

Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Química  
Departamento de Engenharia de Processos

**ESTUDO DA SECAGEM DE  
SABUGO DE MILHO EM CICLONE**

Autora: Édna Santiago Benta  
Orientador: Profa. Dra. Maria Aparecida Silva ✱

Dissertação apresentada à Comissão de Pós-Graduação  
da Faculdade de Engenharia Química como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Química.

Campinas - São Paulo - Brasil  
março - 1997



UNIDADE	78C
N.º CHAMADA:	71UMCAMP
	13494e
V.	Ex.
TOMBO BC/	32112
PROC.	28/1/97
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PRECO	R\$ 11,00
DATA	18/12/97
N.º CPD.	

CM-00102678-8

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B444e Benta, Édna Santiago  
Estudo da secagem de sabugo de milho em ciclone /  
Édna Santiago Benta.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientadora: Maria Aparecida Silva.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Milho - Secagem. 2. Separadores (Máquinas). 3.  
Centrifugadores. 4. Energia da biomassa. I. Silva, Maria  
Aparecida. II Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Química. III. Título.



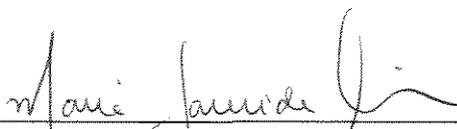
Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Química  
Departamento de Engenharia de Processos

***ESTUDO DA SECAGEM DE  
SABUGO DE MILHO EM CICLONE***

Autora: Édna Santiago Benta

Campinas - São Paulo - Brasil  
março - 1997

Esta dissertação foi defendida e aprovada em 26 de março de 1997, pela banca examinadora constituída pelos seguintes Professores Doutores:



---

Profa. Dra. Maria Aparecida Silva



---

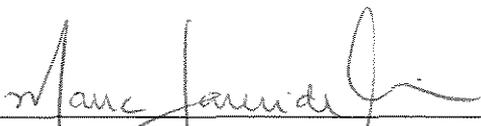
Profa. Dra. Marlene Rita de Queiroz



---

Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha

Esta versão corresponde à redação final da dissertação de mestrado defendida pela Engenharia Química Édna Santiago Benta e aprovada pela comissão julgadora em 26 de março de 1997.



---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria Aparecida Silva



*Este trabalho é dedicado aos meus pais,  
Pedro e Léia*

## AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho fosse realizado. Aliás, a presença de alguma delas me foi imprescindível, pois foi nos momentos mais difíceis e que eu realmente necessitava, elas estavam presentes.

À profa. Dra. Maria Aparecida Silva, pela orientação deste trabalho, pelo fornecimento de material didático, bem como por ter proporcionado a minha participação no XXIV ENEMP.

À professora Dra. Marlene Rita de Queiroz pelas sugestões.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro, projeto de pesquisa “Secagem de Resíduos Agroindustriais III” (Processo 523409-94-0) e bolsa de mestrado.

A FAPESP, pelo suporte financeiro relativo ao Processo 95/1302-0.

Aos amigos Maria Helena de Oliveira Nunes (Helenilde) e Alessandro Dibb (*Spider man*) pela amizade sincera e pelo apoio sempre.

Aos colegas da turma 94/2: Alessandro Dibb, Antônio Vilanova Queiroz Filho, Clamer Dias Farias, Eduardo Pereira, Maria Helena de Oliveira Nunes e Lídia Oazem de Oliveira pelo companheirismo.

Aos colegas Marleny Doris Aranda Saldaña, Alexandre de Paula Peres, Renata Torres Pereira Pinto, Marlus Pinheiro Rolemberg e Marilsa Aparecida Mota também pela inestimável e sincera amizade.

Ao amigo Gamel Said Eduardo de Ayub pela sincera amizade e pela ajuda fornecida.

Ao sr. Levi Ismael Madeira, tanto pela grande ajuda no trabalho propriamente dito, quanto pela amizade.

Aos colegas de laboratório Aleksander Rogério Trevizan (Alex), Cleverson Luciano Ferreira da Silva, Juliano Castro Pereira, Fernando José Rodrigues de Matos, Celso Luiz de Camargo e Karina Freitas Gonçalves, pelo companheirismo e disponibilidade.

Aos alunos de iniciação científica Ruth Keiko Kuriyma, Douglas Ricardo Norberto, e os “indispensáveis” Horácio Figueiredo Diniz e Enrico Valente Freire, pela ajuda nos experimentos no ciclone.

Aos técnicos do Laboratório de Energia da FEM Geraldo Jurandir Vialta, Edmur Lopes Antunes e, em especial, ao sr. Sílvio de Souza (*in memorian*), pela constante ajuda e prestação de serviços.

Aos técnicos da Planta Piloto da FEA José Carlos Gomes Camargo e Valdeci Pereira dos Santos, pela ajuda na moagem dos sabugos.

Aos técnicos da FEAGRI Dário e Francisco, pela ajuda nos aparelhos de caracterização do material.

Ao estabelecimento comercial “Casa da Pamonha”, localizado na cidade de Sumaré, SP, pelo fornecimento dos sabugos de milho.

## **AGRADECIMENTOS ESPECIAIS**

A Deus, pela Sua Eterna Presença na minha vida.

Aos meus pais Pedro Benta filho e Léia Santiago Benta que estiveram (e ainda estão) sempre comigo.

Ao meu amigo Celso Ortiz Gomes e a toda sua família, pela ajuda e pelo carinho com que me acolheram em Campinas.

Ao Everaldo Silvino dos Santos que com muito amor e paciência esteve ao meu lado em todos os momentos, e sem o qual teria sido muito mais difícil superar os períodos de turbulência.

Aos professores doutores Théo Guenter Kieckbusch, Cesar Costapinto Santana, Sandra Cristina dos Santos Rocha, Satoshi Tobinaga e Carlos Alberto Gasparetto os quais, direta e indiretamente me mostram que sabedoria, experiência e simplicidade podem andar juntas e são qualidades que engrandecem e fazem um verdadeiro ser humano.

# SUMÁRIO

<b><u>RESUMO</u></b>	<b>i</b>
<b><u>ABSTRACT</u></b>	<b>ii</b>
<b><u>ÍNDICE DE TABELAS</u></b>	<b>iii</b>
<b><u>ÍNDICE DE FIGURAS</u></b>	<b>iv</b>
<b><u>NOMENCLATURA</u></b>	<b>v</b>
<b><u>1 - INTRODUÇÃO</u></b>	<b>1</b>
<b><u>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u></b>	<b>3</b>
<b><u>2.1 - Biomassa - uma opção alternativa de energia</u></b>	<b>3</b>
2.1.1 - Fontes de biomassa para fins energéticos	5
2.1.2 - Tecnologia de queima da biomassa	7
2.1.3 - Composição da biomassa vegetal	8
<b><u>2.2 - O milho</u></b>	<b>8</b>
2.2.1 - Origem e História	9
2.2.2 - Fisiologia e características botânicas	10
2.2.3 - Composição do milho	11
2.2.4 - Produção	12
2.2.5 - O Resíduo do milho - Sabugo	13
<b><u>2.3 - Teoria de secagem</u></b>	<b>20</b>
2.3.1 - O Agente de secagem	21
2.3.2 - O Material sólido	22
2.3.3 - Mecanismo da secagem	23
2.3.4 - Cinética de secagem	25

2.3.5 - Secagem de produtos agrícolas	28
2.3.6 - Eficiência de secagem	30
2.3.7 - Aspectos energéticos da secagem	30
<b>2.4 - <u>Secadores</u></b>	<b>31</b>
<b>2.5 - <u>Ciclones</u></b>	<b>33</b>
2.5.1 - Generalidades	33
2.5.2 - Vantagens	34
2.5.3 - Princípios e funcionamento do ciclone	35
2.5.4 - Descrição do escoamento das partículas	37
2.5.5 - Transferência de calor e massa	38
2.5.6 - Queda de pressão	39
2.5.7 - Modelagem	40
<b>3 - <u>CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E GEOMÉTRICAS DO MATERIAL</u></b>	<b>41</b>
<b>3.1 - <u>Introdução</u></b>	<b>41</b>
<b>3.2 - <u>Metodologia</u></b>	<b>43</b>
3.2.1 - Análise granulométrica	43
3.2.2 - Diâmetro médio	45
3.2.3 - Ângulo de talude	45
3.2.4 - Densidade aparente	46
3.2.5 - Densidade efetiva	46
3.2.6 - Porosidade	47
3.2.7 - Teor de umidade	47
3.2.8 - Calor específico	48
3.2.9 - Velocidade terminal	48
3.2.10 - Poder calorífico	50
3.2.11 - Composição física	51
<b>3.3 - <u>Apresentação dos resultados e análise</u></b>	<b>51</b>
<b>4 - <u>CINÉTICA DE SECAGEM</u></b>	<b>59</b>

<b>4.1 - <u>Introdução</u></b>	<b>59</b>
<b>4.2 - <u>Experimentos de cinética</u></b>	<b>59</b>
<b>4.3 - <u>Resultados obtidos e análise</u></b>	<b>61</b>
<b>4.4 - <u>Conclusões:</u></b>	<b>69</b>
<b>5 - <u>EXPERIMENTOS REALIZADOS NO CICLONE</u></b>	<b>70</b>
<b>5.1 - <u>Introdução</u></b>	<b>70</b>
<b>5.2 - <u>Descrição do sistema experimental</u></b>	<b>71</b>
<b>5.3 - <u>Medições</u></b>	<b>73</b>
5.3.1 - Vazão de ar	72
5.3.2 - Vazão de sólidos	74
5.3.3 - Massa de sólidos remanescentes	74
5.3.4 - Tempo de permanência das partículas	74
5.3.5 - Temperatura de saída dos sólidos	75
5.3.6 - Perfil de temperatura	75
<b>5.4 - <u>Testes pré-seletivos</u></b>	<b>75</b>
<b>5.5 - <u>Ciclone operando com partículas - secagem</u></b>	<b>77</b>
5.5.1 - Reciclos	79
<b>5.6 - <u>Ciclone operando sem partículas</u></b>	<b>79</b>
<b>6 - <u>RESULTADOS OBTIDOS NO CICLONE E ANÁLISE</u></b>	<b>80</b>
<b>6.1 - <u>Planejamento fatorial</u></b>	<b>82</b>
<b>6.2 - <u>Estimativa dos efeitos</u></b>	<b>82</b>
6.2.1 - Interpretação dos efeitos obtidos	86
<b>6.3 - <u>Influência da granulometria das partículas</u></b>	<b>90</b>
<b>6.4 - <u>Perfil de temperatura para os testes de secagem</u></b>	<b>90</b>

<b>6.5 - <u>Reciclos</u></b>	<b>96</b>
<b>6.6 - <u>Tempo de residência das partículas</u></b>	<b>97</b>
<b>7 - <u>CONCLUSÕES</u></b>	<b>98</b>
<b>8 - <u>SUGESTÕES</u></b>	<b>100</b>
<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b>	<b>101</b>
<b><u>APÊNDICE A</u></b>	<b>108</b>
<b><u>APÊNDICE B</u></b>	<b>113</b>
<b><u>APÊNDICE C</u></b>	<b>117</b>
<b><u>APÊNDICE D</u></b>	<b>120</b>

## **RESUMO DO TRABALHO**

Neste trabalho foi feito um estudo utilizando o ciclone como equipamento de secagem, uma vez que, comumente, é utilizado como separador de partículas. O material utilizado foi sabugo de milho moído, o qual foi devidamente caracterizado física e geometricamente; também foi determinado o calor específico e o poder calorífico do material. No ciclone, além dos experimentos de secagem das partículas de sabugo de milho, foram feitos ensaios com o equipamento operando apenas com ar, determinando-se os perfis de temperatura para ambos os casos. Nos experimentos de secagem foi analisada a influência da temperatura de entrada do ar, da vazão de ar, da vazão de sólidos, bem como da granulometria das partículas. A análise destas influências foi feita através de um planejamento fatorial estatístico em dois níveis dos três primeiros fatores. Os resultados obtidos da caracterização do material que puderam ser comparados com dados encontrados na literatura apresentaram uma concordância satisfatória. O sabugo de milho seco, por exemplo, apresentou um poder calorífico médio de 3800 kcal/kg. Os resultados dos testes de secagem através da análise estatística mostraram que para os níveis estudados de temperatura de entrada do ar (160 e 180 °C), a redução do teor de umidade das partículas foi de 3,89 %; o aumento da temperatura de entrada do ar foi de 11 %. Os resultados também mostraram que ao incrementar-se a vazão de entrada do do ar em 22,35 %, houve uma redução de 10,75 % no teor de umidade das partículas. Por outro lado, o aumento da vazão de sólidos em 75 % provocou uma diminuição de 15,17 % na retirada da umidade. O teor final de umidade desejado de 10 % ( em base úmida) só pode ser obtido com a realização de ciclos de material. Foi observado também que para mesmas temperaturas de entrada do ar, a presença dos sólidos particulados na corrente gasosa provocou um abaixamento no perfil de temperatura do ar nos experimentos de secagem, quando comparados com os perfis obtidos para o ciclone operando apenas com ar puro.

Palavras chaves: sabugo de milho, milho, secagem, ciclone, energia.

## **ABSTRACT**

Cyclones are equipment to separate solid particles from a spinning gaseous flow using centrifugal forces arising in a central vortex. Nevertheless, in this work, it took place a study to turning account a cyclone as a dryer. Crushed corncob particles were dried and their physical and geometrical properties, calorific value and specific heat were determined. The air temperature profiles were measured inside of cyclone with and without corncob particles. The influence of inlet air temperature, air and solid flowrates and particle granulometry influences were analysed on the reduction of the moisture content of the solid particles through statistical analysis. Some experimental results of material characterization could be compared with literatura data with a good agreement. The calorific value for dried corncobs was 3800 kcal/kg. Drying results showed that inlet air temperature (160 and 180 °C), the particle moisture content reduction was 3.89 %, the inlet air temperature increasing was 11 %. The results also showed that increasing 22.35 % of inlet air flowrate, a reduction of 10.75 % on particle moisture content took place. On the other hand, increasing 75 % of solid flowrate, decreased 15.17 % the particle moisture content reduction. In order to achieve the desired final moisture of particles, 10 % (w.b.), it was necessary to recycle the material. The presence of solid particle in the air flow have been decreased the air temperature profiles.

Key words: corncob, corn, drying, cyclone, energy.

