

Modelagem Matemática do Escoamento do Ar em Silos de Grande Porte

por

Adriano José Lentz

Dissertação de Mestrado

Ijuí, RS – Brasil

2006.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

Modelagem Matemática do Escoamento do Ar em Silos de Grande Porte

por

Adriano José Lentz

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Matemática – Área de Concentração da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática.

Ijuí, RS – Brasil

2006.

UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
DeFEM – DEPARTAMENTO DE FÍSICA, ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA
DeTEC – DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**“Modelagem Matemática do Escoamento do Ar
em Silos de Grande Porte”**

elaborada por

ADRIANO JOSÉ LENTZ

como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, no domínio
da Modelagem Matemática

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Oleg A. Khatchatourian (Orientador) – DeFEM/UNIJUI

Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges – DeFEM/UNIJUI

Prof. Dr. Fernando Pedro Reis Brod – Kepler Weber

Ijuí, 19 de Janeiro de 2006.

*Dedico este trabalho ao meu pai, Paulo Arlindo Lentz,
pelas sementes que plantou e pelos frutos que continua gerando,
embora não esteja mais aqui para ver.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Oleg Khatchatourian, pelo aprendizado nas disciplinas e nas orientações dessa dissertação. Obrigado pela amizade, atenção e paciência para solucionar minhas dúvidas, acreditando no meu trabalho.

A minha mãe Vera, que desde cedo me incentivou a estudar e nunca desistir de um objetivo. Obrigado pelo amor, incentivo e carinho.

Ao meu irmão Fábio, pelo estímulo, apoio e esforço para que eu chegasse onde cheguei.

Ao Prof. Nelson Toniazzo, pelo auxílio, amizade e incentivo durante o trabalho.

Aos professores do Mestrado em Modelagem Matemática pelos ensinamentos, dedicação e amizade.

A Prof. Maria de Lourdes Merlini Giuliani, minha orientadora durante a graduação, pela amizade e incentivo.

À Geni, pelo carinho, amizade e paciência quando precisei de sua ajuda.

Aos meus colegas e amigos Denílson e Lidiane, pelos momentos compartilhados, alegrias e várias horas de estudo. Muito Obrigado.

Aos demais colegas do mestrado, pelo convívio e amizade.

Ao Prof. Pedro Schmidt, pela amizade, atenção e atendimento no que fosse necessário do Laboratório de Física.

Aos bolsistas de iniciação científica André e Anderson pela disponibilidade e auxílio.

Aos meus tios (as) pela ajuda, incentivo e apoio.

Ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

*A Deus, pela coragem para não desistir nunca daquilo que buscamos.
Obrigado por mais esta etapa vencida.*

A todos que direta ou indiretamente, auxiliaram na realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

*“É melhor tentar e falhar,
que preocupar-se e ver a vida passar,
é melhor tentar, ainda que em vão,
que sentar-se fazendo nada até o fim.*

*Eu prefiro na chuva caminhar,
que em dias tristes em casa me esconder.*

*Prefiro ser feliz, embora louco,
que em conformidade viver...”*

Martin Luther King

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
INTRODUÇÃO	1
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.1 Introdução	3
1.2 Armazenagem de grãos	6
1.3 Massa de grãos	10
1.4 Propriedades físicas das massas de grãos	12
1.4.1 Ângulo de repouso	13
1.4.2 Massa Específica Granular	13
1.4.3 Porosidade	14
1.5 Ar	14
1.5.1 Psicrometria do ar	14
1.6 Aeração	16
1.6.1 Objetivos da aeração	19
1.6.1.1 Resfriamento da massa de grãos	20

1.6.1.2	Impedir a migração e a condensação da umidade	20
1.6.1.3	Retirar "bolsas de calor" da massa armazenada	21
1.6.1.4	Inibir a atividade de fungos e insetos	21
1.6.1.5	Conservação temporária dos grãos úmidos	22
1.6.1.6	Secagem limitada	22
1.6.1.7	Remoção de odores	23
1.6.1.8	Aplicação de fumigantes	23
1.7	Sistemas de Aeração	23
1.8	Modelos Matemáticos	26
1.9	Objetivos	32
2	MODELO MATEMÁTICO	34
2.1	Introdução	34
2.2	Estabelecimento das Equações	34
2.3	Formulação do Modelo com Influência da Porosidade	38
2.4	Equações do Método de Elementos Finitos	43
3	ESTUDO EXPERIMENTAL	50
3.1	Introdução	50
3.2	Equipamento Experimental	50
3.2.1	Ventilador	55
3.2.2	Medidor de Vazão	55

3.2.3	Pressão Estática	57
3.2.4	Matéria Prima	57
3.3	Experimentos	58
3.3.1	Calibração do Equipamento	58
3.3.2	Realização dos Experimentos	64
3.4	Resultados Experimentais	65
3.4.1	Massa Específica Real, Aparente e Porosidade	65
3.4.2	Queda de Pressão Estática e Fluxo de Ar	67
3.4.3	Dimensão dos grãos	69
	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Silos metálicos.	9
Figura 1.2	Correntes de convecção no interior do silo: inverno e verão. . . .	10
Figura 1.3	Gráfico da conservação dos cereais.	12
Figura 1.4	Representação esquemática do ângulo de repouso.	13
Figura 1.5	Gráfico psicrométrico.	15
Figura 1.6	Esquema simplificado do gráfico psicrométrico.	17
Figura 1.7	Componentes básicos de um sistema de aeração.	24
Figura 1.8	Ventiladores centrífugos e axiais.	25
Figura 2.1	Ilustração das linhas de corrente.	43
Figura 2.2	Elemento simples bidimensional.	45
Figura 3.1	Esquema do equipamento (picnômetro).	51
Figura 3.2	Fotografia do picnômetro.	52
Figura 3.3	Fotografia do equipamento para medir o fator de porosidade. . .	52
Figura 3.4	Fotografia do equipamento para medir o fator de porosidade. . .	53
Figura 3.5	Esquema do dispositivo utilizado para realizar a compactação. . .	55
Figura 3.6	Esquema do dispositivo medidor de vazão.	56
Figura 3.7	Equipamento utilizado para determinar a vazão e a queda de pressão estática.	57
Figura 3.8	Variação de pressão final considerando $P_1^{(0)}=2100 \text{ mmH}_2\text{O}$. . .	58

Figura 3.9	Varição de pressão final considerando $P_1^{(0)}=1700 \text{ mmH}_2\text{O}$. . .	59
Figura 3.10	Varição de pressão final considerando $P_1^{(0)}=1400 \text{ mmH}_2\text{O}$. . .	59
Figura 3.11	Comparativo da variação de pressão final considerando várias pressões iniciais.	60
Figura 3.12	Influência de S e q sobre o erro relativo de porosidade para altura $H=10m$	60
Figura 3.13	Relação entre o número de bolinhas de ping pong e o erro de determinação da variação do volume vazio.	62
Figura 3.14	Relação entre o erro de determinação da variação do volume vazio e a variação do volume vazio.	62
Figura 3.15	Relação entre o erro de determinação da variação do volume vazio e a porosidade aparente	63
Figura 3.16	Relação entre o erro absoluto de determinação do volume vazio e a variação de porosidade.	63
Figura 3.17	Porosidade da massa de grãos de soja.	66
Figura 3.18	Porosidade da massa de grãos de milho.	67
Figura 3.19	Porosidade da massa de grãos de arroz.	67
Figura 3.20	Comparativo entre as porosidades usando o Método 2.	68
Figura 3.21	Curvas experimentais para o fluxo de ar versus queda de pressão estática para diversas alturas da camada de grãos de soja. . . .	68
Figura 3.22	Curvas experimentais para o fluxo de ar versus queda de pressão estática para diversas alturas da camada de grãos de milho. . .	69
Figura 3.23	Curvas experimentais para o fluxo de ar versus queda de pressão estática para diversas alturas da camada de grãos de arroz. . . .	70

Figura 3.24	Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 1m.	71
Figura 3.25	Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 10m.	71
Figura 3.26	Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 20m.	72
Figura 3.27	Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 30m.	72
Figura 3.28	Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 40m.	73
Figura 3.29	Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 50m.	73
Figura 3.30	Fotografia de alguns grãos de soja utilizados para determinação das dimensões, onde (a) é o comprimento, (b) a largura e (c) a espessura.	73
Figura 3.31	Fotografia de alguns grãos de milho utilizados para determinação das dimensões, onde (a) é o comprimento, (b) a largura e (c) a espessura.	74
Figura 3.32	Fotografia de alguns grãos de arroz utilizados para determinação das dimensões, onde (a) é o comprimento, (b) a largura e (c) a espessura.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Série histórica da produção de grãos, safras 2000/01 a 2004/05 (mil toneladas).	4
Tabela 1.2	Série histórica da área plantada, safras 2000/01 a 2004/05 (mil hectares).	4
Tabela 1.3	Série histórica da produtividade, safras 2000/01 a 2004/05 (Kg/ha).	5
Tabela 1.4	Série histórica da produção no Rio Grande do Sul, safras 2000/01 a 2004/05 (mil toneladas).	5
Tabela 1.5	Valores das constantes a e b da equação (1.1).	27
Tabela 3.1	Teor de umidade dos grãos.	58
Tabela 3.2	Volumes dos compartimentos do equipamento experimental (ml).	61
Tabela 3.3	Valores da massa específica real, aparente e da porosidade pelo Método 1.	65
Tabela 3.4	Valores da porosidade para o Método 2 em função da altura da camada de grãos.	66
Tabela 3.5	Dimensão dos grãos utilizados no estudo experimental.	70

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área do elemento finito
A_t	área da seção transversal (m^2)
A_0	área do orifício da placa
a, b	constantes que dependem dos produtos armazenados
B, C e D	matrizes
C	constante de integração
c	coeficiente de vazão
c_{ij}	cofatores da matriz C
F	força de compactação (N)
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
H	altura da camada de grãos (m)
i, j, k	nós
K	coeficiente de permeabilidade
M	matriz de rigidez
N_i, N_j, N_k	componentes da função de forma
$[N]^T$	função de forma
\vec{n}	vetor unitário normal às paredes e ao piso do silo
P	pressão do ar (Pa)
P_i, P_j, P_k	valores da pressão nos nós
P_c	valores de pressão na entrada e saída do ar na massa de grãos
$P_1^{(0)}$	pressão inicial
$P_1^{(f)}, P_2^{(f)}$	pressão final
q	parte relativa de volume bruto no compartimento 2
r	raio-vetor
S	razão entre os compartimentos 2 e 1
t	tempo (s)
U	argumento intermediário
U_1, U_2	manômetros do tipo “tubo em U”

u, v	componentes da velocidade
V	volume vazio do compartimento 2
V_{solido}	volume bruto de amostra colocado no compartimento 2
V_1, V_2	volumes dos compartimentos do picnômetro
W	velocidade do ar (m/s)
W_x	fluxo de ar na direção x
W_y	fluxo de ar na direção y
\vec{W}	vetor fluxo de ar
ΔP	variação de pressão
ε	porosidade (adimensional)
$\varepsilon_i, \varepsilon_j, \varepsilon_k$	valores da porosidade nos vértices do elemento finito
$\bar{\varepsilon}$	porosidade média
μ	viscosidade ($Pa\ s$)
ρ	densidade (kg/m^3)
ρ	densidade da água (g/cm^3)
ρ_m	massa específica aparente da massa de grãos (kg/m^3)
(ρ_{greal})	massa específica real da massa de grãos
ψ	função corrente
Ω	domínio de integração

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre escoamento de ar em silos considerando a massa de grãos um meio não-homogêneo. Com base na revisão bibliográfica sobre métodos de aeração e sobre modelos matemáticos de escoamento de ar, foi escolhido como base o modelo proposto por KHATCHATOURIAN *et al.* (2004). Para complementar o modelo considerando variável a porosidade em função da altura da camada de grãos, foi realizado um estudo experimental utilizando um equipamento desenvolvido (picnômetro) com o objetivo de encontrar a variação da porosidade devido ao efeito da compactação. Foi feita a calibração do equipamento e determinada a variação da porosidade para diferentes alturas da camada de grãos. Para realizar as compactações correspondentes a alturas de até 50 metros da camada de grãos utilizou-se uma alavanca inter-resistente. A variação da porosidade determina a mudança da área efetiva da seção transversal e da velocidade do ar para diferentes alturas de silos, provocando a variação do coeficiente de permeabilidade. Para mostrar a influência desta compactação na relação entre o fluxo de ar e a queda de pressão estática, foi acoplado um sistema ventilador-medidor de vazão no compartimento onde ficam acondicionados os grãos no picnômetro, tentando simular as características de um silo dotado de um sistema de aeração. O equipamento utilizado permitiu determinar com uma boa precisão os valores de porosidade para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando o efeito da compactação e as características de escoamento do ar através da massa de grãos nestas condições.

ABSTRACT

In this work a study on the air drainage in silos having considered the mass of grains in a non-homogeneous medium was carried out. Based in the bibliographical review on methods of aeration and mathematical models of air drainage, the model considered by KHATCHATOURIAN *et al* (2004) was chosen as base. In order to complement the model considering the porosity changeable in function of the height of the layer of grains a experimental study was carried out using a piece of equipment (picnometer) developed with the purpose of finding the variation of the porosity due to the effect of the compacting. The calibration of the equipment was made and the variation of the porosity for different heights of the layer of grains in the silos was determined. In order to carry out the compacting corresponding to heights of until 50 meters of the layer of grains an inter-resistant lever was used. The variation of the porosity determines the change of the effective area of the traverse section and the air speed for different heights of silos, provoking the variation of the permeability coefficient. To show the influence of this compacting in the relation between the air flow and the fall of static pressure, a system fan-measurer of outflow is coupled to the compartment where the grains are conditioned in the picnometer, trying to simulate the characteristics of a silo endowed with an aeration system. The used equipment allowed determining with a good precision the values of porosity for masses of soy grains, maize and rice considering the effect of the compacting and the characteristics of the air draining through the mass of grains in such conditions.

INTRODUÇÃO

A produção de grãos é um dos principais segmentos do setor agrícola, não só no Brasil mas em todo o mundo. Após a colheita, toda safra de grãos precisa ser direcionada, o que envolve locais de armazenamento. O armazenamento é um processo da maior importância, pois de nada adianta produzir bem, com qualidade e produtividade elevada, se a produção se estragar ou ficar comprometida devido a um processo inadequado de armazenamento.

Atualmente, o método de controle da qualidade do produto mais difundido e utilizado é a aeração. A aeração é o processo de forçar o ar ambiente através da massa de grãos de modo a diminuir e uniformizar sua temperatura. É uma ferramenta de gerência muito útil, no armazenamento, que preserva os grãos da deterioração.

Utilizando-se a aeração, modifica-se o microclima na massa de grãos, tornando desfavorável o desenvolvimento de organismos nocivos ao produto e, ao mesmo tempo, criando condições favoráveis à preservação da qualidade.

O processo de aeração, junto com a secagem e o controle fitossanitário, são os meios pelo qual se pode conservar a qualidade dos grãos armazenados por um longo período de tempo.

A eficiência de um sistema de aeração está centrada no fato de se manter uniforme o fluxo de ar em todas as regiões do silo.

Neste trabalho, considerando a importância da aeração para a conservação dos grãos, apresenta-se um estudo sobre a influência da variação da porosidade no escoamento do ar para diferentes alturas de silos devido ao efeito da compactação.

No capítulo 1 foi apresentado um histórico da produção de grãos nos últimos anos. Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre armazenagem de grãos,

propriedades físicas das massas de grãos, aeração, sistemas de aeração, modelos matemáticos de escoamento de ar e foi feita a colocação do problema com seus principais objetivos.

No capítulo 2, foi descrito o modelo matemático desenvolvido no trabalho, que tem como base o modelo proposto por KHATCHATOURIAN *et al.* (2004) que considera variável a porosidade em função da altura da camada de grãos. A resolução do sistema de equações foi feita utilizando o Método dos Elementos Finitos.

No capítulo 3 foi apresentado o estudo experimental realizado, no qual se investigou a variação da porosidade nas massas de grãos de soja, milho e arroz sujeitos a diferentes níveis de compactação usando o picnômetro e sua influência na relação entre o fluxo de ar versus queda de pressão estática.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Introdução

O Brasil possui um imenso potencial para a produção de grãos mas, além do esforço para aumentar a produção de alimentos, há necessariamente que se melhorar as condições para uma armazenagem segura dos grãos. Os principais grãos produzidos são a soja, o arroz, o milho e o trigo.

A soja (*Glycine max*) é natural da China, mas são os Estados Unidos os maiores produtores mundiais. O Brasil, em segundo colocado, tem aumentado sua produção gradualmente. A soja é de extrema relevância para alimentação humana e animal. Aproximadamente 60% de todos os produtos alimentícios contém ingredientes derivados da soja (óleo de soja ou ingredientes protéicos da soja).

O arroz (*Oriza sativa*) é o principal alimento para mais da metade da população mundial, sendo que na Ásia chega a 90% do alimento consumido, o que caracteriza sua importância para a agricultura. O Brasil é o maior produtor mundial, sendo o cereal cultivado em todos os estados. O Rio Grande do Sul é o maior produtor e o responsável pelo abastecimento no Brasil.

O milho (*Zea mays*) é igualmente um dos cereais mais cultivados no Brasil e de alta qualidade nutritiva. É utilizado como alimento humano ou ração animal. No Brasil, os estados do Centro-Sul do País, respondem por 90% da produção nacional, sendo o Paraná o maior produtor. Estados Unidos, China, Brasil, México, França, Argentina e Índia são os maiores produtores mundiais.

A produção de grãos da safra 2004/2005 foi de 113,5 milhões de toneladas, segundo levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). A Tabela (1.1) apresenta a evolução da produção de alguns grãos produzidos no Brasil.

Tabela 1.1: Série histórica da produção de grãos, safras 2000/01 a 2004/05 (mil toneladas).

Produção	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05
Algodão	1521,9	1244,9	1364,9	2092,2	2110,3
Arroz	10386,0	10626,1	10367,1	12829,4	13227,3
Feijão	2592,4	2983,0	3205,0	2978,3	3044,4
Girassol	56,3	71,0	56,4	85,8	62,5
Milho	42289,7	35266,8	47410,9	42128,5	34976,9
Soja	38431,8	41916,9	52017,5	49792,7	51090,1
Sorgo	895,7	798,2	1696,7	2014,1	1567,7
Trigo	3194,2	2913,9	5851,3	5851,3	5845,9
Brasil	100266,9	96746,7	123168,0	119114,2	113480,5

Fonte: CONAB, (2005).

Conforme a Tabela (1.2) existe uma grande diversidade de culturas de grãos produzidos no Brasil. Percebe-se que há uma grande predominância no cultivo de alguns grãos, como a soja, o arroz e o milho.

Tabela 1.2: Série histórica da área plantada, safras 2000/01 a 2004/05 (mil hectares).

Produção	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05
Algodão	868,4	747,7	735,1	1100,0	1172,4
Arroz	3248,6	3219,6	3186,1	3654,4	3916,4
Feijão	3878,7	4269,7	4378,7	4287,4	3812,8
Girassol	37,0	52,6	43,2	55,1	44,0
Milho	12972,5	12297,8	13226,2	12783,0	12025,7
Soja	13969,8	16329,0	18474,8	21375,8	23301,1
Sorgo	502,0	489,9	735,5	898,3	788,5
Trigo	1710,2	2051,6	2464,2	2464,2	2756,3
Brasil	37847,3	40198,0	43946,8	47422,5	48736,1

Fonte: CONAB, (2005).

A Tabela (1.3) mostra que nos últimos anos houve uma melhora acentuada na produtividade das lavouras, possivelmente devido a maior racionalização e profissionalização dos produtores e ao aumento de tecnologia utilizada.

Analisando as Tabelas (1.1), (1.2) e (1.3), percebe-se que apesar de a área de grãos plantada na safra 2004/05 ter sido maior, houve um declínio em

Tabela 1.3: Série histórica da produtividade, safras 2000/01 a 2004/05 (Kg/ha).

