

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE O ESTADO DO RIO GRANDE DO
SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA TEMPERATURA DE GRÃOS DE SOJA NO
INTERIOR DE UM SILO COM AERAÇÃO SUJEITO A CONDIÇÕES DE
CONTORNO**

Elaborada por

MARILENE RIZZI ENCK

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Ijuí-RS, janeiro de 2006.

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

MARILENE RIZZI ENCK

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA TEMPERATURA DE GRÃOS DE SOJA NO
INTERIOR DE UM SILO COM AERAÇÃO SUJEITO A CONDIÇÕES DE
CONTORNO**

Dissertação apresentada ao Departamento de Física, Estatística e Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ – (RS) como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática.

Ijuí, janeiro de 2006.

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora Prof^a. Dr^a. Fabiane A. de Oliveira, e também ao meu co-orientador Prof. Dr. Oleg Khatchatourian que pelo apoio manifestado permitiu reunir as condições que muito me ajudaram a vencer este trabalho. Bem como pela disponibilidade e amizade então demonstradas.

Ao meu esposo, Irineu pelo apoio, compreensão, amor e pela força que me deste nos momentos que mais precisava. Aos meus filhos Aloysio e Iriene pelo carinho e pela compreensão, porque sem eles não teria sentido a minha vida.

Ao professor Nelson Toniazzo, e ao Departamento de Física, pela ampliação do meu conhecimento e pelas trocas de experiências.

Aos colegas do Mestrado, em especial a colega e amiga Angela Beatriz Weber, pela força, estímulo, apoio e pela relação de amizade que compartilhamos.

RESUMO

As sementes provenientes do campo apresentam, em geral, teor de água inadequado para o armazenamento seguro. O elevado teor de água, no período compreendido entre a colheita e secagem, contribui para acelerar o processo deteriorativo dos grãos em razão da elevada atividade metabólica. A armazenagem e o fluxo de cereais são de grande importância para as indústrias agrícolas e otimizações conseguidas na manipulação de tais produtos podem produzir grande benefício econômico. Um dos meios mais utilizados para a manutenção da qualidade dos produtos é a aeração, pois esta permite conservar estes produtos armazenados por um período de tempo prolongado. Existe a necessidade de otimização do processo de aeração, diante dos altos custos envolvidos neste processo em armazéns de grande porte, por isto a importância do estudo e descrição da dinâmica de resfriamento de grãos sob aeração. Para estudar e descrever esta dinâmica, neste trabalho foi desenvolvido um equipamento experimental que simula o resfriamento de grãos em um silo real com aeração. Obteve-se, a partir do uso deste equipamento, curvas de resfriamento de uma massa de grãos de soja para diferentes velocidades do ar em diferentes alturas (seções) do tubo com e sem isolamento térmico. Num trabalho anterior (Menegol, 2005) simulou-se o resfriamento de grãos sob aeração num tubo considerando a hipótese de que perdas de calor nas laterais não eram significativas. A partir dos dados obtidos no presente trabalho observou-se que, a temperatura varia ao longo do raio, sendo que esta variação não pode ser desconsiderada. Adaptou-se então, um modelo matemático para descrever o resfriamento da massa de grãos considerando as perdas de calor pelas laterais do tubo. Os resultados obtidos da simulação quando comparados com os dados experimentais não mostraram boa concordância, indicando que novas hipóteses deverão ser consideradas.

ABSTRACT

The seeds proceeding from the field present, in general, inadequate water content from the safe storage. The raised water content of the seeds, in the period between the harvest and drying contributes to speed up the rotten process in reason of the raised metabolic activity. The storage and the flow of cereals and other products are of great importance for the agricultural industry and optimized obtained in the manipulation of such products can produce an economic benefit. The way more used to maintain of the product quality is the aeration; therefore this allows to conserve the stored products for a extend period of time. It exists the necessity of optimized of the process of aeration, ahead of the high involved costs in this process in warehouses of great transport, therefore the importance of the study and description of the dynamics of cooling of grains under aeration. To study and to describe this dynamics, in this work an experimental equipment was developed that simulates the cooling of grains in a real silo with aeration. It was gotten, from this equipment, cooling curves of a mass of soy grains for different air speeds in different heights (sections) of the tube with and without thermal isolation. In a previous work (Menegol, 2005) the cooling of grains under aeration in a tube was simulated considering the hypothesis of that losses of heat in the laterals were not significant. From the data gotten in the present work the temperature was observed that, varies to the long one of the ray, being that this variation cannot be disrespected. Adapted then, a mathematical model to describe the cooling of the grains mass considering the losses of heat by the laterals of the tube. The gotten results of the simulation when compared with the experimental data they had not shown good agreement, indicating that new hypotheses will have to be considered.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| AGRADECIMENTOS | IV |
| RESUMO | V |
| ABSTRACT | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS | IX |
| ÍNDICE DE TABELAS | XII |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 1 |
| 2.1. ASPECTOS GERAIS..... | 1 |
| 2.2. ARMAZENAMENTO DE GRÃOS EM SILOS | 1 |
| 2.2.1 ARMAZÉNS GRANELEIROS | 1 |
| 2.2.2 SILOS DE CONCRETO OU ALVENARIA..... | 1 |
| 2.2.3 SILOS METÁLICOS | 1 |
| 2.3. ARMAZENAGEM DOS GRÃOS E SUAS CARACTERÍSTICAS..... | 1 |
| 2.3.1 MASSA DE GRÃOS | 1 |
| 2.3.2 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DA MASSA DE GRÃOS | 1 |
| 2.3.3 MATURIDADE FISIOLÓGICA DOS GRÃOS..... | 1 |

| | |
|---|----|
| 2.4 UMIDADE DO GRÃO | 1 |
| 2.4.1 EQUILÍBRIO E COMPORTAMENTO HIDROSCÓPICO DO GRÃO..... | 1 |
| 2.4.2 DIAGRAMA DA CONSERVAÇÃO DE GRÃOS | 1 |
| 2.4.3 DIFUSIVIDADE E A CONDUTIVIDADE DA MASSA DE GRÃOS..... | 1 |
| 2.5 DANOS EM GRÃOS ARMAZENADOS | 1 |
| 2.5.1 ALTAS TEMPERATURAS DA MASSA DE GRÃOS | 1 |
| 2.5.2 AQUECIMENTO DEVIDO À QUALIDADE DO SISTEMA DE ARMAZENAGEM..... | 1 |
| 2.5.3 SILOS COM AERAÇÃO E COM TERMOMETRIA..... | 1 |
| 2.5.4 TERMOMETRIA COMPUTADORIZADA COM CONTROLE DE AERAÇÃO..... | 1 |
| 2.6 QUALIDADE DOS GRÃOS ARMAZENADOS | 1 |
| 2.7 AERAÇÃO..... | 1 |
| 2.7.1 FUNÇÃO DA AERAÇÃO..... | 1 |
| 2.8 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA..... | 1 |
| 3. MODELO MATEMÁTICO | 1 |
| 4. ESTUDOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 36 |
| 4.1 EQUIPAMENTO | 1 |
| 4.2. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS | 1 |
| 4.2.1 RESFRIAMENTO DA MASSA DE GRÃOS AO LONGO DO RAIO..... | 1 |
| 4.2.2 RESFRIAMENTO DA MASSA DE GRÃOS COM ISOLAMENTO E SEM ISOLAMENTO | 1 |
| 4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 1 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 1 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 1 |

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Figura 2.1-Silo Concreto..... | 9 |
| Figura 2.2-Silo Metálico..... | 10 |
| Figura 2.3 - Gráfico de conservação de cereais (Kepler Weber)..... | 15 |
| Figura 2.4 - Correntes Convectivas no interior do Silo: Verão e Inverno..... | 18 |
| Figura 2.5-Explosão de um silo (Chang,1993)..... | 19 |

Capítulo 4

| | |
|--|-----|
| Figura 4.1 - Esquema do equipamento construído para estudar o resfriamento de grãos de soja com isolamento térmico nas laterais..... | 36. |
| Figura 4.2 -- Esquema do equipamento construído para estudar o resfriamento de grãos de soja ao longo do raio..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.3 – Variação da temperatura em função da posição dos termopares, para diferentes valores de tempo na secção $x=0,15m$ com isolamento..... | 40 |
| Figura 4.4 – Variação da temperatura em função da posição dos termopares, para diferentes valores de tempo na secção $x=0,15m$ sem isolamento..... | 41 |
| Figura 4.5 - Esquema do equipamento construído para estudar o resfriamento de grãos de soja com isolamento térmico nas laterais..... | 42 |
| Figura 4.6 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos.Dados experimentais com isolamento($v=0,23 m/s$)..... | 43 |
| Figura 4.7 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos e dados experimentais com isolamento($v=0,41 m/s$)..... | 43 |
| Figura 4.8 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos e dados experimentais com isolamento($v=0,53 m/s$)..... | 44 |
| Figura 4.9 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos.Dados experimentais sem isolamento ($v=0,23 m/s$)..... | 45 |
| Figura 4.10 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos.Dados experimentais sem isolamento ($v=0,41 m/s$)..... | 45 |
| Figura 4.11 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos.Dados experimentais sem isolamento ($v=0,53 m/s$)..... | 46 |
| Figura 4.12-Relação entre a temperatura adimensional $(T-Ta/Tf-Ta)$ e o tempo de resfriamento, para o tubo sem isolamento (símbolos coloridos) e com isolamento (símbolos em preto) com velocidade de aeração de $v=0,23 m/s$ | 47 |

Figura 4.13 -Dinâmica de resfriamento para $v=0,22 \text{ m/s}$, onde, (símbolos vermelho) são os dados experimentais, (símbolos em preto) simulações e (linhas) simulação Menegol, (2005).....49

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1 - Crescimento da produção de soja nos países de maior produção mundial.....5

Tabela 2.2 - Crescimento da produção de grãos no Brasil..... 6

LISTA DE SÍMBOLOS

T - temperatura do grão [$^{\circ}C$];

t - tempo [s];

r - raio do cilindro [m];

z - altura da massa de grãos [m];

k - condutividade térmica da massa de grãos de soja [w/mk];

ρ - densidade volumétrica [kg/m^3];

c_p - calor específico dos grãos de soja, a pressão constante [J/kg.K];

$\alpha = \frac{K}{\rho c_p}$ - é o coeficiente da difusividade térmica dos grãos [m^2/s];

T_a - temperatura do ar de aeração [$^{\circ}C$];

z=L- altura da coluna de grãos [L=0,6m];

r=R- raio do cilindro [R=0,75m];

h^* - coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m.K];

T_0 - temperatura inicial dos grãos [$^{\circ}\text{C}$],(considerada constante);

T^* é a temperatura modificada [$^{\circ}\text{C}$];

h é a razão entre o coeficiente de convecção e a condutividade térmica [$1/m$];

C_1 e C_2 sendo constantes arbitrárias;

$J_0(\gamma r)$ é a função de Bessel em ordem zero de primeira espécie;

$Y_1(\gamma r)$ é a função de Bessel em ordem um de segunda espécie;

A e B são constantes arbitrárias;

z, r são coordenadas cilíndricas.

1. INTRODUÇÃO

Vivemos em uma época em que a necessidade de produção de alimentos é cada vez maior, pois o crescimento da população tem se dado a taxas elevadas nas últimas décadas, exigindo um crescimento bem maior na produção de grãos, sendo que o consumo se mostra cada dia mais exigente, buscando elementos de boa procedência e especialmente de qualidade.

As sementes provenientes do campo apresentam, em geral, teor de água inadequado para o armazenamento seguro. O elevado teor de água das sementes, no período compreendido entre a colheita e a secagem, contribui para acelerar o processo deteriorativo em razão da elevada atividade metabólica. Além disso, ocorre o consumo de substância de reserva e a liberação de energia e água, favorecendo o desenvolvimento de microorganismos e insetos.

Para que as perdas de grãos sejam diminuídas e a qualidade de grãos mantidos para as diferentes finalidades, é necessário aumentar a eficiência dos secadores. E para isso deve-se levar em consideração o tempo de exposição, a temperatura, a velocidade do ar e o teor de umidade.

Junto com a secagem e o controle fitossanitário, a aeração é um dos principais meios pelos quais se pode conservar a qualidade dos grãos armazenados durante um período de tempo prolongado.

Por isso, torna-se importante modelar matematicamente dinâmicas de resfriamento de grãos armazenados em silos sujeitos a aeração.

Conhecendo a dinâmica de resfriamento pode-se otimizar o uso da aeração, diminuindo os custos e aumentando o tempo de armazenagem.

Num trabalho apresentado anteriormente por Menegol (2005), foram obtidos resultados experimentais e simulados utilizando o modelo matemático que considerava o resfriamento de uma massa de grãos de soja armazenados em um silo sujeito a aeração. Neste modelo matemático tinha-se por hipótese que a transferência de calor(resfriamento) se realizava principalmente por condução entre os grãos.

Considerava-se que a dinâmica de variação da temperatura era unidimensional, ao longo da altura do silo, sendo que desconsiderou-se a variação ao longo do diâmetro do silo, pois por hipótese esta variação era desprezível.

O trabalho, aqui apresentado, tem por objetivo estudar a temperatura da massa de grãos de soja no interior de um silo com aeração sujeito a condições de contorno diferentes aos casos abordados anteriormente (Menegol,2005). Neste caso adaptou-se um modelo matemático para determinar as curvas de resfriamento da massa de grãos armazenados em silos sujeito a aeração considerando as perdas de calor nas laterais do silo.

Foram obtidos novos resultados experimentais e comparados com os resultados obtidos pela simulação do modelo matemático.

O presente trabalho é dividido da seguinte maneira:

No capítulo 2 é apresentado uma revisão bibliográfica sobre os aspectos gerais da armazenagem, as características da massa de grãos, a secagem, o sistema de aeração, e feita a colocação do problema.

No capítulo 3 é apresentado e detalhado o modelo matemático de resfriamento dos grãos armazenados com condições de contorno.

No capítulo 4 é apresentado o esquema de um equipamento similar a um silo, onde foram coletados os dados experimentais e analisados os resultados obtidos, e as simulações numéricas realizadas e a comparação com os dados experimentais.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS GERAIS

A grande importância dos recursos naturais e o rápido avanço na produção de grãos têm colocado o Brasil no segundo lugar no “ranking” mundial de produção de soja.

As maiores modificações no quadro agrícola nacional passaram a ser notadas, inicialmente, nos Estados de São Paulo e Rio Grande do Sul e, posteriormente, em Minas Gerais, Paraná, Goiás e Mato Grosso. Nestas unidades da Federação, as condições climáticas, topográficas, de solo e os tipos de colonização caracterizaram a implantação de uma agricultura com altos índices de inversões e voltadas para o atendimento tanto no mercado nacional como internacional. O arroz, o milho e, principalmente, a soja passam a apresentar significativos volumes de excedentes comercializáveis.

