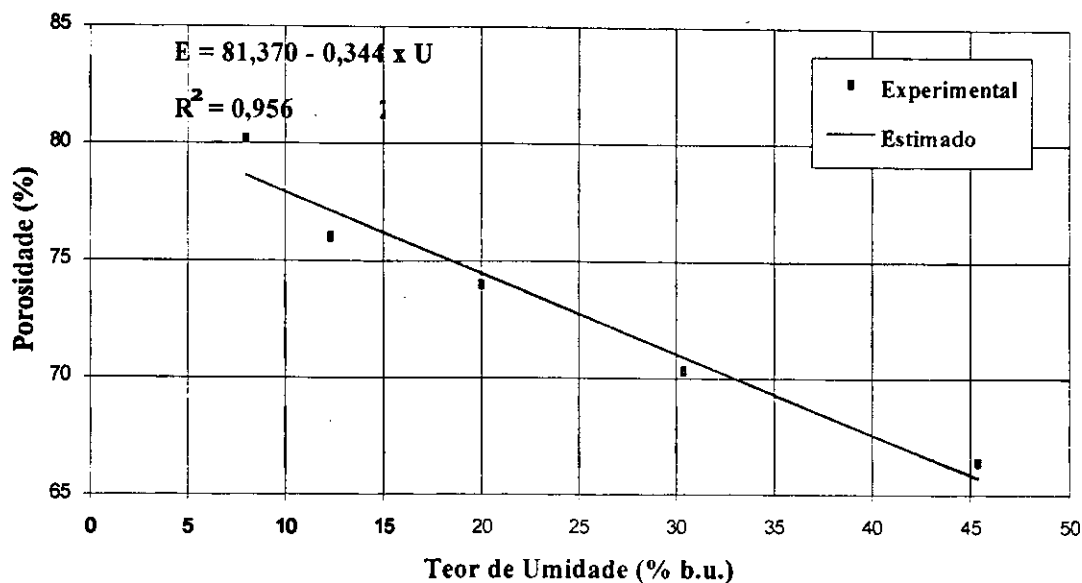


FIGURA 4- Variação da porosidade da massa de frutos de amendoim amendoim em função do seu teor de umidade.

A pressão estática máxima requerida através da massa de frutos de amendoim, para os níveis de umidade estudados, ocorreu para um teor de umidade de 45,4% b.u. e um fluxo de ar de $85,85 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$. Observou-se ainda que, quando tomado por referência o fluxo de ar de $7,27 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$, o aumento no teor de umidade de 8,0 para 45,4% b.u. elevou a resistência ao fluxo de ar em, aproximadamente, 40%.

Os resultados obtidos com os fatores de fluxo de ar e teor de umidade dos frutos de amendoim apresentaram efeitos significativos sobre a pressão estática (Tabela 4).

Analisando-se o efeito isolado do teor de umidade sobre as pressões estáticas médias, constatou-se que houve diferenças significativas entre os tratamentos ao nível de 1% de probabilidade, o mesmo ocorrendo para o fluxo de ar.

TABELA 4 - Análise de variância da queda de pressão estática através de uma massa de frutos de amendoim, com 0% de teor de impureza, espessura da camada de 1,0 m, método de enchimento livre e temperatura do ar de 27,7°C.

Fonte de Variação	G.L	S.Q.	Q.M.	F
UMIDADE	4	9,8672	2,4668	3,79 **
FLUXO	4	478,3410	119,5853	183,71 **
UMIDADE x FLUXO	16	9,6621	0,6039	0,93 ns
RESÍDUO	50	32,5473	0,6509	
TOTAL	74	530,5473		

** = Significativo ao nível de 1% de probabilidade

ns = Não significativo

A Tabela 5 mostra os testes de comparação das médias de pressão estática em função do teor de umidade e do fluxo de ar. Analisando-se as médias de pressão estática em função do teor de umidade, observa-se que houve diferenças significativas entre as médias determinadas para os teores de umidade de 45,5%, 30,4% e 12,3%, base úmida, e aquelas determinadas para os teores de umidade de 20,0% e 8,0%, base úmida, ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Analisando-se as médias de pressão estática em função do fluxo de ar, observa-se que houve diferenças significativas entre as médias determinadas para os fluxos de ar de 7,27 e 21,88 m³/min.m² e aquelas

determinadas para os fluxos de ar de $44,86 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$, $62,85 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ e $85,85 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$.

Pode ser também observado na Tabela 5 que a pressão estática decresceu com o decréscimo do teor de umidade de 45,4% para 20,0%, base úmida; em seguida aumentou quando o teor de umidade passou de 20,0% para 12,3%, base úmida, e tornou a decrescer com o decréscimo do teor de umidade de 12,3% para 8,0%, base úmida. Esse comportamento não constitui necessariamente uma discrepância, uma vez que as diferenças não são muito acentuadas.

TABELA 5- Teste de comparação das médias da pressão estática em função do teor de umidade e do fluxo de ar, usando o Teste de Tukey.

Umidade (% b.u.)	Médias de Pressão Estática (mm ca/m) para fluxo de ar variando de 7,27 a 85,85 m ³ /min.m ²	Fluxo de Ar (m ³ /min.m ²)	Médias de Pressão Estática (mm ca/m) para teor de umidade variando de 45,4 a 8,0 %b.u.
45,4	4,9259 a	7,27	1,4258 c
30,4	4,5635 ab	21,88	1,9727 c
20,0	4,0352 b	44,86	3,7169 b
12,3	4,2029 ab	62,85	7,0443 a
8,0	3,9489 b	85,85	7,5167 a

DMS1 = 0,8341

DMS2 = 0,8341

DMS = Diferença mínima Significativa

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Na Tabela 6, observa-se que, a interação umidade x fluxo de ar para todos os fluxos de ar utilizados, que proporcionou a maior queda na pressão estática em relação às outras combinações foi aquela correspondente a 45,4% b.u. Entretanto, nenhuma interação apresentou diferenças significativas, como já era esperado, devido à análise de variância apresentada na Tabela 4.