**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Composição da biomassa em termos de compostos orgânicos	8
Tabela 2.2 - Valores representativos dos principais constituintes (em 100g) de alguns cereais	11
Tabela 2.3 - Proporção dos componentes na espiga de milho	12
Tabela 2.4 - Produção brasileira de milho (1990-1994)	13
Tabela 2.5 - Análise elementar do sabugo de milho (em percentual)	17
Tabela 2.6 - Propriedades físicas e químicas do sabugo de milho	18
Tabela 2.7 - Poder calorífico de alguns resíduos secos (kcal/kg)	19
Tabela 2.8 - Composição do ar limpo e seco próximo ao nível do mar	22
Tabela 2.9 - Padrão global de energia utilizada na secagem	31
Tabela 3.1 - Peneiras Tyler Standards selecionadas para os testes de granulometria	44
Tabela 3.2 - Conjunto de peneiras selecionadas com os diâmetros médios das partículas retidas	44
Tabela 3.3 - Análise granulométrica do sabugo de milho em quatro teores de umidade	52
Tabela 3.4 - Características das partículas de sabugo de milho	57
Tabela 3.5 - Velocidade terminal das partículas	57
Tabela 3.6 - Comparação do poder calorífico obtido com outros trabalhos	58
Tabela 3.7 - Composição física do sabugo de milho para 73 % de umidade (b.u.) juntamente com os dados da literatura	58
Tabela 5.1 - Temperaturas de entrada do ar no ciclone obtidas dos testes pré-seletivos	76
Tabela 5.2 - Vazões de sólidos obtidas dos testes pré-seletivos	77
Tabela 6.1 - Resultados dos experimentos de secagem das partículas de sabugo de milho no ciclone	81
Tabela 6.2 - Valores das variáveis utilizadas no planejamento fatorial de experimentos	83
Tabela 6.3 - Matriz resultante de um planejamento fatorial 2 <sup>3</sup>	83
Tabela 6.4 - Coeficientes de contraste para um fatorial 2 <sup>3</sup>	85
Tabela 6.5 - Efeitos calculados para o planejamento fatorial baseado na Tabela 6.4	86
Tabela 6.6 - Resultados experimentais em níveis diferentes de granulometria	90
Tabela 6.7- Resultados experimentais obtidos nos testes com reciclo de material	96

Tabela 6.8 - Tempo de residência das partículas em função da vazão de sólidos (X = 3,3 b.s.)	97
Tabela D.1 - Planilha de cálculo para o ciclone operando apenas com ar	120
Tabela D.2 - Resultados experimentais dos testes de secagem de partículas de sabugo de milho realizados no ciclone	122
Tabela D.3 - Perfis de temperatura para o ciclone operando apenas com ar para T = 95,8; 100,7 e 147 °C	128
Tabela D.4 - Perfis de temperatura para o ciclone operando apenas com ar para T = 163,4; 170,3 e 178,1 °C	129
Tabela D.5 - Perfis de temperatura para o ciclone operando apenas com ar para T = 222,2 °C	130

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Planta adulta de milho	10
Figura 2.2 - Secção transversal do sabugo de milho	14
Figura 2.3 - Estrutura molecular da porção lenhosa	16
Figura 2.4 - Estrutura molecular das porções palha/medula	16
Figura 2.5 - Esquema simplificado do processo de secagem	21
Figura 2.6 - Esquema da migração do líquido no interior do sólido	25
Figura 2.7 - Curva de secagem	26
Figura 2.8 - Curva da taxa de secagem	27
Figura 2.9 - Classificação dos secadores segundo o regime hidrodinâmico	32
Figura 2.10 - Desenho ilustrativo do ciclone utilizado por ter LINDEN (1949)	36
Figura 3.1 - Esquema do dispositivo utilizado para medir o ângulo de talude	45
Figura 3.2 - Esquema da coluna pneumática para determinação da velocidade terminal	49
Figura 3.3 - Esquema da bomba calorimétrica	50
Figura 3.4 - Curva das frações ponderais acumuladas resultante da análise de peneira da Tabela 3.3 para $X = 0,11$ (bs)	52
Figura 3.5 - Curva das frações ponderais acumuladas resultante da análise de peneira da Tabela 3.3 para $X = 1,34$ (b.s.)	53
Figura 3.6 - Curva das frações ponderais acumuladas resultante da análise de peneira da Tabela 3.3 para $X = 2,06$ (b.s.)	53
Figura 3.7 - Curva das frações ponderais acumuladas resultante da análise de peneira da Tabela 3.3 para $X = 2,73$ (b.s.)	54
Figura 3.8 - Curva das frações acumuladas ponderais da análise de peneira da Tabela 3.3 para os quatro teores de umidade estudados	54
Figura 3.9 - Histograma da análise de peneira baseado da Tabela 3.3 para $X = 2,73$ (b.s.)	55
Figura 3.10 - Histograma da análise de peneira da Tabela 3.3 para $X = 2,06$ (b.s.)	55
Figura 3.11 - Histograma da análise de peneira da Tabela 3.3 para $X = 1,34$ (b.s.)	56
Figura 3.12 - Histograma da análise de peneira da Tabela 3.3 para $X = 0,11$ (b.s.)	56
Figura 4.1 - Balança de umidade digital utilizada para os testes de cinética de secagem	60
Figura 4.2 - Curvas de secagem das partículas de sabugo de milho para diferentes teores de umidade inicial	61

Figura 4.3 - Curvas de secagem de fatias de sabugo de milho em três espessuras diferentes	62
Figura 4.4 - Curvas de secagem do sabugo em duas posições diferentes	63
Figura 4.5 - Curva de secagem da medula do sabugo de milho	63
Figura 4.6 - Curva de secagem do anel lenhoso do sabugo de milho	64
Figura 4.7 - Curva de secagem da palha do sabugo de milho	64
Figura 4.8 - Curva de secagem de cada parte separada do sabugo de milho	65
Figura 4.9 - Curvas de secagem do anel lenhoso, da medula e do conjunto medula-anel lenhoso do sabugo de milho	65
Figura 4.10 - Curvas de secagem dos diversos componentes individuais do sabugo de milho, do conjunto medula-anel lenhoso e do conjunto com todos os componentes	66
Figura 4.11 - Curva esquemática da taxa de secagem para a medula	67
Figura 4.12 - Curva esquemática da taxa de secagem para a palha	67
Figura 4.13 - Curva esquemática da taxa de secagem para o anel lenhoso	68
Figura 4.14 - Curva esquemática da taxa de secagem para o sabugo de milho	68
Figura 5.1 - Pontos onde foram lidas as temperaturas para a determinação do perfil	70
Figura 5.2 - Esquema do sistema experimental utilizado	71
Figura 5.3 - Esquema da placa de orifícios concêntricos utilizada	72
Figura 6.1 - Efeito da temperatura sobre a redução do teor de umidade das partículas	88
Figura 6.2 - Efeito da vazão de ar sobre a redução do teor de umidade das partículas	88
Figura 6.3 - Efeito da vazão de sólidos sobre a redução do teor de umidade das partículas	89
Figura 6.4 - Efeitos principais sobre a redução do teor de umidade indicando a média	89
Figura 6.5 - Perfil de temperatura do ar no ciclone para os testes de secagem que apresentaram a maior e a menor redução do teor de umidade	91
Figura 6.6 - Perfil de temperatura do ar no ciclone para os testes de secagem - influência da temperatura	92
Figura 6.7 - Perfil de temperatura do ar no ciclone para os testes de secagem - influência da vazão de ar	92
Figura 6.8 - Perfil de temperatura do ar no ciclone para os testes de secagem - influência da vazão de sólidos	93
Figura 6.9 - Perfil de temperatura do ar no ciclone operando apenas com ar	94
Figura 6.10 - Perfil de temperatura das sete temperaturas de entrada de ar no ciclone operando apenas com ar	94
Figura 6.11 - Perfil de temperatura para teste de secagem e ciclone operando apenas com ar.	95

Figura B.1 - Curva de pressão manométrica do ar na placa de orifício em função da queda de pressão. 115

Figura D.1 - Esquema do sistema de secagem utilizado com as correntes de entrada e saída. 126

**NOMENCLATURA**

<b>A<sub>s</sub></b>	Área da seção transversal da tubulação	m <sup>2</sup>
<b>CE</b>	Coefficiente de vazão	-
<b>C<sub>p</sub></b>	Calor específico à pressão constante	J/kg °C
<b>D</b>	Diâmetro da tubulação	m
<b>d</b>	Diâmetro da placa de orifício	m
<b>D<sub>p</sub></b>	Diâmetro médio da partícula	m
<b>H</b>	Entalpia	J/kg
<b>m</b>	Massa	g
<b>M</b>	Peso molecular	kg/kgmol
<b>m<sub>r</sub></b>	Massa de sólidos remanescentes	kg
<b>P</b>	Pressão	N/m <sup>2</sup>
<b>Q</b>	Vazão volumétrica	m <sup>3</sup> /s
<b>Q<sub>p</sub></b>	Quantidade de calor perdido	J
<b>R</b>	Constante dos gases ideais	Pa m <sup>3</sup> /kgmol K
<b>Re</b>	Número de Reynolds	-
<b>T</b>	Temperatura	°C
<b>v</b>	Velocidade	m/s
<b>w</b>	Vazão de sólidos	kg/s
<b>X</b>	Umidade das partículas	kg/kg
<b>Y</b>	Umidade absoluta do ar	kg/kg

**Letras Gregas**

<b>β</b>	Relação entre os diâmetros d e D	-
<b>ε</b>	Porosidade	-
<b>ρ</b>	Densidade	kg/m <sup>3</sup>
<b>ρ<sub>ap</sub></b>	Densidade aparente	kg/m <sup>3</sup>
<b>ρ<sub>ef</sub></b>	Densidade efetiva das partículas completamente secas	kg/m <sup>3</sup>
<b>τ</b>	Tempo de residência das partículas	s
<b>ν</b>	Viscosidade cinemática	m <sup>2</sup> /s

## Subscritos

<b>1</b>	Entrada
<b>2</b>	Saída
<b>abs</b>	Absoluta
<b>ag</b>	Água líquida
<b>am</b>	Amostra
<b>ar</b>	Ar seco
<b>ar,u</b>	Ar úmido
<b>atm</b>	Atmosférico (a)
<b>bs</b>	Bulbo seco
<b>bu</b>	Bulbo úmido
<b>f</b>	Final
<b>i</b>	Inicial
<b>p</b>	Partículas
<b>sist</b>	Sistema
<b>vap</b>	Vapor

## 1 - INTRODUÇÃO

O aproveitamento de resíduos agrícolas e agroindustriais constitui um importante passo para conter o desperdício e contribuir para a economia de uma nação nos dias atuais.

De um modo geral, qualquer tipo de vegetação produz o seu próprio resíduo, o qual é, quase sempre sub-utilizado. O milho, por exemplo, é um importante e nutritivo alimento, consistindo em um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo inteiro, seja para alimentação humana, seja para alimentação animal. De acordo com o IBGE (1995), o Brasil produziu, nos últimos seis anos mais de 170 milhões de toneladas de milho, e está entre os maiores produtores deste cereal no mundo.

O sabugo é um dos resíduos que uma planta de milho produz, e é utilizado principalmente para a alimentação animal. Na indústria, segundo FOLEY e VANDER HOOVEN (1981) tem grande utilidade como carga (suporte) para vários produtos químicos por ser inerte e, devido à sua dureza e resistência, é também utilizado como abrasivo e polidor em produtos de limpeza. A depender do seu uso, muitas vezes é necessário que o sabugo passe por um processo de secagem a fim de ser utilizado.

O processo de secagem, desde os tempos mais remotos, é amplamente utilizado, seja na área industrial ou em outros segmentos. Simplificadamente, consiste na retirada da umidade de um certo material, geralmente por meio de adição de calor, com objetivos específicos como proporcionar uma maior conservação do produto ou armazenagem por um período maior de tempo.

Devido ao fato de existir uma grande variedade de materiais que são submetidos a um processo de secagem (alimentos, por exemplo), faz-se necessária a existência de uma variedade de secadores, com o objetivo, principalmente, de levar em conta as características de cada material. Além dos secadores convencionais como o pneumático ou de leito fluidizado, alguns autores como STRUMILLO e KUDRA (1986), também classificam o ciclone como secador.

O ciclone é um equipamento de separação centrífuga com a finalidade de separar partículas e/ou pós de uma corrente gasosa. É um equipamento com *design* simples, sem partes móveis e de baixo custo de construção. A corrente gasosa juntamente com as partículas entram tangencialmente pela parte superior do equipamento, dando início a um movimento em vórtice formando uma espiral gasosa descendente. As partículas são centrifugadas em direção à parede, sendo coletadas na parte inferior e o gás sai limpo pelo topo.

Baseado nisto, um dos objetivos deste trabalho consiste em investigar a viabilidade do aproveitamento do resíduo agrícola sabugo de milho, a fim de aproveitá-lo para fins energéticos (como combustível alternativo) através da determinação do seu poder calorífico. Desta forma, a secagem constitui-se numa operação primordial para tal fim, pois a retirada da umidade do material torna-se indispensável. Este processo de secagem é feito em um ciclone, o qual é utilizado como secador.

Este trabalho dá continuidade às pesquisas iniciadas por SILVA(1991), a qual utilizou o ciclone para a secagem de borra de café.

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 - Biomassa - uma opção alternativa de energia**

Segundo ABEELS (1986), biomassa é toda forma de material orgânico, animal ou vegetal, que se desenvolve tanto na água quanto na terra. Baseado nesta afirmativa, pode-se dizer que qualquer resíduo agrícola ou agroindustrial constitui-se em uma forma de biomassa.

A partir dos anos 50 e por mais de duas décadas, o mundo passou por uma fase de rápido desenvolvimento econômico, acarretando, entre outros, um crescente consumo de petróleo. A então crise deste combustível ocasionou reflexões mundiais acerca do problema energético devido, principalmente, à sua vasta utilização, ao seu caráter esgotável e também ao seu alto preço em vigência. Partindo deste fato, analistas econômicos europeus e norte-americanos já temiam que a manutenção deste ritmo de consumo pudesse levar a um rápido esgotamento dos recursos naturais do planeta. Deu-se início, então, a programas de conservação de energia bem como ao desenvolvimento de fontes alternativas, MIC (1986).

A partir daí, o aproveitamento de resíduos, tanto agrícolas quanto agroindustriais, como combustível, começou a ter uma atenção especial por parte dos pesquisadores e, segundo QUIRINO e ALSINA (1986), desencadeou-se a possibilidade de aproveitamento de fontes renováveis.

No decorrer das décadas de 60 e 70, o consumo mundial de petróleo cresceu de 10 para 21 bilhões de barris/ano, mantendo este último valor constante até o ano de 1985. Devido ao fato de que a totalidade de novas áreas petrolíferas descobertas representavam menos que o consumo mundial de um ano, pesquisadores concluíram que, a curto e a médio prazo, o consumo de petróleo no mundo não poderia ultrapassar significativamente aqueles números. Como a proposta era a manutenção de um consumo estável de petróleo por parte dos países desenvolvidos nos 50 anos seguintes, seria necessário um imenso esforço de investimento tecnológico visando a conservação da energia, bem como a utilização de fontes alternativas. O empreendimento deveria ser uma tarefa árdua, uma vez que a “única fonte disponível em quantidades praticamente ilimitadas, dentro de um horizonte previsível, era o carvão fóssil; sua utilização intensiva, entretanto, levaria a problemas sociais e de agressão ao meio ambiente”, MIC (1986).

Entre as fontes alternativas citadas no parágrafo anterior, encontra-se a biomassa. A Europa foi a pioneira na utilização tecnológica da biomassa para fins energéticos já no século passado, mas sua utilização hoje, nos países industrializados de clima temperado, é relativamente insatisfatória devido à baixa incidência de energia solar sobre seus territórios, bem como à própria escassez das dimensões territoriais para tal fim, MIC (1986). O Brasil, ao contrário de tais países, ainda que timidamente, vem iniciando a exploração energética da biomassa. Tal fato se deve à disponibilidade e ao potencial da biomassa brasileira, tanto que nenhum outro país dispondo da mais alta tecnologia, poderia solucionar seus problemas energéticos com a biomassa em proporções idênticas às brasileiras, CNI (1980). Com isso, as fontes renováveis de energia nacionais assumem um importante papel e a utilização dessa grande riqueza deve ser encarada como algo a ser investido.