A soja é um produto vegetal de maior concentração protéica, que pertence ao gênero *Glycine*, da família das leguminosas, ou *Fabaceae*.

É originária da China e foi introduzida no Brasil por volta de 1882 na Bahia.

No estado do Rio Grande do Sul a cultura da soja teve início em torno de 1950, sendo que na década de 60 o cultivo se intensificou no Noroeste do Estado.

A soja é de grande importância na alimentação humana e animal, pois está presente em 60% de todos os produtos alimentícios. Ou seja, os maiores compradores da soja são as indústrias de óleo, derivados lácteos e de ração animal.

| Produção(Toneladas) | 2000/01 | 2001/02 | 2002/03 | 2003/04 | 2004/05 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <i>USA</i> | 75,06 | 78,69 | 75,01 | 66,78 | 85,74 |
| <i>Brasil</i> | 39,50 | 43,50 | 52 | 52,60 | 64,50 |
| <i>Argentina</i> | 27,80 | 30 | 35,50 | 34 | 39 |

**Tabela 2.1 - Crescimento da produção de soja nos países de maior produção mundial
USDA-United States Department of Agriculture**

No Rio Grande do Sul, a região noroeste se destaca na produção de cereais e oleaginosas. Dentre as espécies cultivadas, destaca-se a soja. Os grãos aqui cultivados são geralmente utilizados para a industrialização, (óleo e ração animal) e também para a exportação.

A tabela abaixo mostra os principais grãos cultivados no Brasil nos últimos cinco anos.

| Cultura | Safras [valores em mil toneladas] | | | | |
|---------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 2000/01 | 2001/02 | 2002/03 | 2003/04 | 2004/05 |
| <i>Arroz</i> | 10.386,0 | 10.626,1 | 10.367,1 | 12.808,2 | 12.809,4 |
| <i>Feijão</i> | 1.155,7 | 1.303,0 | 1.240,5 | 1.235,1 | 1.090,9 |
| <i>Milho</i> | 35.833,0 | 29.086,3 | 34.613,6 | 31.617,3 | 29.318,5 |
| <i>Soja</i> | 38.431,8 | 41.916,9 | 52.017,5 | 49.770,1 | 61.408,9 |
| <i>Trigo</i> | 3.194,2 | 2.913,9 | 5.851,3 | 5.851,3 | 6.021,6 |

Tabela 2.2 - Crescimento da produção de grãos no Brasil.

Fonte: CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento

Na tabela acima, um aspecto muito importante a ser notado, é o aumento progressivo desses produtos agrícolas, sendo que este processo de expansão, é devido em grande parte ao aumento da área cultivada e a incorporação de novas tecnologias.

O fortalecimento dos processos característicos de comercialização, no caso da soja, passam a exercer significativas influências sobre o desenvolvimento e crescimento econômico bem como na rede armazenadora brasileira.

2.2. ARMAZENAMENTO DE GRÃOS EM SILOS

A armazenagem em graneleiros e silos é uma atividade destinada a guarda e a conservação dos produtos, sendo de fundamental importância para garantir a total qualidade dos grãos armazenados.

As edificações dos silos e armazéns são geralmente feitas em estruturas de concreto ou metálicos.

Sabe-se que ocorrem perdas de qualidade todos os anos, durante a armazenagem, muitas vezes sem pleno conhecimento (ou consciência) da empresa produtora de grãos.

Umidade e temperatura da massa de grãos são fatores decisivos para a manutenção do poder germinativo e vigor, sinônimo de armazenabilidade.

As pragas são os maiores causadores de perdas quantitativas, além de serem responsáveis pela perda de qualidade dos grãos e de seus subprodutos no momento que são encaminhados á comercialização e consumo. Segundo (Weber,2005), as perdas por ataques de pragas chegam a 10%. Diante de um índice tão expressivo, e mantido ao longo dos anos, considera-se de caráter emergencial a divulgação de ações que visem identificar e reduzir drasticamente estas perdas a níveis tecnicamente aceitáveis. É de suma importância a mudança de comportamento dos armazenadores. Tanto administradores como operadores devem conhecer a unidade de armazenagem, para que, em conjunto, possam identificar e prever possíveis pontos de entrada e abrigo de pragas.

Os grãos devem ser inspecionados periodicamente, em intervalos de tempo nunca superior a quinze dias. Nessas inspeções são observadas principalmente as condições qualitativas e fitossanitárias do produto.

Para auxiliar na determinação das medidas de controle a serem implementadas, é recomendável que se saiba identificar e conhecer os hábitos das principais pragas que infestam os produtos armazenados.

Os produtos agrícolas são armazenados e acondicionados em determinados tipos de embalagem, como, sacarias e a granel (esse comporta grandes quantidades de grãos) (Puzzi,1973).

Os grãos armazenados a granel (silos de madeira, de alvenaria, de concreto ou metálicos) permitem uma redução significativa de tempos e de custos, pois se padroniza somente o produto que foi comercializado.

As edificações mais usadas por pequenos e grandes produtores e cooperativas são: armazéns graneleiro, silos de concreto e silos metálicos.

2.2.1 ARMAZÉNS GRANELEIROS

São unidades armazenadoras onde os grãos estocados ocorrem no sentido horizontal. A sua estrutura possui uma geometria adequada para que sua temperatura interna aumente.

Os armazéns mais usados são o de fundo V dotados de espalhador de grãos, esses mais comuns na região Noroeste do Estado. O custo desses armazéns é bem inferior quando comparados com os silos. São usados para estocar a curto prazo e beneficia principalmente os pequenos produtores.

2.2.2 SILOS DE CONCRETO OU ALVENARIA

Os silos de concreto são dotados, funcionalmente, de equipamentos automatizados e semi-automatizados que permitem a simultaneidade de operações, inclusive a transilagem em circuito aberto ou fechado, além de baixa utilização de mão-de-obra, com longa durabilidade sendo que, os produtos são armazenados a granel. As construções geralmente são

em forma cilíndrica ou retangular com suas paredes impermeabilizáveis, sendo o piso plano e com sistema de aeração.

Vantagens:

- Menor tempo de manipulação do produto;
- dispensa sacarias;
- elevado índice de mecanização e automação (economia de mão-de-obra);
- grande velocidade de operações, como descarga, carga, expurgo entre outras.



Figura 2.1 - Silos de Concreto

2.2.3 SILOS METÁLICOS

Silos metálicos conceituam-se como unidades armazenadoras de grãos caracterizadas por células ou compartimentos estanques e herméticos, ou semi-herméticos.

Oferecem condições técnicas de conservação do produto estocado por período de tempo normalmente prolongado usando o sistema de aeração.

Permitem controlar as características físico-químicas e biológicas da massa de grãos que, embora perdendo sua identidade de origem, conservam a diferenciação classificatória da espécie e padrão agrícola, em virtude da compartimentação disponível. Silos metálicos atualmente são os mais utilizados na armazenagem de grãos, pois a tecnologia usada faz com que os grãos tenham uma boa qualidade .



Figura 2.2 - Silos Metálicos

2.3. ARMAZENAGEM DOS GRÃOS E SUAS CARACTERÍSTICAS

2.3.1 MASSA DE GRÃOS

Nos armazéns e silos são armazenados grãos que formam uma massa porosa, constituída pelos grãos e pelo espaço intersticial ou intergranular.

A porosidade de uma massa de grãos é a razão entre o volume de vazios e o volume total. Para a soja, a porosidade é de 0,4.

Uma massa de grãos armazenada em silos apresenta desníveis de temperatura, por isso são indispensáveis o conhecimento da temperatura e a umidade dos grãos. Esse controle levará a longevidade no período de estocagem.

2.3.2 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DA MASSA DE GRÃOS

A respiração é um processo que produz calor, água e dióxido de carbono.

Os grãos são organismos vivos, que respiram liberando gás carbônico (CO₂), água (H₂O) e também energia em forma de calor.

Para considerar a estabilidade de um produto no armazenamento e os riscos de sua deteriorização, deve-se analisar a atividade de água em conjunto com a temperatura (Borges,2002).

A propagação de calor se dá em três diferentes formas:

a) **Condução:** Na massa de grãos, por condução, o calor propaga-se por contato dos grãos entre si, porém devido à natureza porosa dos grãos e a pequena área de contato entre eles, faz com que esta propagação se torne complexa e lenta.

b) Convecção: o ar frio se aquece junto à fonte de calor, sendo que a densidade do ar diminui com o aumento do calor que faz com que ele suba formando uma corrente convectiva, portanto a convecção se propaga no sentido vertical, de baixo para cima.

c) Irradiação: chamada também de radiação, é a energia radiante que se propaga sem necessidade de meio material . Nos silos apenas uma pequena parte do calor, quase irrelevante, se propaga por irradiação.

2.3.3 MATURIDADE FISIOLÓGICA DOS GRÃOS

Os grãos ou sementes alcançam sua maturidade fisiológica (momento em que possuem o máximo de matéria seca) em níveis de umidade que impedem a colheita mecânica, além de não permitirem armazenamento seguro. Na maioria dos grãos, este nível de umidade está acima de 30% (Savicki, 2001).

Como na maioria das vezes não se pode colher os grãos no momento exato de sua maturidade fisiológica, uma vez que colheitadeiras não são capazes de colher grãos com umidades muito elevadas, os grãos são colhidos mais secos, o que resulta em alguma perda. Como esta umidade de colheita ainda é elevada para uma armazenagem segura, normalmente é necessária a secagem artificial.

Os grãos de soja são colhidos, em algumas regiões, com um grau de umidade com o qual pode ser diretamente armazenado em silos com aeração. Nestes casos é recomendável que os silos sejam dotados de controle de aeração.

2.4 UMIDADE DO GRÃO

2.4.1 EQUILÍBRIO E COMPORTAMENTO HIDROSCÓPICO DO GRÃO

A soja é composta de 40% de proteínas, 21,0% de óleos, 34,0% de carboidratos e 4,9% de cinzas, em média. Como o grão pode ceder água (dissorção) ou absorver água (adsorção), ou seja, tem natureza higroscópica, deve existir um equilíbrio, que depende da temperatura e do estado higrométrico do meio ambiente, seja no campo ou no interior do silo ou armazém.

A semente higroscópica ganha ou perde água num processo dinâmico em função da umidade relativa do ar (UR). Assim, para cada UR a uma determinada temperatura, a semente terá um teor de água denominado de equilíbrio higroscópico (EH). Entretanto, a relação entre a UR e umidade das sementes não é linear, apresentando-se como uma curva sigmóide a uma dada temperatura. Esta relação é denominada curva de equilíbrio higroscópico das sementes (Queiroz, 2004).

A análise da atividade de água é o fator mais importante para o estabelecimento de teores de umidade e temperatura recomendados para o armazenamento seguro.(Borges, 2002).

A migração de umidade da massa de grãos se apresenta em silos pelos desníveis de temperatura. Assim, as camadas de massa de grãos que se encontram próximas das paredes e da superfície, adquirem uma temperatura mais baixa (inverno) e mais alta (verão), conforme o local onde foi armazenado (concreto ou metálico).

A taxa de saturação de umidade do ar depende de sua temperatura, significando que, quando o ar aquece aumenta sua capacidade de absorver umidade e diminui esta capacidade quando o ar esfria (Fischer, 2003).

O aquecimento da cobertura pelo sol, aquece o ar interno e absorve a umidade contida nos grãos armazenados. Este ar em contato com a cobertura resfriada, a noite ou no inverno (*variações climáticas*), diminui a temperatura interna, elevando a umidade relativa e podendo condensar e gotejar sobre os grãos. Como consequência haverá mofo, deterioração e até a germinação da camada superior do produto estocado.

Este fenômeno ocorre pelas diferenças de temperaturas interna / externa, quando o lado externo da cobertura se aquece ou se esfria pela variação climática das temperaturas entre o dia e a noite.

2.4.2 DIAGRAMA DA CONSERVAÇÃO DE GRÃOS

O diagrama mostrado abaixo informa a situação em que os grãos poderão se encontrar se armazenados sob diversas condições de umidade e temperatura.

Conhecendo-se a umidade dos grãos (U_g), a temperatura dos grãos (T_g), pode-se localizar a umidade e a temperatura no diagrama. Destes pontos traça-se retas na vertical e na horizontal. No cruzamento marcamos pontos com (A), (B) e (C), que definem as condições finais de conservação dos grãos armazenados e tipos de contaminações.

(A)- A massa de grão possui uma boa qualidade quando se encontra armazenada a temperatura inferior a 18°C e umidade inferior a 14%;

(B)- Aumento da temperatura, que favorece a desenvolvimento de insetos;

(C)-A umidade afeta a germinação das sementes;

(D)- desenvolvimento de fungos.

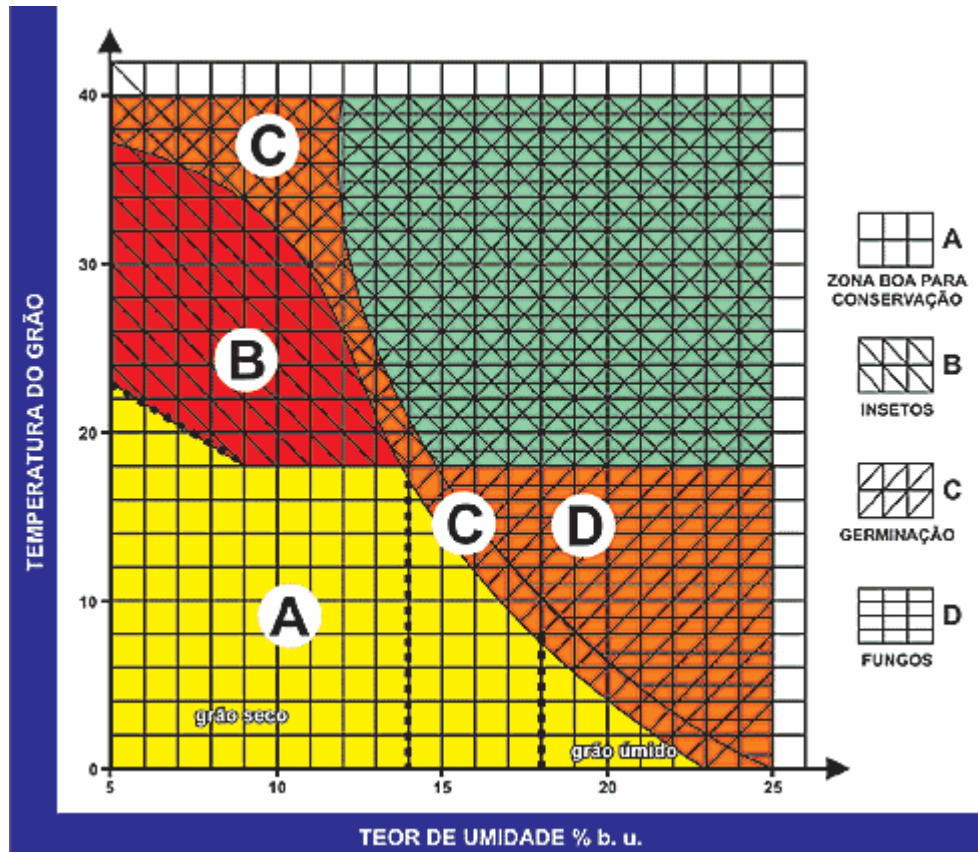


Figura 2.3 - Gráfico de conservação de cereais (Kepler Weber(2005)).