TABELA 6- Teste das médias da interação do teor de umidade e fluxo de ar pelo Teste de Tukey.

Umidade (% b.u.)	Fluxo (m ³ /min.m ²)					Médias
	7,27	21,88	44,86	62,85	85,85	
45,4	1,30aA	3,27aA	4,39aA	8,00aA	7,68aA	4,93
30,4	2,32aA	1,80aA	4,22aA	7,13aA	7,34aA	4,56
20,0	1,19aA	1,60aA	3,49aA	6,53aA	7,37aA	4,04
12,3	1,11aA	1,83aA	3,55aA	7,18aA	7,35aA	4,20
8,0	1,21aA	1,36aA	2,94aA	6,38aA	7,85aA	3,95
Médias	1,43	1,97	3,72	7,04	7,52	4,34

DMS/coluna = 1,87

DMS/linha = 1,87

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na vertical ou maiúscula, na horizontal, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey, ao nível de 1% de probabilidade.

4.3. Efeito da espessura da camada

São apresentadas na Figura 5 as curvas de queda na pressão estática em função da densidade de fluxo de ar através de uma coluna de frutos de amendoim para comprimento da coluna variando de 50 a 200 centímetros. Observou-se em todos os testes que a pressão estática aumenta com a espessura da camada do produto, para cada fluxo de ar estudado. Para um fluxo de ar de 7,27 m³/min.m² observou-se que, quando a espessura da camada variou de 100 para 200 cm, a queda na pressão estática passou de 1,88 mm ca/m para 3,5 mm ca/m, atingindo uma elevação de,

aproximadamente, 90% na resistência ao fluxo de ar. Para o nível mais elevado de fluxo de ar estudado ($85,85 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$), duplicando-se a espessura da camada de 100 para 200 cm, constatou-se um aumento na pressão estática de apenas 15%. Portanto, a variação da pressão estática em função do fluxo de ar não é linear. Observa-se ainda que as linhas para diferentes espessuras da camada do produto são quase paralelas, com inclinações quase constantes para cada segmento de reta, o que está de acordo com GUNASERAKAN e JACKSON (1988).

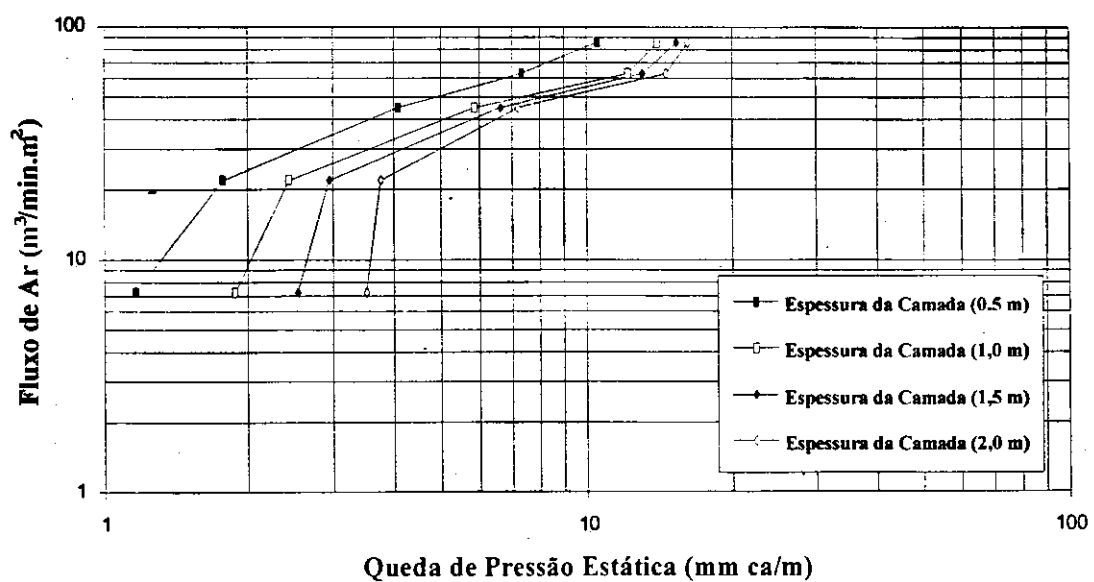


FIGURA 5- Queda de pressão estática (mm ca/m) em função do fluxo de ar para várias espessuras da camada (m) de frutos de amendoim

Observa-se na Tabela 7, efeito significativo da espessura da camada, fluxo de ar e da interação espessura x fluxo de ar sobre a queda de pressão estática ao nível de 1% de probabilidade.

TABELA 7- Análise de variância da queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, com 0% de impureza, 10% b.u de teor de umidade, método de enchimento livre e temperatura do ar de 26,7⁰C.

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
ESPESSURA	3	16,3062	5,4354	346,63 **
FLUXO	4	361,4187	90,3547	5762,16 **
ESPESSURA x FLUXO	12	5,3026	0,4419	28,18 **
RESÍDUO	40	0,6272	0,0157	
TOTAL	59	383,6547		

** = Significativo ao nível de 1% de probabilidade

De acordo com a Tabela 8, observa-se que as pressões estáticas diferem estatisticamente entre si, ao nível de 1% de probabilidade, em função da espessura da camada do produto e também em função do fluxo de ar.

TABELA 7- Análise de variância da queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, com 0% de impureza, 10% b.u de teor de umidade, método de enchimento livre e temperatura do ar de 26,7°C.

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
ESPESSURA	3	16,3062	5,4354	346,63 **
FLUXO	4	361,4187	90,3547	5762,16 **
ESPESSURA x FLUXO	12	5,3026	0,4419	28,18 **
RESÍDUO	40	0,6272	0,0157	
TOTAL	59	383,6547		

** = Significativo ao nível de 1% de probabilidade

De acordo com a Tabela 8, observa-se que as pressões estáticas diferem estatisticamente entre si, ao nível de 1% de probabilidade, em função da espessura da camada do produto e também em função do fluxo de ar.