Dispondo-se da matéria prima em abundância, são necessários a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias e estratégias de aproveitamento da mesma, principalmente no setor energético pois, “a energia é o recurso material mais estratégico para o desenvolvimento das nações”, MIC(1986). Contraditoriamente, países do terceiro mundo, como o Brasil, que dispõem de um rico recurso energético, ficam expostos a um dilema tecnológico grave. Uma vez que necessitarão de tecnologia e recursos financeiros externos, aumentará cada vez mais sua dependência em relação a estes, tornando assim inviável a exploração racional e a própria valorização de seus recursos abundantes. Além disso, não é de interesse dos países industrializados e que comandam o mercado mundial de energia, que os países do terceiro mundo desenvolvam autonomamente a consciência de exploração deste imenso potencial energético. Existem porém, alguns exemplos de programas que foram bem sucedidos, como o programa do álcool etílico no Brasil (o Pro-álcool), a expansão do biogás e das micro-hidrelétricas na China e, em menor escala, a utilização do carvão vegetal no Brasil e nas Filipinas. Partindo de tais exemplos, embora o Brasil não possa contar com tecnologia importada, não apresentaria maiores dificuldades mobilizar toda imaginação, criatividade e competência necessárias para criar e desenvolver uma tecnologia própria, MIC (1986).

Concluindo, a biomassa pode ser não apenas uma mera alternativa energética, mas, também, um modelo de desenvolvimento tecnológico e industrial que pode ser auto-sustentado. Extrapolando a níveis internacionais, pode-se prever que, com tecnologias disponíveis atualmente e mediante futuros desenvolvimentos na área, toda a biomassa do mundo tropical poderia suprir qualquer necessidade mundial de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, bem como de eletricidade, por um tempo praticamente ilimitado, CNI (1980).

### 2.1.1 - Fontes de biomassa para fins energéticos

Praticamente todas as plantas e resíduos vegetais podem, de algum modo, ser utilizados como fonte de energia, como combustíveis alternativos. Além disso, há muitas vantagens em efetuar tais plantações, (CNI, 1980):

- são renováveis;
- podem ser implantadas com tecnologia já disponível;
- podem ser desenvolvidas com recursos humanos e materiais disponíveis atualmente;
- podem ser implantadas em larga escala, no prazo de 4 a 6 anos após a decisão de investir. Não exigem grandes capitais;
- não agredem o meio ambiente e, pelo contrário, contribuem para a estabilização ecológica e melhoria das condições climáticas;
- armazenam energia para uso no momento oportuno;
- representam um enorme potencial de geração de empregos na região rural;
- a combustão dos produtos dessas plantações não interfere no balanço de dióxido de carbono da atmosfera, pois os vegetais consomem, na sua formação por fotossíntese, a mesma quantidade de dióxido de carbono que liberam, ao serem queimados;
- o uso dos combustíveis dessas plantações não altera o balanço térmico da atmosfera, pois a energia liberada na combustão da biomassa foi captada diretamente do sol;
- em muitos casos, as plantações podem ser feitas nas proximidades do local de consumo, dispensando extensos e onerosos sistemas de transporte de combustíveis;
- já existe tecnologia inicial necessária para a utilização dos combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos derivados da biomassa.

Alguns tipos de biomassa com fins combustíveis são apresentados a seguir, com algumas informações básicas a respeito de cada uma. Como a biomassa de interesse no presente trabalho é o sabugo de milho, foi dedicado a este um tópico especial e mais explicativo.

A madeira, sob a forma de lenha, é um dos combustíveis mais antigos que se tem conhecimento, sendo o carvão vegetal um de seus principais subprodutos. Em primeira análise, a madeira deve ser explorada de maneira racional, visando o seu melhor aproveitamento. Entende-se por exploração racional aquela feita com devido reflorestamento, com o objetivo da atividade não se tornar predatória bem como a manutenção do equilíbrio ecológico da flora e da

fauna. O eucalipto é, sem comparação, a espécie mais interessante do ponto de vista energético, tendo em vista que em todo território brasileiro existe o seu cultivo. Não data de muito tempo o início das técnicas de plantio e desenvolvimento de florestas de alto rendimento, isto é, destinadas ao uso energético. Experiências recentes provam a possibilidade de obter-se rendimentos de 25 a 30 toneladas/hectare/ano, desde que sejam observadas as normas necessárias para tal fim, CNI (1980).

O poder calorífico (em base seca) do eucalipto é de 4760 kcal/kg, (LUENGO e EMMERICH, 1982).

Através da carbonização da madeira obtém-se um resíduo sólido denominado carvão vegetal. O processo se caracteriza pela queima ou aquecimento da madeira em uma atmosfera pobre em ar, com a expulsão da umidade, compostos voláteis, uma fração de compostos orgânicos condensáveis à temperatura ambiente (alcatrão), e outros. Não há combustão total devido à pouca quantidade de oxigênio, (LUENGO e EMMERICH, 1982).

No Brasil, o carvão vegetal é utilizado principalmente nas siderúrgicas, onde funciona como redutor e combustível na produção do gusa. No país é ainda produzido em fornos primitivos, com uma eficiência baixa (cerca de 50%) e sem aproveitamento de seus possíveis subprodutos como o alcatrão, ácido acético, metanol, gases não-condensáveis, etc. Novos processos estão em estudo visando aumento da eficiência de altos fornos, uma vez que grande parte do carvão vegetal produzido é usado nesses fornos, os quais exigem carvão em pedaços e com boa resistência física, CNI (1980).

Devido ao aumento de teor de carbono, o poder calorífico do carvão vegetal é bem superior ao da madeira que lhe deu origem, podendo atingir até 8000 kcal/kg, (LUENGO e EMMERICH, 1982).

O bagaço de cana-de-açúcar já vem sendo estudado como combustível alternativo há algum tempo. A quantidade de bagaço de cana originária das usinas de álcool e de açúcar no Brasil representa um valor calorífico equivalente a dois meses por ano de consumo nacional de petróleo. Porém, como não há mercado satisfatório para este bagaço produzido, este é incinerado com baixo rendimento térmico. Se fossem implantados eficientes métodos de queima, com processos mais racionais para a fabricação do açúcar e do álcool, seria possível colocar no mercado uma quantidade de bagaço correspondente a, mais ou menos, 3,5 milhões de barris de petróleo/ano. Além disso, existem outras alternativas para um bom aproveitamento do bagaço, tais como a gaseificação para a produção de etanol; biodigestão para a produção de metanol e fertilizantes; tratamento com bactérias para a fabricação de húmus; etc, CNI (1980).

### 2.1.2 - Tecnologia de queima da biomassa

O propósito energético do uso da biomassa é de que se torne um combustível permanente, e não apenas uma saída temporária para tempos de crise. Em consequência, faz-se necessária a sua utilização da maneira mais racional e eficiente possível.

A biomassa pode ser queimada diretamente, substituindo assim o óleo combustível, ou ainda transformada em outro derivado substituindo a gasolina, óleo diesel, gás liquefeito de petróleo, etc., CNI (1980).

#### *Queima direta*

A eficiência da queima direta está diretamente associada ao tamanho das partículas, uma vez que a biomassa é um combustível sólido. Se a madeira por exemplo, for queimada em toras, terá sua eficiência bem mais baixa do que se for queimada em cavacos ou mesmo em pó, pois no primeiro caso, há uma demanda muito grande de ar em excesso.

Existe ainda o fator umidade, não menos importante, já que quando este é reduzido, a temperatura da queima aumenta e, conseqüentemente, aumenta a eficiência do processo, QUIRINO e ALSINA (1986).

#### *Gaseificação*

Em algumas situações torna-se mais viável gaseificar a biomassa antes de queimá-la. O processo da gaseificação consiste em transformar carbono sólido em gás, em equipamentos denominados gasogênios, sendo que os produtos das reações devem se encontrar em equilíbrio térmico e termodinâmico. O balanço térmico da gaseificação, segundo DAL FABBRO e DIAS, (1982), inclui o calor sensível do ar introduzido, pelo combustível, pelo vapor d'água e calor sensível do gás produzido, além da quantidade de calor representada pelas perdas ( carvão não queimado, calor de vaporização da água, calor sensível das escórias, etc) e o calor latente do gás produzido.

No Brasil, durante a década de 80, era muito restrita a utilização de gasogênios, uma vez que o processo de gaseificação de biomassa era praticamente nulo, (DAL FABBRO e DIAS, 1982).

### 2.1.3 - Composição da biomassa vegetal

Os principais compostos orgânicos sintetizados na planta são três polímeros naturais: a celulose, as hemiceluloses e a lignina.

A celulose é um carboidrato homopolimérico linear, constituído de moléculas de glicose ( $C_6H_{12}O_6$ ), que é uma hexose, ou açúcar de 6 átomos de carbono. As hemiceluloses são heteropolímeros lineares de cadeia relativamente curta, constituídas também de moléculas de hexoses, além de pentose, ou açúcares de 5 átomos de carbono ( $C_5H_{10}O_5$ ;  $C_5H_8O_4$ ). Quanto à lignina, sua natureza é diversa, pois não se trata de um carboidrato polimérico, como a celulose e as hemiceluloses, mas um polímero tridimensional, constituído de moléculas de fenilpropano. O componente mais abundante da biomassa é a celulose e, em média, as plantas superiores possuem a composição apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição da biomassa vegetal em termos de compostos orgânicos.

Composto	Porcentagem, %
celulose	40-60
hemicelulose	15-30
lignina	20-35

Fonte: CNI (1980).

## 2.2 - O milho

Há alguns séculos o milho tem sido amplamente utilizado diretamente tanto na alimentação humana quanto na animal. Sua importância não se limita apenas ao grande volume produzido mundialmente, mas também ao importante papel sócio-econômico que representa. Além disso, constitui-se em uma fonte inestimável de matéria prima básica para uma significativa gama de produtos industrializados, movimentando grandes complexos industriais. Devido ao fato de conter em sua composição alto teor de carboidratos, proteínas, óleos e vitaminas, torna-se um produto de inestimável importância comercial, (FANCELLI, 1982). O sucesso da utilização do milho no âmbito comercial, industrial e alimentício se deve ao seu uso direto para consumo humano e animal, a sua alta produtividade e à possibilidade de cultivo em ampla faixa de meios ambientes. Em termos industriais, serve como matéria prima em diversos setores da

indústria, como nas de amido, dextrose, conservas, álcool e outros produtos manufaturados, constituindo-se em um dos cereais mais completos e cultivados em todo o mundo. Devido ao tamanho do seu grão, ao seu bom rendimento, à facilidade de cultivo, à versatilidade no seu uso alimentício e às características de estocagem, o milho teve uma rápida aceitabilidade como alimento básico por parte da sociedade humana, (MI, 1974).

### 2.2.1 - Origem e história

Segundo alguns estudiosos, o milho teve a sua origem, aparentemente, no México, propagando-se ao norte do Canadá e ao sul da Argentina. Porém, a exatidão de sua região de origem e de seus ancestrais é ainda motivo de controvérsias entre a maioria dos pesquisadores. As primeiras civilizações, astecas, incas e maias, já consumiam e faziam uso do milho, e a planta foi levada para o Velho Mundo pelos primeiros exploradores europeus do Novo Mundo, FANCELLI (1982).

Desde o século passado, sabe-se que o parente mais próximo do milho é o teosinto (*Euchlaena Mexicana*) que é uma gramínea nativa originária da região compreendida entre as Honduras, Guatemala e México, e encontra-se em extinção. Uma outra teoria foi lançada levantando a hipótese de uma outra gramínea nativa, o *Tripsacum*, que poderia originar a ancestralidade do milho. Apesar de descobertas arqueológicas terem evidenciado no Novo México um tipo de milho muito primitivo, com idade aproximada de 4000 anos, somente por volta de 1492, é que o homem europeu, por intermédio de Cristóvão Colombo, pôde observar, pela primeira vez, a existência do milho na Costa Norte de Cuba, FANCELLI (1982).

Por ocasião do descobrimento das Américas, o milho já constituía uma espécie largamente cultivada e utilizada como alimento pelos índios americanos. A gramínea geralmente era reverenciada na religião e nas artes pelas civilizações indígenas astecas, maias e incas. No Brasil, o milho já era utilizado muito tempo antes das grandes navegações terem início, pelos indígenas que aqui habitavam. Por volta da chegada de Pedro Álvares Cabral, era cultivado de forma dispersa em áreas escassas, sendo predominante as espécies de porte elevado, contituidas de grãos moles, espigas finas e alongadas, com coloração variável. Os indígenas utilizavam o milho principalmente sob a forma de farinha, MI (1974).

A história do milho híbrido teve início em 1877 com William James Beal, o qual realizou experimentos cruzando espécies na tentativa de obter uma maior produtividade. Em 1932, o Instituto Agrônômico Brasileiro iniciou pesquisas com o objetivo de melhorar a genética do

milho, com a produção das primeiras sementes híbridas simples vindo nove anos mais tarde, FANCELLI (1982).

### 2.2.2 - Fisiologia e características botânicas

Um desenho esquemático da planta de milho encontra-se na Figura 2.1.

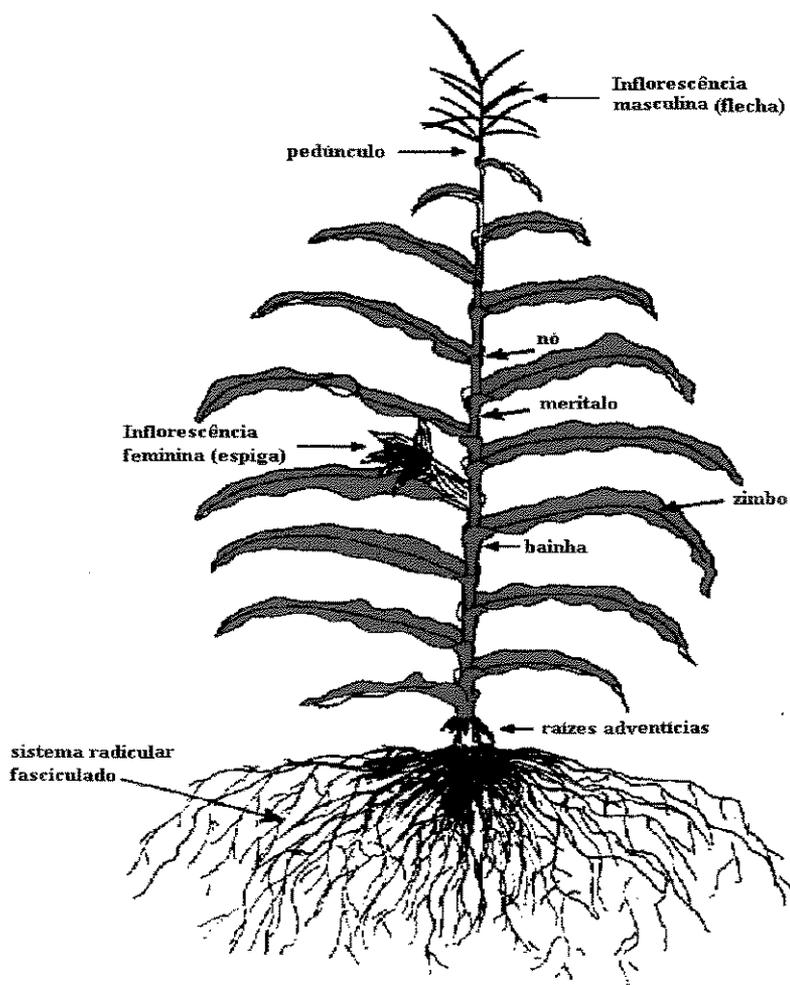


Figura 2.1 - Planta adulta de milho

Fonte: CAMPOS e CANECHIO FILHO(1978)

O milho consiste em uma planta monocotiledônea herbácea, monóide (isto é, possui separadamente os gametas masculino e feminino em duas flores, na mesma planta), pertencente à família *Graminae*, classificada como *Zea mays L.*, subfamília *Panicoideae*, tribo *Maydeae*. Morfologicamente, a planta é constituída por uma haste cilíndrica ereta atingindo de 1 até 4

metros de altura, formada por colmos e nós. É uma planta anual e de ciclo curto, CAMPOS e CANECHIO FILHO (1978).

