

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Parecer

Este exemplar corresponde a relação final da tese defendida por Benedito Carlos Benedetti e aprovada pela Comissão julgadora em 04 de dezembro de 1987.

Campinas, 04 de dezembro de 1987

[Assinatura]
Presidente da Banca

INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE SOBRE

PROPRIEDADES FÍSICAS DE VÁRIOS GRÃOS

BENEDITO CARLOS BENEDETTI
Engenheiro de Alimentos

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ TADEU JORGE

Tese de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Agrícola da
Universidade Estadual de Campinas

NOVEMBRO DE 1987

UNESP
BIBLIOTECA CENTRAL

Para

Benedicta e Antonio (em memória)
que permitiram, através de muito
sacrifício, este momento.

A G R A D E C I M E N T O S

Ao professor José Tadeu Jorge pela orientação precisa e paciente, durante todo o transcorrer de nosso curso de mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP - pela bolsa de mestrado para o desenvolvimento do projeto de pesquisa que deu origem a esta tese.

Ao Instituto Agrônomo de Campinas e ao Instituto Agrônomo do Paraná pela doação das matérias primas.

À Associação Brasileira das Indústrias de Alimentação pelas cópias desta tese.

Ao Dagoberto pela colaboração nas determinações experimentais.

Aos amigos, Mari, Amauri, Rubão, Celene, que em determinados momentos destes três últimos anos, deram a maior força e me incentivaram, contribuindo de maneira muito especial para a conclusão desta tese.

À Graça pelo carinho.

Í N D I C E

	página
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	xi
SIMBOLOGIA	xvii
RESUMO	xix
SUMMARY	xxii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Importância das propriedades físicas dos materiais biológicos	3
2.2. Umidade de Equilíbrio	3
2.3. Pesos Específicos	6
2.4. Ângulo de Talude	8
2.5. Coeficiente de Atrito	10
2.6. Velocidade Terminal	14
3. DETERMINAÇÕES INICIAIS E PREPARO DAS MATÉRIAS PRIMAS	18
3.1. Matérias Primas	18
3.2. Material e Métodos	18
3.2.1. Material	18
3.2.2. Métodos	19
3.2.2.1. Umidade	19
3.2.2.2. Classificação por Tamanho	19
3.2.2.3. Classificação Comercial	21
3.3. Resultados	21
3.3.1. Umidade	21
3.3.2. Classificação por Tamanho	22

	página	
3.3.3.	Classificação Comercial	22
3.4.	Preparo das Matérias Primas	34
3.4.1.	Secagem	34
3.4.2.	Umidificação	34
4.	UMIDADE DE EQUILÍBRIO	36
4.1.	Material e Métodos	36
4.1.1.	Material	36
4.1.2.	Métodos	36
4.2.	Resultados e Discussão	37
4.3.	Conclusões	48
5.	PESOS ESPECÍFICOS	49
5.1.	Peso Específico Aparente	49
5.1.1.	Material e Métodos	49
5.1.1.1.	Material	49
5.1.1.2.	Métodos	50
5.1.1.2.1.	Calibração do Recipiente	50
5.1.1.2.2.	Determinação do Peso Específico Aparente	51
5.2.	Peso Específico Real	51
5.2.1.	Material e Métodos	51
5.2.1.1.	Material	51
5.2.1.2.	Métodos	52
5.3.	Porosidade	52
5.4.	Resultados e Discussão	53
5.5.	Conclusões	66
6.	ÂNGULO DE TALUDE	67
6.1.	Material e Método	67
6.1.1.	Material	67
6.1.2.	Método	67

		página
6.2.	Resultados e Discussão	68
6.3.	Conclusões	73
7.	COEFICIENTE DE ATRITO	74
7.1.	Material e Métodos	74
7.1.1.	Material	74
7.1.2.	Métodos	76
7.2.	Resultados e Discussão	78
7.3.	Conclusões	99
8.	VELOCIDADE TERMINAL	100
8.1.	Material e Método	100
8.1.1.	Material	100
8.1.2.	Métodos	101
8.2.	Resultados e Discussão	103
8.3.	Conclusões	118
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura nº	Assunto	página
01	Umidade de equilíbrio do amendoim em função da umidade relativa do ambiente.	38
02	Umidade de equilíbrio do arroz em casca em função da umidade relativa do ambiente	38
03	Umidade de equilíbrio do feijão em função da umidade relativa do ambiente	39
04	Umidade de equilíbrio do milho em função da umidade relativa do ambiente	39
05	Umidade de equilíbrio da soja em função da umidade relativa do ambiente	40
06	Umidade de equilíbrio do trigo em função da umidade relativa do ambiente	40
07	Umidade de equilíbrio do amendoim, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 39 grau	45
08	Umidade de equilíbrio do arroz em casca, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 39 grau	45
09	Umidade de equilíbrio do feijão, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 39 grau	45
10	Umidade de equilíbrio do milho, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 39 grau	45

Figura nº	Assunto	página
11	Umidade de equilíbrio da soja, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 3º grau	46
12	Umidade de equilíbrio do trigo, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 3º grau	46
13	Equipamento para determinação do peso específico aparente	49
14	Peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do amendoim, em função da umidade	62
15	Peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do arroz em casca, em função da umidade	62
16	Peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do feijão, em função da umidade	63
17	Peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do milho, em função da umidade	63
18	Peso específico aparente, peso específico real e porosidade, da soja, em função da umidade	63
19	Peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do trigo, em função da umidade	63

Figura	Assunto	página
nº		
20	Equipamento para estudo do ângulo de talude	67
21	Ângulo de talude em função da umidade	71
22	Ângulo de talude em função da umidade	73
23	Esquema do equipamento acoplado ao Instron Universal para a determinação dos coeficientes de atrito com superfícies	74
24	Esquema do equipamento acoplado ao Instron Universal para a determinação do coeficiente de atrito interno	76
25	Gráfico característico da força de atrito x deslocamento, determinado com o equipamento Instron Universal, para a superfície de <u>ch</u> apa galvanizada, com milho a 20,74% de <u>umida</u> de e força normal de 7,189 kgf	79
26	Gráfico característico da força de atrito x deslocamento, determinado com o equipamento Instron Universal, para a superfície de <u>ma</u> deirite, com arroz em casca a 15,38% de <u>umi</u> dade e força normal de 5,466 kgf	79
27	Coefficiente de atrito em função da umidade, do amendoim, com diversas superfícies e com o próprio produto	87
28	Coefficiente de atrito em função da umidade, do arroz em casca, com diversas superfícies e com o próprio produto	88

Figura nº	Assunto	página
29	Coeficiente de atrito em função da umidade, do feijão, com diversas superfícies e com o próprio produto	89
30	Coeficiente de atrito em função da umidade, do milho, com diversas superfícies e com o próprio produto	90
31	Coeficiente de atrito em função da umidade, da soja, com diversas superfícies e com o próprio produto	91
32	Coeficiente de atrito em função da umidade, do trigo, com diversas superfícies e com o próprio produto	92
33	Esquema da coluna pneumática para separação e determinação da velocidade terminal	100
34	Velocidade terminal, do amendoim, em função da umidade	113
35	Velocidade terminal, do arroz em casca, em função da umidade	113
36	Velocidade terminal, do feijão, em função da umidade	113
37	Velocidade terminal, do milho, em função da umidade	114
38	Velocidade terminal, da soja, em função da umidade	114
39	Velocidade terminal, do trigo, em função da umidade	114

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro nº	Assunto	página
01	Evolução da produção agrícola brasileira	2
02	Umidade inicial dos produtos utilizados na pesquisa, em %, base úmida	23
03	Classificação por tamanho do amendoim	23
04	Classificação por tamanho do arroz em casca	24
05	Classificação por tamanho do feijão	25
06	Classificação por tamanho do milho	25
07	Classificação por tamanho da soja	26
08	Classificação por tamanho do trigo	26
09	Classificação comercial do amendoim	27
10	Classificação comercial do arroz em casca	28
11	Classificação comercial do feijão	29
12	Classificação comercial do milho	30
13	Classificação comercial da soja	31
14	Classificação comercial do trigo	32
15	Umidade inicial, classificação por tamanho e classificação comercial dos produtos utilizados na pesquisa	33
16	Dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para amendoim, através dos processos de absorção e desorção	38
17	Dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para arroz em casca, através dos processos de absorção e desorção	38

Quadro nº	Assunto	página
18	Dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para feijão, através dos processos de absorção e desorção	39
19	Dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para milho, através dos processos de absorção e desorção	39
20	Dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para soja, através dos processos de absorção e desorção	40
21	Dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para trigo, através dos processos de absorção e desorção	40
22	Constantes da equação do 3º grau: $Meq = a_1 \phi + a_2 \phi^2 + a_3 \phi^3$	42
23	Constantes da equação de Henderson $1 - \phi = e^{-kTMeq^n}$	43
24	Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do amendoim, em função da umidade	54
25	Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do arroz em casca, em função da umidade	55
26	Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do feijão, em função da umidade	56
27	Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do milho, em função da umidade	57

Quadro nº	Assunto	página
28	Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, da soja, em função da umidade	58
29	Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do trigo, em função da umidade	59
30	Regressão linear e coeficiente de correlação para peso específico aparente (ρ_{ap} , em g/ml) em função da umidade (M, em decimal), para cada produto pesquisado	61
31	Regressão linear e coeficiente de correlação para peso específico real (ρ_r , em g/ml) em função da umidade (M, em decimal), para cada produto pesquisado	61
32	Regressão linear e coeficiente de correlação para porosidade (P, em %) em função da umidade (M, em %), para cada produto pesquisado	62
33	Ângulo de talude (em graus) para amendoim em função da umidade	69
34	Ângulo de talude (em graus) para arroz em casca em função da umidade	69
35	Ângulo de talude (em graus) para feijão em função da umidade	69
36	Ângulo de talude (em graus) para milho em função da umidade	69
37	Ângulo de talude (em graus) para soja em função da umidade	70

Quadro nº	Assunto	página
38	Ângulo de talude (em graus) para trigo em função da umidade	70
39	Regressão linear e coeficiente de correlação para ângulo de talude (α , em graus) em função da umidade (M, em decimal), para cada produto pesquisado	70
40	Dados experimentais de coeficiente de atrito com diversas superfícies e coeficiente de atrito interno para amendoim	81
41	Dados experimentais de coeficiente de atrito com diversas superfícies e coeficiente de atrito interno para arroz em casca	82
42	Dados experimentais de coeficiente de atrito com diversas superfícies e coeficiente de atrito interno para feijão	83
43	Dados experimentais de coeficiente de atrito com diversas superfícies e coeficiente de atrito interno para milho	84
44	Dados experimentais de coeficiente de atrito com diversas superfícies e coeficiente de atrito interno para soja	85
45	Dados experimentais de coeficiente de atrito com diversas superfícies e coeficiente de atrito interno para trigo	86
46	Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para amendoim, com várias superfícies e com o próprio produto	87

Quadro nº	Assunto	página
47	Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para arroz em casca, com várias superfícies e com o próprio produto	88
48	Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para feijão, com várias superfícies e com o próprio produto	89
49	Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para milho, com várias superfícies e com o próprio produto	90
50	Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para soja, com várias superfícies e com o próprio produto	91
51	Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para trigo, com várias superfícies e com o próprio produto	92
52	Dados experimentais de velocidade terminal do amendoim, em cm/s	104
53	Dados experimentais de velocidade terminal do arroz em casca, em cm/s	104
54	Dados experimentais de velocidade terminal do feijão, em cm/s	105
55	Dados experimentais de velocidade terminal do milho, em cm/s	105
56	Dados experimentais de velocidade terminal da soja, em cm/s	106
57	Dados experimentais de velocidade terminal do trigo, em cm/s	106

Quadro nº	Assunto	página
58	Constantes da equação de 2º grau da velocidade terminal experimental em função da umidade	107
59	Constantes da equação de 3º grau da velocidade terminal experimental em função da umidade	107
60	Dados utilizados para o cálculo da velocidade terminal teórica	110
61	Velocidade terminal teórica (V_{tt}), $C Re^2$, C e Re teórico, para os produtos pesquisados	111
62	Constantes da equação de 2º grau da velocidade terminal teórica em função da umidade	112
63	Constantes da equação de 3º grau da velocidade terminal teórica em função da umidade	112
64	Faixa de variação da velocidade terminal experimental (V_{te}) e velocidade terminal teórica (V_{tt}), considerando-se toda faixa de umidade	116

SIMBOLOGIA

Símbolo	descrição	unidade
a	número da peneira menor	
a_1, a_2, a_3	constantes da equação de Umidade de Equilíbrio	
A_p	área projetada	cm ²
b	número da peneira maior	
b_0, b_1	constantes da equação de coeficiente de atrito	
b_2, b_3		
c_0, c_1	constantes da equação de velocidade terminal	
c_2, c_3		
C	coeficiente aerodinâmico de arraste	
d_1, d_2, d_3	dimensões do grão	cm
Deq	diâmetro equivalente	cm
F_r	força resistente	dina
g	aceleração da gravidade	cm/s ²
i	número da peneira	
k	constante da equação de Henderson	
m	massa do produto	g
m_a	massa de água	g
m_p	massa de uma partícula	g
M	teor de umidade dos produtos	% ou decimal
Meq	umidade de equilíbrio	%
n	constante da equação de Henderson	
P	porosidade	%
P_i	peso do produto retido na peneira i	g

Símbolo	descrição	unidade
P_m	peneira média	
r	coeficiente de correlação	
Re	número de Reynolds	
t	valor obtido com o teste de Student	
T	temperatura	°C ou ° rankin
V	velocidade	cm/s
V_d	volume deslocado	ml
V_p	volume da partícula	cm ³
V_r	volume do recipiente	ml
V_t	velocidade terminal	cm/s
V_{te}	velocidade terminal experimental	cm/s
V_{tt}	velocidade terminal teórica	cm/s
α	ângulo de talude	graus
μ	coeficiente de atrito	
μ_f	viscosidade do fluido	poise
ρ_a	densidade da água	g/ml
ρ_{ap}	peso específico aparente	g/ml
ρ_f	peso específico do fluido	g/ml
ρ_p	peso específico da partícula	g/ml
ρ_r	peso específico real	g/ml

R E S U M O

O objetivo do presente trabalho foi determinar a influência do teor de umidade sobre algumas propriedades físicas dos seguintes produtos agrícolas: amendoim (cv. Tatú), arroz em casca (cv. IAC-47), feijão (cv. Aysô), milho (cv. Maya XX), soja (cv. Paraná) e trigo (cv. IAC-25). Foram utilizados níveis de umidade, aproximados, de 10%, 15%, 20%, e 25%, base úmida.

As propriedades estudadas, para cada produto em cada nível de umidade, foram: peso específico aparente, peso específico real, porosidade, ângulo de talude, coeficiente de atrito interno, coeficiente de atrito com alumínio, chapa galvanizada, concreto, duratex e madeirite, e a velocidade terminal. Os produtos foram caracterizados, inicialmente, com relação à umidade, classificação por tamanho e classificação comercial, e tiveram determinadas suas curvas de umidade de equilíbrio, processos de adsorção e desorção.

Os dados obtidos de umidade de equilíbrio, para umidade relativa entre 10 e 90% e temperaturas médias em torno de 22-26°C, foram ajustados a dois modelos de equações: um na forma de equação do 3º grau: $Meq = a_1 \phi + a_2 \phi^2 + a_3 \phi^3$, e outro, a equação de Henderson: $1 - \phi = e^{-kTMeq^n}$. Todas as equações obtidas servem para representar os dados experimentais dos seis produtos, pois apresentaram ótimas correlações e significância ao nível de 0,5%. O modelo de 3º grau mostrou-se melhor para amendoim, feijão, soja e trigo, e o modelo de Henderson para arroz em casca e milho.

Os pesos específicos, aparente e real, apresentaram diminuição com o acréscimo da umidade para todos os produtos, com exceção do arroz em casca onde aumentaram. Os dados experimentais foram ajustados a uma equação do 1º grau, apresentando nível de significância de 0,5% para todos os produtos, excetuando-se o amendoim, com relação ao peso específico real, que não mostrou correlação linear. A porosidade aumentou com o aumento da umidade para todos os produtos pesquisados, com exceção do amendoim que não mostrou significância ao ajuste matemático realizado. O trigo apresentou nível de significância de 1,0% e os outros produtos de 5,0%.

O ângulo de talude aumentou com o acréscimo da umidade para os produtos arroz em casca, milho, soja e trigo, e os dados experimentais ajustados a uma equação do 1º grau apresentaram significância ao nível de 1%. O amendoim e o feijão também mostraram aumento do ângulo de talude em função do aumento da umidade, porém os dados experimentais ficaram melhor representados através de equação do 3º grau, com nível de significância de 1%.

O coeficiente de atrito, de uma forma geral, considerando-se toda a faixa de umidade, apresentou uma tendência de aumento com o acréscimo do teor de umidade. A superfície de chapa galvanizada, de uma forma geral, apresentou os menores coeficientes de atrito e a superfície de concreto os maiores. Todas as equações obtidas para o modelo de 3º grau servem para representar o coeficiente de atrito em função da umidade, pois apresentaram boas correlações e significância ao nível de 0,5%, exceção feita para o arroz em casca com alumínio que apresentou significância de 5,0%, e arroz em casca com concreto que mostrou-se não significativo.

A velocidade terminal do arroz em casca, feijão, milho, soja e trigo, aumenta com o aumento do teor de umidade até umidades ao redor de 18-22%, e, diminui com umidades acima desse valor. O amendoim apresentou velocidade terminal diminuindo com o aumento da umidade. Excetuando-se a velocidade terminal teórica para o trigo, que mostrou-se não significativo ao ajuste matemático realizado, todas as equações obtidas pelos modelos de 2º e 3º grau servem para representar a velocidade terminal, teórica e experimental, em função do teor de umidade, pois, apresentaram boas correlações e significância aos níveis de 0,5% e 5,0%, dependendo do produto e/ou do modelo testado.

S U M M A R Y

EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON PHYSICAL PROPERTIES OF SOME GRAINS

The objective of this study was to determine the effect of moisture content on physical properties of peanuts (cv. Tatú), rough rice (cv. IAC-47), beans (cv. Aysô), corn (cv. Maya XX), soybeans (cv. Paraná), and wheat (cv. IAC-25). The moisture content varied from 10% to 25% (w.b.).

The physical properties studied were: bulk and true density, porosity, angle of repose, internal coefficient of friction, coefficient of friction with aluminium, galvanized steel, concrete, plywood, and terminal velocity. Initially the products were characterized in relation to moisture content, size, and commercial classification. The equilibrium moisture content (EMC) curves were determined using the adsorption and desorption static process.

The equilibrium moisture content (EMC) data were collected for relative humidity varying 10 to 90% and temperature between 22 and 26 °C. The data were fitted with a third degree equation: $Meq = a_1 \phi + a_2 \phi^2 + a_3 \phi^3$, and the Henderson equation: $1 - \phi = e^{-kTM^n}$. The regression equations showed good correlation and significance level of 0,5%. The third degree model best represented the EMC data for peanuts, beans, soybeans, and wheat. The Henderson model represented the EMC data for rough rice and corn.

The bulk and true density values decreased with increasing moisture content values for all products but rough rice, wich values increased. A linear relationship for the experimental data showed a significance level of 0,5%, for all products considered, except for the peanuts. The peanuts true density values did not showed statistical significance.

The porosity increased with increasing moisture content values for all products, except peanuts.

The angle of repose increased with increasing moisture content values for rough rice, corn, soybeans, and wheat, and the experimental data fitted a first degree model showed level of significance of 1%. The angle of repose of peanuts and beans increased as the moisture content values increased, and the experimental data were best represented by the third degree model with a significance level of 1%.

The coefficient of friction in general showed a tendency to increase with the increase of the moisture content values. The galvanized steel surface in general showed lower coefficient of friction and concrete surface the higher. The third degree models had good correlations coefficient and high significance levels for all products and surfaces, except for rough rice and aluminium and concrete surfaces.

The terminal velocity for rough rice, beans, corn, soybeans and wheat, increased with moisture content values varying from 18% to 22%, and, decreased for moisture content values higher than 22%. The peanuts terminal velocity decreased as the moisture content values increased. The 2nd and 3rd degrees models showed a good correlations coefficient and high significance levels and can be used to represent the experimental and theoretical terminal velocity for all products, except wheat in relation to theoretical terminal velocity.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades físicas dos materiais biológicos é de fundamental importância em projetos de engenharia envolvendo dimensionamento de máquinas e equipamentos para colheita, manuseio, armazenamento, secagem e aeração. Também é útil em problemas relacionados com fenômenos de transferência de calor e massa durante a secagem e armazenamento de produtos com altos níveis de umidade.

No Brasil, que apresenta uma enorme produção agrícola e onde as perdas, pelas mais diversas razões, também são grandes, as pesquisas nesse campo são praticamente inexistentes e em muitos casos utilizamo-nos de dados de produtos similares de outros países que nem sempre são os mais corretos e adequados.

Outro fator de grande relevância, correlacionado com este projeto de pesquisa, é a existência de pesquisas bem sucedidas, visando o armazenamento de grãos com alto teor de umidade (entre 20% e 25%) e para os quais, nestes níveis de umidade, não existem dados sobre as características físicas, tendo em vista as peculiaridades dos produtos brasileiros.

Os produtos pesquisados foram: amendoim, arroz em casca, feijão, milho, soja e trigo. A escolha deveu-se aos seguintes fatores: a) o arroz e o feijão são os principais produtos, do ponto de vista nutricional, utilizados na alimentação do brasileiro; b) o milho é o principal produto utilizado nas rações animais; c) a soja e o trigo são importantíssimos do ponto de vista econômico, o primeiro, pelo excepcional papel que desempenha nas exportações brasileiras, e o segundo, pelo que significa nas importações de nosso país; d) o amendoim por apresentar sérios problemas de armazenamento e de contaminação; e) a quanti-

dade dessas matérias primas representarem mais de 2/3 da produção total de grãos no Brasil, como pode ser verificado pelos dados apresentados no Quadro 01.

Baseando-se nestas considerações, foi pesquisada a influência do teor de umidade sobre algumas propriedades físicas dos produtos: amendoim, arroz em casca, feijão, milho, soja e trigo. Os níveis de umidade utilizados foram de 10%, 15%, 20% e 25%. As propriedades pesquisadas foram: peso específico aparente, peso específico real, porosidade, ângulo de talude, coeficiente de atrito interno, coeficiente de atrito com alumínio, chapa galvanizada, concreto, duratex e madeirite, velocidade terminal e as curvas de umidade de equilíbrio.

Os dados experimentais foram ajustados a modelos matemáticos adequados à cada propriedade em particular, e testes estatísticos foram aplicados para testar a eficiência desses ajustes.

Quadro 01. Evolução da produção agrícola brasileira 1/
(em milhões de toneladas)

	1984/85	1985/86	1986/87
arroz em casca	9,02	8,10	9,32
feijão (1a. safra)	1,46	0,51	1,07
milho	20,20	16,99	25,09
TOTAL DE GRÃOS	30,68	25,60	35,48
algodão herbáceo em caroço	2,20	1,81	1,09
amendoim (1a. safra)	0,26	0,15	0,18
soja	18,30	13,18	16,33
TOTAL DE OLEAGINOSAS	20,76	15,14	17,60
Outras *	10,03	9,99	11,88
TOTAL GERAL	61,47	50,73	64,96
Trigo colhido na primavera anterior	1,96	4,25	5,30

Fonte: IBGE/estimativa de fevereiro

* Batata inglesa (1a. safra), cebola, mandioca e tomate.

1/ Extraído de GUIA RURAL ABRIL, 1(1):40, abril, 1987.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. IMPORTÂNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS BIOLÓGICOS.

O estudo das propriedades físicas dos materiais biológicos recebeu importante contribuição com o trabalho de MOHSENIN (35), onde foram sintetizadas as características importantes que deviam ser determinadas, procurando despertar o interesse por esse campo de pesquisa. Ressaltou a importância do conhecimento dessas características no dimensionamento e desenho dos equipamentos transportadores, de limpeza e separação, no emprego de técnicas utilizadas no armazenamento e na construção de silos e outros dispositivos de armazenagem, fazendo referências aos poucos trabalhos já existentes.

Posteriormente, outros pesquisadores indicaram em seus trabalhos a importância das propriedades físicas, destacando-se: FORTES et al. (22); JORGE (29) e LEITÃO (34).

2.2. UMIDADE DE EQUILÍBRIO

Quando a pressão de vapor da água na superfície de um produto iguala-se a pressão de vapor da água no ar que o envolve, temos um equilíbrio que determina o valor da umidade existente nesse produto. Essa umidade é chamada de umidade de equilíbrio e seu conhecimento é muito importante para as operações de manuseio, secagem, armazenamento e comercialização das matérias primas, segundo ROA & ROSSI (45).

Diversos parâmetros influenciam o valor da umidade de equilíbrio de um produto, sendo os principais: a umidade relativa e a temperatura do ar ambiente.

Quando ocorre uma mudança na umidade relativa de um ambiente a pressão de vapor da água no ar também sofre alterações, aumentando esta com o aumento da umidade relativa. Assim, para cada umidade relativa corresponde uma umidade de equilíbrio, para um produto considerado, numa determinada temperatura.

A temperatura exerce efeitos significativos sobre o valor da umidade de equilíbrio. Um aumento de temperatura, a umidade relativa constante, diminui o valor da umidade de equilíbrio, de acordo com BROOKER et al. (5). Trabalhando com milho, CHEN & CLAYTON (11) analisaram matematicamente a influência da temperatura sobre a umidade de equilíbrio.

A composição química de um produto também interfere na umidade de equilíbrio, onde grãos com alto teor de lipídeos absorvem menos água do meio ambiente que os grãos com alto teor de amido, como ficou comprovado por ROSSI et al. (46).

Existem dois caminhos para um produto chegar a umidade de equilíbrio: um quando ele absorve água do meio ambiente e outro quando perde água para o meio ambiente. A umidade de equilíbrio do produto que absorve água é menor que a do produto que perde água. Esse fenômeno é chamado de efeito histerese e sua explicação foi apresentada por YOUNG & NELSON (61); CHUNG & PFOST (13) e NGODDY & BAKKER-ARKEMA (39).

KARON & ADAMS (30) utilizaram sais para controle da umidade relativa e apresentaram dados para arroz em casca e quirera de arroz. COLEMAN & FELLOWS (15) determinaram umidades de equilí

brio para trigo, milho, arroz, aveia, cevada, centeio, sementes de linho e trigo mourisco, utilizando ácido sulfúrico para controle da umidade relativa do ambiente. FRANCO (24) apresentou dados do volume de ácido sulfúrico em relação ao volume de água para obtenção de cada umidade relativa. CHAVEZ (9) com arroz, JORGE (29) com soja e LEITÃO (34) com pimenta-do-reino preta, determinaram umidade de equilíbrio utilizando ácido sulfúrico para controle da umidade relativa.

KOSOSKI (31) comparou a utilização de etileno glicol e ácido sulfúrico para controle de umidade relativa e concluiu que as umidades de equilíbrio para ácido sulfúrico sempre são maiores que para etileno glicol, para todas as temperaturas e umidades relativas, e apresentou dados para milho, arroz em casca, feijão preto, soja e amendoim descascado.

O desenvolvimento de equações empíricas e semi-empíricas para aplicação a dados experimentais foram efetuadas por HENDERSON (27); DAY & NELSON (18); CHUNG & PFOST (13) e ROA, citado por SINÍCIO & ROA (49).

HENDERSON (27) sugeriu a seguinte equação para descrever as curvas de umidade de equilíbrio:

$$1 - \phi = e^{-kTM^n} \quad \{ I \}$$

onde: ϕ = umidade relativa, em decimal; T = temperatura, em graus rankine; M = umidade de equilíbrio do produto, base seca, em %; k e n = constantes que dependem do produto. Apresentou os seguintes valores para as constantes k e n: milho: $k = 1,10 \times 10^{-5}$ e $n = 1,90$; soja: $k = 3,20 \times 10^{-5}$ e $n = 1,52$; trigo: $k = 5,59 \times 10^{-5}$ e $n = 3,03$.

JORGE (29) sugeriu a seguinte equação para descrever as curvas de umidade de equilíbrio para condições de armazenamento:

$$M_{eq} = a_1 \phi + a_2 \phi^2 + a_3 \phi^3 \quad \{ II \}$$

onde: M_{eq} = umidade de equilíbrio, base seca, em %; ϕ = umidade relativa, em decimal; a_1 , a_2 e a_3 = constantes a determinar.

CHEN (10) analisando as curvas de equilíbrio de cevada, sorgo e milho, pesquisou equações matemáticas que descrevessem o fenômeno. O mesmo objetivo marcou os trabalhos de DUNSTAN et al. (20) com sorgo e de YOUNG (60) com amendoim.

BERRY & DICKERSON (2) determinaram curvas de umidade de equilíbrio, a temperaturas de 25, 45 e 65°C, para aveia, milho, soja, ovo em pó e rações para frangos; ZURITZ et al. (62) para arroz em casca; DUGALL et al. (19) para sementes de trigo e FLOOD & WHITE (21) para milho de pipoca.

Utilizando produtos nacionais, vários pesquisadores preocuparam-se com a determinação de curvas de umidade de equilíbrio: TRAVAGLINI & TOSELLO (56) para café em côco, beneficiado e despado; JORGE (29) para soja, variedade Santa Rosa; ROA & ROSSI (45) para sementes de cacau e soja; SILVA et al. (48) para cacau; ROSSI et al. (46) para castanhas de caju e raspas de mandioca e LEITÃO (34) para pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally.

2.3. PESOS ESPECÍFICOS

Inicialmente, define-se: a) Volume Real como o volume ocupado pelo produto; b) Volume Aparente com o volume ocupado pelo produto mais o volume intersticial; c) Peso Específico Real como a relação existente entre uma certa massa de produto e o seu Volume Real; d) Peso Específico Aparente como a relação existente entre uma certa massa de produto e o Volume Aparente correspondente; e) Porosidade como a relação entre o Volume Intersticial e o Volume Aparente, expressa em %.

O conhecimento dos pesos específicos, aparente e real, e da porosidade, dos produtos agrícolas tem importância fundamental em projetos de engenharia envolvendo dimensionamento de máquinas e equipamentos para manuseio, armazenamento, secagem e aeração.

BROWNE (6) determinou o peso específico aparente para trigo, cevada e aveia, reumidificados, com a umidade variando de 10 a 30%, concluindo que o peso específico aparente diminuiu com o aumento da umidade.

THOMPSON & ISSACS (52) determinaram porosidade e peso específico aparente para trigo, soja, milho, aveia e cevada com utilização de um picnômetro de comparação a ar.

WRATTEN et al. (59) trabalhando com arroz em casca, grãos médios e longos, determinaram os pesos específicos, aparente e real, e a porosidade, com umidade variando de 12 a 18%, concluindo que os pesos específicos aumentam linearmente com a umidade, e que a porosidade diminui linearmente com a mesma.

CHUNG & CONVERSE (12) estudaram o peso específico aparente para milho e trigo com umidade variando de 9 a 27% e de 9 a 19%, respectivamente, em processos de absorção e desorção de umidade, concluindo que as diferenças devido ao efeito histerese são maiores para o milho do que para o trigo. Determinaram também o peso específico real, concluindo que o mesmo diminui com o aumento da umidade, mas, se as diminuições do peso específico real forem comparadas com as diminuições do peso específico aparente, elas são consideradas muito pequenas.

BRUSEWITZ (8) pesquisou o peso específico, aparente e real, do milho, soja, trigo, aveia, sorgo, cevada e centeio, com reumidificação dos produtos e umidade variando de 15 a 45%; con-

cluiu que o peso específico real apresenta resultados similares para todos os produtos e que diminui linearmente com o aumento da umidade. O peso específico aparente diminui com o aumento da umidade atingindo mínimos valores para trigo, milho, aveia, cevada e centeio, ao redor de 30% de umidade, e então aumenta com o acréscimo da mesma. Os dados experimentais foram ajustados a uma equação do 2º grau.

FRASER et al. (25) trabalhando com "fababeans", com umidade entre 8,5 e 34,9%, determinaram o peso específico aparente, concluindo que o mesmo diminui linearmente com o aumento da umidade.

MORITA & SINGH (37) pesquisaram o peso específico aparente de arroz em casca, grãos curtos, com umidade variando de 11,2 a 19,5%, e concluíram que o peso específico é uma função linear da umidade, aumentando com o aumento da mesma.

NELSON (38) determinou os pesos específicos, aparente e real, para trigo e milho, com umidades variando entre 3 e 24% e 10 e 35%, respectivamente, e concluiu que para o trigo os pesos específicos aumentam levemente até umidade em torno de 8% e para as umidades entre 8 e 24% eles diminuem, marcada e continuamente, com o aumento da umidade. Para o milho, entre os níveis de umidade de 10 e 30%, os pesos específicos diminuem continuamente, atingindo valores mínimos ao redor de 30-35% de umidade, aumentando então com o acréscimo da mesma.

2.4. ÂNGULO DE TALUDE

O ângulo de talude, ou ângulo de repouso natural, é aque

le formado pelo produto, ao escoar através de um fluxo constante, com o plano horizontal, de acordo com TOSELLO & JORGE (55).

De grande importância para projetos, o ângulo de talude é influenciado decisivamente pelo tamanho, forma, orientação das partículas e umidade do produto, segundo MOHSEININ (36).

TRAIN, citado por FOWLER & WYATT (23), demonstrou a existência de cinco métodos diferentes para a determinação do ângulo de talude de materiais granulares, baseados em dois princípios: ângulo de talude estático e ângulo de talude dinâmico, concluindo haver diferença no ângulo de talude dependendo do princípio utilizado para a sua determinação.

TOSELLO & JORGE (55) construíram, para fins didáticos e experimentais, um aparelho prático para determinação do ângulo de talude de grãos e de produtos pulverulentos.