TABELA 8 - Teste de comparação das médias da pressão estática em função da espessura da camada e do fluxo de ar, usando o Teste de Tukey, para um teor de umidade de 10% b.u.

Espessura (m)	Médias de Pressão Estática (mm ca/m) para fluxo de ar variando de 7,27 a 85,85 m ³ /min.m ²	Fluxo de Ar (m ³ /min.m ²)	Médias de Pressão Estática (mm ca/m) para espessura da camada variando de 0,5 a 2,0 m
0,5	2,9210 d	7,27	1,1508 e
1,0	3,6957 c	21,88	1,3250 d
1,5	4,0432 b	44,86	3,0395 c
2,0	4,3078 a	62,85	5,9785 b
		85,85	7,2157a

DMS1 = 0,1225

DMS2 = 0,1460

Médias seguidas por letras diferentes diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

A Tabela 9 mostra que ocorreu uma maior queda na pressão estática para a espessura da camada de 2,0 m para todos os fluxos de ar utilizados, para os quais houve diferença estatisticamente significativa entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade, na pressão estática através da massa de frutos de amendoim.

TABELA 9- Teste das médias de interação da espessura da camada e fluxo de ar pelo Teste de Tukey.

Espessura (m)	Fluxo (m ³ /min.m ²)					Médias
	7,27	21,88	44,86	62,85	85,85	
0,5	0,66 dE	1,09 cD	2,43 cC	4,38 dB	6,05 cA	2,92
1,0	1,00 cD	1,26 bcD	2,97 bC	6,09 cB	7,15 bA	3,70
1,5	1,29 bD	1,41 abD	3,29 aC	6,50 bB	7,72 aA	4,04
2,0	1,65 aD	1,54 adD	3,46 aC	6,94 aB	7,94 aA	4,31
Médias	1,15	1,33	3,04	5,98	7,22	3,74

DMS/coluna = 0,27

DMS/linha = 0,29

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na vertical ou maiúscula, na horizontal, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey, ao nível de 1% de probabilidade.

4.4. Efeito do método de enchimento

As curvas da Figura 6 mostram o comportamento da queda na pressão estática através da massa de frutos de amendoim, para fluxos de ar variando de 7,27 a 85,85 m³/min.m², em função do método de enchimento.

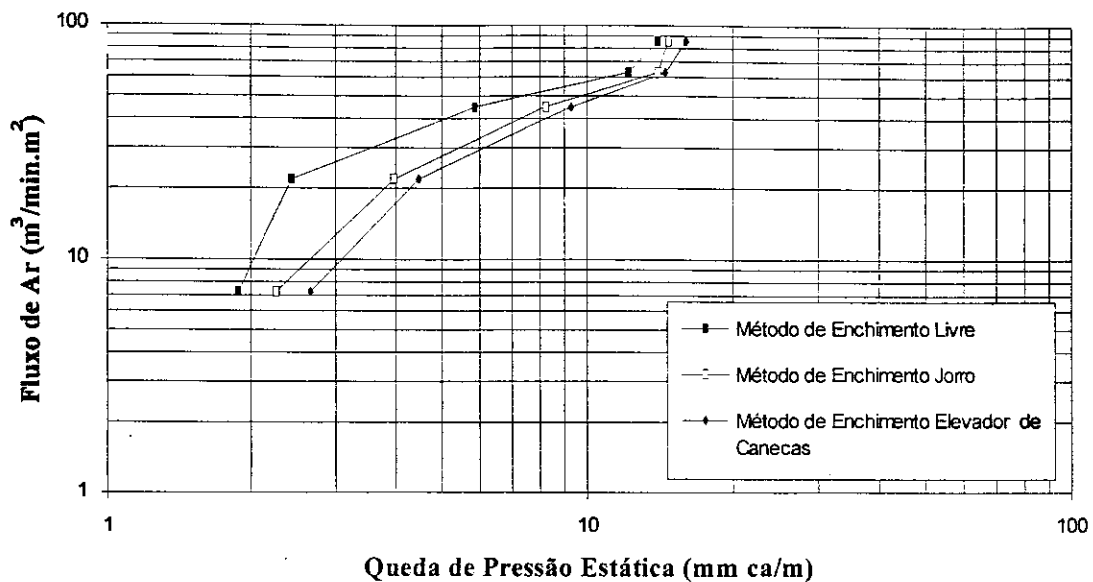


FIGURA 6- Queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim (mm ca/m) em função do fluxo de ar para diferentes métodos de enchimento.

Observou-se que para toda a faixa de fluxo de ar estudada, o método de enchimento utilizando elevador de canecas foi o que resultou em maior queda de pressão estática em relação aos outros dois utilizados. Neste método, os frutos foram lançados a partir de uma altura de 1,10 m, resultando em uma maior compactação da massa na coluna de testes. Constatou-se, ainda, o efeito do método de enchimento sobre a porosidade e a massa específica aparente do produto. Foram observadas massas específicas aparentes de 243 kg/m^3 , 256 kg/m^3 e 262 kg/m^3 para os métodos de enchimento livre, jorro e elevador de canecas, respectivamente. As porosidades observadas foram de 82,0%, 74,5% e 72,3% para o enchimento livre, jorro e elevador de canecas, respectivamente. Este último método proporcionou uma redução de 3% na porosidade da massa do produto, comparado com o enchimento de jorro, e 10% em relação ao enchimento

livre, que apresentou valores de queda na pressão estática próximos às do método elevador de canecas. A Tabela 10 mostra o efeito do método de enchimento da coluna na variação da massa específica aparente e porosidade da massa de frutos de amendoim.

TABELA 10- Variação da massa específica aparente e da porosidade da massa de frutos de amendoim, em relação aos métodos de enchimento, para um teor de umidade de 10% b.u.

