

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCOLA

ALGUMAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA  
PIMENTA-DO-REINO PRETA (*Piper nigrum* L.)  
VARIEDADE KALLUVALLY

Antonio Machado Leitão  
Engenheiro Agrônomo

Orientador:

Prof. Dr. José Luiz Vasconcellos da Rocha

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrí-  
cola da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do Tí-  
tulo de Mestre em Tecnologia de Alimentos.

1983

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
UNICAMP

À Maria dos Anjos e  
aos meus pais pelo  
amor, compreensão e  
estímulo.

AGRADECIMENTOS

O autor deseja externar seus sinceros agradecimentos:

- ao Prof. Octávio Hamilton Botelho Mourão, Magnífico Reitor da Universidade do Amazonas;
- ao Prof. Dr. José Luiz Vasconcellos da Rocha, pela paciente e objetiva orientação;
- aos Professores: Inácio M. Dal Fabro, José Tadeu Jorge e Nilo Sérgio S. Rodrigues;
- à Bibliotecária Angelina Franco de Godoi;
- ao Técnico Dagoberto Favoretto Júnior;
- aos Professores: Merched, Bamonde e Lira, da Universidade do Amazonas;
- aos colegas e amigos: Edevaldo, Edielson, Lourival, Lúcio, Raul e Telma; e
- a todas as pessoas que direta ou indiretamente tornaram possível a realização deste trabalho.

ÍNDICE

Assunto	Página
Índice	iv
Índice de Quadros	viii
Índice de Figuras	xi
Resumo	01
Summary	03
1. Introdução	05
2. Revisão Bibliográfica	07
2.1. Aspectos da planta e da cultura	07
2.2. Aspectos da colheita e beneficiamento	13
2.3. Aspectos da comercialização	16
2.4. Importância das propriedades físicas dos ma teriais biológicos	20
2.5. Umidade de equilíbrio	21
2.6. Características aerodinâmicas	25
2.6.1. Velocidade terminal	26
2.6.2. Perda de carga	29
2.7. Coeficientes de atrito	31

Assunto	Página
2.8. Ângulo de talude ou de repouso natural	36
3. Materiais e Métodos	39
3.1. Materiais	39
3.1.1. Matéria-prima	39
3.1.2. Equipamentos	39
3.1.2.1. Peso específico aparente	39
3.1.2.2. Classificação por tamanho	41
3.1.2.3. Umidade de equilíbrio	41
3.1.2.4. Velocidade terminal	41
3.1.2.5. Perda de carga	44
3.1.2.6. Coeficientes de atrito	46
3.1.2.7. Ângulo de talude ou de repouso natural	49
3.1.2.8. Outros equipamentos	51
3.2. Métodos	52
3.2.1. Caracterização da matéria-prima	52
3.2.1.1. Umidade	52
3.2.1.2. Dimensões características e peso	52
3.2.1.3. Peso específico real	53

Assunto	Página
3.2.1.4. Peso específico aparente	54
3.2.1.5. Grãos chochos	54
3.2.1.6. Classificação por tamanho	55
3.2.2. Umidade de equilíbrio	56
3.2.3. Ácidos graxos fixos	58
3.2.4. Velocidade terminal	58
3.2.5. Perda de carga	59
3.2.6. Coeficientes de atrito	60
3.2.7. Ângulo de talude ou de repouso natu- *     ral	61
4. Resultados e Discussões	63
4.1. Caracterização da matéria-prima	63
4.2. Umidade de equilíbrio	71
4.3. Velocidade terminal	81
4.4. Perda de carga	83
4.5. Coeficientes de atrito	86
4.6. Ângulo de talude ou de repouso natural	90
5. Conclusões	92
5.1. Caracterização da matéria-prima	92
5.2. Umidade de equilíbrio	93
5.3. Velocidade terminal	93

Assunto	Página
5.4. Perda de carga	94
5.5. Coeficientes de atrito	94
5.6. Ângulo de talude ou de repouso natural	95
6. Referências Bibliográficas	96
Simbologia	108

## ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO Nº	Assunto	Página
01	Composição química da pimenta-do-reino branca e preta	15
02	Sinopse das especificações para a classificação da pimenta-do-reino, para fins de comercialização exterior	18
03	Área colhida e quantidade produzida de pimenta-do-reino preta, nos principais estados brasileiros no período de 1978 a 1980	19
04	Quantidade exportada e valor a bordo no Brasil da pimenta-do-reino preta, no período de 1978 a 1980	20
05	Preparo das soluções de ácido sulfúrico para controle da umidade relativa na determinação de umidade de equilíbrio	57
06	Valores e média da umidade, ácidos graxos fixos, grãos chochos, peso específico aparente e peso específico real da pimenta-do-reino preta variedade Kalluvally	66

QUADRO Nº	Assunto	Página
07	Variações de peso e diâmetros encontrados em cem grãos de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally e cálculos do diâmetro equivalente, área de projeção, média, desvio padrão e coeficiente de variação	67
08	Varição de peso, cálculo da peneira média, verificados durante a classificação em peneiras planas oscilatórias, de grãos de pimenta-do-reino preta variedade Kalluvally	70
09	Variações de peso dos grãos de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally com umidade inicial de 4,91% acondicionada em diferentes umidades relativas	74
10	Valores e média final da umidade de equilíbrio da pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally de umidade inicial 4,91%, acondicionada nas diferentes umidades relativas expressas em base seca	75
11	Variações de peso dos grãos de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally, com umidade inicial de 21,54%, acondicionada em diferentes umidades relativas	76

QUADRO Nº	Assunto	Página
12	Valores e média final da umidade de equilíbrio da pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally, de umidade inicial 21,54%, acondicionada nas diferentes umidades relativas, expressas em base seca	77
13	Valores médios de absorção, dessorção e intermediários para pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally expressos em base seca	78
14	Valores experimentais e média da velocidade terminal dos grãos de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally	82
15	Valores experimentais para o cálculo da perda de carga de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally	84
16	Valores médios dos coeficientes de atrito estáticos de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally com vários materiais de superfície	87
17	Valores experimentais do ângulo de talude ou de repouso natural dos grãos de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally	91

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº	Assunto	Página
01	Equipamento para determinação do peso específico aparente	40
02	Esquema do conjunto de peneiras oscilatórias para a classificação por tamanho dos grãos de pimenta	42
03	Esquema da coluna pneumática para separação e determinação da velocidade terminal	43
04	Esquema do equipamento para determinação da perda de carga	45
05	Esquema do equipamento acoplado ao Instron Universal, para a determinação dos coeficientes de atrito com superfícies	47
06	Esquema do equipamento acoplado ao Instron Universal, para determinação do coeficiente de atrito interno	48
07	Equipamento para o estudo do ângulo de talude	50
08	Gráfico de umidade de equilíbrio da pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally	79

FIGURA Nº	Assunto	Página
09	Gráfico de umidade de equilíbrio usando a equação de Henderson comparada com a obtida utilizando a equação do terceiro grau, para pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally	80
10	Curva de perda de carga do fluxo de ar para a pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally	85
11	Gráfico característico da força de atrito versus deslocamento para a pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally, com 9,54% de umidade, em chapa galvanizada	89

## RESUMO

A pimenta-do-reino (*Piper nigrum*, L.) é um condimento muito apreciado e de grande interesse mundial apresentando boas condições de produção no Brasil especialmente na região norte.

É uma planta trepadeira perene que pertence à família *Piperaceae*, oriunda da Costa do Malabar na Índia, não apresentando na sua literatura maiores informações disponíveis principalmente sobre o produto colhido.

No presente trabalho procurou-se estudar algumas características físicas e mecânicas da pimenta-do-reino preta, variedade Kahluvally, tais como: pesos específicos real e aparente, dimensão e peso de cem grãos, porcentagem de grãos chochos, classificação por tamanho, umidade de equilíbrio, teor de ácidos graxos fixos, velocidade terminal, perda de carga e ângulo de talude. Aos dados obtidos procurou-se sempre aplicar análises matemáticas e estatísticas para melhor caracterização e descrição dos fenômenos.

O conteúdo deste trabalho pode oferecer dados de interesse em aplicações práticas para o estudo de operações que vão desde a colheita da matéria-prima até a sua transformação para consumo como condimento.

### SUMMARY

Black pepper (*Piper nigrum*, L.) is a well appreciated condiment exhibiting good conditions for its production in Brazil, mainly in the Northern region.

It is a climber perennial vine which belongs to the *Piperaceae* family originated from the Malabar Coast, India. The literature does not disclose much information about the quality of the harvested product.

The present work attempts to study some physical and mechanical properties of the black pepper, Kalluvaly variety, such as bulk density and specific weight, dimensions and weight of 100 grains, percentage of light grains, classification by size, equilibrium moisture content, non-volatile ether extract content, terminal velocity, pressure drop and angle of repose. It was attempted to apply statistics and mathematical analysis to the data obtained to better characterize the description of the phenomena.

The content of this research work can offer data of interest to practical applications to study the operations understood since the harvesting to the final processing as condiments.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil, pela sua extensa área agrícola, apresenta diversas condições de clima e solo, que possibilitam o desenvolvimento das mais variadas espécies vegetais de interesse econômico para consumo humano. Dentre essas espécies, a pimenta-do-reino (*Piper nigrum*, L.) vem assumindo um papel de crescente importância na agricultura nacional, contribuindo com parcela apreciável no volume de exportação brasileira de produtos agrícolas.

Este condimento é conhecido desde tempos mais remotos, sendo uma das mais ambicionadas especiarias do Mundo Antigo.

A pimenta-do-reino é apresentada comercialmente na forma de pequenos grãos redondos, rugosos e secos, ou em pó, constituindo-se em importante condimento utilizado no preparo de alimentos.

A boa qualidade da pimenta-do-reino brasileira, possibilitou ao país, tornar-se grande concorrente no mercado in

ternacional, competindo com os países produtores e exportadores, como a Índia, Indonésia, Sarawak, Sri-Lanka e Madagascar. No entanto, a literatura, a respeito deste produto, apresenta-se bastante escassa com poucas informações, quer do ponto de vista agrônômico, quer do ponto de vista pós-colheita.

Neste trabalho, procurou-se estudar com mais detalhes algumas das características físicas e mecânicas da pimenta-do-reino preta de interesse para a colheita, limpeza, seleção, beneficiamento, armazenamento e transporte. Com esses elementos procurou-se fornecer subsídios para o desenvolvimento de novas técnicas e de equipamentos visando o incremento da cultura e o melhor aproveitamento da matéria-prima.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Aspectos da planta e da cultura

A pimenteira-do-reino é uma planta pertencente à divisão *Embryophyta Siphonogama*, sub-divisão *Angiosperma*, classe *Dicotylédônia*, sub-classe *Archichlamydeae*, ordem *Piperales*, sub-ordem *Piperineae*, família *Piperaceae*, gênero *Piper*, espécie *Piper nigrum*, L.; segundo a classificação de LAWRENCE (1971).

A espécie *Piper nigrum*, L. é a mais extensivamente cultivada, existindo ainda duas outras que apresentam valor comercial e são cultivadas em suas regiões de origem: *Piper longum*, L. (Índia) e *Piper officinarum*, L. (Java), CARDOSO (1978).

De acordo com ROSENGARTEN Jr. (1969), existem referências feitas à pimenta-do-reino na Índia há mais de três mil anos, na literatura medicinal do antigo Sânscrito. A maio

ria dos nomes europeus dados à pimenta-do-reino são derivados do Sânscrito *pippali*, uma palavra usada para descrever pimenta longa. Na Inglaterra, era chamada "pepperers"; na França "poiuriers"; e, na Alemanha, "pfeffersäcke".

No tempo de Shakespeare, o cheiro picante (pungente) de pimenta era tão bem conhecido na Inglaterra, como sua menção em "Twelfth Night, Act III, Scene IV, testifies:

"Aguecheeks: Here's the challenge; read it: I warrant there's vinegar and pepper in't".

A pimenta-do-reino foi uma das primeiras especiarias comercializadas entre o Oriente e a Europa. A sua intensa comercialização adquiriu tamanha importância na época do Imperador Marco Aurélio, que, na sua administração, os romanos aproveitaram para impôr taxas alfandegárias à Alexandria para este produto. Também, durante a vitória de César na Palestina, em 1101 D.C., cada soldado genovês triunfante recebia duas libras de pimenta-do-reino como parte de seu espólio, como citado por ROSENGARTEN Jr. (1969).

A planta é uma trepadeira perene, com várias hastes, podendo atingir até vinte metros de altura, quando cultivada sem poda e tutorada por árvores de grande porte. Culturas

bem conduzidas não ultrapassam de dois e meio a três metros de altura (ROSENGARTEN Jr., 1969).

As folhas alternadas e opostas, são largas, geralmente apresentam doze a vinte e quatro centímetros de comprimento, denteadas, de cor verde escuro. As flores são pequenas, esbranquiçadas e apresentam-se em amentilhos, ou mais propriamente espigas, com dez a vinte centímetros de comprimento (PARRY, 1969; GEIDA, 1971 e CARDOSO, 1978). Cada espiga localizada nos entre-nós, em posição oposta às folhas, pode produzir cinquenta a sessenta frutos com 0,20 a 0,60 centímetros de diâmetro (GERHARDT, 1973). Os frutos, comumente chamados grãos ou grãos de pimenta, são pequenos, esféricos, de coloração verde escura, quando verdes; tornando-se amarelados e finalmente vermelhos, quando maduros (PARRY, 1969).

A espécie *Piper nigrum*, L. apresenta dezenas de variedades distintas. Essas variedades são reunidas em dois grandes grupos: um grupo onde os representantes possuem folhas grandes e entre-nós compridos; e outro com folhas pequenas e entre-nós curtos (GEIDA, 1971 e CARDOSO, 1978).

Como tipo característico do primeiro grupo, tem-se a variedade "lampong", originária da Indonésia; e, como representante do segundo grupo, a variedade conhecida como "muntok", também proveniente da Indonésia.

Na Índia, o tipo que mais se aproxima da lampong é a variedade balamkotta, e o tipo que se aproxima da muntok é a variedade Kalluvally. A variedade balamkota é considerada como das melhores, apresentando a particularidade de seus frutos amadurecerem ao mesmo tempo, facilitando sobre maneira a colheita. A variedade Kalluvally é mais produtiva, porém seus frutos amadurecem irregularmente, dificultando a colheita. No Brasil, as variedades mais cultivadas são: Balamkotta, Balamkotta jones, Cingapura, Kalluvally, Kudaravally e Kari - munda (CARDOSO, 1978).

O ciclo vegetativo da pimenteira-do-reino é de vinte anos (PARRY, 1969), porém, a viabilidade de produção comercial limita-se do sétimo ao décimo segundo ano. Observando-se um decréscimo gradativo da produção após este período (GEIDA, 1971 e GERHARDT, 1973).

A pimenteira-do-reino é originária da Costa do Malabar na Índia. Planta de clima tipicamente quente e úmido, atualmente, é cultivada na Tailândia, Vietnã, Sumatra, Madagascar, Brasil e outros países. Produz bem em regiões tropicais com altitudes de quinhentos metros e precipitação pluviométrica anual de dois mil e quinhentos milímetros, bem distribuídos (ROSENGARTEN Jr., 1969).

De acordo com CARDOSO (1978), em altitudes inferiores a seiscentos metros, a planta requer chuvas abundantes; em altitudes superiores, essa exigência é menor, porém, nunca inferior a hum mil e oitocentos milímetros.

No tocante a solos, terrenos com boa fertilidade, planos ou levemente inclinados, ricos em humus, bem drenados e levemente sombreados, prestam-se bem ao plantio da pimenteira-do-reino (ROSENGARTEN Jr., 1969 e CARDOSO, 1978).

O melhor tipo de solo para o cultivo da pimenta-do-reino é o solo profundo, sílico-argiloso, poroso e com um lençol freático a dois metros de profundidade. Quanto à acidez, tolera bem pH em torno de 5.5 (CARDOSO, 1978).

A variedade pioneira, introduzida no Brasil, foi a Cingapura, trazida por imigrantes japoneses, na década de trinta, através de mudas de Cingapura. Essa variedade foi desenvolvida inicialmente no município de Tomé Açu, PA, onde encontrou boas condições de clima e solo (PARRY, 1969). Hoje, distintas variedades são cultivadas em vários municípios da Amazônia e em outras regiões do país, mas ainda é o Estado do Pará que detem a maior parcela da produção brasileira, com cerca de noventa por cento.

A propagação mais usual da pimenteira-do-reino é realizada através do enraizamento de estacas, selecionadas das

partes jovens de plantas saudáveis, vigorosas e produtivas (ROSENGARTEN, Jr. 1969 e CARDOSO, 1978). Pode ainda ser multiplicada por via seminífera. Porém, este processo apresenta o inconveniente de produzir plantas mais frágeis, com longevidade mais curta, além de começarem mais tardiamente a produção (CARDOSO, 1978).

Estacas com trinta a quarenta centímetros, contendo de três a quatro gemas bem formadas, são enterradas em recipientes do tipo jacazinhos ou laminados de plástico até uma profundidade de quinze centímetros. São, inicialmente, deixadas em viveiros e, depois de se obter enraizamento satisfatório, são transplantados para o campo. Regularmente regadas, as estacas estarão enraizadas dentro de três a quatro meses (ROSENGARTEN Jr., 1969; GEIDA, 1971 e CARDOSO, 1978). Para abreviar o tempo de enraizamento, pode-se fazer uso de substâncias conhecidas como fito-hormônicas (CARDOSO, 1978).

A época mais apropriada para o plantio é o início das chuvas, de preferência em dias nublados, nos meses de outubro a dezembro (ROSENGARTEN Jr., 1969 e CARDOSO, 1970).

Tratando-se de planta trepadeira, a pimenteira-do-reino necessita de suportes para o seu desenvolvimento. Suas primitivas culturas eram feitas em bosques naturais, plantando-se as mudas ao pé de árvores já formadas. Atualmente, se

gundo ROSENGARTEN Jr. (1969) e CARDOSO (1978), utilizam-se suportes de concreto ou de madeira com doise meio a três metros de altura, com espaçamento de dois por dois metros a três por três metros. Recomendam, ainda, os autores, a realização de podas regulares para estimularem a ramificação de ramos produtivos, controlando o crescimento e facilitando a colheita.

## 2.2. Aspectos da colheita e beneficiamento

O florescimento da pimenteira-do-reino inicia-se entre dois e meio a três anos de idade, quando oriunda de estacas enraizadas e, a frutificação, geralmente ocorre entre os meses de junho a julho (CARDOSO, 1978).

Pequenas colheitas podem ser feitas a partir do terceiro ano após o plantio (ROSENGARTEN Jr., 1969), embora as maiores produções ocorram do sétimo ao décimo segundo ano (PARRY, 1969).

Normalmente, uma boa pimenteira pode produzir até quinze quilos de pimenta verde. Após o beneficiamento, esse peso diminui para quatro a cinco quilos de pimenta-do-reino preta, pronta para a comercialização (CARDOSO, 1978).