KRAMER (32) estudou o ângulo de talude para arroz em casca e verificou que este é grandemente influenciado pela umidade, principalmente quando a mesma está acima de 16-17%, ou seja, para teores de umidade acima destes valores, o ângulo de talude aumenta rapidamente.

STEWART (51) determinou o ângulo de talude e o ângulo de atrito interno para três variedades de sorgo, concluindo que a variedade não interfere no ângulo de talude e que existe uma diferença significativa entre o ângulo de talude e o ângulo de atrito interno, não sendo aconselhável a substituição do ângulo de atrito interno pelo ângulo de talude em projetos de engenharia para não acarretar erros de cálculo.

FOWLER & WYATT (23) estudaram o efeito da umidade sobre o ângulo de talude de materiais granulares, trabalhando com di-

versos produtos, entre os quais o trigo, concluindo que o ângulo de talude aumenta com o aumento da umidade. Sugeriram a seguinte explicação para tal fenômeno: a variação do ângulo de talude com a umidade é devida a uma camada de água superficial, que rodeia cada partícula, e que o efeito da tensão superficial torna-se predominante para manter os sólidos agregados.

LORENZEM, citado por BROOKER et al. (5), apresentou os seguintes dados de ângulo de talude: trigo, variando de $29,6^{\circ}$ com 7,3% de umidade a $35,6^{\circ}$ com 17,1%; milho de 34° com 7,5% de umidade a $35,1^{\circ}$ com 16,2%, e cevada, variando de 29° com 7,9% de umidade a $33,8^{\circ}$ com 23,1%. FRASER et al. (25) apresentaram dados para "fababeans", comprovando a influência da umidade sobre o ângulo de talude, da mesma maneira que KRAMER (32) e FOWLER & WYATT (23).

2.5. COEFICIENTE DE ATRITO

O coeficiente de atrito é definido pela relação entre a força de atrito (força que atua no sentido de resistir ao movimento) e a força normal sobre a superfície de contato. Quando a superfície de contato é formada pelos próprios grãos, temos o chamado atrito interno, cujo coeficiente recebe também essa especificação, conforme JORGE (29).

De acordo com citação de MONSENIN (36), as leis básicas que descrevem o fenômeno de atrito foram enunciadas, primeiramente, por AMONSTONS e posteriormente verificadas por COULOMB. SHERWOOD, citado por MONSENIN (36), resumizou os conceitos mais comuns aceitos sobre atrito.

Dois coeficientes de atrito são considerados para os pro

dados biológicos: o primeiro é o coeficiente de atrito estático, determinado pela força que é capaz de vencer a oposição ao movimento entre os corpos em contato; o segundo é o coeficiente de atrito dinâmico, determinado pela força que se manifesta na superfície de contato quando há movimento relativo entre os corpos, conforme MONSENIN (36).

Vários métodos foram utilizados para determinar os coeficientes de atrito, usualmente projetados para servirem a determinadas condições particulares. Um deles é baseado no ângulo formado por um plano inclinado quando o movimento do produto em contato com esse plano inicia-se. A tangente desse ângulo é o coeficiente de atrito estático. Foi utilizado por KRAMER (32) em trabalhos com arroz.

Outro método consiste em montar a superfície em estudo numa base rígida, colocando-se sobre a mesma um recipiente com as amostras. Aplica-se uma força horizontal ao recipiente, sendo que esta força fornece a medida da força de atrito estático. Este método foi utilizado por RICHTER (44).

BRUBAKER & POS (7); BICKTER & BUELOW (3) e SNYDER et al. (50), utilizaram um método que consiste em mover, através de um motor, a superfície que está em contato com a matéria prima, sendo que um registrador de força está ligado à estrutura que contém a matéria prima. A medida das forças de atrito é feita através de extensômetros.

CLARK & MCFARLAND (14) propuseram a utilização do equipamento Instron Universal para a determinação de coeficientes de atrito, sendo que um cilindro contendo as amostras é movimentado sobre a superfície em estudo, que permanece rígida. Os gráficos

da força de atrito fornecidos pelo aparelho permitem o cálculo dos coeficientes de atrito estático e dinâmico.

TOSELLO (53) modificou este método, ainda utilizando o equipamento Instron Universal, mas com o acoplamento de um sistema mais prático de contato dos grãos com as superfícies e com os próprios grãos. JORGE (29) com soja; DALCOMO (17) com forragens picadas e LEITÃO (34) com pimenta-do-reino preta, utilizaram esta metodologia em seus trabalhos.

RICHTER (44); BICKTER & BUELOW (3) e SNYDER et al. (50), em seus trabalhos, estudaram a influência da força normal nos valores de coeficientes de atrito. Em todos eles a conclusão foi da não influência desse valor nos resultados dos coeficientes de atrito, dentro dos limites por eles estudados.

A influência da umidade nos valores dos coeficientes de atrito estático foi estudada por BRUBAKER & POS (7) trabalhando com milho, soja, trigo, aveia e cevada em contato com as superfícies de concreto, madeira, chapa galvanizada, aço, polietileno e teflon. Concluíram que os valores dos coeficientes de atrito estático aumentam com o aumento do teor de umidade, excetuando-se para o teflon onde eles diminuem. A superfície de concreto apresentou os maiores valores para o coeficiente de atrito estático. Para milho, com umidades de 7,5%; 9,9%; 12,2% e 13,9%, os respectivos valores do coeficiente de atrito encontrados foram: concreto (0,41 - 0,59 - 0,68 - 0,64); madeira (0,27 - 0,31 - 0,33 - 0,37); chapa galvanizada (0,20 - 0,24 - 0,25 - 0,37). Para soja, com umidades de 7,1%; 8,1%; 9,8% e 12,2%, os respectivos coeficientes de atrito foram: concreto (0,39 - 0,55 - 0,47 - 0,55); madeira (0,29 - 0,32 - 0,33 - 0,35); chapa galvanizada (0,21 - 0,21 - 0,18 - 0,20). Para trigo, com umidades de 11,2%; 13,0%; 15,0% e 15,7%,

os respectivos coeficientes de atrito foram: concreto (0,52 - 0,52 - 0,55 - 0,68); madeira (0,31 - 0,35 - 0,47 - 0,48); chapa galvanizada (0,10 - 0,14 - 0,27 - 0,33).

BICKTER & BUELOW (3) estudaram o atrito cinético de cevada e milho, com vários níveis de umidade, nas superfícies de aço e madeira. Concluíram que o coeficiente de atrito para milho aumenta com o aumento da umidade e para cevada diminui entre 10 e 16.5% de umidade e aumenta a partir de 21%. Ajustaram os dados experimentais a uma equação do 1º grau.

SNYDER et al. (50) pesquisaram os coeficientes de atrito cinético do trigo em várias superfícies de metal em diferentes condições de umidade relativa, umidade do grão e umidade das superfícies, concluindo que um aumento na umidade relativa e/ou um aumento da umidade do grão e da superfície, aumenta o coeficiente de atrito cinético do trigo com as superfícies de metal.

LAWTON (33) determinou o coeficiente de atrito estático entre trigo e cevada com diferentes superfícies, concluindo que o coeficiente de atrito estático, no geral, aumenta com o aumento do teor de umidade dos grãos. Dos materiais testados o concreto apresentou o maior coeficiente de atrito, sendo que os outros materiais apresentaram a seguinte ordem decrescente: polietileno, madeira, aço, vidro e teflon. Para trigo obteve os seguintes valores de coeficiente de atrito: concreto (umidade de 12,4% = 0,293; 14,6% = 0,254 e 18,4% = 0,466); madeira (umidade de 12,5% = 0,206; 14,7% = 0,190 e 18,4% = 0,415); aço (umidade de 12,4% = 0,187; 14,6% = 0,239 e 17,5% = 0,415).

TSANG-MUI-CHUNG et al. (57) propuseram uma metodologia para a determinação de coeficientes de atrito cinético de grãos e, utilizando soja e milho, determinaram os valores de atrito em

três níveis de umidade. Concluíram que o coeficiente de atrito cinético, no geral, aumenta com o acréscimo do teor de umidade dos grãos.

2.6. VELOCIDADE TERMINAL

Uma partícula em queda livre, em uma corrente de ar ascendente, está sujeita a três tipos de forças: a força gravitacional, a força devida ao empuxo do ar e a força de resistência. Essas forças atuam da seguinte maneira sobre a partícula: o peso para baixo, o empuxo para cima e a força resistente para cima, de acordo com o apresentado por PERRY & CHILTON (41).

Quando essas forças estiverem em equilíbrio ($\Sigma F = 0$), a velocidade da partícula será constante, sendo denominada de velocidade terminal.

Desse modo podemos escrever:

peso - empuxo = força resistente

Segundo MORSEENIN (36) a força resistente é dada por:

$$F_r = \frac{1}{2} C A_p \rho_f V^2 \quad \{ \text{III} \}$$

portanto:

$$m g - \rho_f g V_p = \frac{1}{2} C A_p \rho_f V_t \quad \{ \text{IV} \}$$

e a velocidade terminal fica determinada por:

$$V_t = \frac{m g (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f \rho_p C A_p}^{\frac{1}{2}} \quad \{ \text{V} \}$$

onde:

V_t = velocidade terminal, em cm/s

g = aceleração da gravidade, em cm/s^2

ρ_p = peso específico da partícula, em g/cm^3

m = massa da partícula, em g

A_p = área projetada da partícula, em cm^2

ρ_f = peso específico do fluido, em g/cm^3

C = coeficiente aerodinâmico de arraste

V_p = volume da partícula, em cm^3

Dessa maneira, pode-se calcular a velocidade terminal de uma partícula teoricamente, desde que se conheçam os parâmetros envolvidos. O coeficiente aerodinâmico de arraste C e a velocidade terminal são, ambos, funções da forma da partícula e do número de Reynolds (Re), de acordo com HAWK et al. (26).

Segundo MOHSENIN (36):

$$Re = \frac{D V \rho_f}{\mu_f} \quad \rightarrow \quad V = \frac{Re \mu_f}{D \rho_f} \quad \{ VI \}$$

e, combinando { V } e { VI }

$$C Re = \frac{2 g m Deq \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{\mu_f A_p \rho_p} \quad \{ VII \}$$

onde:

μ_f = viscosidade do fluido, em $\text{g/s}\cdot\text{cm}$

Deq = diâmetro equivalente da partícula, em cm

Assim sendo, a velocidade terminal depende do coeficiente de arraste, número de Reynolds, peso e diâmetro da partícula, e de duas propriedades do ar, viscosidade e peso específico.

De acordo com PINHEIRO et al. (42), a forma irregular dos produtos agrícolas tem constituído problema nas determinações da velocidade terminal e coeficiente de arraste, o que, na opinião de MOHSENIN (36) muitas vezes pode ser contornado, associando-se ao produto uma forma conhecida.

Dois métodos são utilizados para a determinação da velocidade terminal e do coeficiente de arraste. Um deles é baseado no tempo gasto na queda livre de uma partícula em diversas alturas. No outro, as partículas são colocadas num fluxo de ar vertical, sendo que a velocidade do ar deve ser ajustada para que as partículas fiquem suspensas com pequeno ou nenhum movimento. Neste ponto de equilíbrio, a velocidade do ar é a velocidade terminal da partícula, segundo HAWK et al. (26).

TOSELLO (54) sugeriu um equipamento para a determinação experimental da velocidade terminal e de transporte, para grãos e farinhas. Este equipamento foi utilizado por JORGE (29), com soja, variedade Santa Rosa, e por LEITÃO (34), com pimenta-do-rei no preta, variedade Kalluvally, em seus trabalhos sobre velocidade terminal.

BILANSKI et al. (4) montaram um experimento para verificar a repetibilidade de dados de velocidade terminal em grãos e sementes, apresentando valores para vários produtos, entre eles milho (1063,75 cm/s), soja (1350,26 cm/s) e trigo (899,16 cm/s).

HAWK et al. (26) determinaram a velocidade terminal e o coeficiente de arraste para milho, soja e trigo.

UHL & LAMP (58) estudaram a possibilidade de utilizar a velocidade terminal para a separação de grãos e impurezas, utilizando em seus estudos grãos de aveia, centeio, milho, soja e trigo.

PINHEIRO et al. (42) apresentaram valores de velocidade terminal e coeficiente de arraste para soja, variedade UFV-1.

SHELLARD & MACMILLAN (47) estudaram as propriedades aerodinâmicas dos materiais componentes do trigo debulhado e apresentaram valores de velocidade terminal para o grão de trigo.

Não se encontrou na literatura consultada trabalhos sobre a influência que o teor de umidade exerce sobre a velocidade terminal, mas acredita-se que sua influência seja significativa, pois, uma vez que o conteúdo de água dos grãos afeta suas características físicas, tais como, dimensões, massa e peso específico (37), que são importantes no cálculo da velocidade terminal, esta deve sofrer variações com o teor de umidade.

Não se encontrou na literatura consultada trabalhos sobre a influência que o teor de umidade exerce sobre a velocidade terminal, mas acredita-se que sua influência seja significativa, pois, de acordo com MORITA & SINGH (37), uma vez que o conteúdo de água dos grãos afeta suas características físicas, tais como, dimensões, massa e peso específico, que são importantes no cálculo da velocidade terminal, esta deve sofrer variações com o teor de umidade.

3. DETERMINAÇÕES INICIAIS E PREPARO DAS MATÉRIAS PRIMAS

3.1. MATÉRIAS PRIMAS

Os produtos: amendoim, arroz em casca, feijão, milho e trigo, utilizados nos experimentos foram obtidos, por doação, junto ao Instituto Agronômico de Campinas através da sua Seção de Sementes. A soja foi obtida junto ao Instituto Agronômico do Paraná.

Todos os produtos pertencem à safra 83/84 e os dados com relação a variedade e procedência dos mesmos são os seguintes:

<u>PRODUTO</u>	<u>VARIEDADE</u>	<u>PROCEDÊNCIA</u>
Amendoim	Tatú	Est. Exp. de Mococa
Arroz em casca	IAC-47	Est. Exp. de Mococa
Feijão	Aysó	Est. Exp. de Ribeirão Preto
Milho	Maya XX	Est. Exp. de Pindorama
Soja	Paraná	Instituto Agronômico do Paraná
Trigo	IAC-25	Est. Exp. de Tatuí

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. MATERIAL

Foi utilizado um paquímetro Mitutoyo, com precisão de

milímetro, para medir os grãos de arroz.

Usou-se uma balança semi analítica STANTON D42T com precisão de 0,01 g, para pesagem dos produtos.

Para as determinações de umidade foram utilizadas uma estufa FANEM LTDA, modelo 315/4 e uma balança analítica de precisão com quatro casas decimais e capacidade igual a 200 g, marca Sartorius.

3.2.2. MÉTODOS

3.2.2.1. UMIDADE

A umidade dos produtos foi determinada em estufa a 105°C/24h, conforme as recomendações oficiais do Ministério da Agricultura, de acordo com o apresentado por PUZZI (43).

3.2.2.2. CLASSIFICAÇÃO POR TAMANHO

Para feijão e soja foi utilizado um conjunto de peneiras vibratórias, de furos circulares, seguindo a seguinte metodologia: 300 g de produto foram colocadas no equipamento, com amplitude de oscilação de 1,5 cm e 360 rpm, aproximadamente, e sujeitas a vibração por três minutos; após esse tempo, as quantidades retidas em cada peneira foram pesadas e calculada a peneira média, baseada na seguinte fórmula, apresentada por JORGE (29):

$$P_m = \frac{\sum_{i=a}^{i=b} i \cdot P_i}{\sum_{i=a}^{i=b} P_i} \quad \{ VIII \}$$

onde:

P_m = peneira média

P_i = peso do produto retido na peneira i , em g

i = número da peneira

a = número da peneira menor

b = número da peneira maior

Para amendoim e milho foram utilizadas peneiras de furos circulares e para trigo, peneiras de furos oblongos, seguindo, em ambos os casos, a seguinte metodologia: 300 g de produto foram colocadas sobre o conjunto de peneiras e estas eram agitadas manualmente com movimentos uniformes durante um minuto. Após esse tempo, as quantidades retidas em cada peneira foram pesadas e calculada a peneira média com base na fórmula explicitada anteriormente.

Esta metodologia foi adotada após diversos testes efetuados com amendoim, milho e trigo, considerando-se a quantidade de produto e o tempo necessário para uma distribuição uniforme nas peneiras.

Para arroz em casca o tamanho foi determinado com base na medição de suas três dimensões características: comprimento, largura e espessura. Cincoenta grãos foram escolhidos ao aca-

so do lote recebido e as dimensões foram medidas. A média das cinquenta medidas forneceu as dimensões características desejadas.

3.2.2.3. CLASSIFICAÇÃO COMERCIAL

A classificação comercial dos produtos foi realizada baseando-se em Portarias do Ministério da Agricultura e nas Resoluções para classificação de produtos agrícolas aprovadas pelo Conselho Nacional do Comércio Exterior (CONCEX) (16), de acordo com o apresentado abaixo:

- Amendoim - Portaria nº 329 de 30.12.81 do M.A.
- Arroz em casca - Portarias nº 205 de 26.08.81 e nº 255 de 09.11.81 do M.A.
- Feijão - Portarias nº 206 de 27.08.81 e nº 218 de 03.08.82 do M.A.
- Milho - Resolução nº 78 de 29.02.72 do CONCEX
- Soja - Resolução nº 82 de 05.06.73 do CONCEX

A classificação comercial do trigo foi realizada baseando-se no Decreto nº 8.164 de 05.11.41.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. UMIDADE

Os resultados para a umidade inicial dos produtos en-

contram-se no Quadro 02.

3.3.2. CLASSIFICAÇÃO POR TAMANHO

Os resultados para a classificação por tamanho dos produtos encontram-se nos Quadros 03 a 08.

3.3.3. CLASSIFICAÇÃO COMERCIAL

Os resultados sobre a classificação comercial dos produtos encontram-se nos Quadros 09 a 14.

O Quadro 15 apresenta uma síntese dos Quadros 02 a 14, com os resultados de umidade inicial, classificação por tamanho e classificação comercial.

Quadro 02. Umidade inicial dos produtos utilizados na pesquisa, em %, base úmida.

Produto	Amendoim	Arroz em casca	Feijão	Milho	Soja	Trigo
1	5,49	10,34	10,50	11,63	10,90	12,92
2	5,39	10,53	10,07	11,63	11,13	13,11
3	5,43	10,32	10,00	11,65	10,64	13,12
4	5,77	10,55	10,40	12,17	11,11	13,02
5	5,44	10,64	10,36	11,83	11,07	13,21
Média	5,50	10,48	10,27	11,78	10,97	13,08
DP	0,15	0,14	0,22	0,23	0,21	0,11
CV(%)	2,73	1,34	2,14	1,95	1,91	0,84

Quadro 03. Classificação por tamanho do amendoim.

Peneira	Amostras					Peneira Média
	1 peso (g)	2 peso (g)	3 peso (g)	4 peso (g)	5 peso (g)	
27 (27/64")	7,14	9,66	11,61	8,87	9,51	
26	15,48	16,10	19,43	24,65	22,79	
25	18,21	23,88	19,92	22,26	17,66	
24	45,60	49,84	44,50	47,41	46,16	
23	51,27	45,24	43,76	41,79	45,56	
22	61,84	53,65	56,35	52,65	49,30	
21	37,11	42,22	47,01	44,22	42,08	
20	29,45	27,12	27,05	28,41	29,80	
19	17,69	17,57	14,93	16,21	19,52	
18	9,40	9,21	7,20	5,69	9,25	
17	2,97	4,38	4,17	4,43	4,43	
16	1,83	1,13	1,37	1,93	1,50	
15	1,68	0,90	1,68	2,17	1,79	
Peneira Média	22/64	22/64	22/64	22/64	22/64	22/64

Quadro 04. Classificação por tamanho do arroz em casca.

nº amostra	d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)	nº amostra	d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)
1	0,984	0,292	0,226	26	0,954	0,320	0,220
2	0,936	0,304	0,216	27	0,924	0,310	0,216
3	0,796	0,294	0,216	28	0,834	0,272	0,202
4	0,880	0,312	0,212	29	0,974	0,324	0,224
5	0,902	0,296	0,218	30	0,930	0,330	0,226
6	0,782	0,286	0,206	31	0,936	0,324	0,214
7	1,008	0,314	0,220	32	0,960	0,300	0,200
8	0,876	0,300	0,218	33	0,946	0,310	0,222
9	0,886	0,298	0,220	34	0,854	0,266	0,186
10	0,920	0,288	0,230	35	0,900	0,270	0,208
11	0,908	0,304	0,216	36	1,044	0,296	0,214
12	0,910	0,324	0,210	37	0,922	0,296	0,218
13	0,910	0,248	0,200	38	0,896	0,324	0,220
14	0,948	0,320	0,224	39	0,950	0,320	0,226
15	0,936	0,310	0,220	40	0,972	0,294	0,226
16	0,926	0,312	0,218	41	0,872	0,308	0,216
17	0,916	0,318	0,220	42	0,982	0,312	0,216
18	1,058	0,338	0,228	43	0,934	0,328	0,214
19	0,968	0,324	0,214	44	0,950	0,318	0,220
20	0,868	0,314	0,226	45	0,954	0,282	0,216
21	1,004	0,324	0,232	46	0,894	0,276	0,222
22	0,924	0,322	0,216	47	0,900	0,298	0,218
23	0,968	0,304	0,228	48	0,886	0,296	0,220
24	0,960	0,324	0,218	49	0,998	0,300	0,228
25	0,892	0,306	0,222	50	0,834	0,274	0,206
			d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)		
			Média:	0,925	0,304	0,217	
			Desvio Padrão:	0,055	0,019	0,008	
			Coef. Variação:	5,95%	6,25%	3,69%	

Obs: d1 = comprimento; d2 = largura e d3 = espessura.

Quadro 05. Classificação por tamanho do feijão.

Peneira	Amostras					Peneira Média
	1 peso (g)	2 peso (g)	3 peso (g)	4 peso (g)	5 peso (g)	
19 (19/64")	1,64	3,47	1,49	2,06	2,69	
18	23,06	20,05	22,23	14,95	18,86	
17	83,96	85,30	91,68	76,73	80,60	
16	113,38	108,50	105,00	111,04	115,94	
15	66,26	69,15	65,45	82,56	68,34	
14	10,50	13,33	13,56	13,32	12,86	
13	1,07	0,65	1,02	0,96	0,84	
Peneira Média	16/64	16/64	16/64	16/64	16/64	16/64

Quadro 06. Classificação por tamanho do milho.

Peneira	Amostras					Peneira Média
	1 peso (g)	2 peso (g)	3 peso (g)	4 peso (g)	5 peso (g)	
29 (29/64")	4,44	6,84	8,28	6,30	10,19	
27	69,68	66,54	68,66	68,39	62,62	
26	180,69	186,95	176,96	173,44	161,52	
25	34,26	31,85	37,46	40,87	49,76	
24	5,00	4,31	5,40	5,98	8,00	
23	1,77	0,97	1,00	1,84	4,01	
22	2,64	1,95	1,01	3,03	3,47	
Peneira Média	26/64	26/64	26/64	26/64	26/64	26/64

Obs.: não existia a peneira nº 28 na Seção de Sementes do IAC na ocasião do experimento.

Quadro 07. Classificação por tamanho da soja.

Peneira	Amostras					Peneira Média
	1 peso (g)	2 peso (g)	3 peso (g)	4 peso (g)	5 peso (g)	
19 (19/64")	-	-	0,45	-	0,17	
18	1,84	2,43	1,50	1,36	2,54	
17	38,10	38,00	38,40	39,29	37,11	
16	119,87	114,30	111,95	106,00	110,73	
15	98,01	93,00	92,71	93,80	96,01	
14	34,88	41,53	41,70	46,18	42,38	
13	6,62	9,00	10,63	9,47	8,35	
12	0,98	1,17	1,31	1,05	1,32	
11	0,49	0,31	0,10	0,10	0,15	
Peneira Média	15/64	15/64	15/64	15/64	15/64	15/64

Quadro 08. Classificação por tamanho do trigo.

Peneira	Amostras					Peneira Média
	1 peso (g)	2 peso (g)	3 peso (g)	4 peso (g)	5 peso (g)	
8 (8/64")	1,07	1,76	2,00	2,00	2,02	
7	177,86	180,69	179,91	178,33	174,33	
6	77,41	77,50	76,70	77,80	78,85	
1/15"	43,12	40,55	41,92	41,65	44,93	
Peneira Média	6/64	6/64	6/64	6/64	6/64	6/64

Obs.: para o cálculo da Peneira Média, a peneira 1/15" foi considerada como 4,267/64".

Quadro 09. Classificação comercial do amendoim.

	1 (%)	2 (%)	3 (%)	Média (%)
0				
descascado	100,00	100,00	100,00	100,00
GRUPO				
comum ou bica corrida	100,00	100,00	100,00	100,00
CLASSE				
miúdo	255	244	246	248
CLASSE				
vermelha	100,00	100,00	100,00	100,00
Observações				
mofo, mofados e rancifi-				
cados	14,89	14,52	13,16	14,19
contaminados	0,92	0,65	0,52	0,70
quebrados, chochos, imaturos	3,00	2,12	1,71	2,28
quebrados, quebrados, despe-				
chados	11,15	11,47	12,62	11,74
impurezas e/ou materias es-				
tranhas	-	-	-	-
Umidade				5,50

OBSERVAÇÕES

O cálculo da umidade encontra-se no Quadro 02.

A amostra de manipulação foi de 250,00 g.

Os valores apresentados no item CLASSE são dados em números de amendoim por 100 g de produto.

USO

0 descascado

GRUPO comum ou bica corrida

CLASSE miúdo

CLASSE vermelha

0 abaixo do padrão

Quadro 10. Classificação comercial do arroz em casca.

	1 (%)	2 (%)	3 (%)	Média (%)
GRUPO				
arroz em casca	100,00	100,00	100,00	100,00
SUB-GRUPO				
natural	100,00	100,00	100,00	100,00
CLASSE				
longo	90,00	100,00	95,00	95,00
médio	10,00	-	5,00	5,00
TIPO				
ardidos	1,07	0,88	0,68	0,88
danificados, manchados, pi- cados	4,47	4,41	4,05	4,31
amarelos	-	-	-	-
gessados	-	-	-	-
rajados	-	-	-	-
impurezas e/ou matérias es- tranhas	0,56	0,57	0,44	0,52
teor de umidade				10,48
RENDA				
grãos limpos	80,62	80,34	79,98	80,31
cascas, impurezas e matérias estranhas	19,38	19,66	20,02	19,69
RENDIMENTO				
grãos inteiros	90,50	87,30	86,40	88,07
grãos quebrados	9,50	12,70	13,60	11,93

OBSERVAÇÕES

1. o cálculo da umidade encontra-se no Quadro 02.
2. a determinação da CLASSE foi realizada através da medida do tamanho de 20 grãos, escolhidos ao acaso, após beneficiamen-
to
3. a amostra de manipulação foi de 100,00 g.

CONCLUSÃO

GRUPO arroz em casca CLASSE longo
SUB-GRUPO natural TIPO 4

Quadro 11. Classificação comercial do feijão.

	1 (%)	2 (%)	3 (%)	Média (%)
GRUPO				
grupo I	100,00	100,00	100,00	100,00
CLASSE				
rajado	100,00	99,77	100,00	99,92
TIPO				
grãos avariados	16,38	14,86	15,78	15,68
grãos carunchados e/ou danificados por insetos	0,06	-	0,24	0,10
impurezas e/ou matérias estranhas	-	-	-	-
teor de umidade				10,27

OBSERVAÇÕES

1. o cálculo da umidade encontra-se no Quadro 02.
2. foram considerados grãos partidos os grãos que apresentaram qualquer tipo de rachadura na casca, desde as mais leves até as rachaduras bem caracterizadas.
3. a amostra de manipulação foi de 250,00 g.

CONCLUSÃO

GRUPO grupo I

CLASSE rajado

TIPO abaixo do padrão

Quadro 12. Classificação comercial do milho.

	1 (%)	2 (%)	3 (%)	Média (%)
GRUPO				
duro	0,76	0,93	0,81	0,83
mole	89,01	88,12	91,15	89,43
semi-duro	10,23	10,95	8,02	9,74
CLASSE				
amarelo	100,00	100,00	100,00	100,00
TIPO				
fragmentos, impurezas, matê				
rias estranhas	0,10	-	-	0,03
partidos e quebrados	2,30	2,38	2,89	2,52
ardidos e brotados	1,33	3,42	3,02	2,59
avariados e/ou carunchados	14,35	13,98	15,58	14,64
teor de umidade				11,78

OBSERVAÇÕES

1. o cálculo da umidade encontra-se no Quadro 02.

2. a amostra de manipulação foi de 250,00 g.

CONCLUSÃO

GRUPO misturado. Apresentou as seguintes percentagens:
duro = 0,83%; mole = 89,43% e semi-duro = 9,74%.

CLASSE amarela

TIPO amostra

Quadro 13. Classificação comercial da soja.

	1 (%)	2 (%)	3 (%)	Média (%)
GRUPO				
graúda	48,09	46,77	49,43	48,10
média	47,76	49,63	46,94	48,11
miúda	4,16	3,60	3,36	3,79
CLASSE				
amarela	99,72	99,74	99,48	99,65
verde	0,28	0,26	0,52	0,35
TIPO				
grãos quebrados	2,01	2,54	2,37	2,31
grãos avariados	0,80	0,87	1,65	1,11
impurezas e/ou matérias estranhas	0,17	0,04	0,06	0,09
grãos com rachaduras	1,76	2,14	2,64	2,18
grãos pretos e marrons	-	-	-	-
teor de umidade				10,97

OBSERVAÇÕES

1. o cálculo da umidade encontra-se no Quadro 02.
2. a amostra de manipulação foi de 250,00 g.

CONCLUSÃO

GRUPO misturada

CLASSE amarela

TIPO 1

Quadro 14. Classificação comercial do trigo.

	1 (%)	2 (%)	3 (%)	Média (%)
CLASSE				
IAC - 25	100,00	100,00	100,00	100,00
TIPO				
impurezas	0,63	0,96	0,73	0,79
partidos	0,30	0,17	0,26	0,24
carunchados	-	-	-	-
defeituosos	0,80	1,02	1,18	1,00
teor de umidade				13,08

OBSERVAÇÕES

1. o cálculo da umidade encontra-se no Quadro 02.
2. pelo Quadro 08 verifica-se que a distribuição do trigo nas peneiras é a seguinte: 8/64" = 0,59%; 7/64" = 59,39%; 6/64" = 25,88% e 1/15" = 14,14%, permitindo concluir que o trigo em questão não é uniforme quanto ao tamanho, o que o leva a ser classificado como Tipo 3.
3. a amostra de manipulação foi de 100,00 g.

CONCLUSÃO

CLASSE IAC - 25

TIPO 3

Quadro 15. Umidade inicial, classificação por tamanho e classificação comercial dos produtos utilizados na pesquisa.

Produto	Umidade (%,b.u.)	Classificação por tamanho (Peneira Média)	Classificação Comercial		
			Grupo	Classe	Tipo
Amendoim	5,50	22/64"	descascado (*)	miúdo (**)	abaixo do padrão
Arroz em casca	10,48	(***)	arroz em casca (****)	misturada	4
Feijão	10,27	16/64"	grupo I	rajado	abaixo do padrão
Milho	11,78	26/64"	misturado	amarelo	amostra
Soja	10,97	15/64"	misturada	amarela	1
Trigo	13,08	6/64"	-	IAC - 25	3

(*) Sub-grupo: comum ou bica corrida

(**) Sub-classe: vermelha

(***) feita pela medida das dimensões características do arroz em casca, em cm:
comprimento = 0,925; largura = 0,304 e espessura = 0,217.

(****) Sub-grupo: natural.

3.4. PREPARO DAS MATÉRIAS PRIMAS

Para a determinação das diversas propriedades foi necessário, primeiramente, acondicionar cada produto nos níveis de umidade, aproximados, de 10%, 15%, 20% e 25%, tendo como base a umidade inicial de cada um, de acordo com o Quadro 02. Este procedimento foi realizado através de processos de secagem ou umidificação, dependendo de cada caso.

O amendoim sofreu umidificação para todos os níveis de umidade desejados. Arroz em casca e feijão não sofreram modificações ao nível de 10% e foram umidificados para os outros níveis de umidade. Os produtos milho, soja e trigo sofreram secagem para o nível de 10% e foram umidificados para os níveis restantes.

3.4.1. SECAGEM

Foi realizada em um secador de coluna com temperatura do ar de entrada de $42,0 \pm 1,0$ °C, ar este aquecido por uma resistência elétrica acoplada na entrada do secador.

Inicialmente calculou-se a massa seca de cada lote a sofrer secagem. Sabendo a umidade final desejada determinou-se a quantidade de água a se retirada, e através do controle de peso, de cada lote no secador, interrompeu-se a secagem quando a umidade final, aproximada, foi atingida.

3.4.2. UMIDIFICAÇÃO

Foi realizada através de processo de aspersão de água diretamente sobre os produtos, utilizando um pulverizador manual.

Inicialmente calculou-se a massa seca para cada lote a ser umidificado. Sabendo a umidade final desejada determinou-se a quantidade de água a ser adicionada em cada lote e assim a umidificação pode ser realizada.

Após a secagem ou umidificação os produtos foram acondicionados em sacos plásticos, impermeáveis e guardados em geladeiras, com temperatura controlada de $4,0 \pm 1,0$ °C por um período aproximado de 10 dias para que ocorresse a uniformização da umidade no lote de grãos. Após esse período as propriedades foram determinadas. No dia anterior à realização dos experimentos os sacos plásticos eram retirados das geladeiras e deixados no laboratório onde as propriedades seriam determinadas, de modo que a temperatura dos grãos ficasse em equilíbrio com a temperatura ambiente.

No dia da realização de cada experimento o nível de umidade de cada produto foi determinado, em estufa a 105°C/24h, de acordo com o apresentado por PUZZI (43), e os resultados encontram-se nos respectivos Quadros de cada propriedade pesquisada.