Método de Enchimento	Massa Específica (kg/m ³)	Porosidade (%)
Livre	243	82,
Jorro	256	74,5
Elevador de Canecas	262	72,3

Analisando-se os dados de pressão estática em função dos métodos de enchimento, verificou-se que, independentemente do método de enchimento utilizado, ocorreram maiores quedas na pressão estática para os níveis de fluxo de ar mais elevados.

De acordo com a Tabela 11, não houve diferenças significativas entre os métodos de enchimento avaliados.

TABELA 11- Análise de variância da queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, com 0% de impureza 10% de teor de umidade, espessura de 1,0m e temperatura do ar de 26,7⁰C, em função dos métodos de enchimento utilizados.

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
ENCHIMENTO	2	66,1062	33,0531	1,35 ns
FLUXO	4	579,4297	144,8574	5,91 **
ENCHIM. x FLUXO	8	212,8941	26,6118	1,09 ns
RESÍDUO	30	735,5085	24,5169	
TOTAL	44	1.593,9385		

** = Significativo ao nível de 1% de probabilidade

ns = Não significativo

De acordo com a Tabela 12 observa-se que os métodos de enchimento não diferem estatisticamente entre si, com relação à queda de pressão estática, enquanto que o fluxo de ar de 85,85 m³/min.m² apresentou uma queda na pressão estática maior e estatisticamente diferente dos fluxos de ar de 7,27; 21,88 e 44,86 m³/min.m². Entretanto com o fluxo de ar de 62,85 m³/min.m² não houve diferenças estatisticamente significativas entre si.

TABELA 12- Teste de comparação das médias de pressão estática em função do método de enchimento e do fluxo de ar, usando o Teste de Tukey, para um teor de umidade de 10% b.u.

Enchimento	Médias de Pressão Estática (mm ca/m) para fluxo de ar variando de 7,27 a 85,85 m ³ /min.m ²	Fluxo de Ar (m ³ /min.m ²)	Médias de Pressão Estática (mm ca/m) para enchimento livre, jorro e elevador de canecas
Livre	3,6957 a	7,27	1,1402 b
Jorro	5,0123 a	21,88	2,7630 b
Elevador de Canecas	6,6585 a	44,86	3,5071 b
		62,85	7,0146 ab
		85,85	11,1859 a

DMS1 = 4,4490

DMS2 = 6,7835

Médias seguidas pela mesma letra não difere estatisticamente entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey

Na Tabela 13 observa-se que o método de enchimento elevador de canecas foi o que proporcionou quedas de pressão estática mais elevadas para todos os fluxos de ar utilizados. Entretanto não houve diferenças estatisticamente significativas entre si nas pressões estáticas ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

TABELA 13- Teste das médias de interação do método de enchimento e fluxo de ar pelo Teste de Tukey, para um teor de umidade de 10% b.u.

Enchimento	Fluxo (m ³ /min.m ²)					Médias
	7,27	21,88	44,86	62,85	85,85	
Livre	1,00aA	1,26aA	2,97aA	6,09aA	7,15aA	3,70
Jorro	1,19aA	4,15aA	4,59aA	7,47aA	7,66aA	5,01
Elevador de Canecas	1,23aA	2,88aA	2,96aA	7,48aA	18,74aA	6,66
Médias	1,14	2,76	3,51	7,01	11,19	5,12

DMS/coluna = 9,95

DMS/linha = 11,75

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na vertical, ou maiúscula, na horizontal, não diferem estatisticamente, entre si, pelo Teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

4.5. Efeito do teor de impurezas

A influência dos teores de impureza na queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, com teor de umidade de 10% b.u., fluxos de ar variando de 7,27 a 85,85 m³/min.m², em uma coluna de teste de 1,0 m de altura, cheia pelo método de enchimento livre é mostrada na Figura 7. Observa-se que à medida em que as impurezas da própria cultura foram adicionadas ao produto, para qualquer fluxo de ar, ocorreu uma redução na pressão estática. Este resultado está de acordo com **JAYAS et al. (1991 a)** e **BROOKER et al. (1974)** os quais afirmam que a adição de impurezas com granulometria maior que a dos grãos, causa uma redução na queda de

pressão estática. A partir do nível 0% de impurezas, quando foi adicionado 6% de restos da cultura à massa de frutos de amendoim, ocorreu uma redução na pressão estática de 1,88 para 0,599 mm ca/m, para uma taxa de fluxo de ar de $7,27 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$. Esta tendência repetiu-se para os demais fluxos de ar estudados.

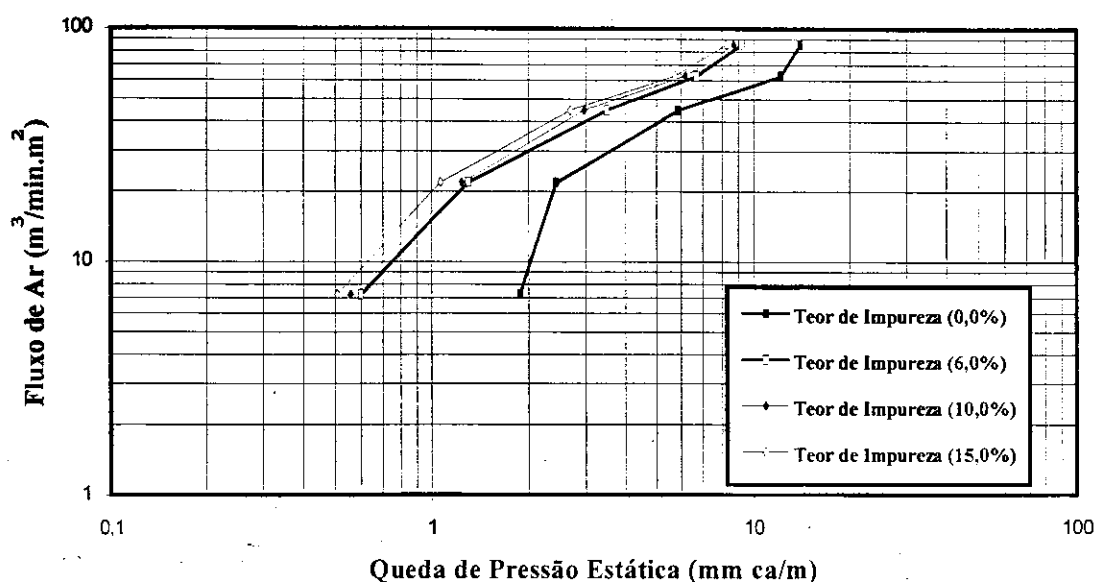


FIGURA 7- Queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim (mm ca/m) em função do fluxo de ar e percentagens de impureza