O sistema radicular é constituído por raízes primárias e laterais e raízes adventícias, apresentando hábitos superficiais (80% das raízes localizam-se nos primeiros 20 cm de solo), conferindo à planta uma baixa tolerância à seca. Suas folhas são arrançadas alternadamente, sendo que a parte superior apresenta uma penugem branca e esparsa.

Sendo uma planta monóide, o milho apresenta flores masculinas e femininas na mesma planta, porém em estruturas vegetais distintas as quais são chamadas inflorescências. As flores masculinas encontram-se em inflorescências do tipo panícula, designada por flecha ou tendão. As femininas, encontram-se inseridas nas inflorescências do tipo espiga, as quais estão localizadas na região mediana da planta, FANCELLI (1982).

### 2.2.3 - Composição do milho

O grão de milho é constituído, na sua maioria, por carboidratos, 60%, 10% de proteína e 4% de óleo, os quais não se encontram distribuídos de maneira uniforme. O endosperma (que constitui 85 % do peso do grão) é constituído basicamente por carboidratos, e é no embrião onde predominam o óleo, a proteína e os sais minerais presentes no grão, o qual ainda pode conter pequenas quantidades de ácido nicotínico, ácido pantotênico e vitamina E, FANCELLI (1982). A Tabela 2.2 apresenta os valores nutritivos do milho comparados com outros cereais.

Tabela 2.2 - Valores representativos dos principais constituintes (em 100g) de alguns cereais.

Constituintes	Milho	Arroz	Trigo
lipídios (g)	4,64	1,00	2,00
Calorias	325,6	351,4	368,0
Proteínas (g)	6,20	8,60	11,70
Ca (g)	0,006	0,010	0,053
P (g)	0,103	0,380	0,374
Fe (mg)	0,51	2,00	5,00
Ácido oxálico (mg)	n.d.	n.d.	n.d.
colesterol (mg)	n.d.	n.d.	43,00

Fonte: FRANCO (1974).

Através da Tabela 2.3, ABBELS (1986) mostra a proporção dos componentes da espiga de milho.

Tabela 2.3 - Proporção dos componentes na espiga de milho.

Porção	%
grão	40
sabugo	7-8
casca e palha	2-3
talo	40
raiz	10

Fonte: ABEELS (1986).

#### 2.2.4 - Produção

Os grandes produtores de milho são os Estados Unidos da América, a Argentina, o Brasil e o México, apesar de todos os continentes, com exceção da Antártida, o produzirem. A América do Norte detém mais de 50% da produção mundial. Na região oeste dos Estados Unidos, por exemplo, existem os chamados “cinturões de milho”, que são grandes áreas de plantio constituídas por quase toda a totalidade de 12 estados. A produção total destes cinturões abrange cerca de 40% da produção mundial total. Também no sul da Europa, em torno do rio Danúbio, nos subtrópicos úmidos e no sul da África, encontram-se cultivos de milho, (MI, 1974).

No Brasil, a maior produção de milho está concentrada na região Sul, tendo o estado do Paraná como principal produtor. O cereal apresentou, no ano de 1992, um aumento na produção de 28.13 % em relação ao ano anterior, tendo uma área total colhida de 13.363.609. hectares. Já em relação ao ano de 1994, a produção de milho teve altas de 8,63 % na primeira safra, e de 52,21 % na segunda safra, IBGE (1995).

A Tabela 2.4 apresenta a produção nacional de milho durante o quinquênio 1990-1994.

Tabela 2.4 - Produção brasileira de milho (1990-1994).

<b>Ano</b>	<b>Área Plantada (1000 ha)</b>	<b>Área Colhida (1000 ha)</b>	<b>Produção (1000 t)</b>
1990	12 023	11 394	21 347
1991	13 580	13 063	23 624
1992	13 888	13 363	30 506
1993	12 877	11 870	30 051
1994	14 523	13 747	32 487

Fonte: IBGE (1995).

Em 1995, considerando as duas safras, a produção nacional de milho foi de 36.276.167 toneladas, sendo 11,66 % superior em relação a 1994. Devido à estiagem, apenas a região Nordeste registrou queda de produção em relação ao ano anterior, IBGE (1995).

### 2.2.5 - O resíduo do milho - sabugo

Como já fora mencionado nos parágrafos anteriores, o milho é produzido principalmente para alimentação, e o grão proporciona uma série de produtos industrializados. Entretanto, algumas partes da planta não possuem um uso direto, e neste caso, são sub-utilizadas. O sabugo, por exemplo, parte central da espiga no qual os grãos estão presos, é o resíduo após ser debulhado o milho.

Para cada 100 kg de espigas de milho, aproximadamente 18 kg (70 % base úmida), são formados pelo sabugo. No ano de 1979, a produção mundial de sabugo foi de 71 milhões de toneladas, onde cerca de 1,5% foram utilizadas em indústria na produção do furfural, e outros produtos químicos como a xilose, sem levar em conta a grande quantidade destinada à alimentação animal, (FOLEY e VANDER HOOVEN, 1981). Baseado nestes números, pode-se estimar que o Brasil, no ano de 1995, produziu aproximadamente 6,5 milhões de toneladas de sabugo de milho.

A Figura 2.2 mostra um esquema da secção transversal do sabugo de milho apresentando suas partes estruturais.

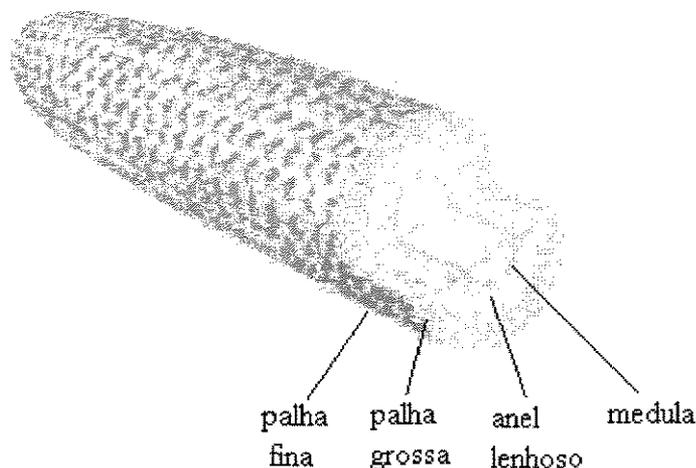


Figura 2.2 - Secção transversal do sabugo de milho

Fonte: FOLEY e VANDER HOOVEN (1981)

Estruturalmente, o sabugo é formado por quatro partes distintas, segundo BAGBY e WIDSTROM (1984) e FOLEY e VANDER HOOVEN (1981):

- palha fina - constitui a parte externa do sabugo;
- palha grossa - camada subsequente à palha fina;
- anel lenhoso, parte interna a qual constitui mais de 50% do sabugo;
- medula, que forma o “miolo” do sabugo, e é circundada pelo anel lenhoso

Em peso e em valores aproximados, a palha fina constitui 4,1 % do sabugo de milho; a palha grossa constitui 33,7%; o anel lenhoso, 60,3% e a medula, 1,9%, segundo CLARK E LATHROP (1953) apud BAGBY e WIDSTROM, (1984).

Devido às características de dureza e resistência à abrasão, os componentes do sabugo serviram de base ao início de suas aplicações na indústria, (LATHROP, 1947) apud BAGBY e WIDSTROM, (1984). O pH da superfície granular do sabugo é 7,4; sendo em seu interior, 4,9. Estes valores contribuem para que o sabugo funcione como suporte inerte para vários materiais. A dureza do anel lenhoso na escala de Mohs é 4,5, sendo a mesma do ferro, (FOLEY e VANDER HOOVEN, 1981). As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam micrografias das partes do sabugo.

---

A Tabela 2.5 apresenta a análise elementar do sabugo de milho e seus componentes. Através desta Tabela, observa-se, como era previsto, que o sabugo de milho é formado principalmente por carbono, oxigênio e hidrogênio.

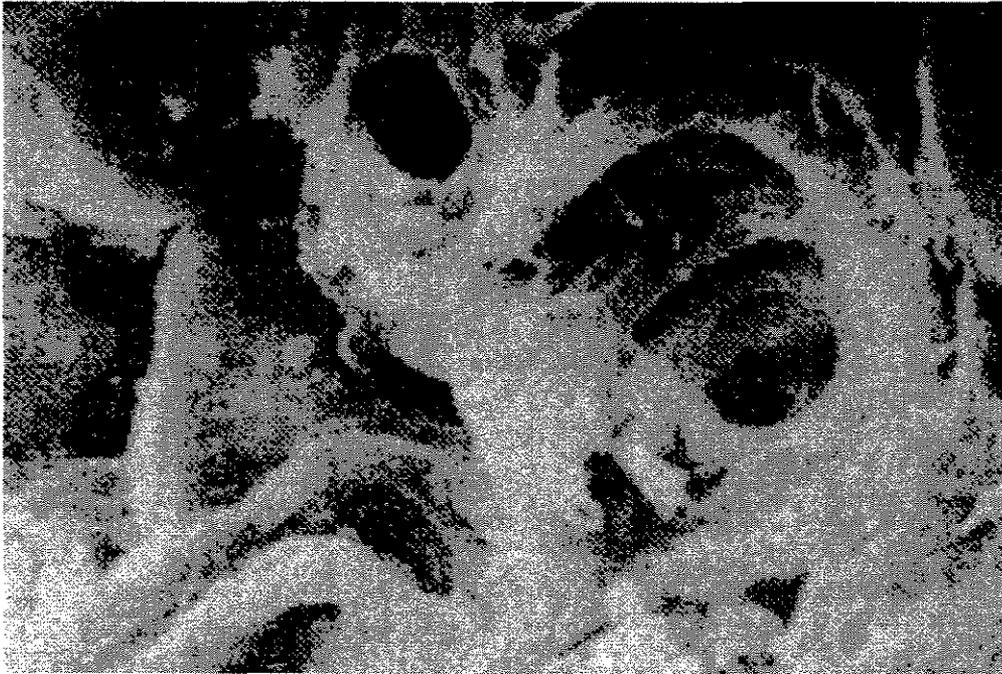


Figura 2.3 - Estrutura molecular da porção lenhosa

Fonte: FOLEY e VANDER HOOVEN (1981)

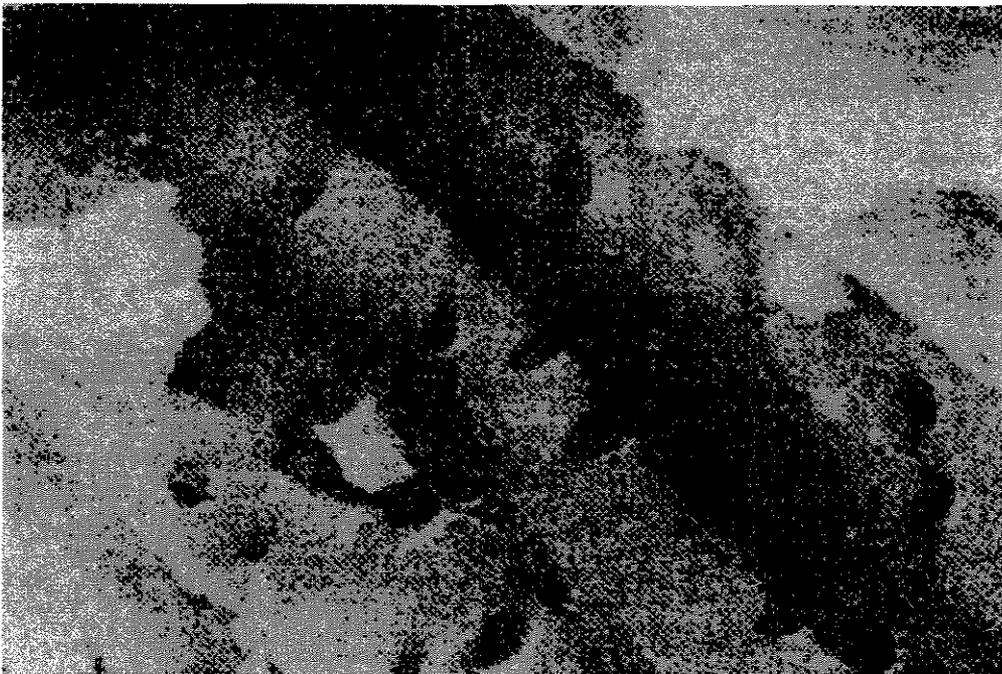


Figura 2.4 - Estrutura molecular das porções palhas/medula

Fonte: FOLEY e VANDER HOOVEN (1981).

Tabela 2.5 - Análise elementar do sabugo de milho (em percentual)

<b>Elemento</b>	<b>Sabugo inteiro</b>	<b>Anel lenhoso</b>	<b>Medula/Palhas</b>
Carbono	43.6	42.9	44.3
Hidrogênio	6.1	7.8	6.8
Nitrogênio	0.40	0.21	0.61
Oxigênio	48.4	47.8	46.8
Fósforo	0.04	0.021	0.07
Enxofre	0.42	0.013	0.22
Potássio	0.76	0.92	0.86
Sódio	0.02	0.14	0.08
Magnésio	0.06	0.11	0.09
Sílica	0.087	0.088	0.089
Ferro	0.021	0.013	0.017
Cálcio	0.11	0.011	0.06
Alumínio	0.0052	0.0052	0.0053
Bário	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Cromo	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Cobre	0.00066	< 0.0001	< 0.0003
Chumbo	< 0.001	< 0.0001	< 0.0003
Manganês	0.00056	< 0.0001	< 0.0003
Níquel	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Vanádio	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Zinco	0.00044	< 0.0001	< 0.0002
Cobalto	0.00001	0.00001	0.00001

Fonte: FOLEY e VANDER HOOVEN (1981).

As principais propriedades físicas e químicas do sabugo de milho estão apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Propriedades físicas e químicas do sabugo de milho

<b>Propriedade</b>	<b>Sabugo inteiro</b>	<b>Anel lenhoso</b>	<b>Medula/Palha</b>
Umidade	9.6 %	7.0 %	6.0 %
Absorção de Água	369 %	133 %	727 %
Dureza (Mohs)	-	4.5	1.0
Expansão (18% H <sub>2</sub> O)	-	69.4 %	69.4 %
Solubilidade em H <sub>2</sub> O (100 °C)	8.7 %	9.5 %	7.4 %
Solubilidade em H <sub>2</sub> O (20 °C)	6.6 %	6.3 %	7.1 %
Celulose	41.2 %	47.1 %	35.7 %
Hemicelulose	36.0 %	37.3 %	37.0 %
Lignina	6.1 %	6.8 %	5.4 %
Pectina	3.1 %	3.2 %	3.2 %
Amido	0.014 %	0.014 %	0.015 %
pH (superfície)	7.4	7.4	7.4
Poder Calorífico (bruto)	3998 kcal/kg	4113 kcal/kg	4157 kcal/kg
Poder Calorífico (líquido)	3752 kcal/kg	3860 kcal/kg	3901 kcal/kg
Temperatura de Ignição	205 °C	205 °C	205 °C

Fonte: FOLEY e VANDER HOOVEN (1981).