Produção	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05
Algodão	2834	2690	3010	3099	2897
Arroz	3197	3300	3254	3511	3377
Feijão	688	699	732	695	798
Girassol	1522	1350	1306	1557	1420
Milho	3260	2868	3585	3296	2909
Soja	2751	2567	2816	2329	2193
Sorgo	1784	1629	2307	2242	1988
Trigo	1868	1420	2375	2375	2121
Brasil	2649	2407	2803	2512	2328

Fonte: CONAB, (2005).

relação a produção e a produtividade. A quebra se deve principalmente às condições adversas, como a estiagem nos estados da região Centro-Sul, sobretudo Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul.

No Rio Grande do Sul, a região noroeste se destaca na produção de cereais e oleaginosas. Entre as espécies cultivadas, destacam-se a soja, o trigo, o milho e o feijão. Os grãos aqui produzidos são utilizados em parte para a industrialização (óleo e ração animal) e em parte à exportação. (TONIAZZO, 1997).

Tabela 1.4: Série histórica da produção no Rio Grande do Sul, safras 2000/01 a 2004/05 (mil toneladas).

Produção	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05
Arroz	5190,5	5464,8	4696,4	6301,7	6205,2
Feijão	146,0	145,0	135,8	137,1	75,4
Milho	6237,0	3905,5	5283,4	3499,7	1570,9
Soja	7113,2	5579,2	9631,1	5559,4	2572,7
Rio Grande do Sul	20171,5	16576,7	22413,4	18205,4	12919,7

Fonte: CONAB, (2005).

1.2 Armazenagem de grãos

A armazenagem vem a ser a atividade destinada à guarda e a conservação de produtos agrícolas (basicamente grãos) em condições inalteradas de qualidade e quantidade (WEBER, 2001).

São necessários diversos processos para armazenagem e o beneficiamento de grãos, sendo de fundamental importância para se garantir a qualidade dos grãos o conhecimento das características dos produtos a serem armazenados (BLASZAK, 2005).

Os grãos chegam à unidade de armazenamento e beneficiamento com teores de impurezas e umidade elevados, onde sofrem um processo de limpeza, secagem e armazenagem, para ao final serem beneficiados e consumidos (WEBER, 2001).

O fluxograma convencional da armazenagem de uma unidade de beneficiamento é:

Colheita→Recebimento→Pré-limpeza→Secagem Pós-Limpeza→Armazenamento→Expedição
--

Por apresentarem um alto teor de umidade e impurezas, os grãos procedentes das lavouras não apresentam condições imediatas de armazenagem.

Como atualmente, procura-se colher os grãos com teores mais elevados de umidade, pois acontece uma grande perda de matéria seca com a secagem na lavoura, faz-se necessária a secagem mecânica dessas massas.

A secagem mecânica pode ser entendida como a atividade destinada a diminuir artificialmente o teor de umidade dos grãos, até um limite adequado, sem comprometer suas propriedades físicas, químicas e biológicas (WEBER, 2001).

Segundo PUZZI (1986), a secagem mecânica apresenta vantagens, tais como:

- a) pode ser processada independente das condições do tempo;
- b) possibilidade de estabelecer um programa de operação com mais facilidade;
- c) o processo é mais rápido do que o feito ao sol, o que impede o desenvolvimento de fungos.

O teor de umidade de um produto exerce grande influência na variação da temperatura de uma massa de grãos durante a armazenagem (ABBOUDA *et al.*, 1992, KHANKARI *et al.* 1994).

As máquinas de limpeza, utilizadas geralmente após a secagem, retiram da massa de grãos impurezas como: grãos de outras culturas, ervas silvestres e daninhas, terra, materiais inertes, cascas e pó do próprio produto.

As perdas dos grãos entende-se desde o amadurecimento na lavoura até o seu consumo, varia para diferentes grãos, condições climáticas e geográficas. As principais fontes de perdas na qualidade e quantidade de grãos durante o armazenamento são fungos, insetos e grãos de baixa qualidade (BROKKER *et al.*, 1982).

Segundo CORTEZ & MAGALHÃES (1992), mesmo considerando a precariedade de dados existentes sobre o percentual de perdas de grãos pós-colheita, pode-se afirmar que essas ficam na faixa de 15 a 25%. Entende-se aqui que o termo "perdas" se refere a qualquer prejuízo que o grão venha a sofrer. Assim temos:

- a) perda física;
- b) perda de qualidade;
- c) perda nutricional;
- d) perda de valor nutricional.

Tais perdas ocorrem basicamente por:

- a) aquecimento dos grãos;
- b) infestação de insetos;
- c) proliferação de fungos;
- d) perda de peso;
- e) perda de vigor na semente ou no grão destinado à indústria.

As propriedades dos grãos, dos aspectos de sua armazenabilidade, são influenciadas pelas condições climáticas ocorridas durante o crescimento e maturação, pelo grau de maturação da colheita, pelo método da colheita e pelo manuseio que o produto sofreu durante o pré-processamento. Quanto maiores as injúrias sofridas pelo produto desde o seu desenvolvimento no campo até o momento de sua armazenagem, mais suscetível ele estará aos agentes causadores de deterioração (BROKKER *et al.*, 1982).

Um elemento indispensável ao incentivo a produção agrícola está relacionado a uma ampla rede de armazenagem, sendo esta constituída de estruturas destinadas a receber a produção de grãos, conservá-los em perfeitas condições técnicas e redistribuí-los posteriormente.

Antes disso, segundo (JÚNIOR *et al.*, 2000), o controle eficiente durante a produção, colheita e processamento, permitem a obtenção de sementes de melhor qualidade, enquanto a armazenagem adequada favorecerá a manutenção desta qualidade.

Estruturalmente, a rede de armazenagem de grãos brasileira é constituída de unidades armazenadoras. As convencionais destinam-se à armazenagem de produtos acondicionadas em um determinado tipo de embalagem, como, por exemplo, sacarias, enquanto as do tipo a granel dispensam o uso de embalagens e podem possuir em suas estruturas silos metálicos, silos em concreto e, ou, armazéns graneleiros (BLASZAK, 2005).

A alternativa mais difundida atualmente no Brasil para armazenagem são silos metálicos (Figura (1.1)). Isso se deve as vantagens propiciadas ao usuário, como:



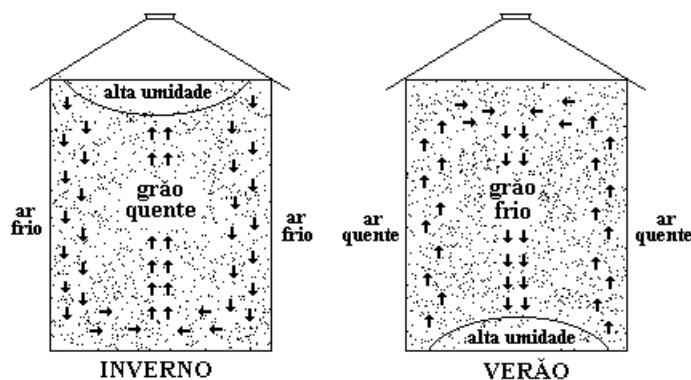
Fonte: Kepler e Weber SA, (2005).

Figura 1.1: Silos metálicos.

- a) melhor condição para conservação do produto;
- b) menor custo de mão-de-obra;
- c) maior velocidade de recebimento e expedição;
- d) facilidade de controle de insetos e roedores.

Devido a mudanças climáticas, variações de temperatura também contribuem para a formação de gradientes de temperaturas em uma massa de grãos armazenada. Temperaturas diferentes nos ambientes interno e externo de um silo provocam correntes de ar na massa de grãos, que podem induzir a migração de umidade das áreas de altas temperaturas para as de baixas temperaturas. A migração de umidade pode potencializar o desenvolvimento de insetos, fungos e bactérias e iniciar a deterioração do produto (CONVERSE *et al.*, 1973; BROOKER *et al.*, 1992).

No inverno, o ar frio e denso que se situa junto à parede do silo gera um fluxo de ar que circulará no interior do silo de cima para baixo. Concomitantemente, o ar que está entre os grãos, no fundo e no centro do silo, absorve calor dos grãos quentes, fazendo o ar subir. Esta combinação faz com que o ar circule no silo. Esta circulação de ar chama-se "corrente de ar de convecção". No verão, o processo ocorre no sentido inverso ao do inverno, Figura (1.2).



Fonte: Adaptado de Brooker; Bakker-Arquema e Hall, (1974).

Figura 1.2: Correntes de convecção no interior do silo: inverno e verão.

O maior causador de danos aos grãos armazenados é a migração de umidade. Ela está relacionada com a temperatura e o teor de umidade do grão e a temperatura e umidade do ar atmosférico.

Umidade e temperatura influem decisivamente no desenvolvimento de fungos. Assim, a umidade e a temperatura devem ser mantidas uniformes e sob controle, visando sua perfeita conservação em silos ou armazéns graneleiros (SAVICKI, 2001).

1.3 Massa de grãos

Os grãos armazenados em silos formam uma massa porosa constituída pelos grãos e pelo ar intersticial ou intergranular. Os grãos são constituídos de um material higroscópico e desta forma mantém equilíbrio de sua umidade com determinada umidade relativa do ar, a uma dada temperatura, tendo a capacidade

de ceder ou absorver umidade de acordo com a baixa ou elevação da umidade do ar contido no espaço intersticial da massa de grãos (BLASZAK, 2005).

A manutenção da temperatura da massa de grãos, abaixo de 15°C, tem sido eficiente na redução da atividade da água dos grãos e, assim, na prevenção do desenvolvimento de insetos e no controle de fungos (SUN & WOODS, 1994; SUN & BYRNE, 1998).

Todos os fatores que ameaçam a perda da qualidade dos grãos, causam um aumento da temperatura. Assim, a verificação constante da temperatura dos grãos, em vários pontos da massa armazenada, pode ajudar a impedir um processo de deterioração. O tratamento preventivo dos produtos armazenados é executado através da aeração, que permite a redução e a manutenção da temperatura dos grãos em níveis baixos. (TOÉ, 2005).

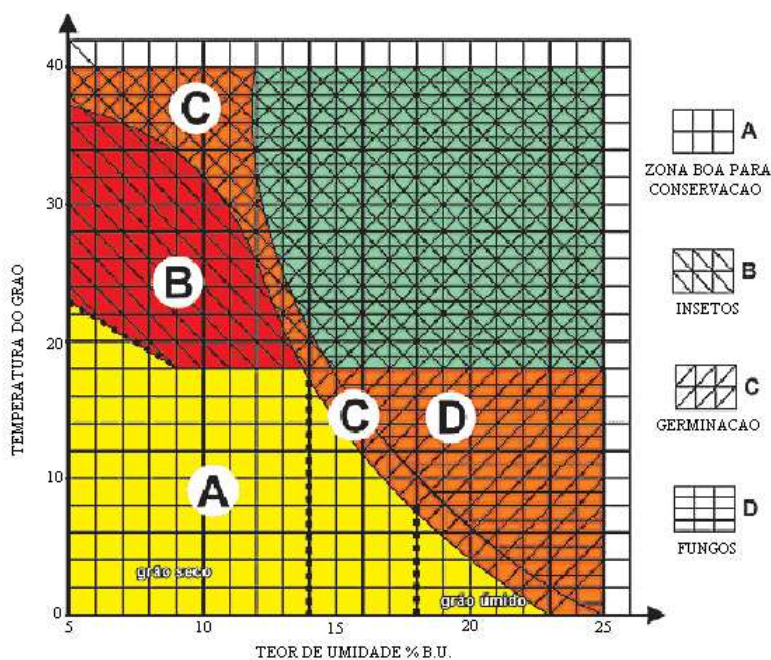
A microflora dos grãos armazenados é constituída por uma grande variedade de microorganismos, sendo os fungos os principais agentes causadores da deterioração dos grãos armazenados. A temperatura ótima para o crescimento da maioria dos fungos é entre 77 e 86°F. Fungos diferem consideravelmente quanto a umidade requerida. A umidade relativa mínima do ar para o desenvolvimento de fungos pode ser abaixo de 65% para alguns tipos e acima de 93% para outros. Assim, para evitar o crescimento de fungos sobre grãos armazenados é aconselhável que a umidade relativa do ar intragranular seja menor que 60% (BROOKER, 1982).

As maiores perdas causadas por fungos, segundo CHRISTENSEN e KAUFMANN (1969), são redução do poder germinativo, descoloração das sementes, aquecimento e mofo, variações bioquímicas, possível produção de toxinas e perda de matéria seca.

O diagrama da Figura (1.3) estabelecido por Burges e Burrel, indica a natureza dos riscos em função da temperatura e umidade dos grãos armazenados. Em muitas regiões brasileiras, as condições de clima tornam difícil a manutenção dos

grãos na área restrita de boa conservação (A). Porém, o armazenamento prolongado se torna possível mediante o emprego correto do sistema de ventilação forçado.

Os cereais se mantêm em boas condições de qualidade, quando se encontram armazenados a temperaturas inferiores a 18°C e teor de umidade inferiores a 15%, representada pela área (A). O gráfico da conservação dos cereais mostra os efeitos do aumento da temperatura, que favorece o desenvolvimento dos insetos (B), da umidade que afeta a germinação das sementes (C) e o desenvolvimento de fungos (D).



Fonte: Adaptado de Weber, (2001).

Figura 1.3: Gráfico da conservação dos cereais.

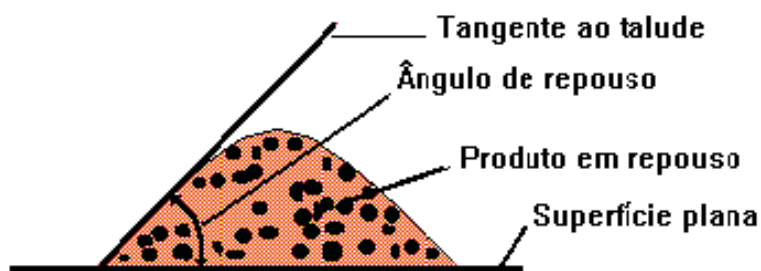
1.4 Propriedades físicas das massas de grãos

Conhecer as propriedades físicas dos produtos agrícolas é de suma importância. Baseando-se no conhecimento das características físicas que se realizam projetos para a construção e operação de equipamentos de secagem e armazenagem

de produtos agrícolas, bem como para a adaptação de equipamentos já existentes, visando obter maior rendimento nas operações de processamento.

1.4.1 Ângulo de repouso

Pode ser definido como o ângulo máximo do talude formado pelos grãos em relação à horizontal e é altamente influenciado pelo teor de umidade, pelo tamanho, pela forma e pela constituição externa do grão. O conhecimento do valor do ângulo de repouso dos grãos é importante para a determinação estática dos silos, da capacidade das correias transportadoras e do dimensionamento das moegas, dutos e rampas de descarga de grãos (SILVA *et al.*, 2000).



Fonte: Silva, (2000).

Figura 1.4: Representação esquemática do ângulo de repouso.

1.4.2 Massa Específica Granular

Também conhecida como peso hectolítrico (PH), densidade granular ou aparente é a razão entre a massa e o volume de determinada quantidade do produto (kg/m^3), incluindo os espaços intergranulares. É uma propriedade usada na comercialização de grãos, quando no dimensionamento de silos, secadores, depósitos e sistema de transporte, como fator para calcular a capacidade de suporte para o peso de determinado volume de grãos. A densidade é também utilizada como parâmetro na determinação do teor de umidade e na estimativa dos danos causados por pragas aos grãos armazenados.

1.4.3 Porosidade

É a relação entre o volume ocupado pelo ar existente na massa granular e o volume total ocupado por esta massa. Tem grande influência sobre a pressão do fluxo de ar que atravessa a massa de grãos, refletindo-se no dimensionamento dos ventiladores, nos sistemas de secagem e aeração e na potência dos motores.

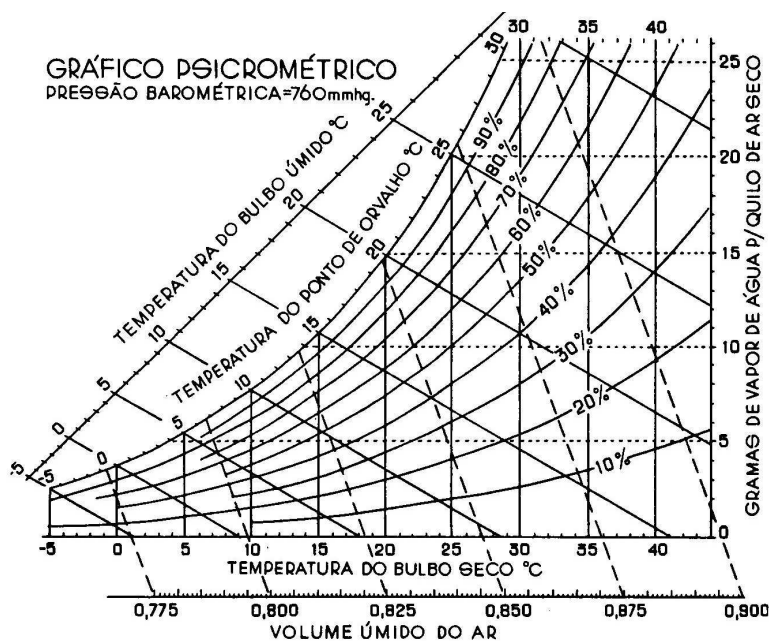
1.5 Ar

O ar intergranular de uma massa de grãos, encontra-se em contínuo movimento devido às correntes de convecção. Representando aproximadamente 40% do volume do silo, através de micromovimentos ocorrem mudanças de umidade e temperatura no interior do silo, fazendo com que se altere a umidade dos grãos.

1.5.1 Psicrometria do ar

Segundo WEBER (2001), psicrometria do ar é o estudo das propriedades da mistura ar+vapor e é importante no processo de armazenagem, pois oferece as ferramentas necessárias para o perfeito conhecimento do ar, das suas características e do seu comportamento. Quando ocorrem mudanças em uma ou mais de suas condições, qualquer uma que se altere, interfere e muda várias outras condições.

Na armazenagem é fundamental o conhecimento da temperatura do ar (T) e da umidade relativa (UR). Para conhecer a umidade relativa, precisamos de um aparelho de leitura direta denominado higrômetro ou um psicrômetro, um aparelho de leitura indireta com dois termômetros, o bulbo úmido (T_u) e o de bulbo seco (T_s). Através do gráfico psicrométrico, conhecemos a umidade relativa do ar e diversas outras informações de interesse no estudo do ar (BLASZAK, 2005). A Figura (1.5) é um gráfico psicrométrico.



Fonte: Puzzi, (1986).

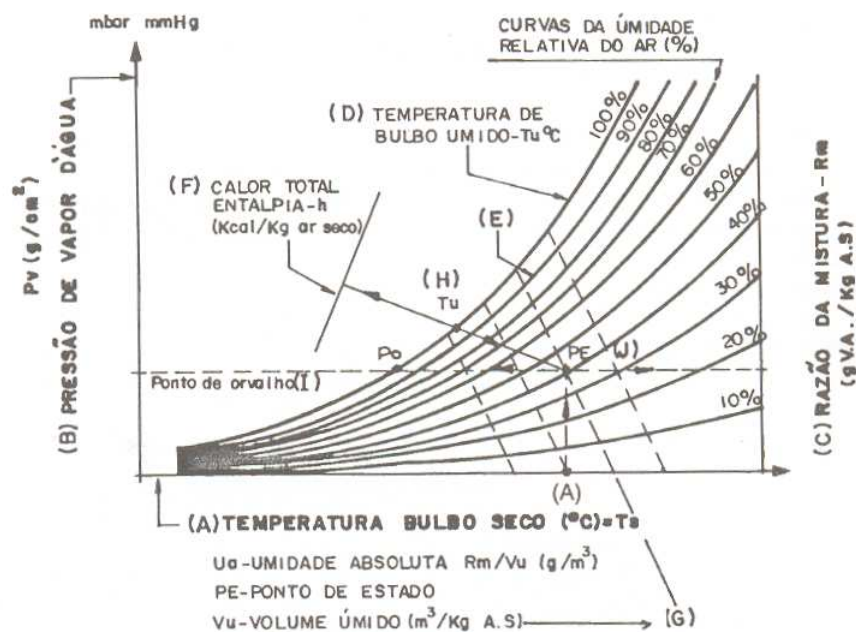
Figura 1.5: Gráfico psicrométrico.