A Figura 8 mostra que, com a adição de 6% de impurezas na massa do produto, ocorreu uma redução na massa específica aparente de 212 kg/m^3 para 164 kg/m^3 e uma elevação na porosidade dos grãos de 78,5% para 82,2%, (Figura 9). Todavia, essa variação Para os demais níveis de impurezas avaliados, observou-se que não ocorreram variações acentuadas na massa específica aparente, o mesmo não ocorrendo com a porosidade que manteve a mesma tendência de elevação.

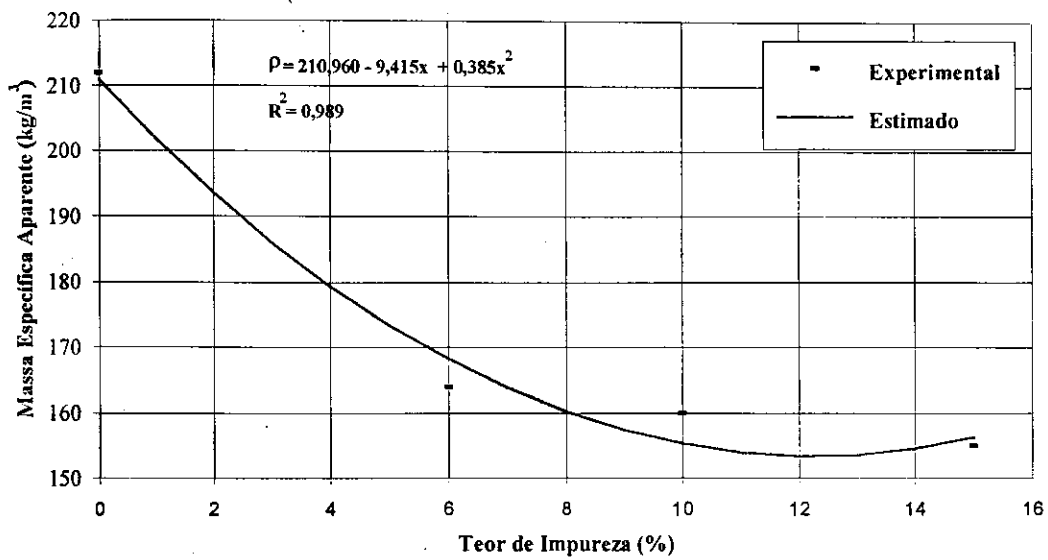


FIGURA 8- Variação da massa específica aparente da massa de frutos de amendoim em função da porcentagem de impurezas, para um teor de umidade de 10% b.u.

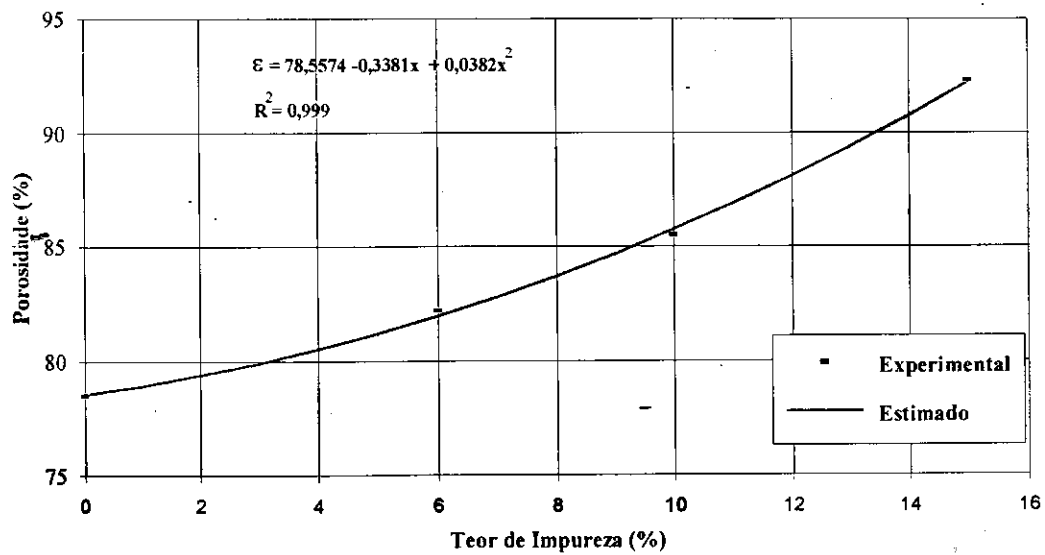


FIGURA 9- Variação da porosidade da massa de frutos de amendoim em função da porcentagem de impurezas para um teor de umidade de 10% b.u..

Avaliando-se o efeito da percentagem de impurezas na queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, observa-se pela análise de variância, conforme Tabela 14, que houve diferença significativa na queda de pressão estática ao nível de 1% de probabilidade devido ao efeito das impurezas.

TABELA 14- Análise de variância da queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, para 10% b.u. de teor de umidade, espessura da camada de 1,0m e temperatura do ar de 26,7°C.

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
IMPUREZA	3	36,7429	12,2476	288,93 **
FLUXO	4	171,2461	42,8115	1.009,96 **
IMPUREZA x FLUXO	12	14,1599	1,1800	27,84 **
RESÍDUO	40	1,6956	0,0424	
TOTAL	59	223,8444		

** = Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Analisando a Tabela 15, verifica-se que o percentual zero de impureza (0%) proporcionou uma queda de pressão estática estatisticamente superior aos percentuais de 6%, 10% e 15%, os quais não diferiram entre si e, ainda, que estes três percentuais foram os que apresentaram menores resistências à passagem do fluxo de ar.