### *Aplicações do sabugo*

O sabugo é amplamente utilizado para a produção de ração animal, alimentação bovina, bem como na confecção de feno e adubo

No âmbito industrial, devido às suas características de dureza e ainda por ser um material muito resistente, o sabugo tem sido utilizado como suporte e carga para vários materiais como plásticos, colas, adesivos, compostos de borracha, pneus, etc. Além disso, é bem utilizado como abrasivos e polidores em produtos de limpeza, fabricação de tijolos e cerâmica, (KENT, 1975). Já suas características absorventes e inertes, favorecem sua utilização como suporte e carga de produtos químicos como os carbamatos e organofosforados. Alguns pesticidas têm, em sua formulação, grânulos (ou pó) de sabugo de milho, (FOLEY e VANDER HOOVEN, 1981).

Uma das utilizações industriais do sabugo de milho é a produção do furfural. Os produtos de furfural reagem com outros componentes químicos a fim de formar materiais inertes

quimicamente, onde poderão ser utilizados, posteriormente, na fabricação de tubos resistentes à corrosão. Algumas resinas do furfural são ainda utilizadas em colas e moldes de fundição, podendo também servir como intermediário de vários outros produtos químicos como o hexametilenodiamínico, usado na produção de *nylons*, (FOLEY e VANDER HOOVEN, 1981).

### *O Sabugo como fonte de energia*

O sabugo seco possui um poder calorífico de aproximadamente 4400 kcal/kg. Por este motivo, vem sendo pesquisada sua utilização como combustível sólido, KENT (1983), bem como estudos de gaseificação. Segundo MOREY et al. (1984), o próprio sabugo de milho pode ser utilizado como combustível para produzir a quantidade de calor necessária para a secagem do milho. Pesquisas reportadas pelos autores mostraram vários estudos realizados no sentido de utilizar o sabugo de milho como fonte de energia para secagem.

Uma comparação do poder calorífico ( em kcal/kg), em base seca, do sabugo de milho, pode ser feita com o de outros resíduos de biomassa, a partir dos dados apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Poder calorífico de alguns resíduos secos (kcal/kg).

<b>Material</b>	<b>Poder calorífico</b>	<b>Autor</b>
caule de juta	4619,10	KUMAR, BAL e OJHA (1984)
casca de arroz	3805,30	idem
fibra de coco	4707,83	idem
palha de trigo	4185,02	idem
rama de algodão	3750,00	idem
sabugo de milho	3804,35	idem
bagaço de cana	4470,59	idem
bagaço de cana	4600,00	Anonimus (1971)
madeira	5450,00	Anonimus (1971)
borra de café	5960,00	Anonimus (1971)

Fonte: SILVA (1991)

### **2.3 - Teoria de secagem**

Desde os tempos mais remotos, a técnica de secagem vem sendo utilizada pelo homem, tanto para a conservação de alimentos quanto na manufatura de objetos de barro e outros utensílios.

A secagem é uma operação muito utilizada, desempenhando importante papel em quase todos os setores da indústria de consumo, sendo muitas vezes, a etapa final de uma série de operações unitárias. Entre outros, a secagem visa a conservação do material (alimentos, por exemplo), o armazenamento por um longo período de tempo, a redução dos custos de transporte; facilitar um posterior manuseio, etc.

Vários autores definem o processo de secagem, que segundo KNEULE (1966), consiste na operação destinada a eliminar a umidade contida em um produto, geralmente por meio de adição de calor.

KEEY (1975) a define como o processo no qual a água é removida de um material, e mais amplamente, como a remoção de substâncias voláteis através de adição de calor, resultando em um produto sólido. Entretanto, nem sempre a principal substância volátil é a água, apesar de esta ser o constituinte cuja remoção seja de maior interesse.

Segundo FOUST et al. (1982), a secagem consiste “na transferência de um líquido presente em um sólido molhado, para uma fase gasosa não-saturada”, sendo o calor geralmente proveniente de uma fonte externa, que poderá ser transferido por condução, convecção ou radiação. É de importância salientar que a umidade será sempre removida na fase vapor e que, durante o processo, ocorre a transferência simultânea de calor e de massa.

PERRY e CHILTON (1985) definem a secagem como a eliminação do líquido presente em certo material por evaporação.

MENON e MUJUMDAR (1987) definem o processo de modo semelhante aos autores citados anteriormente. Ressaltam ainda que no processo de secagem, faz-se necessário o fornecimento de certa quantidade de energia ao material, energia esta que dependerá do próprio produto e dos teores iniciais e finais de umidade.

Pode-se concluir, a partir de todas as definições anteriormente apresentadas, que a secagem consiste na remoção de um líquido (geralmente a água) de um material sólido.

Basicamente, no processo da secagem, a mistura ar/vapor d'água fornece uma certa quantidade de calor ao material úmido, ao mesmo tempo em que absorve a umidade presente no material. Esquemáticamente, o processo está representado pela Figura 2.5

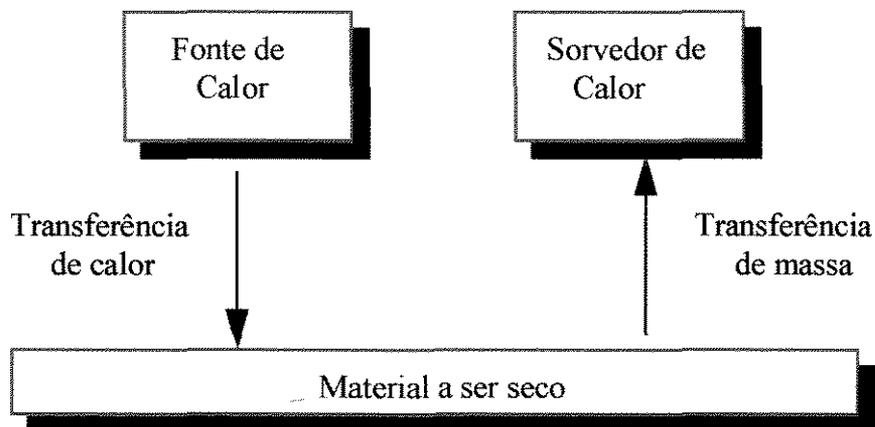


Figura 2.5 - Esquema simplificado do processo de secagem

Fonte: CORNEJO (1987)

Em qualquer processo de secagem, os componentes mais importantes são o agente de secagem e o material a ser seco. Consequentemente, as propriedades de cada um devem ser estudadas e bem conhecidas.

### 2.3.1 - O Agente de Secagem

O agente de secagem mais utilizado é o ar pré-aquecido. O ar úmido consiste em uma mistura de ar seco e vapor d'água; sendo o ar seco composto por vários gases, na sua maioria nitrogênio e oxigênio. A Tabela 2.8 indica a porcentagem molar de seus componentes.

Tabela 2.8 - Composição do ar limpo e seco próximo ao nível do mar

<b>Componente</b>	<b>Porcentagem Molar</b>
Nitrogênio	78.084
Oxigênio	20.9476
Argônio	0.934
Dióxido de Carbono	0.0314
Neônio	0.001818
Hélio	0.000524
Metano	0.0002
Hidrogênio	0.00005
Ozônio	
<i>verão</i>	0-0.000007
<i>inverno</i>	0-0.000002
Amônia	0-traços
Monóxido de Carbono	0-traços

Fonte: HIMMELBLAU (1984).

### 2.3.2 - O Material Sólido

De maneira geral, o material úmido constitui-se do sólido propriamente dito e certa quantidade de umidade, estando esta quase sempre no estado líquido. Cada material possui diferentes estruturas físicas, químicas, bem como diferentes propriedades mecânicas, STRUMILLO e KUDRA (1986). Tais parâmetros influirão consideravelmente no processo, no sentido de, por exemplo, determinar qual o tipo de secador mais adequado para o material em questão, qual a temperatura do ar de secagem, etc,

Quanto à classificação do material sólido, LUIKOV (1968), apud STRUMILLO e KUDRA (1986), apresenta três tipos diferentes:

- *coloidais* - possuem a capacidade de alterar seu tamanho sem alterar suas propriedades elásticas durante a secagem, como a gelatina;
- *capilares-porosos* - são materiais que durante o processo tornam-se quebradiços ou encolhem ligeiramente, ex: areia, carvão vegetal, etc;

- *capilares-porosos-coloidais* - possuem ambas as propriedades descritas acima, ex; papelão, madeira, couro, etc.

Existem várias outras classificações para o material úmido, baseando-se no tipo de umidade presente. KEEY (1975) classifica-os como higroscópicos, não-higroscópicos e parcialmente higroscópicos.

Em relação aos tipos de umidade presentes no material úmido, segundo a classificação de STRUMILLO e KUDRA (1986) são:

- *Umidade Superficial*: é o líquido presente na película externa que envolve o material, devido aos efeitos das tensões superficiais;
- *Umidade Não-Ligada*: é a retida nos interstícios entre as partículas, ou em poros rasos ou abertos. Esta umidade desloca-se até a superfície através da ação das forças capilares e está contida em sólidos não-higroscópicos;
- *Umidade Ligada*: também chamada de umidade higroscópica ou dissolvida, é o líquido que exerce uma pressão de vapor menor que a exercida pelo líquido puro, a certa temperatura de referência.

### 2.3.3 - Mecanismo da Secagem

Basicamente, no processo de secagem o material úmido está em contato com ar insaturado, resultando em um decréscimo do teor de umidade do material, e consequente umidificação do ar.

Ao entrar no secador, o ar já aquecido encontra o material úmido. No meio secante predomina um gradiente de temperatura ocorrendo uma transferência de calor e massa tanto no interior do sólido quanto na camada limite do agente de secagem, (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Logo no início da secagem, o potencial do agente secante é elevado e atinge um valor baixo no final do processo devido ao aumento contínuo de sua umidade. É importante salientar que após o contato do material com o agente secante, a temperatura ajusta-se até que um regime permanente seja atingido, sendo que a temperatura da superfície do sólido é a temperatura de bulbo úmido do gás, a qual permanece constante bem como a taxa de secagem, (KNEULE, 1966). De acordo com KEEY (1975) a taxa de secagem do material depende principalmente da “rapidez” com que a umidade evapora quando em contato com o gás de secagem. De início, a

umidade que evapora é a da superfície livre, mas um material poroso, por exemplo, seca mediante a migração da umidade proveniente do seu interior.

Embora a remoção da umidade por evaporação da superfície do sólido úmido para o agente secante seja essencial para o processo de secagem, a maneira como ocorre a migração da umidade dentro do material úmido também é importante e deve ser conhecida. STRUMILLO e KUDRA (1986) citam três mecanismos de migração da umidade no interior da partícula sólida. Estes mecanismos se devem às diferentes propriedades tanto do material sólido quanto do agente de secagem:

- Quando a resistência à transferência de massa na camada limite do gás for maior que a resistência à migração da umidade no interior do sólido, a intensidade da secagem dependerá mais das condições do escoamento gasoso que das propriedades do material. Neste caso, o processo é controlado pelo balanço de calor e massa na superfície do sólido, ou seja, pelas condições externas.
- Por outro lado, quando a resistência à transferência de massa no interior do material for maior que a resistência à difusão do gás na camada limite do sólido, os parâmetros do material úmido terão grande influência na taxa de secagem. Neste caso, o processo de secagem é controlado pelas condições internas.
- No caso em que tanto a resistência à transferência de massa na camada limite do agente de secagem quanto no interior do material sólido tiverem a mesma ordem de grandeza, ambos deverão ser considerados, isto é, os parâmetros do gás e do próprio material.

Pode-se ainda classificar os tipos de migração da umidade no interior do sólido; dentro do sólido úmido, a umidade pode ser transferida tanto na fase líquida quanto na fase gasosa. Os principais tipos de migração da umidade, segundo STRUMILLO e KUDRA (1986) são: (a) por difusão líquida, (b) por difusão de vapor, (c) por forças capilares, (d) devido ao gradiente de pressão e (e) por efusão (escoamento de Knudsen). KEEY (1975) define o transporte por difusão como aquele que acontece nos sólidos orgânicos fibrosos, substâncias gelatinosas e nas tortas porosas, que são materiais relativamente homogêneos, onde a umidade movimentada-se para a superfície por difusão molecular. A velocidade da difusão é controlada pela lei de Fick. STRUMILLO e KUDRA (1986) explicam o transporte por pressão osmótica baseado no transporte de difusão líquida.

O transporte por difusão do vapor é o principal mecanismo de transporte no sólido e acontece em materiais que possuem um diâmetro de espaço livre maior que  $10^{-7}$  m, (STRUMILLO e KUDRA, 1986). O transporte por capilaridade ocorre em sólidos granulares

ou que possuam poros abertos, sendo o movimento do líquido dentro do sólido resultante das diferenças entre a pressão hidrostática e os efeitos de tensão superficial, (FOUST et al., 1982). Quanto ao transporte por gradiente de pressão, é resultante da diferença da pressão interna devido à evaporação local de líquido ou da condensação local do vapor. O escoamento de Knudsen ocorre quando o caminho livre das moléculas de vapor for igual ao diâmetro dos poros. Esse mecanismo é importante apenas para as condições de alto vácuo. Esquemáticamente, a migração do líquido no interior do sólido está representada pela Figura 2.6.

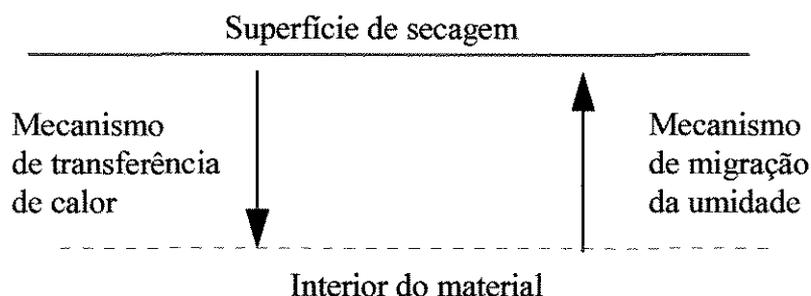


Figura 2.6 - Esquema da migração do líquido no interior do sólido

Fonte: CORNEJO (1987)

### 2.3.4 - Cinética de secagem

A cinética de secagem de um material consiste no estudo da variação do teor médio de umidade e temperatura média no tempo. Através da cinética de secagem de um material úmido pode-se determinar a quantidade de água evaporada, o tempo de secagem, o consumo de energia, etc.. A variação do teor de umidade e da temperatura do material, geralmente é controlada pela transferência de calor e massa entre a superfície e o interior do sólido e as vizinhanças, (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

A determinação da cinética de secagem de um produto é de fundamental importância para simular a operação em um secador industrial, (DAUDIN, 1983).