A colheita dos frutos da pimenteira, que geralmente inicia-se em dezembro, prolongando-se até janeiro, é feita manualmente. Os amentilhos desprendem-se facilmente com leve torsão. e, à medida que vão sendo apanhados, são colocados em bolsas ou cestos. A colheita nos pontos mais altos é feita com o auxílio de escadas tipo tripé, semelhante às utilizadas na colheita de café (ROSENGARTEN Jr., 1969; GEIDA, 1971 e CARDOSO, 1978).

Para a obtenção de pimenta-do-reino preta, os frutos são colhidos em início de maturação, quando começam a tomar a coloração amarelada.

Após a colheita, os frutos são destacados da infrutescência, pelo uso de batimento leve, com paus, ou fricção manual. A seguir, são amontoados para sofrerem leve fermentação e, posteriormente, colocados em esteiras ou piso cimentado, para secagem natural, por cerca de três a quatro dias (ROSENGARTEN Jr., 1969; PARRY, 1969; GEIDA, 1971 e CARDOSO, 1978).

Os grandes produtores preferem retirar os frutos dos amentilhos por percussão, com posterior separação por meio de ventilação (GEIDA, 1971). Na Ásia, é prática comum, imergir os frutos colhidos em água quente, para depois serem espalhados para secagem natural. O objetivo desta imersão é tornar o produto de melhor qualidade (PARRY, 1969).

QUADRO 01 - Composição química média da pimenta-do-reino branca e preta

Composição Química (%)	branca	preta
Umidade	13,4	11,9
Amido	55,41	38,83
Fibras	3,14	13,0
Proteínas	10,9	12,0
Cinzas totais	1,77	4,8
Cinzas insolúveis em HCl	0,10	0,47
Extrato etéreo total	7,64	9,5
Extrato etéreo fixo	6,91	8,4
Extrato etéreo volátil	0,73	1,1

FONTE: GEIDA, 1971.

Segundo PARRY (1969) e GEIDA (1971), no Brasil, a pimenta-do-reino preta é preparada apenas por secagem natural (pequenos produtores) ou em secadores industriais (grandes produtores).

A pimenta-do-reino branca, de maior valor comercial é preparada de frutos colhidos quando totalmente maduros (vermelhos). Colocam-se submersos em água corrente durante sete a dez dias para amolecimento e retirada das partes do fruto (epicarpo e mesocarpo), seguindo-se de lavagem e secagem (PARRY, 1969; ROSENGARTEN Jr., 1969; GEIDA, 1971 e CARDOSO, 1978).

Os grandes produtores preferem remover as partes do fruto mecanicamente, após a maceração, seguida de lavagem e secagem artificial (GEIDA, 1971).

### 2.3. Aspectos da comercialização

Em se tratando de produto de exportação, a qualidade é exigência básica no mercado internacional. Objetivando uma concorrência em pé de igualdade com outros produtores, o Conselho Nacional de Comércio Exterior, órgão vinculado à CACEX, definiu especificações de padronização da pimenta-do-

reino (*Piper nigrum*, L.) visando a classificação e a fiscalização para a exportação, através da Resolução nº75 de 14 de outubro de 1971, cujos dados sumarizados por CARDOSO (1978) encontram-se no QUADRO 2.

A demanda deste importante condimento é relativamente crescente, mas a oferta varia muito, em virtude das condições climáticas, doenças e pragas que afetam a produção. Assim, os preços são bastante instáveis, variando de ano para ano (CARDOSO, 1978).

Nos QUADROS 3 e 4, podemos verificar o desenvolvimento da cultura de pimenta-do-reino, nos principais estados produtores nacionais, valores e quantidades exportadas.

Os mercados consumidores mais importantes para a pimenta-do-reino são os Estados Unidos, Japão e países da Comunidade Econômica Européia, destacando-se Reino Unido, Alemanha Ocidental, França, Itália, Holanda, Bélgica e Suíça (GEIDA, 1971).

QUADRO 02 - Sinopse das especificações para a classificação da pimenta-do-reino, para fins de comercialização exterior

SEGUNDO A QUALIDADE(\*)

SEGUNDO A APRESENTAÇÃO

Tolerâncias - Percentages Máximas

Classe	Tipo	grãos			grãos em- parcidos	grãos es- curecidos	total (emparde- cidos mais escurecidos do produto	Impurezas próprias	Observações
		grãos avariados inclusive chochos	chochos	chochos					
Preta	I	Grãos pretos, pelí- cula enrugada ou não. Os grãos des- ta classe, quando descascados ou des- peliculados, serão considerados pimen- ta preta.	3	4	-	-	1		
	II	Inteiros, sa- dios, tamanho e desenvolvi- mento normais	8	10	-	-	2		Os grãos descasca- dos ou despelícula- dos não afetarão a classificação
	III	Inteiros, sem tamanho uni- forme	16	20	-	-	4		
Branca	I	Grãos brancos, des- providos de pelícu- la. Os grãos em- parcidos e/ou es- curecidos serão co- mo tais considera- dos e enquadrados nesta classe.	-	2	40	5	40	0,5	
	II	Inteiros, sa- dios, tamanho e desenvolvi- mento normais	-	10	40	20	-	2	
	III	Inteiros, sem tamanho uni- forme	-	20	40	20	-	4	Especificar no Cer- tificado de Classi- ficação as porcenta- gens de grãos empar- cidos e/ou escure- cidos

(\*) Consideradas constantes as especificações: odor= natural; extrato etéreo fixo= 6,75%; unidade= 14% e materiais estranhos= 0,5%

Fonte: CARDOSO (1978)

QUADRO 03 - Área colhida e quantidade produzida de pimenta-do-reino preta, nos principais estados brasileiros no período de 1978 a 1980.

Estados	Ano	Área colhida (ha)	Quantidade produzida (ton)
Pará	1978	12.276	44.199
	1979	15.292	46.289
	1980	19.072	58.264
Bahia	1978	1.946	1.906
	1979	2.877	1.363
	1980	2.055	2.454
Espírito Santo*	1978	153	167
	1979	208	187
	1980	221	471
Maranhão	1978	90	200
	1979	178	632
	1980	197	677
Paraíba	1978	942	211
	1979	935	202
	1980	1.092	233
Produção	1978	15.786	47.015
Total da	1979	19.879	49.006
Federação	1980	23.039	62.563

Fonte: Anuário Estatístico do Brasil - FIBGE, 1981.

QUADRO 04 - Quantidade exportada e valor a bordo no Brasil da pimenta-do-reino preta, no período de 1978 a 1980.

Ano	Quantidade exportada (ton)	Valor a bordo no Brasil	
		(Cr\$1.000)	(U\$1.000)
1978	25.350	837.821	47.837
1979	22.000	1.009.486	39.459
1980	26.172	2.210.822	42.440

Fonte: Anuário Estatístico do Brasil - FIBGE, 1981.

#### 2.4. Importância das propriedades físicas dos materiais biológicos

A literatura existente relativa às características físicas de produtos agrícolas, apresenta grande número de pesquisas nesta área, durante as duas últimas décadas.

MOHSE<sup>N</sup>IM (1965) enfatiza a importância do conhecimento das características físicas dos materiais agrícolas, procurando com isso despertar o interesse dos pesquisadores para esse campo da ciência. Ainda MOHSE<sup>N</sup>IM (1965) sintetiza algumas das características mais importantes que precisam ser determinadas, e refere-se aos poucos trabalhos existentes.

Tamanho, forma, densidade, textura superficial, cor, elasticidade, são as características físicas mais importantes dos produtos agrícolas, que podem ser utilizadas para classificação de sementes, bem como, no desenho de equipamentos e estruturas de seleção, limpeza, transporte pneumático e armazenamento, HARMOND *et al.* (1965), JINDAL *et al.* (1974) e MORI TA e SINGH (1979).

## 2.5. Umidade de equilíbrio

O conhecimento do conteúdo de umidade de materiais higroscópicos, entre os quais se incluem os produtos agrícolas, é do maior interesse por causa de sua direta relação com problemas de armazenamento e secagem, CHUNG e PFOST (1967).

Durante o armazenamento, quando a pressão do vapor da água no grão iguala-se à pressão do vapor da água no ambi-

ente, temos um equilíbrio, que representa a unidade de equilíbrio do produto.

Variando-se a umidade relativa do ambiente, há uma alteração na pressão do vapor da água no ar. Assim sendo, para cada valor de umidade relativa corresponde uma unidade de equilíbrio para o produto.

A condição de equilíbrio varia dependendo se a umidade presente no produto aumenta (absorção) ou diminui (dessorção), STROHMAN e YORGER (1967).

Vários pesquisadores se dedicaram ao estudo da unidade de equilíbrio de materiais biológicos, procurando equações que descrevessem o fenômeno, entre os quais estão: STROHMAN e YORGER (1967), HENDERSON (1952) citado por YOUNG e NELSON (1967), CHUNG e PFOST (1967), CHEN e CLAYTON (1971), CHEN (1971), DUSTAN *et al.* (1973) e YOUNG (1976).

Das equações empíricas mais relatadas pela literatura, as mais comuns pela sua simplicidade e relativa precisão, são as de:

$$\text{HENDERSON: } 1 - \phi = e^{-KTM^n}$$

$$\text{HENDERSON-THOMPSON: } 1 - \phi = e^{-a_1(T+a_2)M^{a_3}}$$

$$\text{CHUNG-PFOST: } \ell_n \theta = \frac{-a_1}{R(T+a_2)} e^{-a_3 \text{Meq}}$$

Dentre estas, a equação de HENDERSON tem sido muito utilizada no estudo de umidade de equilíbrio de produtos agrícolas pelos pesquisadores. Foi utilizada por TRAVAGLINI e TOSELLO (1968) e JORGE (1977) para curvas de umidade de equilíbrio de café e soja respectivamente, apresentando bons resultados para café despulpado e beneficiado e resultados regulares para café em coco e soja.

Estudos sobre absorção e dessorção de grãos de trigo, mostram que o produto que absorve água possui umidade de equilíbrio menor do que a do produto que dessorve água, YOUNG e NELSON (1967).

HENDERSON (1970) estudou a possibilidade de troca da composição química do material durante a dessorção e o efeito da respiração dos produtos. Em grãos de arroz, a respiração indicou não ser um fator complicante na determinação da umidade de equilíbrio.

A quantidade de água absorvida ou dessorvida, depende da pressão do vapor de água do ambiente, da temperatura e de certas características físicas do produto. A relação en

tre a quantidade de água absorvida pelo produto e pressão de vapor da água é representada pela curva de umidade de equilíbrio isotérmica. Essas curvas são na maioria das vezes do tipo sigmóide, NGODDY e BAKKER-ARKEMA (1970).

CHEN e CLAYTON (1971), WHITE *et al.* (1972) e DUNSTAN *et al.* (1973), analisaram o efeito da temperatura na umidade de equilíbrio para diversos materiais biológicos.

WHITE *et al.* (1972) cita uma pequena diferença nos níveis de umidade de equilíbrio, a diferentes temperaturas para milho e atribui esta diferença ao efeito da histerese.

DUNSTAN *et al.* (1973) estudando a absorção e dessorção de grãos de sorgo por método dinâmico e método estático, afirmam que o conteúdo da umidade de equilíbrio e o efeito da histerese diminui com o aumento da temperatura.

ALAM e SHOVE (1973) e HENDERSON e PIXTON (1981) utilizaram soluções de sais para o controle da umidade relativa, na determinação de curvas de umidade de equilíbrio de soja.

FRIESEN (1974) desenvolveu um procedimento para prever o conteúdo de umidade de equilíbrio de materiais biológicos, dentro das curvas de histerese.

CHAVEZ (1974) estudou a umidade de equilíbrio de variedades equatorianas e brasileiras de arroz, utilizando solu

ções de ácido sulfúrico para controle da umidade relativa do ambiente. O mesmo processo foi utilizado por YOUNG (1976) durante a determinação da umidade de equilíbrio de sementes de amendoim e amendoim em casca; e por JORGE (1977) para soja, variedade Santa Rosa.

SINÍCIO e ROA (1979) determinaram curvas de umidade de equilíbrio para quinze produtos agrícolas, utilizando o modelo matemático apresentado por ROA.

## 2.6. Características aerodinâmicas

Ar forçado tem sido utilizado para separação de resíduos de cereais (palhiço) e outros fragmentos da debulhação de grãos, desde a introdução de colhedeadas mecânicas na agricultura, UHL e LAMP (1966).

As propriedades aerodinâmicas de sementes e grãos, podem determinar, em parte, o comportamento desses grãos na separação em uma colhedeadas combinada, na limpeza de sementes e em sistemas de transporte pneumático, CRANE e CARLETON (1957).

### 2.6.1. Velocidade terminal

Uma partícula em queda livre, quando submetida a um fluxo de ar vertical, está sujeita a três tipos de força: a gravitacional, a de resistência e a devida ao empuxo do ar.

Quando a velocidade da partícula for nula, essas forças estarão em equilíbrio, e a velocidade do ar, será a velocidade terminal dessa partícula.

$$M (dV/d\theta) = (v_p \gamma_p - v_p \gamma) - F \quad (\text{HENDERSON e PERRY, 1966})$$

Por definição:

$$F = C A_p \gamma V^2 / 2$$

Logo:

$$V_t = \left[ 2mg (\gamma_p - \gamma) / C A_p \gamma_p \gamma \right]^{1/2} \quad (\text{I})$$

Velocidade terminal e coeficiente de arraste são duas funções da forma da partícula e do número de Reynolds (Re), HAWK *et al.* (1966).

$$Re = D_{eq} V \gamma / \mu \quad \rightarrow \quad V = Re \mu / D \gamma \quad (\text{II})$$

Combinando (I) e (II):

$$CRe^2 = \frac{2mg \text{ Deq}^2 \gamma (\gamma_p - \gamma)}{\mu^2 A_p \gamma_p} \quad (\text{III})$$

Devido a forma irregular, os grãos rolam e giram consideravelmente, quando são expostos a um fluxo de ar, HAWK *et al.* (1966). Normalmente os grãos assumem uma posição em que a maior dimensão fica perpendicular ao fluxo de ar.

A velocidade terminal para produtos agrícolas aumenta, quando o peso da partícula aumenta, mesmo que o volume desta permaneça constante. Conclui-se então que, a velocidade terminal sozinha não é uma característica aerodinâmica satisfatória para descrever uma partícula, HAWK *et al.* (1966).

Para o equilíbrio dos grãos, a velocidade do ar está relacionada com o peso, densidade aparente, densidade real e área transversal mínima das partículas, UHL e LAMP (1966).

A velocidade terminal e o coeficiente de arraste para produtos agrícolas têm sido investigados por dois métodos, HAWK *et al.* (1966). Um deles utiliza o tempo gasto na queda livre de um corpo em várias alturas. É feita uma curva com a altura da queda versus o tempo gasto; e a curva é então deri-

vada numericamente para verificar a força de arraste, a cada velocidade. A velocidade terminal é geralmente obtida por extrapolação dos dados.

No segundo método, os grãos são colocados em um fluxo de ar vertical e a velocidade do ar é ajustada para que os grãos fiquem flutuando com pequeno ou nenhum movimento verti-cal. Quando as forças que atuam no corpo estão em equilíbrio, a velocidade do ar é igual à velocidade terminal da partícula.

BILANSKI *et al.* (1962) delineararam um experimento pa-ra verificar a reprodutividade de dados de velocidade termi-nal em grãos e sementes e apresentam valores para alfafa, linho, trigo, cevada, aveia, milho e soja.

GARRET e BROOKER (1965) estudaram os coeficientes de arraste para milho, trigo e aveia e as grandezas que neles influem, utilizando uma técnica que requer uma fotografia de uma porção da queda da partícula. Esta técnica é limitada pe-la sensibilidade do filme, para registrar o traço do percurso da partícula.

KEEK e GOSS (1965) determinaram a velocidade ter-minal para sementes de rosa e alfafa.

HAWK *et al.* (1966) estudaram os coeficientes de ar-raste e velocidade terminal para trigo, soja e milho.

MOHSENIN (1970) tabelou valores de velocidade terminal e coeficiente de arraste para diversos produtos agrícolas.

TOSELLO (1975) citado por JORGE (1977) sugere um equipamento para a determinação experimental da velocidade terminal e de transporte para grãos e farinhas.

JORGE (1977) determinou a velocidade terminal e coeficiente de arraste para soja.

#### 2.6.2. Perda de carga

A perda de carga do fluxo de ar é a perda de pressão que o ar sofre ao atravessar uma camada do produto.

SHEDD (1951) descreve um equipamento para determinação da perda de carga do fluxo de ar ao atravessar uma camada de grãos, e apresenta resultados para soja, milho, aveia, arroz em casca, sementes de trevo vermelho e sementes de trevo híbrido.

SHEDD (1953) sugere uma fórmula para relacionar a perda de pressão do fluxo de ar ao atravessar a camada do material, descrita matematicamente por:

$$Q = aP^b$$

e BROOKER *et al.* (1974) citam a equação de HUKILL-SHEED:

$$\Delta P = \frac{aQ^2}{\ln(1+bQ)}$$

A primeira fórmula descreve as curvas apresentadas pela American Society of Agricultural Engineers (1980). Essas curvas experimentais são utilizadas no cálculo para dimensionamento de ventiladores para secagem, aeração e expurgo. Nessas curvas, a umidade do produto está consignada para uma orientação do projetista.

CRANE e CARLETON (1957) estudaram a influência do material, regime do fluxo, velocidade do ar, diâmetro, comprimento e inclinação do duto (tubulação), na perda de carga no transporte pneumático de grãos.

DAY (1963) estudando a perda de carga para feno de alfafa, observou que em geral a perda de pressão do fluxo de ar através de uma camada do produto depende: do regime do fluxo de ar, da densidade e viscosidade do ar, do tamanho do condutor do fluido, rugosidade do material, porosidade da camada e extensão da trajetória do ar.

PATTERSON *et al.* (1969) estudaram a influência da porosidade, da umidade, da temperatura do ar e grau de impure

zas na perda de carga do fluxo de ar para feijão e milho.

CALDERWOOD (1973) estudou a diferença relativa da resistência ao fluxo de ar para grãos de arroz longo e médio com casca e sem casca comparada com arroz brunido, obtido a partir do processamento.

AGRAWAL e CHAND (1974) estudaram a perda de carga de arroz em casca, sem impurezas e materiais estranhos.

STEELE (1974) estudou a influência do diâmetro da coluna e umidade do produto na perda de carga de amendoim em casca.

RABE e CURRENCE (1975) estudaram a influência da unidade e da altura da camada, na perda de carga em folhas de alfafa.

JORGE (1977) determinou a perda de carga para soja variedade Santa Rosa.

## 2.7. Coeficientes de atrito

A relação entre a força que atua no sentido de resistir ao movimento quando duas superfícies estão em contato, e a força normal sobre a superfície, é chamada coeficiente de

atrito. Quando a superfície de contato é formada pelos próprios grãos, chama-se coeficiente de atrito interno.