4. UMIDADE DE EQUILÍBRIO

4.1. MATERIAL E MÉTODOS

4.1.1. MATERIAL

A umidade de equilíbrio foi estudada em ambiente de umidade relativa controlada por ácido sulfúrico. O ambiente era constituído por dessecadores de vidro, da Pyrobras, com 21 cm de diâmetro e o produto acondicionado em cadinhos de alumínio. O ácido sulfúrico utilizado foi da "Carlo Erba", tendo densidade igual a 1,84 g/ml.

Para a pesagem dos cadinhos foi utilizada uma balança analítica de precisão com quatro casas decimais e capacidade igual a 200 g, marca Sartorius. Para determinação de umidade foi utilizada uma estufa FANEM LTDA.

4.1.2. MÉTODOS

Em cada dessecador foi estabelecido um ambiente com umidade relativa controlada, variando de 10% a 90%, com intervalos de 10%. Foi utilizado ácido sulfúrico para a obtenção dessas umidades relativas, de acordo com os dados fornecidos por FRANCO (24). Os dessecadores permaneceram à temperatura ambiente que foi registrada por um termohigrógrafo.

Todos os produtos pesquisados tiveram a umidade de e-

quilíbrio obtida por dois processos: adsorção e desorção.

Para o processo de adsorção cada produto sofreu uma secagem, a baixa temperatura, visando deixá-lo com teor de umidade inicial bem baixo. Os produtos com teor de umidade inicial alto foram obtidos por processo de umidificação. Em ambos os casos, secagem e umidificação, a metodologia utilizada está descrita no tópico 3.4.

No interior dos dessecadores foram colocados seis cadinhos com aproximadamente 2,0000 g cada um, sendo três para o processo de adsorção e três para o processo de desorção, para cada produto estudado.

Controlou-se a perda ou o ganho de peso, através de pesagens regulares, até que o equilíbrio foi atingido (peso constante), sendo então determinada a umidade em estufa a 105°C/24h(43).

Com esses dados foi construída a curva de umidade de equilíbrio, em função da umidade relativa do ambiente e estabelecida uma equação matemática para descrever o fenômeno, utilizando-se o modelo estabelecido por JORGE (29).

4.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos Quadros 16 a 21 são apresentados os resultados de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para os processos de adsorção e desorção dos produtos: amendoim, arroz em casca, feijão, milho, soja e trigo. As Figuras 01 a 06 mostram as curvas obtidas por estes dois processos.

Quadro 16. Dados experimentais de unidade de equilíbrio em função da unidade relativa, para amendoim, através dos processos de adsorção e desorção.

U. R. (%)	Meq (%)	Meq (%)	$\overline{\text{Meq}}$ (%)
	1,77	33,48	
10	1,64	2,12	1,88
20	2,82	3,83	3,33
30	3,26	4,07	3,67
40	3,79	4,52	4,16
50	4,82	5,11	4,97
60	5,97	6,45	6,21
70	7,16	7,08	7,12
80	9,99	9,95	9,97
90	14,22	14,41	14,32 +

+ ocorreu desenvolvimento de fungos durante o experimento
 - temperatura média = $22,1 \pm 4,9$ °C
 - todas as umidades em base seca

Quadro 17. Dados experimentais de unidade de equilíbrio em função da unidade relativa, para arroz em casca, através dos processos de adsorção e desorção.

U. R. (%)	Meq (%)	Meq (%)	$\overline{\text{Meq}}$ (%)
	8,13	27,12	
10	3,28	2,82	3,05
20	5,88	5,47	5,68
30	7,28	6,97	7,13
40	8,03	8,27	8,15
50	9,27	9,71	9,49
60	11,20	11,76	11,48
70	12,92	13,46	13,19
80	15,38	16,10	15,74
90	18,58	19,90	19,24 +

+ ocorreu desenvolvimento de fungos durante o experimento
 - temperatura média = $26,8 \pm 4,3$ °C
 - todas as umidades em base seca

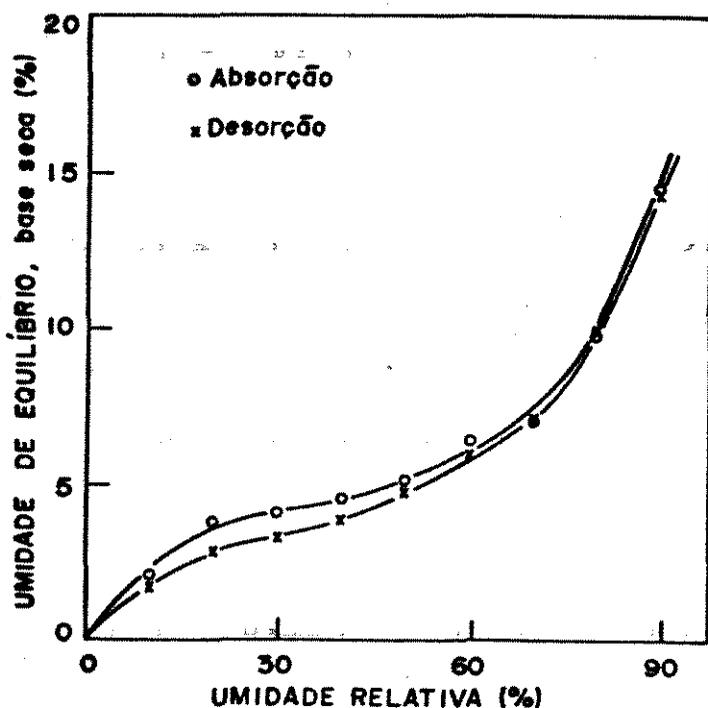


Figura 01. Unidade de equilíbrio do amendoim, em função da unidade relativa do ambiente.

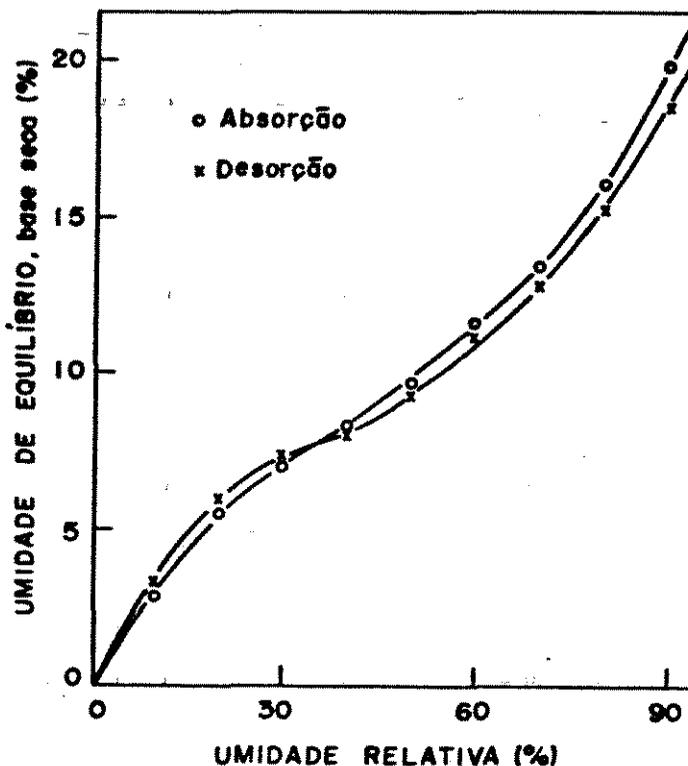


Figura 02. Unidade de equilíbrio do arroz em casca, em função da unidade relativa do ambiente.

Quadro 18. Dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para feijão, através dos processos de adsorção e desorção.

U. R. (%)	Meq (%)	Meq (%)	Meq (%)
	<u>6,26</u>	<u>37,93</u>	
10	3,81	3,91	3,86
20	5,96	6,56	6,26
30	7,01	7,84	7,43
40	7,56	8,58	8,07
50	9,06	10,64	9,85
60	12,01	13,25	12,63
70	13,54	15,76	14,65
80	17,76	19,12	18,44
90	23,85	29,85	26,85 +

+ ocorreu desenvolvimento de fungos durante o experimento
 - temperatura média = $23,1 \pm 5,3$ °C
 - todas as umidades em base seca

Quadro 19. Dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para milho, através dos processos de adsorção e desorção.

U. R. (%)	Meq (%)	Meq (%)	Meq (%)
	<u>3,77</u>	<u>33,80</u>	
10	3,15	3,66	3,41
20	5,24	5,97	5,61
30	6,30	7,59	6,95
40	7,40	8,80	8,10
50	9,40	10,40	9,90
60	11,36	12,20	11,78
70	12,97	13,52	13,25
80	15,56	16,03	15,80
90	20,86	20,80	20,83 +

+ ocorreu desenvolvimento de fungos durante o experimento
 - temperatura média = $22,1 \pm 4,9$ °C
 - todas as umidades em base seca

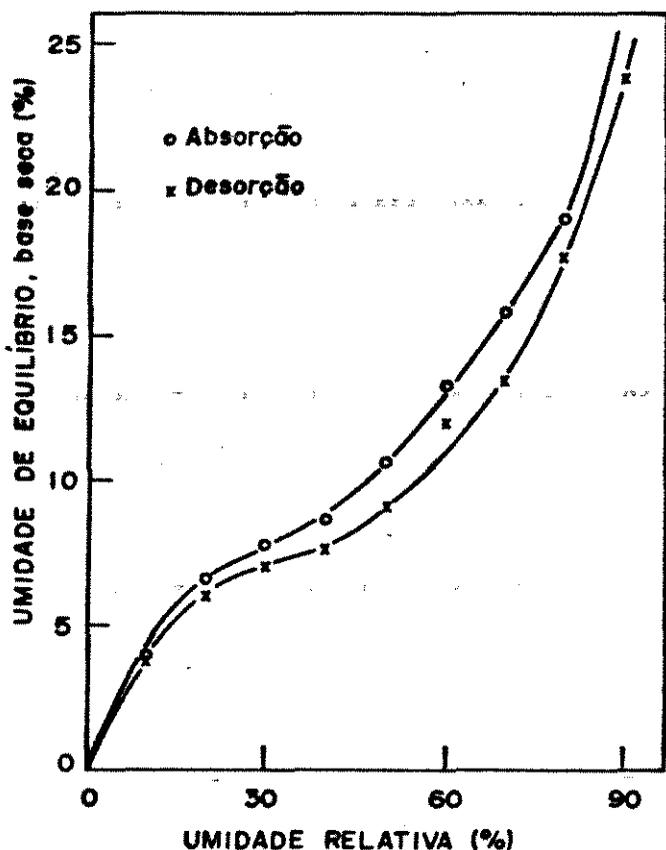


Figura 03. Umidade de equilíbrio do feijão, em função da umidade relativa do ambiente.

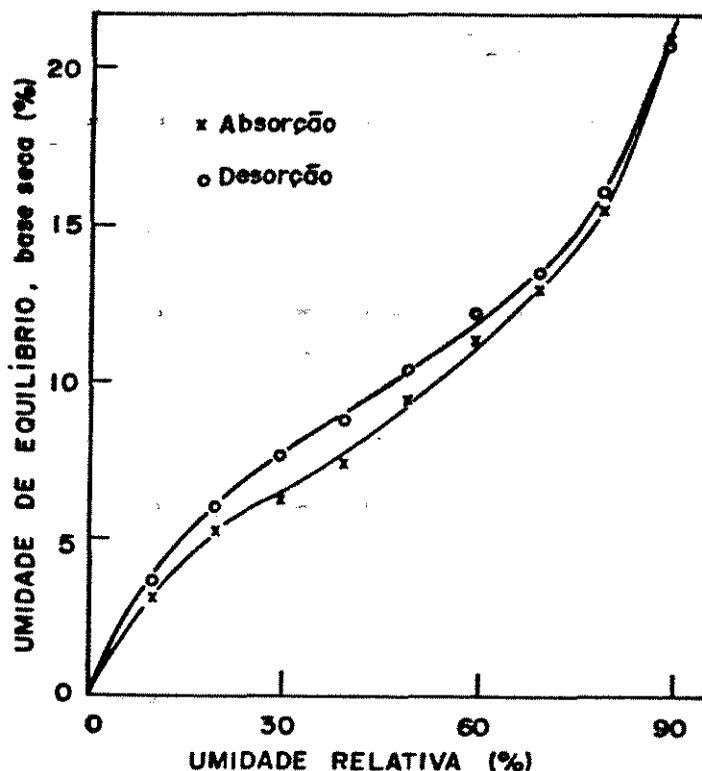


Figura 04. Umidade de equilíbrio do milho, em função da umidade relativa do ambiente.

Quadro 20. Dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para soja, através dos processos de adsorção e desorção.

U. R. (%)	Meq (%)	Meq (%)	Meq (%)
	<u>6,88</u>	<u>33,65</u>	
10	3,40	3,22	3,31
20	4,78	4,94	4,86
30	6,02	5,88	5,95
40	6,24	6,64	6,44
50	7,39	7,49	7,44
60	9,60	10,11	9,86
70	12,41	12,07	12,24
80	16,91	16,53	16,72
90	25,13	25,25	25,19 +

+ ocorreu desenvolvimento de fungos durante o experimento
 - temperatura média = $26,3 \pm 4,2$ °C
 - todas as umidades em base seca

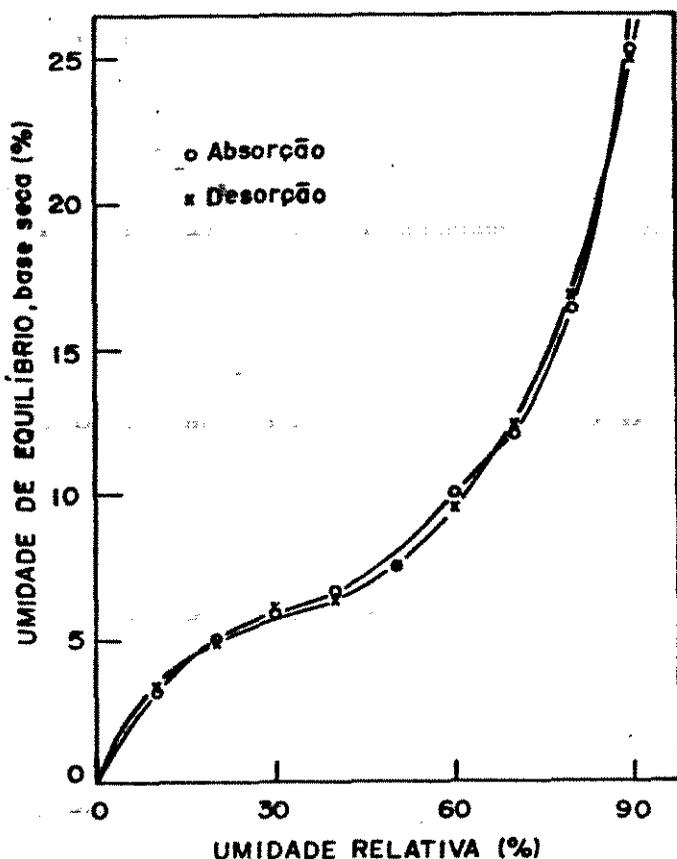


Figura 05. Umidade de equilíbrio da soja, em função da umidade relativa do ambiente.

Quadro 21. Dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para trigo, através dos processos de adsorção e desorção.

U. R. (%)	Meq (%)	Meq (%)	Meq (%)
	<u>5,79</u>	<u>36,05</u>	
10	4,17	4,23	4,20
20	6,24	7,01	6,63
30	7,03	8,23	7,63
40	7,96	9,71	8,84
50	9,64	11,50	10,57
60	12,22	13,97	13,10
70	14,50	15,64	15,07
80	16,92	18,06	17,49
90	21,88	22,58	22,23 +

+ ocorreu desenvolvimento de fungos durante o experimento
 - temperatura média = $23,1 \pm 5,3$ °C
 - todas as umidades em base seca

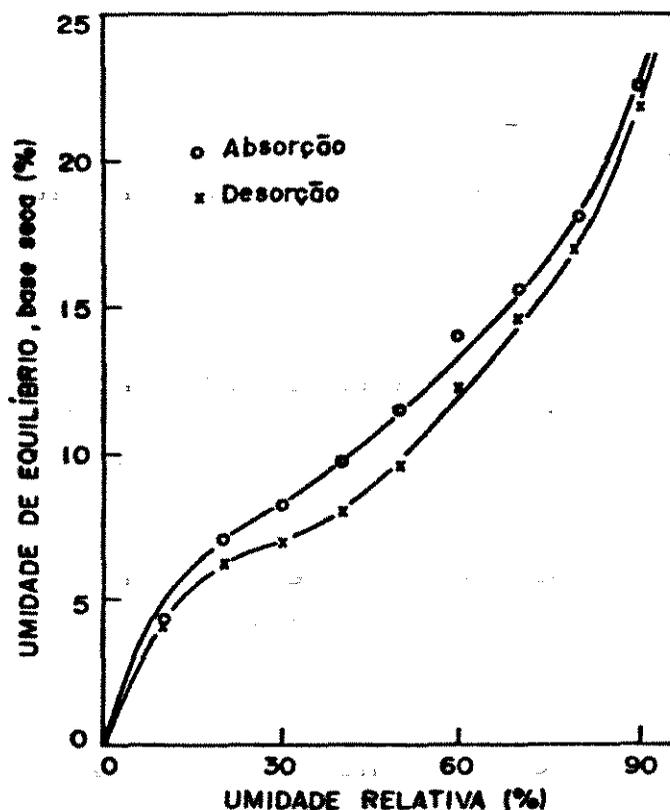


Figura 06. Umidade de equilíbrio do trigo, em função da umidade relativa do ambiente.

Para descrever os dados da umidade de equilíbrio média apresentados, foi utilizado o seguinte modelo estabelecido por JORGE (29):

$$\text{Meq} = a_1 \phi + a_2 \phi^2 + a_3 \phi^3 \quad , \quad \text{onde:}$$

Meq = umidade de equilíbrio, em %, base seca

ϕ = umidade relativa, em decimal

a_1, a_2, a_3 = constantes a determinar

O método dos mínimos quadrados foi utilizado para determinar a equação:

$$SS = \sum (\text{Meq} - a_1 \phi - a_2 \phi^2 - a_3 \phi^3)^2$$

$$\frac{\delta SS}{\delta a_1} = 0 = \sum (\text{Meq} - a_1 \phi - a_2 \phi^2 - a_3 \phi^3) \phi$$

$$\frac{\delta SS}{\delta a_2} = 0 = \sum (\text{Meq} - a_1 \phi - a_2 \phi^2 - a_3 \phi^3) \phi^2$$

$$\frac{\delta SS}{\delta a_3} = 0 = \sum (\text{Meq} - a_1 \phi - a_2 \phi^2 - a_3 \phi^3) \phi^3$$

ou ainda:

$$\sum \text{Meq} \phi - a_1 \phi^2 - a_2 \phi^3 - a_3 \phi^4 = 0$$

$$\sum \text{Meq} \phi^2 - a_1 \phi^3 - a_2 \phi^4 - a_3 \phi^5 = 0$$

$$\sum \text{Meq} \phi^3 - a_1 \phi^4 - a_2 \phi^5 - a_3 \phi^6 = 0$$

Realizando os cálculos para eliminar os somatórios, chegamos ao seguinte sistema:

$$2,85 a_1 + 2,205 a_2 + 1,533 a_3 = \Sigma \text{Meq } \phi$$

$$2,205 a_1 + 1,533 a_2 + 1,208 a_3 = \Sigma \text{Meq } \phi^2$$

$$1,533 a_1 + 1,208 a_2 + 0,978 a_3 = \Sigma \text{Meq } \phi^3$$

Um sistema de três equações com três incógnitas que é facilmente resolvido. O Quadro 22 mostra as constantes obtidas para os seis produtos utilizados em nosso experimento, bem como os respectivos coeficientes de correlação e o nível de significância.

Quadro 22. Constantes da equação do 3º grau:

$$\text{Meq} = a_1 \phi + a_2 \phi^2 + a_3 \phi^3$$

Produto	a_1	a_2	a_3	r	$t_{1/}$
Amendoim	28,21	- 67,03	59,38	0,988	16,92 *
Arroz em casca	38,37	- 64,06	49,93	0,991	19,59 *
Feijão	50,71	- 111,59	97,98	0,992	20,79 *
Milho	42,20	- 76,97	62,01	0,988	16,92 *
Soja	45,32	- 113,25	104,42	0,995	26,36 *
Trigo	45,68	- 79,94	63,24	1,000	∞ *

* significativo ao nível de 0,5%

1/ teste de Student para análise da regressão com 7 graus de liberdade

Utilizando os mesmos dados e a equação proposta por HENDERSON (27), podemos obter os valores das constantes k e n, através de uma regressão linear.

$$\text{A equação } 1 - \phi = e^{-kT\text{Meq}^n}, \text{ onde:}$$

Meq = umidade de equilíbrio, em %, base seca

ϕ = umidade relativa, em decimal

T = temperatura, em graus Rankine

k e n = constantes a determinar

Transformando a equação em $-\ln(1 - \phi) = kT\text{Meq}^n$, ou ainda: $\ln(-\ln(1 - \phi)) = \ln kT + n \ln \text{Meq}$, que é a equação de uma reta em papel mono-log. No Quadro 23 encontram-se as constantes obtidas, com os respectivos coeficientes de correlação e nível de significância.

Quadro 23. Constantes da equação de Henderson:

$$1 - \phi = e^{-kT\text{Meq}^n}$$

Produto	n	k	T (°C)	r	t _{2/}
Amendoim	1,58	$8,40 \times 10^{-5}$	22,1	0,980	13,03 *
Arroz em casca	1,74	$2,43 \times 10^{-5}$	26,8	0,995	26,36 *
Feijão	1,64	$2,50 \times 10^{-5}$	23,1	0,986	15,64 *
Milho	1,77	$2,23 \times 10^{-5}$	22,1	0,998	41,77 *
Soja	1,51	$4,50 \times 10^{-5}$	26,3	0,970	10,56 *
Trigo	1,88	$1,40 \times 10^{-5}$	23,1	0,996	29,49 *

* significativo ao nível de 0,5%

2/ teste de Student para análise da regressão com 7 graus de liberdade

Nas Figuras 07 a 12 são apresentadas as curvas obtidas com a utilização da equação do 3º grau e da equação de Henderson, descritas nos Quadros 22 e 23, com as respectivas umidades de equilíbrio médias, para todos os produtos pesquisados.

Analisando os Quadros 22 e 23 conclui-se que todas as equações obtidas podem ser utilizadas para descrever a variação da umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, pois apresentaram ótimas correlações para o ajuste dos dados experimentais, sendo que o menor coeficiente de correlação encontrado foi de 0,970, para a soja, na equação de Henderson.

Baseando-se, ainda, nos coeficientes de correlação, nota-se que a equação do 3º grau é melhor para representar os dados experimentais dos produtos amendoim, feijão, soja e trigo, enquanto que a equação de Henderson é melhor para os produtos arroz em casca e milho.

A aplicação do teste de Student indicou que todas as equações são significativas ao nível de 0,5%, resultado excelente sob o ponto de vista estatístico.

Os valores das constantes k e n da equação de Henderson encontrados com nossos dados experimentais apresentaram-se similares aos valores encontrados por HENDERSON (27) para soja e milho, e distintos dos valores encontrados para o trigo. O amendoim apresentou as constantes da equação de Henderson com valores distantes dos valores encontrados por YOUNG (60).

Uma comparação dos valores de umidade de equilíbrio obtidos em nosso experimento com os encontrados na literatura indica o seguinte: o amendoim apresentou valores de umidade de

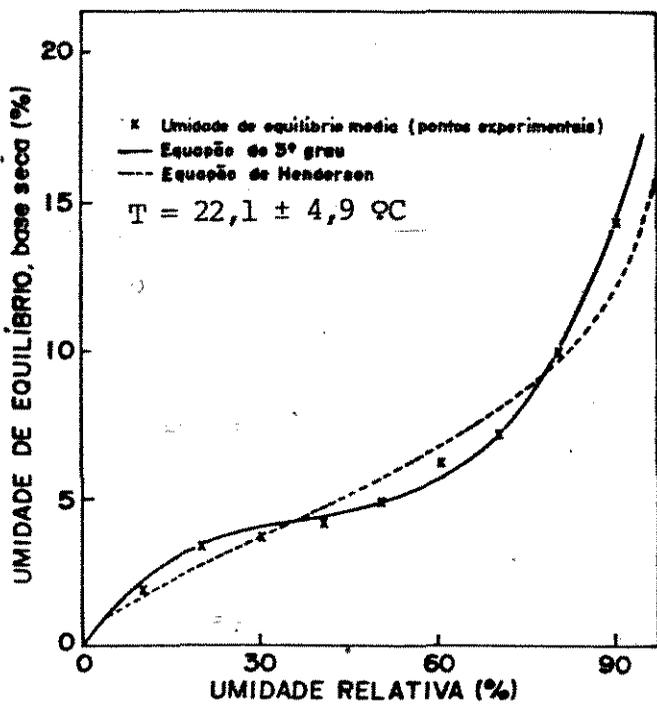


Figura 07. Umidade de equilíbrio do amendoim, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 3º grau.

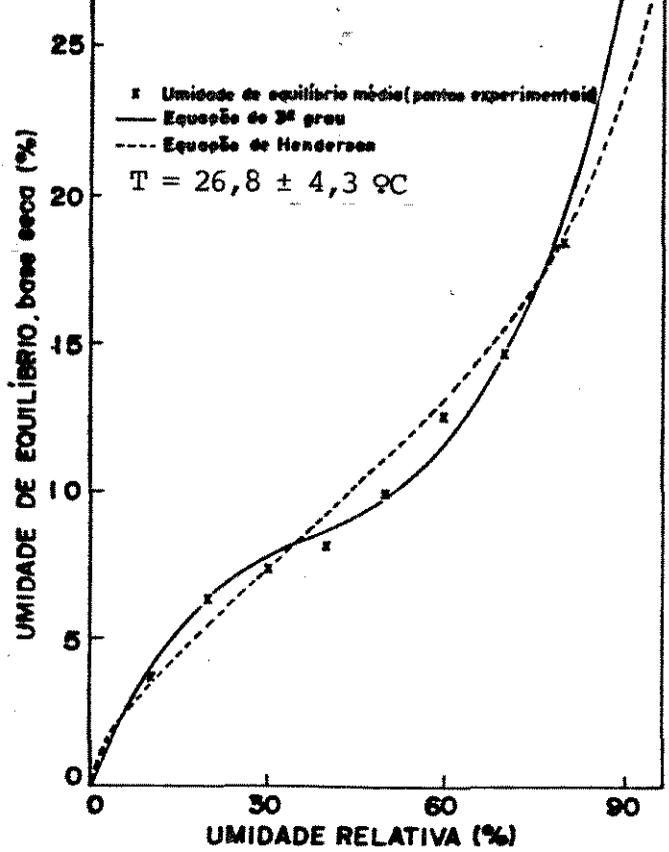


Figura 09. Umidade de equilíbrio do feijão, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 3º grau.

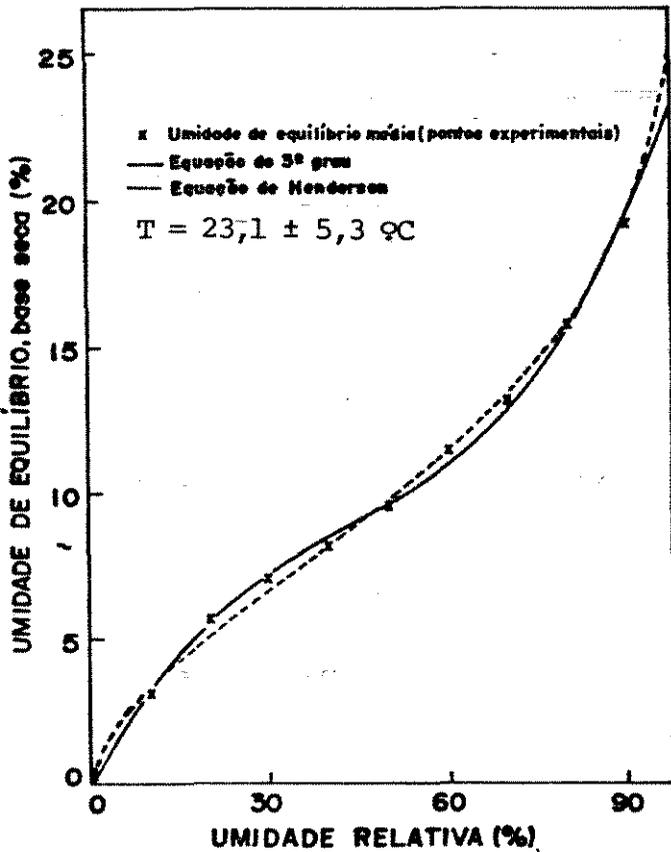


Figura 08. Umidade de equilíbrio do arroz em casca, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 3º grau.

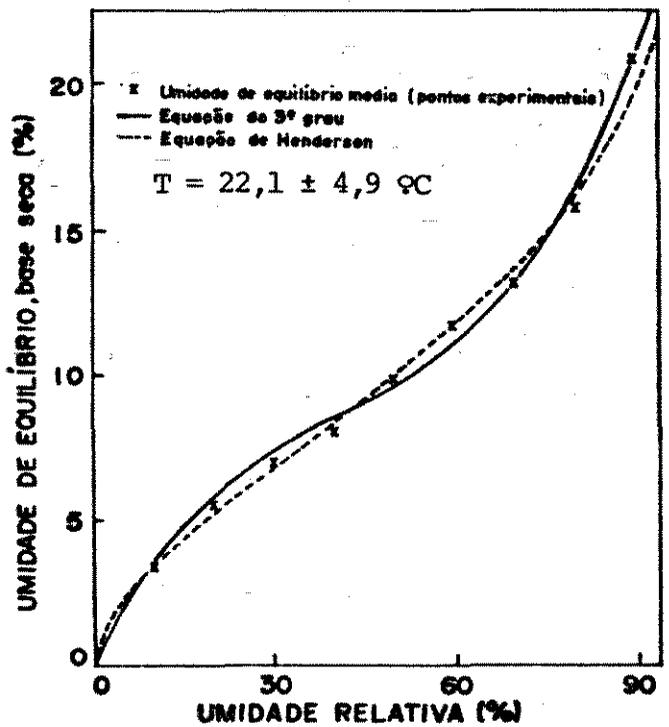


Figura 10. Umidade de equilíbrio do milho, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 3º grau.

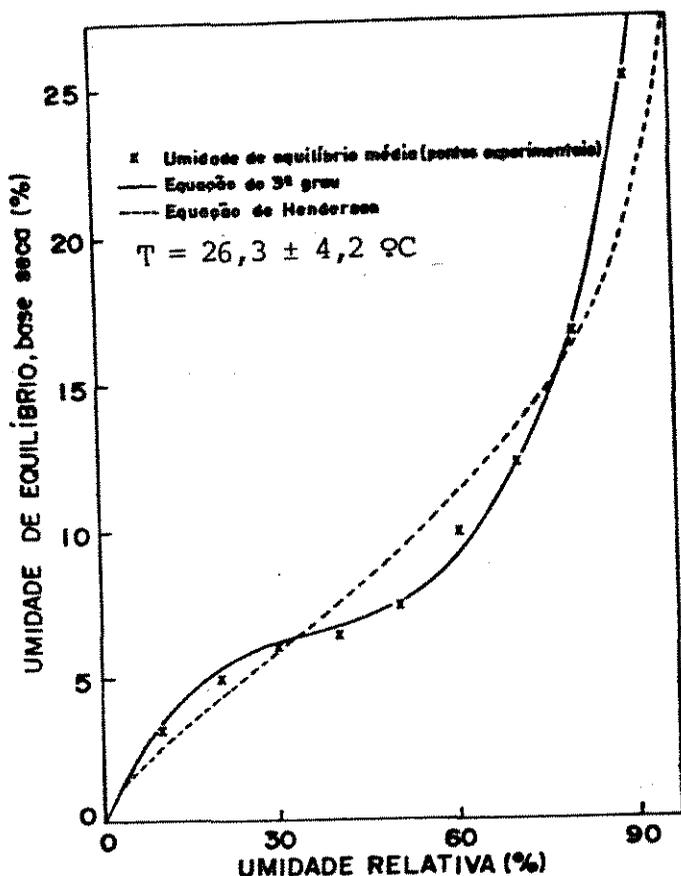


Figura 11. Umidade de equilíbrio da soja, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 3º grau.

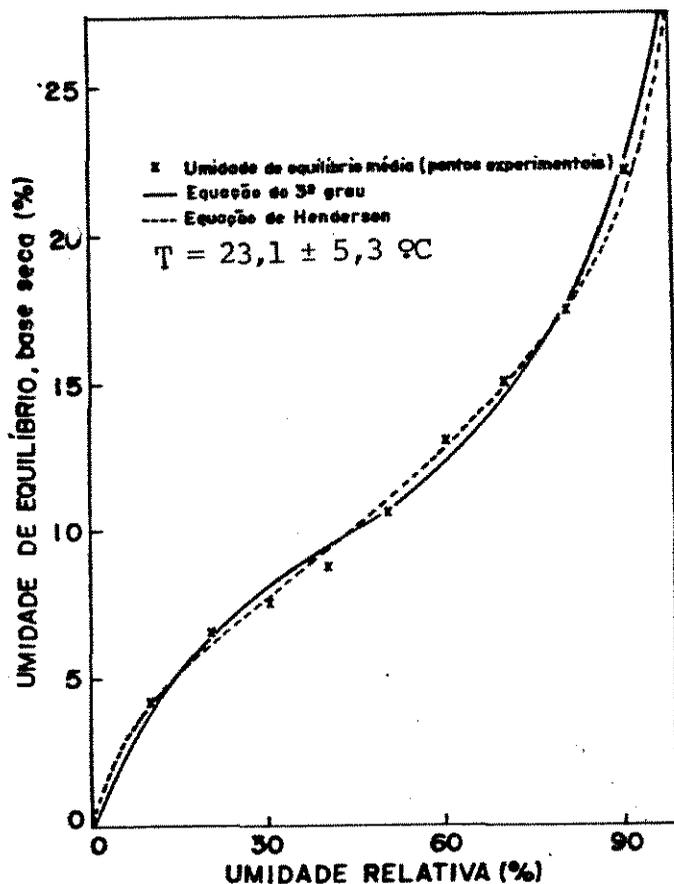


Figura 12. Umidade de equilíbrio do trigo, em função da umidade relativa, usando a equação de Henderson comparada com a do 3º grau.

equilíbrio maiores até o nível de 60% de umidade relativa e menores acima deste valor, comparando-se com o produto utilizado por YOUNG (60); comparados com os valores relatados por BROOKER et al. (5), nosso produto apresentou menores valores de umidade de equilíbrio até 70% de umidade relativa e o mesmo valor para umidade relativa de 80%.