Segundo os autores, os principais parâmetros que influenciam a cinética de secagem de um material sólido são:

- a temperatura
- a umidade do ar
- a velocidade relativa do ar

- a pressão total

A cinética de secagem de um material pode ser bem ilustrada por intermédio de diagramas construídos pelos seguintes sistemas de coordenadas:

- *curva de secagem*  $\Rightarrow$  teor de umidade x tempo de secagem
- *curva da taxa de secagem*  $\Rightarrow$  taxa de secagem x teor de umidade do material
- *curva de temperatura*  $\Rightarrow$  temperatura do material x teor de umidade do material

Os dados para a determinação da curva cinética são geralmente, obtidos em laboratório, medindo a variação da massa e da temperatura do material com o tempo utilizando ar quente como agente de secagem, (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

As Figuras 2.7 e 2.8 mostram típicas curvas de secagem e de taxa de secagem.

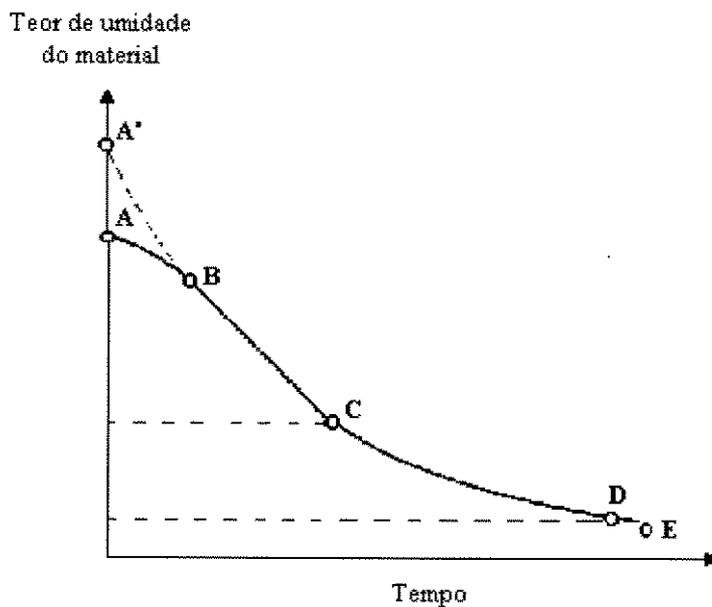
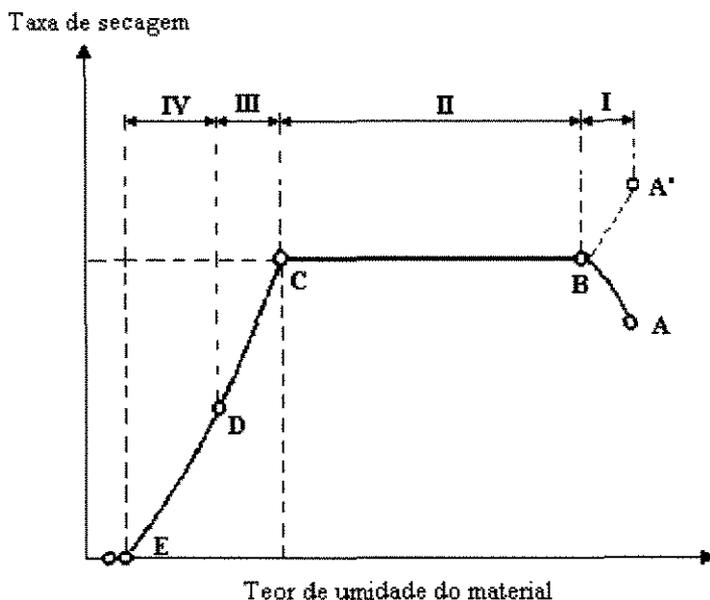


Figura 2.7 - Curva de secagem

Fonte: STRUMILLO e KUDRA (1986)



Onde:

I - período inicial de secagem

II - período de secagem à taxa constante

III - primeiro período de secagem à taxa decrescente

IV - segundo período de secagem à taxa decrescente

Figura 2.8 - Curva da taxa de secagem

Fonte: STRUMILLO e KUDRA (1986)

O segmento A-B indica o período inicial de secagem. Neste período, o regime é transiente e o ar insaturado fornece calor sensível ao sólido úmido, sendo a pressão de vapor na superfície deste igual a pressão de saturação, (KNEULE, 1966). Na prática este período é muitas vezes desprezível, a depender do tipo de material, por ter uma duração muito curta.

Após este período inicial transiente, a taxa de secagem torna-se constante e a relação  $X = f(t)$ , linear. Toda a superfície exposta do sólido está saturada de água, sendo que a temperatura nesta superfície tende à temperatura de bulbo úmido do gás (segmento B-C). Segundo FOUST et al. (1982), alguns sólidos, nos quais a difusão controla o movimento do líquido, não possuem o período à taxa constante ou este é relativamente curto. Este período estende-se até um ponto chamado ponto crítico,  $X_{cr}$ , no qual não há mais umidade livre e a curva perde a linearidade,

(STRUMILLO e KUDRA, 1986). Dá-se início, a partir daí, aos períodos de secagem à taxa decrescente.

O período de secagem à taxa decrescente é controlado pelo transporte de umidade no interior do material, isto é, pelas condições internas. Divide-se em *primeiro período de taxa decrescente* (segmento C-D) e *segundo período de taxa decrescente* (segmento D-E). No primeiro período a superfície fica gradualmente mais pobre em líquido, pois a velocidade da umidade para a superfície é menor que a velocidade com que a massa é transferida da superfície para o meio secante. No ponto D, não existe, na superfície do sólido, qualquer área significativamente saturada no líquido, pois esta área seca através da transferência convectiva de calor para a corrente gasosa, bem como pela transferência de massa. O vapor presente nos níveis mais internos do material sólido difunde-se para a superfície não-saturada, e, posteriormente, para a corrente gasosa. Comparando com a transferência convectiva de calor e massa que ocorre na superfície saturada, este mecanismo é muito lento. Após o ponto D, segundo período de taxa decrescente, toda a evaporação ocorre a partir do interior do sólido até que seja atingida a umidade de equilíbrio  $X_{eq}$ , a qual é o menor teor de umidade atingível num processo de secagem. É importante salientar que o teor de umidade de equilíbrio é função das condições de secagem nas quais o sólido está sendo submetido, e será atingido quando a pressão de vapor na superfície do sólido for igual à pressão parcial do vapor no agente de secagem afluente, FOUST et al. (1982).

### 2.3.5 - Secagem de produtos agrícolas

Em relação aos produtos (ou resíduos) agrícolas e agroindustriais, a secagem representa o processo comercial mais utilizado para a preservação de sua qualidade. Como em qualquer outro material, consiste na remoção de grande parte da água contida, não devendo ocorrer perdas em suas propriedades nutricionais e/ou organolépticas. Tal efeito é conseguido porque, quando seco, o produto deixa de ser um meio propício para o desenvolvimento de microorganismos, bem como para suas atividades metabólicas, (ROSSI e ROA, 1980 e ABALONE et al., 1994).

Os produtos agrícolas em geral podem ser submetidos a dois processos de secagem diferentes:

- secagem natural
- secagem artificial

A secagem natural consiste em expor o produto por períodos relativamente longos à radiação solar sob condições climáticas adversas. Devido à estas condições adversas, este método exige um clima com baixa umidade, temperatura relativamente alta e relativa intensidade de ventos. Para um melhor aproveitamento das condições naturais, é conveniente manter o material em condições que permitam a livre circulação do ar, permitindo a incidência de radiação solar, (CORNEJO, 1987). A secagem natural pode ser realizada no próprio campo ou em terreiros. Segundo DALBELLO (1995), em terreiros é necessário revolver o produto periodicamente, com o objetivo de acelerar o processo. A principal vantagem deste método é o baixo custo, tanto nas instalações quanto no requerimento da energia. Como desvantagens, a depender do tipo do sólido, a secagem natural tem o agravante da possível proliferação de microorganismos, acelerando sua degradação. Além disso, exige um maior tempo de secagem e uma grande dependência das condições climáticas.

No Brasil, na década de 80, aproximadamente 80% da produção de grãos nacional, era seca pelo método natural. A maior parte desta produção era proveniente de pequenos e médios produtores, os quais eram responsáveis por mais de 75% da produção total no Brasil na ocasião, (ROSSI e ROA, 1980).

O método artificial é outra alternativa para a secagem de produtos agrícolas, no qual o produto úmido é exposto à ação de uma corrente convectiva forçada de ar aquecido, em altas ou baixas temperaturas. DALBELLO (1995) aponta como baixas temperaturas aquelas que apresentam um gradiente de temperatura entre 1 e 10 °C em relação ao ar natural, ou ainda o próprio ar natural. Geralmente, este tipo de secagem é feita no próprio silo secador, onde o produto já encontra-se armazenado. Apesar da necessidade de serem tomados alguns cuidados especiais a fim de evitar a deterioração do produto durante a secagem, o método apresenta as vantagens de permitir um mínimo manuseio dos grãos e alta eficiência de secagem.

A secagem artificial em altas temperaturas é a maneira mais rápida e menos dependente das condições atmosféricas. Permite diminuir rapidamente o teor de umidade dos produtos com altos teores de umidade inicial, bem como proporciona condições para um futuro armazenamento do produto e preservação de todas as suas qualidades nutricionais, organolépticas, fisiológicas, etc. Segundo BROOKER et al. (1982), a secagem a altas temperaturas ocorre quando o ar está, no mínimo, a 50 °C, com uma variação de 50 a 300 °C. Apesar disso, tal condição não é rígida, pois vários autores caracterizam o processo como sendo aquele realizado a uma temperatura de 10 ou mais graus Celsius acima da temperatura do ar natural.

Segundo BIAGI et al. (1993), a utilização da secagem a altas temperaturas permite, entre outras:

- antecipar a colheita, permitindo racionalizar os trabalhos de cultivo do solo;
- armazenar o produto por longos períodos, sem o risco de ocorrer deterioração dos mesmo;
- planejar a colheita e o emprego de eficientes equipamentos e mão-de-obra;
- a estocagem do produto;
- comercializar o produto em épocas mais vantajosas de preço, com a valorização no mercado.

Como desvantagem, a secagem a altas temperaturas demanda um alto consumo de energia calorífica ou mecânica, para o aquecimento e movimentação do ar. Além disso, a alta temperatura pode causar quebras, trincamentos, ou mesmo comprometer as propriedades nutricionais e/ou organolépticas do produto.

Segundo SOKHANSANJ (1984), a secagem de grãos requer mais de 65% da energia total gasta na produção e processamento do milho.

### **2.3.6 - Eficiência de secagem**

Segundo SOKHANSANJ (1984), a eficiência energética no processo de secagem consiste na energia necessária para retirar uma unidade de peso de água, em MJ/kg de água evaporada. Teoricamente, é a energia necessária para evaporar 1 kg de água livre a 100 °C e pressão atmosférica.

### **2.3.7 - Aspectos energéticos da secagem**

A secagem industrial é, segundo STRUMILLO e KUDRA (1986), uma das operações unitárias que mais demanda energia. Os autores citam que na indústria de produtos de madeira, a secagem consome aproximadamente 70 % da energia total consumida. Na indústria têxtil, 50 % da energia total consumida é utilizada para a secagem, e este percentual ultrapassa 60 % na produção de milho na própria fazenda. A Tabela 2.9 apresenta o total energético gasto com a secagem.

Tabela 2.9 - Padrão global de energia utilizada na secagem.

Setor	Energia gasta com secagem, MJ/ano	Energia total gasta, MJ/ano	% utilizado para a secagem
alimentício e agrícola	35	286	12
químico	13	390	6
têxtil	7	128	5
papel e celulose	45	137	33
cerâmico e material para construção	14	127	11
madeireiro	4	35	11
total	128	1103	12

Fonte: STRUMILLO e KUDRA (1986).

## 2.4 - Secadores

Existe, atualmente no mercado, uma ampla variedade de secadores em função da existência de uma grande variedade de produtos e materiais que necessitam passar por um processo de secagem. Conseqüentemente, o desenvolvimento de um secador deve levar em consideração as características estruturais de cada material. STRUMILLO e KUDRA (1986) salientam a importância do conhecimento de certas variáveis tais como a maneira como será feita a alimentação; o método de aquecimento do agente de secagem; as propriedades físicas e químicas do material, etc, a fim de projetar um secador satisfatório.

Os autores classificam os secadores como de regime hidrodinâmico ativo e regime hidrodinâmico não-ativo. Os últimos são classificados como:

- secadores de leito fixo;
- secadores de leito móvel;
- secadores de leito em queda livre.

Quanto aos secadores de regime hidrodinâmico ativo, os autores apresentam a seguinte classificação:

- secadores com leito fluidizado
- secadores com leito de fluxo corrente.

A Figura 2.9 esquematiza a classificação dos secadores segundo STRUMILLO e KUDRA (1986), com alguns exemplos.

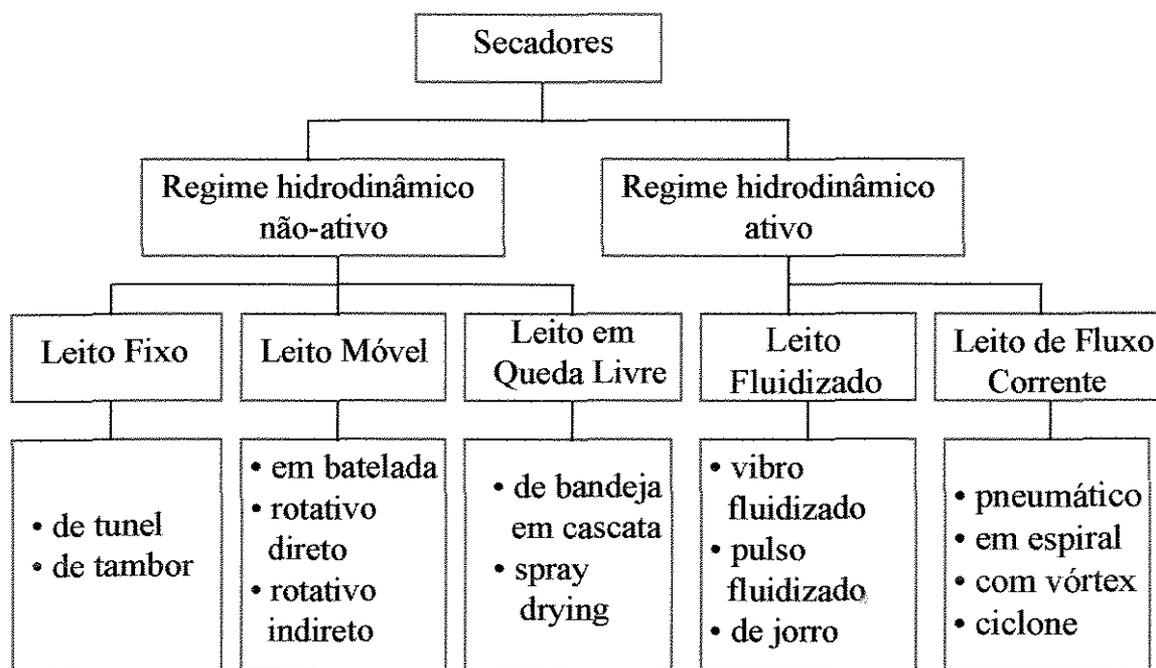


Figura 2.9 - Classificação dos secadores segundo o regime hidrodinâmico.

Fonte: STRUMILLO e KUDRA(1986).