2.4.3 DIFUSIVIDADE E A CONDUTIVIDADE DA MASSA DE GRÃOS

O conhecimento das propriedades térmicas da massa de grãos é essencial para o desenvolvimento das ciências agrícolas e de alimentos podendo ser empregado numa grande variedade de objetivos, tais como: predição da taxa de secagem ou distribuição de temperatura em grãos úmidos sujeitos a diferentes condições de secagem, aquecimento ou resfriamento, otimização do desempenho de equipamentos de transferência de calor.

De acordo com Sharma e Thompson, há muitos métodos para avaliar as propriedades térmicas de grãos úmidos, bem como sua contribuição em processos de secagem e estocagem de grãos.

O método usual, atualmente adotado, devido ao pequeno tempo de teste é o método de estado transiente. Algumas dificuldades são associadas a este método, tais como: medir a temperatura, localização dos termopares, transferência de calor convectiva em medições de propriedades térmicas de materiais granulares (Freire, 1981).

A determinação em regime estacionário contrapõe-se à determinação em regime transiente. Embora o regime transiente seja vantajoso no curto período de experimento e na precisão da determinação, os detalhes construtivos de equipamento experimental para o regime transiente são maiores e mais dispendiosos que os de um equipamento experimental em regime estacionário.

As propriedades térmicas, tais como difusividade e condutividade térmicas, variam segundo a natureza do produto, variedade, teor de umidade e temperatura.

Segundo Freire (1981), os métodos de estado estacionário podem ser divididos em: método das placas paralelas, método do cilindro concêntrico e método da esfera concêntrica. Estes três métodos requerem uma solução de equações de transferência de calor para um regime de estado estacionário em coordenadas retangulares, cilíndricas e esféricas, respectivamente.

No método de estado estacionário, a temperatura constante é mantida em cada superfície da amostra teste. A razão constante de fluxo de calor, obtida após o equilíbrio, é medida para uma dada área seccional perpendicular ao fluxo e um gradiente de temperatura. Aplicando-se a primeira Lei de Fourier de transferência de calor, a condutividade média pode ser calculada (Holman, 1983). Devido a sua simplicidade, este foi um dos primeiros métodos a serem utilizados para materiais biológicos (massa de grãos de soja).

2.5 DANOS EM GRÃOS ARMAZENADOS

A conservação dos grãos armazenados depende muito das interações que acontece entre as variações físicas, químicas e biológicas deste meio.

Segundo Toniazzo, (1997), as perdas dos grãos pós-colheita, ficam na faixa de 15 a 25%.

a)Perdas físicas: essas perdas ocorrem quando no produto há uma perda de peso do grão e ocorre com o ataque de insetos.

b)Perda de Qualidade: O grão perde suas características intrínsecas essenciais, que são alteradas geralmente com a ação de microorganismos que modificam suas propriedades, causando assim uma má qualidade do produto.

c)Perdas nutricionais: O ataque de insetos afeta a qualidade nutricional dos grãos, sendo que as perfurações favorecem as infestações de fungos e a perda de peso, ficando assim o grão ardido e mofado. Isso representa uma queda no valor nutritivo do grão ao ser utilizado como alimento.

d)Perda do valor comercial: Danos mecânicos produzidos nos grãos, grãos quebrados, mesmo que não apresentam problemas de perdas físicas ou de qualidade, tem seu valor comercial afetado.

2.5.1 ALTAS TEMPERATURAS DA MASSA DE GRÃOS

O teor de umidade de um produto exerce grande influência na variação de temperatura de uma massa de grãos durante a armazenagem (Abbouda et al., 1992 ; Khankari et al., 1994). Por isso, recomenda-se a secagem e limpeza do produto antes do seu

armazenamento, pois esses procedimentos diminuem a ação da microflora na massa de grãos, retardando a velocidade das trocas gasosas e o processo de deterioração natural.

Devido a mudanças climáticas, variações de temperatura também contribuem para a formação de gradientes de temperatura 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. A migração de umidade pode potencializar o desenvolvimento de insetos, fungos e bactérias e iniciar a deterioração do produto.

O gradiente da temperatura no interior de silos causa correntes convectivas de ar que transportam a umidade de uma parte a outra do silo, provocando a migração de umidade.

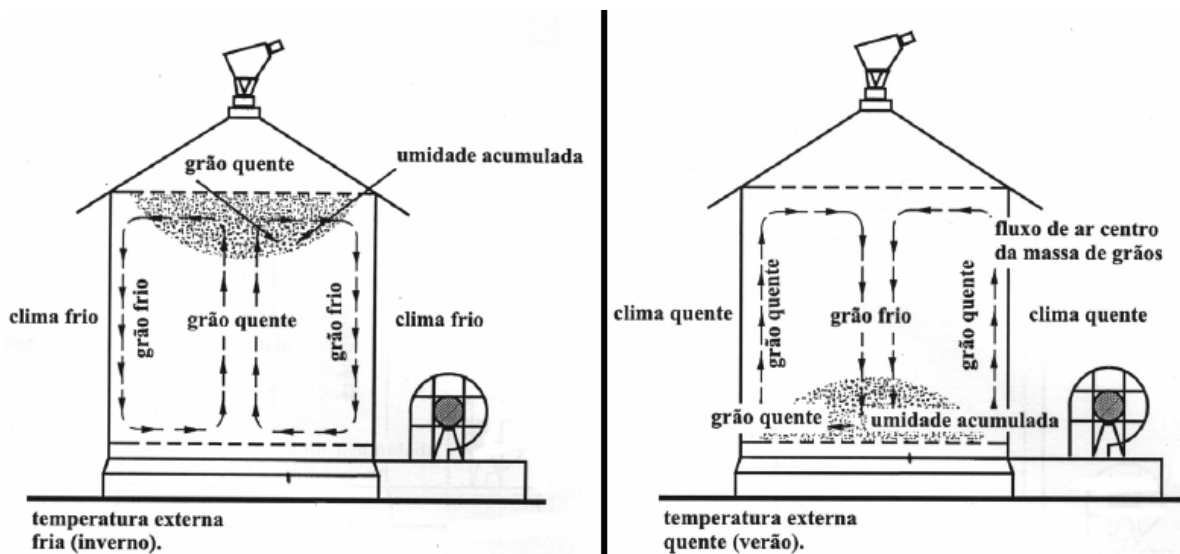


Figura 2.4 - Corrente Convectiva no interior do Silo: Verão e Inverno

2.5.2 AQUECIMENTO DEVIDO À QUALIDADE DO SISTEMA DE ARMAZENAGEM

Os silos e os armazéns são construções indispensáveis ao armazenamento da produção agrícola e influenciam decisivamente na sua qualidade e preço. Entretanto, por sua dimensão e complexidade, podem ser fonte de vários e graves acidentes do trabalho. Por serem os silos locais fechados, enclausurados, perigosos e traiçoeiros, são conhecidos como espaços confinados.

A decomposição de grãos pode gerar vapores inflamáveis. Se a umidade do grão for superior a 20%, poderá gerar metanol, propanol ou butanol. Os gases metano e etano, também produzidos pela decomposição de grãos, são igualmente inflamáveis e podem gerar explosões.

O principal fator causador de explosões em silos é o pó que fica suspenso. “Quanto mais fino o pó, maior é o risco de explosão, principalmente nas culturas de trigo, milho e soja”.



Figura 2.5 – Explosão de um silo(Chang,1993)

2.5.3 SILOS COM AERAÇÃO E COM TERMOMETRIA

Segundo Weber (2005), na atualidade, não se admitem unidades armazenadoras novas que se construam sem termometria que indiquem as elevações de temperatura e a localização do calor e, em caso de graneleiros, a aeração será feita por partes e serão abertos os canais de aeração ou aeradores na região do foco de calor. Em caso de silo vertical, toda massa será aerada para manter os grãos em boas condições de temperatura e umidade.

Na prática a aeração de manutenção se faz com ar a uma temperatura aproximada de 6°C abaixo da temperatura média da massa de grãos, para que a aeração se torne mais eficaz. A umidade do ar também deverá ser levada em consideração para que não ocorra risco de secar os grãos já secos enquanto estão sendo resfriados. E assim, considerando a localização do foco de umidade e calor a ser removido, se estiver na parte mais baixa do silo, não se recomenda a aeração de insuflação para não fazer passar todo o calor e umidade pelos demais grãos e para evitar período de aeração mais prolongado com custos desnecessários.

2.5.4 TERMOMETRIA COMPUTADORIZADA COM CONTROLE DE AERAÇÃO

Sistema inteligente e de longo alcance que faz o controle das medições de temperatura e da aeração automaticamente, permitindo que, de uma maneira fácil e rápida, seja possível acessar todas as condições da massa de grãos existente na unidade armazenadora. Gera relatórios coloridos, de fácil análise e compreensão e permite monitorar uma ou mais unidades, inclusive em outras localidades. Completo, opera com um software de programação, comando e impressão que busca, automaticamente, o programa de aeração, ligando e desligando os motores conforme as necessidades do produto armazenado, por silo, individualmente.

2.6 QUALIDADE DOS GRÃOS ARMAZENADOS

Observa-se que, ao longo dos anos, foram se consolidando padrões de qualidade: um de caráter normativo que estabelece limites mínimos e outro reconhecido pelo mercado (normalmente superior ao anterior).

Em se tratando de grãos de soja, por exemplo, o padrão de qualidade que o mercado reconhece como bom, é o resultado de anos e anos de trabalho das melhores empresas produtoras de grãos.

Pessoas, processos e máquinas interagem para atingir objetivos de qualidade e assim destacar seus produtos de outros.

Seleção de campo, seleção de cultivares, supervisão de campo, colheita, recebimento, beneficiamento e armazenagem são algumas etapas que compõem o processo de produção de sementes.

Algumas destas etapas experimentaram enormes saltos tecnológicos (as quatro primeiras por exemplo, em detrimento de outras que ficaram estagnadas, ou com melhorias pequenas, tímidas).

Neste cenário a engenharia deve utilizar toda sua inteligência e criar técnicas para minimizar os riscos do clima e máquinas suficientemente seletivas para descartar materiais que não são apropriados para a semeadura.

O resfriamento artificial de grãos desponta como uma alternativa viável técnica e econômica. O sistema de compressão mecânica ou refrigeração como o conhecemos até hoje foi inventado em 1902.

Os primeiros estudos sobre resfriamento artificial da massa de grãos surgiram a partir de 1950.

A transferência de calor na massa de grãos são alguns fenômenos físicos complexos, que ocorre principalmente por condução e convecção. (Andrade, 2001).

No estágio atual da tecnologia, pode-se resfriar a massa de grãos tanto em silos (processo estático) ou na linha de beneficiamento (processo dinâmico).

2.7 AERAÇÃO

O ambiente de estocagem comporta-se como um ecossistema no qual os grãos e microflora (fungos e bactérias), os insetos e os ácaros são seus componentes bióticos principais. Quando a transferência dinâmica de umidade e calor entre a superfície do grão e o ar intergranular resulta em uma atmosfera propícia para o desenvolvimento de fungos, tem-se o risco da degeneração progressiva do produto armazenado, que pode levar a sua completa deterioração. Um ambiente favorável pode fazer também com que insetos promovam a destruição massiva do grão. Inseto e ácaros também são responsáveis pela contaminação do produto e pela perda de seu valor comercial.

A aeração pode ser definida como a movimentação forçada de ar ambiente (ou condicionado) pelos poros da massa granular, com objetivo de estabelecer uma atmosfera favorável a conservação do produto armazenado. Ao ocupar os espaços intergranulares, o ar passará a constituir um novo micro-clima, separado do meio exterior pela isolamento térmica própria dos grãos, o qual permanecerá até que seja necessária sua renovação.

Na aeração, o fluxo de ar é estabelecido mecanicamente, pela ação de compressores centrífugos (ventiladores), distinguindo-se do processo da ventilação natural,

que ocorre pela ação dos ventos ou pela convecção térmica do ar. A aeração também difere da secagem com ar ambiente, uma vez que utiliza fluxos de ar muito menores do que a secagem.

Embora a aeração seja uma tecnologia originalmente concebida para uso em climas temperados, onde se dispõe mais freqüentemente de ar sob condições desejáveis (baixa temperaturas e umidade relativa), seu emprego disseminou-se em climas subtropicais e tropicais, onde as limitações impostas pelo ambiente podem ser contornadas por técnicas de manejos adequadas.

2.7.1 FUNÇÃO DA AERAÇÃO

Define-se como o processo de ventilar os grãos armazenados em silos ou graneleiros através de um sistema mecânico contendo ventilador e aerodutos, tendo como finalidade manter a massa armazenada com temperatura adequada e homogênea, obter um rebaixamento da temperatura dos grãos quando necessário para obter maior tempo de armazenagem seguro através da aeração de manutenção ou corretiva em oportunidades de elevações de temperatura em pontos localizados ou mesmo de forma generalizada.

A aeração também é de grande ajuda no processo de secagem para remover alguns percentuais de umidade dos grãos que ainda chegam úmidos e quentes, aumentando a capacidade de secagem, ou ainda retirando do secador grãos secos, porém quentes sem resfriar, também aumentando a capacidade de secagem em torno de 30%, se o secador estiver trabalhando pelo sistema contínuo e resfriando os grãos através da aeração nos silos.