Segundo citação de MOHSEIN (1970), as leis básicas sobre o atrito foram primeiro enunciadas por AMONSTONS e, mais tarde, verificadas por COULOMB.

Investigações mais recentes, com melhoramento das técnicas de medição, têm mostrado que alguns desses conceitos de atrito não podem ser explicados pelas simples leis de COULOMB. SHERWOOD, em 1951, resumiu os conceitos mais gerais que são hoje aceitos (DALCOMO, 1980).

Segundo MOHSEIN (1970) são considerados dois coeficientes de atrito para grãos e outros produtos biológicos; um é determinado pela força que se manifesta na superfície de contato quando há movimento relativo entre os corpos, chamado de atrito dinâmico ou atrito de deslizamento; o outro é o coeficiente de atrito estático, determinado pela força que é capaz de impedir o movimento relativo entre os corpos em contato.

Os métodos para as determinações destes coeficientes de atrito são os mais variados. Num deles, para medir o coeficiente de atrito dinâmico, o material é colocado em contato com a superfície que está montada em um disco rotativo,

movido através de um motor elétrico. A força de atrito dinâmico é medida por extensômetro adaptado ao sistema. Para medir o coeficiente de atrito estático, a superfície em estudo é montada numa base rígida e, sobre esta superfície, é colocado um recipiente sem fundo, que contém as amostras. Em uma das extremidades do recipiente, através de um fio e uma roldana, está adaptado um sistema para aplicação de forças, onde são colocados pesos gradativamente até dar início ao movimento do recipiente com as amostras. Estes equipamentos foram utilizados por RICHTER (1954).

BRUBAKER e POS (1965), BICKERT e BUELOW (1966), SNYDER *et al.* (1967) e STEWART *et al.* (1969), utilizaram em seus trabalhos um método que consiste de uma mesa horizontal suportada por rolamentos e conectada a um motor de velocidade variável. As superfícies de atrito são montadas sobre esta mesa; e o recipiente que contém as amostras permanece fixo sobre a superfície de atrito que se desloca a uma velocidade constante. A medida da força de atrito é feita através de extensômetro.

MOHSEIN (1970) cita outro método também empregado na determinação do coeficiente de atrito, o qual se baseia no ângulo formado por um plano inclinado quando inicia o movimen

to da matéria-prima em contato com esse plano. A tangente desse ângulo é o coeficiente de atrito estático.

Alguns métodos menos utilizados são descritos por HERDERSON (1967), MOHSENIN (1970) e CLARK *et al.* (1970).

CLARK e McFARLAND (1973) propuseram a utilização do aparelho Instron Universal para a determinação dos coeficientes de atrito, através do acoplamento de um dispositivo semelhante ao usado por BICKERT e BUELOW (1966), só que a superfície de atrito permanece fixa, sendo movimentado um cilindro que contém as amostras. Um cabo é preso ao cilindro, passando por uma polia e é fixado ao dinamômetro do aparelho, que com base nos gráficos de força de atrito fornecidos pelo aparelho, são calculados os coeficientes de atrito dinâmico e estático.

O método usado por CLARK *et al.* (1970) foi modificado por TOSELLO (1975), utilizando ainda o aparelho Instron Universal mas com o acoplamento de um sistema mais prático de contato com a superfície. Esse dispositivo, assim modificado, foi utilizado por JORGE (1977) na determinação de coeficientes de atrito de soja em várias superfícies e também por DAL COMO (1980), para forragens picadas, em várias superfícies.

RICHTER (1954) trabalhou com feno, palha, milho e grama. Recomendou um coeficiente de atrito estático 0,35 e dinâmico 0,30 para feno e palha. Para milho e grama, recomendou um coeficiente de atrito respectivamente 0,80 e 0,70.

RICHTER (1954) trabalhando com forrageiras, BRUBAKER e POS (1965) com grãos em várias superfícies, BICKERT e BUELOW (1966) com grãos em superfícies de aço e madeira, SNYDER *et al.* (1967) com grãos de trigo em superfície de aço, e STEWART *et al.* (1967) com grãos de sorgo em várias superfícies observaram que, de maneira geral, um acréscimo na umidade do produto biológico implica em aumento do coeficiente de atrito.

RICHTER (1954) trabalhando com feno seco, em superfícies de chapa galvanizada, observou que há decréscimo nos valores dos coeficientes de atrito após o condicionamento do material, em virtude da ocorrência de polimento na superfície. STEWART *et al.* (1969) observaram os mesmos resultados para grãos de sorgo em superfícies de aço e concreto.

Por outro lado, BICKERT e BUELOW (1966) constataram que ocorre um aumento de até cinquenta por cento no atrito com grãos de milho em superfície de vidro durante o condicionamento.

BRUBAKER e POS (1965) trabalhando com grãos em várias superfícies, SNYDER *et al.* (1967) trabalhando com grãos de trigo em superfícies de alumínio e chapa galvanizada e STEWART *et al.* (1969) trabalhando com grãos de sorgo em superfícies de aço e concreto e LAWTON (1980) trabalhando com grãos de trigo e cevada em várias superfícies mostraram a influência da umidade relativa do ambiente na determinação do coeficiente de atrito, o qual aumenta com o acréscimo da umidade relativa.

MOSHENIN (1970) apresenta valores do coeficiente de atrito estático e dinâmico para os mais variados produtos biológicos em diferentes superfícies.

## 2.8. Ângulo de talude ou de repouso natural

Quando um material é escoado em queda livre, em fluxo constante, sobre um plano horizontal, se acumula num volume de forma cônica. A forma desse cone é característica para cada produto. O ângulo de talude, também chamado ângulo de repouso natural, é o ângulo formado pela inclinação da superfície do cone, em relação ao plano horizontal (PUZZI, 1977).

Outro método para se determinar o ângulo de talude é colocar o produto em caixa sem fundo sobre o material de superfície. Desta maneira, o produto fica em contato com o material de superfície. Este (material de superfície) é montado em uma base, de tal modo que uma das extremidades possa ser levantada lentamente, até que o produto deslize. Neste ponto é medido o ângulo formado entre a base fixa e o plano inclinado. (MOHSENIN, 1970).

Para qualquer material, o ângulo de talude varia com o aumento do teor de umidade e quantidade de material estranho, HENDERSON e PERRY (1966).

STEWART (1968) estudando a diferença de valores entre o ângulo de talude e ângulo de atrito interno relatou que há uma evidência que se o valor do ângulo de talude for usado no lugar do valor do ângulo de atrito interno, pode produzir erros em desenhos onde este coeficiente de atrito é um fator a considerar. A magnitude do erro pode ou não ser crítica, dependendo da sua importância na relação concernente.

MOHSENIN (1970) apresenta valores do ângulo de talude para vários produtos agrícolas.

Valores do ângulo de talude para gergelim são apresentados em GEIDA (1971).

KUHNEMUND (1981) faz referências à importância do conhecimento do ângulo de talude para o desenho de silos, em especial na determinação da geometria da seção de descarga. Esta, deve ter um formato adequado, do contrário podem ocorrer interrupções durante o escoamento do material.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Matéria-prima

Para a execução do presente estudo, utilizou-se pimenta-do-reino preta (*Piper nigrum*, L.), variedade Kalluvally em grãos, proveniente de Belém - PA, fornecida pelo Centro de Pesquisas Agropecuárias do Trópico Úmido (CPATU) - Embrapa.

Os grãos de pimenta-do-reino estavam livres de impurezas, portanto, em boas condições para a execução do trabalho.

##### 3.1.2. Equipamentos

###### 3.1.2.1. Peso específico aparente

Esta propriedade física da pimenta-do-reino preta foi determinada em balança hectolétrica (Figura 1), que consiste basicamente de um funil (3) com uma válvula de saída do

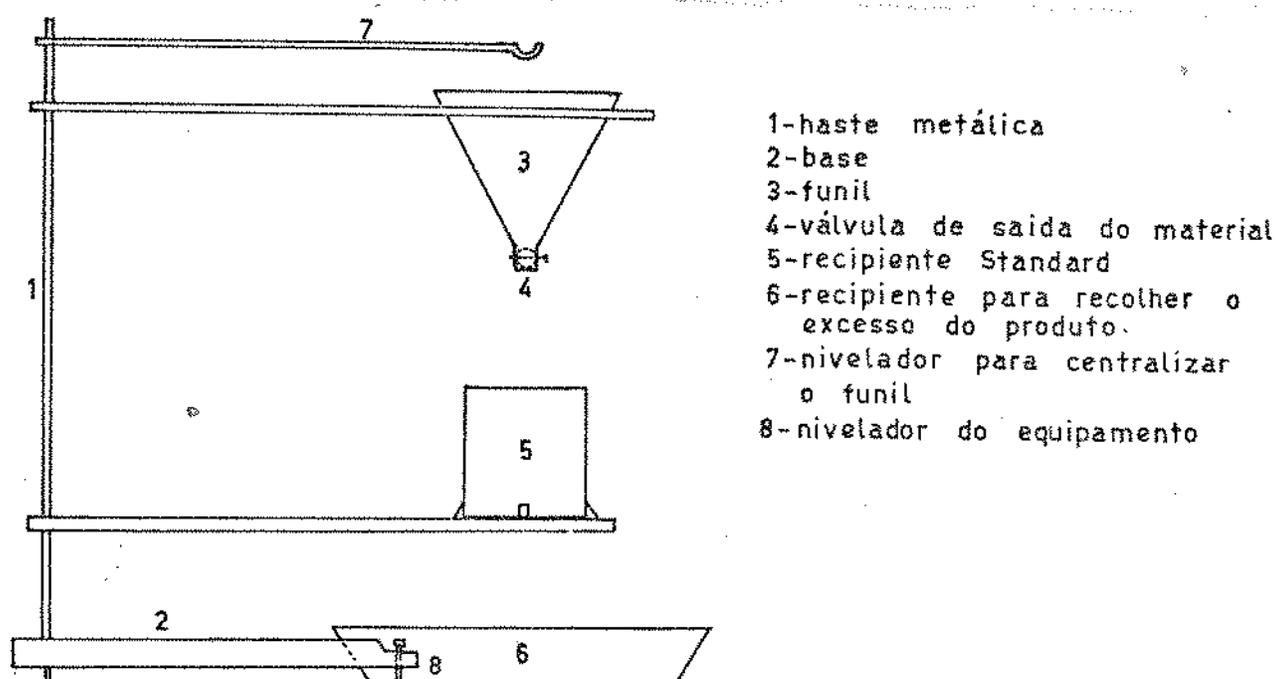


FIGURA 01 - Equipamento para determinação do peso específico aparente.

material (4), um recipiente standard de volume igual a mil mililitros (5) e um recipiente para recolher o excesso do produto (6).

#### 3.1.2.2. Classificação por tamanho

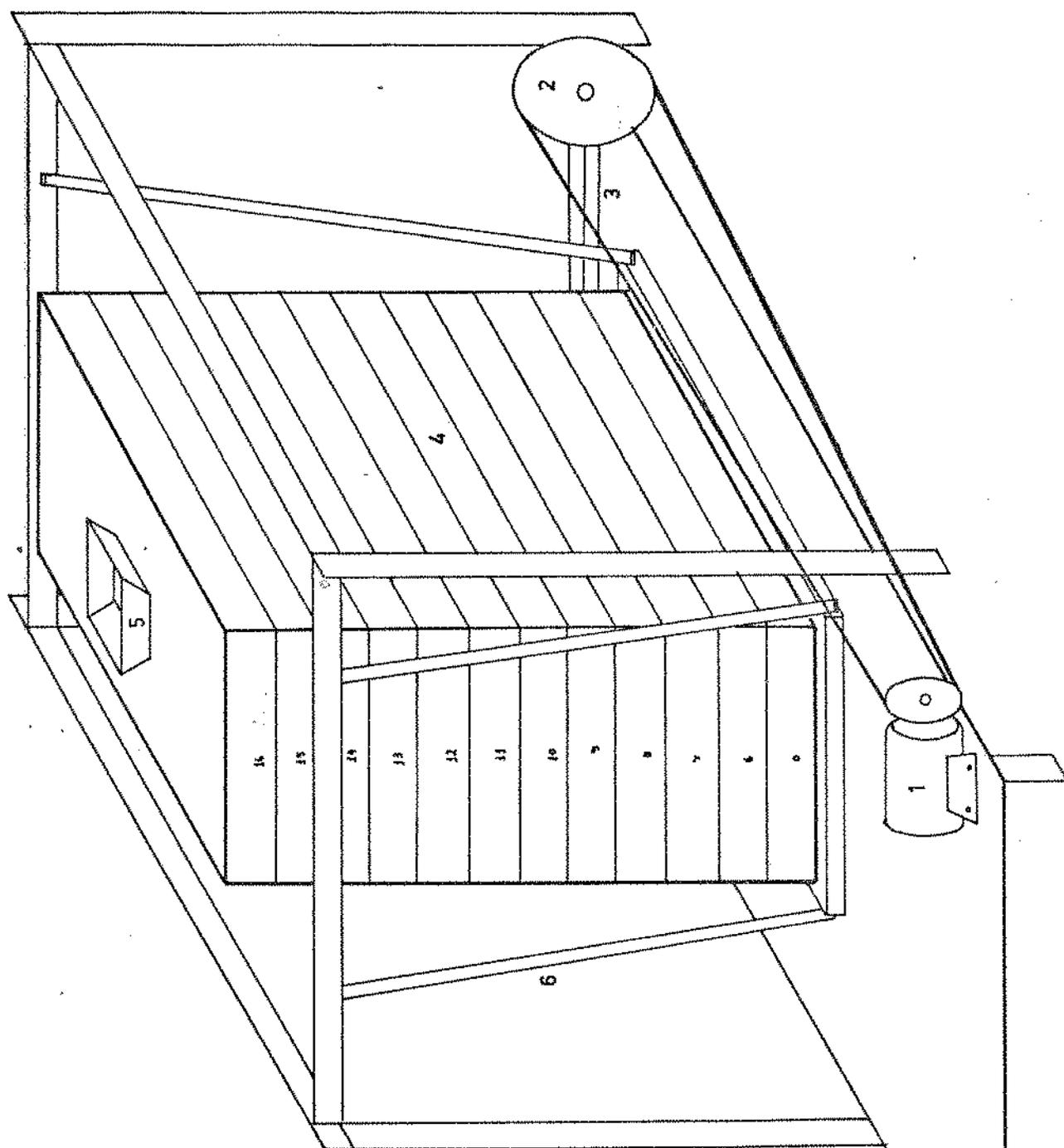
Este equipamento (Figura 2) consiste em um conjunto de peneiras planas oscilatórias (4), de furo redondo, sujeitas a oscilação de quinze milímetros de amplitude e trezentas e sessenta rotações por minuto, e moega (5). A oscilação é produzida por motor (1) ligado a uma polia (2) que movimentam um eixo excêntrico (3).

#### 3.1.2.3. Umidade de equilíbrio

A umidade de equilíbrio da pimenta-do-reino foi estudada em ambiente de umidade relativa controlada. Para tal, foram utilizados dessecadores de vidro, de tamanho médio, com vinte e um centímetros de diâmetro, soluções de ácido sulfúrico e cadinhos de metal onde o produto foi acondicionado.

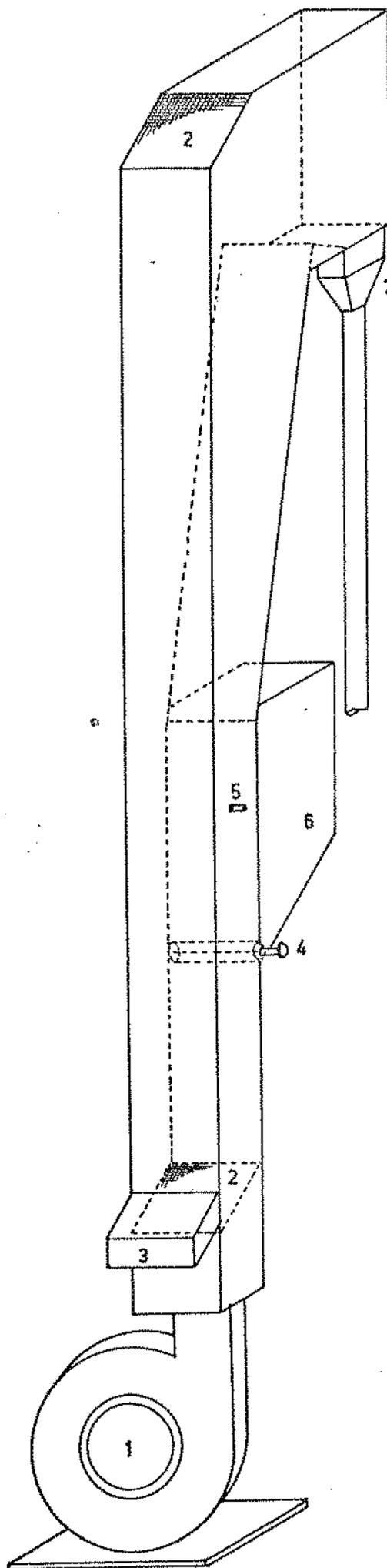
#### 3.1.2.4. Velocidade terminal

Para a determinação da velocidade terminal experimental, utilizou-se um aparelho construído na FEAA-UNICAMP. O referido aparelho (Figura 3) consiste de uma coluna vertical



- 1- motor
- 2- polia
- 3- eixo excêntrico
- 4- conjunto de peneiras
- 5- moega
- 6- suporte oscilatório

FIGURA 02- Esquema do conjunto de peneiras oscilatórias para classificação, por tamanho, dos grãos de pimenta.



- 1-ventilador centrífugo
- 2-tela
- 3-saida do produto
- 4-registro de entrada do produto
- 5-adaptação para o tubo "Pitot"
- 6-depósito do material
- 7-saida do material leve

FIGURA 03 - Esquema da coluna pneumática para separação e determinação da velocidade terminal.

de forma retangular, construída de acrílico para permitir a visualização do fenômeno e um ventilador centrífugo (1). Lateralmente fica o depósito (6) e um sistema de pás rotativas (4), que impedem o escapamento do ar e permitem a alimentação de grãos. A entrada dos grãos é regulada manualmente. Para a determinação da velocidade do ar, existem adaptações na parte intermediária da coluna (5), onde é conectado o tubo "Pitot".

#### 3.1.2.5. Perda de carga

Este equipamento (Figura 4) consiste basicamente de duas partes adaptadas a um ventilador centrífugo.

À saída do ventilador (1) está ligado um duto cilíndrico com quatorze centímetros e meio de diâmetro, feito em chapa galvanizada (2). Ao final desta parte de chapa galvanizada está adaptado um duto de vidro, cilíndrico, com quatorze centímetros e meio de diâmetro (5). Este cilindro possui um fundo perfurado (4), onde se coloca o material a ser estudado, bem como, adaptações (6) para introdução dos tubos de medição da perda de pressão do ar, na coluna de água (7). É colocado um anemômetro (8) no final do duto cilíndrico de vidro para medir a velocidade do ar emergente da camada do material.