Os produtos arroz em casca, milho, feijão e trigo, apresentaram menores valores de umidade de equilíbrio, em todas as umidades relativas, que os valores relatados por BROOKER et al. (5); a mesma tendência é verificada quando a compara-

ção é feita com os valores encontrados por KOSOSKI (31) para arroz em casca e milho e ZURITZ et al. (62) com arroz em casca.

A soja apresentou maiores valores de umidade de equilíbrio em relação à soja, variedade Santa Rosa, estudada por JORGE (29), em todas as umidades relativas; comparando com o produto pesquisado por KOSOSKI (31) a nossa variedade apresentou maior umidade de equilíbrio apenas para umidade relativa de 90%; em relação aos valores apresentados por ALAM & SHOVE (1), a variedade brasileira apresentou maiores valores de umidade de equilíbrio para os níveis de 10%, 20% e 30% de umidade relativa, e menores valores para as outras umidades relativas.

O efeito histerese, existente entre os processos de adsorção e desorção, ficou bem caracterizado para os produtos amendoim, feijão, milho e trigo, enquanto que para o arroz em casca e soja as curvas de adsorção e desorção se confundem, não ficando clara a ocorrência do fenômeno, como pode ser observado nas Figuras 02 e 05.

Baseando-se nos dados experimentais obtidos, notamos que existe uma tendência para produtos com alto teor de lipídeos em sua constituição, caso do amendoim, apresentarem umidade de equilíbrio menor que os outros produtos a uma mesma umidade relativa, de modo semelhante aos resultados encontrados por ROSSI et al. (46).

4.3. CONCLUSÕES

4.3.1. Todas as equações obtidas, do modelo de 3º grau, e do modelo de Henderson, na faixa de umidade relativa de 10 a 90% e temperatura média ao redor de 22-26 °C, servem para representar os dados experimentais dos produtos estudados, pois apresentaram ótimas correlações, entre 0,970 e 1,000, e significância ao nível de 0,5%.

4.3.2. O modelo de 3º grau mostrou-se melhor para os produtos: amendoim, feijão, soja e trigo, e o modelo de Henderson para os produtos arroz em casca e milho.

4.3.3. O efeito histerese ficou bem caracterizado para os produtos amendoim, feijão, milho e trigo, enquanto que para o arroz em casca e soja as curvas de adsorção e desorção se confundem, não ficando clara a ocorrência do fenômeno.

5. PESOS ESPECÍFICOS

5.1. PESO ESPECÍFICO APARENTE

5.1.1. MATERIAL E MÉTODOS

5.1.1.1. MATERIAL

O aparelho utilizado para a determinação do peso específico aparente (Fig. 13) é constituído de uma parte, semelhante a um "funil", onde o produto é colocado para a determinação. As dimensões desse "funil" são as seguintes: diâmetro superior 19,5 cm; abertura de escoamento 3,3 cm e altura de 12,5 cm. Distante exatamente 7,65 cm (3 polegadas) deste "fu-

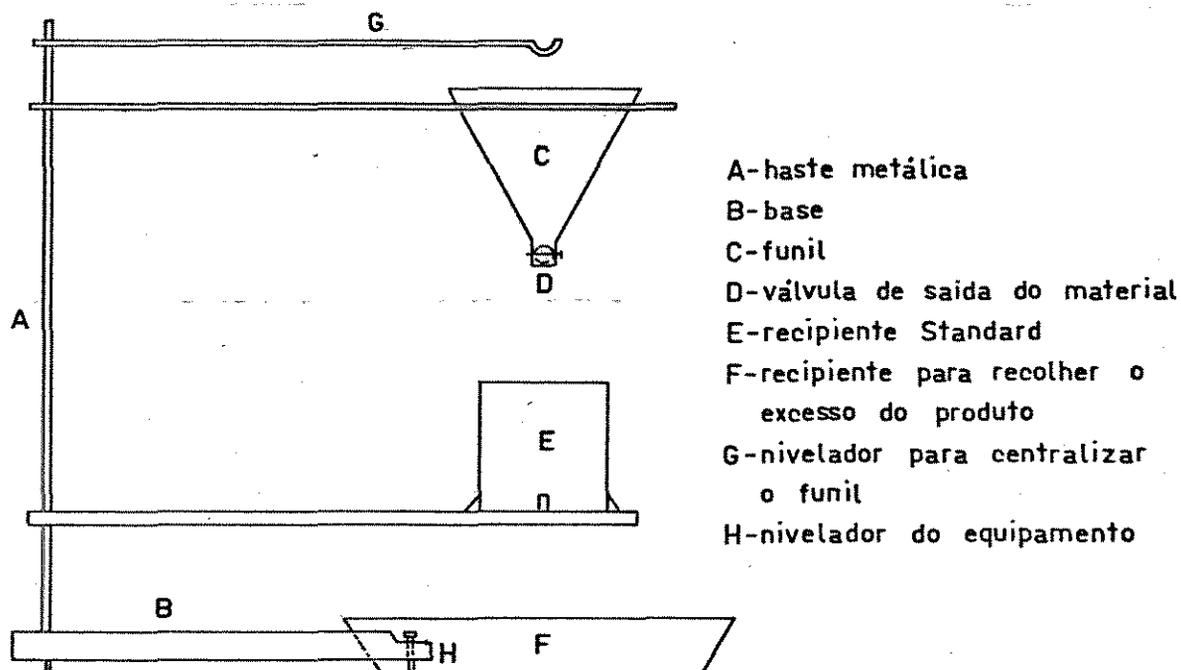


Figura 13. (Fonte: LEITÃO (34)) Equipamento para determinação do peso específico aparente.

nil", a partir da abertura de escoamento está um recipiente de volume aproximadamente igual a um litro, de seção circular de 11,3 cm de diâmetro e altura de 10,6 cm.

Foi utilizada uma balança de precisão de 0,1 g para a pesagem do recipiente de seção circular.

5.1.1.2. MÉTODOS

5.1.1.2.1. CALIBRAÇÃO DO RECIPIENTE

O recipiente foi pesado em uma balança de precisão de 0,1 g, mantendo-o no prato. Certa quantidade de água foi colocada até seu quase completo enchimento, completando-se o volume, cuidadosamente, através de uma bureta. O peso de água utilizado foi anotado. Com um termômetro foi medida a temperatura da água e através de uma tabela calculada a densidade correspondente a esta temperatura. O volume do recipiente foi calculado pela relação:

$$V_r = \frac{m_a}{\rho_a} \quad \{ IX \} \quad , \text{ onde:}$$

V_r = volume do recipiente, em ml

m_a = massa de água, em g

ρ_a = densidade da água (corrigida para a temperatura, em g/ml

A calibração foi realizada com três repetições e a média foi calculada.

5.1.1.2.2. DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO APARENTE

A distância entre o "funil" e o recipiente foi conferida. O produto colocado no "funil" e a abertura para o escoamento, aberta. O escoamento deve ser constante e livre, sem qualquer interferência. Uma espátula foi passada pelo recipiente para retirar o excesso de produto existente e o mesmo foi pesado em uma balança de precisão de 0,1 g. Por diferença entre este valor e o peso do recipiente, o peso do produto existente foi calculado. Finalmente, foi calculado o peso específico aparente pela relação:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_r} \quad \{ X \} \quad , \text{ onde:}$$

ρ_{ap} = peso específico aparente, em g/ml

m = massa do produto, em g

V_r = volume do recipiente, em ml

Foram realizadas cinco repetições para cada nível de umidade, para cada tipo de produto.

5.2. PESO ESPECÍFICO REAL

5.2.1. MATERIAL E MÉTODO

5.2.1.1. MATERIAL

Para a determinação desta grandeza foram utilizadas

provetas graduadas de 500ml.

Foi utilizada uma balança semi-analítica, marca STANTON D42T, com precisão de 0,01 g para a pesagem dos produtos.

5.2.1.2. MÉTODO

Para a determinação do peso específico real foi utilizado o princípio de Archimedes (34): 150 g de produto foram colocadas na proveta graduada que continha 250 ml de água. Pelo volume de água deslocado, foi calculado o peso específico real pela relação:

$$\rho_r = \frac{m}{V_d} \quad \{ \text{XI} \} \quad , \text{ onde}$$

ρ_r = peso específico real, em g/ml

m = massa do produto, em g

V_d = volume deslocado, em ml

Foram realizadas cinco repetições para cada produto em cada nível de umidade.

5.3. POROSIDADE

Após a determinação do peso específico aparente e do peso específico real, foi calculada a porosidade, para cada produto, a cada nível de umidade, pela relação:

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_r} \right) \times 100 \quad \{ \text{XII} \}, \text{ onde:}$$

P = porosidade, em %

ρ_{ap} = peso específico aparente, em g/ml

ρ_r = peso específico real, em g/ml

Todos os dados obtidos, para todos os produtos, foram ajustados, através de uma regressão linear a uma equação do 1º grau. O teste de Student foi utilizado para verificar a consistência das equações obtidas.

5.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O recipiente utilizado na determinação do peso específico aparente foi calibrado apresentando o valor de 1039,0 ml para seu volume.

Os Quadros 24 a 29 apresentam os resultados das medições efetuadas para peso específico aparente e peso específico real, bem como o cálculo da porosidade, com base nos valores médios dos pesos específicos, aparente e real, em função da umidade, para os seis produtos pesquisados.

Analisando-se os Quadros 24 a 29, constata-se que os desvios padrões dos dados experimentais, de todos os produtos, apresentaram valores pequenos; acoplado ao fato que o maior coeficiente de variação foi de 1,10% para peso específico

Quadro 24. Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do amendoim, em função da umidade.

M (%)	m (g)	ρ_{ap} (g/ml)	$\overline{\rho}_{ap}$ (g/ml)	V_d (ml)	ρ_r (g/ml)	$\overline{\rho}_r$ (g/ml)	P (%)
	646,6	0,622		145,0	1,034		
	651,4	0,627	0,625	145,0	1,034	1,038	39,79
9,93	650,9	0,626	0,002	142,5	1,053	0,008	
	649,1	0,625	0,31%	145,0	1,034	0,82%	
	648,5	0,624		145,0	1,034		
	630,5	0,607		145,0	1,034		
	631,4	0,608	0,608	145,0	1,034	1,034	41,20
15,07	632,1	0,608	0,001	145,0	1,034	0,000	
	632,0	0,608	0,12%	145,0	1,034	0,00%	
	632,5	0,609		145,0	1,034		
	644,1	0,620		145,0	1,034		
	628,4	0,605	0,613	145,0	1,034	1,034	40,72
20,26	634,1	0,610	0,006	145,0	1,034	0,000	
	636,0	0,612	0,94%	145,0	1,034	0,00%	
	639,8	0,616		145,0	1,034		
	620,1	0,597		145,0	1,034		
	621,0	0,598	0,601	145,0	1,034	1,031	41,71
25,32	625,3	0,602	0,003	145,0	1,034	0,008	
	628,6	0,603	0,56%	145,0	1,034	0,74%	
	627,0	0,603		147,5	1,017		

Quadro 25. Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do arroz em casca, em função da umidade.

M	m	ρ_{ap}	$\overline{\rho_{ap}}$	V_d	ρ_r	$\overline{\rho_r}$	P
(%)	(g)	(g/ml)	(g/ml)	(ml)	(g/ml)	(g/ml)	(%)
	645,5	0,621		130,0	1,154		
	644,3	0,620	0,621	127,5	1,176	1,167	46,79
11,18	644,9	0,621	0,001	127,5	1,176	0,012	
	647,7	0,623	0,24%	130,0	1,154	1,03%	
	643,3	0,619		127,5	1,176		
	645,1	0,621		125,0	1,200		
	648,7	0,624	0,624	125,0	1,200	1,195	47,78
15,45	656,6	0,632	0,005	127,5	1,176	0,011	
	643,3	0,619	0,79%	125,0	1,200	0,90%	
	648,6	0,624		125,0	1,200		
	664,9	0,640		122,5	1,224		
	672,7	0,647	0,642	122,5	1,224	1,234	47,97
20,68	663,8	0,639	0,003	120,0	1,250	0,014	
	666,8	0,642	0,48%	120,0	1,250	1,15%	
	666,5	0,642		122,5	1,224		
	648,2	0,659		117,5	1,277		
	676,2	0,651	0,656	117,5	1,277	1,272	48,43
25,52	680,3	0,655	0,003	120,0	1,250	0,012	
	682,8	0,657	0,46	117,5	1,277	0,95%	
	628,3	0,657		117,5	1,277		

Quadro 26. Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do feijão, em função da umidade.

M	m	ρ_{ap}	$\overline{\rho_{ap}}$	V_d	ρ_r	$\overline{\rho_r}$	P
(%)	(g)	(g/ml)	(g/ml)	(ml)	(g/ml)	(g/ml)	(%)
	815,1	0,785		117,5	1,278		
	816,7	0,786	0,785	120,0	1,250	1,261	37,75
11,57	815,9	0,785	0,001	117,5	1,278	0,015	
	813,3	0,783	0,14%	120,0	1,250	1,22%	
	815,5	0,785		120,0	1,250		
	806,8	0,777		117,5	1,278		
	807,9	0,778	0,778	117,5	1,278	1,272	38,84
15,38	811,2	0,781	0,003	117,5	1,278	0,013	
	811,4	0,781	0,34%	120,0	1,250	0,98%	
	805,4	0,775		117,5	1,278		
	777,2	0,748		120,0	1,250		
	779,9	0,751	0,750	120,0	1,250	1,240	39,52
22,05	780,8	0,751	0,004	122,5	1,224	0,014	
	774,8	0,746	0,50%	120,0	1,250	1,15%	
	785,3	0,756		122,5	1,224		
	753,4	0,725		122,5	1,224		
	756,7	0,728	0,728	122,5	1,224	1,214	40,03
27,90	758,4	0,730	0,002	122,5	1,224	0,013	
	758,4	0,730	0,29%	125,0	1,200	1,08%	
	755,6	0,727		125,0	1,200		

Quadro 27. Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do milho, em função da umidade.

M	m	ρ_{ap}	$\overline{\rho_{ap}}$	V_d	ρ_r	$\overline{\rho_r}$	P
(%)	(g)	(g/ml)	(g/ml)	(ml)	(g/ml)	(g/ml)	(%)
	773,1	0,744		125,0	1,200		
	767,9	0,739	0,743	125,0	1,200	1,210	38,60
11,08	776,0	0,747	0,003	120,0	1,250	0,022	
	771,2	0,742	0,39%	125,0	1,200	1,85%	
	771,7	0,743		125,0	1,200		
	738,5	0,711		122,5	1,224		
	730,7	0,703	0,707	122,5	1,224	1,219	42,00
15,07	734,8	0,707	0,003	122,5	1,224	0,011	
	735,8	0,708	0,41%	125,0	1,200	0,89%	
	730,0	0,707		122,5	1,224		
	695,5	0,669		125,0	1,200		
	699,4	0,673	0,675	125,0	1,200	1,200	43,75
19,96	698,3	0,672	0,007	125,0	1,200	0,000	
	700,8	0,674	1,10%	125,0	1,200	0,00%	
	714,4	0,688		125,0	1,200		
	660,3	0,636		130,0	1,154		
	647,9	0,624	0,629	130,0	1,154	1,158	45,68
27,15	653,5	0,629	0,004	127,5	1,176	0,010	
	653,9	0,629	0,68%	130,0	1,154	0,85%	
	653,2	0,629		130,0	1,154		

Quadro 28. Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, da soja, em função da umidade.

M	m	ρ_{ap}	$\overline{\rho_{ap}}$	V_d	ρ_r	$\overline{\rho_r}$	P
(%)	(g)	(g/ml)	(g/ml)	(ml)	(g/ml)	(g/ml)	(%)
	770,1	0,741		125,0	1,200		
	769,3	0,740	0,741	125,0	1,200	1,195	37,99
10,38	771,0	0,742	0,001	127,5	1,176	0,011	
	769,1	0,740	0,11%	125,0	1,200	0,90%	
	769,4	0,741		125,0	1,200		
	754,4	0,726		127,5	1,176		
	752,8	0,725	0,728	125,0	1,200	1,195	39,08
15,26	756,3	0,728	0,003	125,0	1,200	0,011	
	758,5	0,730	0,39%	125,0	1,200	0,90%	
	761,0	0,732		125,0	1,200		
	732,6	0,705		127,5	1,176		
	733,2	0,706	0,707	127,5	1,176	1,186	40,39
19,75	734,5	0,707	0,005	127,5	1,176	0,013	
	730,6	0,703	0,71%	125,0	1,200	1,11%	
	744,0	0,716		125,0	1,200		
	717,3	0,690		127,5	1,176		
	721,3	0,694	0,693	127,5	1,176	1,163	40,41
24,54	721,4	0,694	0,003	130,0	1,154	0,012	
	722,7	0,696	0,43%	130,0	1,154	1,04%	
	716,2	0,689		130,0	1,154		

Quadro 29. Resultados para peso específico aparente, peso específico real e porosidade, do trigo, em função da umidade.

M (%)	m (g)	ρ_{ap} (g/ml)	$\overline{\rho_{ap}}$ (g/ml)	V_d (ml)	ρ_r (g/ml)	$\overline{\rho_r}$ (g/ml)	P (%)
	859,9	0,828		115,0	1,304		
	857,6	0,825	0,824	112,5	1,333	1,316	37,39
10,32	855,0	0,823	0,003	115,0	1,304	0,016	
	853,4	0,821	0,32%	115,0	1,304	1,21%	
	857,6	0,825		112,5	1,333		
	812,3	0,782		115,0	1,304		
	809,9	0,779	0,783	115,0	1,304	1,304	39,95
15,11	812,5	0,782	0,003	115,0	1,304	0,000	
	815,3	0,785	0,39%	115,0	1,304	0,00%	
	818,2	0,787		115,0	1,304		
	762,7	0,734		117,5	1,277		
	762,3	0,734	0,733	117,5	1,277	1,272	42,37
19,94	763,4	0,735	0,002	117,5	1,277	0,012	
	758,1	0,730	0,27%	120,0	1,250	0,95%	
	763,1	0,734		117,5	1,277		
	730,9	0,703		120,0	1,250		
	734,1	0,707	0,705	120,0	1,250	1,250	43,60
25,20	733,5	0,706	0,002	120,0	1,250	0,000	
	731,8	0,704	0,23%	120,0	1,250	0,00%	
	733,1	0,706		120,0	1,250		

aparente e 1,85% para peso específico real, pose-se concluir que as metodologias empregadas para as determinações dos pesos específicos, aparente e real, são boas.

Em termos de valores absolutos as variedades brasileiras de milho, soja e trigo apresentaram peso específico real menor que das variedades utilizadas por BRUSEWITZ (8) e NELSON (38). Para peso específico aparente as variedades brasileiras de soja e trigo apresentaram valores maiores que as utilizadas por BRUSEWITZ (8), CHUNG & CONVERSE (12) e NELSON (38). O milho, por sua vez, resultou em peso específico aparente com valores menores que os encontrados por BRUSEWITZ (8) e NELSON (38), e valores maiores que os encontrados por CHUNG & CONVERSE (12).

Também em termos de valores absolutos, a variedade brasileira de arroz em casca apresentou menores valores de peso específico real e porosidade, e maiores valores de peso específico aparente, que as variedades utilizadas por WRATTEN et al. (59); o arroz em casca apresentou, ainda, menores valores de peso específico aparente que a variedade utilizada por MORITA & SINGH (27).

Os Quadros 30 a 32 mostram as equações de 1º grau, de peso específico aparente, peso específico real e porosidade, em função da umidade, que representam o melhor ajuste dos dados experimentais obtidos.

As Figuras 14 a 19 fornecem as curvas típicas de ρ_{ap} , ρ_r e P, em função da umidade (M), traçadas a partir das equações apresentadas nos Quadros 30 a 32.

Quadro 30. Regressão linear e coeficiente de correlação para peso específico aparente (ρ_{ap} , em g/ml) em função da umidade (M, em decimal), para cada produto pesquisado.

Produto	Equação	r	t ₁ /
Amendoim	$\rho_{ap} = 0,635 - 0,130 \cdot M$	0,810	5,85 *
Arroz em casca	$\rho_{ap} = 0,589 + 0,257 \cdot M$	0,958	14,17 *
Feijão	$\rho_{ap} = 0,830 - 0,368 \cdot M$	0,967	16,07 *
Milho	$\rho_{ap} = 0,813 - 0,696 \cdot M$	0,992	33,27 *
Soja	$\rho_{ap} = 0,779 - 0,352 \cdot M$	0,982	22,20 *
Trigo	$\rho_{ap} = 0,906 - 0,821 \cdot M$	0,991	32,02 *

* significativo ao nível de 0,5%

1/ teste de Student para análise da regressão linear com 18 graus de liberdade.

Quadro 31. Regressão linear e coeficiente de correlação para peso específico real (ρ_r , em g/ml) em função da umidade (M, em decimal), para cada produto pesquisado.

Produto	Equação	r	t ₂ /
Amendoim	$\rho_r = 1,042 - 0,042 \cdot M$	0,423	1,98 **
Arroz em casca	$\rho_r = 1,098 + 0,675 \cdot M$	0,887	8,14 *
Feijão	$\rho_r = 1,310 - 0,326 \cdot M$	0,803	5,71 *
Milho	$\rho_r = 1,261 - 0,350 \cdot M$	0,802	5,70 *
Soja	$\rho_r = 1,224 - 0,227 \cdot M$	0,706	4,23 *
Trigo	$\rho_r = 1,367 - 0,464 \cdot M$	0,933	11,02 *

* significativo ao nível de 0,5%

** significativo ao nível de 5,0%

2/ teste de Student para análise da regressão linear com 18 graus de liberdade.

Quadro 32. Regressão linear e coeficiente de correlação para porosidade (P, em %) em função da umidade (M, em %), para cada produto pesquisado.

Produto	Equação	r	t _{3/}
Amendoim	$P = 39,04 + 0,10 \cdot M$	0,833	2,13 ns
Arroz em casca	$P = 43,84 + 0,10 \cdot M$	0,942	3,97 **
Feijão	$P = 36,51 + 0,13 \cdot M$	0,964	5,13 **
Milho	$P = 34,86 + 0,42 \cdot M$	0,961	4,91 **
Soja	$P = 36,28 + 0,18 \cdot M$	0,948	4,21 **
Trigo	$P = 33,35 + 0,42 \cdot M$	0,985	8,07 *

* significativo ao nível de 1,0%

** significativo ao nível de 5,0%

ns não significativo

3/ teste de Student para análise da regressão linear com 2 graus de liberdade.

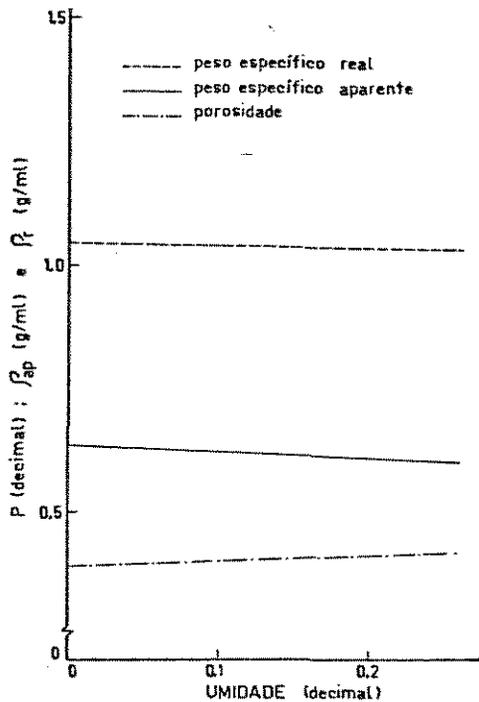


Figura 14. Peso específico aparente, peso específico real e porosidade do amendoim, em função da umidade.

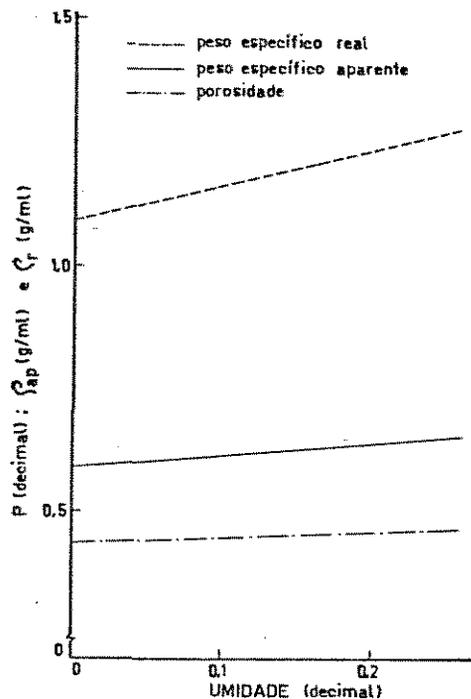


Figura 15. Peso específico aparente, peso específico real e porosidade do arroz em casca, em função da umidade.

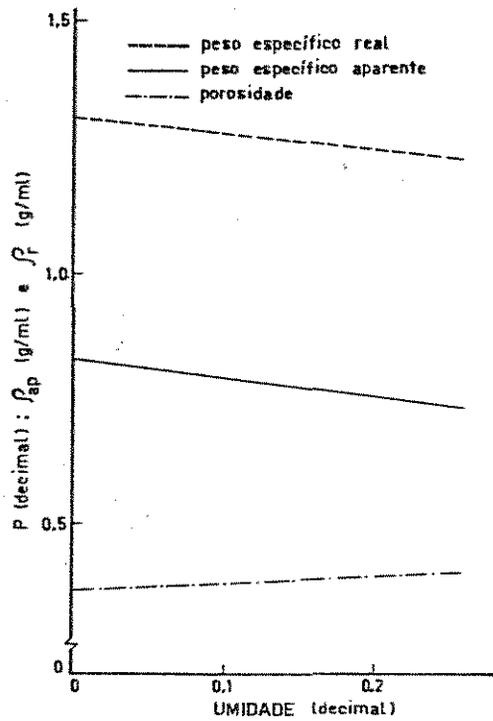


Figura 16. Peso específico aparente, peso específico real e porosidade do feijão, em função da umidade.

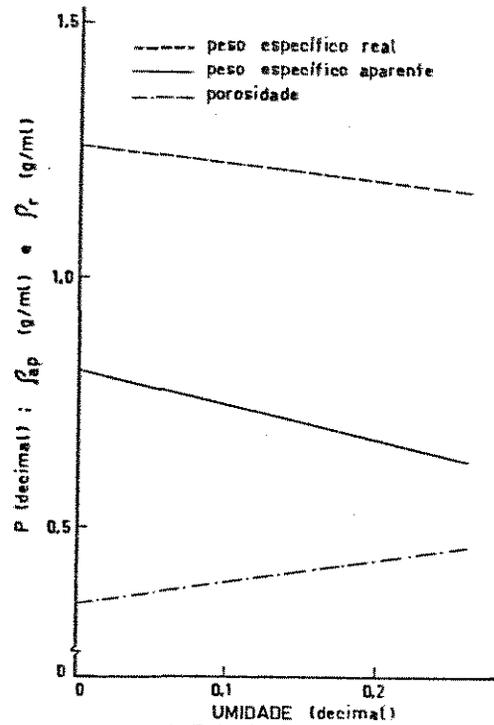


Figura 17. Peso específico aparente, peso específico real e porosidade do milho, em função da umidade.

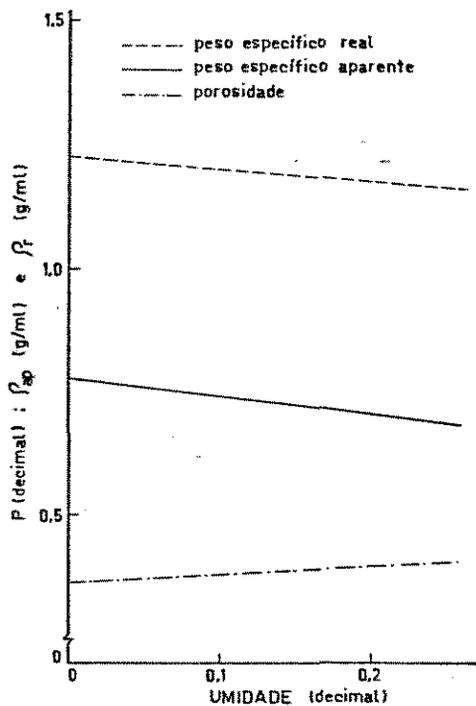


Figura 18. Peso específico aparente, peso específico real e porosidade da soja, em função da umidade.

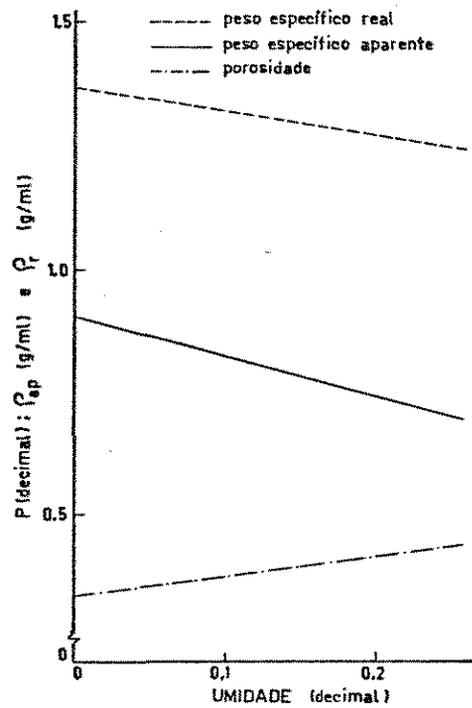


Figura 19. Peso específico aparente, peso específico real e porosidade do trigo, em função da umidade.

Para a faixa de umidade estudada: 9,93 a 25,32% (amendoim); 11,18 a 25,52% (arroz em casca); 11,57 a 27,90% (feijão); 11,08 a 27,15% (milho); 10,38 a 24,54% (soja) e 10,32 a 25,20% (trigo), todos os produtos mostraram uma relação linear para peso específico aparente, com coeficientes de correlação variando de 0,810 a 0,992 e significância ao nível de 0,5%, indicando que as equações obtidas são muito boas para representar a variação do peso específico aparente com a umidade.

O peso específico real apresentou coeficientes de correlação variando de 0,706 a 0,933, com significância ao nível de 0,5%, para todos os produtos, com exceção do amendoim que não apresentou correlação linear.

Os produtos: amendoim, feijão, milho, soja e trigo apresentaram um decréscimo nos pesos específicos, aparente e real, com o aumento do teor de umidade. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por BROWNE (6) para trigo; BRUSEWITZ (8) para milho, soja e trigo, e NELSON (38) para milho e trigo. O arroz em casca apresentou um acréscimo nos pesos específicos, aparente e real, com o aumento do teor de umidade, resultados coincidentes aos encontrados por WRATTEN et al. (59) e MORITA & SINGH (37).

O amendoim, por sua vez, foi o produto que apresentou as menores alterações das grandezas em função do aumento do teor de umidade. Este fato ocorreu possivelmente devido ao alto teor de gorduras existente na sua composição.

Uma tentativa de explicação para o comportamento distinto apresentado pelo arroz em casca é que a água adicionada para elevar a sua umidade vai aumentar o volume do grão que expandindo-se iria ocupar o espaço vazio existente entre a casca e o grão. Isto propiciaria um aumento da massa do arroz sem que seu volume sofra aumento significativo, o que explicaria o aumento nos pesos específicos, aparente e real. Tal fato não acontece nos outros produtos, que incorporam umidade aumentando significativamente o volume, ao ponto de inverter a tendência observada no caso do arroz.

Baseando-se nos Quadros 30 e 31, conclui-se que a taxa de decréscimo dos pesos específicos, aparente e real, quando ocorre aumento do teor de umidade, apresenta o seguinte resultado, em ordem decrescente, para os produtos: trigo, milho, feijão, soja e amendoim.

A porosidade sofreu um acréscimo com o aumento do teor de umidade para todos os produtos pesquisados. O Quadro 32 mostra as equações de 1º grau da porosidade em função da umidade, cujos coeficientes de correlação variaram entre 0,833 e 0,985, com nível de significância de 1,0% para o trigo; de 5,0% para arroz em casca, feijão, milho e soja e não significativo para o amendoim.

Estes resultados são decorrentes do fato de que para o cálculo da regressão linear foram utilizados apenas quatro dados de porosidade, sendo um para cada nível de umidade.

Na faixa de umidade pesquisada temos o seguinte aumen

to percentual da porosidade, em ordem crescente, em relação ao valor de 10% de umidade: arroz em casca (3,3%); amendoim (3,8%); feijão (3,8%); soja (7,2%); milho (16,0%) e trigo (16,9%).

5.5. CONCLUSÕES

5.5.1. Os produtos: amendoim, feijão, milho, soja e trigo, mostraram uma diminuição dos pesos específicos, aparente e real, com o aumento do teor de umidade.