Para que as condições de armazenamento sejam seguras por longos períodos a aeração é essencial, devido a garantia de boa conservação dos grãos e sem perdas de massa seca dos grãos no silo. Espaços intergranulares que existem entre os grãos armazenados a

granel, são fundamentais para que a aeração se torne viável sendo que, segundo o tamanho e a forma, os grãos apresentam menor ou maior resistência à passagem de ar, desta forma, facilitando ou dificultando o fluxo através da massa. Simultaneamente a existência de impurezas acima de 1% e mal distribuída, da mesma forma, prejudica a aeração mais eficaz.

A aeração pode ser utilizada para atenuar ou eliminar odores indesejáveis, como aqueles característicos de grãos embolorados, fermentados, etc.

2.8 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

Através da revisão bibliográfica pode-se verificar que há uma preocupação relacionada com o armazenamento de grãos de soja e que a aeração é um dos principais meios pelos quais se pode conservar a qualidade dos grãos armazenados durante um período de tempo prolongado.

Com o objetivo de estudar e modelar matematicamente o processo de resfriamento de grãos de soja sujeitos a aeração, foram realizados neste trabalho, uma série de experimentos de resfriamento de grãos e adaptado um modelo matemático que pretende oferecer uma boa concordância com as curvas de resfriamento obtidas experimentalmente.

Neste trabalho, pretende-se avançar os estudos sobre o processo de resfriamento de grãos e sua modelagem matemática iniciados anteriormente em (Menegol, 2005). Naquele trabalho, foi considerado um modelo matemático onde a hipótese central era que a massa de grãos resfriava por aeração pelo mecanismo de condução e a expressão matemática encontrada para a temperatura dos grãos dependia da altura considerada no tubo e do tempo de resfriamento, (caso unidimensional) portanto, variações de temperatura ao longo do raio foram desconsideradas (Oliveira, 2004).

No presente trabalho, esta hipótese foi revista e a variação de temperatura ao longo do raio no modelo matemático (caso bidimensional), foi considerada.

Apresentam-se as curvas simuladas comparando-se com os dados experimentais obtidos.

Os experimentos de resfriamento foram realizados utilizando tubos com e sem isolamento térmico para comparação das curvas de resfriamento dos grãos e cálculos de transferência de calor ao longo das paredes do tubo.

Além disto, realizou-se experimentos de resfriamentos de grãos com sensores (termopares) de temperatura posicionados ao longo do raio do tubo (com e sem isolamento térmico) para uma determinada altura para o tubo.

A partir das curvas de resfriamento obtidos experimentalmente, foi proposto um modelo matemático que descreve o resfriamento da massa de grãos ao longo do tempo para cada secção (altura) do tubo.

3. MODELO MATEMÁTICO

Para descrever o resfriamento da massa de grãos de soja e suas características considerou-se que o mecanismo de transferência de calor principal entre os grãos é a condução e resolveu-se, a partir desta hipótese inicial, a equação do calor em coordenadas cilíndricas para uma coluna de grãos sem isolamento, obtendo a variação da temperatura em função da posição na coluna de grãos, do raio e do tempo (Incropera,1998).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{kr \partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k \partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Considerando k constante tem-se que:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r \partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.2)$$

onde:

T é a temperatura do grão, sendo que $T=T(r,z,t)$ [°C], t é o tempo[s]

r é o raio do cilindro[m];

z a altura da massa de grãos [m];

k é a condutividade térmica da massa de grãos de soja [W/mK];

ρ a densidade volumétrica [Kg/m³];

c_p é o calor específico dos grãos de soja, a pressão constante [J/kg.k].

onde $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ é a difusividade térmica dos grãos [m^2/s].

Fazendo a seguinte mudança de variáveis:

$$T^*(r, z, t) = T(r, z, t) - T_a \quad (3.3)$$

onde T_a é a temperatura do ar de aeração (temperatura ambiente), tem-se a seguinte equação do calor:

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T^*}{\partial r} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T^*}{\partial t} \quad (3.4)$$

A equação (3.2) está sujeito as seguintes condições de contorno e condições iniciais:

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, z, t) \Big|_{z=L} = 0 \quad (3.5)$$

$$T_a = T(r, 0, t) \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, z, t) \Big|_{r=R} = -h[T(R, z, t) - T_a] \quad (3.7)$$

onde,

$$h = \frac{h^*}{k} \quad (3.8)$$

$$T_0 = T(r, z, 0) , \quad (3.9)$$

e:

L é a altura da coluna de grãos (L=0,6m);

R é o raio do cilindro (R=0,75m);

h^* é o coeficiente de transferência de calor por convecção;

T_0 é a temperatura inicial dos grãos (considerada constante);

k é a condutividade térmica dos grãos [w/mk];

h é a razão entre o coeficiente de transferência de calor por convecção e a condutividade térmica (1/m);

T^* é a temperatura modificada [°C].

Na interpretação física das condições de contorno (3.5) e (3.6) neste trabalho considera-se que ocorra transferência de calor nas laterais do silo.

Para as novas variáveis (T^*), as condições de contorno são dadas por:

$$\frac{\partial T^*}{\partial z}(r, z, t)|_{z=L} = 0 \quad (3.10)$$

$$T^*(r, 0, t) = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial r}(r, z, t)|_{r=R} = -hT^*(R, z, t) \quad (3.12)$$

$$T^*(r, z, 0) = T_i = T_0 - T_a \quad (3.13)$$

Para resolver a equação (3.4) com as condições de contorno mostradas acima, utiliza-se o método de separação de variáveis onde:

$$T^*(r, z, t) = X(r)Y(z)U(t) \quad (3.14)$$

Em relação as novas variáveis a equação (3.4) fica:

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{1}{Xr} \frac{\partial X}{\partial r} - \frac{1}{\alpha U} \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{-1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} \quad (3.15)$$

A expressão acima é verdadeira se os dois lados da equação forem iguais a uma constante λ^2 .

Pode-se separar o problema em duas expressões:

$$\frac{-1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} = \lambda^2 \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{1}{Xr} \frac{\partial X}{\partial r} - \frac{1}{\alpha U} \frac{\partial U}{\partial t} = \lambda^2 \quad (3.17)$$

Primeiramente resolve-se a equação (3.16), onde:

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} + \lambda^2 Y = 0 \quad (3.18)$$

A solução geral desta equação conforme (Boyce, 1994) com C_1 e C_2 sendo constantes arbitrárias é:

$$Y(z) = C_1 \cos(\lambda z) + C_2 \text{sen}(\lambda z) \quad (3.19)$$

Substituindo na solução (3.19), a condição de contorno (3.11) resulta em:

$$T^*(r, 0, t) = X(r)Y(0)U(t) = 0 \quad (3.20)$$

onde

$$Y(0) = 0 \quad (3.21)$$

Substituindo esta condição na equação (3.19) obtém-se então:

$$Y(0) = C_1 \cdot 1 + C_2 \text{sen}(0) = 0 \quad (3.22)$$

e, neste caso $C_1 = 0$.

A solução da equação dada em (3.18) com condições de contorno (3.10) fica na forma:

$$Y(z) = C_2 \text{sen}(\lambda z) \quad (3.23)$$

Aplicando na solução mostrada acima a condição de contorno dada em (3.10) tem-se;

$$X(r)U(t) \frac{\partial Y}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \quad (3.24)$$

Pela equação acima, tem-se que:

$$\frac{\partial Y}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \quad (3.25)$$

Substituindo a expressão para $Y(z)$ na equação (3.25), tem-se como resultado.

$$C_2 \cos(\lambda L) \cdot \lambda = 0 \quad (3.26)$$

Como $C_2 \neq 0$, e $\lambda \neq 0$, tem-se uma expressão para λ :

$$\lambda_n = \frac{\left(n + \frac{1}{2}\right)\pi}{L} \quad \text{com } n=0,1,2,\dots \quad (3.27)$$

$$Y_n(Z) = C_2 \text{sen} \left[\frac{\left(n + \frac{1}{2}\right)\pi z}{L} \right] \quad (3.28)$$

Fazendo com que,

$$\mu_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi \quad \text{com } n=0,1,2,\dots \quad (3.29)$$

Obtém-se a seguinte expressão:

$$Y_n(z) = \text{sen}\left(\frac{\mu_n z}{L}\right) \quad \text{com } n=0,1,2,\dots \quad (3.30)$$

A segunda expressão (3.17) pode ser escrita como:

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{1}{Xr} \frac{\partial X}{\partial r} = \lambda^2 + \frac{1}{\alpha U} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (3.31)$$

A equação (3.31) pode ser separada em duas outras equações, onde a constante de separação é dada por γ^2 :

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{1}{Xr} \frac{\partial X}{\partial r} = -\gamma^2 \quad (3.32)$$

$$\lambda^2 + \frac{1}{\alpha U} \frac{\partial U}{\partial t} = -\gamma^2 \quad (3.33)$$

A equação (3.33) pode ser re-arranjada na seguinte forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (\gamma^2 + \lambda^2)\alpha U = 0 \quad (3.34)$$

Esta é uma equação diferencial ordinária de primeira ordem na variável t , cuja solução é dada por (Boyce, 1994):

$$U(t) = e^{-(\gamma^2 + \lambda^2)at} \quad (3.35)$$

A equação (3.32) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial X}{\partial r} + \gamma^2 X = 0 \quad (3.36)$$

Esta equação está na forma da equação de Bessel de ordem zero para a variável γr e tem como solução (Ozisik, 2000).

$$X(r) = AJ_0(\gamma r) + BY_1(\gamma r) \quad (3.37)$$

onde:

$J_0(\gamma r)$ é a função de Bessel em ordem zero, de primeira espécie;

$Y_1(\gamma r)$ é a função de Bessel em ordem um, de segunda espécie;

A e B são constantes arbitrárias.

Considerando que $Y_1(\gamma r)$ diverge quando $r=0$, tem-se que:

$$X(r) = AJ_0(\gamma r) \quad (3.38)$$

Aplicando as condições de contorno (3.12) na solução acima, encontra-se:

$$\left. \frac{\partial J_0(\gamma r)}{\partial r} \right|_{r=R} = -hJ_0(\gamma R) \quad (3.39)$$

Utilizando a relação (Ozisik, 2000),

$$\frac{\partial J_0(\gamma r)}{\partial r} = \gamma \frac{\partial J_0(\gamma r)}{\partial(\gamma r)} \quad (3.40)$$

e a propriedade entre as funções de Bessel tem-se:

$$\frac{dJ_0(x)}{dx} = -J_1(x) \quad \text{onde } x = \gamma r \quad (3.41)$$

Logo a equação (3.39) pode ser reescrita como:

$$-\gamma J_1(\gamma R) + h J_0(\gamma R) = 0 \quad (3.42)$$

Fazendo $\gamma R = w_k$ e substituindo-se em (3.42) encontra-se cujas raízes são dadas por :

$$J_1(w_k) = \frac{hR}{w_k} J_0(w_k) \quad (3.43)$$

Substituindo as relações acima nas funções $X(r)$ e $U(t)$ obtêm-se as expressões:

$$X_k(r) = A J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) \quad (3.44)$$

e

$$U(t) = e^{-\left(\frac{w_k^2}{R^2} + \frac{\mu_n^2}{L^2}\right) \alpha t} \quad (3.45)$$

Substituindo-se as expressões acima encontradas, juntamente com a expressão dada em (3.4), encontra-se a expressão para a temperatura $T^*(r, z, t)$, $T^* = x(r)y(z)u(t)$:

$$T^*(r, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{kn} e^{-\left(\frac{w_k^2}{R^2} + \frac{\mu_n^2}{L^2}\right) \alpha t} J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) \text{sen}\left(\frac{\mu_n z}{L}\right) \quad (3.46)$$

onde os coeficientes A_{kn} serão obtidos a partir da condição inicial $T^*(r, z, 0) = T_i$, (eq. 3.13):

$$T_i = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{kn} J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) \text{sen}\left(\frac{\mu_n z}{L}\right) \quad (3.47)$$

Integrando a expressão acima nas variáveis r e z e, utilizando as relações de ortogonalidade para as funções seno de Bessel tem-se:

$$\begin{aligned}
& \int_0^L \int_0^R T_i r J_0\left(\frac{w_\beta r}{R}\right) \text{sen}\left(\frac{\mu_m z}{L}\right) dr dz = \\
& \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^L \int_0^R A_{kn} J_0\left(\frac{w_\beta r}{R}\right) J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) \text{sen}\left(\frac{\mu_m z}{L}\right) \text{sen}\left(\frac{\mu_n z}{L}\right) r dr dz
\end{aligned} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned}
& \int_0^L \int_0^R T_i r J_0\left(\frac{w_\beta r}{R}\right) \text{sen}\left(\frac{\mu_m z}{L}\right) dr dz = \\
& \int_0^R A_{kn} J_0\left(\frac{w_\beta r}{R}\right) J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) r dr \int_0^L \text{sen}\left(\frac{\mu_m z}{L}\right) \text{sen}\left(\frac{\mu_n z}{L}\right) dz
\end{aligned} \quad (3.49)$$

Considerando-se a integral na variável z e utilizando a condição de ortogonalidade das funções seno, tem-se que:

$$\begin{aligned}
& \int_0^L \text{sen}\left(\frac{\mu_m z}{L}\right) \text{sen}\left(\frac{\mu_n z}{L}\right) dz = \int_0^L \text{sen}^2\left(\frac{\mu_n z}{L}\right) dz = \int_0^L \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\mu_n z}{L}\right) \right] dz = \\
& \frac{L}{2} \left[1 - \frac{1}{2\mu_n} \text{sen}(2\mu_n) \right]
\end{aligned} \quad (3.50)$$

A integral no lado direito da equação (3.49) na variável r pode ser resolvida utilizando a relação de ortogonalidade para a função de Bessel, de ordem zero J_0 .