- A) Temperatura do Bulbo Seco, T_s - a linha horizontal inferior, linha das abscissas, contém a escala de -5°C à $+45^{\circ}\text{C}$, da temperatura do termômetro de bulbo seco.
- B) Pressão de Vapor, P_V - é a medida na ordenada, coluna à esquerda, a pressão de vapor d'água em mbar e em mmHg.
- C) Razão de Mistura, RM - na ordenada à direita, temos a escala de razão de mistura, que é o conteúdo de água sob forma de vapor contida no ar, por quilograma de ar seco, dado em g de vapor de água, (g/kg).
- D) Temperatura do Bulbo Úmido, T_u - a escala dessa temperatura se encontra na linha curva ao alto, sobre a escala da umidade relativa UR igual a 100%. Note que o valor da (T_u) indicada na escala, quando projetada para baixo, sobre o eixo das abscissas, coincide com os valores da T_s ($T_u = T_s$), Figura (1.6).

- E) Umidade Relativa do Ar, UR - se encontra nas linhas curvas, sendo a mais de baixo, e a curva de umidade 10% até o mais alto, de 100% que contém a escala do termômetro de bulbo úmido.
- F) Entalpia, h - é a medida do calor contido no ar e é dado em kcalorias por quilo de ar seco (kcal/kg).
- G) Volume Úmido, VU - é o volume de ar úmido em metros cúbicos por quilo de ar seco (m^3/kg).
- H) Umidade Absoluta, UA - é o quociente entre a razão da mistura (RM) e o volume de ar em (g/m^3).
- I) Ponto de Orvalho, PO - é a temperatura na qual se inicia a condensação do vapor d'água. Orvalho é o produto da condensação da umidade atmosférica devida ao abaixamento da temperatura. O seu valor encontrado sobre a curva UR é igual a 100%.
- J) Ponto de Estado, PE - é o local que se estabelece no gráfico psicrométrico, pela intersecção de duas ou mais linhas das condições do ar. Conhecidas duas condições de estado, se localiza o PE, e através dele, pode-se conhecer todas as demais características do ar em estudo.

1.6 Aeração

Os grãos armazenados a granel necessitam periodicamente, de um arejamento para manter suas qualidades. A aeração é o método de controle mais difundido e utilizado na preservação dos grãos armazenados. Essa tecnologia é utilizada para modificar o microclima da massa de grãos, criando condições desfavoráveis ao crescimento de organismos prejudiciais ao grão. Essa técnica consiste na movimentação forçada do ar ambiente adequado através da massa de grãos, com o objetivo geral de diminuir e uniformizar a temperatura (PUZZI, 1986). O ar é



Fonte: Weber, (2001).

Figura 1.6: Esquema simplificado do gráfico psicrométrico.

insuflado ou aspirado por meio de um ventilador e em seguida é distribuído pela massa de grãos por meio de dutos perfurados (LASSERAN, 1981).

O principal objetivo da realização da aeração é a redução da temperatura. Por isso, o processo deve ser conduzido quando a temperatura do ar é inferior à temperatura dos grãos. Leva-se ainda em consideração dois fatores importantes: a umidade relativa do ar e a diferença entre a temperatura do grão e a do ar (PEREIRA, 1995).

Segundo SCHULZ (2003), a maior resistência ao fluxo de ar num sistema de aeração é causada pela massa de grãos. Essa resistência ao escoamento do ar depende:

- dos parâmetros do fluxo de ar;
- das características da superfície do produto (rugosidade);
- da forma e tamanho das impurezas;
- do tamanho e quantidade de grãos quebrados;

- do grau de compactação da massa de grãos;
- da configuração e tamanho dos espaços intersticiais;
- da homogeneidade da massa de grãos;
- da altura da camada do produto.

Diferenças significativas de porosidade ou presença de impurezas em determinadas regiões da massa de grãos, podem oferecer resistência maior ou menor à passagem do ar, criando regiões super-aeradas e outras sub-aeradas. O resultado disso é a formação de gradientes de umidade e/ou temperatura e ainda a formação de focos de infestação de fungos. Portanto, a aeração precisa ser uniforme. (BORGES, 2002).

Segundo WEBER (2001), existem quatro tipos de aeração que são classificadas a seguir, no que diz respeito à complexidade e responsabilidade, a partir da simples manutenção até a aeração secante que é a mais forte e exige volumes maiores de ar:

- *Aeração de Manutenção*

Neste caso, os grãos depositados no silo devem estar secos, frios e limpos. Ela tem como finalidade neutralizar o aquecimento espontâneo dos grãos e as correntes de convecção, que se formam devido às diferenças de temperatura na massa.

- *Aeração Corretiva*

É aplicada quando em um determinado ponto da massa de grãos se verifica a elevação da temperatura acima do normal. Esta alteração pode ser causada por: local com elevada concentração de impurezas, foco com desenvolvimento acentuado de microorganismos, infiltração de umidade ou acúmulo de finos e quebrados impedindo à passagem do ar. Sempre que for constatado um aumento de temperatura em

alguns pontos, deve-se realizar a aeração, por isso é indispensável o acompanhamento diário da temperatura da massa de grãos.

- *Aeração de Resfriamento*

É usada para resfriar massas de grãos que estão com temperaturas acima das indicadas para a boa conservação. Existem dois motivos para os grãos serem depositados com temperaturas elevadas no silo: os grãos, após passarem pelo secador onde secam e resfriam, mesmo "frios", a temperatura será de 5°C a 10°C acima da temperatura ambiente, o que representa uma temperatura elevada, especialmente nos dias quentes. Outro motivo, diz respeito a uma estratégia de secagem em que se utiliza o secador pelo sistema contínuo ou intermitente, com a secagem a corpo inteiro, sem resfriamento no secador. Neste caso, os grãos saem quentes e o resfriamento deverá ser feito no silo. É indispensável que o resfriamento se dê dentro de certos limites de tempo, para que não comprometa a qualidade dos grãos.

- *Aeração Secante*

Uma unidade de armazenagem pode ser dotada de um sistema especialmente projetado para realizar a secagem no próprio silo. O teor de umidade máxima dos grãos introduzidos na célula é determinado no projeto e deve ser observado, bem como as condições climáticas. Períodos frios e úmidos não se prestam para a secagem no silo, já que ela se dará muito lentamente, propiciando a deterioração de parte dos grãos.

1.6.1 Objetivos da aeração

O principal objetivo da aeração é a manutenção da qualidade e quantidade da massa armazenada, através de um sistema de ventilação mecânico. A

aeração pode trazer benefícios para o produto armazenado quando esta técnica for utilizada de maneira preventiva, nunca de maneira corretiva.

1.6.1.1 Resfriamento da massa de grãos

O resfriamento da massa de grãos é o principal, e o mais vantajoso benefício da aeração (PEREIRA, 1995).

Diminuindo-se a temperatura da massa, para o produto que está com determinado teor de umidade, diminui-se também a atividade da água, isto é, diminui-se a disponibilidade de água para atividades biológicas tanto do grão como da microflora presente. A diminuição da temperatura, também irá retardar, ou até inibir, o desenvolvimento de insetos. A temperatura é também um fator para a respiração dos grãos, quanto menor a temperatura, menor a velocidade de respiração e conseqüentemente menor a produção de calor.

A aeração é a técnica que permite modificar o microclima da massa de grãos, para estabelecer condições para a sua conservação. Diminuindo a temperatura da massa de grãos pode-se inibir a atividade biológica, ou ainda, se isso não for possível, estabelecer uma limitação para a velocidade dos processos de deterioração.

1.6.1.2 Impedir a migração e a condensação da umidade

Geralmente os grãos são armazenados com temperatura altas, comparadas com as temperaturas ambientais baixas que ocorrem onde o inverno é muito rigoroso. Se a temperatura ambiental diminui, isto causa um diferencial de temperatura através da massa de grãos.

Em silos metálicos os grãos da camada superior que estão próximos às paredes do silo, estarão numa temperatura menor que aquela do interior da massa. Em graneleiros, os grãos da camada superior estarão em temperatura menor que

a do interior da massa de grãos. Assim, há condições para o estabelecimento de correntes de ar movimentado por convecção natural.

O principal objetivo da aeração é manter a temperatura uniforme nos grãos armazenados, impedindo, assim, a migração de umidade.

1.6.1.3 Retirar "bolsas de calor" da massa armazenada

Em determinadas regiões do silo, podem ocorrer ataques de insetos ou crescimento de fungos onde a secagem for insuficiente, causando o aquecimento da massa de grãos.

A massa de grãos apresenta baixo coeficiente de condução de calor. Pequenas quantidades de calor, resultantes de um foco de infestação de insetos ou crescimento de fungos nos grãos que não são rapidamente dissipados permanecem na massa como "bolsas de calor". O aumento da temperatura se propaga lentamente para a periferia da bolsa. Na massa de grãos ocorrem diferenças de temperatura, resultando num movimento de ar quente do foco para a superfície do grão. Se as condições de temperatura da superfície do grão ou do ar exterior forem suficientemente baixas, ocorre a condensação da umidade, ocasionando o aumento da umidade do grão e a deterioração deste.

1.6.1.4 Inibir a atividade de fungos e insetos

Mantendo a temperatura na faixa de 17 a 22°C e a umidade inferior a 30%, inibe-se o desenvolvimento algumas espécies, pois as condições ideais de desenvolvimento estão na faixa de 23°C a 35°C e umidade relativa próxima de 70%.

CALDERWOOD *et al.* (1984) estudaram o efeito da aeração em arroz armazenado, ao longo de 54 meses, em silos metálicos e concluíram que o controle de insetos foi o principal fator para o sucesso do armazenamento. Nesse contexto, a aeração da massa de grãos mostrou-se eficiente para reduzir a temperatura do pro-

duto abaixo da temperatura ótima para o desenvolvimento de insetos e proporcionar, ao final do armazenamento, um produto com boa germinação e baixa acidez.

ARTHUR (1994) estudou grãos de milho armazenados em silos com aeração contínua. Populações de insetos (*Sitophilus zeamais* e *Tribulium castaneum*) foram reduzidas em silos que continham sistema de aeração.

1.6.1.5 *Conservação temporária dos grãos úmidos*

A aeração é freqüentemente aplicada em unidades armazenadoras para manter por um certo período de tempo, sem aquecimento, uma massa de grãos úmidos, antes da secagem.

Numa massa de grãos úmidos é intenso o processo respiratório, devido ao metabolismo dos grãos. No processo respiratório a matéria seca é consumida e a energia produzida resulta em aquecimento da massa. Aerando continuamente uma massa de grãos, remove-se o calor resultante da respiração do grão e evita-se o crescimento de fungos pela redução de temperatura da massa de grãos.

A conservação temporária de grãos úmidos em climas tropicais é muito difícil, pois em temperaturas mais altas a respiração, o crescimento de fungos e a deterioração do grão são mais rápidas.

A armazenagem temporária de grãos úmidos é um processo bastante arriscado, a aeração deverá ser executada com grande cuidado e supervisão, com maior fluxo de ar possível, e com a temperatura do ar menor que a do grão, preferivelmente.

1.6.1.6 *Secagem limitada*

Em geral, a aeração não tem como objetivo a secagem dos grãos. Entretanto, a manutenção temporária dos grãos úmidos pode resultar na perda de umidade do grão.

1.6.1.7 Remoção de odores

O crescimento de fungos e a fermentação causam odores estranhos. A aeração pode ser utilizada para dissipar esses odores, com a renovação do ar intergranular.

1.6.1.8 Aplicação de fumigantes

A aplicação de fumigantes através do sistema de aeração é um método prático e eficiente de expurgo de grãos, sendo a distribuição uniforme em toda a massa.

Uma das vantagens do controle de insetos pela manipulação da temperatura na massa de grãos é o menor uso de fumigantes (REED *et al.*, 2000). CUPERUS *et al.* (1986) relataram que grãos de trigo armazenados sem aeração foram tratados com fumigantes duas vezes mais que aqueles aerados.

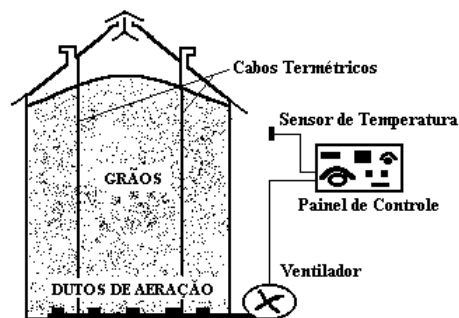
1.7 Sistemas de Aeração

Um sistema de aeração visa a distribuição uniforme da movimentação de ar através da massa de grãos, de modo que a camada de grãos seja aerada homogeneamente (SCHULZ, 2003) .

Um sistema de aeração é composto pelas estruturas de armazenagem (silos metálicos ou graneleiros), ventiladores, dutos de distribuição do ar, dutos de suprimentos do ar, sistema de termometria e sistema de controle da aeração. A Figura (1.7) ilustra um sistema de aeração de um silo.

A aeração é usada para manter a qualidade do grão. A qualidade é mantida movimentando-se o ar ambiente adequado através da massa de grãos armazenada. O ar atravessa a massa de grãos por ação de um ventilador que transforma a energia mecânica em cinética e gera uma pressão para vencer a resistência

oferecida pelos sistemas ao escoamento do ar. As resistências são oferecidas principalmente pela massa de grãos, chapa perfurada e perdas que ocorrem em dutos e transições (TOÉ, 2005).



Fonte: Adaptado de Gomes, (1998).

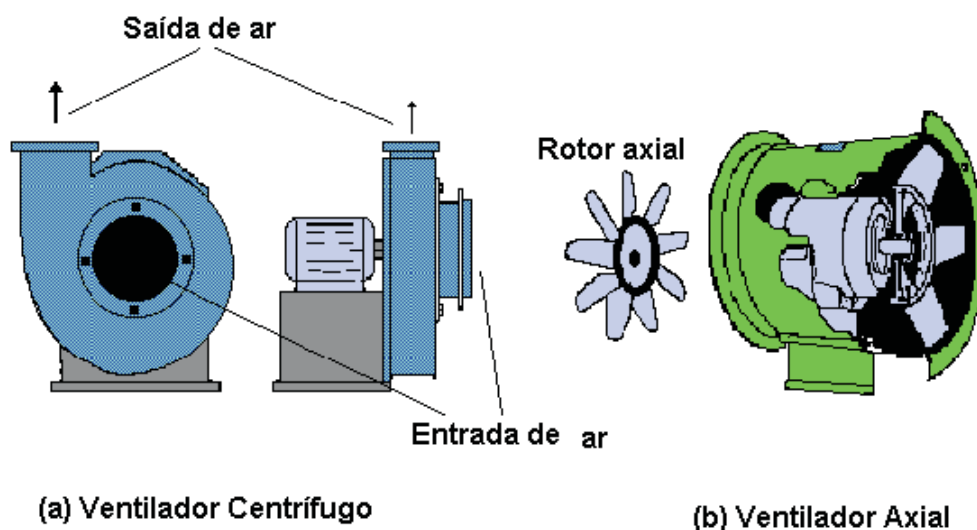
Figura 1.7: Componentes básicos de um sistema de aeração.

O ar, em sistemas de aeração é distribuído para a massa de grãos através de condutos, que são tubos (armazéns) com paredes perfuradas ou chapas perfuradas que permitem a passagem do ar, e devem estar espaçados nos silos horizontais ou armazéns de forma a distribuir da melhor maneira possível o ar através da massa de grãos.

Os ventiladores são máquinas que insuflam ou aspiram o ar de maneira contínua. São escolhidos com vistas a fornecer uma certa vazão de ar sob determinada pressão. A vazão é expressa em metros cúbicos por segundo (m^3/s) ou metros cúbicos por hora (m^3/h). São usados dois tipos de ventiladores: centrífugo e radial (Figura (1.8)). Sendo que os ventiladores centrífugos são mais recomendados quando é necessário produzir maior pressão (SAVICKI, 2001).

Os ventiladores são dotados de motores elétricos cuja potência é expressa em cavalo-vapor (HP), e variam quanto a voltagem (220-760 volts), fases (trifásicos) e frequência (50 ou 60 Hz).

Segundo PUZZI (1986), o projeto de um sistema de aeração deve considerar a vazão de ar necessária, pressão estática segundo os grãos e a potência requerida.



Fonte: Silva, (2000).

Figura 1.8: Ventiladores centrífugos e axiais.

A escolha de um ventilador depende do volume de ar requerido e da pressão estática contra a qual o ventilador precisa operar para movimentar o ar. Determina-se a pressão estática através de aparelhos denominados manômetros, que são dutos (o mais simples na forma de U) enchidos parcialmente com um líquido (água) com determinado peso específico, com uma das extremidades se comunicando com o conduto e a outra livre para a atmosfera. O desnível do líquido entre os dois dutos determina a pressão estática.

A estimativa da potência do motor para atender o sistema de aeração geralmente é feita a partir de gráficos que relacionam a vazão com pressão estática e a espessura da camada de grãos (SAVICKI, 2001).

Segundo ARAÚJO (1986), o cálculo da potência do ventilador é função da vazão do ar, pressão estática total e eficiência do ventilador. Convencionalmente, esta pressão é determinada por meio de equações e gráficos que relacionam a perda de pressão por unidade de espessura da camada de produto com a densidade de fluxo de ar, ou seja, com a vazão por unidade de área.

1.8 Modelos Matemáticos

Quando o ar é forçado a passar por uma camada de grãos, a resistência ao escoamento, denominada de pressão estática, é resultado da perda de energia devido ao atrito e turbulência. Esta resistência é superada fornecendo-se vácuo na saída. Para um dado fluxo de ar é necessário determinar a quantidade de energia que o ventilador tem que transferir ao ar para vencer a resistência oferecida pela massa de grãos e mantê-lo em movimento. (TOÉ, 2005).

SHEDD (1953) apresentou um modelo relacionando a densidade de fluxo e queda de pressão estática, baseado em dados experimentais. O modelo (1.1) supõe que não ocorre variação da queda de pressão por unidade de profundidade, ou seja, independe da altura. Contudo, esta suposição não é correta para massas de grãos de alturas elevadas.

$$Q = a(\Delta P)^b, \quad (1.1)$$

onde:

Q =vazão volumétrica de ar por unidade de área ($m^3 \text{min}^{-1} m^{-2}$);

ΔP =variação da pressão estática com a altura da camada de grãos (Pa/m);

a, b =constantes que dependem do tipo e condição de grão.

A Tabela 1.5 apresenta os valores das constantes a e b para fluxos na faixa de 0,05 a 0,20 m/s .

HUKKIL & IVES (1955) utilizando os dados experimentais obtidos por SHEDD, propuseram uma segunda equação para a perda de pressão em uma camada de grãos, para uma faixa de escoamento do ar no intervalo de 0,61 a 12,2 $m^3 \text{min}^{-1} m^{-2}$.

$$\Delta P = \frac{aQ^2}{\ln(1 + bQ)}, \quad (1.2)$$

Tabela 1.5: Valores das constantes a e b da equação (1.1).

Produto	a	b
Milho	0,163	0,68
Trigo	0,171	0,80
Soja	0,205	0,68

Fonte: Shedd, (1953).

onde a e b são coeficientes que dependem do produto.

MATTHIES & PETERSON (1974), realizando um estudo com esferas propuseram a seguinte equação:

$$\frac{\Delta P}{H} = K_M F_M \frac{H}{d} \frac{1}{\varepsilon^4} \frac{\rho}{2g} W^2, \quad (1.3)$$

onde:

ΔP =perda de pressão ($mmCA$);

F_M =fator de fricção (adimensional);

K_M =coeficiente que depende do produto;

d =diâmetro equivalente da partícula (m);

ε =porosidade (decimal);

ρ =massa específica do ar (kg/m^3);

W =velocidade do ar (m/s);

g =fator de conversão (N/m^2) para ($mmCA$), $g = 9,81$;

H =espessura da camada de grãos (m).