TABELA 15- Teste de comparação das médias da queda de pressão estática em função da percentagem de impurezas e fluxo de ar, usando o Teste de Tukey, para um teor de umidade de 10% b.u.

Impureza (%)	Médias de Pressão Estática (mm ca/m) para fluxo de ar variando de 7,27 a 85,85 m ³ /min.m ²	Fluxo de Ar (m ³ /min.m ²)	Médias de Pressão Estática (mm ca/m) para percentual de impurezas variando de 0 a 15%
0	3,6957 a	7,27	0,5055 e
6	1,8999 b	21,88	0,8001 d
10	1,9174 b	44,86	1,8140 c
15	1,8508 b	62,85	3,7306 b
		85,85	4,8546 a

DMS1 = 0,2015

DMS2 = 0,2401

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

De acordo com a Tabela 16, a média da interação impureza x fluxo de ar ao nível 0% de impureza, para todos os fluxos de ar utilizados, também foi a que proporcionou uma pressão estática maior que os níveis de 6%, 10% e 15%, os quais não apresentaram pressões estáticas estatisticamente diferentes entre si, pelo Teste de Tukey, ao nível de 1% de probabilidade. Com relação ao fluxo de ar, para todos os níveis de impurezas analisados, as pressões estáticas diferiram estatisticamente entre si, exceto para os dois níveis mais baixos de fluxo de ar (7,27 e 21,88 m³/min.m²).

TABELA 16 - Teste das médias de interação da percentagem de impureza e fluxo de ar pelo Teste de Tukey, para um teor de umidade de 10% b.u.

Impureza (%)	Fluxo (m ³ /min.m ²)					Médias
	7,27	21,88	44,86	62,85	85,85	
0	1,00 aD	1,26 aD	2,97 aC	6,09 aB	7,15 aA	3,70
6	0,34 bD	0,67 bD	1,55 bC	2,98 bB	3,95 bA	1,90
10	0,33 bD	0,65 bD	1,39 bC	3,05 bB	4,16 bA	1,92
15	0,35 bD	0,61 bD	1,35 bC	2,80 bB	4,15 bA	1,85
Médias	0,51	0,80	1,81	3,73	4,85	2,34

DMS/coluna = 0,45

DMS/linha = 0,48

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na vertical, ou maiúscula, na horizontal, não diferem estatisticamente, entre si, pelo Teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade.

4.6. Efeito da temperatura do ar

A influência da temperatura do ar na resistência ao fluxo de ar através da massa de frutos de amendoim é mostrada na Figura 10. Observa-se que, para a faixa de temperatura estudada (26,7°C a 85,1°C), ocorreram variações na queda de pressão estática, atingindo valores mínimos de 0,58 mm ca/m para a temperatura de 85,1°C e máximo de 2,80 mm ca/m para a temperatura de 51,25°C, considerando-se o fluxo de ar de 7,27 m³/min.m². Esta diferença representa um aumento de, aproximadamente, 5 vezes na queda da pressão estática.

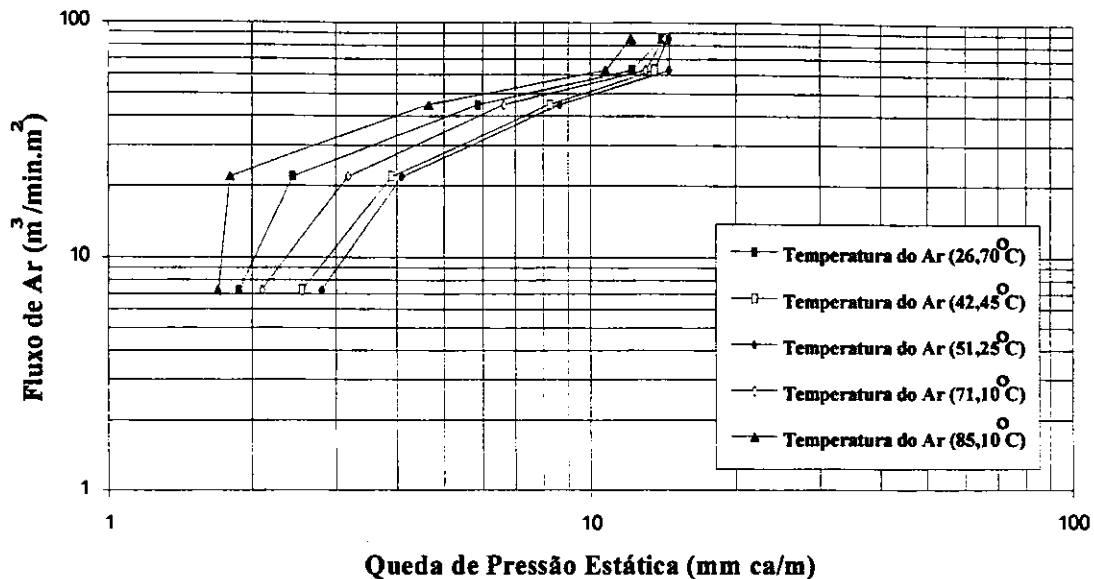


FIGURA 10- Queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim (mm ca/m) em função do fluxo de ar para várias temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$) para um teor de umidade de 10% b.u.

No final de cada teste experimental para a determinação da queda de pressão estática em função de temperatura do ar de secagem, foram determinados os teores de umidade das amostras de frutos de amendoim. Ficou constatado uma variação média máxima de um ponto percentual em relação ao percentual de água de 10% b.u., verificado no início dos testes.

Constatou-se ainda que as maiores quedas na pressão estática foram verificadas para a temperatura de $51,25^{\circ}\text{C}$, para toda a faixa de fluxo de ar estudada.