Segundo (Arfken, 1985):

$$\int_0^R J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) J_0\left(\frac{w_\beta r}{R}\right) r dr = \int_0^R \left[J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) \right]^2 r dr = \frac{R^2}{2} \left[J_0'^2(w_k) + J_0^2(w_k) \right] \quad (3.51)$$

Substituindo-se os resultados obtidos nas equações (3.50), (3.51) e (3.41) na (3.49)

tem-se:

$$\int_0^L \int_0^R T_i r J_0\left(\frac{w_\beta r}{R}\right) \text{sen}\left(\frac{\mu_m z}{L}\right) dr dz = \frac{R^2 L}{4} \left[J_0'^2(w_k) + J_0^2(w_k) \right] \left[1 - \frac{1}{2\mu_n} \text{sen}(2\mu_n) \right] A_{kn} \quad (3.52)$$

Substituindo a expressão dada em (3.43) na equação (3.52) obteve-se a seguinte expressão:

$$T_i \int_0^L \text{sen}\left(\frac{\mu_n z}{L}\right) dz \int_0^R r J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) dr = \frac{R^2 L}{4w_k^2} (h^2 R^2 + w_k^2) J_0^2(w_k) \left(1 - \frac{1}{2\mu_n} \text{sen}(2\mu_n)\right) A_{kn} \quad (3.53)$$

A expressão para os coeficientes A_{kn} é dada da seguinte forma:

$$A_{kn} = \frac{4w_k^2 T_i \int_0^L \text{sen}\left(\frac{\mu_n z}{L}\right) dz \int_0^R r J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) dr}{R^2 L (h^2 R^2 + w_k^2) J_0^2(w_k) \left(1 - \frac{1}{2\mu_n} \text{sen}(2\mu_n)\right)} \quad (3.54)$$

Resolvendo as integrais nas variáveis r e z na expressão acima tem-se:

$$\int_0^L \text{sen}\left(\frac{\mu_n z}{L}\right) dz = -\frac{L}{\mu_n} \cos\left(\frac{\mu_n z}{L}\right) \Big|_0^L = -\frac{L}{\mu_n} [\cos(\mu_n) - 1] = [1 - \cos(\mu_n)] \frac{L}{\mu_n} \quad (3.55)$$

e

$$\int_0^R r J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) dr = \frac{R^2}{w_k^2} \int_0^R u J_0(u) du \quad (3.56)$$

onde:

$$u = \frac{w_k r}{R} \quad (3.57)$$

Considerando que:

$$\int x J_0(x) dx = x J_1(x) \quad \text{então,}$$

$$= \frac{R^2}{w_k^2} u J_1(u) \Big|_0^R = \frac{R^2}{w_k^2} \cdot \frac{w_k r}{R} J_1\left(\frac{w_k r}{R}\right) \Big|_0^R = \frac{R^2}{w_k} J_1(w_k) \quad (3.58)$$

Então, o resultado da integral mostrada na equação (3.56) é dado por:

$$\int_0^R r J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) dr = \frac{R^2}{w_k} J_1(w_k) \quad (3.59)$$

Substituindo as expressões (3.43), (3.55), (3.59) e (3.54) obtém-se para a expressão dos coeficientes A_{k_n} é:

$$A_{k_n} = \frac{4w_k^2 T_i L (1 - \cos(\mu_n)) h R^3 J_0(w_k)}{\mu_n R^2 L (h^2 R^2 + w_k^2) J_0^2(w_k) \left(1 - \frac{\text{sen}(2\mu_n)}{2\mu_n}\right) w_k^2} \quad (3.60)$$

Reescrevendo a equação (3.60), obtém-se:

$$A_{k_n} = \frac{8T_i (1 - \cos(\mu_n)) h R}{(R^2 h^2 + w_k^2) J_0(w_k) (2\mu_n - \text{sen}(2\mu_n))} \quad (3.61)$$

Substituindo a expressão acima na equação (3.46), tem-se a expressão final para a temperatura.

$$T(r, z, t) = T_a + 8(T_0 - T_a) R h \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos(\mu_n)) e^{-\left(\frac{w_k^2 + \mu_n^2}{R^2 + L^2}\right) \alpha t} J_0\left(\frac{w_k r}{R}\right) \text{sen}\left(\frac{\mu_n z}{L}\right)}{(h^2 R^2 + w_k^2) J_0(w_k) (2\mu_n - \text{sen}(2\mu_n))} \quad (3.62)$$

4. ESTUDOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 EQUIPAMENTO

Foram realizados experimentos no Laboratório de Medidas Físicas e Modelagem Matemática da Unijuí. Os grãos de soja foram adquiridos da Cotrijuí, já selecionados e limpos, com um teor de umidade média de 12,5%(b.u).

Foi desenvolvido um equipamento para simular as características de um silo dotado de um sistema de aeração, mostrado na figura 3.1.

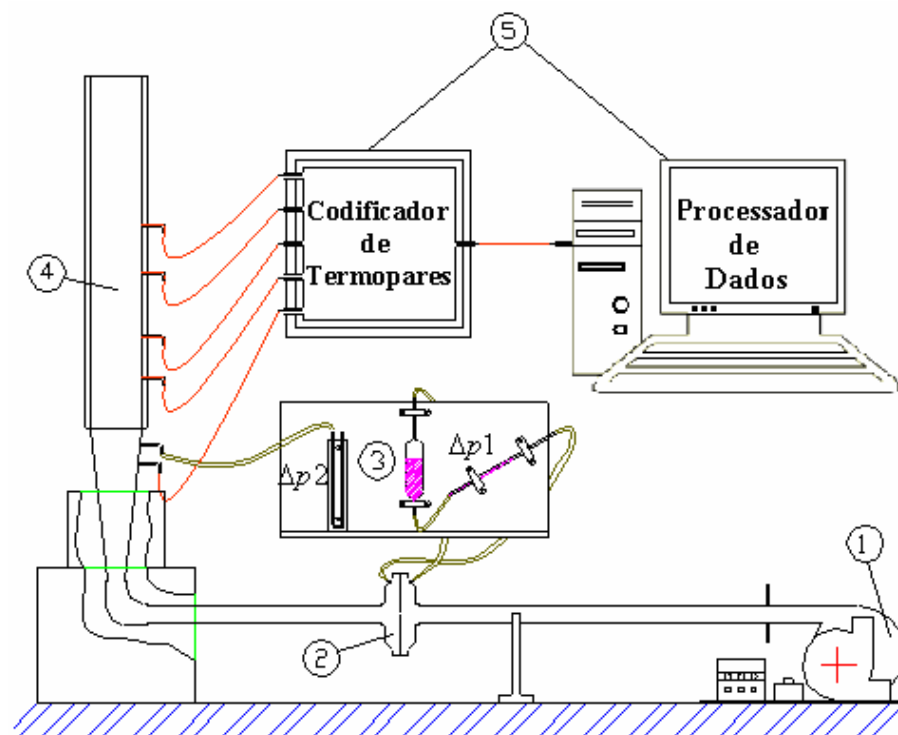


Figura 4.1 - Esquema do equipamento construído para estudar o resfriamento de grãos de soja com e sem isolamento térmico nas laterais.

O equipamento é composto de:

1) Ventilador é um sistema utilizado para movimentar o ar através da massa de grãos. Esse sistema é acionado por um motor elétrico, com $\frac{3}{4}$ Hp e rotação de 3450 rpm para impulsionar o ar que passa por uma tubulação de 50mm de diâmetro ligados a este equipamento tem-se o inversor de frequência que controla as velocidades do ar do ventilador.

2) Placa de orifício, ligada a um manômetro, (tubo em U com um dos ramos inclinado 30°) que mede a pressão Δp_1 . A partir desta medida é possível calcular a vazão (Q) do ar que atravessa a placa e a velocidade do ar (v).

$$Q = C.A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p_1}{\rho}} \quad (4.1)$$

onde A_0 é a área do orifício da placa ($0,001017m^2$), Δp_1 é a variação de pressão mostrada no manômetro, ρ é a massa específica do fluido ($1,1614kg/m^{-3}$) e C é o coeficiente da placa de orifício. Segundo Toniazzi (1997), o valor do coeficiente C , determinado experimentalmente, varia conforme a velocidade. Para o intervalo de velocidades utilizadas neste trabalho considerou-se $C = 0,72$.

3) Foi medida a variação de pressão na placa de orifício Δp_1 , variando a frequência de rotação do motor e com isto foi possível determinar a vazão para cada valor de pressão medidos.

A vazão de um fluido em escoamento num tubo é dada por

$$Q = vA \quad (4.2)$$

onde v é a velocidade de escoamento do fluido [m/s] e A é a área de seção reta do tubo [m^2].

Sabendo que a vazão é a mesma em qualquer posição dos tubos utilizados no experimento, pois considerou-se que em todo o percurso não há fontes nem escapamentos de ar, tem-se a seguinte relação

$$Q_1 = Q_2 \quad (4.3)$$

onde Q_1 é vazão na tubulação onde foi colocada a placa de orifício [m^3/s] (tubo com diâmetro de 50 mm) e Q_2 é a vazão no tubo que esta sendo feito o experimento e onde foi colocada a massa de grãos. Então:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (4.4)$$

onde, v_1 é a velocidade do ar na tubulação, A_1 é a área da seção reta da tubulação ($A_1 = 0,0018m^2$), v_2 é a velocidade do ar na entrada do tubo onde está sendo realizado o experimento e A_2 é a área de seção reta do tubo em que estamos realizando o experimento.

Portanto

$$v_2 = \frac{v_1 A_1}{A_2} \quad (4.5)$$

Como são conhecidas A_1 , A_2 e v_1 mede-se através da placa de orifício sendo possível calcular v_2 para diferentes valores de rotação do motor.

O segundo manômetro acoplado na entrada do tubo que esta sendo escolhido permite medir a pressão que o ar exerce sobre a coluna de grãos.

4) Para a simulação de um silo foi utilizado um tubo de PVC de 150mm de diâmetro, sem isolamento e com isolamento (com manta de borracha), onde foram colocados

termopares ao longo da massa de grãos, ou seja, os termopares foram introduzidos no tubo em diversas alturas, sendo que estes estão ligados a um processador de dados.

5) As informações da variação da temperatura foram transmitidas pelos termopares modelo MTK – Tipo K – Universal, com sensores de diâmetro $\pm 1mm$ e arquivados eletronicamente com o auxílio de uma placa de aquisição de dados analógico/digital (placa A/D do tipo LR 7018, 16 bits, 8 pontos com conversor 485 para 232 placa LR 7520, 8 canais de leitura de dados (permite o uso de até 8 sensores) e realiza 10 leituras por segundo e um computador pessoal (Oliveira, 2004).

4.2. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

4.2.1 RESFRIAMENTO DA MASSA DE GRÃOS AO LONGO DO RAIO.

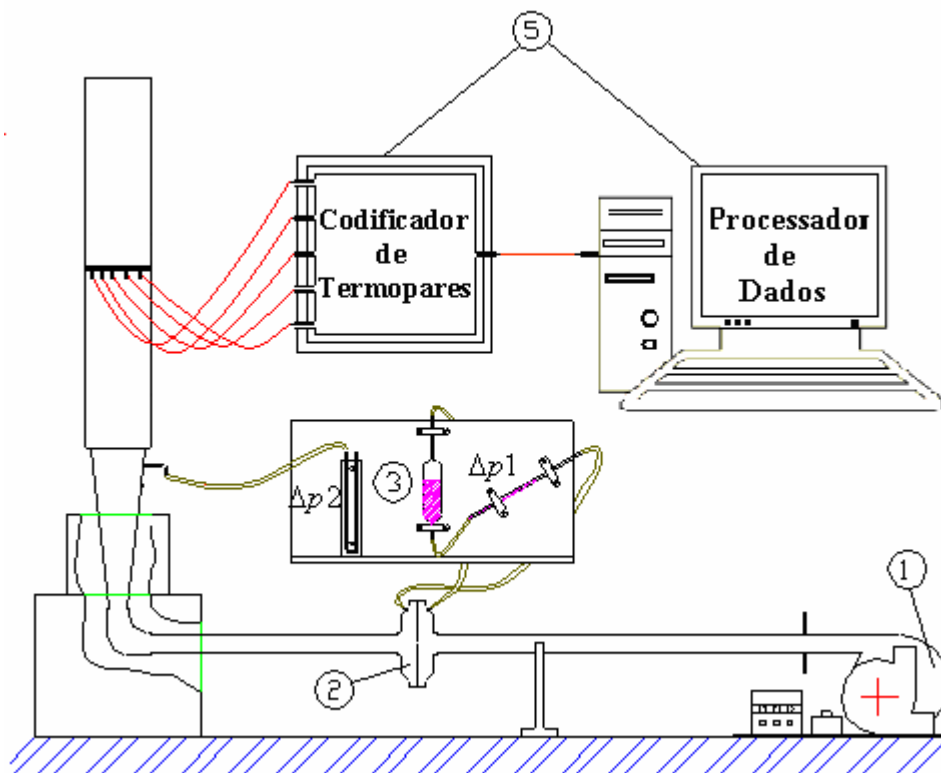


Figura 4.2 - Esquema do equipamento construído para estudar o resfriamento de grãos de soja ao longo do raio.

Para testar a hipótese de que ocorre transferência de calor da massa de grãos para o ambiente, e se esta transferência é ou não desprezível, foi realizado um experimento onde os grãos de soja foram aquecidos uniformemente em uma estufa, foram colocados num tubo de PVC de 150mm de diâmetro sem isolamento, preenchendo uma coluna de grãos de 0,60m. Sensores de temperatura (termopares) foram colocados ao longo do diâmetro do tubo na altura de 0,15 m e conectados a uma placa de aquisição de dados. Os dados da temperatura dos grãos em função do tempo, ao longo do raio, foram coletados (tempo de amostragem 2 segundos).

Os resultados experimentais obtidos são mostrados na figura (4.2) e (4.3)

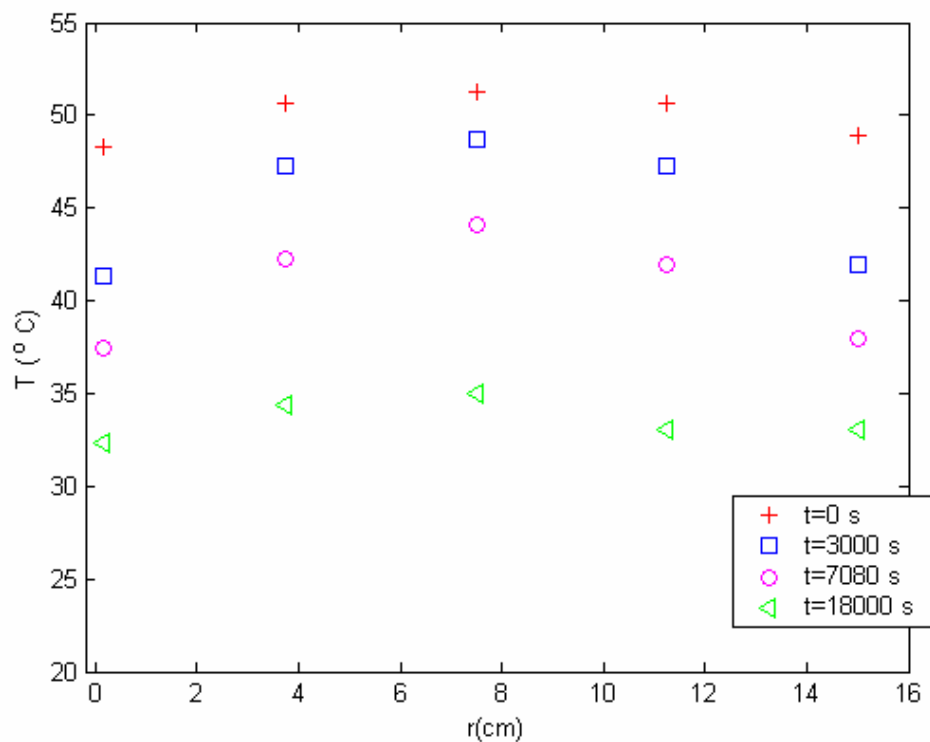


Figura 4.3 – Variação da temperatura em função da posição dos termopares, para diferentes valores de tempo na secção x=0,15m, com isolamento.