PIERCE & THOMPSON (1975), criaram um modelo matemático para prever padrões de pressão do ar e a trajetória de correntes em silos de forma cônica, obtiveram uma equação diferencial parcial em coordenadas cilíndricas. Os padrões de pressão do ar foram obtidos segundo o procedimento usado por BROKKER (1961,

1969), para armazenagem em silos de forma retangular. Obtiveram importantes parâmetros para a projeção de sistemas de aeração em silos de forma cônica, tais como: diâmetro da base, ângulo de repouso do grão armazenado, tipo de grão e tamanho dos dutos.

Para o escoamento em meio poroso é conhecida a equação de Blake-Kozeny, válida somente para o regime laminar dada por $\left(\frac{Re'}{(1-\varepsilon)} < 10\right)$, onde $Re' = \frac{V_\infty D_p \rho}{\mu}$ é o número de Reynolds modificado:

$$\Delta P = 150 \frac{V_\infty \mu L (1 - \varepsilon)^2}{D_p \varepsilon^2}, \quad (1.4)$$

onde

μ =viscosidade dinâmica ($lb_f s ft^{-2}$);

L =comprimento da coluna porosa (ft);

V_∞ =velocidade superficial do fluido (ft/s);

D_p =diâmetro da partícula (ft);

ρ =massa específica do ar (lb_m/ft^3).

Para o escoamento turbulento, $\left(\frac{Re'}{(1-\varepsilon)} > 1000\right)$ é conhecida a equação de Burke-Plumer:

$$\Delta P = 3,50 \frac{L}{D_p} \frac{\rho V_\infty^2 (1 - \varepsilon)}{2 \varepsilon^3}, \quad (1.5)$$

Para o escoamento no regime de transição $\left(10 < \frac{Re'}{(1-\varepsilon)} < 1000\right)$, Ergun (1952) mostrou que os dados de diversos pesquisadores apresentam concordância satisfatória com a soma da expressão para o fluxo laminar com a turbulenta, obtendo:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{V_\infty \mu (1 - \varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} + 1,75 \frac{\rho V_\infty^2 (1 - \varepsilon)}{D_p^2 \varepsilon^3}, \quad (1.6)$$

BAKKER-ARQUEMA (1969), testaram a equação de ERGUN trabalhando com sementes de cereja e sugeriram a seguinte modificação:

$$\Delta P = 1,22 \left| 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu \frac{H}{D^2} \frac{V}{g} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon) h}{\varepsilon^3} \frac{V^2}{d \rho g} \right|, \quad (1.7)$$

HAQUE *et al.* (1978) e GRAMA *et al.* (1984) estudaram a resistência ao fluxo de ar, causada pela presença de impurezas na massa de grãos de milho, e concluíram que um teor maior de finos, materiais estranhos menores que os grãos, reduz a porosidade e eleva a queda de pressão estática ao longo da camada do produto, ressaltando que esta resistência ao escoamento de ar é inversamente proporcional ao tamanho das impurezas. Resposta semelhante foi encontrada por CHUNG *et al.* (1984) trabalhando com grãos de sorgo.

SASSERON (1980) observou, dentre a diversas propriedades físicas de produtos agrícolas, que a massa específica aparente e a porosidade sofrem notada influência do percentual e do tamanho de impurezas presentes na massa de grãos, enquanto JAYAS (1991) avaliaram a resistência ao fluxo de ar em camadas de sementes de linho, com diferentes tamanhos e percentuais de impurezas, verificando que o acréscimo de finos, em nível de até 5%, resultou em um aumento gradual da massa específica aparente, entretanto, as variações correspondentes à porosidade foram pequenas.

Em HAQUE, AHMED e DEYOE (1982), foi estudada a variação na resistência à passagem do ar, ocasionada pela variação da umidade da massa de grãos. Foi observado que a resistência decrescia com o aumento da umidade do grão. Analisando as curvas de ΔP pelo teor de umidade, a expressão que melhor representou esta relação foi:

$$\Delta P = AW + BW^2 + CMW, \quad (1.8)$$

onde

ΔP =queda de pressão;

W =velocidade do ar (m/s);

M =umidade do grão;

A, B e C =constantes.

MIKETINAC *et al.* (1986) determinaram, através da técnica de elementos finitos, a distribuição do fluxo de ar em silo de fundo plano e cônicos e com diferentes dutos de distribuição de ar, e constataram que a técnica de elementos finitos pode ser usada para prever a distribuição do ar nos silos e determinar as zonas onde ocorre baixa de velocidade do ar.

ARAÚJO (1986), investigou a perda de pressão em função da espessura da camada de grãos de soja (H), densidade de fluxo de ar (Fa) e teor de finos (F). Para os intervalos de densidade de fluxo de ar de 0,9 a 30,2 $m^3min^{-1}m^{-2}$, teor de finos de 0,01 a 0,2 decimal e espessura da camada de grãos de 0,4 à 3,0 metros de altura, obteve a seguinte equação:

$$\Delta P = 28 - 13,87H - 135,9F - 4,568(Fa) + 0,0948(Fa)^2 + 72,69HF + 2,795H(Fa) + 15,12F(Fa). \quad (1.9)$$

O autor conclui que a espessura da camada de grãos de soja, considerada explicitamente no modelo, revelou significativo efeito em relação a variável perda de pressão.

TONIAZZO (1997), KHATCHATOURIAN *et al.* (1999), estudaram a influência do teor de umidade para a queda de pressão do ar numa camada de grãos de soja, concluíram que o aumento do teor de umidade reduz a resistência imposta pelos grãos à passagem do ar. Os autores, utilizando dados experimentais próprios, expressaram os coeficientes a e b da equação de Shedd como uma função linear do teor de umidade (Tu), obtendo:

$$\begin{aligned} a &= 0,0014(Tu) - 0,013 \\ b &= -0,015(Tu) + 0,777. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Valendo-se de relações entre velocidade e gradientes de pressão e admitindo a homogeneidade da massa de grãos, resolveram, pelo método dos elementos finitos, a equação diferencial parcial não homogênea em relação a pressão:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (1.11)$$

onde $K = A|\text{grad}P|^{B-1}$.

CORRÊA *et al.* (2000) determinaram experimentalmente os valores de massa específica aparente e porosidade, para grãos de feijão de duas variedades em função do tamanho de impurezas na massa do produto, ajustando equações matemáticas a dados experimentais. Concluíram que a massa específica aparente de grãos de feijão diminui e a porosidade aumenta com elevação do nível de impurezas grossas e redução de impurezas finas.

SAVICKI (2001), apresentou um modelo matemático do escoamento do ar em sistemas de armazenagem de grãos de soja para o caso bidimensional, onde considera-se a massa de grãos um meio não-homogêneo devido a mudança no valor da porosidade para diferentes alturas da camada de grãos, ocasionada pela compactação exercida pelo peso dos próprios grãos ou pela presença de vibrações.

Foi usada uma equação diferencial parcial não-linear para calcular a pressão estática na forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (1.12)$$

onde

K =coeficiente de permeabilidade;

P =pressão;

Da mesma forma, usaram uma equação diferencial parcial para a função corrente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{K} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{K} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = 0 \quad (1.13)$$

onde

K =coeficiente de permeabilidade;

ψ =função corrente;

Foi elaborado um aplicativo que utiliza a técnica dos elementos finitos para a solução das equações diferenciais parciais presentes no modelo (pressão e função corrente) possibilitando a construção dos gráficos das isóbaras e linhas de corrente. O programa pode ser utilizado para as simulações do ar em silos e armazéns com diferentes geometrias e sistemas de distribuição de ar.

DEVILLA *et al.* (2005) estudaram a distribuição em uma massa de grãos de milho submetidos a um processo de aeração, através de simulações em que se empregou a técnica de elementos finitos. A distribuição de ar proveniente das simulações, indicou a existência de zonas de baixa velocidade na massa de grãos situadas, na sua parte inferior, próxima ao centro do silo e à sua parede.

1.9 Objetivos

Considerando a importância da aeração e a eficiência deste sistema para manter a qualidade dos grãos armazenados e a carência de estudos sobre o efeito da compactação e sua influência sobre a variação da porosidade e na distribuição do ar em silos, o presente trabalho tem como objetivos:

- Desenvolver um equipamento para modelar as condições de compactação na armazenagem de grãos em silos de grande porte;
- Avaliar o funcionamento do equipamento (picnômetro) para determinação dos valores de porosidade;

Realizar os estudos experimentais para:

-
- Encontrar os valores de porosidade, considerando a compactação para vários tipos de massas de grãos: soja, milho e arroz;
 - Obter as relações experimentais entre velocidade do ar e gradiente de pressão estática nas mesmas condições, para várias profundidades das camadas;
 - Incluir no modelo matemático proposto por KHATCHATOURIAN *et al.* (2004) a influência da variação da porosidade.

2 MODELO MATEMÁTICO

2.1 Introdução

Modelagem Matemática consiste na arte de transformar problemas da realidade em problemas matemáticos e resolvê-los interpretando suas soluções na linguagem do mundo real (BASSANEZZI, 2001).

Diversas ferramentas matemáticas podem ser utilizadas para observar esses processos. As equações diferenciais nos permitem modelar matematicamente quantidades que variam continuamente no tempo.

O avanço tecnológico no campo computacional constitui um forte auxílio a modelagem matemática, permitindo a sofisticação dos modelos numéricos. O método dos elementos finitos é um método numérico para a solução de complexos problemas da engenharia. Atualmente, ele é considerado um dos melhores métodos para a solução de uma grande variedade de problemas práticos.

2.2 Estabelecimento das Equações

O sistema de equações que modela o escoamento de um fluido viscoso incompressível isotérmico, pode ser descrito pelo sistema de equações da continuidade e de Navier-Stokes:

$$\operatorname{div}W = 0, \quad (2.1)$$

$$\rho \frac{dW}{dt} = -\operatorname{grad}P + \mu \nabla^2 W, \quad (2.2)$$

onde

W = vetor velocidade (m/s);

ρ = densidade (kg/m^3);

t =tempo (s);

P =pressão (Pa);

μ =viscosidade ($Pa\ s$).

A solução deste sistema, depende do número de Reynolds efetivo, encontrado pela velocidade média calculada, levando-se em conta a porosidade da massa de grãos (velocidade aparente) e relacionando as distribuições de pressão e velocidade em cada ponto do domínio de integração para cada instante de tempo na forma de uma função $W = f(gradP)$.

KHATCHATOURIAN *et al.* (2001), mostraram com dados experimentais próprios que, mesmo para números de Reynolds iguais para escoamento de ar em vários tipos de massas de grãos, a relação entre a velocidade e o gradiente de pressão é diferente para cada tipo de grão.

Fatores como a compactação da massa de grãos, a presença de impurezas e a variação da umidade, forma geométrica dos grãos, distinção na rugosidade da superfície da partícula, aumentam a diferença entre os valores calculados pela equações (2.1) e (2.2) e os valores reais medidos. Isto significa que, tentar simular o processo de escoamento de ar em massas de grãos utilizando as equações da continuidade (2.1) e de Navier-Stokes (2.2) contribui na teoria, mas está longe de aplicações práticas.

Analisando as relações experimentais entre a velocidade do ar e a queda de pressão obtida por SHEDD (1953) para o caso unidimensional para intervalos de variação de velocidade que utiliza-se em silos, foi obtida uma função empírica $W = f(\frac{dP}{dy})$, que na forma implícita leva em conta a dependência do escoamento de viscosidade e o fator de atrito correspondente a cada tipo de grão considerado. Para intervalos de variação de velocidade correspondentes ao regime laminar esta função é equivalente à fórmula de Poiseuille ou a equação de Blake-Kozeny (uma função linear entre a queda de pressão e a velocidade).

Assim, para o regime laminar no caso unidimensional, temos:

$$\frac{dP}{dy} \sim |W| \Rightarrow |W| = K \frac{dP}{dy}, \quad (2.3)$$

onde K é o coeficiente de proporcionalidade.

Aplicando logaritmo e derivando, obtemos:

$$\frac{d(\log|W|)}{d\left(\log\left|\frac{dP}{dy}\right|\right)} = 1, \quad (2.4)$$

Para o regime turbulento que corresponde a valores maiores de velocidade, a queda de pressão é proporcional ao quadrado da velocidade (equação de Burke-Plumer). Assim, tem-se:

$$\frac{dP}{dy} \sim |W|^2 \Rightarrow |W| = K \left(\left|\frac{dP}{dy}\right|\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.5)$$

Aplicando logaritmo e derivando, temos:

$$\frac{d(\log|W|)}{d\left(\log\left|\frac{dP}{dy}\right|\right)} = 0.5, \quad (2.6)$$

Para descrever a variação da derivada $d(\log|W|)/d(\log(|dP/dy|))$ para os três domínios de fluxo que correspondem aos regimes de escoamento laminar, transiente e turbulento, foi proposta a seguinte fórmula:

$$\frac{d(\log|W|)}{d\left(\log\left|\frac{dP}{dy}\right|\right)} = \frac{3}{4} - \frac{\arctan(U)}{2\pi}, \quad (2.7)$$

onde $U(P) = a \log(|dP/dy|) + b$ é um argumento intermediário; $a > 0$ e b são constantes.

Evidentemente, quando $dP/dy \rightarrow 0$,

$$\lim_{U \rightarrow -\infty} \left(\frac{3}{4} - \frac{\arctan(U)}{2\pi} \right) = 1,$$

que corresponde ao regime laminar e, quando $dP/dy \rightarrow \infty$,

$$\lim_{U \rightarrow \infty} \left(\frac{3}{4} - \frac{\arctan(U)}{2\pi} \right) = 0.5,$$

que corresponde ao regime turbulento.

Se integrarmos a equação (2.7) em relação ao logaritmo do gradiente de pressão, encontramos a expressão para a velocidade:

$$\log|W| = [\ln(1 + U^2) - 2U \arctan(U)]/\pi + 3U/4a + C, \quad (2.8)$$

onde C é a constante de integração.

Os dados experimentais obtidos por SHEDD (1953), comparados com os cálculos feitos pela equação (2.8) proposta, mostraram uma boa coincidência para o intervalo de variação de dP/dy . Assim, a expressão analítica obtida para a função $|W| = f(dP/dy)$, relaciona a velocidade do ar com a queda de pressão para o caso unidimensional.

Se o escoamento de ar não sofrer mudanças bruscas, isto é, existe fluxo predominante em todas os domínios de aeração dos grãos armazenados, a equação (2.8) pode ser aplicada para os casos bi e tridimensionais. Nesse caso, substituí-se a queda de pressão (dP/dy) na equação (2.7) pelo módulo do gradiente de pressão $|gradP|$.

Recentemente, KHATCHATOURIAN *et al.* (2004) mostraram que o escoamento de ar através de uma massa de grãos em silos com geometria complexa pode ser descrito pelo sistema de equações:

$$\operatorname{div}W = 0, \quad (2.9)$$

$$W = -\frac{\operatorname{grad}P}{|\operatorname{grad}P|} \exp(\ln 10([\ln(1 + U^2) - 2U \arctan(U)]/\pi + 3U/4a + C)), \quad (2.10)$$

onde $U = a \log(|\operatorname{grad}P|) + b$ é um argumento intermediário; $a > 0$ e b são constantes.

A equação escalar (2.9) é a equação da continuidade para fluidos incompressíveis. A equação vetorial (2.10) substitui a equação de Navier-Stokes (2.2) e expressa que os vetores de velocidade e gradiente de pressão são colineares em todos os pontos do domínio e que a razão entre os módulos destes vetores é uma função do gradiente de pressão.

O coeficiente de permeabilidade K é expresso por:

$$K = \exp(\ln 10([\ln(1 + U^2) - 2U \arctan(U)]/\pi + 3U/4a + C))/|\text{grad}P|. \quad (2.11)$$

Usando a equação (2.10), podemos expressar as componentes da velocidade u e v para o caso bidimensional da seguinte forma:

$$u = -K \frac{\partial P}{\partial x}, v = -K \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2.12)$$

Substituindo a equação (2.12) na equação (2.9) obtemos a equação diferencial parcial não-linear em relação à pressão:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0. \quad (2.13)$$

2.3 Formulação do Modelo com Influência da Porosidade

Neste trabalho, o modelo matemático proposto por KHATCHATOURIAN *et al.* (2004) é complementado com a variação da porosidade. A variação da porosidade determina a mudança da área efetiva da seção transversal e da velocidade do ar para diferentes alturas da camada de grãos, o que provoca a variação do coeficiente de permeabilidade.

Podemos descrever a equação da continuidade para o escoamento de ar através de uma massa de grãos, levando-se em conta a variação da porosidade da seguinte forma:

$$\vec{W} = (u, v), \quad (2.14)$$

$$u = -K \frac{\partial P}{\partial x}, v = -K \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (2.15)$$

,

$$\vec{W} = K \left(\frac{\partial P}{\partial x} i + \frac{\partial P}{\partial y} j \right), \quad (2.16)$$

sendo u e v componentes da velocidade.

$$\text{div}(\varepsilon \vec{W}) = 0, \quad (2.17)$$

onde

$$U = a \log(|\text{grad}P|) + b, \quad (2.18)$$

$$K = \exp(\ln 10(\{[\ln(1 + U^2) - 2U \arctan(U)]/\pi + 3U\}/4a + C))/|\text{grad}P|, \quad (2.19)$$

e

\vec{W} = vetor fluxo de ar;

ε = porosidade;

K = coeficiente de permeabilidade;

P = pressão do ar.

Substituindo as componentes da equação (2.15) na equação (2.17) e considerando a variação da porosidade, temos a equação para a pressão na seguinte forma:

$$\varepsilon \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right] + K \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + K \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} = 0. \quad (2.20)$$

onde

$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}$ = função que depende da superfície livre dos grãos;

$\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}$ = função determinada com dados experimentais próprios para silo com seção transversal constante.

O coeficiente de permeabilidade K e a porosidade ε variam em função de x e y .

As condições de contorno são:

$$P = P_c, \quad (2.21)$$

(condição de contorno de Dirichlet) que se refere aos valores da pressão na entrada e saída do ar na massa de grãos.

$$\vec{n} \text{grad}P = 0, \quad (2.22)$$

(condição de contorno de Neumann) onde \vec{n} é um vetor unitário normal às paredes e ao piso do silo.

A equação (2.20) é a equação do modelo matemático deste trabalho que junto com as condições de contorno, equações (2.21), (2.22) descrevem a distribuição de pressão e o escoamento do ar no silo levando-se em conta a influência da porosidade.

Em silos e armazéns onde a massa de grãos atinge alturas elevadas, ela passa a constituir um meio não-homogêneo, apresentando diferentes coeficientes de permeabilidade, que variam em função da altura da camada de grãos.

Neste trabalho vamos considerar a influência da compactação da massa de grãos em silos e armazéns de grande porte, causada pela força peso do próprio grão na operação de despejo destes nos armazéns ou silos.

Para este caso, em que a massa de grãos é considerada um meio não-homogêneo, admite-se que a equação (2.13) serve para descrever a distribuição de pressão na massa de grãos, desde que se leve em consideração a variação do coeficiente de permeabilidade devido a compactação.

Para considerar a não-homogeneidade da massa de grãos, escreve-se a equação (2.16) na seguinte forma:

$$\vec{W} = -K(x, y, P, a, b)gradP, \quad (2.23)$$

onde o coeficiente de permeabilidade é uma função que determina o que acontece em cada ponto do domínio de escoamento. Ele varia de acordo com a alteração do grau de compactação (porosidade) da massa de grãos, com o gradiente de pressão e com o tipo de grão.

Escrita desta forma, a equação (2.23) define um meio não-homogêneo e caracteriza um escoamento pseudo-potencial.

Para um meio isotrópico não-homogêneo, a equação (2.23) implica que:

$$\text{rot}(\vec{W}) = \text{rot}(-k\text{grad}P) = -K\text{rot} * \text{grad}P - \text{grad}K * \text{grad}P, \quad (2.24)$$

que mostra que o fluxo é rotacional, exceto no caso especial onde os vetores $\text{grad}P$ e $\text{grad}K$ são sempre paralelos.