5.5.2. Os pesos específicos, aparente e real, do arroz em casca aumentaram com o acréscimo do teor de umidade.

5.5.3. Todos os produtos apresentaram um aumento da porosidade com o acréscimo do teor de umidade.

5.5.4. As equações de 1º grau encontradas para representar o ajuste dos dados experimentais apresentaram elevada correlação e alta significância para todos os produtos, com exceção do amendoim.

5.5.5. As metodologias empregadas nas determinações dos pesos específicos, aparente e real, são boas.

6. ÂNGULO DE TALUDE

6.1. MATERIAL E MÉTODO

6.1.1. MATERIAL

Para determinação desta propriedade foi utilizado aparelho construído na Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da UNICAMP. Consiste em uma caixa retangular de dimensões:

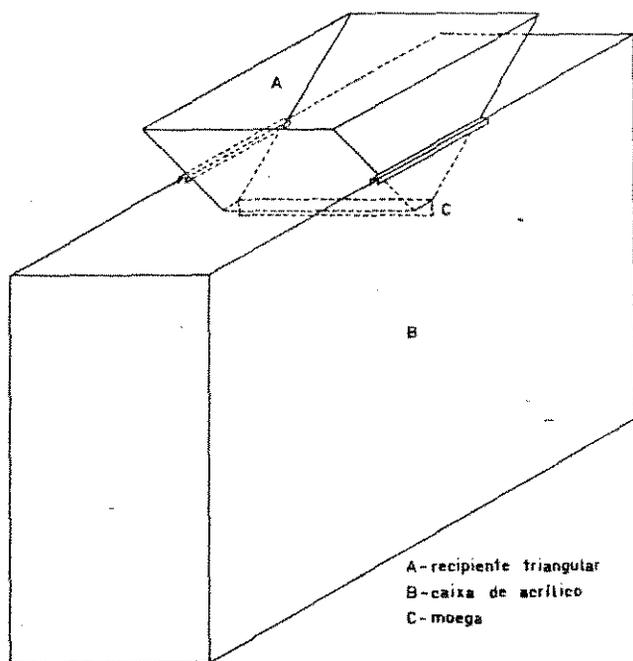


Figura 20. (Fonte: LEITÃO (34)). Equipamento para determinação do ângulo de talude.

formado com a horizontal.

6.1.2. MÉTODO

A matéria prima estudada foi colocada no recipiente tri-

50cm de comprimento, 20cm de largura e 40cm de altura, toda construída em acrílico transparente, o que permite a visualização perfeita da determinação. É dotado de um recipiente triangular onde a matéria prima em estudo é colocada e de uma moega para o escoamento da mesma para o interior da caixa (Fig. 20), conforme TOSELLO & JORGE (55).

Foi utilizado um dispositivo dotado de um transferidor para medir o ângulo

angular e através da moega escoou com fluxo constante para o interior da caixa, com fundo na posição horizontal, com a formação do ângulo de talude característico. Foram medidos, através do dispositivo dotado de transferidor, os quatro ângulos formados pela matéria prima com o nível do fundo da caixa (dois ângulos de cada lado), sendo que a média destas medidas forneceu o ângulo de talude do produto em estudo. Para cada nível de umidade, foram realizadas cinco repetições, para cada tipo de produto.

Os resultados obtidos foram ajustados, através de regressão linear, a uma equação do 1º grau. O teste de Student foi aplicado para testar a eficiência do ajuste realizado.

6.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os Quadros 33 a 38 mostram os resultados obtidos experimentalmente para o ângulo de talude com as respectivas médias, desvios padrões e coeficientes de variação, dos produtos: amendoim, arroz em casca, feijão, milho, soja e trigo, em função da umidade.

Analisando-se os Quadros 33 a 38, nota-se que os desvios padrões, de todos os produtos, apresentaram valores pequenos; acoplado ao fato que o maior coeficiente de variação foi de 3,9%, pode-se concluir que a metodologia empregada para a determinação do ângulo de talude é muito boa.

O Quadro 39 apresenta as equações resultantes da regressão linear, para a qual foram utilizados todos os pontos experimentais obtidos. Também são apresentados os respectivos coeficientes de correlação e o nível de significância.

Quadro 33. Ângulo de talude (em graus) do amendoim, em função da umidade.

repetições	Umidade (%)			
	9,93	15,07	20,26	25,32
1	33,8	35,6	34,5	34,8
2	35,5	35,9	35,6	36,4
3	33,4	36,8	35,1	34,6
4	34,0	35,9	35,0	35,8
5	35,1	35,0	34,4	34,3
M	34,4	35,8	34,9	35,2
DP	0,9	0,7	0,5	0,9
CV(%)	2,6	1,8	1,4	2,5

Quadro 34. Ângulo de talude (em graus) do arroz em casca, em função da umidade.

repetições	Umidade (%)			
	11,18	15,45	20,68	25,52
1	32,3	32,5	33,3	35,4
2	32,9	34,3	33,4	35,1
3	31,5	32,4	34,6	34,4
4	31,8	32,6	34,4	35,9
5	32,6	33,3	35,4	35,6
M	32,2	33,0	34,2	35,3
DP	0,6	0,8	0,9	0,6
CV(%)	1,8	2,4	2,6	1,6

Quadro 35. Ângulo de talude (em graus) do feijão, em função da umidade.

repetições	Umidade (%)			
	11,57	15,38	22,05	27,90
1	34,4	33,9	34,6	36,6
2	34,5	32,8	34,5	35,0
3	33,1	33,6	34,1	36,5
4	33,6	34,0	33,4	35,0
5	33,5	32,9	32,9	36,0
M	33,8	33,4	33,9	35,8
DP	0,6	0,6	0,7	0,8
CV(%)	1,8	1,7	2,2	2,2

Quadro 36. Ângulo de talude (em graus) do milho, em função da umidade.

repetições	Umidade (%)			
	11,08	15,07	19,96	27,15
1	29,3	30,6	34,6	37,9
2	29,1	30,4	33,6	37,4
3	29,1	29,0	32,9	37,0
4	29,3	31,8	31,8	38,3
5	29,1	29,1	34,8	39,3
M	29,2	30,2	33,5	38,0
DP	0,1	1,2	1,2	0,9
CV(%)	0,4	3,9	3,7	2,3

Quadro 37. Ângulo de talude (em graus) da soja, em função da umidade.

repetições	Umidade (%)			
	10,38	15,26	19,75	24,54
1	31,0	29,9	30,1	32,4
2	29,3	29,3	31,1	32,0
3	29,5	29,5	30,4	32,4
4	29,0	29,5	31,6	32,0
5	28,5	28,9	31,0	32,8
M	29,5	29,4	30,8	32,3
DP	0,9	0,4	0,6	0,3
CV(%)	3,2	1,2	1,9	1,0

Quadro 38. Ângulo de talude (em graus) do trigo, em função da umidade.

repetições	Umidade (%)			
	10,32	15,11	19,94	25,20
1	30,6	33,1	37,9	38,3
2	31,5	33,3	36,5	38,6
3	32,6	33,3	37,3	37,3
4	31,8	33,0	38,0	38,1
5	32,1	32,8	37,5	38,5
M	31,7	33,1	37,4	38,2
DP	0,7	0,2	0,6	0,5
CV(%)	2,4	0,6	1,6	1,4

Quadro 39. Regressão linear e coeficiente de correlação para ângulo de talude (α , em graus) em função da umidade (M, em decimal), para cada produto pesquisado.

Produto	Equação	r	$t_{\frac{1}{}}$
Amendoim	$\alpha = 34,5 + 3,0 \cdot M$	0,201	0,87 ns
Arros em Casca	$\alpha = 29,8 + 21,5 \cdot M$	0,875	7,67 *
Feijão	$\alpha = 31,9 + 12,2 \cdot M$	0,688	4,02 *
Milho	$\alpha = 22,3 + 56,9 \cdot M$	0,961	14,74 *
Soja	$\alpha = 26,8 + 21,2 \cdot M$	0,851	6,87 *
Trigo	$\alpha = 26,7 + 47,6 \cdot M$	0,943	12,02 *

* Significativo ao nível de 1%

ns Não significativo

$\frac{1}{}$ Teste de Student para análise de regressão com 18 graus de liberdade

A Fig. 21 fornece o ângulo de talude em função do teor de umidade para os produtos pesquisados, calculada com base nas equações apresentadas no Quadro 39, com exceção do amendoim, onde não se verificou a correlação linear.

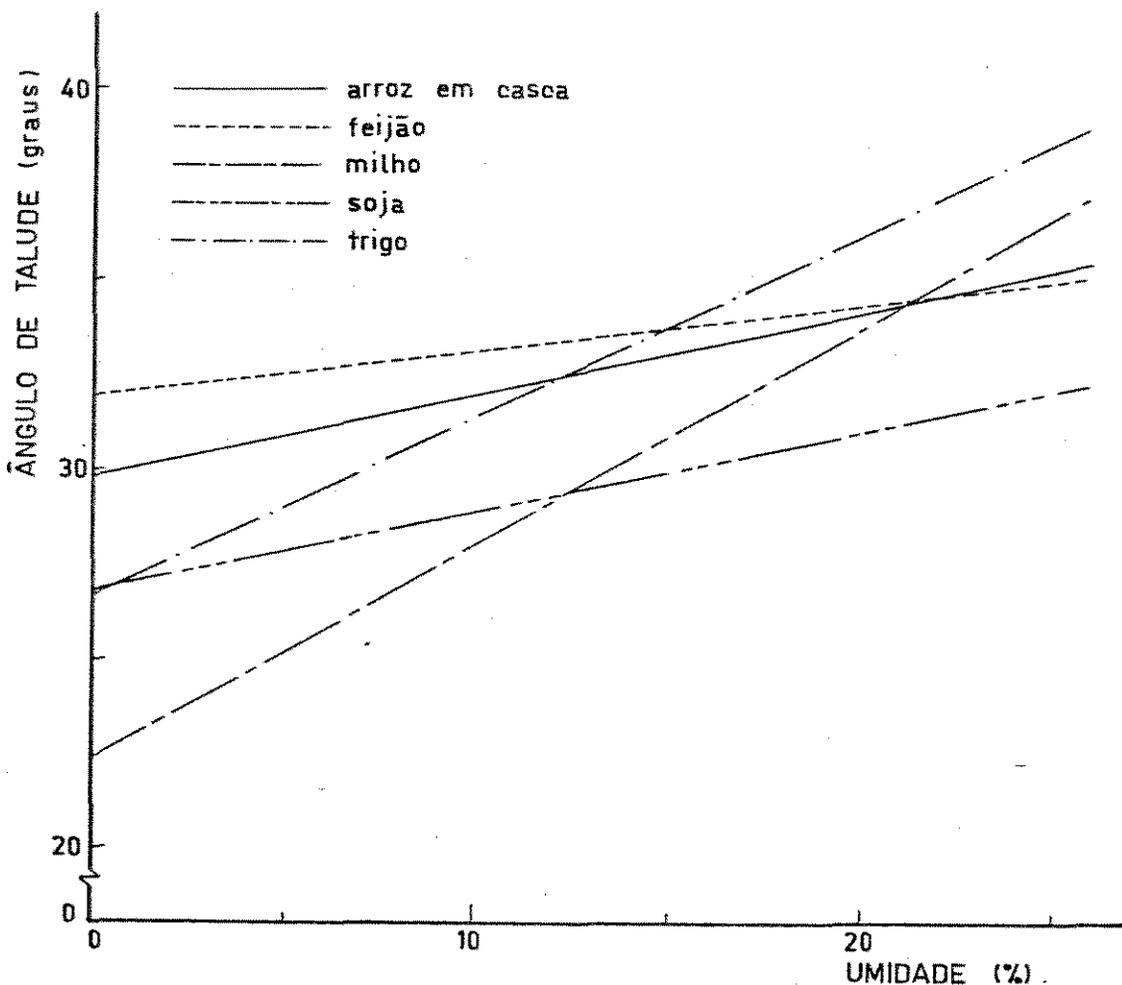


Figura 21. Ângulo de talude em função da umidade.

Os produtos arroz em casca, milho, soja e trigo, apresentaram um aumento no ângulo de talude com o aumento do teor de umidade, resultados que concordam com os encontrados por FOWLER & WYATT (23); LORENZEN, citado por MOHSENIN (36) e FRASER et al. (25). Nestes casos o ajuste dos dados experimentais à equação do 1º grau resultou em equações com coeficientes de correlação variando de 0,851 a 0,961 e significância ao nível de 1%, o que permite assegurar que o modelo testado apresenta bons resultados.

Em termos de valores absolutos os produtos brasileiros apresentam, no geral, menores ângulos de talude que os produtos pesquisados em outros países, conforme resultados relatados por BROOKER et al. (5) para milho, e FOWLER & WYATT (23) para trigo.

O feijão também apresenta o ângulo de talude aumentando com o acréscimo do teor de umidade, mas a equação do 1º grau resultante do ajuste dos dados apresentou um coeficiente de correlação apenas regular, de 0,688 e significância ao nível de 1%. Entretanto, ajustando os dados experimentais a um modelo do 3º grau, através do método dos mínimos quadrados, a representação dos mesmos melhorou consideravelmente, resultando na equação:

$$\alpha = 36,7 - 31,7 \cdot M + 22,7 \cdot M^2 + 282,1 \cdot M^3 \{ \text{XIII} \}$$

onde: ângulo de talude (α), em graus e umidade (M), base úmida, em decimal, com coeficiente de correlação de 0,839 e mantendo a significância ao nível de 1% (Fig. 22).

Comparando com o único produto similar encontrado na literatura, o "fababeans" (25), o feijão apresenta valores para o ângulo de talude maiores em todos os níveis de umidade.

Em relação ao amendoim, pode-se afirmar que praticamente não apresentou correlação para o ajuste dos dados à equação do 1º grau, mas ajustados a um modelo do 3º grau apresentaram boa correlação, com coeficiente de correlação 0,824 e significância ao nível de 1%, resultando na equação apresentada abaixo, e representada na Fig. 22.

$$\alpha = 11,5 + 428,4 \cdot M - 2430,3 \cdot M^2 + 4374,8 \cdot M^3 \{ \text{XIV} \}$$

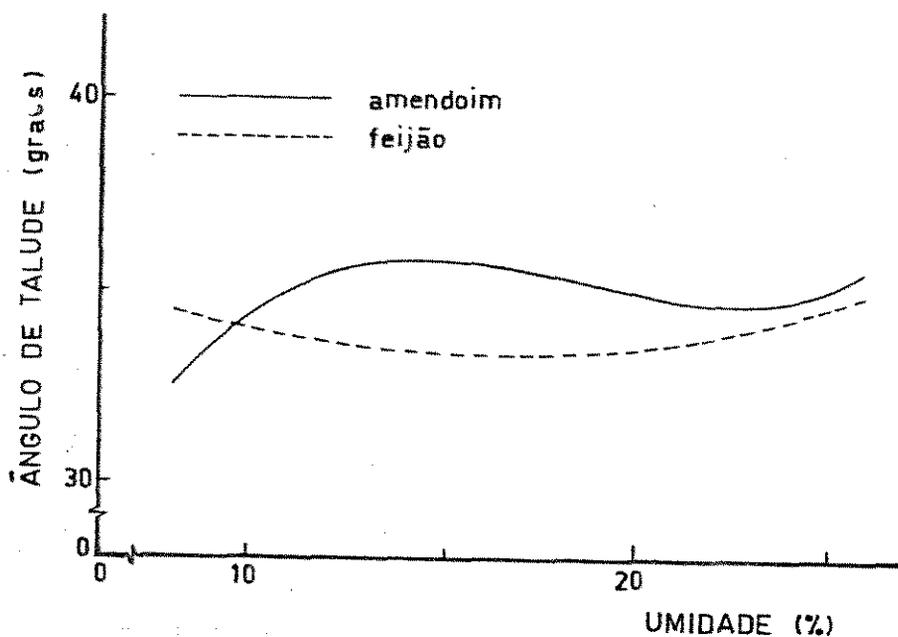


Figura 22. Ângulo de talude em função da umidade.

6.3. CONCLUSÕES

6.3.1. O ângulo de talude aumenta com o aumento do teor de umidade para os produtos: arroz em casca, feijão, milho, soja e trigo.

6.3.2. O modelo do 19 grau testado para representar os dados experimentais é muito bom para os produtos: arroz em casca, milho, soja e trigo.

6.3.3. Para os produtos amendoim e feijão o modelo de 39 grau é bom para representar os dados experimentais.

6.3.4. A metodologia empregada é muito boa para determinar o ângulo de talude.

7. COEFICIENTE DE ATRITO

7.1. MATERIAL E MÉTODOS

7.1.1. MATERIAL

O equipamento utilizado para a determinação dos coeficientes de atrito, desenvolvido por TOSELLO(53), 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 23.

O Instron Universal, modelo 1130, é um aparelho convencional, constituído basicamente de duas partes: um cabeçote (A) que se desloca em sentido vertical por meio da ação de duas roscas guias (B), um dinamômetro de tração e compressão (C), solidâ-

A-cabeçote móvel
B-barras rosqueadas
C-dinamômetro
D-registrador de força
E-base do Instron
F-suporte da superfície em estudo
G-superfície de atrito

H-rolêna guia
I-fio de aço
J-ponto de aplicação da força
K-carrinho portador do produto
L-rolamentos
M-carga normal (placa de ferro)
N-plataforma rígida

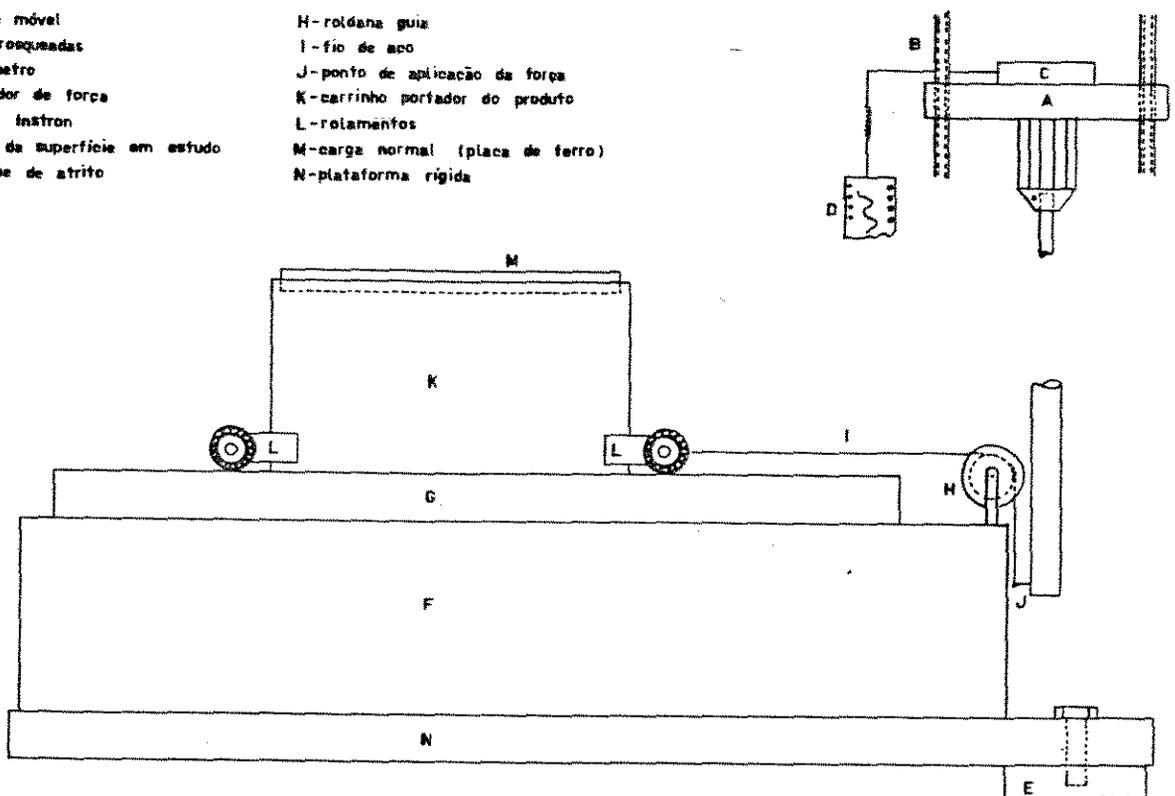


Figura 23. (Fonte: LEITÃO (34)) Esquema do equipamento acoplado ao Instron Universal para a determinação dos coeficientes de atrito.

rio ao cabeçote móvel (A); e um sistema de registro de força (D), 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 (E) encontra-se um dispositivo que consta, essencialmente, de um suporte horizontal (F), onde é colocado as superfícies de atrito a serem estudadas (G) e o carrinho contendo o produto (K), uma roldana guia (H) por onde passa o fio de aço (I) fazendo conexão entre o ponto de aplicação de força (J) e o carrinho (K) que empurra o produto 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 horizontal da superfície de atrito.

O carrinho é uma caixa retangular, sem fundo, construído de acrílico, com as seguintes dimensões: 14,8cm de comprimento, 13,0cm de largura e 8,2cm de altura. Esse carrinho está apoiado sobre rolamentos (L) que visam diminuir o atrito do sistema e manter a base do carrinho afastada dois milímetros da superfície de atrito, permitindo assim, que só o produto entre em contato com a superfície. Foram estudadas as superfícies de alumínio, duratex, chapa galvanizada, concreto e madeirite. Para aplicação da carga normal, foram utilizadas placas de ferro (M) com dimensões ligeiramente inferiores às do carrinho, colocadas sobre o produto de modo que a pressão normal aplicada fosse uniforme em todo o material.

Para o estudo do coeficiente de atrito interno utilizou-se o mesmo equipamento usado na determinação dos coeficientes de atrito com superfícies, substituindo-se a superfície por outra

caixa, de dimensões iguais a: 19,5cm de comprimento, 15,0cm de largura e 8,0cm de altura, que continha o produto em estudo (F), como pode ser observado no esquema da Figura 24.

Para a pesagem dos produtos foi utilizada uma balança Mettler P3N, com capacidade de 3.000g e divisão de 1g.

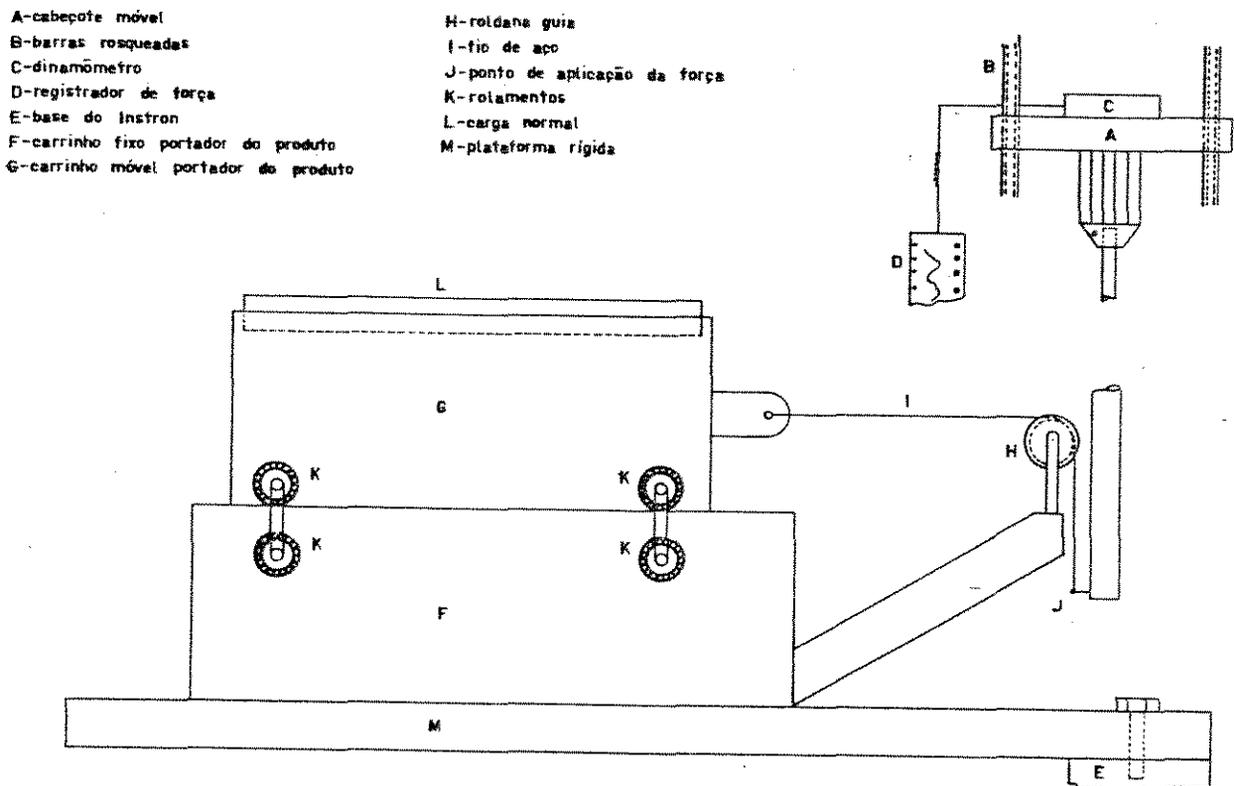


Figura 24. (Fonte: LEITÃO (34)) Esquema do equipamento acoplado ao Instron Universal para determinação do coeficiente de atrito interno.

7.1.2. MÉTODOS

A força aplicada foi registrada graficamente. Ensaios preliminares indicaram a seguinte combinação: velocidade de aplicação da força de 0,5 cm/min e velocidade da carta de registro de 20 cm/min.

Para o estudo dos coeficientes de atrito com as diversas superfícies, o carrinho foi colocado sobre cada uma delas, recebendo em seu interior o produto pesquisado, que foi mantido em contato com a superfície.

Os experimentos foram realizados com diversos valores para a força normal, dependendo de cada produto, variando de 5,366kgf a 8,742kgf (pressão sobre os grãos na superfície de contato de 27,89 g/cm² a 45,44 g/cm²), visando comprovar a constância dos valores dos coeficientes de atrito.

Para determinada superfície e produto foram realizadas duas ou três repetições a cada normal utilizada e nível de umidade.

Para a determinação dos coeficientes de atrito interno, a caixa retangular sem fundo foi colocada sobre a outra que continha em seu interior o produto pesquisado. A caixa sem fundo recebia em seu interior o produto em estudo, ficando dessa maneira em contato os grãos das duas caixas de acrílico.

O processo de determinação do atrito interno foi semelhante à determinação do atrito com superfícies, com as normais variando de 5,396kgf a 8,772kgf (pressão sobre os grãos na superfície de contato de 18,45 g/cm² a 29,99 g/cm²).

Foram realizadas duas ou três repetições para cada normal, em cada produto estudado e em cada nível de umidade.

Com base nos gráficos resultantes de cada teste determinou-se o valor da força aplicada, que relacionadas com as respectivas normais forneceram os coeficientes de atrito.

Os dados experimentais obtidos foram ajustados a um modelo do 3º grau, na forma:

$$\mu = b_0 + b_1 M + b_2 M^2 + b_3 M^3 \quad \{ XV \}$$

onde:

μ = coeficiente de atrito

M = teor de umidade, base úmida, decimal

b_0, b_1, b_2 e b_3 = constantes a determinar.

O teste de Student foi aplicado para testar a eficiência do ajuste realizado.

7.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Medidas Físicas do Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP. A temperatura do laboratório permaneceu constante, a $25^{\circ}\text{C} \pm 1,0^{\circ}\text{C}$, durante todo o transcorrer do experimento.

As Figuras 25 e 26 representam os gráficos característicos da força de atrito x deslocamento, determinados com o equipamento Instron Universal, para milho com chapa galvanizada e arroz em casca com madeirite, respectivamente. Estes gráficos foram semelhantes aos obtidos por CLARK & MCFARLAND (14) quando determinaram coeficientes de atrito com a utilização do aparelho Instron Universal.

Baseando-se na Figura 25, mostra-se um exemplo de como os coeficientes de atrito foram calculados. A escala de força adotada foi de 0,050 kg/divisão. Até o ponto onde o carrinho começa a se deslocar temos 42 divisões, indicando que a força de

atrito neste ponto foi de $0,050 \times 42 = 2,100$ kgf. A força normal aplicada, neste caso, foi de 7,189 kgf, logo, o coeficiente de atrito calculado foi de:

$$\mu = \frac{2,100 \text{ kgf}}{7,189 \text{ kgf}} = 0,292$$

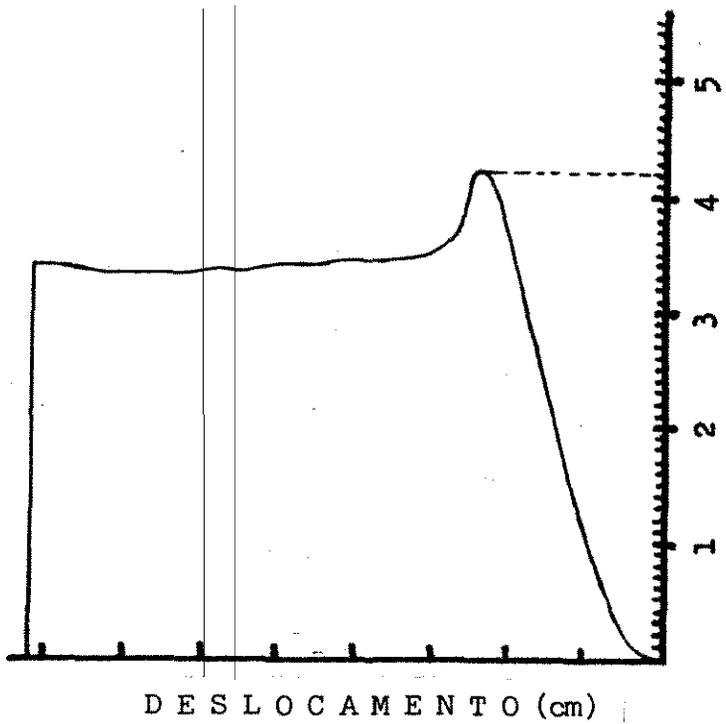


Figura 25. Gráfico característico da força de atrito x deslocamento, determinado com o equipamento Instron Universal, para a superfície de chapa galvanizada, com milho a 20,74% de umidade e força normal de 7,189 kgf.

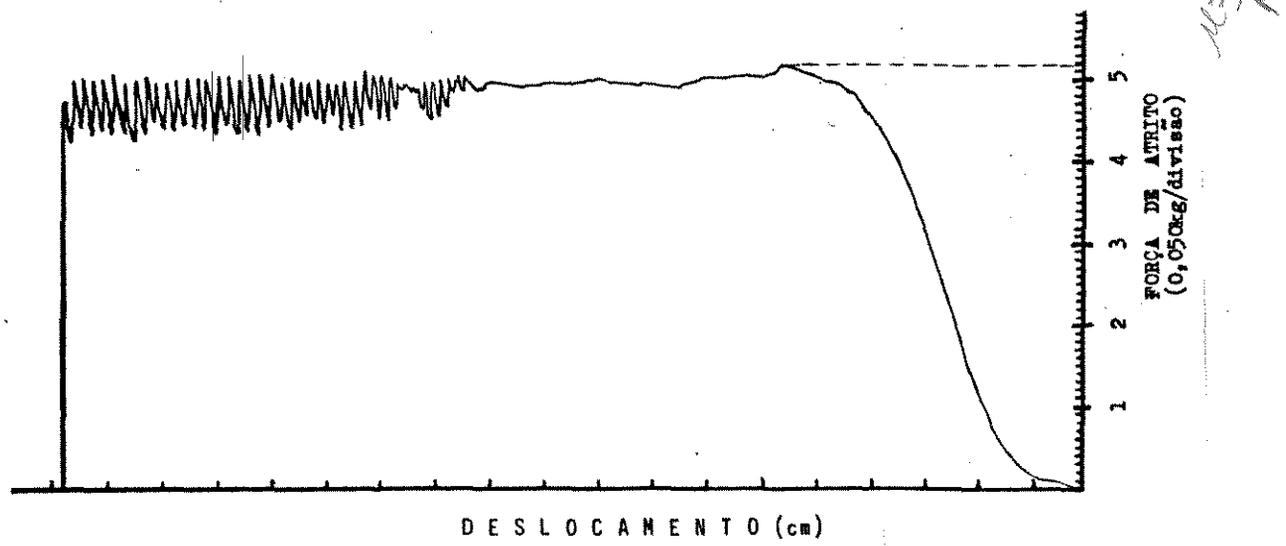


Figura 26. Gráfico característico da força de atrito x deslocamento, determinado com o equipamento Instron Universal, para a superfície de madeira com arroz em casca a 15,38% de umidade e força normal de 5,466 kgf.

Os Quadros 40 a 45 mostram os dados experimentais dos coeficientes de atrito com as várias superfícies e os coeficientes de atrito interno dos seis produtos pesquisados.

Utilizando-se esses dados experimentais foi realizado o ajuste ao modelo de 3º grau proposto, que resultou nas constantes b_0 , b_1 , b_2 e b_3 , apresentadas nos Quadros 46 a 51, com os respectivos coeficientes de correlação e nível de significância, dos produtos: amendoim, arroz em casca, feijão, milho, soja e trigo, com as superfícies de alumínio, chapa galvanizada, concreto, duratex e madeirite, e o atrito interno.

Nas Figuras 27 a 32 foram representadas as curvas, de todos os produtos, obtidas com a utilização das equações dos Quadros 46 a 51.

Excetuando-se as equações para as superfícies de alumínio e concreto com arroz em casca, todas as outras equações obtidas para todos os produtos, com todas as superfícies e para o atrito interno, podem ser utilizadas para expressar, nas faixas de umidade estudadas, a relação entre o coeficiente de atrito e o teor de umidade, pois apresentaram boas correlações para o ajuste dos dados experimentais.

A aplicação do teste de Student para estas equações indicou que todas elas foram significativas ao nível de 0,5%, resultado excelente sob o ponto de vista estatístico. Para arroz em casca com alumínio o nível de significância foi de 5,0%, e para o mesmo produto com concreto o ajuste foi não significativo.