Como já fora mencionado anteriormente, cada secador é projetado de acordo com, principalmente, o tipo de material a ser seco e suas respectivas características físicas, químicas, mecânicas, organolépticas ( no caso de alimentos), etc. Secadores de leito fluidizado, por exemplo, são utilizados principalmente para materiais granulares, podendo também ser utilizados para a secagem de pastas e soluções. As grandes vantagens da utilização de tais secadores consistem na sua boa performance em secar grandes quantidades de material por dia, em proporcionar um bom contato entre as fases particulada e gasosa mantendo a uniformidade do material dentro do leito resultando em boas condições para a transferência de calor e massa, em aplicar outras fontes de energia, etc, STRUMILLO e KUDRA (1986).

Por outro lado, se houver necessidade de condições específicas de operação para a secagem, devido às características inerentes ao material, por exemplo, tornar-se-ia inviável o uso

de secadores com leito fluidizado. Estes secadores tornam-se inviáveis quando há necessidade de secar materiais polidispersos (materiais que possuem diferentes tamanhos e/ou densidades), ou quando é necessária uma velocidade de fluidização mais alta. Além disso, para temperaturas muito altas, a depender do material, este poderá fundir e conseqüentemente, obstruir a placa distribuidora do equipamento. Aumentando-se a secção transversal da câmara de secagem e proporcionando condições para a formação de zonas de jorro, são alteradas as condições hidrodinâmicas de operação, e ampliadas as aplicações do secador de leito fluidizado. Altas velocidades são atingidas na parte inferior do equipamento evitando um tempo de permanência prolongado do material junto à grade, e entupimentos, STRUMILLO e KUDRA (1986).

Para a secagem de materiais termo-sensíveis ou fáceis de secar, geralmente são utilizados secadores pneumáticos. Estes secadores proporcionam um baixo tempo de permanência do material, altas temperaturas e alta eficiência térmica.

Pela Figura 2.9, pode-se observar que STRUMILLO e KUDRA (1986) classificaram o ciclone como um secador de regime hidrodinâmico ativo e de fluxo corrente. De fato, pesquisadores, a exemplo de SILVA(1991), já estudaram o uso de ciclones como equipamentos de secagem. Pelo fato de ser objeto de pesquisa do presente trabalho, outras informações sobre ciclones estão apresentadas nos parágrafos seguintes.

## **2.5 - Ciclones**

### **2.5.1 - Generalidades**

Entre os primeiros pesquisadores que deram início ao estudo sobre ciclones, destacam-se ter LINDEN (1949) e STAIRMAND (1951). De acordo com SILVA (1991), os estudos experimentais do primeiro são utilizados até hoje para testar modelos teóricos.

O ciclone consiste, em primeira análise, em um equipamento de separação centrífuga, utilizado principalmente para a separação de pós ou partículas de gases. Possui grande capacidade para trabalhar correntes fluidas contendo partículas sólidas melhorando amplamente o contato entre ambas, (YEN et al., 1990). São equipamentos bastante antigos e segundo ZHOU e SOO (1990), os ciclones são utilizados como equipamentos de separação há mais de 100 anos.

De acordo com BIFFIN et al. (1983), o ciclone é um eficiente separador de partículas quando a faixa de diâmetros destas figuram entre 10 e 2000  $\mu\text{m}$ , mas sua eficiência cai drasticamente quando o tamanho das partículas é menor que 5  $\mu\text{m}$ . Apesar disso, tem sido

utilizado com grande frequência e ao longo de vários anos na indústria de processos, tanto para impedir a emissão de partículas na atmosfera, quando o objetivo é a preocupação com o meio ambiente, quanto para a própria recuperação de pó quando o processo envolve sistemas particulados, SILVA (1991). O ciclone é descrito por HALL (1979) como sendo um equipamento cônico cujo objetivo é separar sólidos (ou pós), normalmente na faixa de 5 a 200 microns, de uma corrente gasosa, sendo que os sólidos são coletados no fundo do cone e o ar escapa pela parte superior

De uns anos para cá, o ciclone tem sido utilizado além de sua função tradicional, sendo utilizados como reatores em vários processos são, ou qualquer outro processo que exija um mecanismo de contato gás-sólido, (SZEKELY e CARR, 1966). Podem ainda, segundo YEN et al. (1990), ser utilizados como trocadores de calor ou como secadores, SILVA (1991), devido ao regime dinâmico proporcionado por fortes correntes convectivas que ocorre em seu interior, CREMASCO et al. (1993). No Brasil, NEBRA (1985), foi a pioneira em levantar a hipótese da ocorrência de algum nível de secagem no ciclone. Um estudo experimental específico utilizando o ciclone exclusivamente como equipamento de secagem foi realizado por SILVA (1991), confirmando a hipótese de NEBRA (1985).

### 2.5.2 - Vantagens

Entre as vantagens do uso do ciclone destacam-se a alta eficiência de coleta e economia, devido ao seu *design* simples e seu baixo custo de construção. YUU et al (1978) destacam o fato dos ciclones serem os sistemas de remoção de partículas (ou pós) mais comuns na indústria, sendo ainda de simples construção não contendo partes móveis. Além disso, podem ser utilizados a altas temperaturas, (PATTERSON e MUNZ, 1989) e pressões caso sejam fabricados com material apropriado, (BIFFIN et al., 1984). SZEKELY e CARR (1966) também destacam como vantagens o fato de poder se utilizar partículas finas com um eficiente contato entre a fase gasosa e os sólidos, além de ser muito bem aceito quando se deseja um tempo de contato relativamente pequeno. Apesar de toda discussão relativa à vantagem da utilização do ciclone em temperaturas altas, há controvérsias a este respeito. PARKER et al. (1981) mostraram em seus experimentos a redução da eficiência de coleta no ciclone, quando utilizados nestas condições. Porém, a maioria dos pesquisadores acredita na boa aplicabilidade dos ciclones separadores em temperaturas altas. MOTHE e LOFFLER (1988), por exemplo, predizem o

uso com eficiência satisfatória para temperaturas acima de 1000 °C e pressões entre 0,01 e 100 bar.

### 2.5.3 - Princípios e funcionamento do ciclone

Em seus estudos, ter LINDEN (1949) descreve o escoamento tri-dimensional que ocorre no interior do ciclone. Segundo ele, em qualquer ponto a velocidade pode ser desmembrada em três componentes: velocidade tangencial, axial (chamada por alguns autores de vertical) e radial. A velocidade tangencial predomina e sofre um incremento em direção ao centro, tornando-se mais fraca na região central turbulenta; nesta região, a velocidade total do gás desvia-se consideravelmente do valor da velocidade tangencial. ter LINDEN (1949) observou que este aumento da velocidade tangencial ocorre até uma distância relativa de 0,325 d ( ver Figura 2.10) decrescendo posteriormente. À medida que vai atingindo a parte cônica, esta componente incrementa-se, principalmente quando o cone torna-se cada vez mais estreito. Baseado nos estudos de ter LINDEN (1949), vários outros autores pesquisaram o mecanismo de funcionamento no interior do ciclone.

No ciclone separador, as partículas são removidas do gás através de forças centrífugas ascendentes em vórtex, MOTHEs e LOFFLER (1988). O fluxo gasoso juntamente com as partículas sólidas entram tangencialmente pela parte superior do ciclone, dando início ao movimento em vórtice o qual origina uma espiral gasosa descendente em seu interior. Devido à velocidade tangencial do gás, a força centrífuga faz com que as partículas mais densas se movam radialmente em direção à parede, e impulsionadas pelas forças gravitacionais e de fricção, escoam por esta e são coletadas na base cônica. O gás, já limpo, sai pelo topo do ciclone por intermédio da espiral ascendente central.

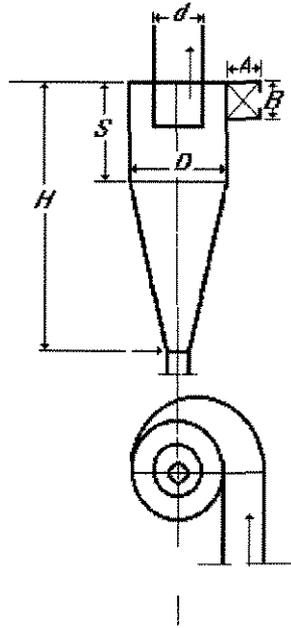


Figura 2.10 - Desenho ilustrativo do ciclone utilizado por ter LINDEN (1949).

Ao ser introduzido tangencialmente em espiral descendente, o gás tem seu deslocamento gradualmente radial em direção ao centro, até que atinja uma posição tal que o fluxo em espiral tenha sua direção radial invertida, isto é, torna-se ascendente mantendo o mesmo sentido de giro, saindo pelo extremo superior. A velocidade do gás é dividida em três componentes: a componente tangencial é a que predomina, e aumenta em direção ao eixo do ciclone seguindo o plano horizontal; a componente axial é descendente em relação à parte externa da região central e ascendente no interior da mesma; a componente radial atua em direção ao eixo do ciclone. Fazendo-se um balanço de forças entre as forças centrífuga e de arraste, verifica-se que a partícula é coletada se a primeira for maior, caso contrário, a partícula será arrastada pela parte superior do ciclone, na descarga de gases, GODOY (1989). Em suas investigações, ter LINDEN (1949) concluiu que a gravidade exerce pouquíssima influência na separação das partículas da corrente gasosa já que a eficiência do ciclone é praticamente independente da sua posição. Ressaltou ainda que, um bom ciclone deve ter uma capacidade satisfatória de separação, independente de sua posição.

Segundo BLOOR e INGHAM (1973) apud NEBRA (1985), existem três regiões bem definidas no interior no ciclone sendo uma situada junto às paredes externas, onde são considerados os efeitos viscosos; uma região intermediária onde há formação do vórtice que

ocupa aproximadamente  $2/5$  vezes o raio do ciclone; e a região interna, onde o movimento do fluido é ascendente e com características similares à rotação de um corpo rígido.

Como já fora mencionado, a componente tangencial da velocidade torna-se menor na região turbulenta, na qual é difícil fazer quaisquer medições mais apuradas. ter LINDEN (1949) observou que, nesta região, as componentes verticais e radiais assumem papéis importantes. O escoamento descendente ao longo das paredes, trajetória da velocidade vertical, garante o arraste das partículas (para a parte inferior coletora) que forem arremessadas em direção às paredes. É por este motivo que as forças da gravidade exercem uma influência muito pequena nesta parte. A velocidade radial, por toda a parte do ciclone, é aquela em direção ao centro, e tende a arrastar as partículas em direção à parede ou para o centro do ciclone. A região central não é propícia para a separação das partículas, pois neste ponto elas podem ser carregadas pelo escoamento vertical, saindo pela região de exaustão superior. Para garantir a eficiência de coleta neste caso, deve-se manter as partículas mais afastadas possível do centro.

Baseado nas informações acima, pode-se concordar com STAIRMAND (1951), que diz ser o objetivo do ciclone separador criar um vórtex, o qual centrifuga as partículas em direção à parede, que são coletadas posteriormente.

#### **2.5.4 - Descrição do escoamento das partículas**

Até por volta da década de 50, uma descrição exata e detalhada do escoamento no interior do ciclone, mesmo nos modelos mais simples, não era descrita com suficiente precisão, uma vez que o fenômeno que ocorria dentro do sistema era muito complexo. Todavia, segundo STAIRMAND (1951), todo o conhecimento que se tinha disponível até então sobre o assunto era suficiente para postular o fenômeno bem como o mecanismo de separação no ciclone, sem comprometer o estudo. Antes disso, porém, tais conclusões já haviam sido obtidas por ter LINDEN (1949), que dissera ser possível o uso de cálculos simples baseados em testes experimentais, para explicar as propriedades do ciclone, sua eficiência, queda de pressão, etc., com precisão suficiente em vários casos práticos.

A partir de alguns anos, pode-se dizer que já é bem descrito o escoamento das partículas no interior do ciclone, bem como sua disposição ao longo deste.

Segundo RANZ (1985), as partículas sólidas dispõem-se em espirais não uniformes ao longo da parede do ciclone de tal modo a se parecerem com “densas camadas líquidas”, sendo que é esta que escoam pela parede até o cone de coleta. Tal experimento foi realizado utilizando

partículas de areia e acoplando uma chapa de vidro transparente no topo do ciclone a fim de visualizar o fenômeno. RANZ (1985) ainda propôs um modelo cinético e um equacionamento matemático a fim de entender o mecanismo de formação das camadas fluidas. YEN et al. (1990) realizaram experimento semelhante utilizando um ciclone transparente e, embora com finalidades diferentes de RANZ (1985), também observaram que as partículas sólidas dispunham-se de maneira não-uniforme, movendo-se espiral e descendentemente ao longo das paredes do equipamento. Formaram-se aproximadamente cinco espirais de sólidos no ciclone e suas trajetórias dependiam do fluxo de gás, da alimentação das partículas e de seus tamanhos.

Uma descrição satisfatória do movimento da partícula no interior do ciclone, assim como sua remoção, poderia ser melhor compreendida através da simulação numérica do fluxo de gás e do movimento da partícula. MOTHESE E LOFFLER (1988) em seus estudos, descreveram o mecanismo de remoção da partícula no ciclone através do cálculo da trajetória das mesmas e medindo a velocidade do gás através de um velocímetro. Verificaram que a velocidade tangencial do gás dependia apenas do raio não sendo função da coordenada axial do ciclone; além disso, a variação radial da velocidade tangencial do gás era determinada pela geometria do ciclone, pela rugosidade da parede e pela concentração das partículas.

SZEKELY E CARR (1966), apesar de terem realizado suas pesquisas abordando principalmente a transferência de calor no ciclone, também postularam um modelo de escoamento no interior do ciclone. Porém seus trabalhos são contestados por muitos autores, uma vez que assumiram que as partículas sólidas se distribuem uniformemente nas paredes do ciclone. Estas hipóteses não vão de encontro às de BIFFIN et al. (1984), YEN et al.(1990), RANZ (1985) e de outros que assumem a disposição radial espiral não uniforme das partículas ao longo das paredes do ciclone.

### **2.5.5 - Transferência de calor e massa**

Ao contrário da descrição do escoamento no interior do ciclone, a transferência de calor no interior do ciclone ainda não está completamente descrita.

De acordo com SZEKELY E CARR (1966), uma grande variedade de trabalhos já foi realizada, mas muito pouco foi avaliado a respeito da transferência de calor e/ou de massa entre o gás e os sólidos ou entre a parede do ciclone e a corrente gás-sólidos. Porém, em seus experimentos realizados, os autores chegaram a algumas conclusões tais como: a taxa de transferência de calor da parede é afetada pela densidade, calor específico e tamanho das

partículas; a presença dos sólidos reduz muito a transferência de calor entre a parede e o gás, isto porque os sólidos formariam uma espécie de “barreira isolante” ao fluxo de calor. Uma observação importante decorrente das conclusões acima é a limitação do uso de ciclones como trocadores de calor quando a suspensão gás-sólido for muito concentrada e for desejada uma boa troca de calor entre o sólido e a parede.

Apesar das divergências relativas aos modelos de escoamento, as conclusões dos trabalhos de transferência de calor realizados por YEN et al. (1990) concordam com as de SZEKELY E CARR (1966), no tocante à influência dos particulados. Para uma vazão fixa de sólidos, por exemplo, o aumento da velocidade de entrada do gás melhora o movimento tanto do gás quanto do sólido, especialmente na parte inferior do ciclone.