De acordo com BEAR (1972), um fluxo bidimensional no plano xy ,

$$\frac{dx}{q_x(x, y, z, t_0)} = \frac{dy}{q_y(x, y, z, t_0)} = \frac{dz}{q_z(x, y, z, t_0)}, \quad (2.25)$$

torna-se:

$$dx/q_x = dy/q_y \Rightarrow q_y dx - q_x dy = 0, \quad (2.26)$$

Assim, a expressão matemática para as curvas equipotenciais (isóbaras) em um fluxo bidimensional pode ser encontrada considerando a ortogonalidade dos vetores \vec{W} e ds , ou seja:

$$\vec{W} \vec{ds} = W_x dx + W_y dy = 0, \quad (2.27)$$

onde ds é um vetor correspondente a um deslocamento elementar sobre as curvas equipotenciais.

Considerando a colinearidade dos vetores \vec{W} e $\text{grad}P$, as linhas de corrente, que coincidem com a trajetória das partículas para o caso estacionário, são ortogonais as isóbaras. A curva que, em cada ponto é tangente à direção do fluxo de ar é denominada linha de corrente. Admitindo a colinearidade dos vetores \vec{W} e dr , obtemos a expressão matemática para as linhas de corrente:

$$\vec{W} * \vec{dr} = 0, \quad (2.28)$$

onde r é o raio-vetor do ponto considerado e dr é um vetor que corresponde a um deslocamento elementar sobre a curva linha de corrente.

A equação (2.28) pode ainda ser apresentada da seguinte forma:

$$W_y dx - W_x dy = 0. \quad (2.29)$$

Desde que $\text{div}(\varepsilon\vec{W}) = 0$, equação (2.17), a equação (2.29) apresenta-se como diferencial total, onde:

$$W_x = -\varepsilon \frac{\partial\psi}{\partial y}, W_y = \varepsilon \frac{\partial\psi}{\partial x}, \quad (2.30)$$

onde ψ é a função corrente.

Para encontrarmos a equação para a função corrente (ψ), reescrevemos a equação (2.23) na forma:

$$-\text{grad}P = \varepsilon \frac{\vec{W}}{K}. \quad (2.31)$$

Aplicando o operador rotacional sobre o vetor gradiente de pressão, resulta:

$$\text{rot}(-\text{grad}P) = \text{rot}\left(\varepsilon \frac{\vec{W}}{K}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon \frac{W_y}{K}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon \frac{W_x}{K}\right) = 0. \quad (2.32)$$

Substituindo a equação (2.30) na equação (2.32) obtemos:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon \frac{1}{K} \frac{\partial\psi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon \frac{1}{K} \frac{\partial\psi}{\partial y}\right) = 0. \quad (2.33)$$

Considerando a variação da porosidade, temos a equação parcial:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon \frac{1}{K} \frac{\partial\psi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon \frac{1}{K} \frac{\partial\psi}{\partial y}\right) + \frac{1}{K} \frac{\partial\varepsilon}{\partial x} \frac{\partial\psi}{\partial x} - \frac{1}{K} \frac{\partial\varepsilon}{\partial y} \frac{\partial\psi}{\partial y} = 0. \quad (2.34)$$

A função ψ é chamada de função corrente de fluxo bidimensional, em um meio não-homogêneo. A interpretação física da função pode ser dada da seguinte forma: A Figura (2.1) mostra algumas linhas de corrente identificadas como ψ_A , $\psi_A + \Delta\psi$, $\psi_A + 2\Delta\psi$, etc. A direção de crescimento ψ (ou $\text{grad}\psi$) é escolhida de forma que $\text{grad}\psi$ é obtida de uma rotação anti-horária do $\text{grad}P$.

Consideramos dA um elemento de área de unidade de largura (na direção z) e ds de comprimento, onde ds é o comprimento de um elemento de área de um caminho arbitrário unindo os pontos A e B (sobre as linhas de corrente ψ_A e ψ_B respectivamente). A direção de dA é perpendicular a ds , assim temos:

$$d\vec{A} = \vec{1}z * d\vec{s}. \quad (2.35)$$

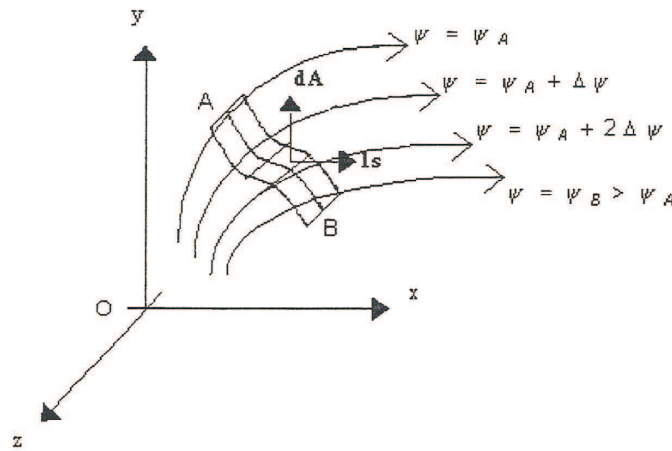


Figura 2.1: Ilustração das linhas de corrente.

Considere a integral:

$$Q_{AB} = \int_A^B \vec{q} d\vec{A} = \int_A^B \vec{q} (\mathbf{1}\vec{z} * d\vec{s}) = - \int_A^B (q_x dy - q_y dx) = - \int_A^B d\psi = \psi_A - \psi_B. \quad (2.36)$$

Disso, a descarga total entre duas linhas de corrente é obtida pela diferença entre os valores da função correspondente a essas linhas. A dimensão de ψ é volume por unidade de tempo por unidade de largura.

Observa-se que o caminho fechado para a integração entre A e B é imaginária, dependendo somente da fronteira A e B . Assim, ψ pode ser considerada uma função indeterminada à extensão de uma constante aditiva. De acordo com a convenção de sinais aqui empregada, $\psi_A < \psi_B$. Uma fronteira impermeável de um domínio de fluxo, com um fluxo sempre tangencial a ela, sempre coincide com uma linha de corrente.

2.4 Equações do Método de Elementos Finitos

Segundo SEGERLIND (1984), o método de elemento finitos tem sido aplicado na solução de uma grande variedade de problemas. Ele assume que qualquer distribuição contínua em um domínio, tal como a pressão, pode ser aproximada por

um modelo discreto composto de um conjunto de funções contínuas definidos em um número finito de subdomínios ou elementos.

Multiplicando a equação (2.20) pela função de forma $[N]^T$ e integrando em relação ao domínio V , tem-se:

$$\int \int \int_V [N]^T \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon K \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon K \frac{\partial P}{\partial y} \right) + K \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + K \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} \right] dV = 0, \quad (2.37)$$

onde $[N] = [N_i \ N_j \ N_k]$ e $\{P\} = \begin{Bmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{Bmatrix}$

Integrando por partes os dois primeiros termos da equação (2.37), obtemos as identidades:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial x} + [N]^T \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon K \frac{\partial P}{\partial x} \right). \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left([N]^T \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial y} + [N]^T \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon K \frac{\partial P}{\partial y} \right). \quad (2.39)$$

De onde:

$$[N]^T \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon K \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial x}. \quad (2.40)$$

$$[N]^T \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon K \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left([N]^T \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2.41)$$

Substituindo as equações (2.40) e (2.41) na equação (2.37), temos:

$$\begin{aligned} & \int \int \int_V \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left([N]^T \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right\} dV + \\ & \int \int \int_V \left([N]^T K \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + [N]^T K \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} \right) dV - \\ & \int \int \int_V \left\{ \varepsilon K \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right\} dV = 0. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Logo:

$$\int \int \int_V \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left([N]^T \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right\} dV =$$

$$\int \int \int_V \left\{ \varepsilon K \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right\} dV -$$

$$\int \int \int_V \left([N]^T K \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + [N]^T K \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} \right) dV. \quad (2.43)$$

Aplicando a equação de Ostrogradski-Gauss:

$$\int \int \int_V \operatorname{div} \vec{W} dV = \int \int_{\Omega} \vec{n} \vec{W} d\Omega, \quad (2.44)$$

tem-se:

$$\int \int \int_V \left\{ \varepsilon K \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \left([N]^T K \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + [N]^T K \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right\} dV =$$

$$\int \int_{\Omega} \left([N]^T \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial n} \right) d\Omega. \quad (2.45)$$

Usando a condição de fronteira sobre a parede:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = \vec{n} \operatorname{grad} P = 0, \quad (2.46)$$

temos:

$$\int \int_{\Omega} \left([N]^T \varepsilon K \frac{\partial P}{\partial n} \right) d\Omega = 0. \quad (2.47)$$

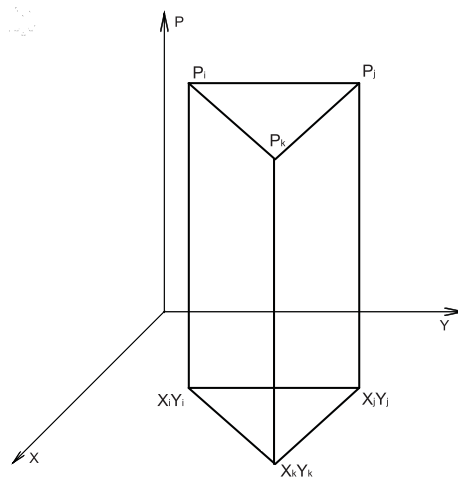


Figura 2.2: Elemento simples bidimensional.

Para obter a solução da equação (2.45), o campo de integração (seção transversal do silo) é dividido em vários elementos triangulares, cujos vértices i, j, k são chamados de nós. Consideram-se os valores da pressão nos nós de P_i, P_j e P_k conhecidos e escolhe-se uma função linear para aproximar os valores da pressão nos pontos internos de cada elemento (Figura (2.2)).

Temos então:

$$P = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y = \begin{pmatrix} 1 & x & y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix}. \quad (2.48)$$

Os valores nos nós são:

$$\begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} = [C] \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix}. \quad (2.49)$$

Logo:

$$\begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} = [C]^{-1} \begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{pmatrix}. \quad (2.50)$$

Substituindo a equação (2.50) em (2.48), tem-se:

$$P = \begin{pmatrix} 1 & x & y \end{pmatrix} [C]^{-1} \begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{pmatrix}. \quad (2.51)$$

$$P = \frac{1}{\det C} \begin{pmatrix} 1 & x & y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{pmatrix}, \quad (2.52)$$

$$P = N_i P_i + N_j P_j + N_k P_k = [N] \{ P \}, \quad (2.53)$$

onde N_i, N_j, N_k são funções de forma. P_i, P_j, P_k são os valores da pressão nos vértices do elemento finito, c_{ij} são cofatores da matriz C .

Derivando a equação (2.53), obtemos:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \end{pmatrix} = [B] \{ P \}, \quad (2.54)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{pmatrix} = [B], \quad (2.55)$$

onde $B = \frac{1}{\det C} \begin{pmatrix} c_{12} & c_{22} & c_{32} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{pmatrix}$.

Da mesma forma, temos que:

$$\varepsilon = N_i \varepsilon_i + N_j \varepsilon_j + N_k \varepsilon_k, \quad (2.56)$$

onde N_i, N_j, N_k são funções de forma e $\varepsilon_i, \varepsilon_j, \varepsilon_k$ são os valores da porosidade nos vértices do elemento finito.

Derivando a equação (2.56), temos:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \end{pmatrix} = [B] \{ \varepsilon \}. \quad (2.57)$$

Denotamos $[D] = \begin{pmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{pmatrix}$.

Considerando as equações (2.54), (2.55) e (2.57), a equação (2.45) toma a seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \bar{\varepsilon} \int \int \int_V [B]^T D [B] \{ P \} dV - \\ & \int \int \int_V \begin{pmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{pmatrix} \left(([B] \{ \varepsilon \})^T D [B] \{ P \} \right) dV = 0, \end{aligned} \quad (2.58)$$

onde $\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_i + \varepsilon_j + \varepsilon_k)/3$.

Como a função a integrar não depende das coordenadas x e y para a divisão do domínio de integração, a equação (2.58) torna-se:

$$\bar{\varepsilon} \begin{bmatrix} B \end{bmatrix}^T D \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \{ P \} - \left(\int \int \int_V \begin{pmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{pmatrix} dV \left(\begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \{ \varepsilon \} \right)^T D \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \{ P \} \right) = 0. \quad (2.59)$$

Sabendo que:

$$\int \int_A L_1^a L_2^b L_3^c dA = \frac{a!b!c!}{(a+b+c+2)!} 2A, \quad (2.60)$$

onde $N_i = L_1$, $N_j = L_2$ e $N_k = L_3$; $a = 1$, $b = 0$, $c = 0$ e A é a área do elemento finito, temos:

$$\int \int_A \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{pmatrix} dA = \frac{A}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.61)$$

Então podemos reescrever a equação (2.59) da seguinte forma:

$$\bar{\varepsilon} \begin{bmatrix} B \end{bmatrix}^T D \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \{ P \} - \frac{A}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \{ \varepsilon \}^T \begin{bmatrix} B \end{bmatrix}^T D \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \{ P \} = 0. \quad (2.62)$$

$$\left[\bar{\varepsilon} I - \frac{A}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \{ \varepsilon \}^T \right] \begin{bmatrix} B \end{bmatrix}^T D \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \{ P \} = 0. \quad (2.63)$$

Então tem-se o Sistema de Equações Lineares (que pode ser resolvido pelo método de Eliminação Gaussiana ou pelo Método de Gradientes Conjugados), na forma:

$$\left[M \right] \left\{ P \right\} = b, \quad (2.64)$$

onde

$\left[M \right]$ é a matriz de rigidez;
 $\left\{ P \right\}$ é o vetor das incógnitas.

3 ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Apesar de a compactação ser um tema de fundamental importância para empresas controladoras e operadoras de silos de grande porte, existem poucos trabalhos referentes ao assunto.

Tentando simular as características de um silo dotado de um sistema de aeração, foi desenvolvido um equipamento para determinar a magnitude da compactação da massa de grãos. Os parâmetros analisados são a variação da porosidade e a relação entre o fluxo de ar e a queda de pressão estática causada por essa compactação.

Para tornar o trabalho mais preciso, foram determinadas as dimensões de uma amostra de cada tipo de grão. Todas as análises foram realizadas em massas de grãos de soja, arroz e milho.

3.2 Equipamento Experimental

A porosidade das massas de grãos foi obtida de duas maneiras: a primeira despejando-se um volume conhecido de fluido (óleo de soja) em um recipiente graduado contendo um determinado volume de grãos e a segunda utilizando um picnômetro de comparação de ar. (Figura (3.1)). No primeiro caso, além da porosidade foi determinada a massa específica real e a aparente das massas de grãos.

Onde:

- V_1 e V_2 são os volumes dos compartimentos 1 e 2, constantes;
- V é o volume vazio do compartimento 2;

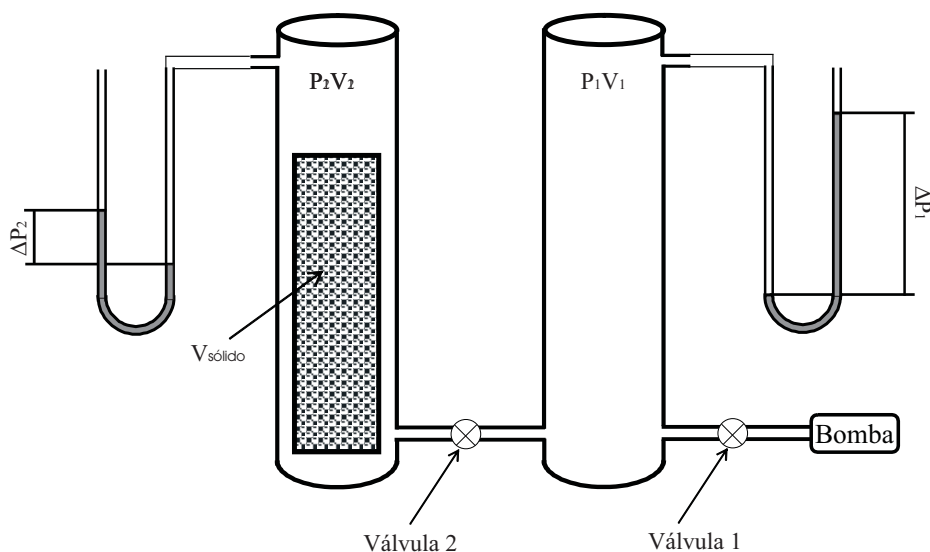


Figura 3.1: Esquema do equipamento (picnômetro).

- $V_{sólido}$ é o volume bruto de amostra (massas de grãos) colocada no compartimento 2.
- $q = \frac{V_{sólido}}{V_2}$ é a parte relativa de volume bruto de amostra colocada no compartimento 2
- $S = \frac{V_2}{V_1}$ é a razão entre os compartimentos 2 e 1, constante, conhecido.

Cada um dos compartimentos 1 e 2 é ligado a um manômetro do tipo “tubo em U” (U_1 e U_2 respectivamente) através de mangueiras, inclinados 30° em relação a horizontal, que possuem como líquido manométrico água colorida ($\rho = 1g/cm^3$).

O picnômetro funciona da seguinte forma:

- 1) Abertura total das válvulas para estabilização das pressões;
- 2) Verificação do fechamento sem falha na abertura da parte superior do compartimento 2, que serve para a colocação e retirada da massa de grãos do compartimento;
- 3) Fechamento da válvula 2;



Figura 3.2: Fotografia do picnômetro.



Figura 3.3: Fotografia do equipamento para medir o fator de porosidade.

- 4) Introdúz-se ar no compartimento 1 até a pressão desejada ($P_1^{(0)}$) no tubo U_1 (manômetro). Esta pressão é relativa em relação à atmosférica e é medida em milímetros de coluna de água;
- 5) Fechamento da válvula 1 (momento inicial);
- 6) Após estabilização da pressão no compartimento 1, abre-se a válvula 2.
- 7) Da mesma forma que da primeira vez, mede-se a ($P_2^{(f)}$) do tubo U_2 (manômetro) que necessariamente é igual a ($P_1^{(f)}$) do tubo U_1 (momento final).

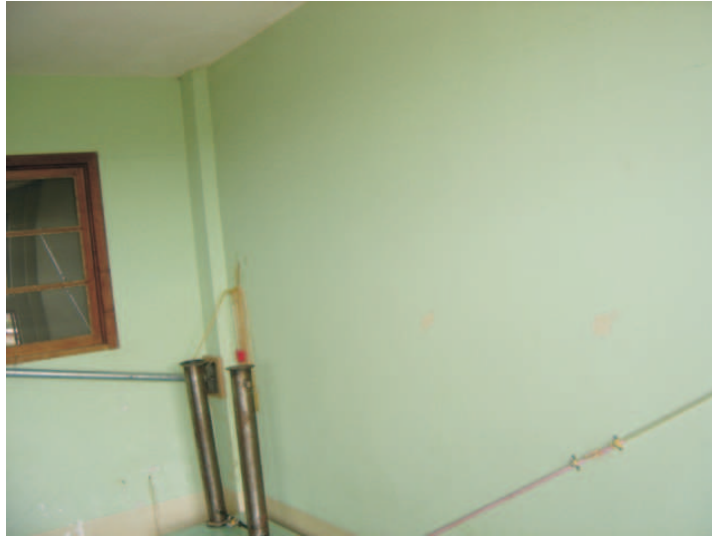


Figura 3.4: Fotografia do equipamento para medir o fator de porosidade.

Usando a Lei de Clapeyron, temos as seguintes equações para o momento inicial:

$$P_1^{(0)}V_1 = m_1^{(0)}RT. \quad (3.1)$$

$$P_2^{(0)}V = m_2^{(0)}RT. \quad (3.2)$$

Para o momento final, as equações são:

$$P_1^{(f)}V_1 = m_1^{(f)}RT. \quad (3.3)$$

$$P_2^{(f)}V = m_2^{(f)}RT. \quad (3.4)$$

Utilizando-se a equação de conservação das massas, temos:

$$m_1^{(0)} + m_2^{(0)} = m_1^{(f)} + m_2^{(f)}. \quad (3.5)$$

Isolando m nas equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4) e substituindo na equação (3.5), tem-se:

$$V = \frac{(P_1^{(0)} - P_1^{(f)})}{P_2^{(f)} - P_2^{(0)}}V_1. \quad (3.6)$$

A porosidade (ε) é dada então por:

$$\varepsilon = \frac{V}{V_2}. \quad (3.7)$$

Para determinar a vazão e a queda de pressão estática é acoplado uma peça metálica de forma afunilada na parte inferior do compartimento 2, que é conectada ao sistema “ventilador - medidor de vazão” descrito a seguir. Na parte superior desta peça de conexão existe uma chapa metálica perfurada que deixa o ar passar. Todo o conjunto é apoiado em uma estrutura de madeira.