Quadro 40. Dados experimentais de coeficiente de atrito com diversas superfícies e coeficiente de atrito interno para amendoim.

Superfície		Umidade (%)			
		9,79	14,62	21,11	26,69
Alumínio	N 1	0,238	0,348	0,244	0,601
	N 2	0,268	0,311	0,256	0,560
	N 3	0,239	0,334	0,246	0,556
	M	0,248	0,331	0,249	0,572
	DP	0,017	0,019	0,006	0,025
	CV(%)	6,86	5,64	2,59	4,35
Chapa galvanizada	N 1	0,213	0,301	0,259	0,659
	N 2	0,180	0,281	0,230	0,566
	N 3	0,163	0,275	0,206	0,499
	M	0,185	0,286	0,232	0,575
	DP	0,025	0,014	0,027	0,080
	CV(%)	13,72	4,77	11,46	13,98
Concreto	N 1	0,494	0,632	0,370	0,755
	N 2	0,443	0,639	0,345	0,690
	N 3	0,435	0,600	0,378	0,474
	M	0,457	0,624	0,364	0,640
	DP	0,032	0,021	0,017	0,147
	CV(%)	7,00	3,33	4,73	23,00
Duratex	N 1	0,259	0,396	0,590	0,799
	N 2	0,280	0,405	0,555	0,781
	N 3	0,276	0,378	0,512	0,715
	M	0,272	0,393	0,552	0,765
	DP	0,011	0,014	0,039	0,044
	CV(%)	4,10	3,50	7,07	5,78
Madeirite	N 1	0,305	0,452	0,502	0,545
	N 2	0,323	0,473	0,359	0,493
	N 3	0,305	0,412	0,337	0,470
	M	0,311	0,446	0,399	0,503
	DP	0,010	0,031	0,090	0,038
	CV(%)	3,34	6,95	22,44	7,64
Amendoim (atrito interno)	N 1	1,109	1,208	0,970	1,251
	N 2	1,024	1,048	0,911	1,250
	N 3	0,929	0,940	0,747	1,166
	M	1,021	1,065	0,876	1,222
	DP	0,090	0,135	0,116	1,049
	CV(%)	8,82	12,66	13,19	3,99

Quadro 41. Dados experimentais de coeficiente de atrito com diversas superfícies e coeficiente de atrito interno para arroz em casca.

Superfície		Umidade (%)			
		11,40	15,38	20,11	25,15
Alumínio	N 1	0,387	0,346	0,339	0,344
	N 2	0,385	0,381	0,380	0,369
	N 3	0,392	0,374	0,387	0,369
	M	0,388	0,367	0,369	0,361
	DP	0,004	0,019	0,026	0,014
	CV(%)	0,93	5,05	7,03	4,00
	Chapa galvanizada	N 1	0,226	0,240	0,156
N 2		0,217	0,243	0,154	0,206
N 3		0,221	0,223	0,173	0,190
M		0,221	0,235	0,161	0,202
DP		0,005	0,011	0,010	0,011
CV(%)		2,04	4,58	6,49	5,24
Concreto		N 1	0,500	0,458	0,444
	N 2	0,642	0,456	0,478	0,496
	N 3	0,458	0,524	0,496	0,495
	M	0,533	0,491	0,473	0,492
	DP	0,096	0,030	0,026	0,006
	CV(%)	18,08	6,11	5,59	1,24
	Duratex	N 1	0,307	0,309	0,300
N 2		0,312	0,327	0,354	0,507
N 3		0,328	0,335	0,377	0,518
M		0,316	0,324	0,344	0,506
DP		0,011	0,013	0,040	0,013
CV(%)		3,48	4,11	11,50	2,58
Madeirite		N 1	0,355	0,483	0,428
	N 2	0,358	0,496	0,451	0,551
	N 3	0,379	0,482	0,442	0,539
	M	0,364	0,487	0,440	0,542
	DP	0,013	0,008	0,012	0,008
	CV(%)	3,59	1,60	2,63	1,54
	Arroz em casca (atrito interno)	N 1	0,737	0,731	0,510
N 2		0,681	0,755	0,489	0,810
N 3		0,665	0,842	0,481	0,802
M		0,694	0,776	0,493	0,830
DP		0,038	0,058	0,015	0,042
CV(%)		5,45	7,53	3,04	5,03

Quadro 42. Dados experimentais de coeficiente de atrito com di
versas superfícies e coeficiente de atrito interno
para feijão.

Superfície		Umidade (%)			
		11,63	15,44	20,19	26,23
Alumínio	N 1	0,350	0,225	0,216	0,350
	N 2	0,304	0,253	0,266	0,355
	N 3	0,333	0,266	0,251	0,377
	M	0,329	0,248	0,244	0,361
	DP	0,023	0,021	0,026	0,014
	CV(%)	7,07	8,45	10,50	3,98
Chapa galvanizada	N 1	0,211	0,207	0,151	0,247
	N 2	0,176	0,187	0,145	0,268
	N 3	0,214	0,207	0,181	0,271
	M	0,200	0,200	0,159	0,262
	DP	0,021	0,012	0,019	0,013
	CV(%)	10,55	5,76	12,13	4,99
Concreto	N 1	0,342	0,389	0,239	0,617
	N 2	0,340	0,355	0,265	0,596
	N 3	0,320	0,405	0,278	0,611
	M	0,334	0,383	0,261	0,608
	DP	0,012	0,026	0,020	0,011
	CV(%)	3,64	6,67	7,62	1,78
Duratex	N 1	0,320	0,198	0,157	0,430
	N 2	0,233	0,203	0,167	0,460
	N 3	0,224	0,214	0,165	0,446
	M	0,259	0,205	0,163	0,445
	DP	0,053	0,008	0,005	0,015
	CV(%)	20,47	3,99	3,25	3,37
Madeirite	N 1	0,323	0,257	0,219	0,500
	N 2	0,335	0,296	0,230	0,519
	N 3	0,311	0,274	0,233	0,540
	M	0,323	0,276	0,227	0,520
	DP	0,012	0,020	0,007	0,020
	CV(%)	3,72	7,09	3,24	3,85
Feijão (atirto interno)	N 1	0,658	0,694	0,611	1,069
	N 2	0,629	0,667	0,553	1,077
	N 3	0,594	0,617	0,517	0,905
	M	0,627	0,659	0,560	1,017
	DP	0,032	0,039	0,047	0,097
	CV(%)	5,11	5,93	8,46	9,55

Quadro 43. Dados experimentais de coeficiente de atrito com diversas superfícies e coeficiente de atrito interno para milho.

Superfície		Umidade (%)			
		10,65	15,44	20,19	26,23
Alumínio	N 1	0,266	0,170	0,282	0,452
	N 2	0,257	0,176	0,271	0,482
	N 3	0,263	0,172	0,266	0,510
	M	0,262	0,173	0,273	0,481
	DP	0,005	0,003	0,008	0,029
	CV(%)	1,75	1,77	3,00	6,03
Chapa galvanizada	N 1	0,221	0,141	0,249	0,306
	N 2	0,202	0,131	0,241	0,290
	N 3	0,129	0,135	0,213	0,322
	M	0,184	0,136	0,234	0,306
	DP	0,049	0,005	0,019	0,016
	CV(%)	26,40	3,71	8,07	5,23
Concreto	N 1	0,259	0,223	0,461	0,443
	N 2	0,254	0,228	0,447	0,432
	N 3	0,177	0,221	0,435	0,439
	M	0,230	0,224	0,448	0,438
	DP	0,046	0,004	0,013	0,006
	CV(%)	19,99	1,61	2,91	1,27
Duratex	N 1	0,227	0,307	0,415	0,495
	N 2	0,221	0,416	0,430	0,473
	N 3	0,235	0,461	0,415	0,455
	M	0,228	0,395	0,420	0,474
	DP	0,007	0,079	0,009	0,020
	CV(%)	3,09	20,06	2,06	4,22
Madeirite	N 1	0,230	0,311	0,422	0,497
	N 2	0,264	0,321	0,430	0,461
	N 3	0,246	0,312	0,420	0,414
	M	0,247	0,315	0,424	0,457
	DP	0,017	0,006	0,005	0,042
	CV(%)	6,90	1,75	1,25	9,10
Milho (atrito interno)	N 1	0,672	0,522	0,644	0,617
	N 2	0,704	0,499	0,577	0,603
	N 3	0,798	0,425	0,574	0,568
	M	0,725	0,482	0,598	0,596
	DP	0,065	0,051	0,040	0,025
	CV(%)	9,04	10,52	6,62	4,24

Quadro 44. Dados experimentais de coeficiente de atrito com diversas superfícies e coeficiente de atrito interno para soja.

Superfície		Umidade (%)			
		10,31	15,25	20,10	26,87
Alumínio	N 1	0,234	0,178	0,234	0,303
	N 2	0,249	0,200	0,241	0,319
	N 3	0,255	0,202	0,250	0,315
	M	0,246	0,193	0,242	0,312
	DP	0,011	0,013	0,008	0,008
	CV(%)	4,40	6,89	3,32	2,67
Chapa galvanizada	N 1	0,230	0,162	0,113	0,230
	N 2	0,255	0,131	0,113	0,257
	N 3	0,284	0,144	0,113	0,260
	M	0,256	0,146	0,113	0,249
	DP	0,027	0,016	0,000	0,017
	CV(%)	10,54	10,69	0,00	6,64
Concreto	N 1	0,461	0,368	0,301	0,470
	N 2	0,420	0,400	0,295	0,478
	N 3	0,417	0,412	0,301	0,488
	M	0,433	0,393	0,299	0,479
	DP	0,025	0,023	0,003	0,009
	CV(%)	5,68	5,78	1,16	1,88
Duratex	N 1	0,218	0,216	0,299	0,492
	N 2	0,210	0,224	0,527	0,463
	N 3	0,214	0,237	0,503	0,469
	M	0,214	0,226	0,443	0,475
	DP	0,004	0,011	0,125	0,015
	CV(%)	1,87	4,70	28,28	3,23
Madeirite	N 1	0,278	0,221	0,352	0,463
	N 2	0,267	0,235	0,372	0,474
	N 3	0,256	0,256	0,392	0,471
	M	0,267	0,237	0,372	0,469
	DP	0,011	0,018	0,020	0,006
	CV(%)	4,12	7,42	5,38	1,21
Soja (atrito interno)	N 1	0,691	0,771	0,898	1,069
	N 2	0,646	0,752	0,876	1,025
	N 3	0,583	0,744	0,675	1,022
	M	0,640	0,756	0,816	1,039
	DP	0,054	0,014	0,123	0,026
	CV(%)	8,48	1,84	15,05	2,53

Quadro 45. Dados experimentais de coeficiente de atrito com diversas superfícies e coeficiente de atrito interno para trigo.

Superfície		Umidade (%)			
		11,19	15,60	20,11	26,76
Alumínio	N 1	0,181	0,241	0,159	0,347
	N 2	0,172	0,247	0,159	0,324
	N 3	0,170	0,232	0,175	0,315
	M	0,174	0,240	0,164	0,329
	DP	0,006	0,008	0,009	0,017
	CV(%)	3,36	3,15	5,62	5,02
Chapa galvanizada	N 1	0,185	0,216	0,135	0,307
	N 2	0,165	0,190	0,143	0,305
	N 3	0,155	0,188	0,152	0,292
	M	0,168	0,198	0,143	0,301
	DP	0,015	0,016	0,009	0,008
	CV(%)	9,07	7,89	5,93	2,70
Concreto	N 1	0,331	0,415	0,340	0,487
	N 2	0,341	0,411	0,360	0,492
	N 3	0,341	0,402	0,365	0,484
	M	0,338	0,409	0,355	0,488
	DP	0,006	0,007	0,013	0,004
	CV(%)	1,71	1,63	3,73	0,83
Duratex	N 1	0,141	0,214	0,278	0,402
	N 2	0,165	0,204	0,276	0,385
	N 3	0,146	0,206	0,285	0,376
	M	0,151	0,208	0,280	0,388
	DP	0,013	0,005	0,005	0,013
	CV(%)	8,40	2,54	1,69	3,41
Madeirite	N 1	0,155	0,183	0,210	0,373
	N 2	0,165	0,197	0,227	0,374
	N 3	0,170	0,210	0,229	0,368
	M	0,163	0,197	0,222	0,372
	DP	0,008	0,014	0,010	0,003
	CV(%)	4,68	6,87	4,70	0,87
Trigo (atrito interno)	N 1	0,606	0,781	0,617	0,805
	N 2	0,644	0,787	0,584	0,861
	N 3	0,519	0,764	0,591	0,834
	M	0,590	0,777	0,597	0,833
	DP	0,064	0,012	0,017	0,028
	CV(%)	10,87	1,54	2,91	3,36

Quadro 46. Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para amendoim, com várias superfícies e com o próprio produto.

Superfície	b_0	b_1	b_2	b_3	r	t $\frac{1}{/}$
Alumínio	- 1,814	41,212	- 254,987	502,331	0,994	28,737 *
Chapa galvanizada	- 1,879	40,891	- 250,667	494,213	0,973	13,331 *
Concreto	- 3,318	73,917	- 442,023	826,674	0,878	5,801 *
Duratex	- 0,191	7,209	- 32,124	69,465	0,991	23,411 *
Madeirite	- 1,338	30,675	- 171,552	308,842	0,860	5,329 *
Amendoim(interno)	- 1,514	51,884	- 328,967	648,124	0,827	5,652 *

* significativo ao nível de 0,5%

$\frac{1}{/}$ teste de Student para análise da significância com 10 graus de liberdade.

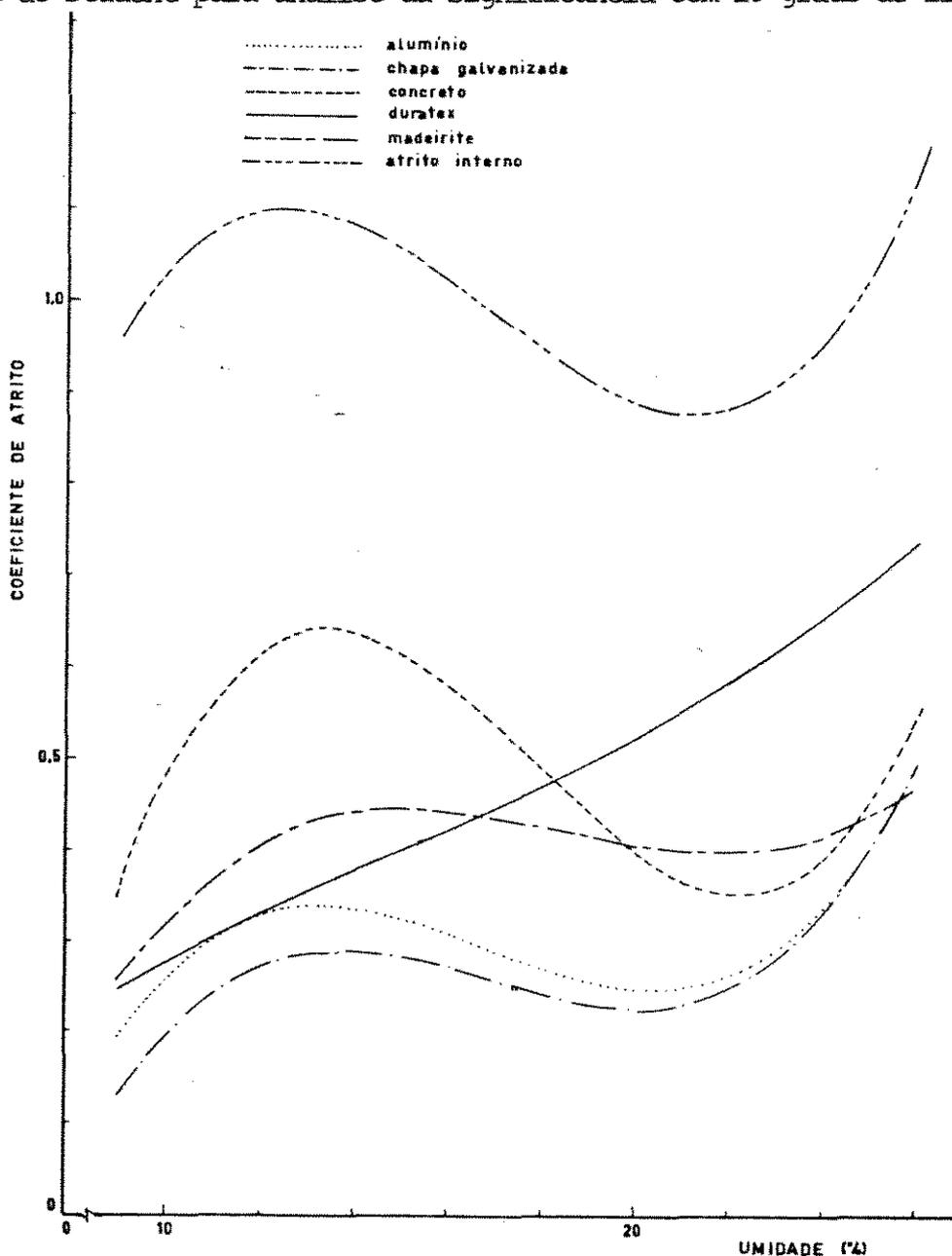


Figura 27. Coeficiente de atrito em função da umidade, do amendoim, com várias superfícies e com o próprio produto.

Quadro 47. Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para arroz em casca, com várias superfícies e com o próprio produto.

Superfície	b_0	b_1	b_2	b_3	r	t <u>2/</u>
Alumínio	0,778	- 6,644	35,270	- 61,438	0,574	2,217 **
Chapa galvanizada	- 1,398	30,404	- 180,631	338,131	0,974	13,596 *
Concreto	0,777	- 2,889	6,286	2,770	0,457	1,625 ns
Duratex	- 0,330	13,031	- 86,203	189,272	0,973	13,331 *
Madeirite	- 2,796	55,856	- 311,052	563,538	0,994	28,737 *
Arroz (interno)	- 6,841	141,842	- 848,235	1612,424	0,968	12,198 *

* significativo ao nível de 0,5%

** significativo ao nível de 5,0%

ns não significativo

2/ teste de Student para análise da significância com 10 graus de liberdade.

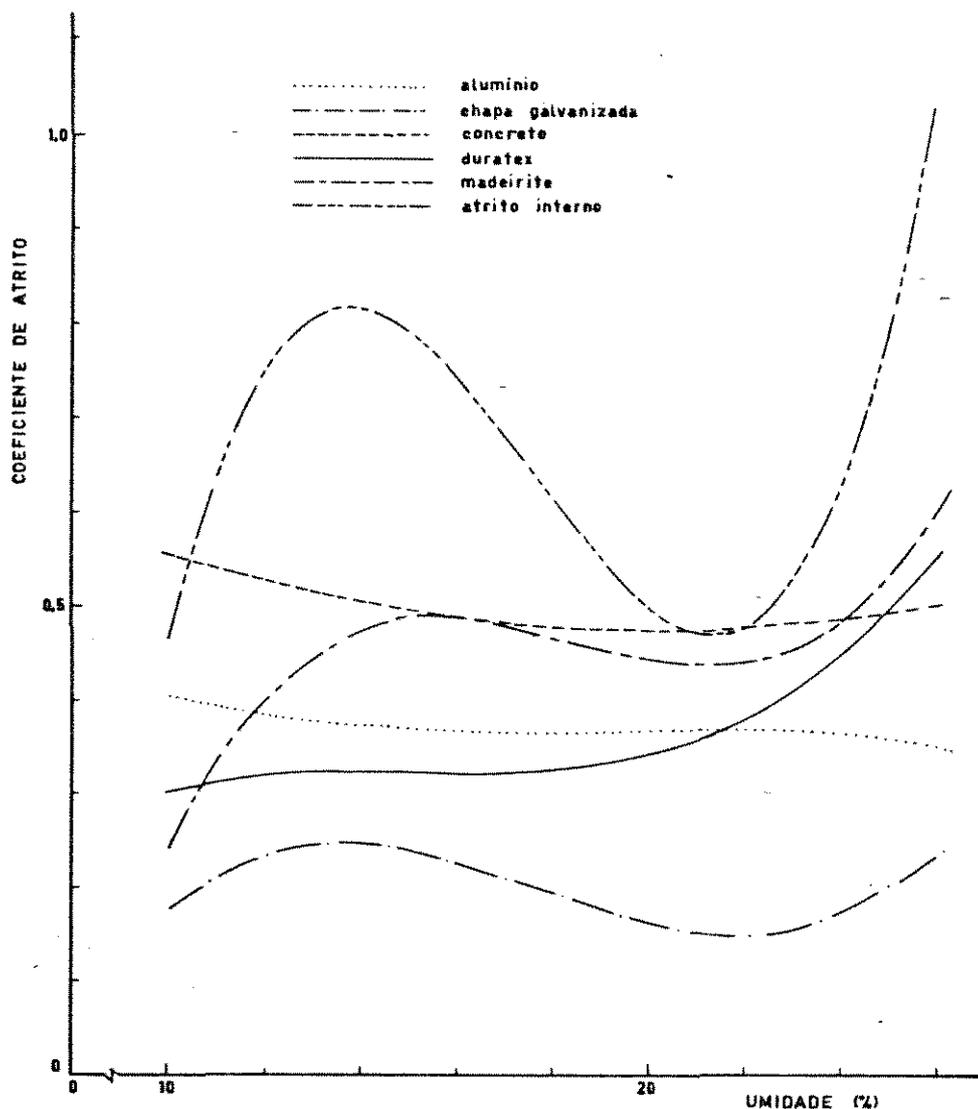


Figura 28. Coeficiente de atrito em função da umidade, do arroz em casca, com várias superfícies e com o próprio produto.

Quadro 48. Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para feijão, com várias superfícies e com o próprio produto.

Superfície	b_0	b_1	b_2	b_3	r	t <u>3/</u>
Alumínio	1,139	- 11,276	41,319	- 36,782	0,943	8,961 *
Chapa galvanizada	- 0,827	19,672	- 120,301	233,053	0,938	8,557 *
Concreto	- 3,667	74,409	- 441,520	838,649	0,995	31,504 *
Duratex	- 0,588	19,410	- 140,315	310,096	0,981	15,990 *
Madeirite	- 0,768	23,728	- 164,537	353,729	0,993	26,586 *
Feijão (interno)	- 3,156	71,597	- 434,391	846,696	0,964	11,464 *

* significativo ao nível de 0,5%

3/ teste de Student para análise da significância com 10 graus de liberdade.

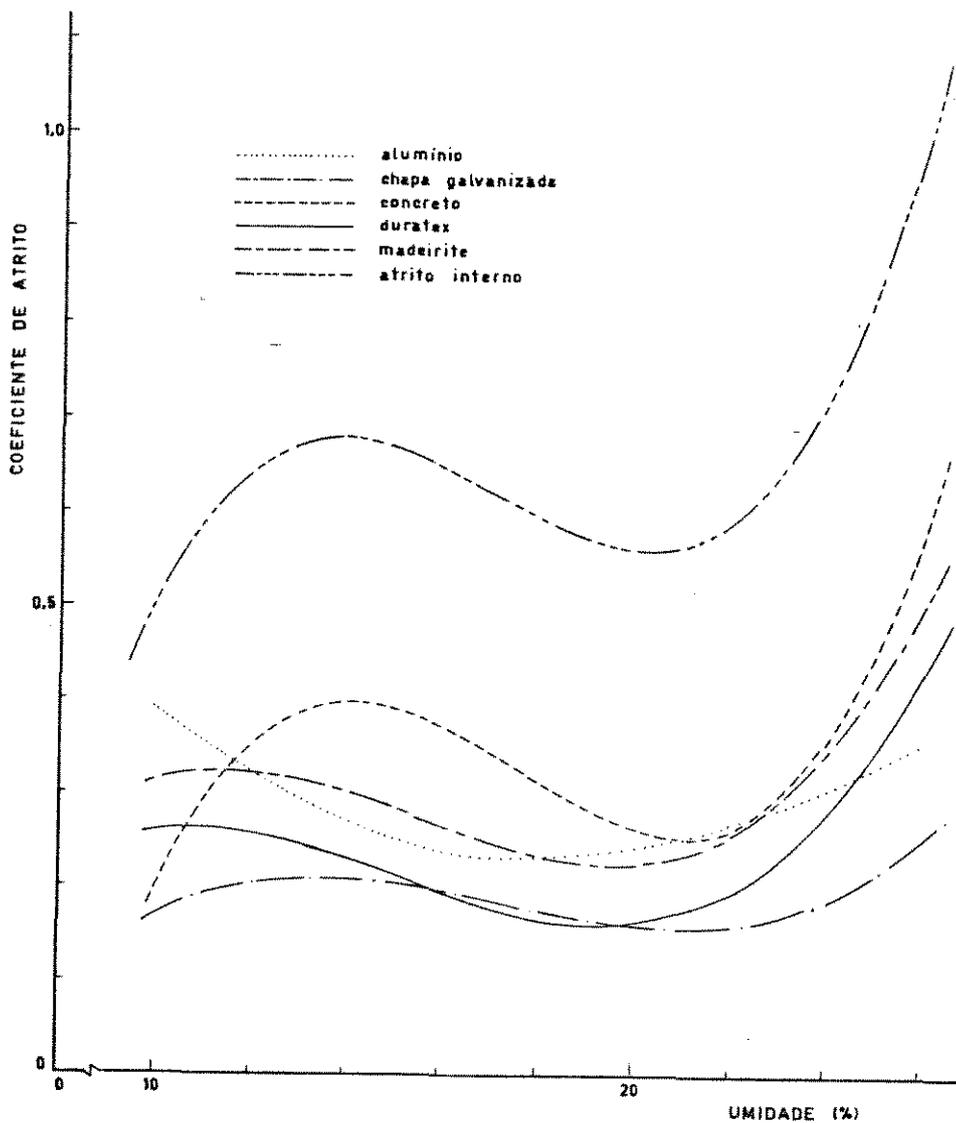


Figura 29. Coeficiente de atrito em função da umidade, do feijão, com várias superfícies e com o próprio produto.

Quadro 49. Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para milho, com várias superfícies e com o próprio produto.

Superfície	b_0	b_1	b_2	b_3	r	t <u>4/</u>
Alumínio	1,296	- 16,144	67,075	- 62,813	0,994	28,737 *
Chapa galvanizada	1,391	- 21,747	118,643	- 196,165	0,945	9,137 *
Concreto	2,599	- 46,530	284,716	- 532,208	0,985	18,051 *
Duratex	- 1,735	33,488	- 173,119	297,732	0,937	8,482 *
Madeirite	0,389	- 4,850	42,203	- 86,854	0,979	15,186 *
Milho (interno)	4,743	- 71,171	384,888	- 665,802	0,912	7,031 *

* significativo ao nível de 0,5%

4/ teste de Student para análise da significância com 10 graus de liberdade.

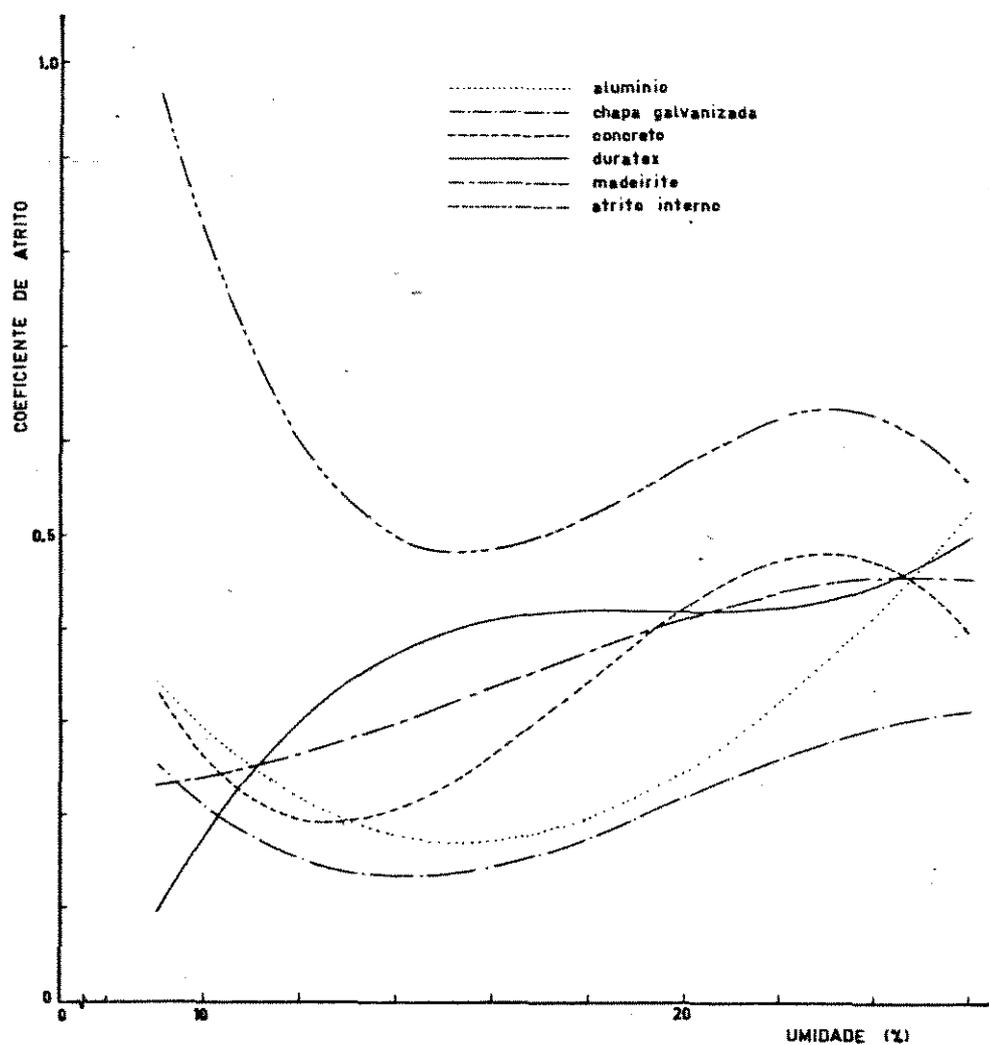


Figura 30. Coeficiente de atrito em função da umidade, do milho, com várias superfícies e com o próprio produto.

Quadro 50. Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para soja, com várias superfícies e com o próprio produto.

Superfície	b_0	b_1	b_2	b_3	r	t $\frac{5}{}$
Alumínio	1,081	- 14,822	78,029	- 124,753	0,981	15,990 *
Chapa galvanizada	0,604	- 3,462	- 3,519	42,755	0,976	14,173 *
Concreto	- 0,649	22,989	- 153,184	309,799	0,974	13,596 *
Duratex	2,358	- 42,402	258,099	- 470,317	0,919	7,371 *
Madeirite	1,749	- 28,059	161,354	- 277,842	0,991	23,411 *
Soja (interno)	- 0,323	16,789	- 90,084	172,902	0,931	8,066 *

* significativo ao nível de 0,5%

$\frac{5}{}$ teste de Student para análise da significância com 10 graus de liberdade.

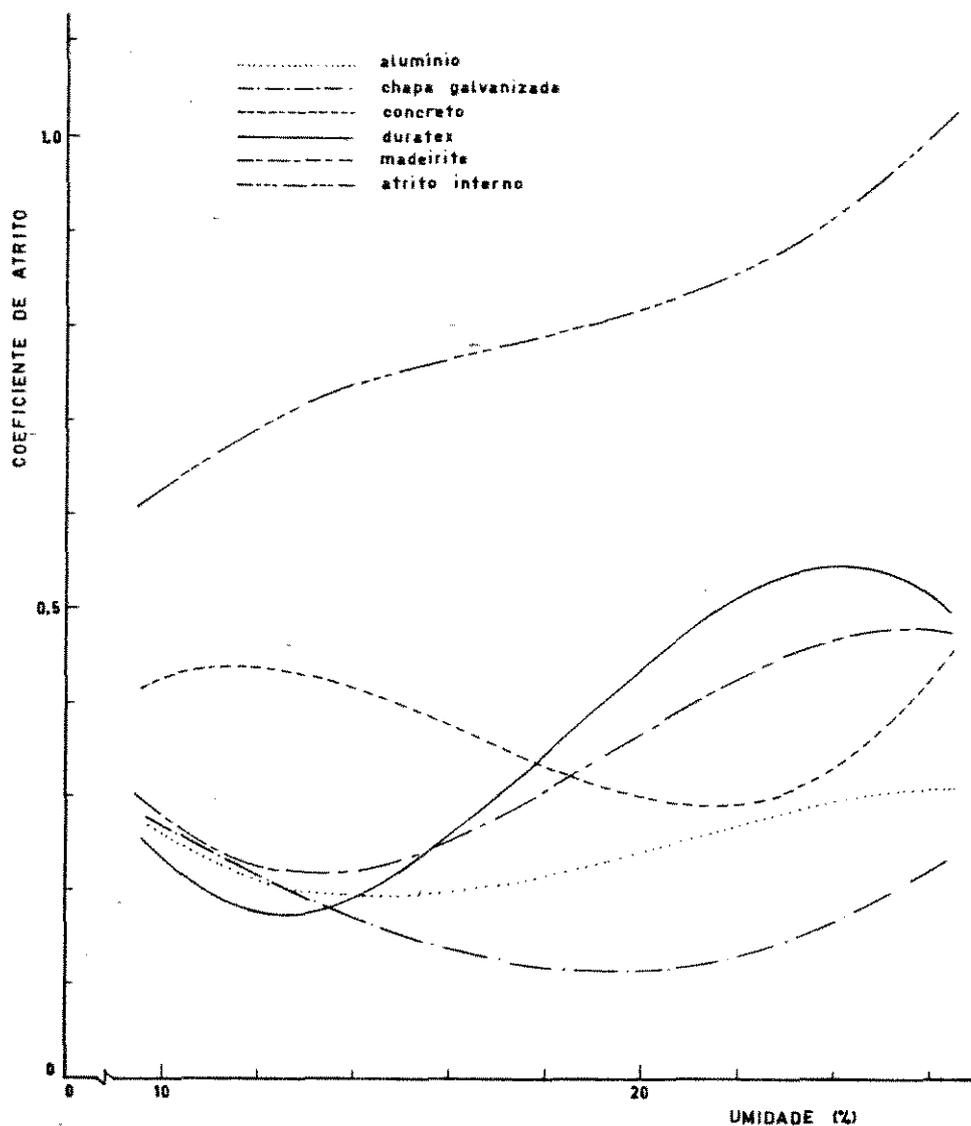


Figura 31. Coeficiente de atrito em função da umidade, da soja, com várias superfícies e com o próprio produto.