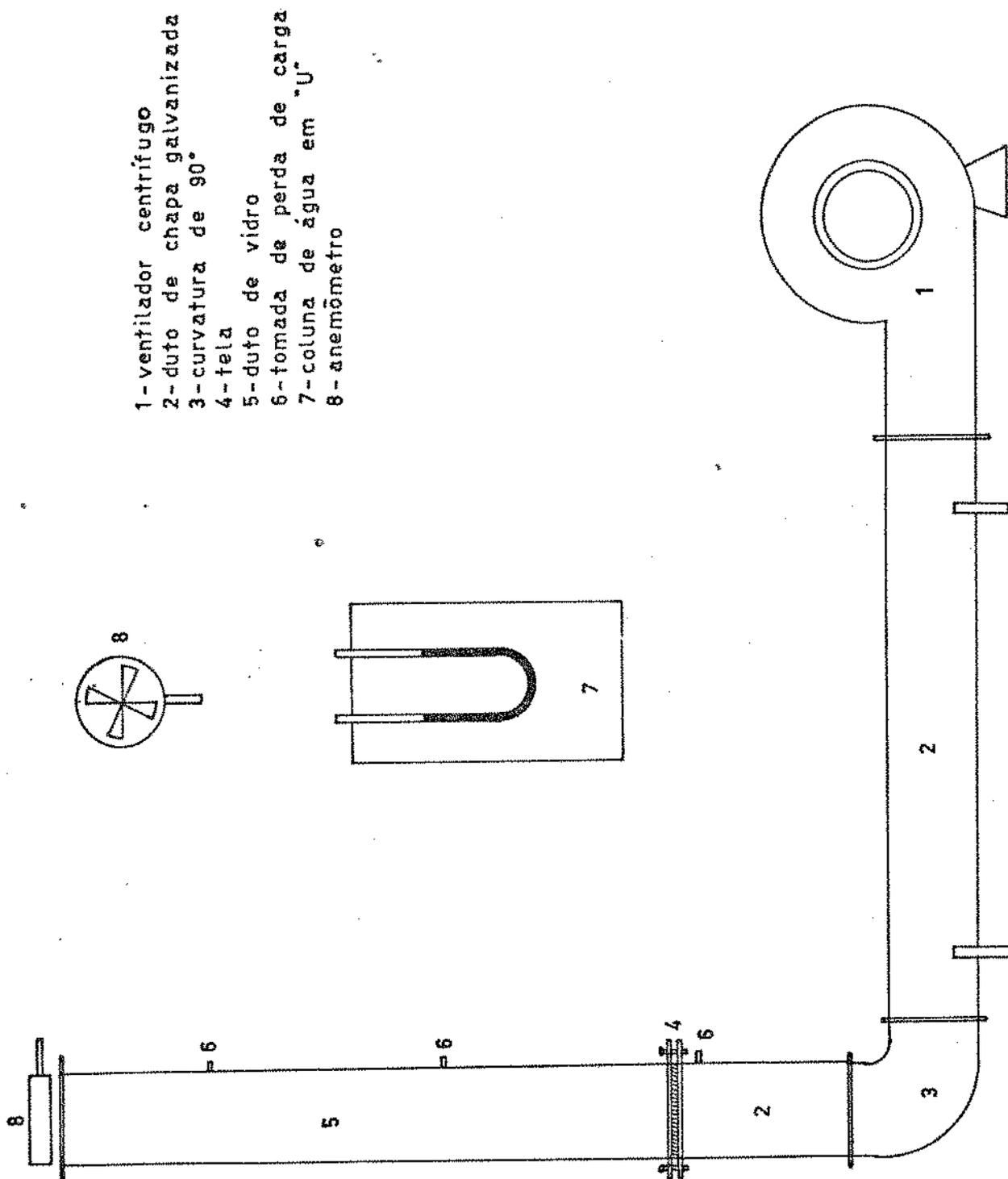


FIGURA 04 - Esquema do equipamento para determinação da perda de carga.

### 3.1.2.6. Coeficientes de atrito

O equipamento utilizado para a determinação dos coeficientes de atrito consiste de um dispositivo especialmente construído para este fim. Tal dispositivo é acoplado ao aparelho Instron Universal, como pode ser observado no esquema da Figura 5.

O Instron Universal modelo 1130 é um aparelho convencional, construído basicamente de duas partes: um cabeçote móvel (1) que se desloca em sentido vertical por meio da ação de duas roscas guias (2), um dinamômetro de tração e compressão (3), solidário ao cabeçote móvel (1); e um sistema de registro de força (4), em função do deslocamento. Neste aparelho é possível variar a velocidade do cabeçote e do papel onde é feito o registro da força de atrito.

Acoplado à base do Instron (5) encontra-se um dispositivo que consta essencialmente de plataforma horizontal (14), onde é colocado o carrinho contendo o produto (11), e as superfícies de atrito a serem estudadas (7), uma roldana guia (8) por onde passa o fio de aço (9) fazendo conexão entre o ponto de aplicação de força (10) e o carrinho (11) que empurra a pimenta sobre a superfície de atrito. A roldana guia é ajustada de maneira que a aplicação da força seja na mesma linha vertical do dinamômetro e na mesma linha horizontal da superfície de atrito.

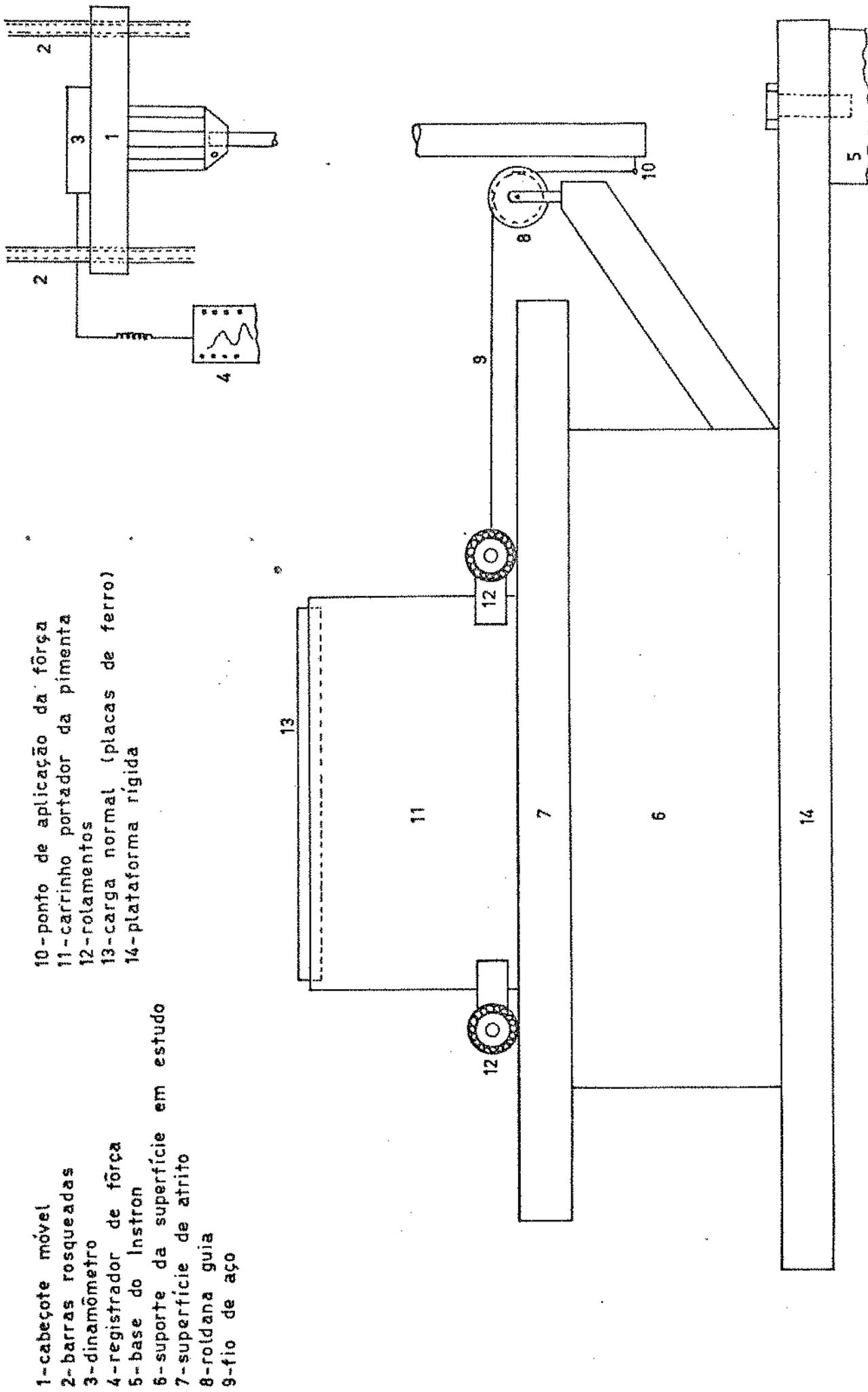
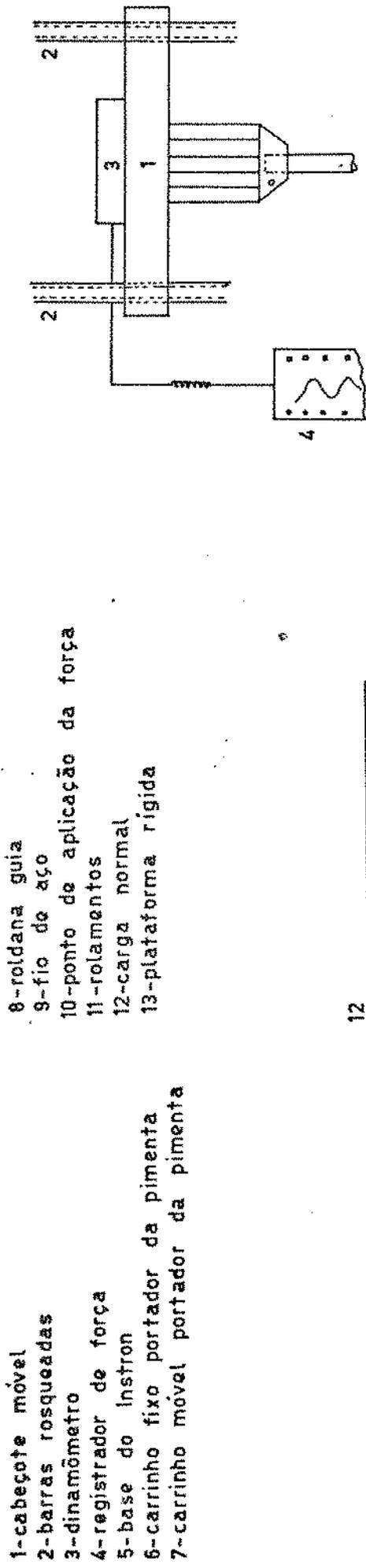


FIGURA 05 - Esquema do equipamento acoplado ao Instron Universal, para a determinação dos coeficientes de atrito com superfícies.



- 1-cabeçote móvel
- 2-barras rosqueadas
- 3-dinamômetro
- 4-registrador de força
- 5-base do instron
- 6-carrinho fixo portador da pimenta
- 7-carrinho móvel portador da pimenta

- 8-rolzana guia
- 9-fio de aço
- 10-ponto de aplicação da força
- 11-rolamentos
- 12-carga normal
- 13-plataforma rígida

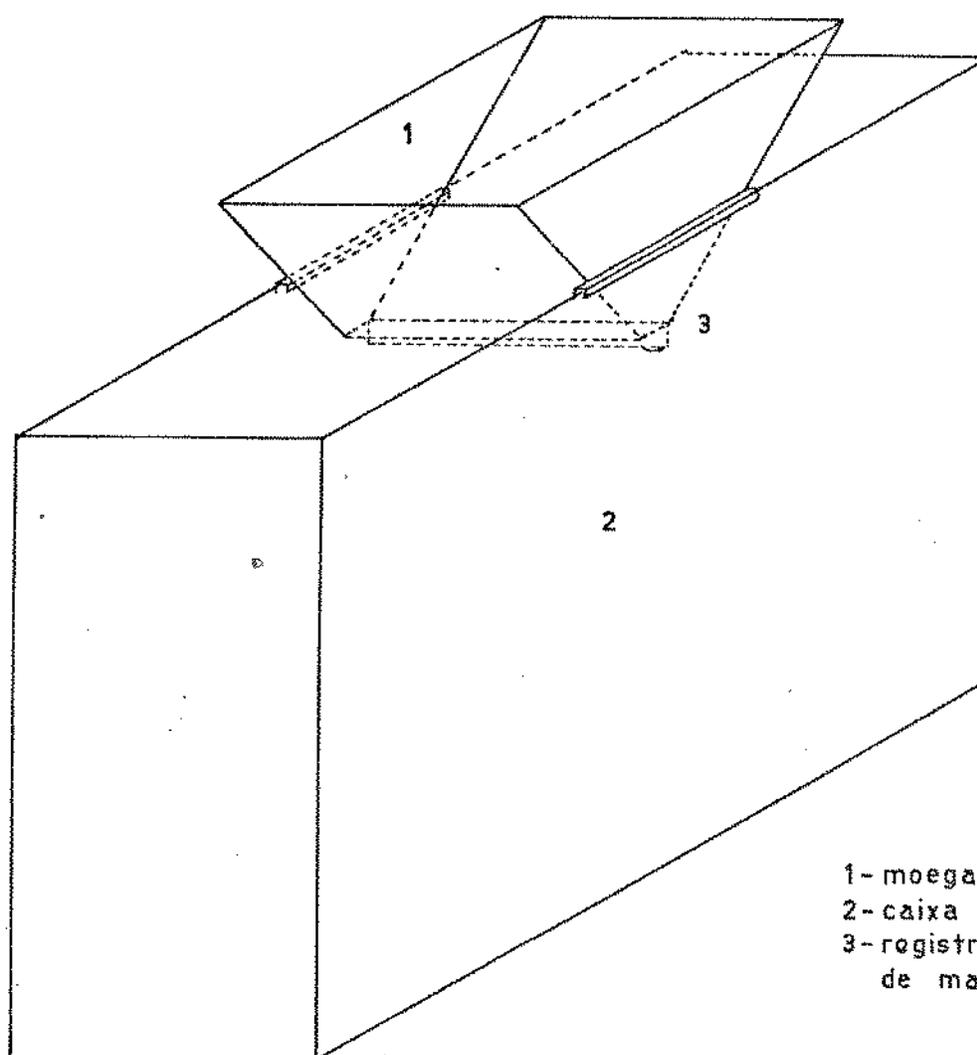
FIGURA 06 - Esquema do equipamento acoplado ao Instron Universal, para determinação do coeficiente de atrito interno.

O carrinho é uma caixa retangular sem fundo, construído de acrílico, com as seguintes dimensões: comprimento x largura x altura = 13,5 x 15,3 x 8,2 cm. Esse carrinho está apoiado sobre rolamentos (12) que visam diminuir o atrito do sistema e manter a base do carrinho afastada dois milímetros da superfície de atrito, permitindo assim, que sô a pimenta-reino entre em contato com as seguintes superfícies de atrito estudadas: aço inoxidável, aglomerado, alumínio, chapa galvanizada, compensado, duratex e madeira (pinho amarelo e pinho branco). Para aplicação da carga normal, foram utilizadas placas de ferro (13) com dimensões ligeiramente inferiores às do carrinho.

Para o estudo do coeficiente de atrito interno, utilizou-se o mesmo equipamento usado na determinação dos coeficientes de atrito nos materiais de superfície, substituindo-se estes por uma caixa contendo pimenta (6), como pode ser observado no esquema da Figura 6.

### 3.1.2.7. Ângulo de talude ou de repouso natural

O ângulo de talude ou de repouso natural foi determinado em caixa retangular, construída de acrílico, com as seguintes dimensões: comprimento x largura x altura = 50 x 20 x 40 cm (Figura 7). Esta caixa (2) apresentava uma moega (1) na



- 1- moega
- 2- caixa de acrílico
- 3- registro de escoamento de material

FIGURA 07 - Equipamento para estudo do ângulo de talude.

parte central superior, com registro de escoamento (3) do material. Foi utilizado um transferidor para medir o ângulo que o produto contido na caixa faz com a horizontal.

#### 3.1.2.8. Outros equipamentos

Durante a realização dos experimentos foram utilizadas as seguintes balanças: Marte, de capacidade igual a um quilo e seiscentos e cinquenta gramas, modelo um mil e um e Sartorius analítica, capacidade igual a duzentos gramas, modelo dois mil quatrocentos e setenta e dois.

Para a determinação da umidade foi usada estufa Fanem, modelo trezentos e quinze barra quatro.

As dimensões dos grãos de pimenta foram determinadas com paquímetro Mitutoyo, com precisão de centésimo de milímetro.

Nas determinações da velocidade terminal experimental, utilizou-se "Pitot" da F.W. Dwyer Manufacturing Co. com capacidade de medidas de quinhentos a nove mil pés por minuto.

A temperatura verificada durante o experimento da umidade de equilíbrio, foi registrada por termohigrôfago OTA KEIKI SEISAKUSHO, que registra temperaturas na faixa de menos quinze a quarenta graus Celsius e umidade relativa de zero a cem por cento.

Durante o estudo da perda de carga utilizou-se anemômetro Georg Rosenmüller, de capacidade máxima de mil metros por minuto.

Diversas vidrarias foram utilizadas no decorrer dos experimentos.

### 3.2. Métodos

#### 3.2.1. Caracterização da matéria-prima

##### 3.2.1.1. Umidade

A umidade do produto foi determinada segundo o método do número trinta mil e cinco da AOAC. Décimaterceira edição (1980).

Foram utilizadas dez amostras de aproximadamente do is gramas e calculou-se a média aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

##### 3.2.1.2. Dimensões características e peso

A dimensão dos grãos foi determinada tomando-se uma amostra de cem grãos e medindo-se grão a grão com o paquímetro, as dimensões: longitudinal, transversal e uma dimensão intermediária.

O diâmetro equivalente de cada grão foi calculado pela fórmula:

$$D_{eq} = (d_1 \cdot d_2 \cdot d_3)^{1/3} \quad (\text{HOHSEIN, 1970})$$

Calculou-se também a área de projeção de cada grão, considerando-se o produto como uma esfera, utilizando-se a equação:

$$A_p = \pi D_{eq}^2 / 4 \quad (\text{HOHSEIN, 1970})$$

Com os resultados obtidos calculou-se a média aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de variação para o peso, diâmetro equivalente e área de projeção da amostra de cem grãos.

#### 3.2.1.3. Peso específico real

O peso específico real foi determinado pelo princípio de Arquimedes: vinte gramas de pimenta foram colocadas em uma proveta de duzentos e cinquenta mililitros, graduada, contendo cento e setenta mililitros de água. Pelo volume de água deslocado, calculou-se o peso específico real. Calcu

lou-se a média aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de variação, após dez repetições.