Para simular as compactações que as camadas superiores da massa de grãos exercem sobre as camadas inferiores, é admitido que a pressão exercida pelas camadas superiores pode ser aproximada pela relação:

$$P = \rho_m * g * H, \quad (3.8)$$

onde

P =pressão (N/m^2);

ρ_m =massa específica aparente da massa de grãos (kg/m^3);

g =aceleração da gravidade (m/s^2);

H =altura da camada de grãos (m).

A força de compactação pode ser expressa então pela relação:

$$F = P * A_t, \quad (3.9)$$

onde

F =força de compactação (N);

A_t =área da seção transversal(m^2).

Como os valores para a força de compactação (F) são muito elevados, utiliza-se uma alavanca inter-resistente (Figura (3.5)) que permite simular compactações correspondentes a alturas de até 50 metros da massa de grãos.

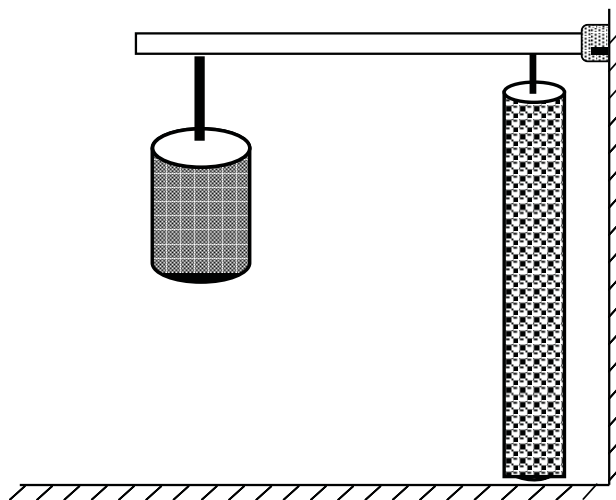


Figura 3.5: Esquema do dispositivo utilizado para realizar a compactação.

3.2.1 Ventilador

É constituído basicamente de duas partes: um motor e um rotor. Para nossos experimentos foi utilizado um ventilador do tipo centrífugo, com pás para frente e dois rotores acoplados em série. O ventilador possui um motor elétrico com potência 3/4 HP, 3450 rpm, 60Hz, 200-230 Volts.

O fluxo de ar gerado é conduzido através de um tubo de PVC de 50 milímetros de diâmetro e 0,50 metros de comprimento. Uma das extremidades do tubo é conectada ao corpo do ventilador e a outra ao medidor de vazão. No outro lado do medidor de vazão é conectada mais 1,00 metro de tubo de igual diâmetro, que se liga a parte inferior da peça metálica de forma afunilada.

3.2.2 Medidor de Vazão

Também chamado de “medidor de orifício” ou “medidor de placa”, é o dispositivo utilizado para medir a vazão e é composto de um placa metálica com um orifício circular de borda delgada no centro. Este orifício provoca uma contração do jato de ar, provocando uma significativa diferença de pressão a jusante e a montante da placa (Figura (3.6)). Esta diferença de pressão é a grandeza utilizada para

determinar a vazão no canal, através da relação (STRETER, 1980):

$$Q = c * A_0 * \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (3.10)$$

onde

Q =vazão de ar (m^3/s);

A_0 =área do orifício da placa (m^2);

c =coeficiente de vazão (adimensional);

ΔP =diferença de pressão (N/m^2);

ρ =massa específica do ar (kg/m^3).

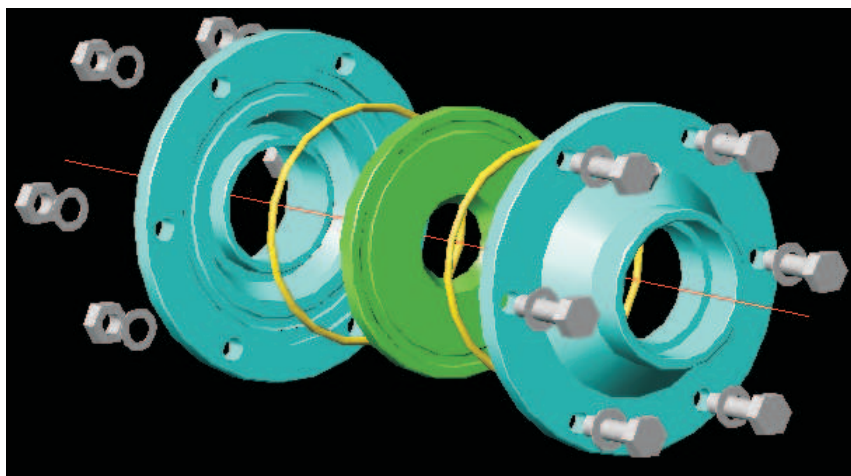


Figura 3.6: Esquema do dispositivo medidor de vazão.

A medida de diferença de pressão (ΔP) na placa é feita através de um manômetro do tipo “tubo em U”, com um dos ramos inclinado 30° em relação a horizontal. Como líquido manométrico é utilizada água ($\rho = 1g/cm^3$). Para calcularmos a vazão de ar no canal, ingressamos com os valores de (ΔP) na equação (3.10).

3.2.3 Pressão Estática

Um tubo em L (tubo de Prandtl) é instalado na base do compartimento 2, numa posição inferior a chapa de contenção dos grãos. Este tubo transmite, através de uma mangueira a pressão estática a um manômetro do tipo “tubo em U”, que utiliza água colorida como líquido manométrico. Uma escala graduada em milímetros possibilita fazer a medida do desnível do líquido no tubo.

Como na saída de ar do compartimento 2 a pressão é igual a atmosférica, não faz-se necessário medir a pressão. A Figura (3.7) apresenta a forma esquemática do equipamento utilizado para determinar a vazão e a queda de pressão estática.

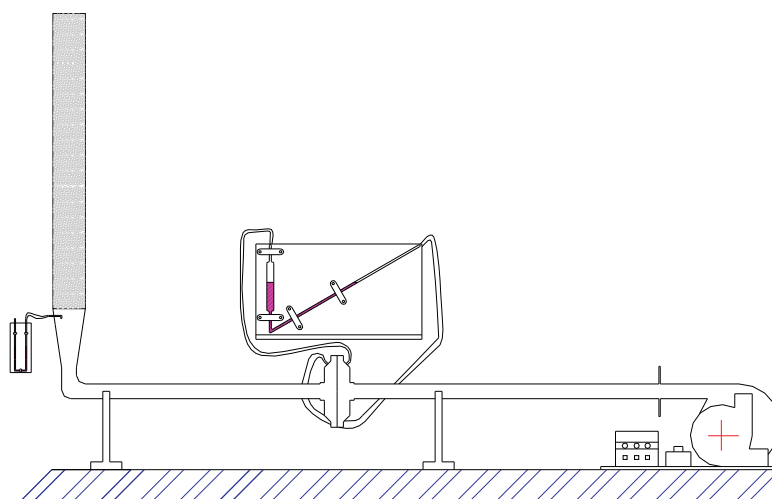


Figura 3.7: Equipamento utilizado para determinar a vazão e a queda de pressão estática.

3.2.4 Matéria Prima

Os grãos utilizados para os experimentos foram analisados no Laboratório de Análises de Sementes do Departamento de Estudos Agrários da Unijuí e apresentam valores para o teor de umidade conforme a Tabela (3.1).

Tabela 3.1: Teor de umidade dos grãos.

Massa de grãos	Teor de umidade (%)
Soja	12,2
Milho	13,2
Arroz	14,3

3.3 Experimentos

3.3.1 Calibração do Equipamento

A calibração de equipamentos que executam análises e medições de materiais e produtos é condição indispensável para assegurar e manter confiabilidade nas medidas obtidas.

Para prever qual a variação de pressão final nos manômetros após o processo de compactação, são realizadas simulações que utilizam dados de porosidade que variam de $\varepsilon = [0,3; 0,7]$. Considera-se $S = 1$ e varia-se o valor de q e $P_1^{(0)}$, levando-se em conta a dependência que existe entre q e a porosidade.

As Figuras (3.8), (3.9) e (3.10) mostram a diferença de pressão, para vários valores de q e uma pressão $P_1^{(0)}$ de $2100 \text{ mmH}_2\text{O}$, $1700 \text{ mmH}_2\text{O}$ e $1400 \text{ mmH}_2\text{O}$, respectivamente.

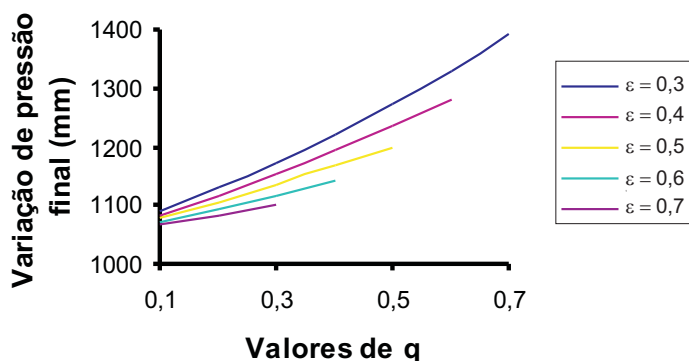


Figura 3.8: Variação de pressão final considerando $P_1^{(0)} = 2100 \text{ mmH}_2\text{O}$.

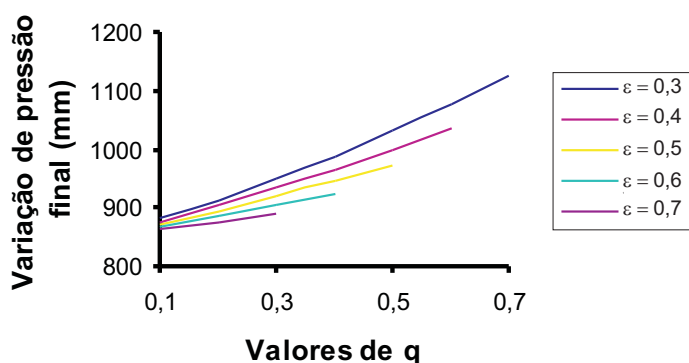


Figura 3.9: Variação de pressão final considerando $P_1^{(0)}=1700 \text{ mmH}_2\text{O}$.

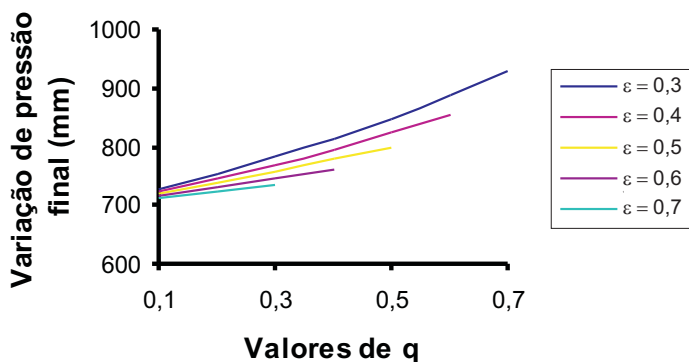


Figura 3.10: Variação de pressão final considerando $P_1^{(0)}=1400 \text{ mmH}_2\text{O}$.

A figura (3.11) apresenta o comparativo da variação de pressão final para vários valores de q e $P_1^{(0)}$.

Analisando as Figuras (3.8), (3.9) e (3.10), percebe-se uma variação de pressão final maior, quanto maiores forem os valores de q e $P_1^{(0)}$. Desse modo, quanto maior for a pressão inicial utilizada e quanto maior a quantidade de massa de grãos que estiver no compartimento 2, maior será a variação de pressão final.

Neste sentido, para o estudo experimental trabalhou-se com o comparativo 2 sempre cheio de grãos e uma pressão inicial $P_1^{(0)}$ que variava de 1700 mmH_2O até 2100 mmH_2O .

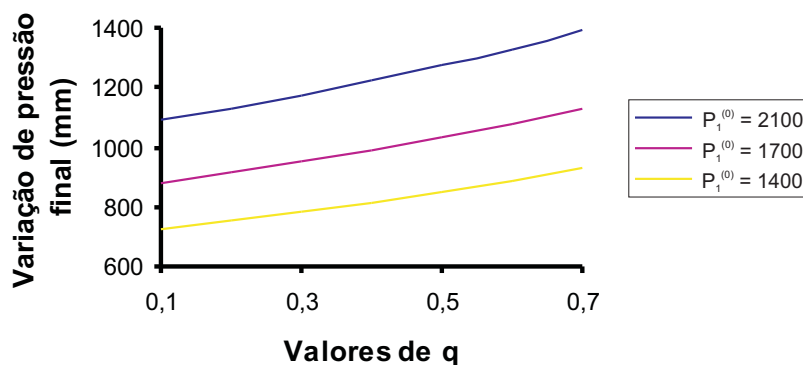


Figura 3.11: Comparativo da variação de pressão final considerando várias pressões iniciais.

Durante o processo de medição da variação de pressão nos manômetros ocorrem erros. Considerando que estamos utilizando uma escala graduada em milímetros, pode ocorrer um erro absoluto em medição de pressão entre $[-1;1]$ mm de água.

A Figura (3.12) apresenta a influência de S e q sobre o erro relativo de porosidade para altura $H=10m$.

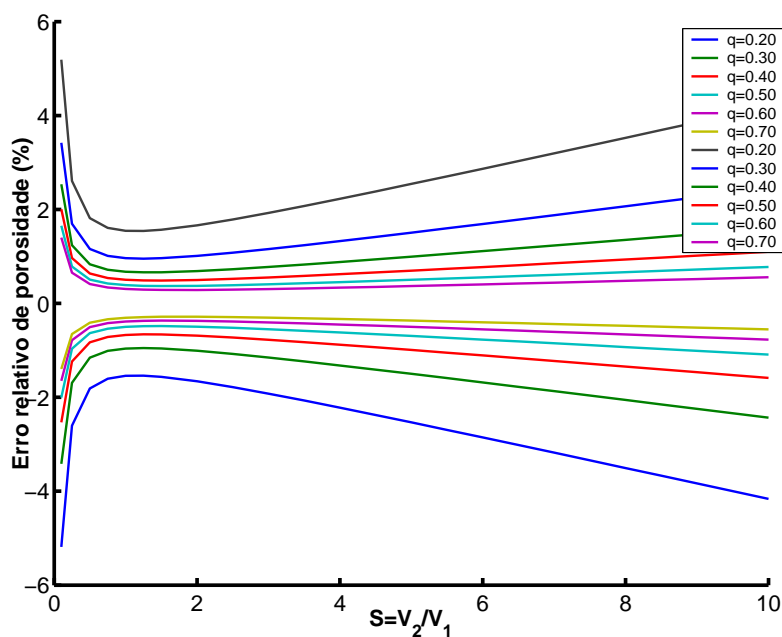


Figura 3.12: Influência de S e q sobre o erro relativo de porosidade para altura $H=10m$.

A Figura (3.12) mostra que para altura $H=10m$, $S=1$ e $\varepsilon=0,5$ (corresponde $q=0,5$), o erro “de leitura” é igual a aproximadamente 0,5%, isto é, não ultrapassa 1%.

Este valor (1%) é escolhido como “limite superior” do erro “de leitura”.

Para a realização dos experimentos, primeiramente mediu-se com máxima precisão possível o volume dos compartimentos do equipamento. Para tal, encheram-se de água os dois compartimentos e com ajuda de béckeres de 100 e 500 miligramas (ml) determinou-se o volume de água, obtendo-se os valores da Tabela (3.2).

Tabela 3.2: Volumes dos compartimentos do equipamento experimental (ml).

	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão
Comp. 1	9852	9843	9864	9853	10,536
Comp. 2	9888	9880	9888	9885	4,621
Vol. total	19740	19723	19752	19738	14,577

Analisando dados da literatura, percebemos que a variação de porosidade para alturas da massa de grãos de $0m$ até $50m$ está na ordem de 0% a 10%. Para o nosso caso, isso significa uma variação do volume vazio no compartimento 2 de mais ou menos 500 *ml*.

Para estimar a sensibilidade do equipamento, foram feitos experimentos com sólidos de volumes conhecidos. Determinou-se a quantidade da massa de grãos no compartimento 2 ($V_{sólido}$) e foram adicionadas bolinhas de ping pong (sólidos de volume conhecido) que simulavam grãos maiores que se distribuíam de forma igual. A quantidade de grãos colocada foi escolhida de modo que, depois de colocadas todas as bolinhas de ping pong o compartimento estivesse cheio.

Foram feitas medições com 5, 10, 15, 20, 25 e 29 bolinhas que modelavam a variação de porosidade decorrente do processo de compactação e determinavam uma variação de volume vazio no compartimento 2 de 316 *ml*.

Na Figura (3.13) estão plotados o número de bolinhas de ping pong e o erro de determinação da variação do volume vazio.

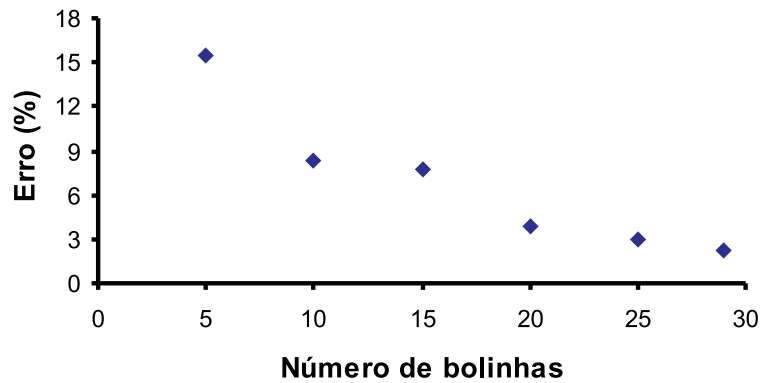


Figura 3.13: Relação entre o número de bolinhas de ping pong e o erro de determinação da variação do volume vazio.

A Figura (3.14) apresenta a relação entre o erro de determinação da variação do volume vazio e a variação do volume vazio.

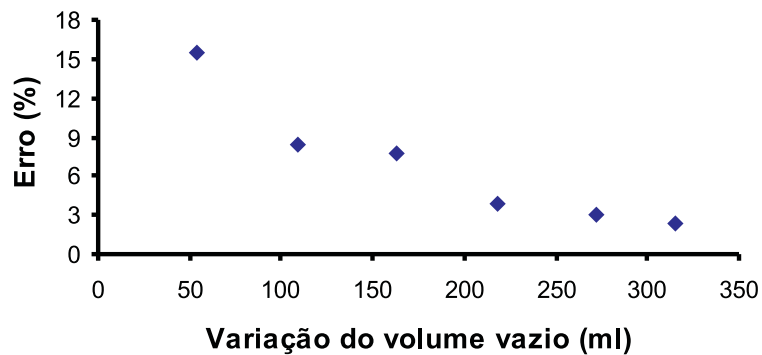


Figura 3.14: Relação entre o erro de determinação da variação do volume vazio e a variação do volume vazio.

A Figura (3.15) apresenta a relação entre a porosidade aparente (ε_{ap}) (porosidade das bolinhas de ping pong e a porosidade dos grãos) e o erro de determinação da variação do volume vazio.

Na Figura (3.16) encontramos a relação entre o erro absoluto de determinação do volume vazio e a variação de porosidade.

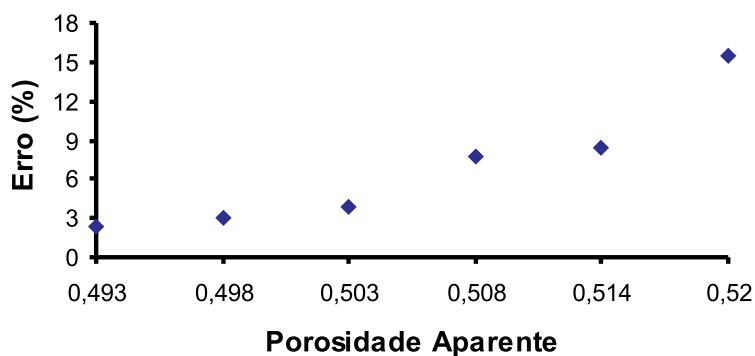


Figura 3.15: Relação entre o erro de determinação da variação do volume vazio e a porosidade aparente .