De acordo com a Tabela 17, a análise de variância mostra que houve diferenças significativas de pressão estática para as diversas temperaturas estudadas.

TABELA 17- Análise de variância da queda de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, com 0% de impureza, teor de umidade de 10% b.u., espessura da camada de 1,0 m e método de enchimento livre.

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
TEMPERATURA	4	36,3576	9,0894	30,55 **
FLUXO	4	423,9049	105,9762	356,23 **
TEMPER. x FLUXO	16	14,4288	0,9018	3,03 **
RESÍDUO	50	14,8748	0,2975	
TOTAL	74	489,5662		

** = Significativo ao nível de 1% de probabilidade

4.7. Efeito do fluxo de ar

Foram conduzidos 300 testes experimentais utilizando-se 5 diferentes taxas de fluxos de ar, na faixa de 7,27 a 85,85 m³/min.m², interagindo individualmente com 5 teores de umidade, 4 níveis de impurezas, 3 espessuras da camada do produto, 5 níveis de temperatura do ar e 3 métodos de enchimento da coluna de teste. A influência do fluxo de ar na queda da pressão estática através da massa de frutos de amendoim, em relação a esses parâmetros é mostrada nas das Figuras 2, 5, 6, 7 e 10, respectivamente. Todas as curvas foram traçadas em escala logarítmica, sendo substancialmente paralelas e com convexidade ascendente, consistindo de 5

segmentos de retas com diferentes inclinações, o que está de acordo com Sheldon et al., citado por AKRITIDIS et al. (1979).

Ainda de acordo com as Figuras 2, 5, 6, 7 e 10 ficou evidenciado, em todos os casos, que com o aumento das taxas de fluxo de ar ocorreram acréscimos nas quedas de pressão estática através da massa de frutos de amendoim, independentemente do tratamento. Estes acréscimos foram mais acentuados para fluxos de ar mais elevados dentro da faixa estudada. Um acréscimo do fluxo de ar de 7,27 para 85,85 m³/min.m², resultou numa elevação média na queda de pressão estática de 16,20 mm ca/m, ocorrida na interação espessura da camada com o fluxo de ar.

Analisando-se a influência isolada do fluxo de ar na determinação da queda na pressão estática através da massa de frutos de amendoim, de acordo com as Tabelas 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, e 17 observa-se que as interações duplas fluxo de ar com teor de umidade, fluxo de ar com teor de impurezas, fluxo de ar com espessura da camada, fluxo de ar com temperatura do ar e fluxo de ar com método de enchimento, foram igualmente significativas ao nível de 1% de probabilidade de acordo com o Teste de Tukey.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e as condições em que foi realizado este trabalho, concluiu-se que:

- 5.1 - Houve influência do teor de umidade no perfil da pressão estática, através da massa de frutos de amendoim. A possível causa dessa ocorrência foi o efeito da elevação do teor de umidade na massa específica aparente e na porosidade da massa do produto.
- 5.2 - Houve um aumento na pressão estática com o aumento da espessura da camada do produto. Duplicando-se a espessura da camada de 1 para 2 m, a queda na pressão estática aumentou de 1,88 para 3,50 mm ca/m, correspondendo a uma elevação de, aproximadamente, 90% na resistência ao fluxo de ar.
- 5.3 - O método elevador de canecas para enchimento da coluna de testes, foi o que resultou em maior queda de pressão estática para toda a faixa de fluxo de ar estudada, devido a uma maior altura de queda utilizada neste método, o que ocasionou maior compactação da massa de amendoim.

- 5.4 - À medida em que as impurezas da própria cultura, com granulometria maior que as do produto, foram adicionadas à massa de frutos de amendoim, para qualquer fluxo de ar na faixa estudada, ocorreu uma redução na pressão estática.
- 5.5 - Ficou evidenciado que, para a faixa de temperatura de 26,7 a 85,1⁰C, ocorreram variações na queda de pressão estática, atingindo valores mínimos de 0,58 mm ca/m, para a temperatura de 85,1⁰C e máximo de 2,80 mm ca/m, para a temperatura de 51,25⁰C, considerando-se o fluxo de ar de 7,27 m³/min.m².
- 5.6 - Com o aumento dos fluxos de ar ocorreram acréscimos na queda de pressão estática, independentemente, do tratamento.
- 5.7 - A análise de variância demonstrou que a influência isolada do fluxo de ar, na queda de pressão estática foi significativa, ao nível de 1% de probabilidade, de acordo com o teste de Tukey.
- 5.8 - A temperatura do ar de secagem influenciou significativamente na queda de pressão estática do ar. Essas variações são devidas, possivelmente, a um ligeiro aumento na turbulência do ar através da massa do produto, com o aumento da temperatura.

CAPÍTULO VI

RECOMENDAÇÕES

- 6.1 - Na determinação das propriedades físicas, utilizar a metodologia do deslocamento de líquido utilizando o tolueno, para avaliar o volume dos grãos, por ser um método que apresenta maior exatidão.
- 6.2 - Ajustar equações para representar os dados experimentais relacionando a queda de pressão estática com os fatores que a influenciam.
- 6.3 - Utilização de metodologia que determine os fatores de fricção e turbulência, que causam a dissipação continuamente da pressão do ar através da camada do produto.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, C.F.Jr.; FISH, Jr. , J.D. Airflow resistance characteristics of bulk piled sweet potatoes . Transactions of the ASAE, St. Joseph, 25 (4):1103-6 , 1982 .

AKRITIDIS, C.B.; SIATRAS, A.J. Resistance of pumpkin seeds to airflow. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 22(6):1414-6, 1979.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Regras para Análise de Sementes. Brasília, DNPV/DISEM, 1980. 188p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Drying Cereal Grains. Westport: The AVI Publishing Company, 1974, 265p.

CALDERWOOD, D.L. Resistance to airflow of rough , brown and milled rice. Transactions of the ASAE, St. Joseph , 16(3):525-532 , 1973.