#### 3.2.1.4. Peso específico aparente

Para o cálculo do peso específico aparente, utilizou-se o método do United States Department of Agriculture (1970). Verificou-se o peso de grãos contidos em uma vasilha de volume igual a mil mililitros, depois que o produto escoou livremente através de um funil, e é retirado o excesso de grãos passando uma espátula horizontalmente sobre a superfície da vasilha. Foram feitas dez repetições, e com os resultados obtidos foram calculados média aritmética, desvio padrão e coeficiente de variação.

#### 3.2.1.5. Grãos chochos

A determinação da quantidade de grãos chochos foi feita segundo o método do British Standards Institution (1970). Foram colocadas amostras de cinquenta gramas de grãos de pimenta-do-reino em becker de seiscentos mililitros, com trezentos mililitros de solução álcool-água com densidade zero vírgula oitenta gramas por mililitro, seguidas de agitação com espátula. Deixou-se em repouso por dois minutos e retirou-se os grãos flutuantes. Repetiu-se o processo de agitação, repouso e remoção dos grãos flutuantes.

Os grãos removidos foram espalhados sobre uma toalha, colocados para secar durante uma hora em ambiente de ar seco, e a seguir pesados. Calculou-se a porcentagem de grãos chochos por massa na amostra. Os dados obtidos para média aritmética, desvio padrão e coeficiente de variação, correspondem a resultados de dez repetições.

### 3.2.1.6. Classificação por tamanho

Foram colocadas amostras de trezentos gramas no equipamento descrito anteriormente, sujeitas a oscilação por três minutos. Após este período de tempo, foram pesadas as frações que ficaram retidas em cada peneira. Foram feitas dez repetições. Com os resultados obtidos calculou-se a média das frações retidas em cada peneira, bem como a porcentagem e a peneira média mediante a seguinte equação:

$$P_m = \frac{\sum_{i=7}^{14} i P_i}{\sum_{i=7}^{14} P_i}$$

### 3.2.2. Umidade de equilíbrio

No estudo da umidade de equilíbrio utilizou-se pimenta-do-reino com quatro pontos noventa e um e vinte e um pontos cinquenta e quatro por cento de umidade. Para conseguir pimenta-do-reino com alto conteúdo de umidade, foi necessário a utilização de uma câmara com umidade relativa controlada. A umidade relativa usada foi oitenta e cinco a noventa por cento e a temperatura quatorze graus Celsius.

Por outro lado, para obtenção de grãos de pimenta-do-reino com baixo teor de umidade, foi necessária a realização de secagem em secador de túnel.

Amostras de pimenta-do-reino com aproximadamente dois gramas foram colocadas em cadinhos em ambiente de umidade relativa controlada, a temperatura ambiente. Utilizou-se umidades relativas variando de dez a noventa por cento, com intervalos de dez por cento, usando-se soluções de ácido sulfúrico, conforme Quadro 05.

Utilizou-se dessecadores como ambiente de umidade relativa controlada, dentro dos quais foram colocados os cadinhos contendo as amostras de pimenta-do-reino preta. Controlou-se o fenômeno de absorção e dessorção de água do produto através de uma pesagem semanal, até se atingir o equilíbrio, momento em que a umidade final foi determinada em estufa.

QUADRO 05 - Preparo das soluções de ácido sulfúrico para controle da umidade relativa na determinação de umidade de equilíbrio.

Umidade relativa (%)	Densidade g/ml	ml de ácido/l de solução (ml/l)
10	1,577	575,10
20	1,491	480,72
30	1,435	421,14
40	1,389	372,70
50	1,339	326,25
60	1,293	273,16
70	1,252	231,75
80	1,203	183,61
90	1,139	123,85

Fonte: FRANCO (1943)

A curva de umidade de equilíbrio foi construída em função da umidade de equilíbrio do produto e da umidade relativa do ambiente, estabelecendo-se os valores para as constantes da pimenta-do-reino preta através de uma equação matemática

tica para descrever o fenômeno, onde se utilizou o método dos mínimos quadrados. Foram utilizadas três repetições para cada umidade do produto em cada umidade relativa controlada.

### 3.2.3. Ácidos graxos fixos

A determinação do teor de ácidos graxos fixos foi feita segundo o método do British Standards Institution (1970); foram utilizadas amostras de pimenta-do-reino previamente moída, com peso aproximado de dois gramas no extrator Soxhlet, e sujeitas a refluxo do solvente (Éter de petróleo), por dezoito horas. Após este período de tempo eliminou-se o solvente por evaporação e os balões contendo a amostra de ácidos graxos foram colocados em estufa a cento e cinco - cento e dez graus Celsius, até peso constante. Pelo peso do material retido no fundo do balão, calculou-se o teor de ácidos graxos fixos e os resultados foram expressos em percentagem. Com os resultados obtidos calculou-se a média aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

### 3.2.4. Velocidade terminal

Procurou-se na coluna pneumática o ponto de equilíbrio para os grãos de pimenta-do-reino sujeitos ao fluxo de

ar, para o que regulou-se a entrada de ar do ventilador.

Foram usadas amostras de cinquenta gramas do produto para a determinação experimental. No instante em que o equilíbrio foi alcançado fez-se a leitura da velocidade do ar no "Pitot" adaptado ao aparelho. Foram feitas dez repetições, e com os resultados obtidos calculou-se a média aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de variação. A velocidade terminal obtida experimentalmente foi comparada com aquela obtida teoricamente, utilizando as características físicas do produto, e do ar.

#### 3.2.5. Perda de carga

Utilizou-se uma camada de vinte e oito centímetros de produto na coluna de vidro. Variou-se a vazão de ar fornecida pelo ventilador, tomando-se pontos que representaram toda a faixa de variação possível. Para cada ponto selecionado foi medida a velocidade do ar emergente da camada de pimenta-do-reino, através do anemômetro, e a perda de pressão do fluxo de ar ao atravessar esta camada através da leitura no manômetro de água com tubo em "U". Foram realizadas dez leituras. Com estes dados, foi estabelecida a equação que descreve o fenômeno através dos mínimos quadrados e o gráfico com a representação dos dados experimentais.

### 3.2.6. Coeficientes de atrito

Antes de ser determinado o coeficiente de atrito, foram realizados ensaios preliminares visando verificar a funcionalidade do aparelho e, buscar a melhor combinação de velocidade do cabeçote móvel e do sistema de registro de força, para obter o ponto de força do coeficiente de atrito estático. Foi estabelecido dez centímetros por minuto para o sistema de registro de força e dez centímetros por minuto para o carrinho.

Verificou-se que a força de atrito dos dispositivos (carrinhos) vazios, no estudo do coeficiente de atrito interno, foi da ordem de duzentos gramas. Tomou-se este valor como referência subtraindo-o de toda a força de atrito registrada durante a determinação do coeficiente de atrito interno.

Para o estudo dos coeficientes de atrito em superfícies, o carrinho foi colocado sobre as diversas superfícies testadas recebendo em seu interior os grãos de pimenta-do-rei, que foram mantidos diretamente em contato com estas superfícies de atrito.

Foram utilizados os seguintes valores para a força normal durante os estudos do coeficiente de atrito com superfícies: três quilos seiscentos e cinquenta gramas; seis qui

los e setecentos gramas e nove quilos e seiscentos e vinte gramas.

Para a determinação do coeficiente de atrito interno, a caixa retangular sem fundo foi colocada sobre outra contendo pimenta, e colocou-se uma massa conhecida de grãos na caixa sem fundo, ficando portanto em contato os grãos das duas caixas de acrílico.

Foram realizados estudos com os seguintes valores para a força normal, na determinação do coeficiente de atrito interno: três quilos e novecentos e cinquenta gramas, sete quilos e nove quilos novecentos e vinte gramas.

No estudo dos dois coeficientes de atrito: com superfícies e interno para cada força normal foram feitas cinco repetições.

### 3.2.7. Ângulo de talude ou de repouso natural

A pimenta-do-reino preta foi colocada na caixa de acrílico, através da moega por onde fluiu em filme de fluxo regular e contínuo. Utilizou-se um transferidor para medir o ângulo que o produto acumulado dentro da caixa fez com a horizontal.

Foram feitas dez repetições e com os valores obtidos calculou-se o ângulo de talude médio, e a tangente deste ângulo que é aproximadamente igual ao coeficiente de atrito in terno.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

##### 4.1. Caracterização da matéria-prima

Nos Quadros 06 a 08 encontram-se os resultados obtidos durante as determinações de umidade, pesos específicos real e aparente, porcentagem de grãos chochos, conteúdo de ácidos graxos fixos, peso de cem grãos, diâmetro equivalente, área de projeção e distribuição dos grãos em peneiras planas oscilatórias, para pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally.

A análise dos dados em relação ao conteúdo de umidade, teor de ácidos graxos fixos, porcentagem de grãos chochos e impurezas, a pimenta-do-reino preta estudada é classificada segundo as normas da CONCEX (Resolução número setenta e cinco), do tipo II e classe preta. Observa-se que o produto possui umidade de nove vírgula cinquenta e quatro por cento, inferior ao limite máximo permitido, que é quatorze por cento, extrato etéreo fixo igual a oito vírgula dezeseite por cento, su-

perior ao limite mínimo permitido que é de seis vírgula setenta e cinco por cento; porcentagem de grãos chochos igual a sete vírgula dezoito por cento, quantidade inferior ao limite máximo que é de oito por cento; impurezas do próprio produto, com zero vírgula noventa e nove por cento, inferior ao limite máximo permitido, que é dois por cento; e mantêm odor natural característico de pimenta-do-reino.

O peso específico real, igual a zero vírgula oitocentos e doze gramas por mililitros foi utilizado na determinação da velocidade terminal obtida teoricamente através de cálculos. \*

A porcentagem de grãos chochos, da ordem de sete vírgula dezoito por cento, quantidade considerada mediana, é característica da própria variedade, pois pimenteira-do-reino variedade Kalluvally, apresenta alta produção, porém, os frutos amadurecem irregularmente. Deste modo, os amentilhos durante a colheita apresentam grãos maduros, grãos verdes e grãos em desenvolvimento. Estes últimos depois de secos apresentam-se chochos, visto que foram colhidos quando não estavam totalmente granados.

O valor médio da massa de um grão, bem como o valor médio do diâmetro equivalente e o valor médio da área de projeção, juntamente com o peso específico real, são caracterís-

ticas importantes dos grãos de pimenta-do-reino, utilizadas no cálculo da velocidade terminal, que discutiremos mais adiante.

O diâmetro equivalente médio, igual a zero vírgula quatrocentos e dezessete centímetros, determinado através de cálculo, utilizando as dimensões características dos grãos, está muito próximo do valor encontrado para a primeira média, ou seja, zero vírgula quatrocentos e treze centímetros.

A peneira média calculada é  $10,4/64''$  com fração média da amostra, de noventa e sete vírgula doze gramas, correspondendo a trinta e dois vírgula trinta e sete por cento.

A divisão das peneiras é da ordem de  $1/64''$ , então o valor obtido pelo cálculo utilizando os dados experimentais, pode ser aproximado para a peneira  $10/64''$ .

QUADRO 06 - Valores e média da umidade, ácidos graxos fixos, grãos chochos, peso específico aparente e peso específico real da pimenta-do-reino preta, variedade Kaluvally.

Amostras nº	Umidade (%)	Ácidos Graxos Fixos (%)	Grãos Chocos (%)	Peso específico Aparente (g/ml)	Peso específico Real (g/ml)
1	9,5317	8,40	8,24	0,477	0,800
2	9,6654	7,96	6,00	0,465	0,769
3	9,7340	8,68	6,76	0,464	0,741
4	9,8030	6,74	7,50	0,465	0,800
5	9,8292	7,38	5,24	0,465	0,800
6	9,3960	8,95	7,76	0,470	0,833
7	9,1335	7,14	7,50	0,449	0,769
8	9,2234	8,12	7,76	0,455	0,833
9	9,4600	10,15	7,24	0,468	0,870
10	9,6660	8,16	7,76	0,461	0,904
Média	9,54	8,17	7,18	0,464	0,812
Desvio padrão	0,239	0,978	0,923	0,008	0,049
Coefficiente de variação (%)	2,50	11,97	12,86	1,72	6,03

QUADRO 07 - Variações de peso e diâmetros encontrados em cem grãos de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally e cálculos do diâmetro equivalente, área de projeção, média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Amostra	massa (m) (g)	d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)	deq (cm)	área (Ap) (cm <sup>2</sup> )
1	0,0528	0,544	0,452	0,470	0,487	0,186
2	0,0096	0,391	0,367	0,389	0,382	0,115
3	0,0047	0,335	0,313	0,313	0,320	0,080
4	0,0429	0,487	0,451	0,467	0,468	0,172
5	0,0057	0,359	0,263	0,347	0,320	0,080
6	0,0164	0,493	0,385	0,387	0,419	0,138
7	0,0163	0,475	0,351	0,357	0,390	0,119
8	0,0130	0,431	0,317	0,331	0,356	0,100
9	0,0073	0,381	0,333	0,371	0,361	0,102
10	0,0410	0,501	0,431	0,451	0,460	0,166
11	0,0162	0,497	0,347	0,379	0,403	0,128
12	0,0302	0,477	0,405	0,411	0,430	0,145
13	0,0547	0,495	0,487	0,491	0,491	0,189
14	0,0126	0,409	0,339	0,397	0,380	0,113
15	0,0476	0,461	0,451	0,453	0,455	0,162
16	0,0351	0,471	0,445	0,459	0,458	0,165
17	0,0095	0,467	0,209	0,351	0,325	0,083
18	0,0230	0,449	0,397	0,441	0,428	0,144
19	0,0256	0,537	0,383	0,411	0,439	0,151
20	0,0492	0,547	0,449	0,511	0,501	0,197
21	0,0393	0,491	0,445	0,487	0,474	0,176
22	0,0148	0,383	0,353	0,357	0,364	0,104
23	0,0156	0,495	0,431	0,441	0,455	0,162
24	0,0386	0,463	0,431	0,435	0,443	0,154
25	0,0174	0,465	0,251	0,287	0,322	0,081
26	0,0327	0,507	0,465	0,475	0,482	0,182
27	0,0179	0,505	0,367	0,391	0,417	0,136
28	0,0177	0,445	0,347	0,357	0,380	0,113
29	0,0270	0,527	0,381	0,485	0,460	0,166
30	0,0149	0,443	0,249	0,315	0,326	0,083
31	0,0186	0,447	0,347	0,389	0,392	0,121
32	0,0606	0,507	0,463	0,469	0,479	0,180
33	0,0308	0,441	0,383	0,411	0,411	0,133
34	0,0385	0,523	0,419	0,441	0,459	0,165
35	0,0152	0,515	0,373	0,411	0,429	0,144
36	0,0176	0,449	0,369	0,373	0,395	0,122
37	0,0386	0,461	0,443	0,453	0,452	0,160

Cont...

## Continuação QUADRO 07

Amostra	massa (m) (g)	d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)	deq (cm)	área (A <sub>p</sub> ) (cm <sup>2</sup> )
38	0,0180	0,389	0,353	0,357	0,366	0,105
39	0,0507	0,475	0,451	0,455	0,460	0,166
40	0,0219	0,497	0,407	0,409	0,436	0,149
41	0,0506	0,475	0,463	0,467	0,468	0,172
42	0,0571	0,493	0,483	0,487	0,488	0,187
43	0,0180	0,397	0,315	0,343	0,350	0,100
44	0,0305	0,447	0,415	0,441	0,434	0,148
45	0,0138	0,419	0,377	0,397	0,397	0,124
46	0,0232	0,453	0,389	0,431	0,423	0,140
47	0,0120	0,451	0,269	0,327	0,341	0,091
48	0,0163	0,489	0,413	0,417	0,438	0,151
49	0,0237	0,509	0,423	0,427	0,451	0,160
50	0,0286	0,439	0,411	0,431	0,427	0,143
51	0,0684	0,571	0,491	0,519	0,526	0,217
52	0,0183	0,437	0,349	0,365	0,382	0,115
53	0,0208	0,473	0,367	0,375	0,402	0,127
54	0,0372	0,451	0,415	0,433	0,433	0,147
55	0,0071	0,357	0,309	0,334	0,333	0,087
56	0,0489	0,509	0,467	0,471	0,482	0,182
57	0,0245	0,563	0,373	0,483	0,466	0,170
58	0,0240	0,463	0,383	0,431	0,424	0,141
59	0,0348	0,423	0,409	0,411	0,414	0,135
60	0,0134	0,427	0,349	0,351	0,374	0,110
61	0,0337	0,501	0,423	0,491	0,470	0,173
62	0,0074	0,379	0,335	0,367	0,360	0,102
63	0,0263	0,467	0,383	0,385	0,410	0,132
64	0,0298	0,489	0,415	0,425	0,442	0,153
65	0,0186	0,421	0,389	0,415	0,408	0,131
66	0,0092	0,451	0,235	0,241	0,294	0,068
67	0,0174	0,519	0,390	0,413	0,437	0,150
68	0,0237	0,461	0,403	0,429	0,430	0,145
69	0,0130	0,365	0,297	0,337	0,332	0,086
70	0,0147	0,445	0,379	0,387	0,403	0,128
71	0,0086	0,453	0,283	0,327	0,347	0,094
72	0,0491	0,483	0,472	0,473	0,476	0,178
73	0,0348	0,479	0,440	0,459	0,459	0,165
74	0,0181	0,487	0,369	0,415	0,421	0,139
75	0,0349	0,467	0,443	0,455	0,455	0,162
76	0,0229	0,449	0,379	0,387	0,404	0,128
77	0,0147	0,373	0,331	0,335	0,346	0,094
78	0,0099	0,447	0,371	0,411	0,408	0,131

Cont...

## Continuação QUADRO 07

Amostra	massa (m) (g)	d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)	deq (cm)	área (Ap) (cm <sup>2</sup> )
79	0,0257	0,461	0,401	0,451	0,437	0,150
80	0,0490	0,519	0,449	0,487	0,484	0,184
81	0,0451	0,519	0,443	0,471	0,477	0,179
82	0,0096	0,389	0,289	0,299	0,323	0,082
83	0,0205	0,451	0,379	0,437	0,421	0,139
84	0,0215	0,535	0,361	0,365	0,413	0,134
85	0,0412	0,491	0,441	0,451	0,460	0,166
86	0,0276	0,459	0,437	0,449	0,448	0,158
87	0,0161	0,389	0,301	0,387	0,356	0,100
88	0,0179	0,431	0,367	0,373	0,389	0,119
89	0,0285	0,561	0,379	0,417	0,446	0,156
90	0,0542	0,469	0,451	0,461	0,460	0,166
91	0,0150	0,459	0,333	0,357	0,437	0,150
92	0,0509	0,471	0,451	0,467	0,463	0,168
93	0,0148	0,413	0,339	0,367	0,372	0,109
94	0,0241	0,455	0,387	0,395	0,411	0,133
95	0,0096	0,431	0,343	0,379	0,383	0,115
96	0,0362	0,487	0,429	0,479	0,464	0,169
97	0,0062	0,315	0,289	0,309	0,304	0,072
98	0,0471	0,439	0,437	0,439	0,438	0,151
99	0,0305	0,413	0,401	0,405	0,406	0,129
100	0,0437	0,489	0,449	0,487	0,475	0,177
Média	0,0265	0,461	0,385	0,410	0,417	0,138
Desvio pa drão	0,015				0,051	0,032
Coefficien te de vá riação (%)	56,60				12,23	23,19

QUADRO 08 - Variação de peso, cálculo da peneira média, verificadas durante a classificação em peneiras planas oscilatórias, de grãos de pimenta-do-reino preta variedade Kalluvally.