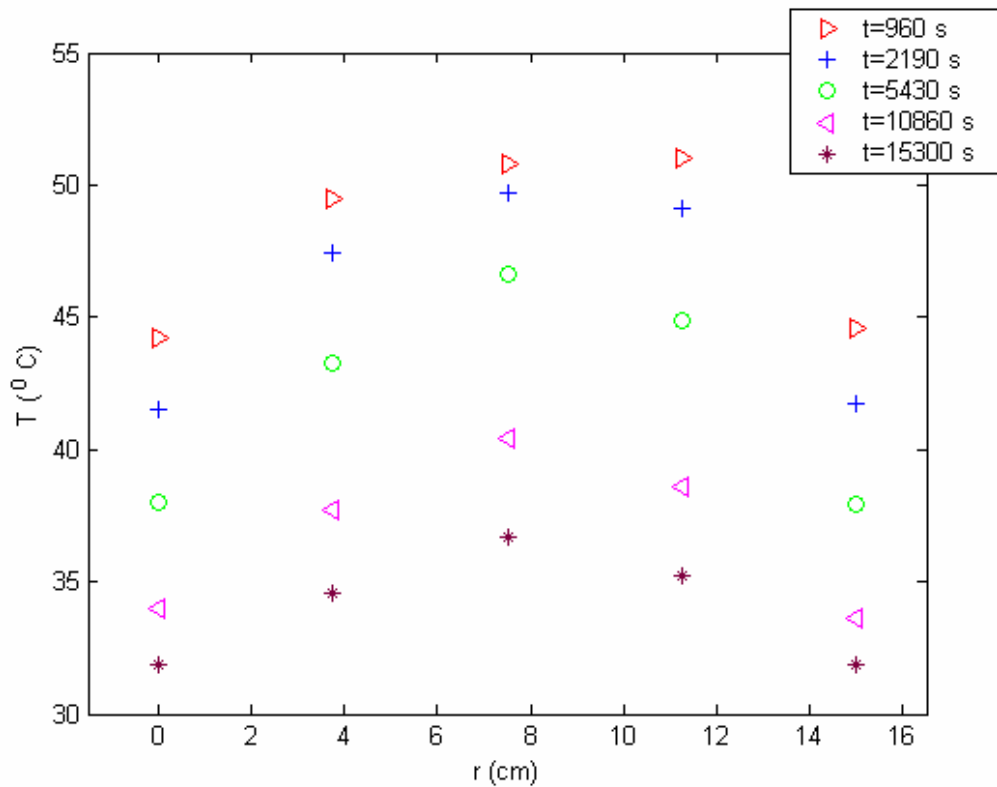


Figura 4.4 – Variação da temperatura em função da posição dos termopares, para diferentes valores de tempo na secção $x=0,15\text{m}$ sem isolamento.

Ao longo do raio pode-se notar pelos gráficos acima, que as temperaturas modificam-se mais sensivelmente no tubo sem isolamento e próximos as paredes as temperaturas aproximam-se da temperatura ambiente a medida que o tempo passa.

Além disto, a hipótese que há perdas pequenas de calor nas laterais do tubo isolado, fica comprovada observando as pequenas diferenças de temperatura ao longo do raio do tubo para um mesmo instante de tempo. Com isto, vê-se que o modelo matemático para descrever a temperatura deve considerar as perdas de calor nas laterais do tubo isolado para um mesmo instante de tempo.

4.2.2 RESFRIAMENTO DA MASSA DE GRÃOS COM ISOLAMENTO E SEM ISOLAMENTO

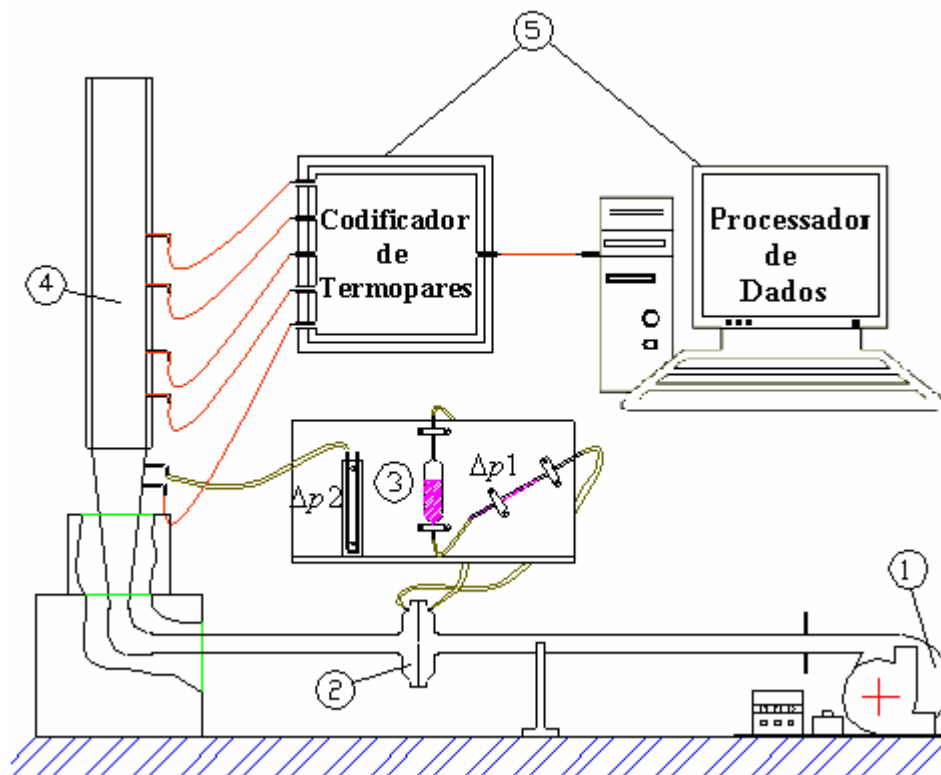


Figura 4.5 - Esquema do equipamento construído para estudar o resfriamento de grãos de soja com isolamento térmico nas laterais.

Neste experimento, os grãos de soja foram aquecidos uniformemente em uma estufa, foram colocados num tubo de PVC de 150 mm de diâmetro, preenchendo uma coluna de 0,60 m. Sensores de temperatura, ou seja, termopares, foram colocados ao longo da massa de grãos em diferentes alturas $z=0,0\text{m}$; $z=0,15\text{m}$; $z=0,27\text{m}$; $z=0,40\text{m}$; $z=0,54\text{m}$, e a velocidade do ar utilizado na aeração (resfriamento) foi variada e medida indiretamente pelo manômetro.

Os dados experimentais obtidos pelo experimento do tubo isolado e sem isolamento são mostrados nos gráficos abaixo, onde T_a é a temperatura do ar, U é a umidade do ar, P_a pressão atmosférica e v a velocidade do ar medida pelo manômetro.

$v=0,23\text{m/s}$; $T_a=32^\circ\text{C}$; $U=63\%$; $P_a=720\text{mmHg}$

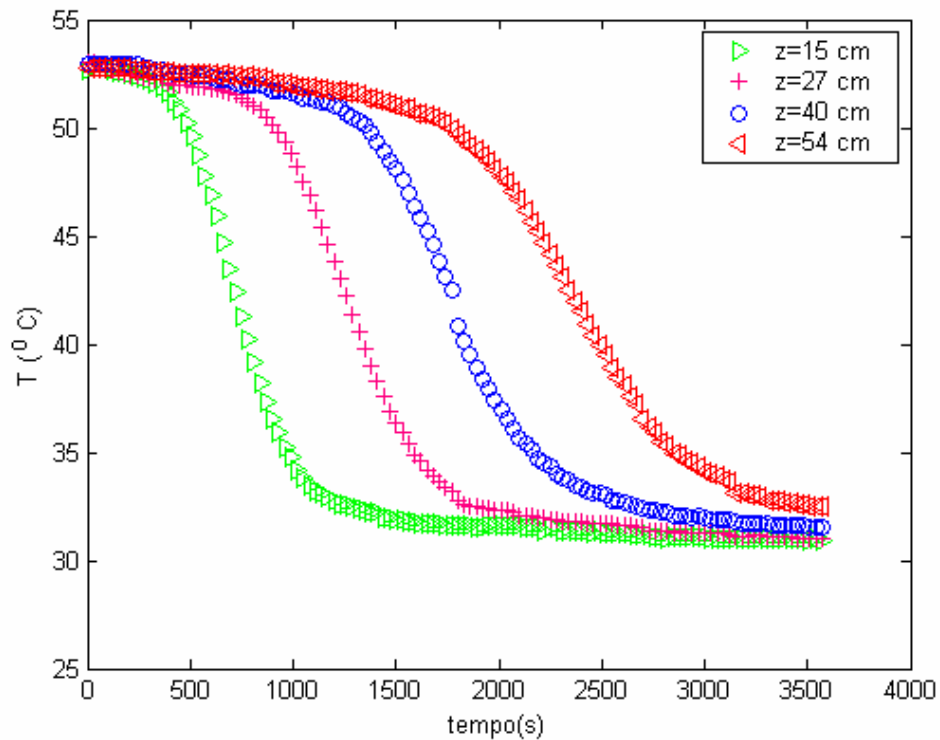


Figura 4.6 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos. Dados experimentais com isolamento, ($v=0,23$ m/s).

Dia=15-03-05

$v=0,41\text{m/s}$; $T_a=34^\circ\text{C}$; $U=63\%$; $P_a=720\text{mmHg}$

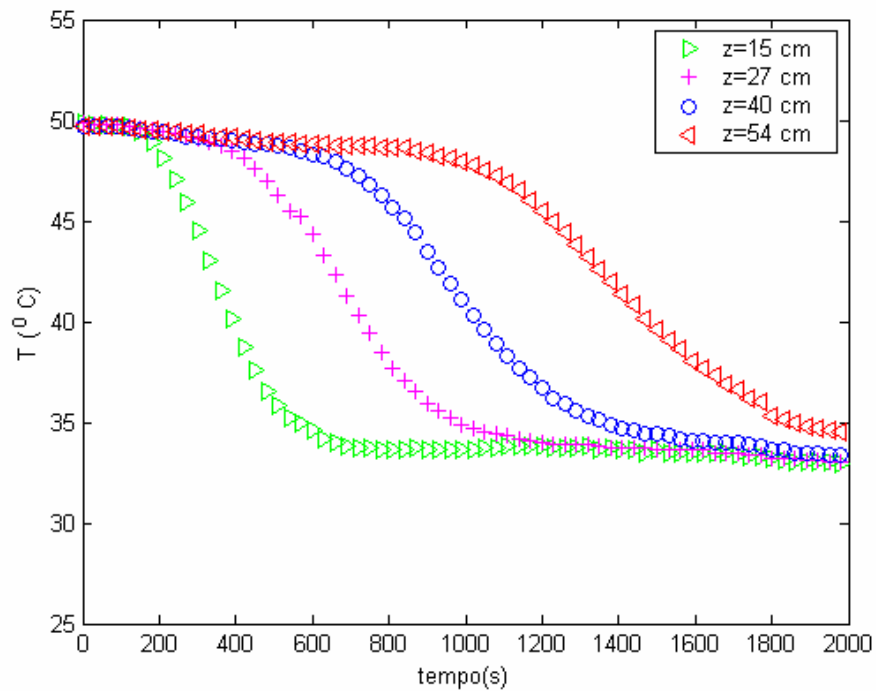


Figura 4.7 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos e dados experimentais com isolamento ($v=0,41$ m/s).

Dia=20-04-05

$v=0,53\text{m/s}$; $T_a = 35^\circ\text{C}$; $U=63\%$; $P_a = 720\text{mmHg}$

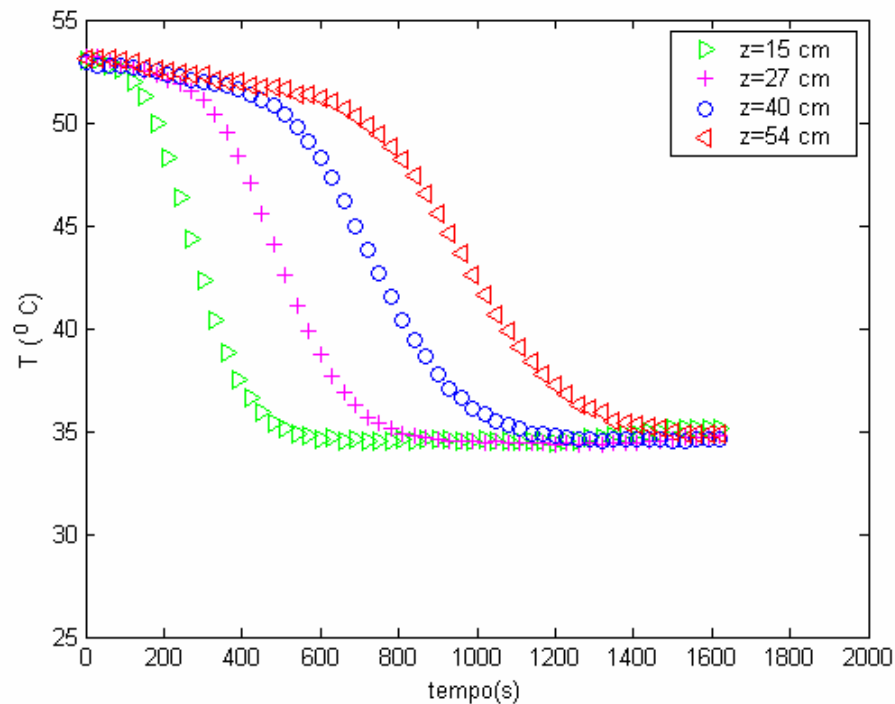


Figura 4.8 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos e dados experimentais com isolamento ($v=0,53\text{ m/s}$).

Observações também constatadas por (Menegol, 2005), que o processo de resfriamento no início acontece de maneira mais lenta e dependendo de uma aceleração significativa ocorrendo depois de um determinado tempo. O resfriamento é lento no início por que o ar retira o calor dos grãos das primeiras seções e reduz a capacidade de resfriamento das seções mais distantes, sendo que esse processo, por hipótese ocorre por condução.