Quadro 51. Constantes da equação de coeficiente de atrito em função da umidade, para trigo, com várias superfícies e com o próprio produto.

Superfície	b_0	b_1	b_2	b_3	r	t <u>6/</u>
Alumínio	- 2,248	44,252	- 254,176	466,347	0,989	21,144 *
Chapa galvanizada	- 1,475	30,711	- 181,444	341,885	0,986	18,699 *
Concreto	- 1,758	37,756	- 213,441	387,530	0,992	29,850 *
Duratex	0,128	- 0,907	12,043	- 18,775	0,996	35,249 *
Madeirite	- 0,349	9,259	- 54,260	111,074	0,997	40,733 *
Trigo (interno)	- 5,103	102,232	- 573,892	1026,727	0,965	11,636 *

* significativo ao nível de 0,5%

6/ teste de Student para análise da significância com 10 graus de liberdade.

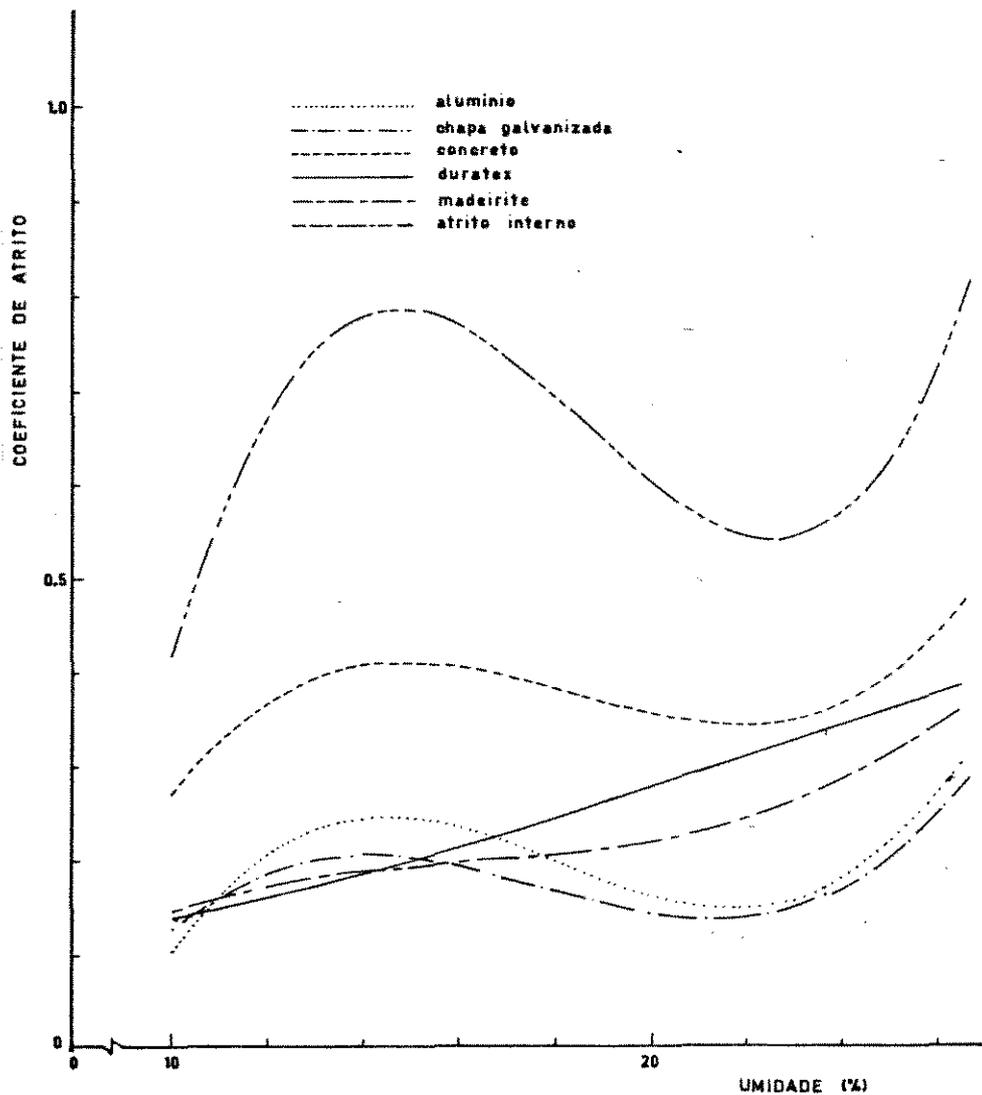


Figura 32. Coeficiente de atrito em função da umidade, do trigo, com várias superfícies e com o próprio produto.

O comportamento do amendoim com a variação do teor de umidade mostrou que, excetuando-se a superfície de duratex que apresentou o coeficiente de atrito aumentando continuamente com a umidade, as outras superfícies e o atrito interno apresentaram a tendência de aumento do coeficiente de atrito com a umidade até os níveis de 13-15%, passando então a ocorrer uma diminuição, mais ou menos acentuada dependendo de cada superfície, até os níveis de 20-22% e, voltando novamente a aumentar.

De acordo com o Quadro 40, para os níveis de umidade de 9,79 e 14,62% o amendoim apresentou a seguinte ordem crescente, das superfícies, para os valores dos coeficientes de atrito: chapa galvanizada, alumínio, duratex, madeirite e concreto; para 21,11% foi de: chapa galvanizada, alumínio, concreto, madeirite e duratex, e para 26,69% a ordem foi: madeirite, alumínio, chapa galvanizada, concreto e duratex.

A superfície de chapa galvanizada apresentou menor coeficiente de atrito, que as outras superfícies, até a umidade de 25,60%, onde ocorreu a inversão com relação à superfície de madeirite. Os coeficientes de atrito interno foram maiores que os coeficientes de atrito apresentados por todas as superfícies, para todas as umidades.

O comportamento do arroz em casca em função do teor de umidade para a superfície de alumínio indicou que o coeficiente de atrito diminuiu até a umidade de 14%, permanecendo constante até 24% e, voltando a diminuir novamente. Por sua vez, a superfície de concreto apresentou o coeficiente de atrito diminuindo até os níveis de umidade de 18-19%, com inversão dessa tendência a partir destas umidades.

A superfície de duratex mostrou um aumento do coeficiente de atrito moderadamente acentuado até a umidade de 18%, quando então passaram a aumentar rapidamente com o teor de umidade. De maneira contrária, a superfície de madeirite apresentou um acréscimo bastante acentuado do coeficiente de atrito até o nível de umidade de 14%, e a partir deste valor um aumento bem moderado.

O coeficiente de atrito com chapa galvanizada e o coeficiente de atrito interno aumentaram até as umidades de 13-14%, ocorrendo a partir daí diminuição até o nível de umidade de 22%, e, novamente, passando a aumentar com a umidade.

Em comparação com os valores encontrados na literatura, ao nível de 14% de umidade, o arroz em casca utilizado apresentou o coeficiente de atrito de 0,246 com a chapa galvanizada que é 63,4% menor que o valor de 0,402 obtido por KRAMER (32) para a mesma superfície; por sua vez, o valor do coeficiente de atrito de 0,505 para o concreto encontrou-se bastante próximo dos valores obtidos por KRAMER (32), que se situaram na faixa de 0,516 a 0,531. O coeficiente de atrito interno apresentou um valor acima do encontrado por esse pesquisador.

Baseando-se no Quadro 41, para a umidade de 11,40% os coeficientes de atrito apresentaram a seguinte ordem crescente, com relação às superfícies: chapa galvanizada, duratex, madeirite, alumínio e concreto; para 15,38 e 20,11% a seguinte ordem: chapa galvanizada, duratex, alumínio, madeirite e concreto, e para 25,15% a ordem foi: chapa galvanizada, alumínio, concreto, duratex e madeirite.

O coeficiente de atrito interno do arroz em casca foi

maior que os coeficientes de atrito com todas as superfícies em todas as umidades, enquanto que os menores coeficientes, para todas as umidades, foram obtidos com a superfície de chapa galvanizada.

O feijão apresentou as superfícies de duratex e madeirite com leve declínio no coeficiente de atrito a partir da umidade de 10-12% até 20%, onde ocorreu inversão desta tendência, e os coeficientes de atrito passaram a aumentar rapidamente com a umidade. Comportamento semelhante apresentou a superfície de chapa galvanizada, mas o aumento que ocorreu a partir de 20% de umidade foi menos acentuado que as outras duas superfícies.

Por outro lado, a superfície de alumínio mostrou diminuição do coeficiente de atrito até 17-18%, e aumento a partir dessa umidade. O coeficiente de atrito da superfície de concreto e o coeficiente de atrito interno apresentaram comportamento semelhante, com aumento até 14% de umidade, diminuindo entre esta umidade e 20-21% e, novamente, voltando a aumentar.

De acordo com o Quadro 42 o coeficiente de atrito do feijão apresentou a seguinte ordem crescente com relação às superfícies, para 11,63% de umidade: chapa galvanizada, duratex, madeirite, alumínio e concreto; para 15,44% de umidade: chapa galvanizada, duratex, alumínio, madeirite e concreto; para 20,19% de umidade: chapa galvanizada, duratex, madeirite, alumínio e concreto; e para 26,23% de umidade: chapa galvanizada, alumínio, duratex, madeirite e concreto.

O coeficiente de atrito interno foi maior que todos os coeficientes de atrito com as superfícies em todas as umidades. Das superfícies estudadas, a chapa galvanizada apresentou os me-

nores coeficientes de atrito para todas as umidades e o concreto, os maiores.

O comportamento do milho com relação a umidade mostrou que, para a superfície de alumínio, o coeficiente de atrito diminui rapidamente até a umidade em torno de 16% e, a partir deste valor aumenta rapidamente. Tendência semelhante foi verificada com a chapa galvanizada, mas a inversão ocorre em torno de 14% de umidade, e a magnitude da diminuição e do aumento é menos acentuada.

A superfície de madeirite apresentou acréscimo contínuo do coeficiente de atrito com a umidade, enquanto que, para a superfície de duratex ocorreu rápido aumento do coeficiente de atrito até 15% de umidade, permanecendo constante até 22% e aumentando rapidamente a partir daí.

O coeficiente de atrito com concreto e o coeficiente de atrito interno apresentaram comportamento semelhante, com diminuição rápida até 13-15% de umidade, aumentando a partir deste ponto até umidade em torno de 23% e, novamente, diminuindo rapidamente.

Em relação aos valores encontrados na literatura, o milho utilizado apresentou menores valores de coeficiente de atrito, em todos os níveis de umidade, que o produto utilizado por BRUBAKER & POS (7) com as superfícies de concreto e chapa galvanizada. Comparando-se com os coeficientes de atrito cinético obtidos por TSANG-MUI-CHUNG et al. (57), com madeira e chapa galvanizada, o milho Maya XX apresentou menores coeficientes de atrito em todos os níveis de umidade.

Baseando-se no Quadro 43, para a umidade de 10,65%, os

coeficientes de atrito apresentaram a seguinte ordem crescente, com relação às superfícies: chapa galvanizada, duratex, concreto, madeirite e alumínio; para 14,81% a ordem foi: chapa galvanizada, alumínio, concreto, madeirite e duratex; para 20,74% a ordem foi: chapa galvanizada, alumínio, duratex, madeirite e concreto, e para 25,18% a seguinte ordem: chapa galvanizada, concreto, madeirite, duratex e alumínio.

O coeficiente de atrito interno foi maior que os coeficientes com todas as superfícies em todas as umidades. A chapa galvanizada apresentou menor coeficiente de atrito para todas as umidades.

O comportamento da soja com a variação da umidade, para a superfície de alumínio, mostrou que o coeficiente de atrito diminui até umidade ao redor de 14% e, aumenta a partir deste valor. Para a chapa galvanizada a tendência foi semelhante, mas o ponto de inversão ocorreu em torno de 19-20% de umidade. A superfície de concreto apresentou decréscimo do coeficiente de atrito entre 11 e 21% de umidade, com aumento muito rápido para umidade superior a 21%.

As superfícies de duratex e madeirite apresentaram comportamento semelhante, onde o coeficiente de atrito diminui até umidade ao redor de 12-14%, aumentando a partir desse valor até 24-25% e, diminuindo novamente. O coeficiente de atrito interno aumentou rápida e continuamente com a umidade.

Comparando-se os valores obtidos para a soja, variedade Paranã, 10,31% de umidade, com a soja, variedade Santa Rosa, a 10,51% de umidade, utilizada por JORGE (29), constatou-se que a soja, variedade Paranã apresentou menores coeficientes de atrito

para as superfícies de alumínio, duratex e chapa galvanizada, e também menor coeficiente de atrito interno. Os coeficientes de atrito com chapa galvanizada foram maiores que os coeficientes encontrados por BRUBAKES & POS (7) e, com a superfície de concreto, foram menores.

De acordo com o Quadro 44, para a umidade de 10,31%, a ordem crescente dos coeficientes de atrito, com relação às superfícies, foi a seguinte: duratex, alumínio, chapa galvanizada, madeirite e concreto; para 15,25% a ordem foi: chapa galvanizada, alumínio, duratex, madeirite e concreto; para 20,10% foi: chapa galvanizada, alumínio, concreto, madeirite e duratex; e para a umidade de 26,87% foi: chapa galvanizada, alumínio, madeirite, duratex e concreto.

O coeficiente de atrito interno foi maior que os coeficientes de atrito com todas as superfícies em todas as umidades.

O trigo apresentou comportamento semelhante entre o coeficiente de atrito interno e os coeficientes de atrito com alumínio, chapa galvanizada e concreto, onde os mesmos aumentam até umidade em torno de 13-15%, com inversão dessa tendência até 21-24% e, novamente, voltando a aumentar. Por outro lado, as superfícies de duratex e madeirite apresentaram os coeficientes de atrito aumentando continuamente com a umidade.

Comparando-se os dados obtidos com os valores da literatura, os coeficientes de atrito para trigo foram menores, em todas as umidades, que os encontrados por BRUBAKER & POS (7) com concreto e madeira, e com relação a chapa galvanizada, maiores até a umidade de 13% e menores acima desse valor. Em relação aos coeficientes obtidos por LAWTON (33), nosso produto mostrou-se com coeficientes de atrito substancialmente diferentes.

Baseando-se no Quadro 45, para a umidade de 11,19%, os coeficientes de atrito apresentaram a seguinte ordem crescente, com relação às superfícies: duratex, madeirite, chapa galvanizada, alumínio e concreto; para 15,60% a ordem foi: madeirite, chapa galvanizada, duratex, alumínio e concreto; as umidades de 20,11 e 26,76% apresentaram a seguinte ordem: chapa galvanizada, alumínio, madeirite, duratex e concreto.

A superfície de concreto apresentou o maior coeficiente de atrito que as outras superfícies em todas as umidades. Por sua vez, o coeficiente de atrito interno foi maior que os coeficientes com todas as superfícies.

7.3. CONCLUSÕES

7.3.1. Todas as equações obtidas servem para representar o coeficiente de atrito em função da umidade, excetuando-se as superfícies de alumínio e concreto com arroz em casca, pois apresentaram boas correlações e alto nível de significância.

7.3.2. De uma forma geral, a superfície de chapa galvanizada apresentou os menores coeficientes de atrito e a superfície de concreto os maiores.

7.3.3. De uma forma geral, considerando-se toda a faixa de umidade pesquisada, pode-se verificar uma tendência de aumento no coeficiente de atrito em função da elevação da umidade.

7.3.4. Os resultados mostraram que os valores dos coeficientes de atrito são substancialmente diferentes ao se comparar baixas umidades do produto (armazenagem tradicional) com altas umidades (armazenagem úmida), o que alerta para cuidados especiais no dimensionamento de silos, em função da forma como o grão será armazenado.

8. VELOCIDADE TERMINAL

8.1. MATERIAL E MÉTODOS

8.1.1. MATERIAL

Para a determinação desta propriedade foi utilizado um aparelho construído na Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da UNICAMP, que se encontra representado no esquema da Figura 33.

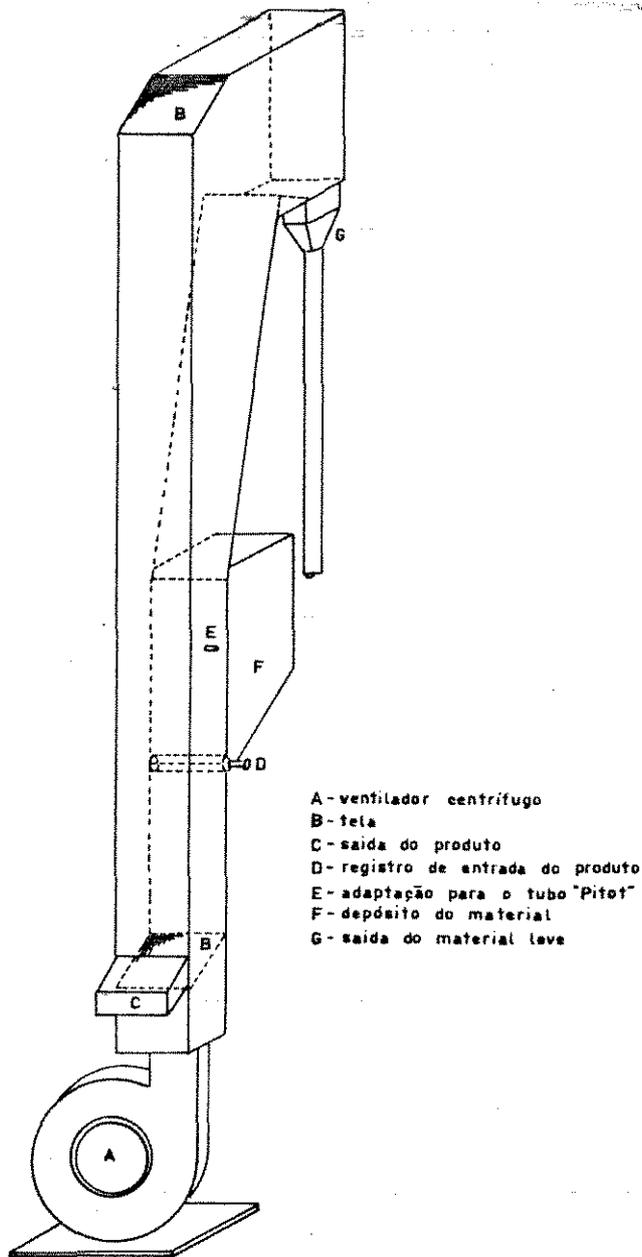


Figura 33. (Fonte: LEITÃO (34)) Esquema da coluna pneumática para se paração e determinação da velocidade terminal.

Consiste basicamente em uma coluna vertical de seções transversais de forma retangular, construída de acrílico, o que permite a visualização do fenômeno. Nessa coluna pode ser injetado um fluxo de ar através de um ventilador centrífugo (marca JOMAR, tipo FT2, 1CV, 2,2 amperes, 3600 rpm e 220/380 volts), fluxo esse que pode ser regulado pelo aumento ou diminuição da tomada de ar do ventilador. A alimentação de grãos é feita pela parte inferior da coluna, sendo o fluxo regulado manualmente por um sistema de pás rotati

vas que impedem o escape de ar pelo tubo de alimentação. Na parte intermediária da coluna vertical há adaptações para serem inseridos tubos de "pitot" para a determinação da velocidade do ar.

As dimensões dos produtos foram determinadas com um paquímetro Mitutoyo, com precisão de centésimo de milímetro. Para a pesagem foram utilizadas uma balança semi analítica STANTON D42T com precisão de 0,01g e uma balança analítica de precisão com quatro casas decimais.

A velocidade do ar foi determinada através do "pitot" da F.W. Dwyer Manufacturing Co. com capacidade de medidas até 4572 cm/s.

8.1.2. MÉTODOS

Procurou-se, na coluna de acrílico, o ponto de equilíbrio para as amostras dos vários grãos, sujeitas ao fluxo de ar, regulando-se a entrada de ar do ventilador. Cada amostra era constituída por 50g de grãos e a determinação foi visual. No momento em que o equilíbrio foi alcançado, a velocidade do ar foi calculada com base na leitura do "pitot" adaptado ao aparelho.

Foram realizadas 10 repetições para cada produto em cada nível de umidade. A temperatura do ar foi medida em cada um dos experimentos.

Essa velocidade terminal experimental foi comparada com a velocidade terminal teórica, obtida com base nas características físicas do produto e nas características do ar.

Para o cálculo da velocidade terminal teórica tomou-se 25 grãos de cada produto, ao acaso, em cada nível de umidade e,

individualmente, mediu-se as três dimensões características. Os mesmos grãos também foram pesados.

Baseando-se nas dimensões calculou-se o diâmetro equivalente, definido por MOHSEIN (36), como:

$$Deq = (d_1 \cdot d_2 \cdot d_3)^{\frac{1}{3}} \quad \{ XVI \}$$

onde:

Deq = diâmetro equivalente, em cm.

d_1, d_2, d_3 = as três dimensões do grão, em cm.

Considerando-se o grão como uma esfera, utilizou-se o diâmetro equivalente para o cálculo da área projetada, definida por MOHSEIN (36), como:

$$A_p = \frac{\pi}{4} Deq^2 \quad \{ XVII \}$$

onde:

A_p = área projetada, em cm^2

Deq = diâmetro equivalente, em cm.

As médias dos valores da massa do grão, do diâmetro equivalente e da área projetada foram utilizadas nas equações { V } e { VII } .

Os dados de velocidade terminal experimental e velocidade terminal teórica foram ajustados, para cada produto, a dois modelos matemáticos. Um de 2º grau, na forma:

$$V_t = c_0 + c_1 M + c_2 M^2 \quad \{ XVIII \}$$

onde:

$V_t = V_{te}$ = velocidade terminal experimental, em cm/s

$V_t = V_{tt}$ = velocidade terminal teórica, em cm/s

M = teor de umidade, em %

$c_0, c_1, c_2,$ = constantes a determinar

O outro, de 3º grau, na forma:

$$V_t = c_0 + c_1 M + c_2 M^2 + c_3 M^3 \quad \{ \text{XIX} \}$$

onde:

$V_t = V_{te}$ = velocidade terminal experimental, em cm/s

$V_t = V_{tt}$ = velocidade terminal teórica, em cm/s

M = teor de umidade, em %

c_0, c_1, c_2, c_3 = constantes a determinar

Para verificar a consistência do ajuste realizado o teste de Student foi aplicado aos resultados obtidos.

8.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os Quadros 52 a 57 apresentam os dados experimentais da velocidade terminal em função da umidade para os seis produtos pesquisados.

A velocidade terminal média mostrada nesses Quadros foi utilizada para o ajuste matemático aos modelos propostos, resultando nas constantes apresentadas nos Quadros 58 e 59, com os respectivos coeficientes de correlação e nível de significância.

Quadro 52. Dados experimentais de velocidade terminal do amendoim, em cm/s

M (%)	9,95	14,58	21,11	26,16
1	1468,12	1437,64	1422,40	1437,64
2	1422,40	1407,16	1391,92	1391,92
3	1447,80	1422,40	1437,64	1468,12
4	1468,12	1468,12	1437,64	1391,92
5	1422,40	1447,80	1422,40	1437,64
6	1468,12	1437,64	1422,40	1376,68
7	1407,16	1437,64	1437,64	1447,80
8	1437,64	1468,12	1422,40	1407,16
9	1468,12	1422,40	1447,80	1407,16
10	1468,12	1422,40	1376,68	1437,64
Média	1447,80	1437,13	1421,89	1420,37
DP	23,83	19,96	22,01	29,45
CV(%)	1,65	1,39	1,55	2,07

Quadro 53. Dados experimentais de velocidade terminal do arroz em casca, em cm/s.

M (%)	11,32	15,73	19,95	25,48
1	833,12	878,84	858,52	858,52
2	812,80	858,52	878,84	812,80
3	812,80	878,84	858,52	887,84
4	762,00	909,32	833,12	833,12
5	833,12	878,84	878,84	858,52
6	787,40	858,52	909,32	833,12
7	858,52	909,32	833,12	858,52
8	812,80	878,84	909,32	833,12
9	878,84	909,32	878,84	833,12
10	787,40	909,32	858,52	812,80
Média	817,88	886,97	869,70	841,25
DP	34,79	20,77	26,75	21,58
CV(%)	4,25	2,34	3,08	2,57

Quadro 54. Dados experimentais de velocidade terminal do feijão, em cm/s.

M (%)	11,16	15,58	20,46	26,32
1	1391,92	1407,16	1447,80	1447,80
2	1376,68	1407,16	1422,40	1422,40
3	1391,92	1422,40	1376,69	1447,80
4	1376,68	1391,92	1407,16	1447,80
5	1346,20	1437,64	1407,16	1437,64
6	1315,72	1422,40	1376,68	1422,40
7	1346,20	1422,40	1447,80	1437,64
8	1391,92	1437,64	1422,40	1437,64
9	1391,92	1422,40	1407,16	1391,92
10	1361,44	1407,16	1422,40	1376,68
Média	1369,06	1417,83	1413,76	1426,97
DP	26,15	14,46	24,54	24,59
CV(%)	1,91	1,02	1,74	1,72

Quadro 55. Dados experimentais de velocidade terminal do milho, em cm/s.

M (%)	10,71	15,18	19,89	25,18
1	1168,40	1254,76	1270,00	1203,96
2	1219,20	1270,00	1254,76	1270,00
3	1186,18	1219,20	1285,24	1203,96
4	1186,18	1186,18	1219,20	1219,20
5	1203,96	1254,76	1254,76	1186,18
6	1168,40	1219,20	1254,76	1186,18
7	1168,40	1270,00	1270,00	1219,20
8	1168,40	1219,20	1270,00	1186,18
9	1168,40	1236,98	1236,98	1203,96
10	1186,18	1254,76	1148,08	1236,98
Média	1182,37	1238,50	1246,38	1211,58
DP	17,77	27,15	39,28	26,42
CV(%)	1,50	2,19	3,15	2,18

Quadro 56. Dados experimentais de velocidade terminal da soja, em cm/s.

M (%)	10,38	15,33	19,84	27,27
1	1447,80	1422,40	1498,60	1468,12
2	1437,64	1407,16	1483,36	1407,16
3	1447,80	1437,64	1498,60	1391,92
4	1422,40	1498,60	1483,36	1391,92
5	1422,40	1468,12	1468,12	1407,16
6	1422,40	1447,80	1447,80	1361,44
7	1437,64	1437,64	1422,40	1376,68
8	1391,92	1447,80	1468,12	1391,92
9	1391,92	1437,64	1468,12	1407,16
10	1407,16	1483,36	1437,64	1437,64
Média	1422,91	1448,82	1467,61	1404,11
DP	20,66	27,60	25,28	30,31
CV(%)	1,45	1,90	1,72	2,16

Quadro 57. Dados experimentais de velocidade terminal do trigo, em cm/s.

M (%)	11,04	15,29	19,56	26,76
1	1076,96	1112,52	1076,96	1076,96
2	1036,32	1097,28	1097,28	1016,00
3	995,68	1112,52	1097,28	1097,28
4	1056,64	1127,76	1056,64	1016,00
5	1016,00	1016,00	1036,32	995,68
6	995,68	1076,96	1056,64	1016,00
7	1036,32	1076,96	1076,96	1016,00
8	1016,00	1097,28	1076,96	975,36
9	1056,64	1112,52	1097,28	1056,64
10	995,68	1112,52	1112,52	1016,00
Média	1028,19	1094,23	1078,48	1028,19
DP	29,05	31,97	23,47	37,35
CV(%)	2,04	2,92	2,18	3,63

Quadro 58. Constantes da equação de 2º grau da velocidade terminal experimental em função da umidade.

Produto	c_0	c_1	c_2	r	t $\frac{1}{/}$
amendoim	1490,02	- 5,08115	0,0915149	0,9986	26,698 *
arroz em casca	505,346	40,0018	- 1,05771	0,9266	3,485 **
feijão	1229,37	16,9949	- 0,364735	0,9225	3,380 **
milho	896,568	37,3454	- 0,98741	0,9968	17,635 *
soja	1232,65	25,2734	- 0,69427	0,9723	5,883 **
trigo	746,566	36,915	- 0,989473	0,9456	4,111 **

* significativo ao nível de 0,5%

** significativo ao nível de 5,0%

1/ teste t de Student para análise da significância com 2 graus de liberdade.

Quadro 59. Constantes da equação de 3º grau da velocidade terminal experimental em função da umidade.

Produto	c_0	c_1	c_2	c_3	r	t $\frac{2}{/}$
amendoim	1436,01	5,17553	- 0,511894	0,011132	1,0000	∞ *
arroz em casca	317,7	188,758	- 9,56385	0,154667	1,0000	∞ *
feijão	658,888	119,208	- 6,12713	0,102838	0,9980	22,327 *
milho	772,138	60,5841	- 2,3526	0,0254036	0,9995	44,705 *
soja	1531,26	- 30,0797	- 2,4828	- 0,0568668	0,9988	28,842 *
trigo	55,673	161,772	- 8,07027	0,126423	1,0000	∞ *

* significativo ao nível de 0,5%

2/ teste t de Student para análise da significância com 2 graus de liberdade

Analisando-se os Quadros 58 e 59 nota-se que a velocidade terminal experimental em função do teor de umidade dos produtos pode ser representada por todas as equações obtidas, do modelo de 2º grau e do 3º grau, pois apresentaram boas correlações e alto nível de significância.

Para o cálculo da velocidade terminal teórica foram utilizados os valores apresentados no Quadro 60. O diâmetro equivalente e a área projetada foram calculados de acordo com as equações { XVI } e { XVII }, respectivamente.

O peso específico da partícula (ρ_p), para cada produto em cada nível de umidade, foi calculado utilizando-se as equações do Quadro 31. O valor de $g = 979 \text{ cm/s}^2$ foi extraído de JORGE (29), p.39. As características do ar, densidade e viscosidade, foram extraídas de PERRY & CHILTON (41) levando em consideração os valores de temperatura. A densidade do fluido (ar) utilizada nos cálculos foi de $\rho_f = 0,0012928 \text{ g/cm}^3$.

Primeiramente esses dados foram utilizados na equação { VII }. Com os valores de $C Re^2$ e pelo relacionamento entre $C Re^2$, C e Re , encontrado em HENDERSON & PERRY (28), chegamos aos valores de C e Re teórico.

Pela equação { V } foi calculada a velocidade terminal teórica (V_{tt}). Os resultados para $C Re^2$, C , Re teórico e V_{tt} são apresentados no Quadro 61.

O coeficiente aerodinâmico de arraste C , considerando todos os produtos, variou de 0,391 a 0,410, e o número de Reynolds teórico entre 2.800 e 11.150. Esses dados mostram concordância com os valores apresentados por HENDERSON & PERRY (28), em que para a faixa de Reynolds de $1,0 \times 10^3$ a $2,5 \times 10^5$, e considerando corpos esféricos, o coeficiente de arraste é aproximadamente

constante, em torno de 0,44. A faixa apresentada pelo número de Reynolds indicou, para nosso experimento, um fluxo de ar, correspondente às velocidades terminais, em regime turbulento (28).

Os valores de V_{tt} apresentados no Quadro 61 foram utilizados para o ajuste matemático aos modelos propostos, resultando nas constantes apresentadas nos Quadros 62 e 63, com os respectivos coeficientes de correlação e nível de significância.

Com exceção do trigo para o modelo do 2º grau da velocidade terminal teórica em função da umidade, todas as outras equações obtidas para este modelo apresentaram boas correlações e ótimo nível de significância, indicando a possibilidade de suas utilizações para representar a variação da velocidade terminal com a umidade. Por outro lado, o modelo de 3º grau apresentou ótimas correlações e nível de significância de 0,5%, para todos os produtos, indicando que a utilização dessas equações é ainda mais viável.

A opção pela utilização de dois modelos diferentes para representar a velocidade terminal, teórica e experimental, em função do teor de umidade, deveu-se ao fato que o modelo de 2º grau pareceu, a princípio, mais lógico para descrever o fenômeno, baseado nos dados experimentais e na faixa de umidade pesquisada; e o modelo de 3º grau porque apresentou, para todos os produtos, melhores correlações e nível de significância para o ajuste matemático realizado.

As Figuras 34 a 39 representam as curvas obtidas com a utilização das equações apresentadas nos Quadros 58 e 59, e nos Quadros 62 e 63.

Quadro 60. Dados utilizados para o cálculo da velocidade terminal teórica.