Amostra	Peneiras							
	7(*) peso (g)	8 peso (g)	9 peso (g)	10 peso (g)	11 peso (g)	12 peso (g)	13 peso (g)	14 peso (g)
1	3,1	12,6	55,5	98,0	72,0	43,8	13,3	1,7
2	2,6	12,0	55,3	98,5	73,1	42,6	14,5	1,4
3	3,7	13,3	54,2	97,1	71,9	43,2	15,1	1,5
4	2,2	11,3	52,4	95,9	75,3	44,5	16,6	1,8
5	2,3	12,1	56,0	99,6	77,3	39,5	12,2	1,0
6	2,1	11,2	52,5	96,6	77,8	44,8	13,6	1,4
7	3,8	12,8	54,9	99,4	75,2	39,7	13,3	0,9
8	4,1	12,4	52,0	96,3	77,1	44,0	12,5	1,6
9	3,5	11,5	50,0	93,9	78,0	47,2	13,7	2,2
10	2,2	11,3	52,3	95,9	75,3	44,5	16,6	1,9
Média	2,96	12,05	53,51	97,12	75,30	43,38	14,14	1,54
Porcentagem	0,99	4,02	17,84	32,37	25,10	14,46	4,71	0,51
Peneira média: 10,4/64"								

(\*) A fração da amostra retida nesta peneira está acrescida da fração retida no fundo (peneira zero), e a soma das duas foi considerada como impurezas do próprio produto.

#### 4.2. Umidade de equilíbrio

A marcha das variações dos pesos durante o fenômeno de absorção e dessorção dos grãos de pimenta-do-reino preta, com umidade inicial de quatro vírgula noventa e um por cento e vinte e um vírgula cinquenta e quatro por cento; umidade final; e os resultados médios finais, utilizados na construção dos gráficos das Figuras 8 e 9, encontram-se nos Quadros 09 a 13.

A temperatura média verificada durante o experimento, calculada com base nos gráficos obtidos pelo registro do termohigrógrafo foi vinte e cinco mais ou menos dois graus Celsius.

Utilizamos, além da equação de HENDERSON, uma equação do terceiro grau, da forma:

$$M_{eq} = a_1 \vartheta + a_2 \vartheta^2 + a_3 \vartheta^3$$

para descrever os dados apresentados no Quadro 13.

A equação do terceiro grau foi resolvida em computador, utilizando uma sub-rotina do laboratório de Matemática Aplicada, sub-rotina MINOR (LABMA, 1982).

Obtivemos:

$$a_1 = 0,32$$

$$a_2 = -0,58 \times 10^{-2}$$

$$a_3 = 0,48 \times 10^{-4}$$

O que nos levou à equação final:

$$Meq = 0,32\phi - 0,58 \times 10^{-2}\phi^2 + 0,48 \times 10^{-4}\phi^3,$$

que apresenta o coeficiente de correlação igual a zero vírgula novecentos e setenta e um, com significância a zero vírgula zero cinco por cento.

Utilizando os mesmos dados e a equação proposta por HENDERSON, obtivemos os valores das constantes k e n, através de regressão linear.

A equação  $1 - \phi = e^{-KTM^n}$  pode ser transformada em:

$$\log_e (1 - \phi) = -KTM^n, \text{ ou ainda:}$$

$\log_e |-\log_e (1 - \phi)| = \log_e k + \log_e T + n \log_e M$ , que é a equação de uma reta em papel monolog.

Por meio da regressão linear, obtivemos os valores de  $n = 1,77$  e  $K = 3,00 \times 10^{-5}$ , ficando a equação:

$$1 - \theta = e^{-3,00 \times 10^{-5} TM^{1,77}}$$

apresentando coeficiente de correlação igual a zero vírgula noventa e noventa e significância a zero vírgula zero cinco por cento.

Os resultados estatísticos indicam que tanto a equação de HENDERSON como a equação do terceiro grau servem para descrever os dados obtidos para a umidade de equilíbrio de pimenta-do-reino preta. No entanto, a curva obtida com os dados da equação do terceiro grau é mais característica, visto que as curvas de umidade de equilíbrio para produtos agrícolas, em geral, são do tipo sigmóide.

QUADRO 09 - Variações de peso dos grãos de pimenta-do-reino preta, variedade Kaluvally com umidade inicial de 4,91% acondicionada em diferentes unidades relativas.

Amostra	U.R. (%)	Peso inicial (g)	Peso após 1a. semana (g)	Peso após 2a. semana (g)	Peso após 3a. semana (g)	Peso após 4a. semana (g)	Peso após 5a. semana (g)	Peso após 6a. semana (g)
1	10	2.0038	1.9823	1.9724	1.9678	1.9654	1.9614	1.9593
2	10	2.0022	1.9794	1.9694	1.9646	1.9632	1.9585	1.9567
3	10	1.9984	1.9734	1.9627	1.9574	1.9562	1.9507	1.9489
4	20	2.0021	1.9904	1.9843	1.9819	1.9818	1.9797	1.9805
5	20	2.0050	1.9935	1.9869	1.9840	1.9822	1.9805	1.9792
6	20	2.0026	1.9914	1.9848	1.9826	1.9804	1.9792	1.9787
7	30	2.0039	2.0051	2.0021	2.0052	2.0042	2.0054	2.0013
8	30	2.0043	2.0039	2.0011	2.0010	2.0003	2.0004	1.9996
9	30	2.0046	2.0052	2.0034	2.0033	2.0026	2.0025	2.0011
10	40	2.0006	2.0195	2.0215	2.0221	2.0221	2.0221	2.0227
11	40	2.0065	2.0222	2.0246	2.0252	2.0247	2.0249	2.0244
12	40	2.0038	2.0239	2.0260	2.0270	2.0268	2.0270	2.0278
13	50	2.0014	2.0340	2.0362	2.0370	2.0372	2.0371	2.0374
14	50	2.0012	2.0255	2.0283	2.0291	2.0292	2.0291	2.0292
15	50	2.0029	2.0357	2.0392	2.0403	2.0407	2.0403	2.0405
16	60	2.0023	2.0683	2.0720	2.0727	2.0727	2.0728	2.0729
17	60	2.0036	2.0583	2.0616	2.0628	2.0626	2.0627	2.0629
18	60	2.0003	2.0678	2.0710	2.0717	2.0714	2.0713	2.0707
19	70	2.0050	2.1083	2.1100	2.1109	2.1110	2.1099	2.1102
20	70	2.0052	2.1012	2.1038	2.1057	2.1051	2.1044	2.1050
21	70	2.0009	2.1075	2.1100	2.1107	2.1100	2.1100	2.1103
22	80	2.0005	2.1633	2.1644	2.1652	2.1630	2.1630	2.1632
23	80	2.0018	2.1684	2.1714	2.1715	2.1694	2.1669	2.1692
24	80	2.0040	2.1645	2.1683	2.1674	2.1662	2.1642	2.1665
25	90	2.0003	2.2819	2.2903	2.2848	2.2634	2.2514	2.2433
26	90	2.0025	2.2973	2.3041	2.2961	2.2751	2.2609	2.2481
27	90	2.0035	2.2843	2.2907	2.2808	2.2659	2.2524	2.2448

ADRO 10 - Valores e média final da umidade de equilíbrio da pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally de umidade inicial 4,91%, acondicionada nas diferentes umidades relativas expressas em base seca.

Mostra	U.R. (%)	Peso inicial (g)	Peso seco (g)	Peso final (g)	Umidade e equilíbrio (%)	Média final (%)
1	10	2.0038	1.9054	1.9593	2.83	
2	10	2.0022	1.9039	1.9567	2.77	2.72
3	10	1.9984	1.9003	1.9489	2.56	
4	20	2.0021	1.9038	1.9805	4.03	
5	20	2.0050	1.9066	1.9792	3.81	3.92
6	20	2.0026	1.9043	1.9787	3.91	
7	30	2.0039	1.9055	2.0013	5.03	
8	30	2.0043	1.9059	1.9996	4.92	4.98
9	30	2.0046	1.9062	2.0011	4.98	
10	40	2.0006	1.9024	2.0227	6.32	
11	40	2.0065	1.9080	2.0244	6.10	6.28
12	40	2.0038	1.9054	2.0278	6.42	
13	50	2.0014	1.9031	2.0374	7.06	
14	50	2.0012	1.9029	2.0292	6.64	6.95
15	50	2.0029	1.9046	2.0405	7.14	
16	60	2.0023	1.9040	2.0729	8.87	
17	60	2.0036	1.9052	2.0629	8.28	8.67
18	60	2.0003	1.9021	2.0707	8.86	
19	70	2.0050	1.9066	2.1102	10.68	
20	70	2.0052	1.9067	2.1050	10.40	10.67
21	70	2.0009	1.9026	2.1103	10.92	
22	80	2.0005	1.9023	2.1632	13.71	
23	80	2.0018	1.9035	2.1692	13.96	13.79
24	80	2.0040	1.9056	2.1665	13.69	
25	90	2.0003	1.9021	2.2433	17.94	
26	90	2.0025	1.9042	2.2484	18.08	17.95
27	90	2.0035	1.9051	2.2448	17.83	

QUADRO II - variações de peso dos grãos de pimenta-do-reino por semana, em diferentes unidades relativas.  
 cial de 21,54%, acondicionada em diferentes unidades relativas.

Amostra	U.R. (%)	Peso inicial (g)	Peso após 1a. semana (g)	Peso após 2a. semana (g)	Peso após 3a. semana (g)	Peso após 4a. semana (g)	Peso após 5a. semana (g)	Peso após 6a. semana (g)
28	10	2.0016	1.6528	1.6412	1.6341	1.6306	1.6301	1.6266
29	10	2.0035	1.6614	1.6495	1.6419	1.6383	1.6378	1.6343
30	10	2.0010	1.6434	1.6327	1.6265	1.6231	1.6235	1.6193
31	20	2.0002	1.6522	1.6456	1.6417	1.6404	1.6396	1.6388
32	20	2.0014	1.6635	1.6560	1.6514	1.6504	1.6484	1.6476
33	20	2.0000	1.6527	1.6455	1.6413	1.6407	1.6401	1.6392
34	30	2.0014	1.6825	1.6781	1.6748	1.6788	1.6772	1.6770
35	30	2.0009	1.6755	1.6707	1.6676	1.6671	1.6664	1.6660
36	30	2.0027	1.6807	1.6759	1.6983	1.6975	1.7002	1.6988
37	40	2.0004	1.6981	1.6943	1.6920	1.6923	1.6915	1.6911
38	40	2.0006	1.6943	1.6903	1.6877	1.6879	1.6871	1.6865
39	40	2.0013	1.7010	1.6976	1.6954	1.6954	1.6946	1.6941
40	50	2.0044	1.7059	1.7029	1.7012	1.7008	1.7008	1.7001
41	50	2.0020	1.6932	1.6906	1.6893	1.6890	1.6886	1.6878
42	50	2.0013	1.6946	1.6917	1.6899	1.6896	1.6893	1.6884
43	60	2.0045	1.7388	1.7361	1.7349	1.7345	1.7337	1.7328
44	60	2.0026	1.7456	1.7433	1.7424	1.7419	1.7408	1.7401
45	60	2.0007	1.7257	1.7243	1.7231	1.7230	1.7218	1.7210
46	70	2.0010	1.7570	1.7539	1.7526	1.7520	1.7517	1.7508
47	70	2.0006	1.7552	1.7521	1.7516	1.7511	1.7498	1.7489
48	70	2.0015	1.7537	1.7517	1.7506	1.7502	1.7486	1.7481
49	80	2.0078	1.8029	1.7994	1.7968	1.7961	1.7952	1.7916
50	80	2.0060	1.8043	1.8002	1.7988	1.7970	1.7950	1.7936
51	80	2.0051	1.8079	1.8037	1.8007	1.7998	1.7966	1.7965
52	90	2.0009	1.8806	1.8613	1.8579	1.8520	1.8481	1.8421
53	90	2.0056	1.8813	1.8621	1.8590	1.8523	1.8483	1.8423
54	90	2.0013	1.8759	1.8591	1.8547	1.8482	1.8445	1.8444

QUADRO 12 - Valores e média final da umidade de equilíbrio da pimenta-do-rei no preta, variedade Kalluvally, de umidade inicial 21,54%, acondicionada nas diferentes umidades relativas, expressas em base seca.

Amostra	U.R. (%)	Peso inicial (g)	Peso seco (g)	Peso final (g)	Umidade de equilíbrio (%) b.s.	Média final (%) b.s.
28	10	2.0016	1.5704	1.6266	3.58	
29	10	2.0035	1.5719	1.6343	3.97	3.56
30	10	2.0010	1.5700	1.6193	3.14	
31	20	2.0002	1.5694	1.6388	4.42	
32	20	2.0014	1.5703	1.6476	4.92	4.60
33	20	2.0000	1.5692	1.6392	4.46	
34	30	2.0014	1.5703	1.6770	6.79	
35	30	2.0009	1.5699	1.6660	6.12	7.01
36	30	2.0027	1.5713	1.6988	8.11	
37	40	2.0004	1.5695	1.6911	7.75	
38	40	2.0006	1.5697	1.6865	7.44	7.69
39	40	2.0013	1.5702	1.6941	7.89	
40	50	2.0044	1.5726	1.7001	8.11	
41	50	2.0020	1.5708	1.6878	7.45	7.70
42	50	2.0013	1.5702	1.6884	7.53	
43	60	2.0045	1.5727	1.7328	10.18	
44	60	2.0026	1.5712	1.7401	10.75	10.19
45	60	2.0007	1.5697	1.7210	9.64	
46	70	2.0010	1.5700	1.7508	11.52	
47	70	2.0006	1.5697	1.7489	11.42	11.42
48	70	2.0015	1.5703	1.7481	11.32	
49	80	2.0078	1.5753	1.7916	13.73	
50	80	2.0060	1.5739	1.7936	13.96	13.96
51	80	2.0051	1.5732	1.7965	14.19	
52	90	2.0009	1.5699	1.8421	17.34	
53	90	2.0056	1.5736	1.8423	17.08	17.29
54	90	2.0013	1.5702	1.8444	17.46	

QUADRO 13 - Valores médios de absorção, dessorção e intermediários para pimenta-do-reino preta, variedade Kal-luvally expressos em base seca.

U.R. (%)	Umidade de equilíbrio (%) (Absorção) b.s.	Umidade de equilíbrio (%) (Dessorção) b.s.	Umidade Intermediária (%) b.s.
10	2.72	3.56	3.14
20	3.92	4.60	4.26
30	4.98	7.01	6.00
40	6.28	7.69	6.99
50	6.95	7.70	7.32
60	8.67	10.19	9.43
70	10.67	11.42	11.04
80	13.79	13.96	13.88
90	17.95	17.29	17.62

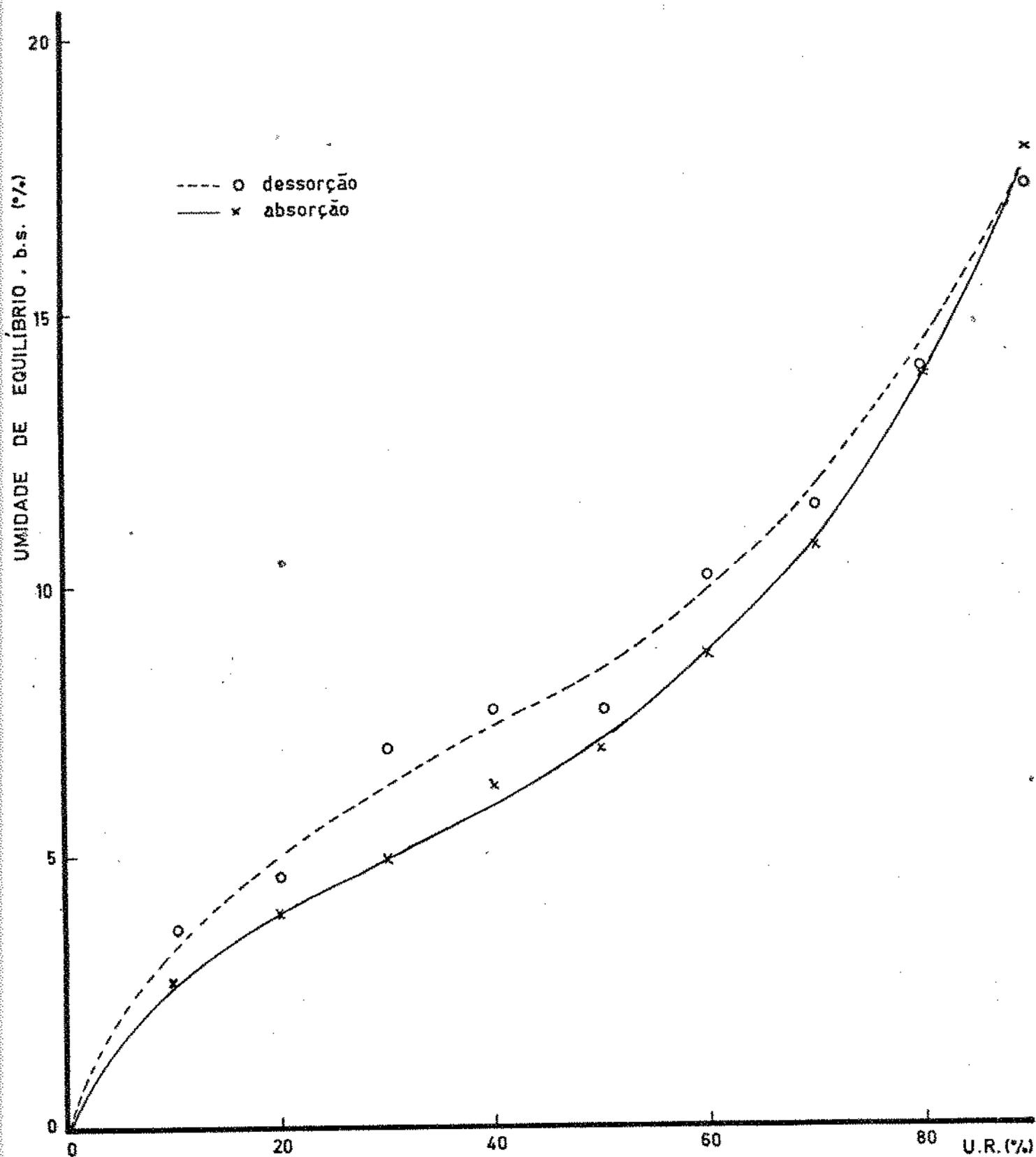


FIGURA 08 - Gráfico de umidade de equilíbrio da pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally, em função da umidade relativa do ambiente.