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M; ARAGÃO, R.F; SANTANA, E.F & SILVA, F.A.S. Estudo da Morfologia Geométrica em Grãos. Revista Nordestina de Armazenagem, III (1): 3-30, 1986.

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M; FILHO, J.G.F. Determinação da porosidade de sementes de Mamona (*Ricinus communis L.*) e Algaroba (*Prosopis juliflora (SW) DC*). Revista Nordestina de Armazenagem, I (I): 55-64, 1984.

DAVIS , R.B,Jr.; BAKER, V.H. The resistance of Long and Chopped Hay to Air Flow . Agricultural Engineering, St. Joseph, 92-100 , 1951 .

EMBRAPA. Amendoim 1ª e 2ª safra, previsão e acompanhamento de safras, Volume 19, Nº 4 Pág. 13-14, 1995.

EMBRAPA. Amendoim BR-1 informações para seu cultivo. Campina Grande - PB: MAARA/CNPA/EMBRAPA, 1994 (Folder).

ERGUN, S. Fluid flow trough packed columns. Chemical Engineering Progress, 48 (2): 89-94, 1952.

FARMER, G.S.; BRUSEWITZ, G.H.; WHITNEY, R.W. Resistance to airflow of bluestem grass seed . Transactions of the ASAE, St. Joseph , 24(2): 480-3 , 1981 .

GRAMA, S.N; BERN, C.J; HURBURGH Jr., C.R. Airflow resistance of mixtures of shelled corn and fines. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 27(1): 268-72, 1984.

GUNASEKARAN, S.; JINDAL, V.K; SHOVE, G.C. Resistance to airflow of paddy (rough rice) in shallon depths. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 26(2):601-5, 1983.

GUNASEKARAN , S.; JACKSON, C.V. Resistance to airflow of grain sorghum. Transactions of the ASAE , St. Joseph,31(4): 1237-40 , 1988.

GUSTAFSON, R.J; HALL, G.E. Density and Porosity Changes of Shelled Corn During Drying. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 1972.

HALL, C.W. Drying farms crops. 5th ed., Ann Arbor, Michigan, Edwards Brothers, 1966. 336p.

HAQUE, E.; AHMED, Y.N; DEYOCE, C.W. Static pressure drops in fixed bed of grain as affected by grain moisture content. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 25(4):1095-8, 1982.

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 , 21(5): 997-1000 , 1978 .

HENDERSON, S.M. Resistance of shelled corn and bin walls to air flow . Agricultural Engineering , St. Joseph , 24(6): 367-9, 1943 .

HUSAIN , A. ; OJHA, T.P. Resistance to the passage of air through rough rice . Journal Agricultural Engineering Research, London, 14(1): 47-53 , 1969 .

JAYAS, D.S.; SOKHANSANJ, S; MOYSEY, B.C.; BARBER, E.M.
Airflow resistance of canola (Rapeseed). Transactions of the ASAE, St.
Joseph, 30(5):1484-8, 1987.

JAYAS, D.S.; ALAGUSUNDARAM, K.; IRVINE, D.A. Resistance to
airflow through bulk flax seed as affected by moisture content,
direction of airflow and foreign material . Canadian Agricultural
Engineering , Ottawa , 32(2): 279-85 , 1991 a .

JAYAS, D.S.; SOKHANSANJ, S.; SOSULSKI , F.W. Resistance of bulk
canola seed to airflow in presence of foreign material. Canadian
Agricultural Engineering , Ottawa, 33(1): 45-57 , 1991 b .

MOHSENIN, N.N. Physical properties of plant and animal material.
Gordson and Breach. Science Publishers, New York, 2nd Edição, 1978.
742p.

PATIL, B.G; WARD, G.T. Resistance to airflow of oilseed rape.
Journal of Agricultural Engineering Research, London, 41(5): 5-31,
1988 .

PATTERSON, R.J.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; BICKERT, W.G. Static
pressure-airflow relationships in packed beds of granular biological
materials such as grain-II. Transactions of the ASAE, St. Joseph,
14(1): 172-4, 1971.

PUZZI, D. Abastecimento e armazenagem de grãos. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. Campinas, SP. 1989.

SHEDD, C.K. Some new data on resistance pressure drop of grains to air flow. Agricultural Engineering, St. Joseph, 32(9): 493-5, 1951.

SHEDD, C.K. Resistance of grains and seeds to airflow. Agricultural Engineering, St. Joseph, 34(9): 616-9, 1953.

SHELDON, W.H.; HALL, C.W.; WANG, J.K. Resistance of shelled corn and wheat to low air flows. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 3(2): 92-4, 1969.

SIEBENMORGEM, T.J.; JINDAL, V.K. Airflow resistance of rough rice as affected by moisture content, fines concentration and bulk density. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 30(4): 1138-43, 1987.

SILVA, L.C.; DALPASQUALE, V.A. Perda de Carga em camadas fixas de guar. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, volume II, 1888- 93, 1993.

SILVA, M.G.; PEDROZA, J.P.; OLIVEIRA, J.F. Resistência das sementes de milho ao fluxo de ar. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Volume II, 1116-27, 1993.

SILVA, I.J.O. Perda de pressão em grãos de arroz em casca e milho em função do teor de umidade, nível de impureza, altura de camada e taxa de fluxo de ar. Tese de Mestrado. Campinas-SP, 1992. 74p.

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, 33(4): 1281-5, 1990.

STEELE, J.L. Resistance of peanuts to airflow. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 29(2): 573-7, 1974.

THOMPSON, R.A.; ISAACS, G.W. Porosity determinations of grains and seeds with an air-comparison pycnometer. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan 49085, n^o 66-803, 1966.

WILHELM, L.R.; TOMPKINS, F.D.; MULLINS, C.A. Airflow resistance of pea pods. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 26(3): 946-9, 1983.

YANG, X.; BERN, C.J.; HURBURGH Jr.; C.R. Airflow resistance of cleanings removed from corn. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 33(4): 1299-302, 1990.