Produto	M (%)	d ₁ cm	d ₂ cm	d ₃ cm	Deq cm	A _p cm ²	m g	T °C	ρ _p g/cm ³	μ _{ar} centi- poise
Amendoim	9,95	1,240	0,806	0,916	0,971	0,741	0,4698	26,0	1,038	0,0181
	14,58	1,248	0,804	0,900	0,967	0,734	0,5144	31,0	1,036	0,0183
	21,11	1,188	0,914	0,806	0,957	0,716	0,5316	27,0	1,033	0,0181
	26,16	1,286	0,916	0,864	1,006	0,795	0,5785	27,0	1,031	0,0181
Arroz em casca	11,32	0,936	0,315	0,220	0,402	0,127	0,0340	32,0	1,174	0,0183
	15,73	0,944	0,317	0,223	0,407	0,130	0,0379	27,0	1,204	0,0181
	19,95	0,920	0,305	0,221	0,396	0,123	0,0357	32,0	1,233	0,0183
	25,48	0,949	0,320	0,228	0,411	0,133	0,0387	31,5	1,270	0,0183
Feijão	11,16	0,962	0,660	0,474	0,670	0,353	0,2184	33,0	1,274	0,0185
	15,58	0,964	0,655	0,467	0,666	0,348	0,2135	26,0	1,259	0,0181
	20,46	0,995	0,677	0,472	0,683	0,366	0,2395	31,0	1,243	0,0183
	26,32	1,002	0,670	0,488	0,689	0,373	0,2528	33,0	1,224	0,0185
Milho	10,71	1,205	1,048	0,432	0,817	0,524	0,3894	26,5	1,224	0,0181
	15,18	1,275	1,069	0,433	0,839	0,553	0,4005	26,0	1,208	0,0181
	19,89	1,315	1,093	0,432	0,853	0,571	0,4156	32,0	1,191	0,0183
	25,18	1,357	1,106	0,437	0,869	0,593	0,4538	31,5	1,173	0,0183
Soja	10,38	0,664	0,550	0,638	0,615	0,297	0,1494	31,0	1,200	0,0183
	15,33	0,668	0,557	0,644	0,621	0,303	0,1547	25,0	1,189	0,0181
	19,84	0,704	0,566	0,654	0,639	0,321	0,1701	31,0	1,179	0,0183
	27,27	0,747	0,566	0,659	0,653	0,335	0,1865	26,5	1,162	0,0181
Trigo	11,04	0,572	0,320	0,271	0,367	0,106	0,0373	32,0	1,316	0,0183
	15,29	0,566	0,318	0,270	0,365	0,105	0,0375	27,0	1,296	0,0181
	19,56	0,577	0,328	0,279	0,375	0,110	0,0416	35,0	1,276	0,0185
	26,76	0,584	0,332	0,280	0,379	0,113	0,0416	33,0	1,243	0,0185

Quadro 61. Velocidade terminal teórica (V_{tt}), C_{Re} , C e Re teórico, para os produtos pesquisados.

Produto	M (%)	C_{Re}	C	Re teórico	V_{tt} (cm/s)
Amendoim	9,95	$46,1 \times 10^6$	0,407	10.400	1535,04
	14,58	$49,4 \times 10^6$	0,408	10.650	1611,91
	21,11	$52,2 \times 10^6$	0,409	10.850	1653,62
	26,16	$56,8 \times 10^6$	0,410	11.150	1638,49
Arroz em casca	11,32	$3,27 \times 10^6$	0,403	2.850	1002,50
	15,73	$3,72 \times 10^6$	0,400	3.050	1050,09
	19,95	$3,43 \times 10^6$	0,402	2.800	1045,16
	25,48	$3,72 \times 10^6$	0,400	3.050	1049,11
Feijão	11,16	$20,5 \times 10^6$	0,391	7.200	1547,29
	15,58	$21,0 \times 10^6$	0,391	7.250	1540,77
	20,46	$23,0 \times 10^6$	0,393	7.550	1587,20
	26,32	$23,8 \times 10^6$	0,393	7.650	1615,28
Milho	10,71	$38,3 \times 10^6$	0,403	9.700	1670,29
	15,18	$39,4 \times 10^6$	0,404	9.850	1646,86
	19,89	$40,0 \times 10^6$	0,405	9.950	1648,91
	25,18	$43,6 \times 10^6$	0,406	10.200	1688,66
Soja	10,38	$14,4 \times 10^6$	0,388	6.000	1400,52
	15,33	$15,2 \times 10^6$	0,388	6.200	1410,95
	19,84	$16,4 \times 10^6$	0,389	6.450	1435,58
	27,27	$43,6 \times 10^6$	0,390	6.850	1469,55
Trigo	11,04	$3,59 \times 10^6$	0,400	3.000	1153,72
	15,29	$3,69 \times 10^6$	0,400	3.050	1162,29
	19,56	$3,91 \times 10^6$	0,399	3.100	1197,52
	26,76	$3,91 \times 10^6$	0,399	3.100	1181,51

Quadro 62. Constantes da equação de 2º grau da velocidade terminal teórica em função da umidade

Produto	c_0	c_1	c_2	r	t $\frac{3/}{}$
amendoim	1248,66	37,3798	- 0,859808	0,9991	33,311 *
arroz em casca	830,764	21,0708	- 0,49438	0,9316	3,625 **
feijão	1556,34	- 3,87469	0,236738	0,9554	4,575 **
milho	1837,31	- 22,7254	0,667792	0,9934	12,248 *
soja	1381,95	0,70929	0,0926696	0,9958	15,382 *
trigo	1028,65	14,5362	- 0,32702	0,8820	2,647 ns

* significativo ao nível de 0,5%

** significativo ao nível de 5,0%

ns não significativo

3/ teste t de Student para análise da significância com 2 graus de liberdade.

Quadro 63. Constantes da equação de 3º grau da velocidade terminal teórica em função da umidade.

Produto	c_0	c_1	c_2	c_3	r	t $\frac{4/}{}$
amendoim	1217,38	43,3201	- 1,20928	$6,44727 \times 10^{-3}$	0,9992	35,334 *
arroz em casca	233,789	128,967	- 6,66409	0,112184	1,0000	∞ *
feijão	2147,69	- 109,828	6,21	- 0,106601	0,9987	27,708 *
milho	1808,28	- 17,3036	0,349286	$5,92683 \times 10^{-3}$	0,9937	12,539 *
soja	1519,46	- 24,7805	1,55569	- 0,0261869	1,0000	∞ *
trigo	1599,49	- 88,6257	5,52342	- 0,104456	1,0000	∞ *

* significativo ao nível de 0,5%

4/ teste t de Student para análise da significância com 2 graus de liberdade.

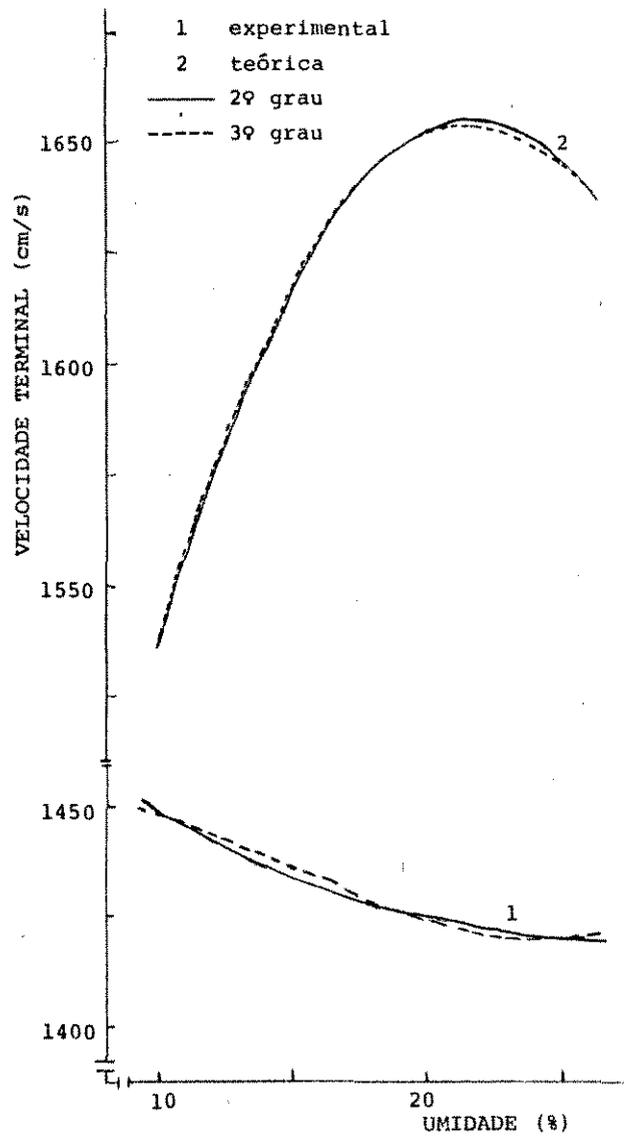


Figura 34. Velocidade terminal, do amendoim, em função da umidade.

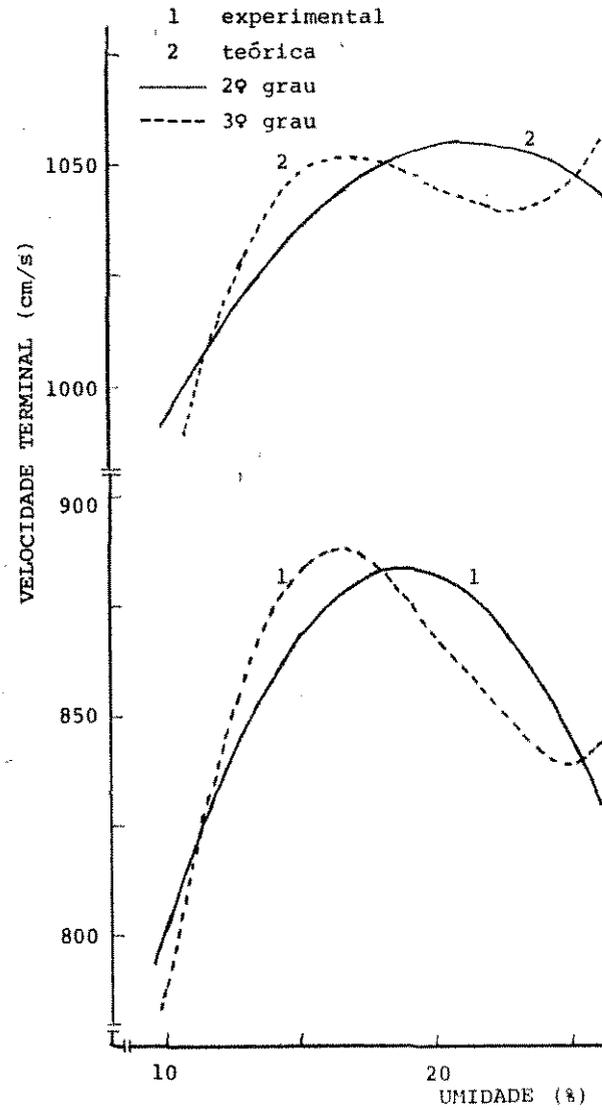


Figura 35. Velocidade terminal, do arroz em casca, em função da umidade.

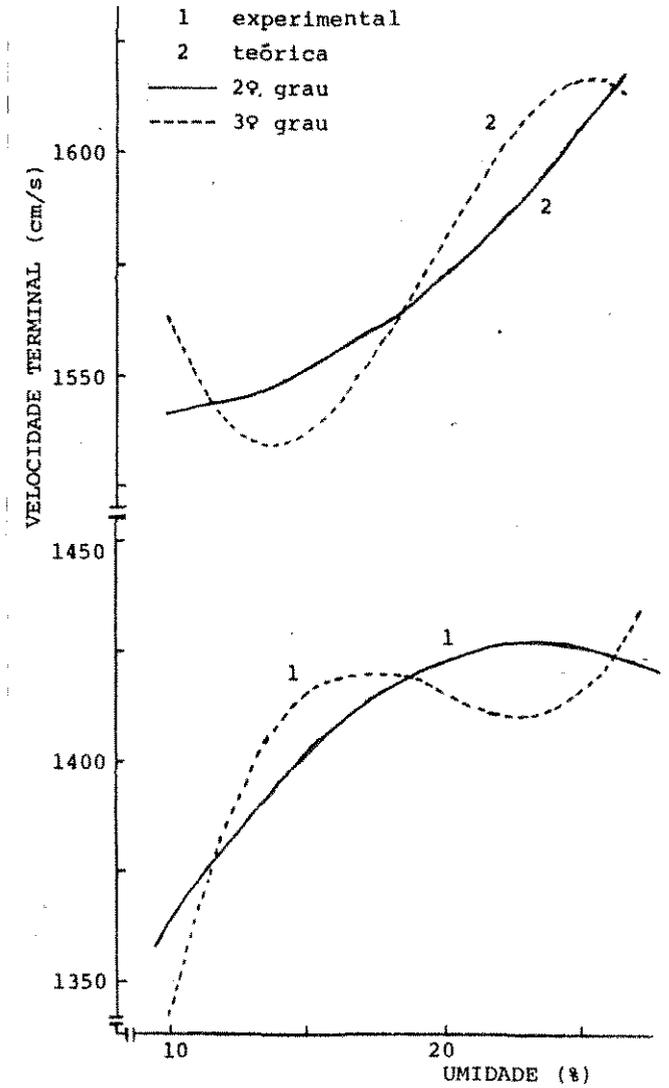


Figura 36. Velocidade terminal, do feijão, em função da umidade.

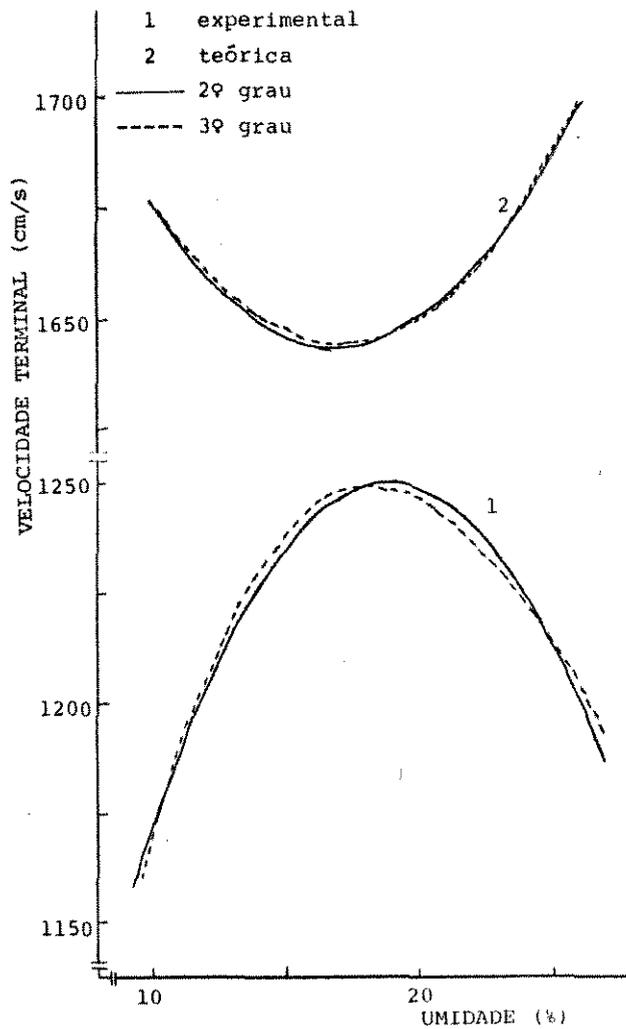


Figura 37. Velocidade terminal, do milho, em função da umidade.

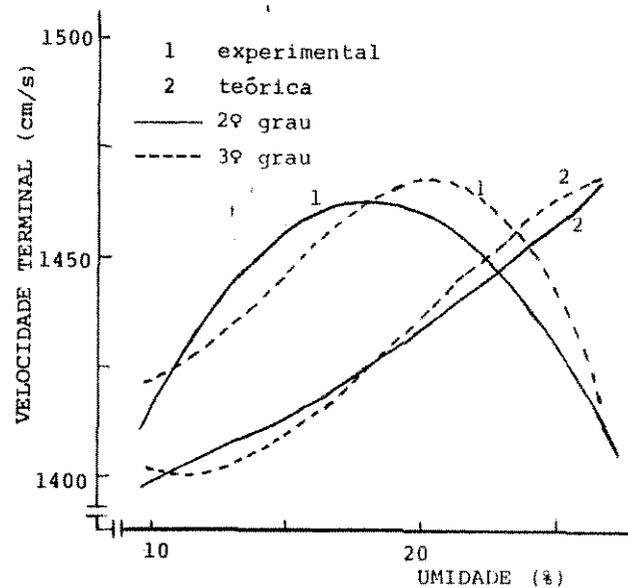


Figura 38. Velocidade terminal, da soja, em função da umidade.

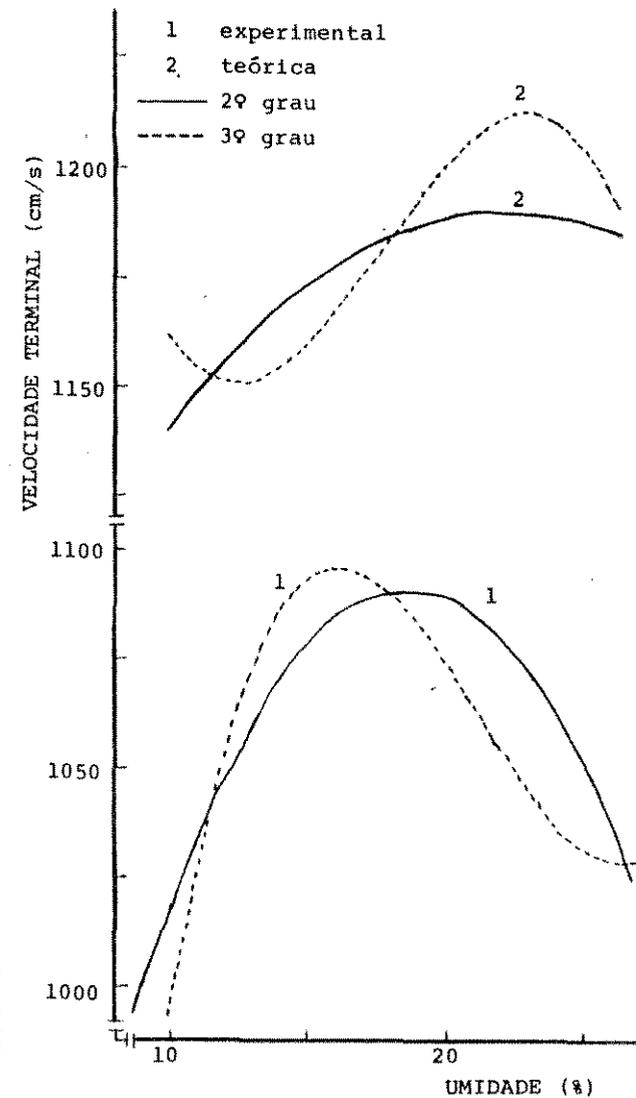


Figura 39. Velocidade terminal, do trigo, em função da umidade.

A influência que o teor de umidade exerceu sobre a velocidade terminal experimental foi muito semelhante para os produtos arroz em casca, milho, soja e trigo, onde a velocidade terminal aumentou com o aumento da umidade até 17-20%, e, a partir desses níveis de umidade passou a diminuir. O feijão apresentou comportamento semelhante, mas a inversão ocorreu com umidades em torno de 22-24%. O amendoim apresentou diminuição da velocidade terminal com o aumento da umidade.

Comparando-se os valores obtidos em nosso experimento com os valores apresentados pela literatura, chegou-se às seguintes constatações: para o milho, a velocidade terminal encontrou-se dentro da faixa de velocidade obtida por UHL & LAMP (58), que foi de 792,48 a 1280,16 cm/s; por outro lado, a velocidade terminal do milho foi maior que a obtida por HAWK et al. (26) e menor que a encontrada por BILANSKI et al. (4).

O coeficiente de arraste para o milho apresentou menores valores que os coeficientes obtidos por BILANSKI et al. (4) e UHL & LAMP (58), mas encontrando-se dentro da faixa de variação de 0,35 a 0,63, que foi a faixa obtida por HAWK et al. (26).

Por sua vez, o trigo apresentou maiores valores para a velocidade terminal que os encontrados por UHL & LAMP (58), HAWK et al. (26), SHELLARD & MACMILLAN (47) e BILANSKI et al. (4). Neste último trabalho encontrou-se a velocidade terminal de 914,4 cm/s que é a mais próxima do menor valor obtido em nosso experimento, isto é, 1028,19 cm/s.

A soja com 10,38% de umidade apresentou o valor de 1422,91 cm/s para a velocidade terminal experimental, que foi menor que as velocidades obtidas por JORGE (29), com 1508,68 cm/s

para 10,22% de umidade, e PINHEIRO et al. (42) com 1640 cm/s para 11,16% de umidade. Entretanto, comparando-se com os valores obtidos por BILANSKI et al. (4) e HAWK et al. (26), a soja apresentou maiores valores de velocidade terminal. UHL & LAMP (58) obtiveram uma grande faixa de variação para a velocidade terminal da soja, de 914,40 a 1828,80 cm/s, sendo que a soja por nós utilizada apresentou, considerando os quatro níveis de umidade, velocidade terminal praticamente na metade dessa variação.

A velocidade terminal calculada teoricamente para a soja apresentou resultados bastante próximo dos resultados obtidos por JORGE (29) e PINHEIRO et al. (42), com diferença da ordem de 3,0% e 4,2%, respectivamente.

O coeficiente de arraste C foi bem menor que os obtidos por BILANSKI et al. (4) e HAWK et al. (26), e encontrando-se dentro da faixa de variação apresentada por UHL & LAMP (58). Para a umidade de 10,38%, o valor de C foi de 0,388, que é muito próximo do valor obtido por JORGE (29) com 0,389 para 10,22% de umidade, e por PINHEIRO et al. (42) com 0,40 para 11,16% de umidade.

Quadro 64. Faixa de variação da velocidade terminal experimental (V_{te}) e velocidade terminal teórica (V_{tt}), considerando-se toda faixa de umidade.

Produto	V_{tt} (cm/s)	V_{te} (cm/s)
amendoim	1535 a 1654	1420 a 1448
arroz em casca	1003 a 1050	818 a 887
feijão	1541 a 1615	1369 a 1427
milho	1647 a 1689	1182 a 1246
soja	1401 a 1470	1404 a 1468
trigo	1154 a 1198	1028 a 1094

O Quadro 64 mostra uma síntese, para cada produto, das velocidades terminais, teórica e experimental, considerando-se toda a faixa de umidade pesquisada. Nota-se que, com exceção da soja, que apresentou, praticamente, a mesma faixa de velocidade terminal experimental e teórica, os outros produtos mostraram velocidade terminal experimental menor que a velocidade terminal teórica. Isto pode ser explicado, em parte, pelo motivo que para o cálculo da velocidade terminal teórica os grãos foram considerados uma esfera, com a utilização de seu diâmetro equivalente, o que implicaria em uma rotação dos grãos em torno de si mesmo, dentro de um fluxo de ar turbulento, com possíveis desvios na determinação da velocidade terminal experimental.

Outro fator foi a utilização na determinação da velocidade terminal experimental de grande quantidade de grãos, enquanto a velocidade terminal teórica era determinada com base nas medidas do grão individualmente. Isto, segundo BILANSKI, citado por PINHEIRO et al. (42), pode ocasionar desvios nos resultados obtidos para as duas velocidades.

8.3. CONCLUSÕES

8.3.1. A velocidade terminal do arroz em casca, feijão, milho, soja e trigo, aumenta com o aumento do teor de umidade até umidades ao redor de 18-22%, e, diminui com umidades acima desse valor.

8.3.2. O amendoim mostrou decréscimo da velocidade terminal com o aumento do teor de umidade.

8.3.3. O fluxo de ar, correspondente às velocidades terminais, apresentou regime turbulento.

8.3.4. Considerando-se todos os produtos e níveis de umidade, o coeficiente aerodinâmico de arraste, C , apresentou variação de 0,391 a 0,410.

8.3.5. O modelo de 2º grau mostrou-se bom para representar a velocidade terminal, teórica e experimental, em função da umidade, pois, apresentou boas correlações e significância, com exceção da equação da velocidade terminal teórica para o trigo.

8.3.6. O modelo de 3º grau mostrou-se excelente para representar a velocidade terminal, experimental e teórica, em função da umidade, pois, apresentou ótimas correlações e alto nível de significância, para todos os produtos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALAM, A. & SHOVE, G.C. Hygroscopicity and thermal properties of soybeans. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 16(4):707-9, 1973.
2. BERRY, M.R. & DICKERSON, R.W. Moisture adsorption isotherms for selected feeds and ingredients. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 16(1):137-9, 1973.
3. BICKERT, W.C. & BUELOW, F.W. Kinetic friction of grains on surfaces. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 9(1):129-31, 1966.
4. BILANSKI, W.W.; COLLIS, S.H. & CHU, P. Aerodynamic properties of seed grains. Agric. Eng., St. Joseph, MI, 43(4):216-9, 1962.
5. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W. & HALL, C.W. Drying cereal grains. Westport, Conn., AVI Pub., 1974. 265 p.
6. BROWNE, D.A. Variation of the bulk density of cereals with moisture content. J. Agric. Eng. Res., London, 7(4):288-90, 1962.
7. BRUBAKER, J.E. & POS, J. Determining static coefficient of friction of grains on structural surfaces. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 8(1):53-5, 1965.
8. BRUSEWITZ, G.W. Density of rewetted high moisture grains. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 18(5):935-8, 1975.
9. Chavez, J.B. Contribuição para o 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. 52 p. (Tese - Mestrado - Faculdade de Tecnologia de Alimentos, UNICAMP).

10. CHEN, C.S. Equilibrium moisture curves for biological materials. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 14(5):924-6, 1971.
11. CHEN, C.S. & CLAYTON, J.T. The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 14(5):927-9, 1971.
12. CHUNG; D.S. & CONVERSE, H.H. Effect of moisture content on some physical properties of grains. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 14(4):612-4, 620, 1971.
13. CHUNG; D.S. & PFOST; H.B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 10(4):549-57, 1967.
14. CLARK, R.L. & MCFARLAND, H.A. Granular materials friction apparatus. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 16(6):1198-9. 1973.
15. COLEMAN, D.A. & FELLOWS, H.C. Hygroscopic moisture of cereal grains and flaxseed exposed to atmospheres of different relative humidity. Cereal Chem., St. Paul, MN, 2(5):275-87, 1925.
16. Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI). Classificação de produtos agropecuários, subprodutos e resíduos de valor econômico. Campinas, 1975. 252 p.
17. DALCOMO, E.L. Coeficientes de atrito de forrageiras picadas em várias superfícies. Campinas, 1980. 70 p. (Tese-Mestrado - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola UNICAMP).
18. DAY, D.L. & NELSON, G.L. Desorption isotherms for wheat. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 8(2):293-7, 1965

19. DUGALL, A.K.; MUIR, W.E. & BROOKER, D.B. Sorption equilibrium moisture contents of wheat kernels and chaff. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 25(4):1086-90, 1982.
20. DUNSTAN, E.R.; CHUNG, D.S. & HODGES, T.O. Adsorption and desorption characteristics of grain sorghum. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 16(4):667-70, 1973.
21. FLOOD JR., C.A. & WHITE, G.M. Desorption equilibrium moisture relationships for popcorn. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 27(2):561-5, 571, 1984.
22. FORTES, M.; HARA, T. & DELGIUDICE, P.M. Propriedades aerodinâmicas de grãos de sorgo de Minas Gerais. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 4, Viçosa, 1974. Anais do... Viçosa, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1974. p.67-76.
23. FOWLER, R.T. & WYATT, F.A. The effect of moisture content on the angle of repose of granular solids. Austr. J. Chem. Eng. june:5-8, 1960.
24. FRANCO, C.M. Estudo sobre a conservação de sementes. Bragantia, Campinas, SP, v.3:137-50, 1943.
25. FRASER, B.M.; VERMA, S.S. & MUIR, W.E. Some physical properties of fababeans. J. Agric. Eng. Res., London, 23(1):53-7, 1978.
26. HAWK, A.L.; BROOKER, D.B. & CASSIDY, J.J. Aerodynamic characteristics of selected farm grains. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 9(1):48-51, 1966.
27. HENDERSON, S.M. A basic concept of equilibrium moisture. Agric. Eng., St. Joseph, MI, 33(1):29-33, 1952.
28. HENDERSON, S.M. & PERRY, R.L. Agricultural process engineering. 2.ed. S.l.p., S.c.p., c1966, 1970. 430 p.

29. JORGE, J.T. Determinações de algumas propriedades físicas e mecânicas da soja, variedade Santa Rosa. Campinas, 1977. 173 p. (Tese - Mestrado - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, UNICAMP).
30. KARON, M.L. & ADAMS, M.E. Hygroscopic equilibrium of rice and rice fractions. Cereal Chem., St. Paul, MN, 26(1): 1-12, 1949.
31. KOSOSKI, A.R. Dois métodos comparando a obtenção do equilíbrio higroscópico dos grãos. Rev. Brasil. de Armazenamento, Viçosa, MG, 2(2):31-43, 1944.
32. KRAMER, H.A. Factors influencing the desing of bulk storage bins for rough rice. Agric. Eng., St. Joseph, MI, 25(12): 463-6, 1944.
33. LAWTON, P.J. Coefficients of friction between cereal grain and various silo wall materials. J. Agric. Eng. Res., London, 25(1):75-86, 1980.
34. LEITÃO, A.M. Algumas propriedades físicas e mecânicas da pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally. Campinas, 1983. 109 p. (Tese - mestrado - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, UNICAMP).
35. MOHSENIN, N.N. Physical properties of agricultural products. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 8(1):25-9, 1965.
36. MOHSENIN, N.N. Physical properties of plant and animal materials. New York, Gordon and Breach Science, 1970. v.1, 734 p.
37. MORITA, T. & SINGH, R.P. Physical and thermal properties of short-grain rough rice. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 22(3):630-6, 1979.

38. NELSON, S.O. Moisture-dependent kernel - and bulk density relationships for wheat and corn. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 23(1):139-43, 1980.
39. NGODDY, P.O. & BAKKER-ARKEMA, F.W. A generalized theory of sorption phenomena in biological materials (Part I - The isotherm equation). Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 13(5):612-17, 1970.
40. OSTLE, B. Statistics in research. 2.ed., Iowa State Univ. Press, 1963. 585 p.
41. PERRY, R.H. & CHILTON, C.H. Manual de engenharia química. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1980. 1v.(paginação irregular).
42. PINHEIRO, M.C.; HARA, T.; FORTES, M. & COELHO, D.T. Propriedades físicas de grãos de soja UFV-1. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 5, Lavras, 1975. Anais do... Lavras, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1975. T.2, Seção 5:1-5.
43. PUZZI, D. Manual de armazenamento de grãos: armazéns e silos. São Paulo, Agronômica Ceres, 1977. p. 67.
44. RICHTER, D.W. Friction coefficients of some agricultural materials. Agric. Eng., St. Joseph, MI, 35(6):411-3, 1954.
45. ROA, G. & ROSSI, S.J. Determinação experimental de curvas de teor de umidade de equilíbrio mediante a medição da umidade relativa de equilíbrio. Rev. Brasil. de Armazenamento, Viçosa, MG, 2(2):17-22, 1977.
46. ROSSI, S.J.; FIOREZE, R.; CAVALCANTE, V.M.S. & FARIAS, H.R. Curvas de teor de umidade de equilíbrio e calor latente de vaporização para castanhas de cajú e raspas de mandioca. Rev. Brasil. de Armazenamento, Viçosa, MG, 6(2):5-10, 1981.

47. SHELLARD, J.E. & MACMILLAN, R.H. Aerodynamic properties of threshed wheat materials. J. Agric. Eng. Res., London, 23(3):273-81, 1978.
48. SILVA, J.N.; PINHEIRO FILHO, J.B.; SEDIYAMA, G.C. & CONDÉ, A.R. Curvas de equilíbrio higroscópico do cacau. Rev. Brasil. de Armazenamento, Viçosa, MG, 4(2):31-8, 1979.
49. SINÍCIO, R. & ROA, G. Curvas e equações de equilíbrio higroscópico para 15 produtos agrícolas. Rev. Brasil. de Armazenamento, Viçosa, MG, 4(2):45-55, 1979.
50. SNYDER, L.H.; ROLLER, W.L. & HALL, G.E. Coefficients of kinetic friction of wheat on various metal surfaces. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 10(3):411-3, 419, 1967.
51. STEWART, B.R. Effect of moisture content and specific weight on internal-friction properties of sorghum grain. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 11(2):260-2, 1968.
52. THOMPSON, R.A. & ISSACS, G.W. Porosity determination of grains and seeds with in air-comparison pycnometer. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 10(5):693-6, 1967.
53. 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. Ci. e Cult. Supl., São Paulo, 27(7):491, 1975.
54. TOSELLO, A. Equipamento experimental para determinação de algumas características aerodinâmicas de grãos. Ci. e Cult. Supl., São Paulo, 27(7):491, 1975.
55. TOSELLO, A. & JORGE, J.T. Equipamento experimental para a determinação do ângulo de talude. Ci. e Cult. Supl., São Paulo, 28(7):852, 1976.

56. TRAVAGLINI, D. & TOSELLO, Y. Aplicação da equação de Henderson em estudos de umidade de equilíbrio em café em côco, despolpado e beneficiado. Coletânea ITAL, Campinas, SP, 2:403-13, 1967/68.
57. TSANG-MUI-CHUNG, M.; VERMA, L.R. & WRIGHT, M.E. A device for friction measurement of grains. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 27(6):1938-41, 1944, 1984.
58. UHL, J.B. & LAMP, B.J. Pneumatic separation of grain and straw mixtures. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 9(2):244-6, 1966.
59. WRATTEN, F.T.; POOLE, W.D.; CHESNESS, J.L.; BAL, S. & RAMARAO, V. Physical and thermal properties of rough rice. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 12(6):801-3, 1969.
60. YOUNG, J.H. Evaluation of models to describe sorption and desorption equilibrium moisture content isotherms of Virginia - type peanuts. Transactions of the ASAE, St. Joseph MI, 19(1):146-50, 155, 1979.
61. YOUNG, J.H. & NELSON, G.L. Theory of hysteresis between sorption and desorption isotherms in biological materials. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 10(2):260-3, 1967.
62. ZURITZ, C.; SINGH, R.P.; MOINI, S.M. & HENDERSON, S.M. Desorption isotherms of rough rice from 10° to 40° C. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 22(2):433-6, 440, 1979.