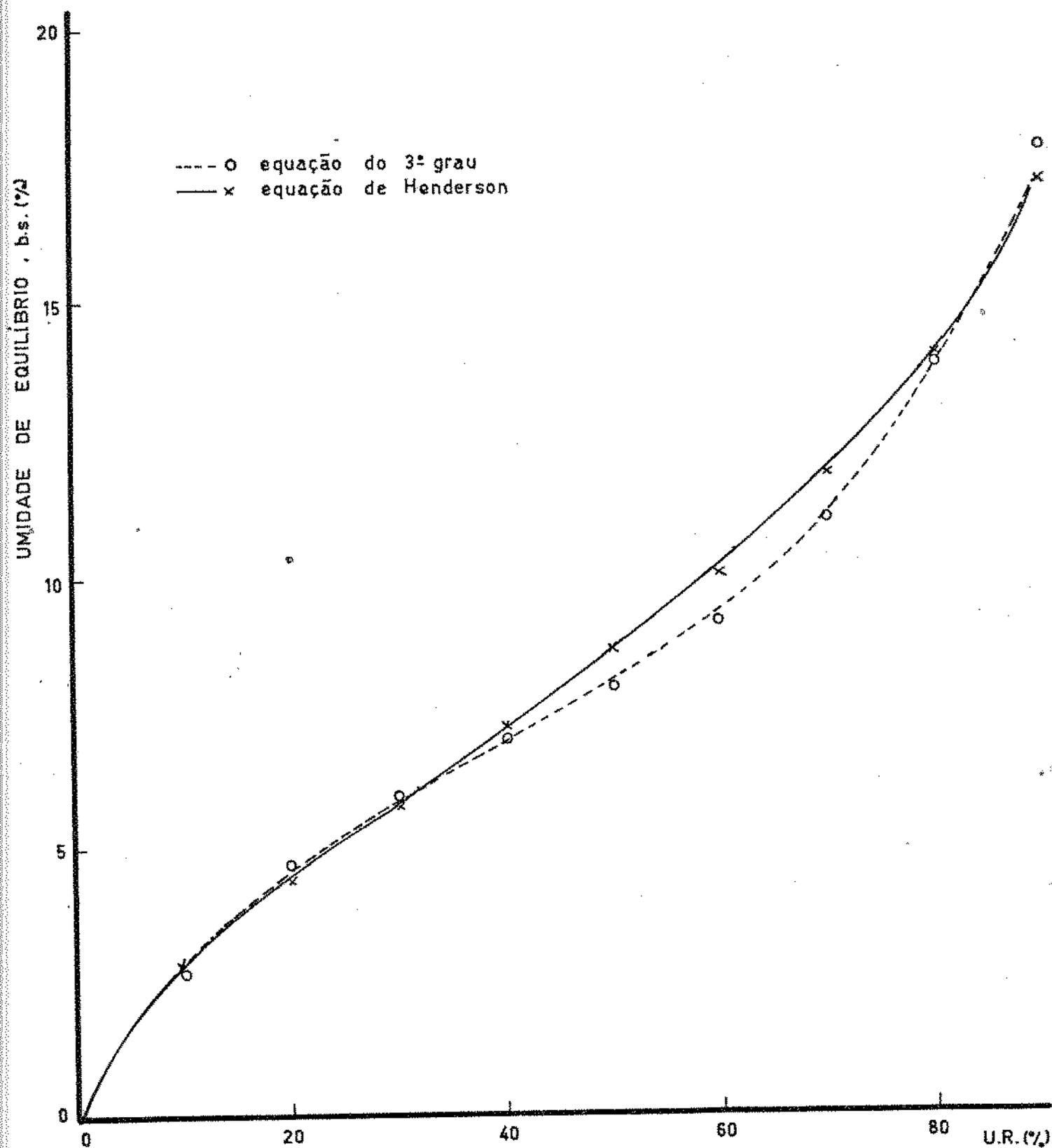


FIGURA 09 - Gráfico de umidade de equilíbrio usando a equação de Henderson comparada com a obtida utilizando a equação do 3º grau, para pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally.

### 4.3. Velocidade terminal

Com os valores médios do Quadro 07 mais o peso específico real encontrado no Quadro 06, calculou-se a velocidade terminal teórica para os grãos de pimenta-do-reino preta, utilizando ainda os seguintes dados:

$$\mu = 1,81 \times 10^{-4} \text{ g/cm/s} \quad (\text{PERRY, 1963}) \quad (\approx 25^{\circ}\text{C})$$

$$\hat{\gamma} = 1,293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3 \quad (\text{PERRY, 1963}) \quad (\approx 25^{\circ}\text{C})$$

$$g = 979 \text{ cm/s}^2 \quad (\text{JORGE, 1977})$$

Aplicando a equação (III), citada na página 27, obtivemos  $CRe^2 = 2,58 \times 10^6$  e usando a relação entre  $CRe^2$ , C e Re (HENDERSON e PERRY, 1966), obtivemos o valor para  $C=0,411$  e  $Re = 2,505$ .

Efetuada o cálculo da velocidade terminal teórica pela equação (II), citada na página 26, foi obtido o valor de  $V_t = 841,04 \text{ cm/s}$ . A velocidade terminal experimental é apresentada no Quadro 14. Foi obtida a partir da média aritmética de dez repetições e foi  $V_e = 631,95 \text{ cm/s}$ .

O número de Reynolds obtido, indica regime de fluxo turbulento.

QUADRO 14 - Valores experimentais e média da velocidade terminal dos grãos de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally.

Amostra	velocidade		
	pés/min	cm/min	cm/s
1	1.230	37.490,4	624,84
2	1.260	38.404,8	640,08
3	1.240	37.795,2	629,92
4	1.200	36.576,0	609,60
5	1.220	37.185,6	619,76
6	1.340	40.843,2	680,72
7	1.210	36.880,8	614,68
8	1.230	37.490,4	624,84
9	1.250	38.100,0	635,00
10	1.260	38.404,8	640,08
Média			631,95
Desvio Padrão			19,921
Coeficiente de variação (%)			3,15

Os valores da velocidade terminal para pimenta-do-reino, obtida teoricamente, difere da obtida experimentalmente. Esta diferença é, provavelmente, proveniente de vazamentos no equipamento utilizado; na elevada percentagem de grãos chochos; na equação utilizada, visto que esta fórmula se aplica bem para materiais considerados como esferas perfeitas e, ainda, a energia cinética adquirida pelos grãos quando se chocam uns com os outros, durante a exposição ao fluxo de ar em regime turbulento.

#### 4.4. Perda de carga

Os dados experimentais, obtidos para a determinação da perda de carga do fluxo de ar ao atravessar uma camada de pimenta-do-reino preta, estão no Quadro 15.

Com esses dados, foi construído o gráfico da Figura 10; de modo semelhante ao gráfico da American Society of Agricultural (1980).

Utilizamos a equação de Sheed (1953) e verificamos que nossos dados se enquadram dentro da equação do tipo:

$$Q = aP^b$$

RO 15 - Valores experimentais para o cálculo da perda de carga de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally.

Velocidade do ar (m/min)	Velocidade do ar (pés/min)	$\Delta P$ (mmágua)	$\Delta P$ (pol.água)	Fluxo (pés <sup>3</sup> /min)	$\Delta P/H$ (pol.água/pé)
6,4	21,00	10	0,39	5,74	0,42
11,3	37,08	16	0,63	6,60	0,68
18,9	62,01	22	0,87	11,04	0,95
23,0	75,46	30	1,18	13,43	1,28
27,6	90,56	38	1,50	16,12	1,63
30,1	98,76	43	1,69	17,58	1,84
34,2	112,21	50	1,97	19,97	2,14
36,8	120,74	56	2,21	21,49	2,40
38,6	126,65	61	2,40	22,54	2,61
47,2	154,86	67	2,64	27,56	2,87

Área do recipiente:  $165,13 \text{ cm}^2 = 0,178 \text{ pés}^2$

Altura da pimenta:  $28 \text{ cm} = 0,919 \text{ pés}$

Umidade da pimenta: 9,54%

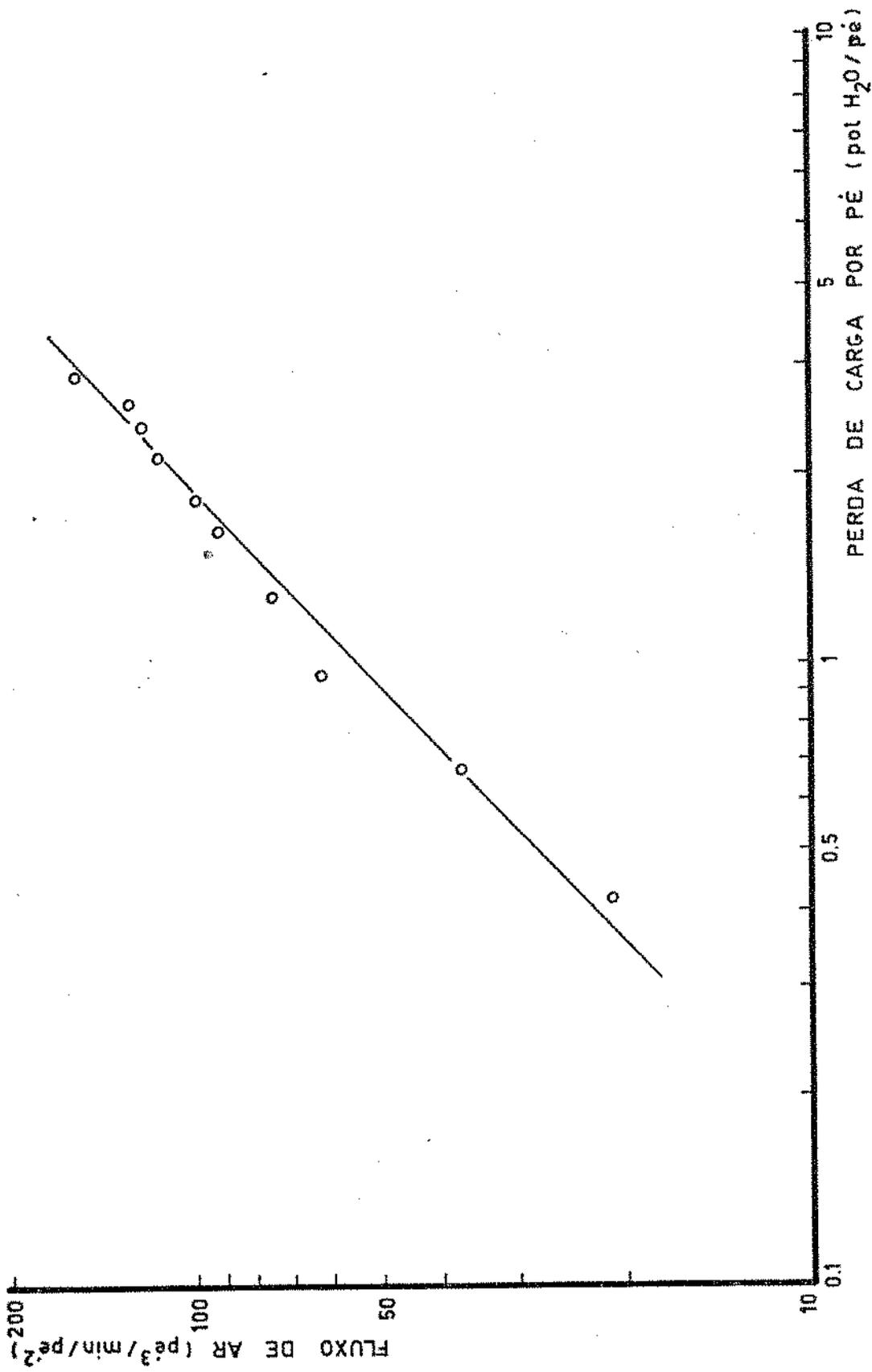


FIGURA 10 - Curva de perda de carga do fluxo de ar para a pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally.

Aplicando a regressão linear aos dados obtidos, foram encontrados os seguintes valores:  $a = 54,764$ ;  $b = 0,969$ . Ficando a equação:

$$Q = 54,764P^{0,969}$$

Foi obtido raio de correlação igual a zero vírgula novecentos e noventa e significância a zero vírgula cinco por cento.

#### 4.5. Coeficientes de atrito

O Quadro 16 apresenta os valores dos coeficientes de atrito estático da pimenta-do-reino preta, nos diversos materiais de superfície estudados, e o coeficiente de atrito estático interno.

Através da aplicação de força ao sistema, o carrinho se deslocava no sentido horizontal, e com o valor registrado dessa força, conhecendo-se a normal, calculou-se o coeficiente de atrito.

Para uma maior clareza, segue um exemplo de como os coeficientes de atrito estático foram calculados. O gráfico

QUADRO 16 - Valores médios dos coeficientes de atrito estáticos de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvaly com vários materiais de superfície.

Material	Força normal (kg)	Força de atrito (kg) (*)	Coefficiente de atrito médio	Média final
Aço inox	3,650	1,006	0,276	$\bar{M}$ = 0,285
	6,700	1,920	0,286	$\sigma$ = 0,008
	9,620	2,816	0,293	CV(%) = 2,80
Madeira (Pinho branco)	3,650	1,286	0,352	$\bar{M}$ = 0,347
	6,700	2,274	0,339	$\sigma$ = 0,007
	9,620	3,378	0,351	CV(%) = 2,02
Alumínio	3,650	1,330	0,364	$\bar{M}$ = 0,360
	6,700	2,386	0,356	$\sigma$ = 0,004
	9,620	3,476	0,361	CV(%) = 1,11
Duratex	3,650	1,192	0,333	$\bar{M}$ = 0,371
	6,700	2,596	0,387	$\sigma$ = 0,033
	9,620	3,874	0,393	CV(%) = 8,89
Compensado	3,650	1,436	0,393	$\bar{M}$ = 0,408
	6,700	2,768	0,413	$\sigma$ = 0,013
	9,620	4,008	0,417	CV(%) = 3,19
Chapa Galvanizada	3,650	1,710	0,468	$\bar{M}$ = 0,460
	6,700	3,138	0,468	$\sigma$ = 0,014
	9,620	4,260	0,443	CV(%) = 3,04
Madeira (Pinho amarelo)	3,650	1,726	0,473	$\bar{M}$ = 0,482
	6,700	3,270	0,488	$\sigma$ = 0,008
	9,620	4,652	0,484	CV(%) = 1,66
Aglomerado	3,650	1,860	0,510	$\bar{M}$ = 0,486
	6,700	3,336	0,498	$\sigma$ = 0,031
	9,620	4,340	0,451	CV(%) = 6,37
Pimenta	3,950	2,730	0,691	$\bar{M}$ = 0,708
	7,000	5,044	0,720	$\sigma$ = 0,015
	9,920	7,060	0,712	CV(%) = 2,12

(\*) Cada valor da força de atrito representa a média de cinco repetições.

da Figura 11 é característico da força de atrito versus deslocamento para a pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally com nove vírgula cinquenta e quatro por cento de umidade, em superfície de chapa galvanizada. A escala de força adotada foi cem gramas por divisão. Como temos aproximadamente quarenta e dois vírgula seis divisões até o ponto onde a força provocou o movimento do carrinho, a força de atrito dinâmico neste ponto foi igual a quatro quilos duzentos e sessenta gramas.

A carga normal aplicada neste caso foi nove quilos seiscentos e vinte gramas, logo o coeficiente de atrito estático foi

$$\alpha = \frac{4,260}{9,620} = 0,443.$$

Cada valor de força de atrito corresponde à média dos valores de cinco repetições.

Como se pode verificar, para um aumento da força normal, há um aumento da força de atrito. Verifica-se ainda que, para cada material de superfície estudado, corresponde um valor de coeficiente de atrito.

A pequena variação dos valores dos coeficientes de atrito observada quando se estuda o mesmo material de superfície, variando a força normal, é função da desuniformidade da

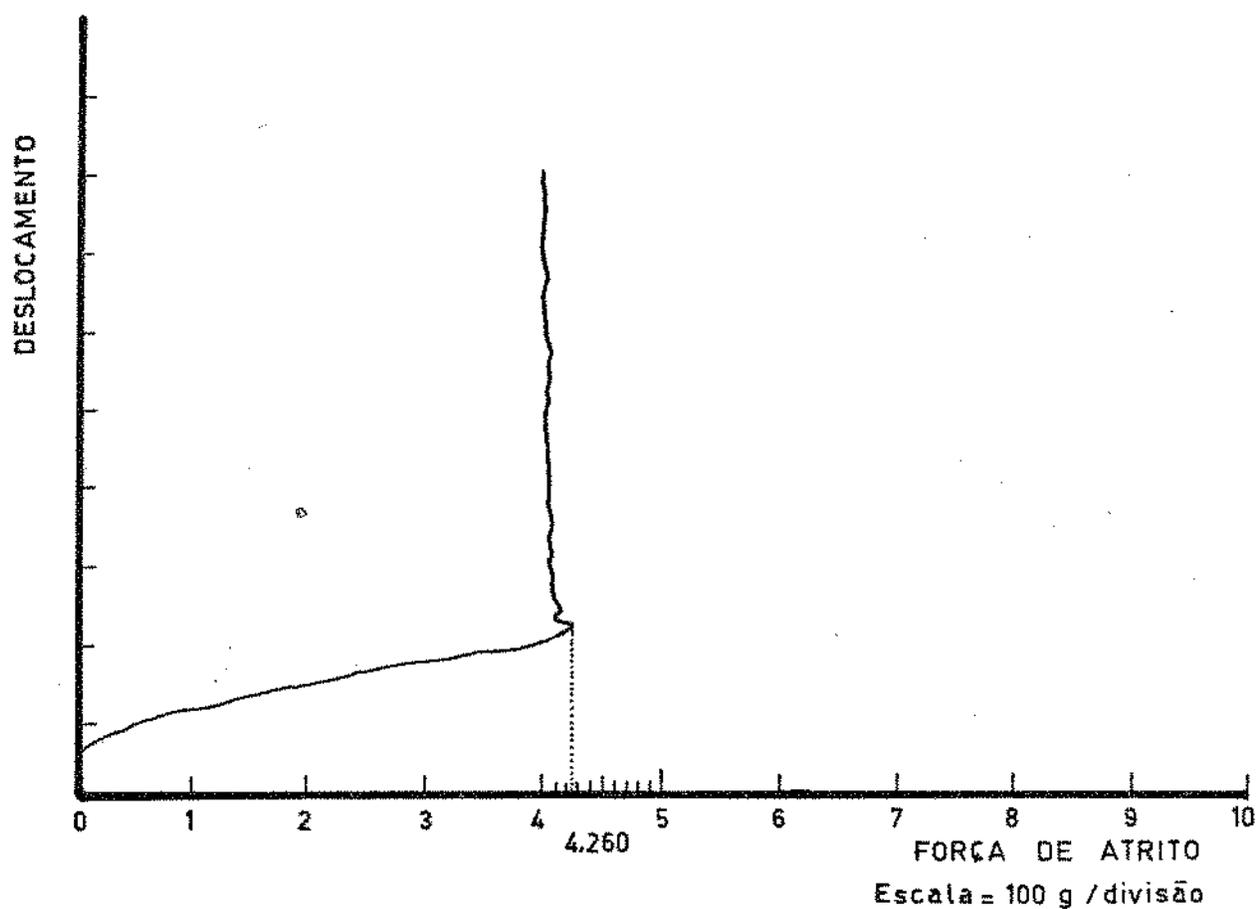


FIGURA 11 - Gráfico característico da força de atrito vs. deslocamento para a pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally, com 9.54 % de umidade, em chapa galvanizada.

superfície de contato e pela maior ou menor acomodação dos grãos de pimenta durante o movimento do carrinho. As maiores variações nos valores do coeficiente de atrito foram observadas nas superfícies de duratex e aglomerado, que apresentavam coeficiente de variação da ordem de oito vírgula oitenta e nove e seis vírgula trinta e sete por cento, respectivamente.