Nos gráficos mostrados a seguir, o tubo não foi isolado nas laterais, sendo que usou-se as mesmas velocidades para o resfriamento da massa de grãos, do que no caso anterior (tubo isolado)..

Dia=24-05-05

$v=0,23$ m/s; $T_a=18^\circ\text{C}$; $U=62\%$; $P_a=720\text{mmHg}$

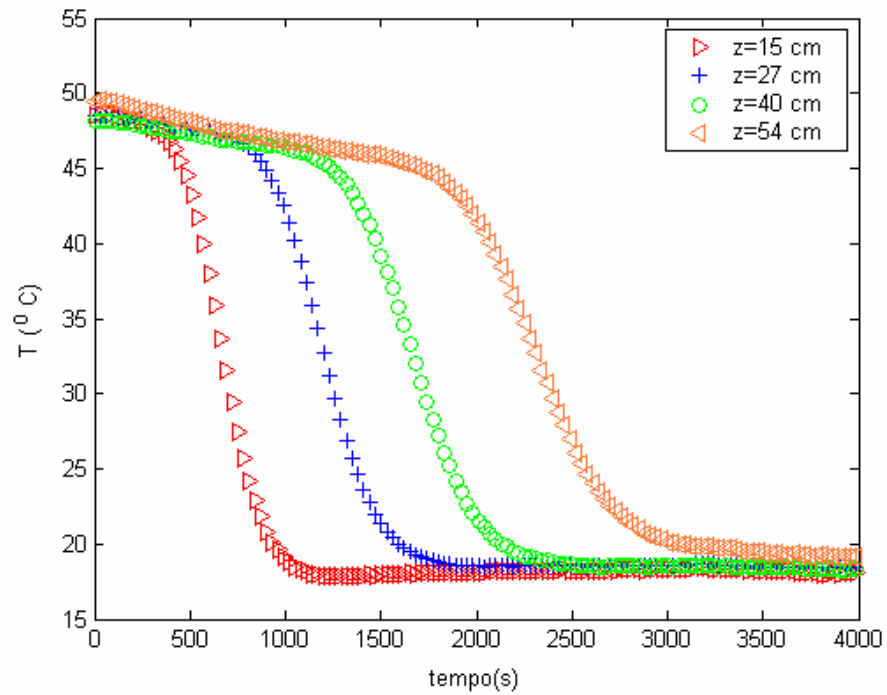


Figura 4.9 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos. Dados experimentais sem isolamento ($v=0,23$ m/s).

Dia=31-05-05

$v=0,41$ m/s; $T_a=18^\circ\text{C}$; $U=63,5\%$; $P_a=720\text{mmHg}$

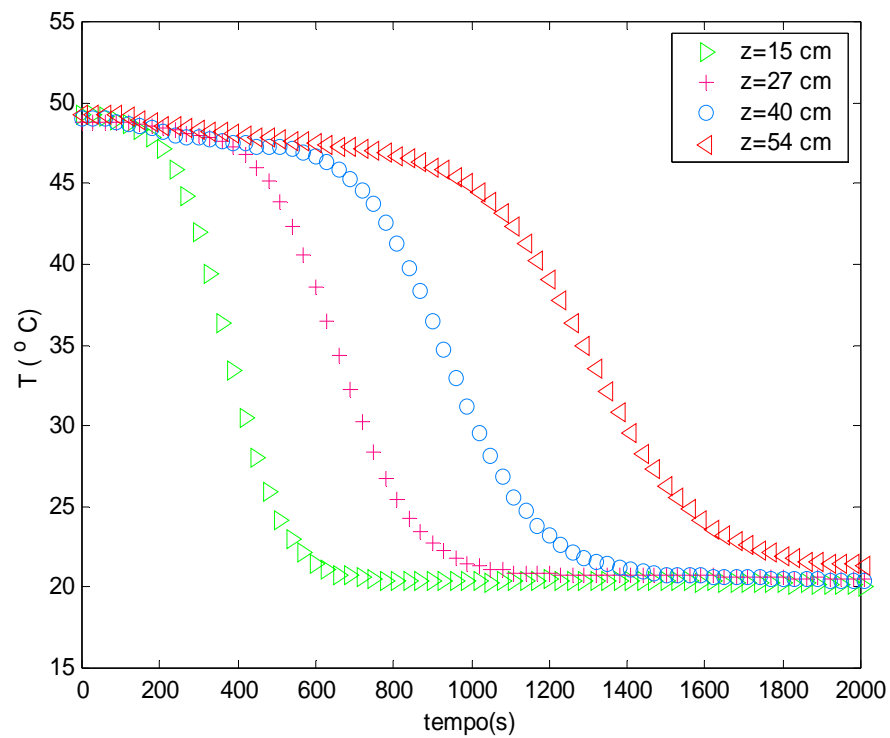


Figura 4.10 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos. Dados experimentais sem isolamento ($v= 0,41$ m/s).

Dia=06-06-05

$v=0,53$ m/s; $T_a =20^\circ\text{C}$; $U=63\%$; $P_a =720\text{mmHg}$

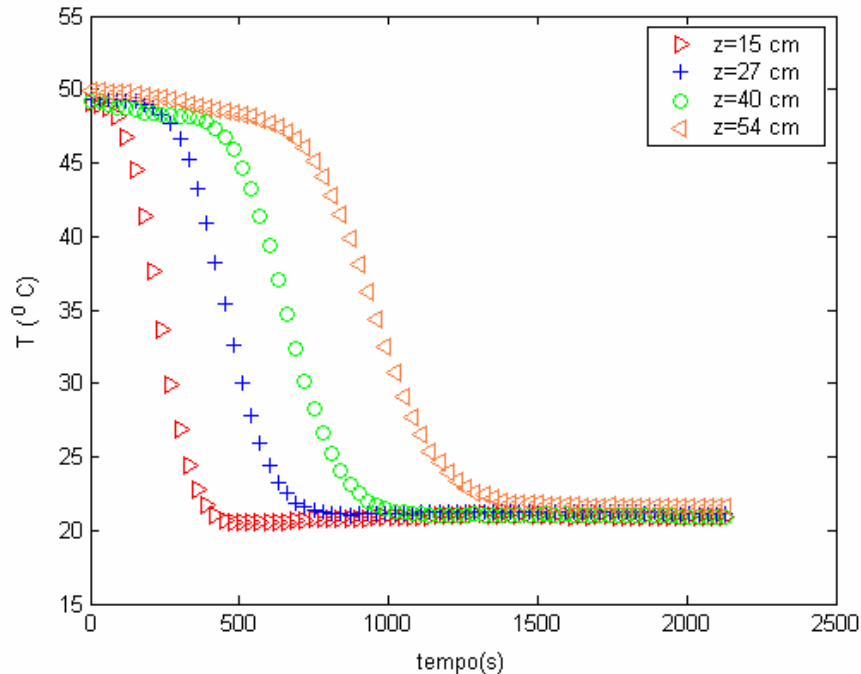


Figura 4.11 - Temperatura da massa de grãos em função do tempo, para diferentes alturas da coluna de grãos. Dados experimentais sem isolamento ($v= 0,53$ m/s).

Assim como no experimento do tubo com isolamento, as curvas experimentais mostram que se forma um platô no início do resfriamento, indicando que até que as seções mais próximas da fonte de ar resfriem-se, e as seções mais distantes não sofrerão modificações significativas.

Isso ocorre porque o ar que chega inicialmente frio (temperatura ambiente), troca calor com as primeiras camadas de grão e aumenta sua temperatura, com isto não resfria as camadas mais distantes da fonte de ar.

Para obter-se uma análise comparativa das curvas de esfriamento encontradas nos experimentos com isolamento e sem isolamento, constitui-se o gráfico abaixo, para velocidade de $0,23\text{m/s}$ obtém-se os gráficos a seguir:

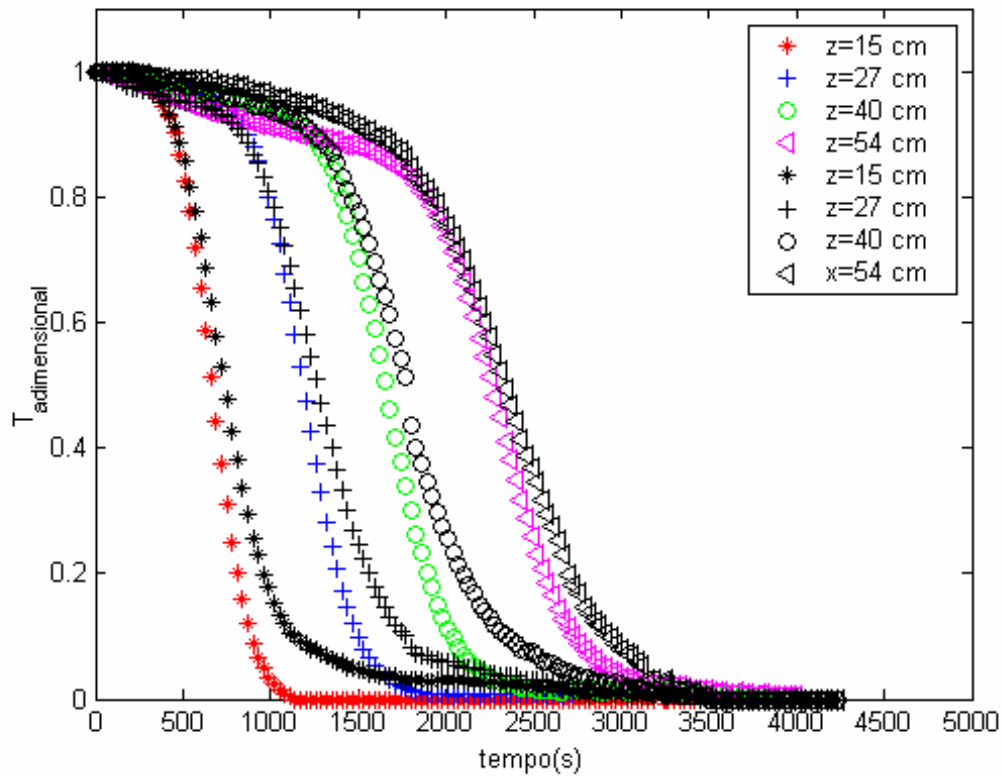


Figura 4.12-Relação entre a temperatura adimensional ($T-T_a/T_f-T_a$) e o tempo de resfriamento, para o tubo sem isolamento (símbolos coloridos) e com isolamento (símbolos em preto).

A figura acima mostra que existe uma pequena diferença entre as curvas do perfil de temperatura para diferentes seções do tubo com e sem isolamento térmico.

As curvas mostram que as temperaturas nas seções decrescem mais lentamente no tubo com isolamento térmico.

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foi realizada uma simulação numérica do resfriamento de grãos de soja no caso do tubo com isolamento térmico.

Para realizar-se a simulação foram considerados os valores para os parâmetros $\alpha = 1,08 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$ e $h = 1,1 \text{ m}^{-1}$ conhecidos na literatura, (Irudayaraj, 1992 e Kreith, 1986) além disto são os valores que apresentam os melhores resultados para o modelo unidimensional apresentados em Menegol (2005). Para simular e comparar com os dados experimentais mostrados na figura (4.12) utilizou-se a equação (3.62) para a temperatura variando ao longo do raio e no tempo. Para realizar as simulações e comparações com os dados experimentais, utilizou-se $r = 0,01 \text{ m}$ para as posições dos termopares, para a temperatura ambiente $T_a = 31^\circ\text{C}$ e a temperatura inicial dos grãos $T_0 = 52,9^\circ$. Os valores de z usados nesta simulação foram $z = 0,15 \text{ m}$, $z = 0,27 \text{ m}$, $z = 0,40 \text{ m}$ e $z = 0,54 \text{ m}$. A velocidade de aeração apresentada nesta simulação foi $v = 0,22 \text{ m/s}$. Além disto, foram construídos programas em Matlab para encontrar as raízes da equação transcendente dada pela expressão (3.43) e com estes valores calcular as temperaturas ao longo do raio e da altura da secção. Os programas encontram-se em anexo e os resultados obtidos pela simulação foram comparados com os dados experimentais e são mostrados no gráfico abaixo:

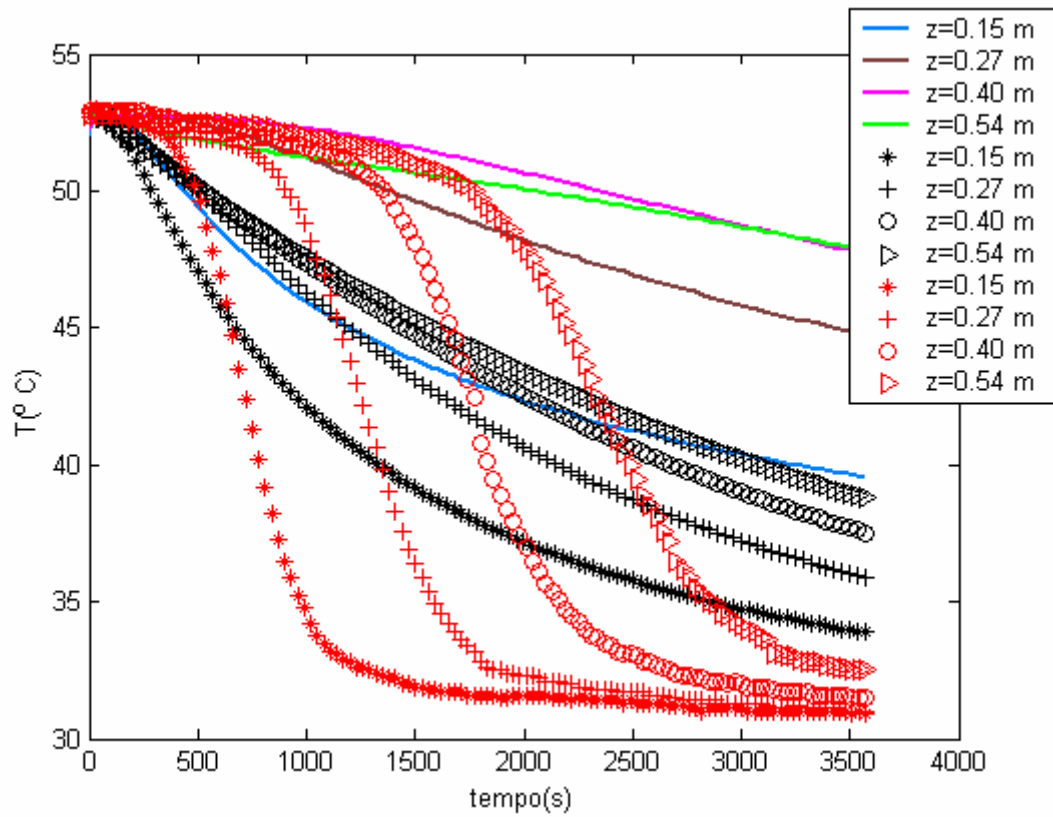


Figura 4.13-Dinâmica de resfriamento para $v=0,22$ m/s, onde, (símbolos vermelho) são os dados experimentais, (símbolos em preto) simulações e (linhas) simulação Menegol,2005.