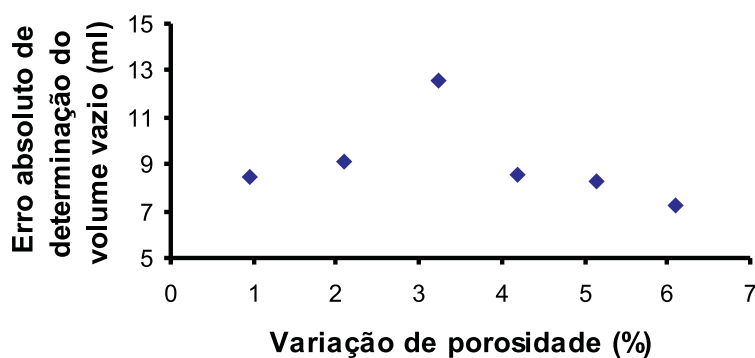


Figura 3.16: Relação entre o erro absoluto de determinação do volume vazio e a variação de porosidade.

Analisando a Figura (3.16) percebemos que o maior erro absoluto na determinação do volume vazio acontece quando fazemos os experimentos com 15 bolinhas de ping pong. Nesta condição, a diferença entre o valor experimental e o valor calculado é de 12,5 ml, o que determina um erro de 0,242% na determinação da variação do volume vazio.

Sendo assim, considerando o erro na determinação da variação do volume vazio e o erro de medição da variação de pressão, chegamos a um erro na determinação da porosidade de 1,242%.

3.3.2 Realização dos Experimentos

Num primeiro instante, foi encontrada a massa específica real (ρ_{greal}), massa específica aparente e a porosidade dos grãos utilizando o método de despejo de um fluido em um recipiente graduado.

Para a determinação dos valores de porosidade usando o picnômetro, procedeu-se da seguinte forma:

- 1) Encheu-se o compartimento 2 de modo que os grãos não sofressem qualquer compactação, foram instalados os manômetros e para várias leituras de pressão diferentes foi determinada a correspondente porosidade;
- 2) Para a determinação em camadas compactadas, a massa de grãos era transferida de forma gradual (camadas 0,25m) e a cada acréscimo era aplicado o processo de compactação, utilizando a alavanca descrita anteriormente. Foram instalados os manômetros, e novamente para diversas leituras de pressão diferentes foi determinada a correspondente porosidade;
- 3) Nos experimentos seguintes, variava-se o grau de compactação de modo a corresponder a cada altura da camada de grãos.

Como o equipamento deve ser hermético, para que não acontecessem problemas de vazamento, optou-se por encontrar primeiramente os valores de porosidade para todas as massas de grãos.

Para a medição da relação entre o fluxo de ar e a queda de pressão estática, utilizou-se apenas o compartimento 2, e procedeu-se da seguinte forma:

- 1) Encheu-se o compartimento de forma que os grãos não sofressem compactação, foram acoplados o conjunto ventilador-medidor de vazão e

instalado o manômetro, e para diversos valores de fluxo de ar determinada a correspondente queda de pressão estática.

- 2) Para os outros experimentos repetiu-se o processo de compactação descrito anteriormente. Da mesma forma, ao término de cada processo de compactação era acoplado o conjunto ventilador-medidor de vazão e instalado o manômetro, e para diversos valores de fluxo de ar, determinadas as correspondentes quedas de pressão estática.

3.4 Resultados Experimentais

3.4.1 Massa Específica Real, Aparente e Porosidade

A Tabela (3.3) apresenta os valores da massa específica real, massa específica aparente e da porosidade obtidos pelo método de despejo de um fluido em um recipiente graduado (Método 1).

Tabela 3.3: Valores da massa específica real, aparente e da porosidade pelo Método 1.

Produto	Massa Esp. Real (kg/m^3)	Massa Esp. Aparente (kg/m^3)	Porosidade
Soja	1283,43	713,59	0,444
Milho	1297,94	711,27	0,452
Arroz	1476,04	560,90	0,620

Comparando os dados de massa específica real da Tabela (3.3) com os dados de SOARES (1986) que determinou a grandeza para grãos de soja e obteve $\rho_{greal}=1200kg/m^3$ e de DEVILLA *et al.* (2004) que encontrou para grãos de milho obtendo $\rho_{greal}=1264kg/m^3$ podemos observar uma boa concordância.

Esta concordância nos mostra que os dados obtidos para a porosidade por este método estão descritos corretamente.

A Tabela (3.4) exhibe os valores da porosidade usando o picnômetro (Método 2) para às diversas alturas da camada de grãos.

Tabela 3.4: Valores da porosidade para o Método 2 em função da altura da camada de grãos.

Altura	Soja	Milho	Arroz
1	0,453	0,463	0,631
10	0,438	0,445	0,612
20	0,434	0,441	0,608
30	0,430	0,437	0,603
40	0,426	0,433	0,593
50	0,420	0,427	0,585

A Figura (3.17) mostra os valores da porosidade obtidos para massas de grãos de soja usando os Métodos 1 e 2 bem como o valor determinado por Soares (1986).

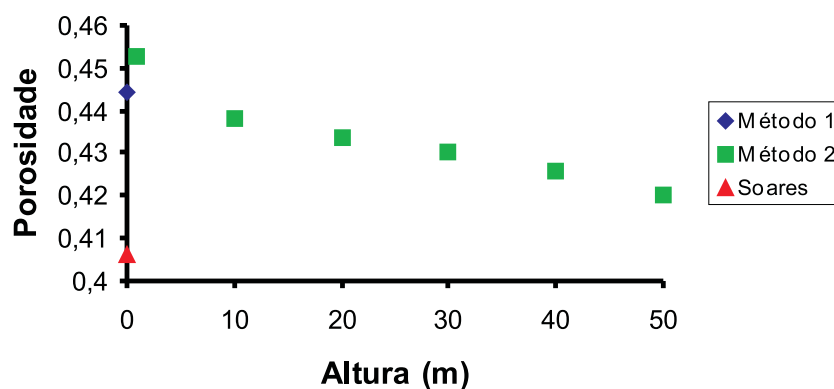


Figura 3.17: Porosidade da massa de grãos de soja.

A Figura (3.18) apresenta os valores de porosidade encontrados para massas de grãos de milho usando os Métodos 1 e 2 e o valor obtido por Devilla *et al.* (2004).

A Figura (3.19) demonstra os valores de porosidade encontrados para a massa de grãos de arroz pelos Métodos 1 e 2.

Na Figura (3.20) exhibe-se comparativamente os valores de porosidade encontrados usando-se o Método 2.

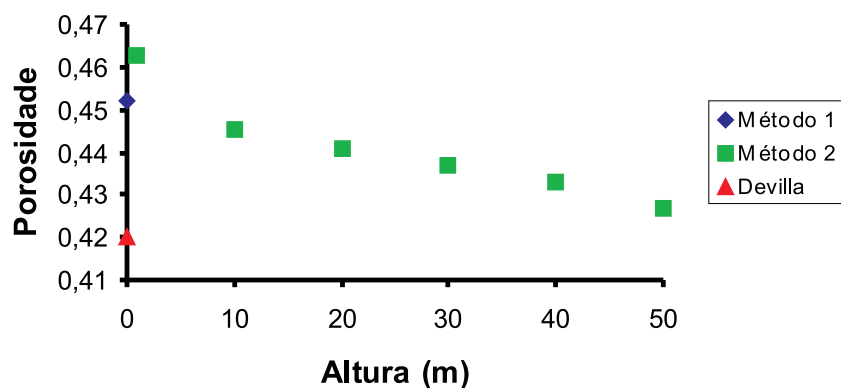


Figura 3.18: Porosidade da massa de grãos de milho.

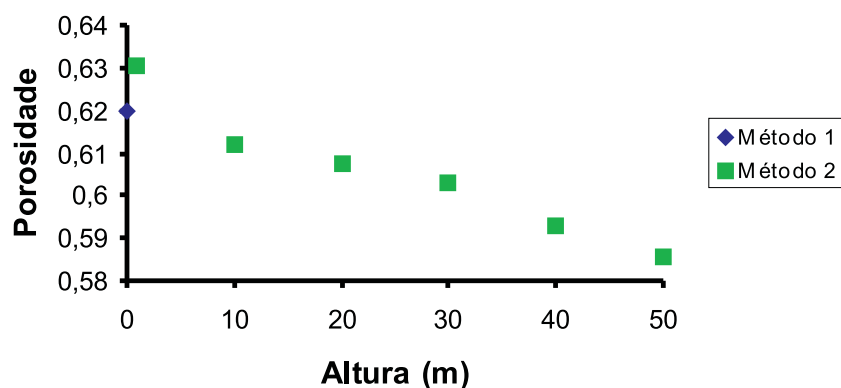


Figura 3.19: Porosidade da massa de grãos de arroz.

Observa-se que a taxa de variação da porosidade é maior no início do processo de compactação e que ocorre uma redução do valor da porosidade conforme aumenta a altura da camada de grãos.

3.4.2 Queda de Pressão Estática e Fluxo de Ar

Nas figuras (3.21), (3.22) e (3.23) são plotados os valores experimentais obtidos para a relação entre o fluxo de ar e a queda de pressão estática para as massas de grãos de soja, milho e arroz respectivamente. Ambas as relações são apresentadas na forma logarítmica e a queda de pressão é a razão entre a diferença

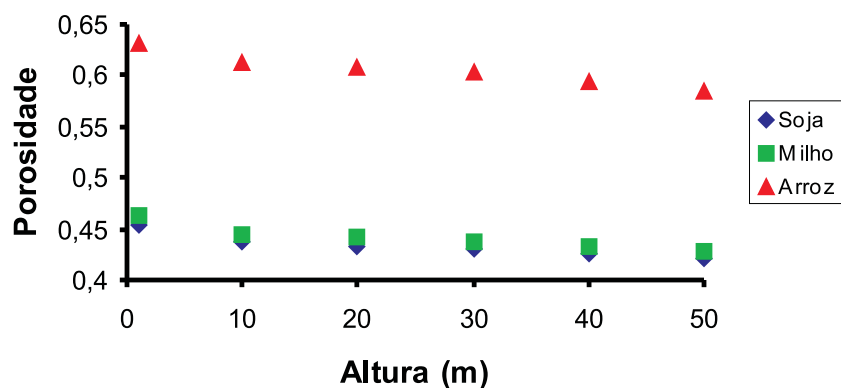


Figura 3.20: Comparativo entre as porosidades usando o Método 2.

de pressão medida na entrada e saída da câmara de grãos e a altura da camada de grãos. A unidade utilizada para expressar a queda de pressão é Pa/m e da taxa de fluxo de ar $m^3/s^{-1}m^{-2}$.

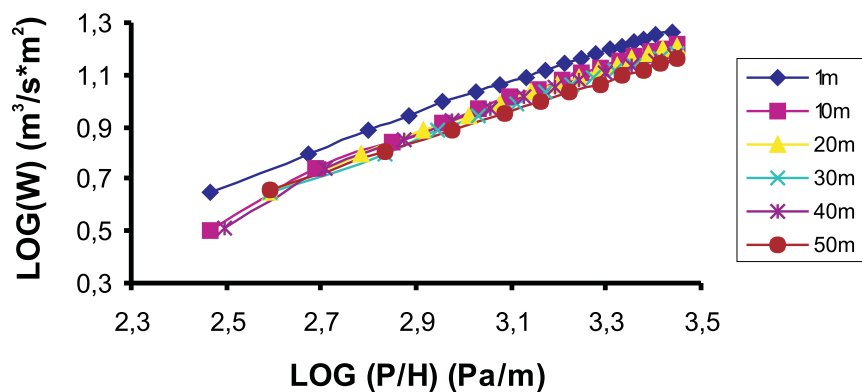


Figura 3.21: Curvas experimentais para o fluxo de ar versus queda de pressão estática para diversas alturas da camada de grãos de soja.

As figuras (3.24), (3.25), (3.26), (3.27), (3.28) e (3.29) apresentam comparativamente os valores obtidos para a relação entre o fluxo de ar e a queda de pressão estática para as massas de grãos de soja, milho e arroz considerando as seis alturas de massas de grãos analisadas.

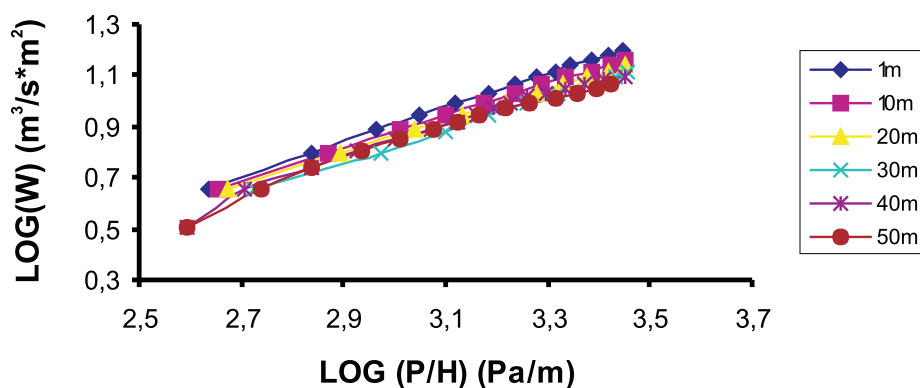


Figura 3.22: Curvas experimentais para o fluxo de ar versus queda de pressão estática para diversas alturas da camada de grãos de milho.

O aumento na pressão estática pode ser explicada pelo fato da diminuição da porosidade, dificultando a passagem do ar pela massa de grãos.

3.4.3 Dimensão dos grãos

A forma irregular dos produtos agrícolas exige, para sua descrição, um número elevado de dimensões axiais, cuja obtenção é trabalhosa. A determinação das propriedades geométricas, a partir desse número elevado de dimensões axiais, envolve métodos numéricos cujas soluções são laboratoriais (CHUMA, 1982; MOHSEENIM, 1980).

O tamanho e a forma são características específicas de cada produto, definidos geneticamente, que podem ser influenciadas pelo ambiente durante e após o período de sua formação e que influencia as demais propriedades físicas do produto.

O tamanho é determinado pelas medições dos eixos perpendiculares do grão, como mostram as Figuras (3.30), (3.31) e (3.32). Determinam-se o comprimento, a largura e a espessura dos grãos. Essas determinações eram conduzidas em 50 grãos obtidos aleatoriamente nas massas de grãos analisadas. Os grãos eram

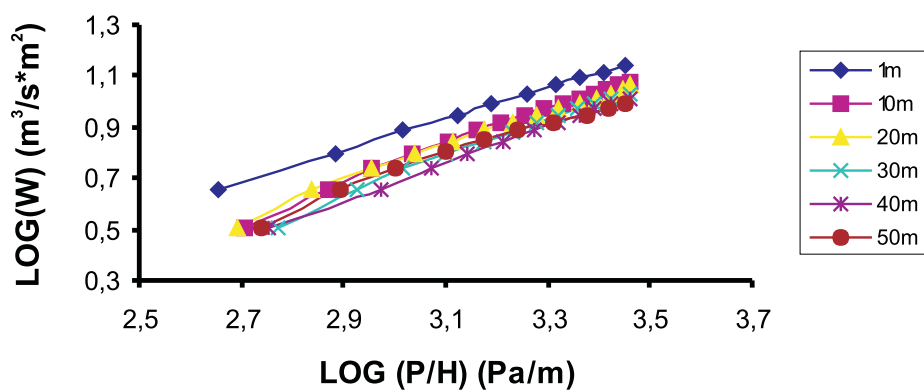


Figura 3.23: Curvas experimentais para o fluxo de ar versus queda de pressão estática para diversas alturas da camada de grãos de arroz.

fotografados e determinou-se o valo médio de cada dimensão utilizando-se o software CorelDRAW 10.

A Tabela (3.5) exhibe os valores encontrados e a variação para as dimensões dos grãos utilizados no estudo experimental.

Tabela 3.5: Dimensão dos grãos utilizados no estudo experimental.

Produto	Comprimento (<i>mm</i>)	Largura (<i>mm</i>)	Espessura (<i>mm</i>)
Soja	$6,5 \pm 0,5$	$5,5 \pm 0,5$	$5,0 \pm 1,0$
Milho	$9,0 \pm 2,0$	$8,5 \pm 1,0$	$5,0 \pm 1,0$
Arroz	$10,0 \pm 1,0$	$2,5 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,5$

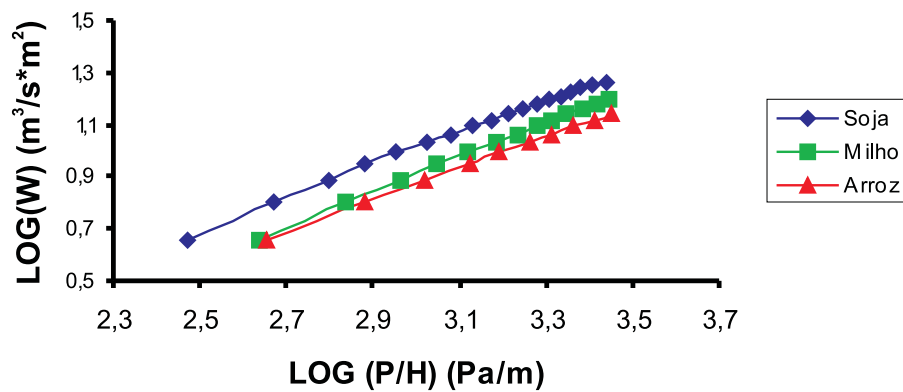


Figura 3.24: Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 1m.

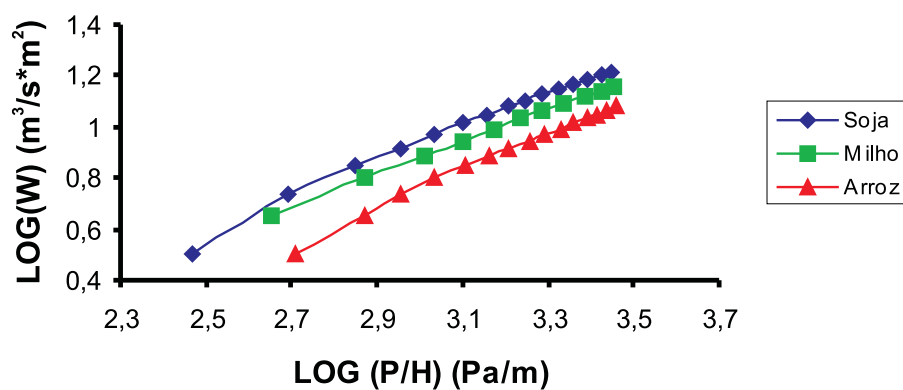


Figura 3.25: Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 10m.

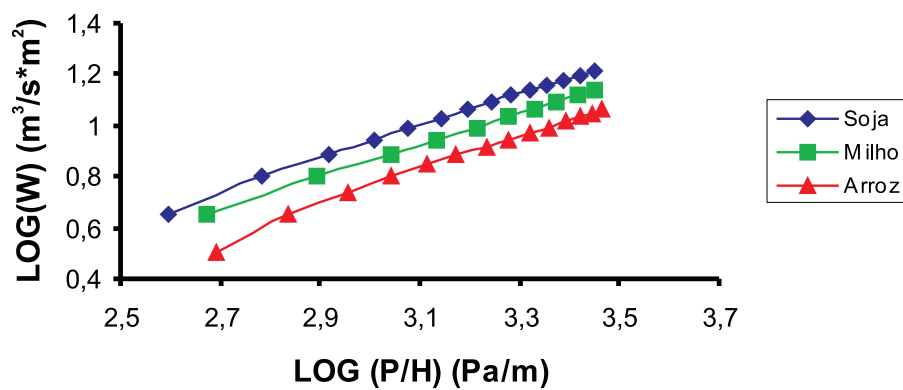


Figura 3.26: Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 20m.