#### 4.6. Ângulo de talude ou de repouso natural

Os dados experimentais dos valores obtidos durante o estudo do ângulo de talude, bem como, o ângulo de talude médio para a pimenta-do-reino preta, encontram-se no Quadro 17.

Foi obtido o ângulo de talude médio, igual a trinta e cinco graus.

A tangente deste ângulo é igual a zero vírgula sete centos, valor próximo ao obtido durante a determinação do coeficiente de atrito interno da pimenta-do-reino preta.

QUADRO 17 - Valores experimentais do ângulo de talude ou de repouso natural dos grãos de pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally.

Amostra	Ângulo A	Ângulo B	Ângulo C	Ângulo D	Ângulo Médio
1	35,5	33,5	33,5	34,0	34,12
2	35,0	35,5	36,0	33,5	35,00
3	35,0	34,5	36,0	34,0	35,28
4	34,5	35,5	35,0	34,0	35,15
5	35,0	37,0	35,5	32,0	35,28
6	31,0	35,0	33,0	34,5	34,28
7	36,0	36,5	36,0	34,0	36,02
8	33,5	35,0	34,0	35,0	34,38
9	37,0	35,0	35,5	33,5	35,25
10	35,0	35,0	35,0	34,5	35,28
Média:					35,00
Desvio padrão:					0,581
Coeficiente de variação (%):					1,66

## 5. CONCLUSÕES

Baseados nas diversas determinações das propriedades físicas e mecânicas da pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally com nove vírgula cinquenta e quatro por cento de unidade, podemos nas condições em que foram desenvolvidas as experiências, tirar as seguintes conclusões:

### 5.1. Caracterização da matéria-prima

- Os grãos de pimenta-do-reino apresentam variação de diâmetro longitudinal e transversal de zero vírgula quatrocentos e sessenta e um a zero vírgula trezentos e oitenta e cinco centímetros.
- Peso médio de cem grãos igual a dois gramas vírgula sessenta e cinco.
- Peso específico real equivalente a zero vírgula oitocentos e doze gramas por mililitros.
- Peso específico aparente da ordem de zero vírgula quatrocentos e sessenta e quatro gramas por mililitros.

- Valor médio de sete vírgula dezoito por cento de grãos chochos.
- Ácidos graxos fixos de oito vírgula dezessete por cento.
- Peneira média igual a zero vírgula quatrocentos e treze centímetros.

### 5.2. Umidade de equilíbrio

- As equações de Henderson e do terceiro grau utilizadas para descreverem os dados das cruvas de umidade de equilíbrio, mostram-se adequadas, apresentando correlação respectivamente igual a zero vírgula novecentos e noventa e zero vírgula novecentos e setenta e um e significância a zero vírgula zero cinco por cento.
- As constantes determinadas foram:

Henderson,  $K = 3,00 \times 10^{-5}$  e  $n = 1,73$

Polinômio e do terceiro grau,  $a_1 = 0,32$ ,  $a_2 = -0,58 \times 10^{-2}$  e  $a_3 = 0,48 \times 10^{-4}$ .

### 5.3. Velocidade terminal

- A velocidade terminal teórica encontrada foi oi

tocentos e quarenta e um vírgula zero quatro centímetros por segundo é a experimental seiscentos e trinta e um vírgula noventa e cinco centímetros por segundo.

- O valor do coeficiente aerodinâmico de arraste foi zero vírgula quatrocentos e onze.
- O número de Reynolds calculado foi dois mil quinhentos e cinco.

#### 5.4. Perda de carga

- A equação de Shedd para descrever a perda de carga é adequada para representar os dados, apresentando correlação igual a zero vírgula novecentos e noventa e significância a zero vírgula zero cinco por cento.
- As constantes determinadas foram a igual a cinquenta e quatro vírgula setecentos e sessenta e quatro; e b igual a zero vírgula novecentos e sessenta e nove.

#### 5.5. Coeficientes de atrito

- O método utilizado para as determinações dos coeficientes de atrito é apropriado, apresentando coeficiente de

variação baixo para a maioria dos materiais de superfície estudados com exceção das superfícies de duratex e aglomerado, que foram pouco superiores a cinco por cento.

- Os valores dos coeficientes de atrito estático nas superfícies estudadas foram: aço inoxidável zero vírgula duzentos e oitenta e cinco; madeira (pinho branco) zero vírgula trezentos e quarenta e sete; alumínio zero vírgula trezentos e sessenta; duratex zero vírgula trezentos e setenta e um; compensado zero vírgula quatrocentos e oito; chapa galvanizada zero vírgula quatrocentos e sessenta; madeira (pinho amarelo) zero vírgula quatrocentos e oitenta e dois; e aglomerado zero vírgula quatrocentos e oitenta e seis.
- O coeficiente de atrito interno foi zero vírgula setecentos e oito.

#### 5.6. Ângulo de talude ou de repouso natural

- O ângulo de talude encontrado foi de trinta e cinco graus.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAVAL, K.K. & CHAND, P. - Pressure drop across fixed beds of rough rice. Transactions of the ASAE 17(3):560-563, 1974.

ALAM, A. & SHOVE, G.C. - Hygroscopicity and thermal properties of soybeans. Transactions of the ASAE 16(4):707-709, 1973.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - Resistance to air flow through grains and storage components. In: Agricultural Engineers Yearbook. St. Joseph, 1980. |p.329 ASAE data: ASAE D272| .

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO BRASIL. Rio de Janeiro, FIBGE, 1981. p.330, 357.

AOAC. - Spices and other condiments. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 13. ed. Washington, 1980. p.553.

- BICKERT, W.G. & BUELOW, F.H. - Kinetic friction of grains on surfaces. Transactions of the ASAE 9(1):129-131, 134, 1966.
- BILANSKI, W.K.; COLLINS, S.H. & CHU, P. - Aerodynamic properties of seed grains. Agricultural Engineering 43(4):216-219, 1962.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION - Methods of test for spices and condiments. Determination of non-volatile ether extract. London, 1970. 7p |BS 4585: pt. 6: 1970| .
- \_\_\_\_\_ - Specification for black pepper and white pepper. (Whole and ground). London, 1970. p.11. |BS 4595: 1970| .
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W. & HALL, C.W. - Drying cereal grains. Westport, AVI Publishing, 1974. Cp.5; 265p.
- BRUBAKER, J.E. & POS, J. - Determining static coefficients of friction of grains on structural surfaces. Transactions of the ASAE 8(1):53-55, 1965.
- CALDERWOOD, D.L. - Resistance to airflow of rough, brown and milled rice. Transactions of the ASAE 16(3):525-532, 1973.

- CARDOSO, M. - Instruções para a cultura da pimenteira-do-reino. Boletim do Instituto Agrônômico, nº166, 1978. p.1-24.
- CHAVEZ, J.B. - Contribuição ao estudo de características físico-mecânicas de variedades equatorianas e brasileiras de arroz; ensaios preliminares de armazenamento de arroz sem casca, variedade IAC 1246, sob diferentes atmosferas. Campinas, 1974. 52p. Tese (Mestrado) - Fac. Tecnol. Alim. - UNICAMP.
- CHEN, C.S. & CLAYTON, J.T. - The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials. Transactions of the ASAE 14(5):927-929, 1971.
- CHEN, C.S. - Equilibrium moisture curves for biological materials. Transactions of the ASAE 14(5): 924-926, 1971.
- CHUNG, D.S. & PFOST, H. B. - Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. Part I: Heat and free energy changes of adsorption and desorption. Transactions of the ASAE 10(4):549-551, 1967.
- ..... & ..... - Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. Part II: Development of the general isotherm equation. Transactions of the ASAE 10(4): 552-557, 1967.

- CLARK, R.L. & MCFARLAND, H.A. - Granular materials friction apparatus. Transactions of the ASAE 16(6):1198-1199, 1973.
- CLARK, R.L.; WELCH, G.B. & FOX, W.R. - Kinetic friction of cotton seeds as affected by several factors. Transactions of the ASAE 13(6):708-714, 1970.
- CARNE, I.W. & CARLETON, W.M. - Predicting pressure drop in pneumatic conveying of grains. Agricultural Engineering 38(3): 168-171, 180, 1957.
- DALCOMO, E.L. - Coeficientes de atrito de forrageiras picadas em várias superfícies. Campinas, 1980. 70p. Tese (Mestrado). Fac. Eng. Alim. Agric. - UNICAMP.
- DAY, C.L. - Effects of conditioning and other factors on resistance of hay to air flow. Transactions of the ASAE 6(3): 199-201, 1963.
- DUNSTAN, E.R.; CHUNG, D.S. & HODGES, T.O. - Adsorption and desorption characteristics of grain sorghum. Transactions of the ASAE 16(4):667-670, 1973.
- FRANCO, C.M. - Estudo sobre conservação de sementes. Bragantia, 3:137-150, 1943.

- FRIESEN, J.A. - Predicting equilibrium moisture content within the hysteresis loop. Transactions of the ASAE 17(2):339-341, 1974.
- GARRET, R.E. & BROOKER, D.B. - Aerodynamic drag of farm grains. Transactions of the ASAE 8(1):49-52, 1965.
- GEIDA, - Contribuição ao desenvolvimento da agroindústria: condimentos. Campinas, FCTPTA, 1971. 187p.
- GERHARDT, U. - Espécias e condimentos. Zaragoza, Acribia, 1973. 158p.
- HARMOND, J.E.; BRANDERBURG, N.R. & JENSEN, L.A. - Physical properties of seed. Transactions of the ASAE 8(1):30-32, 1965.
- HAWK, A.L.; BROOKER, D.B. & CASSIDY, J.J. - Aerodynamic characteristics of selected farm grains. Transactions of the ASAE 9(1):48-51, 1966.
- HENDERSON, J.M. - Measuring kinetic friction coefficients using oscillatory motion. Transactions of the ASAE 10(3):348-351, 1967.

BC/4853

- HENDERSON, S.M. - Equilibrium moisture content of small grain-hysteresis. Transactions of the ASAE 13(6):762-764, 1970.
- HENDERSON, S.M. & PERRY, J.H. - Agricultural processs engineering. 2.ed. New York, John Wiley, 1966. 228p.
- HENDERSON, S.M. & PIXTON, S.W. - Relative humidity control in equilibration studies. J. Sci. Food Agric. 32: 1145-1150, 1981.
- JINDAL, V.K.; MOHSENIN, N. & HUSTED, J.V. - Surface area of selected agricultural seeds and grains. Transactions of the ASAE 17(4):720-728, 1974.
- JORGE, J.T. - Determinação de algumas propriedades físicas e mecânicas da soja, variedade Santa Rosa. Campinas, 1977, 173p. Tese(Mestrado) - Fac. Eng. Alim. Agric. - UNICAMP.
- KEEK, H. & GOSS, J.R. - Determining aerodynamic drag and terminal velocities of agronomic seeds in free fall. Transactions of the ASAE 14(8):553-557, 1965.

- KUHNEMUND, B. - Ensilage de productos a granel. Braunschweig, Bühler-Miag: Noticiário nº217, 1981. p.16-18.
- LABMA - Sub-rotina MINOR. Laboratório de matemática aplicada, IMECC, UNICAMP, 1982. (no prelo).
- LAURENCE, G.H.M. - Taxonomy of vascular plants. New York, Macmillan, 1971. 821 p.
- LAWTON, P.J. - Coefficients of friction between cereal grain and various silo wall materials. J. Agric. Engng. Res. 25:75-86, 1980.
- MOHSEIN, N.N. - Physical properties of agricultural products. Transactions of the ASAE 8(1):25-29, 1965.
- \_\_\_\_\_. - Physical properties of plant and animal materials. New York. Gordon and Breach Science Publishers. 1970, 734p.
- MORITA, T. & SING, R.P. - Physical and thermal properties of short-grain rough rice. Transactions of the ASAE 22(3):630-636, 1979.

- NGODDY, P.O. & BAKKER-ARKEMA, F.W. - A generalized theory of sorption phenomena in biological materials (Part I. The isotherm equation. Transaction of the ASAE 13(5):612-617, 1970.
- OSTLE, B. - Statistics in research. 2.ed. Ames, Iowa State University Press, 1963. 585p.
- PARRY, J.W. - Spices. New York. Chemical Publishing, 1969, 235p.
- PATTERSON, R.J.; BAKKER-ARKEMA, F.W. & BICKERT, W.G. - Static pressure-airflow relationships in packed beds of granular biological materials such as grain. St. Joseph, 1969. 14p. ASAE, Paper. 69-334 .
- PERRY, J.H. - Chemical engineers handbook. 4.ed. New York, Mc. Graw Hill, 1963. p.3.71, 3.196, 3.197.
- PUZZI, D. - Manual de armazenamento de grãos, armazéns e silos. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1977. Cap.15, 294-326p.

RABE, D.L. & CURRENCE, H.D. - Air flow resistance and density of alfafa leaves. Transactions of the ASAE 18(5):932-934, 938. 1975.

RICHTER, D.W. - Friction coefficients of some agricultural materials. Agricultural Engineering 35(6):411-413, 1954.

ROSENGARTEN, Jr., F. - The book of spices. Wynnewood, Livingston Publishing, 1969, 350p.

SHEDD, C.K. - Some new data on resistance of grains to air flow. Agricultural Engineering 32(9):493-495, 1951.

\_\_\_\_\_. - Resistance of grains and seeds to air flow. Agricultural Engineering 34(9):616-619, 1953.

SINÍCIO, R. & ROA, G. - Curvas e equações de equilíbrio higroscópico para quinze produtos agrícolas. Rev. Brasil. Armaz. 4(2):45-55, 1979.

- SNYDER, L.H.; ROLLER, W.L. & HALL, G.E. - Coefficients of kinetic friction of wheat on various metal surfaces. Transactions of the ASAE 10(3):411-413, 419, 1967.
- STEELE, J.L. - Resistance of peanuts to airflow. Transactions of the ASAE 17(3):573-577, 1974.
- STEWART, B.R. - Effect of moisture content and specific weight on internal-friction properties of sorghum grain. Transactions of the ASAE 11(2):260-262, 1968.
- STEWART, B.R.; HOSSAIN, Q.A. & KUNZE, O.R. - Friction coefficients of sorghum grain on steel, teflon and concrete surfaces. Transactions of the ASAE 12(4):415-418, 1969.
- STROHMAN, R.D. & YOERGER, R.R. - A new equilibrium moisture-content equation. Transaction of the ASAE 10(5):675-677, 1967.
- TOSELLO, A. - Equipamento experimental para determinação de coeficiente de atrito de grãos; atrito interno e atrito com paredes de diversos materiais; em conjugação com o equipamento Instron Universal. Ciên. Cult., São Paulo, 27(7):491, 1975. Supl. |Resumos 27. Reunião SBPC, Jul. 1975| .

- TOSELLO, A. - Equipamento experimental para determinação de algumas características aerodinâmicas de grãos. Cien. Cult., São Paulo, 27(7):491, 1975. Supl. |Resumos 27. Reunião da SBPC, Jul. 1975| .
- TRAVAGLINI, D. & TOSELLO, Y. - Aplicação da equação de Henderson em estudos de umidade de equilíbrio em café em côco, despolpado e beneficiado. Coletânea de Instituto de Tecnologia de Alimentos 2:403-413, 1967/68.
- UHL, J.B. & LAMP, B.J. - Pneumatic separation of grain and straw mixtures. Transactions of the ASAE 9(2):244-246, 1966.
- USDA. - Standard method of making test weight-per-bushel determination. IN: Official grain standards of the United States. Washington, 1970. p.94-97. USDA bull., 1065 .
- WHITE, G.M.; ROSS, I.J. & KLAIBER, J.D. - Moisture equilibrium in mixing of shelled corn. Transactions of the ASAE 15(3): 508-514, 1972.
- YOUNG, J.H. & NELSON, G.L. - Theory of hysteresis between sorption and desorption isotherms in biological materials. Transactions of the ASAE 10(2): 260-263, 1967.

YOUNG, J.H. - Evaluation of models to describe sorption and desorption equilibrium moisture content isotherms of Virginia - Type Peanuts. Transactions of the ASAE 19(1):146-155, 1976.

SIMBOLOGIA

Símbolo	Definição	Unidade
a	Constante da equação de Shedd	
$a_1, a_2, a_3$	Constante da equação de terceiro grau	
$A_p$	Área de projeção do grão de pimenta-do-reino	$\text{cm}^2$
b	Constante da equação de Sheed	
b.s.	Base seca	
C	Coefficiente aerodinâmico de arraste	
C.V.	Coefficiente de variação	%
$d_1, d_2, d_3$	Dimensões do grão de pimenta-do-reino	cm
Deq	Diâmetro equivalente	cm
g	Aceleração da gravidade	$\text{cm/s}^2$
H	Altura da camada de pimenta-do-reino	cm ou pé
i	Número da peneira	
K	Constante da equação de Henderson	
m	Massa do grão de pimenta-do-reino	g
M	Umidade de equilíbrio, base seca	%
M	Média	

Símbolo	Definição	Unidade
n	Constante da equação de Henderson	
$P = \Delta P/H$	Perda de carga do fluxo de ar	pé/pol
Pi	Peso do produto retido na peneira i	g
Pm	Peneira média	cm ou pol
Q	Fluxo de ar	pés <sup>3</sup> /min/pé <sup>2</sup>
Re	Número de Reynolds	
T	Temperatura	graus rankine
Ve	Velocidade terminal experimental	cm/s
Vt	Velocidade terminal teórica	cm/s
$\alpha$	Coefficiente de atrito	
$\mu$	Viscosidade do ar	g/cm.s
$\phi$	Umidade relativa	%
$\gamma$	Densidade do ar	g/ml
$\gamma_p$	Peso específico real da pimenta-do-reino	g/ml
$\Delta P$	Perda de carga	mm ou pol. H <sub>2</sub> O
$\eta$	Desvio padrão	