Como conclusão pode-se observar pelo gráfico que os resultados obtidos não tem boa concordância com os dados experimentais.

5. CONCLUSÃO

O processo pós-colheita dos produtos agrícolas é essencial para garantir a qualidade dos alimentos. Para que o processo seja conduzido de maneira eficaz é necessário o conhecimento acurado dos efeitos das condições impostas ao produto e de suas propriedades físicas, químicas e biológicas.

Neste trabalho foi estudado o processo de resfriamento de grãos de soja por aeração.

Foram realizados experimentos em laboratório com o objetivo de encontrar as curvas de resfriamento de grãos para diferentes velocidades do ar de aeração. Além disto, pretendeu-se encontrar a relação entre as variações de temperatura dos grãos, para diferentes alturas do tubo onde estava armazenado o soja.

Foram realizados experimentos com tubos com e sem isolamento térmico para definir a importância das perdas de calor nas laterais do tubo.

Foi mostrado neste trabalho, que as perdas de calor no tubo com isolamento são pequenas comparados com o tubo sem isolamento.

Além disto, experimentos mostraram que as temperaturas ao longo do raio para os diferentes tubos apresentam características diferentes.

No tubo sem isolamento as temperaturas mudavam rapidamente com o passar do tempo em quanto que, no tubo com isolamento as temperaturas eram mais uniformes, indicando pequenas perdas de calor.

Foi proposto um modelo matemático para descrever as curvas de resfriamento de grãos, para caso bidimensional, isto é, as temperaturas dependeriam da posição radial considerada e da altura da secção.

Neste modelo resolveu-se a equação de calor para caso bidimensional, onde considerava-se as perdas de calor pelas laterais.

Para simular numericamente a expressão para a temperatura encontrada no modelo, utilizou-se como valores para os parâmetros α e h , valores já conhecidos na literatura.

Os resultados finais mostraram que as simulações não apresentaram boa concordância com os dados experimentais, o mesmo ocorrendo para o modelo estudado em Menegol (2005) (Caso unidimensional).

Uma hipótese considerada para que os valores simulados não tenham apresentado bons resultados é o fato de que neste modelo foi considerado que a transferência de calor (resfriamento) se dá pelo processo de condução.

Não foi considerados o processo de convecção do ar com os grãos.

Nos próximos trabalhos sugere-se que se realizem experimentos para calcular o grau de importância dos processos de condução e convecção na aeração, e incluir nas equações do modelo matemático o processo de convecção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOUDA, S.K.; Chung, D.S.; Seib, P.A.; Song, A. **Heat and mass transfer in stored milo. Part I. Heat transfer model.** Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.35, n.5, p.1569-1573, 1992.

ANDRADE, E. T., Molin, L., Couto, S.M. e Cardoso, G.E. **Distribuição de Temperatura em Grãos Armazenados em Silos: Modelagem por Elementos Finitos.** Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa-MG n.26, 2001, pp. 28-35.

ARFKEN, G. **Mathematical Methods for Physics.** Academic Press- Inglaterra (1985). Third Edition.

BORGES, P. A. P. **Modelagem Matemática dos Processos envolvidos nos Sistemas de Secagem e Armazenamento de Grãos.** Tese de Doutorado, Porto Alegre, 2002.

BOYCE, W e Di Prima, R., **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno.** Guanabara-Koogan, 1994.

CHANG, C. S., Converse, H. H. & Steele, J. L. **Modeling of Temperature of Grain during Storage with Aeration.** Transactions of the ASAE, vol. 37, n. 6, 1993, pp. 1927-1938.

FISCHER, L. **Estudo Teórico/Experimental da dinâmica da secagem de soja em camada fina** - Dissertação de Mestrado. Ijuí, 2003.

FREIRE, E .S. **Thermal properties of dry cocoa beans.** Iri Cranfield Institute of Technology.National College of Agricultural Engineering;122 p.,1981.(M.Sc.Thesis).

FOX, R. W., McDonald, A. T. **Introdução a Mecânica dos Flúidos**. 4 ed. Guanabara Koogan, 1995.

HOLMAN, J. P, **Transferência de calor** .Megraw-Hill do Brasil Ltda.,São Paulo,1983.

INCROPERA, F. P. and DeWitt, D. P.. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. LTC, 1998.

IRUDAYARAJ, J., Haghghi, K. and Strohshine, R. L. **Finite Element analysis of drying with application to cereal grains**. Journal Agric. Eng. Res., 53, 1992, pp 209-229.

KHATCHATOURIAN O. A. and Savicki D. L. **Mathematical Modelling of Airflow in a Aerated Soy Bean Store under Non-Uniform Conditions**. Biosystems Engineering, vol 88, 2004, pp.201-211.

KHANKARI, K.K.; Morey, R.V.; Patankar, S.V. **Mathematical model for moisture diffusion in stored grain due to temperature gradients**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.37, n.5, p.1591-1604, 1994.

KREITH, F. and Bohn, M. S. **Principles of Heat Transfer**. Editora Harper & Row, 1986.

MENEGOL,A.P. **Modelagem Matemática do Resfriamento da Massa de Grãos de Soja**. Dissertação de Mestrado.Ijuí,2005.

OLIVEIRA, F. A., Khatchatourian, O., Wendt, A. P. **Mathematical Modelling of Thermal State of Stored Products in Silos with Aeration System**. Proceedings do XXV CILAMCE-Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Recife/Pe. CR-ROM, 2004.

OLIVEIRA, J. F. S. **Determinação do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção entre o ar de Secagem e o Grão de Soja**. Dissertação de Mestrado. Ijuí, 2004.

OLIVEIRA, L. S. and Haghghi, K. **Conjugate Heat and Mass transfer in Convective Drying of Multiparticle Systems**. Parte II: Soybean Drying. Drying Technology, 16, 1998, pp. 463-483.

OZISIK, M. N., AND ORLANDER, H. R. B., **Inverse Heat transfer: Fundamentals And Applications**. Taylor Francis, New York, 2000.

PUZZI, D. **Conservação dos Grãos Armazenados**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1973.

QUEIROZ, D. M., Valente, D. S. M., 2004. **Determinação da Temperatura e Umidade dos grãos durante o Processo de Aeração**. *Jornal da Armazenagem*. Disponível em <www.centreimar.org.br> Acesso em 28/06/04.

SAVICKI, D. L. **Modelagem Matemática do Processo de Aeração em Condições Não-Homogêneas da Massa de Grãos de Soja**. Dissertação de Mestrado, Ijuí, 2001.

SISSOM, L. E. **Fenômenos de Transporte**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.

SHARMA, D. K. , THOMPSON, T. L., **Special heard and thermal conductivity of sorghum**. *Transaction of the ASEI*, V.16, n 01, p. 114-117, 1973.

STREETER, V. L., Wylie, E. B. **Mecânica dos Fluidos**. 7 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1980.

TONIAZZO, N. **Modelagem Matemática do Escoamento do Ar em Sistemas de Armazenamento de Grãos**. Dissertação de Mestrado. Ijuí, 1997.

WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Panambi, 2005.

ZILL, D. G e Cullen M. R. **Equações Diferenciais**. São Paulo: Makron Books, vol 2, 2001.

ANEXOS

Programas:

```

% PROGRAMA QUE CALCULA A TEMPERATURA DO GRÃO PARA DIFERENTES SEÇÕES E
TEMPOS - CASO BIDIMENSIONAL
lambda=0.500*1.0*25; %[w/(m K)] coeficiente da condutividade termica
pg=1350; % densidade do grão[kg/m^3]
c=1122; % calor específico a pressão constante [J/(kg K)]
a=sqrt(lambda/pg/c); % raiz de condutividade térmica (calorífica)[m^2/s]
L=0.6; % Altura de câmara [m]
h=11; % Razão entre o coeficiente de transferência de calor e condutividade
térmica [1/m];
d=0.150 ; % diâmetro do tubo
R=d/2; % Raio do tubo
U0=52.7; % Temperatura inicial do grão
Ua=30.9; % Temperatura ambiente
T=3570; % Tempo máximo de aeração
kt=100; % Número de passos temporais
dt=T/kt; % Passo temporal em segundos
Na=15; % Número de autofunções (das harmônicas) levadas em conta na solução
disp('Cálculo de distribuição de temperatura numa barra isolada 1-D');
disp('Para x=0: T0=const (condição de Dirichlet); para x=L: convecção
(condição de Neumann)');
t=[0:dt:T];
Nt=size(t,2);
% z=0,15 m

x=[0.0 0.15];
Nx=size(x,2)-1; %Número de divisões espaciais
U=zeros(Nx+1,Nt);
for j=2:Nt %Ciclo temporal
    Te=t(j);
    Z=raiz(h,a,Te);
    for i=2:Nx+1 %ciclo espacial
        u=0;
        if p>0
            n0=1;
        else
            n0=2;
        end;
        for n=0:Na
            m=(n+1/2)*pi;
            u=u+8*(U0-Ua)*h*R*Z*(exp(-(m*a/L)^2*t(j))*sin(m/L*x(i))/(2*m));
        end;
        U(i,j)=u+Ua;
    end;
end;
U(1:Nx+1,1)=U0;
U(1,1:Nt)=Ua;

% Programa que Calcula as Raízes Wk
function x=bissecao(a,b,h);
e=1e-6;
ya=equacao(a,h);
yb=equacao(b,h);
if abs(ya)<e
    x=a;return;
end;
if abs(yb)<e
    x=b;return;
end;
if ya*yb<0

```

```

yx=ya;
while abs(yx)>e
    x=(a+b)/2;
    yx=equacao(x,h);
    if yx*yb>0
        yb=yx;
        b=x;
    else
        ya=yx;
        a=x;
    end
end;
else
    disp(' repetir isolamento');
end

%Programa que Calcula a equação Transcendente
function y=equacao(x,h);
R=0.15/2;
y=besselj(1,x).*x-h*R*besselj(0,x);

    % z=0,27 m

U0=53;% Temperatura inicial do grão
Ua=31.0;%Temperatura ambiente
x=[0.0 0.27];
Nx=size(x,2)-1; %Número de divisões espaciais
U1=zeros(Nx+1,Nt);
for j=2:Nt %Ciclo temporal
    Te=t(j);
    Z=raiz(h,a,Te);
    for i=2:Nx+1 %ciclo espacial
        u=0;
        if p>0
            n0=1;
        else
            n0=2;
        end;
        for n=0:Na
            m=(n+1/2)*pi;
            u=u+8*(U0-Ua)*h*R*Z*(exp(-(m*a/L)^2*t(j))*sin(m/L*x(i)))/(2*m));
        end;
        U1(i,j)=u+Ua;
    end;
end;
U1(1:Nx+1,1)=U0;
U1(1,1:Nt)=Ua;

% z=0,40 m

U0=52.9;%Temperatura inicial de grão
Ua=31.5;%Temperatura ambiente
x=[0.0 0.40];
Nx=size(x,2)-1; %Número de divisões espaciais
U2=zeros(Nx+1,Nt);
for j=2:Nt %Ciclo temporal
    Te=t(j);
    Z=raiz(h,a,Te);
    for i=2:Nx+1 %ciclo espacial
        u=0;

```



```

        if p>0
            n0=1;
        else
            n0=2;
        end;
        for n=0:Na
            m=(n+1/2)*pi;
            u=u+8*(U0-Ua)*h*R*Z*(exp(-(m*a/L)^2*t(j))*sin(m/L*x(i)))/(2*m));
        end;
    U2(i,j)=u+Ua;
    end;
end;
U2(1:Nx+1,1)=U0;
U2(1,1:Nt)=Ua;

%z=0,54 m

U0=52.8;%Temperatura inicial do grão
Ua=32.5;%Temperatura ambiente
x=[0.0 0.54];
Nx=size(x,2)-1; %Número de divisões espaciais
U3=zeros(Nx+1,Nt);
for j=2:Nt %Ciclo temporal
    Te=t(j);
    Z=raiz(h,a,Te);
    for i=2:Nx+1 %ciclo espacial
        u=0;
        if p>0
            n0=1;
        else
            n0=2;
        end;
        for n=0:Na
            m=(n+1/2)*pi;
            u=u+8*(U0-Ua)*h*R*Z*(exp(-(m*a/L)^2*t(j))*sin(m/L*x(i)))/(2*m));
        end;
    U3(i,j)=u+Ua;
    end;
end;
U3(1:Nx+1,1)=U0;
U3(1,1:Nt)=Ua;

B1=isol3mm;
[mm nn]=size(B1);
plot(t,[0 1]*U,'k*');
hold on
plot(t,[0 1]*U1,'k+');
hold on
plot(t,[0 1]*U2,'ko');
hold on
plot(t,[0 1]*U3,'k>');
hold on
plot(B1(1:mm,1),B1(1:mm,2),'r*');
hold on
plot(B1(1:mm,1),B1(1:mm,3),'r+');
hold on
plot(B1(1:mm,1),B1(1:mm,4),'ro');
hold on
plot(B1(1:mm,1),B1(1:mm,5),'r>');

```

```

Ylabel('T (^o C)');
Xlabel('tempo(s)');
legend('z=0.15 m', 'z=0.27 m', 'z=0.40 m', 'z=0.54 m', 'z=0.15 m', 'z=0.27
m', 'z=0.40 m', 'z=0.54 m'); z=0

% Programa que calcula a função Z;
function Z=raiz(h,a,Te);
% Solução de equação; 10 primeiras raízes; h é parametro
R=0.15/2;
x=0;
H=0.05;
y=equacao(x,h);
i=0;
s=0;
while i<10
    x=x+H;
    y1=equacao(x,h);
    if y*y1<=0
        i=i+1;
        X(i)=bissecao(x-H,x,h);
        ra=X(i);
        s=s+besselj(0,ra*0,01/R)*exp(-(ra*a/R)^2*Te)/(((h*R)^2+
ra^2)*besselj(0,ra));
        Z=s;
    end;
    y=y1;
end;
end;

```

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](#)