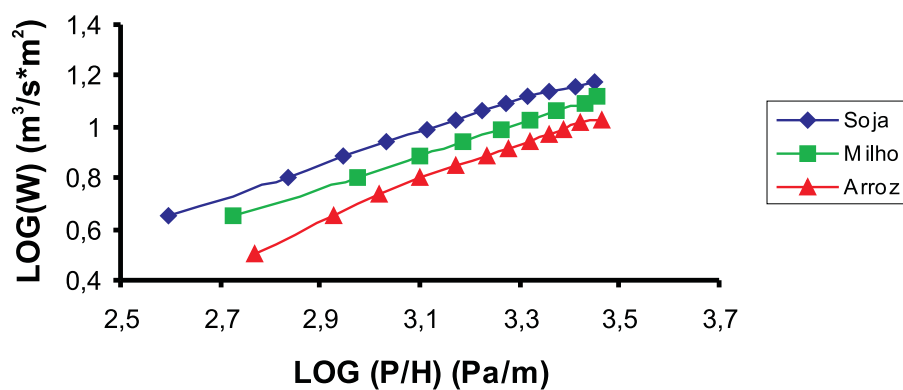


Figura 3.27: Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 30m.

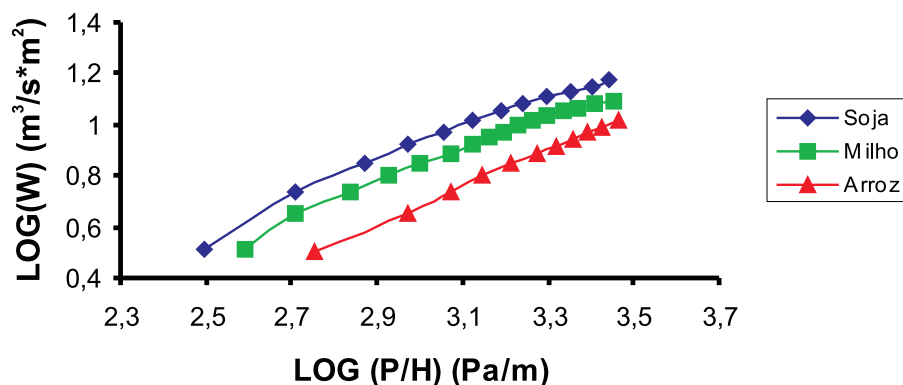


Figura 3.28: Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 40m.

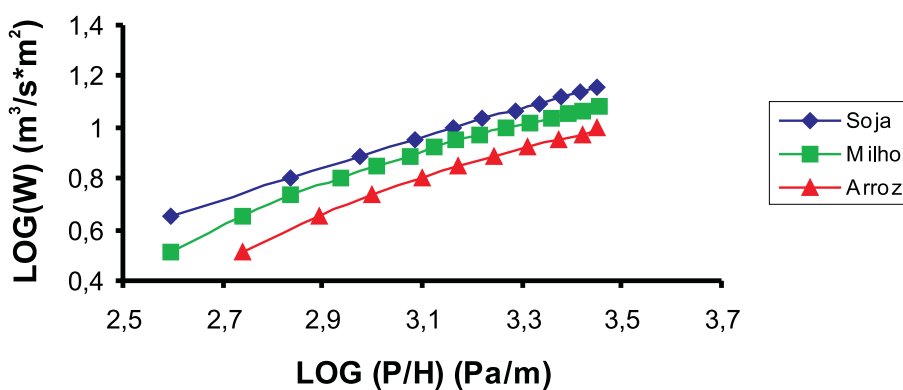


Figura 3.29: Comparação de escoamento do ar para massas de grãos de soja, milho e arroz considerando altura de 50m.

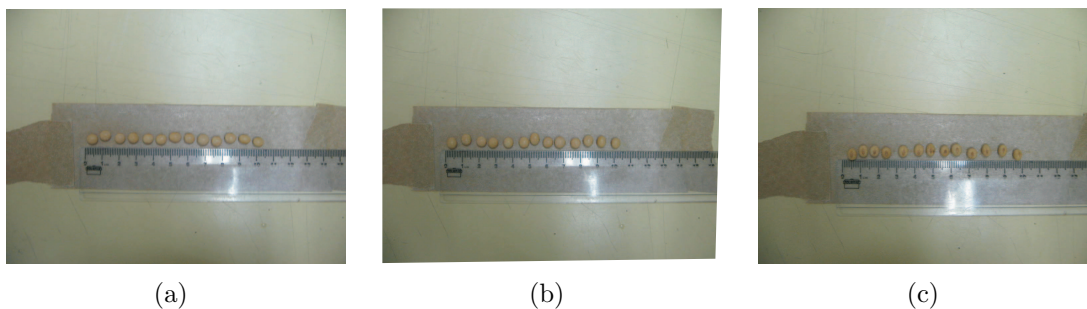


Figura 3.30: Fotografia de alguns grãos de soja utilizados para determinação das dimensões, onde (a) é o comprimento, (b) a largura e (c) a espessura.

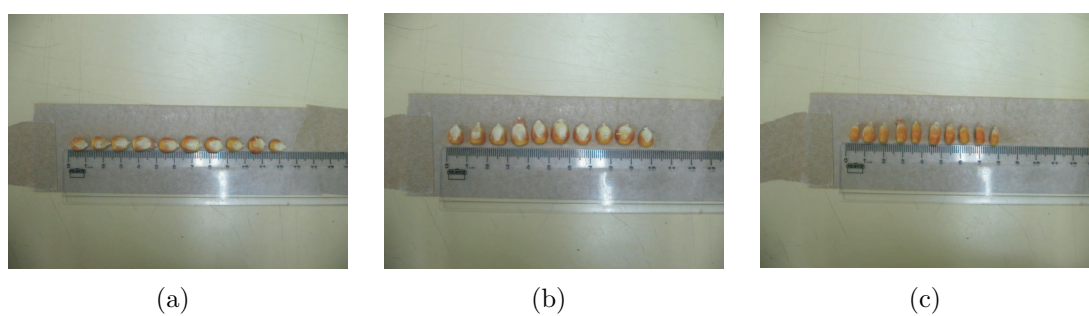


Figura 3.31: Fotografia de alguns grãos de milho utilizados para determinação das dimensões, onde (a) é o comprimento, (b) a largura e (c) a espessura.

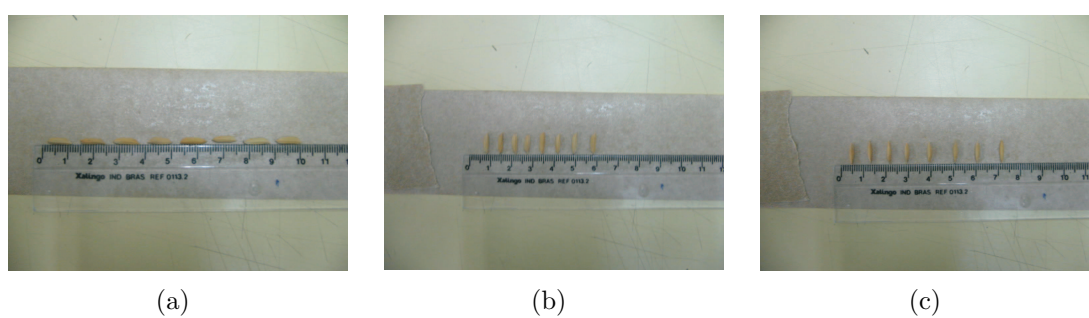


Figura 3.32: Fotografia de alguns grãos de arroz utilizados para determinação das dimensões, onde (a) é o comprimento, (b) a largura e (c) a espessura.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre o escoamento do ar em silos. Através da revisão bibliográfica de métodos e modelos matemáticos sobre aeração, escolheu-se como base o modelo descrito por KHATCHATOURIAN *et al.* (2004). Completou-se o modelo, incluindo a variação da porosidade em função da altura da camada de grãos, provocada pela compactação.

Para complementação do modelo foram realizados experimentos, permitindo que fossem obtidos os valores de porosidade e a relação entre velocidade e gradiente de pressão estática para várias alturas da camada de grãos e vários tipos de massas de grãos: soja, milho e arroz.

Os experimentos de porosidade foram realizados utilizando-se dois métodos diferentes, no primeiro despeja-se um volume conhecido de um fluido (óleo de soja) em um recipiente graduado contendo uma certa quantidade de grãos e no segundo usa-se um picnômetro que permite determinar os valores de porosidade em função da compactação.

Pode-se dizer que o equipamento apresentou bons resultados para os valores de porosidade e seu uso pode ser estendido para determinação da porosidade de outras tipos massas de grãos. Uma diferença entre os valores obtidos e os encontrados na literatura pode ser explicado, considerando que as dimensões dos grãos analisados não eram as mesmas. Dessa forma, para complementar o trabalho, foram determinadas as dimensões dos grãos utilizados no estudo experimental.

Para a relação entre velocidade e gradiente de pressão foi utilizado o mesmo compartimento onde estavam acondicionados os grãos no picnômetro e foi acoplado o conjunto ventilador-medidor de vazão. Os dados obtidos mostraram que a compactação afeta sensivelmente os valores da relação entre velocidade e gradiente de pressão. Ocorre um aumento da queda de pressão estática conforme aumenta a altura da massa de grãos.

Os resultados obtidos permitiram complementar o modelo desenvolvido por KHATCHATOURIAN *et al.* (2004) para realizar as simulações de escoamento do ar em silos de grande porte para os tipos de grãos analisados.

Para trabalhos futuros sugere-se realizar as simulações que utilizam as dependências obtidas e, encontrar os valores de porosidade e queda de pressão estática para outros tipos massas de grãos armazenadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABBOUDA, S. K., CHUNG, D. S., SEIB, P. A., AND SONG, A. Heat and mass transfer in stored milo. (part 1: Heat transfer model). *Transaction of the ASAE* 35, 5 (1992), 1569–1573.
- [2] ARAÚJO, L. G. *Variação da Perda de Pressão em Camadas de Grãos de Soja em Função do Teor de Finos, da Densidade de Fluxo de Ar e da Espessura da Camada*. Dissertação de mestrado, UFV, Viçosa 1986.
- [3] ARTHUR, F. H. Feasibility of using aeration to control insect pests of corn stored in southeast georgia: Simulated field test. *Journal Economical Entomology* 87, 5 (1994), 1359–1365.
- [4] BAKKER-ARQUEMA, F. W., PATERSON, R. J., AND BICKERT, W. G. Static pressure airflow relationships in packed bedsof granular biological materials such as cherry pits. *Transactions of the ASAE* 12, 1 (1969), 134–140.
- [5] BASSANEZI, R. C. *Ensino-aprendizagem com Modelagem Matemática*. Editora Contexto, São Paulo, 2002.
- [6] BEAR, J. *Dinamics of fluids in porous media*. Elsevier, 1972.
- [7] BLASZAK, S. P. *Modelagem Matemática do Escoamento do Ar em Massa de Grãos com Porosidade Variável*. Dissertação de mestrado, UNIJUÍ, Ijuí 2005.
- [8] BORGES, P. A. P. *Modelagem Matemática do Processo de Secagem de Grãos de Soja*. Tese de doutorado, UFRGS, Porto Alegre 2002.
- [9] BROOKER, D. B. Pressure patterns in graindrying system established by numeral methods. *Transactions of the ASAE* 4 (1961), 72–74.

- [10] BROOKER, D. B. Computing air pressure and velocity distribution when air flows through a porous medium a nonlinear velocity - pressure relationship exist. *Transactions of the ASAE 12* (1969), 118–120.
- [11] BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., AND HALL, C. W. *Drying Cereal Grains*. The AVI Publishing Company, 1974.
- [12] BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., AND HALL, C. W. *Drying Cereal Grains*, 5 ed. The AVI Publishing Company, 1982.
- [13] BROOKER, D. B., BAKKER-ARQUEMA, F. W., AND HALL, C. W. *Drying and storage of grains and oilseeds*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [14] CALDERWOOD, D. L., COGBURN, R. R., WEBB, B. D., AND MARCHETTI, M. A. Aeration of rough rice in long-term storage. *Transaction of the ASAE 27*, 5 (1984), 1579–1585.
- [15] CHRISTENSEN, C. M., AND KAUFMANN, H. H. *Grain Storage the Role of Fungi in Quality Loss*. Minneapolis: University of Minnesota, 1969.
- [16] CHUMA, Y., UCHIDA, S., AND SHEMSANGA, K. H. H. Simultaneous measurement of size, surface area and volume of grain and soybeans. *Transactions of the ASAE 25*, 6 (1982), 1752–1756.
- [17] CHUNG, D. S., ABDELMOSHIN, G. A., AND KIM, M. S. Resistance of grain sorghum to airflow. *Transactions of the ASAE 13p* (1984).
- [18] CONAB. *Companhia nacional de abastecimento*. www.conab.gov.br, 2005.
- [19] CONVERSE, H. H., GRAVES, A. H., AND CHUNG, D. S. Transient head transfer within wheat stored in a cylindrical bin. *Transaction of the ASAE 2* (1973), 129–133.
- [20] CORRÊA, P. C., GUIMARÃES, W. T., AND JÚNIOR, P. C. A. Efeito do nível e do tamanho de impurezas nas propriedades físicas da massa

- granular de feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 5, 1 (2001), 97–100.
- [21] CORTEZ, L. A. B., AND MAGALHÃES, P. S. G. *Introdução a Engenharia Agrícola*. Unicamp, Campinas, SP, 1992.
- [22] CUPERUS, G. W., PRICKETT, C. K., BLOOME, P. D., AND PITTS, J. T. Insect population in aerated and unaerated stored wheat in oklahoma. *Journal Kansas Entomology Society* 59 (1986), 620–627.
- [23] DEVILLA, I. A., COUTO, S. M., AND QUEIROZ, D. M. Distribuição do fluxo de ar em silos com sistema de aeração: análise por elementos finitos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 9, 2 (2005), 256–262.
- [24] DEVILLA, I. A., COUTO, S. M., ZOLNIER, S., AND SILVA, J. S. Variação da temperatura e umidade de grãos armazenados em silos com aeração. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 8, 2/3 (2004), 284–291.
- [25] ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress* 48, 2 (1951), 89–95.
- [26] GRAMA, S. N., BERN, C. R., AND JUNIOR, C. R. H. Airflow resistance of mixtures of shelled and fines. *Transactions of the ASAE* 27, 1 (1984), 268–272.
- [27] HAQUE, E., AHMED, Y. N., AND DEYOE, C. M. Static pressure drop in a fixed bed of grain as affected by grain moisture content. *Transactions of the ASAE* (1982), 1095–1098.
- [28] HAQUE, E., FOSTER, G. H., CHUNG, D. S., AND LAI, F. S. Static pressure drop across a bed of corn mixed with fines. *Transactions of the ASAE* 21, 5 (1978), 997–1000.

- [29] HUKILL, W. V., AND IVES, N. C. Radial airflow resistance of grain. *Agricultural Engineering* 36, 15 (1955), 332–335.
- [30] JAYAS, D. S., ALAGUSUNDARAM, D., AND IRVINE, D. A. Resistance to airflow through bulk flax seed as affected by moisture content, direction of airflow and foreign material. *Canadian Agricultural Engineering* 32, 2 (1991), 279–285.
- [31] JÚNIOR, P. C. A., CORRÊA, P. C., AND QUEIROZ, D. M. Modelamento da perda de qualidade de sementes de soja, em função das condições iniciais e da atmosfera no armazenamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4, 3 (2000), 403–408.
- [32] KHANKARI, K. K., MOREY, R. V., AND PATANKAR, S. V. Mathematical model for moisture diffusion in stored grain due to temperature gradients. *Transaction of the ASAE* 37, 5 (1994), 1591–1604.
- [33] KHATCHATOURIAN, O., AND SAVICKI, D. Mathematical modelling of airflow in an aerated soya bean store under non-uniform conditions. *Biosystems Engineering*, 88(2) (2004), 201–211.
- [34] KHATCHATOURIAN, O. A., AND SAVICKI, D. Optimization of the air distribution in grain storehouse with aeration in non-uniform of the mass of grains. *Proceedings of the 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering - COBEM* (2001), 73–82.
- [35] KHATCHATOURIAN, O. A., TONIAZZO, N. A., AND BORGES, P. A. P. Simulação numérica da influência da compactação dos grãos sobre o escoamento do ar em silos. *CILAMCE* (1999).
- [36] KW. *Kepler Weber Industrial S. A.* www.kepler.com.br, 2005.
- [37] LASSERAN, J. C. *Aeração de grãos*. No. 2. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, Série Centreinar, 1981.

- [38] MATTHIES, H. J., AND PETERSON, H. New data for calculating the resistance top airflow of stored granular materials. *Transactions of the ASAE* 17, 6 (1974), 1144–1149.
- [39] MIKETINAC, M. J., SOKHANSANJ, S., AND JAYAS, D. S. Graphical analysis of airflow distribution in grain bins using the finite element method. *Canadian Agricultural Engineering* 28, 1 (1986), 23–30.
- [40] MOHSEENIM, N. N. *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach Science Publishers, 1980.
- [41] PEREIRA, J. A. M. *Aeração de Grãos - Fundamentos e Manejo*. Série Centreinar, Notas de aula 1995.
- [42] PIERCE, R. O., AND THOMPSON, T. L. Airflow pattern in coaxial-shaped piles of grain. *Transactions of the ASAE* 18 (1975), 946–949.
- [43] PUZZI, D. *Abastecimento e Armazenagem de Grãos*. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas, 1986.
- [44] REED, C., SUBRAMANYOM, F. H. A. A. I. B., AND HAGSTRUM, D. W. Alternative to pesticides in stored-product ipm. *Norwell: Kluwer Academic Publishers* (2000), 51–72.
- [45] SASSERON, J. L. *Características dos grãos armazenados*. CENTREINAR, 1980.
- [46] SAVICKI, D. L. *Modelagem Matemática do Processo de Aeração em Condições Não-Homogêneas da Massa de Grãos de Soja*. Dissertação de Mestrado, UNIJUÍ, Ijuí 2001.
- [47] SCHULZ, J. A. T. *Modelagem Matemática do Processo de Aeração de Grãos em Silo com Simetria Axial*. Dissertação de Mestrado, UNIJUÍ, Ijuí 2003.
- [48] SEGERLIND, L. J. *Applied Finite Element Analysis*. John Wiley, 1984.

- [49] SHEDD, C. K. Resistance of grains and seeds to air flow. *Agricultural Engineering* 34, 9 (1953), 616–619.
- [50] SILVA, J. S., AND CORRÊA, P. C. *Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*. Editora Aprenda Fácil, 2000.
- [51] SOARES, J. B. *Curvas de secagem em camada fina e propriedades físicas de soja (Glycime max)*. Tese de doutorado, UFV, Viçosa 1986.
- [52] STREETER, V. L., AND WYLIE, E. B. *Mecânica dos Fluidos*, 7 ed. McGraw-Hill, 1980.
- [53] SUN, D. W., AND BYRNE, C. Selection of emc/erh isotherm equations for rapeseed. *Journal Agricultural Engineering Research*, 69 (1998), 307–315.
- [54] SUN, D. W., AND WOODS, J. L. Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers. *Transaction of the ASAE* 37 (1994), 1919–1926.
- [55] TOÉ, M. C. D. *Resolução Numérica do Problema Inverso para Escoamento do Ar em Silos*. Dissertação de Mestrado, UNIJUÍ, Ijuí 2005.
- [56] TONIAZZO, N. A. *Modelagem Matemática do Escoamento do Ar em Sistemas de Armazenagem de Grãos*. Dissertação de mestrado, UNIJUÍ, Ijuí 1997.
- [57] WEBER, E. A. *Armazenagem Agrícola*. Livraria e Editora Agropecuária Ltda, 2001.

[12],[21],[43],[57], [33],[5],[56], [46], [7], [55], [54], [53], [1], [32], [19], [13],
[3], [14], [22], [44], [15], [50], [37], [41], [47], [8], [2], [49], [29], [38], [42], [9], [10], [25],
[18], [11], [31], [4], [35], [34], [28], [26], [17], [45], [30], [27], [20], [52], [48], [16], [40],
[51], [24], [23], [39], [6], [36]

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)