### **2.5.6 - Queda de pressão**

Existem vários trabalhos que provam a redução da queda de pressão em ciclones pela presença de sólidos. YUU et al. (1978) concluíram que a presença das partículas depositadas aumenta o fator de fricção nas paredes do ciclone, resultando em uma diminuição da velocidade tangencial; mas esta diminuição era devido apenas às partículas aderidas à parede, e não àquelas presentes no próprio escoamento. Os pesquisadores provaram isto ao observar que a velocidade tangencial também decrescia (na ausência de partículas no gás), ao recobrirem as paredes do ciclone com uma camada líquida adesiva depositando as partículas sobre a mesma. YUU et al. (1978) concluíram que mesmo para concentrações de partículas extremamente baixas, a redução da queda de pressão ainda é considerável. Por outro lado, LITTLE JOHN e SMITH (1978) apud BEECKMANS e MORIN (1987) observaram que, para uma queda de pressão constante, o fluxo de entrada aumentava quando as partículas eram introduzidas juntamente com a corrente gasosa, sendo portanto, contraditórios em relação aos experimentos de YUU et al. (1978). BEECKMANS e MORIN (1987), em seus estudos, tentaram confirmar as conclusões de YUU et al. (1978) sobre as partículas depositadas nas paredes, obtendo resultados semelhantes. Além disso, também concluíram que a forma das partículas também influenciam a redução ou aumento da queda de pressão.

### **2.5.7 - Modelagem**

Como não faz parte do objetivo desta dissertação a abordagem numérica, serão mencionados apenas alguns trabalhos já realizados a respeito da modelagem realizada em ciclones, como de NEBRA (1985), que desenvolveu um modelo teórico da secagem do bagaço de cana-de-açúcar em um secador pneumático acoplado a um ciclone. GODOY (1989) estudou o tempo de permanência de partículas no ciclone, obtendo correlações dos tempos de permanência das partículas em função da concentração volumétrica das mesmas, bem como propôs um modelo matemático para o escoamento ar-partícula. SILVA (1991) desenvolveu um modelo teórico para secagem em ciclone, composto pelas equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento, em coordenadas cilíndricas e considerando o sistema bifásico.

### **3 - CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E GEOMÉTRICAS DO MATERIAL**

#### **3.1 - Introdução**

A caracterização das partículas sólidas constitui uma etapa fundamental, tanto para a realização de qualquer trabalho experimental que as utilize, quanto na indústria, pois vários parâmetros experimentais dependem de suas propriedades físicas, químicas ou geométricas.

MOHSENIN (1970) salientou a importância do conhecimento das propriedades e características físicas de materiais sólidos para o design de máquinas, estruturas, controle de processos e outros.

Segundo FOUST et al. (1982), o problema de caracterizar um sólido particulado qualquer está presente em toda a engenharia. Relativamente à engenharia química, os sólidos particulados estão presentes em muitas das operações unitárias como na moagem, secagem, filtração, coleta de pós, etc. Os autores enfatizam ainda as duas classes de propriedades dos sólidos: as propriedades relativas à partícula isolada e as relativas aos vazios existentes entre elas. Cabe salientar que, as propriedades relativas à fase constituída pelos vazios entre as partículas sólidas dependem das propriedades de cada partícula, porém as primeiras devem ser expressas de modo a levar em consideração a influência de uma partícula sobre a outra. Este problema torna-se complicado quando há uma grande faixa de dimensões, grande variedade de formas bem como diferenças na composição.

Com o objetivo de obter o material para o trabalho, foi feita uma pesquisa no Catálogo da Associação Brasileira das Indústrias da Alimentação, ABIA (1995), a fim de saber quais indústrias processavam o milho em conserva. Tal procedimento foi necessário pois aquelas que apenas fabricavam produtos à base de milho, compravam a matéria prima previamente debulhada, isto é, em grãos, não dispoendo, portanto, do sabugo. Identificadas as indústrias, foram descartadas as que se localizavam em outros estados ou que fossem muito distantes da cidade de Campinas, devido à possibilidade de fermentação e/ou deterioração do sabugo durante o transporte, pois o material possui um alto teor de umidade.

A seguir apresenta-se as indústrias processadoras localizadas relativamente próximas de Campinas:

- Companhia Industrial Mercantil Paoletti - Cajamar/SP,
- Conservas Angelo Aurichio - Espírito Santo de Pinhal/SP,
- Conservas PEIXE - Taquaritinga/SP.

Na época em que foi contactada, a Companhia Industrial Mercantil Paoletti estava processando apenas o tomate, estando a planta de processamento de milho temporariamente parada. A Angelo Aurichio (Conservas OLE), após a garantia de fornecimento semanal de sabugo de milho já moído, também decidiu parar sua planta processadora de sabugo temporariamente. A PEIXE, a qual foi visitada, dispunha de um resíduo completamente disforme composto pelo sabugo, palha e talos de milho, tornando-se inviável para a realização deste trabalho. A relação de todas as indústrias consultadas estão no Apêndice C deste trabalho.

Recorreu-se, portanto, ao estabelecimento comercial “Casa da Pamonha” localizado na cidade de Sumaré, Estado de São Paulo, que se dispôs a fornecer semanalmente o sabugo de milho inteiro. O sabugo foi moído em moinho de martelo da marca “Tiger”, do tipo C.V. 2, 3800 RPM, na planta piloto da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP, em dois níveis de granulometria.

Para o sabugo de milho, foram realizados os seguintes testes de caracterização:

- granulometria
- diâmetro médio
- ângulo de talude
- densidade aparente
- densidade efetiva
- porosidade
- velocidade terminal
- umidade
- calor específico
- poder calorífico
- composição física

Para que um material seja satisfatoriamente caracterizado, a determinação do seu tamanho exerce um papel fundamental, pois, em certas aplicações, o tamanho da partícula afeta significativamente o processo, MOHSENIN (1970). Testes de caracterização para o tamanho da

partícula, no presente trabalho, consistiram na determinação da granulometria e do diâmetro médio. No presente trabalho, foi utilizada a média Sauter (volumar-aureolar), pois além de ser a mais utilizada na engenharia química, pode ser determinada a partir da análise granulométrica.

O ângulo de talude (ou de repouso) é o ângulo que o material, quando empilhado, forma com a horizontal. É fortemente influenciado pela natureza do material como tamanho, forma e teor de umidade. A importância da determinação do ângulo de talude de partículas sólidas consiste no fato deste ser um parâmetro fundamental para o desenho de vários equipamentos como silos, por exemplo, (VEGA & ALVAREZ, 1996).

O conhecimento da densidade aparente do material também é um dado essencial para o dimensionamento de silos e correias transportadoras, pois relaciona a massa (ou o peso) com o volume total ocupado. A densidade aparente, juntamente com a densidade efetiva, permitem o cálculo da porosidade do leito (ou fração de vazios), a qual é importante para aplicação da movimentação de ar no interior da massa. Além disso, a porosidade tem grande influência na queda de pressão do escoamento.

A velocidade terminal é importante para aplicações de suspensão do material num fluxo de ar.

Como em qualquer experimento de secagem, fez-se necessária a determinação dos teores de umidade presentes no material, pois este fator é preponderante para o acompanhamento da secagem, para a determinação da quantidade de energia necessária para o processo, bem como para a escolha do tipo de secador a ser utilizado.

Como um dos objetivos do presente trabalho consiste na secagem ciclônica de sabugo de milho para posterior utilização energética, é de suma importância a determinação do poder calorífico do material.

Faz-se necessário salientar que não foram encontrados na literatura, trabalhos experimentais relativos a alguns testes de caracterização das partículas de sabugo de milho, não sendo possível, portanto, uma análise comparativa satisfatória dos resultados obtidos neste trabalho.

## **3.2 - Metodologia**

### **3.2.1 - Análise granulométrica**

A granulometria foi determinada pelo método das peneiras padronizadas, e antes da realização do método propriamente dito, foram feitos alguns preliminares a fim de selecionar

quais as faixas de abertura de peneiras seriam apropriadas para o material. O critério de seleção estabelecido foi em relação as massas que restavam nas peneiras, as quais deveriam distribuir-se em cada uma delas de maneira uniforme. Na Tabela 3.1 encontram-se as peneiras selecionadas com as respectivas aberturas, seguindo a série de Tyler com razão  $\sqrt{2}$ . A Tabela 3.2 apresenta o conjunto de peneiras com os diâmetros médio das partículas retidas com base na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Peneiras Tyler Standards selecionadas para o teste de granulometria

Tyler	Abertura, mm
3	6,35
4	4,76
6	3,36
8	2,38
10	1,68

Tabela 3.2 - Conjunto de peneiras selecionadas com os diâmetros médios das partículas retidas

Peneira ABNT	Diâmetro médio das partículas retidas, mm
+3	< 6,35
-3+4	5,55
-4+6	4,060
-6+8	2,870
-8+10	2,030
-10	> 1,68

Para as duas faixas foram tomadas três amostras, pelo método manual das divisões sucessivas proposto por FOUST et al (1982), de aproximadamente 200 gramas cada uma, e peneiradas em um peneirador vibratório da marca “Produ-Test” por 20 minutos. Os testes foram realizados para diferentes teores de umidade.

### 3.2.2 - Diâmetro médio

O diâmetro médio das partículas foi calculado pela média de Sauter através da Equação 3.1, FOUST et al.

$$D_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{\phi_m(D_{pi})\Delta D_{pi}}{D_{pi}}} \quad (3.1)$$

onde:

$\phi_m(D_{pi})\Delta D_{pi}$  = fração ponderal retida na peneira

$D_{pi}$  = diâmetro médio das partículas retidas

### 3.2.3 - Ângulo de talude

O ângulo de talude foi determinado no laboratório da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP em um equipamento construído na própria faculdade. O equipamento está esquematizado na Figura 3.1.

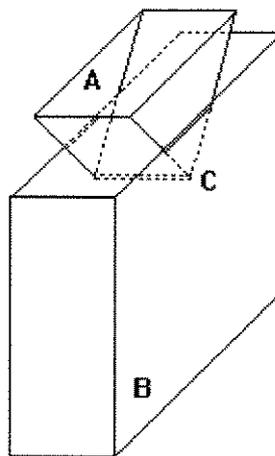


Figura 3.1 - Esquema do equipamento utilizado para medir o ângulo de talude

Consiste em uma caixa retangular com as seguintes dimensões: 50 cm de comprimento, 20 cm de largura e 40 cm de comprimento, construída em acrílico transparente. É dotado de um recipiente piramidal onde a matéria prima é depositada, e de uma moega para o escoamento da mesma para o interior da caixa. Para a leitura do ângulo formado com a horizontal, foi utilizado um dispositivo dotado de um transferidor.

O ângulo foi obtido através da média aritmética dos ângulos formados com os quatro vértices da caixa retangular. Foram feitas cinco repetições.

### 3.2.4 - Densidade aparente

A densidade aparente também foi determinada na Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, em um aparelho próprio para tal fim. Uma certa quantidade de material seco foi depositada em um funil e posteriormente escoada em queda livre para um outro recipiente de volume já conhecido. Conhecida a massa de material depositada no recipiente, a densidade aparente foi calculada, através da média obtida de cinco repetições, utilizando-se a Equação 3.2.

$$\rho_{(ap)} = \frac{\text{massa de material seco (g)}}{\text{volume do recipiente (cm}^3\text{)}} \quad (3.2)$$

### 3.2.5 - Densidade efetiva

A densidade efetiva do material seco foi determinada pelo Instituto de Química da UNICAMP, utilizando-se o método de picnometria de multivolume, em um aparelho da marca Picnometer 1305. Tal procedimento foi adotado por não ser possível a realização deste teste por picnometria comum, uma vez que, para os líquidos disponíveis, o material sólido flutuava. Foram feitas três repetições.

O princípio básico para a determinação da densidade neste aparelho, consistia na observação da redução do volume de gás (hélio, neste caso) na câmara da amostra, causada pela própria presença da amostra.

### 3.2.6 - Porosidade

Calculou-se a porosidade do material através da Equação 3.3.:

$$\varepsilon = 1 - \frac{P_{(ap)}}{P_{(ef)}} \quad (3.3)$$

### 3.2.7 - Teor de umidade

A metodologia adotada para a determinação da umidade do sabugo de milho foi a do método direto, o qual é, geralmente, utilizado para a determinação da umidade de grãos. Consiste em remover a umidade do sólido, determinando posteriormente seu peso ou volume. No presente trabalho, o método consistiu em deixar as amostras em estufa, pesando-as em determinados intervalos de tempo até que não houvesse mais variação de massa. Estas determinações foram feitas para as duas granulometrias disponíveis e consistia em pesar três amostras úmidas com aproximadamente 10 gramas cada. As amostras permaneciam por 30 horas na estufa com temperatura de 100 °C. O tempo fora previamente selecionado pois não fora observada variação adicional de massa após este intervalo. Determinada a massa seca, calculou-se as umidades em base úmida e seca através das Equações 3.4 e 3.5, respectivamente. As pesagens foram feitas em uma balança analítica marca AND, modelo HR-60, com precisão de 0,0001g.

$$X_{bu} = \frac{\text{(massa de água)}}{\text{(massa de material úmido)}} \quad (3.4)$$

$$X_{bs} = \frac{\text{(massa de água)}}{\text{(massa de material seco)}} \quad (3.5)$$

### 3.2.8 - Calor específico

A metodologia empregada para o cálculo do calor específico foi baseada em WORSNOP (1964). Para determinar o calor específico da amostra, foi determinado, primeiramente, o calor

específico do tubo de Dewar. A Equação 3.6 descreve o balanço para o sistema garrafa-água em equilíbrio:

$$m_{ag} c_{p_{ag}} [T_{i_{ag}} - T_{f_{sist}}] = m_{tubo} cp_{tubo} [T_f - T_{i_{tubo}}] \quad (3.6)$$

Onde:  $m_{tubo} cp_{tubo} = W =$  equivalente em água da garrafa.

Para determinar o calor específico da amostra:

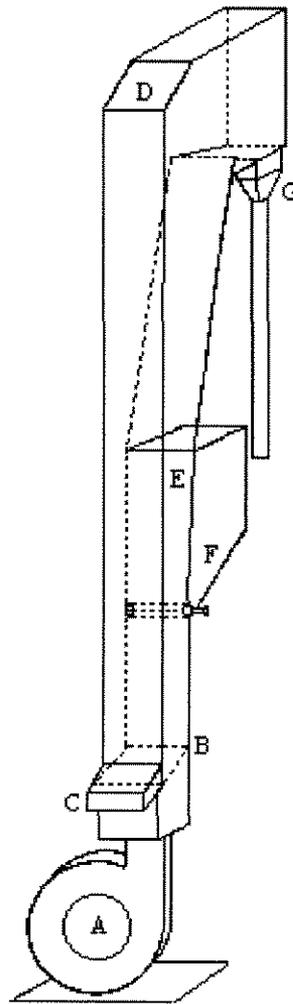
$$m_{ag} cp_{ag} (T_{i_{ag}} - T_f) = (W + m_{am.} cp_{am.}) (T_f - T_{i_{tubo}}) \quad (3.7)$$

A metodologia completa para a determinação do calor específico da amostra de sabugo de milho está descrito no Apêndice A deste trabalho.

### 3.2.9 - Velocidade terminal

Para determinar a velocidade terminal das partículas foi utilizado um aparelho construído pela Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, cujo esquema está apresentado na Figura 3.2.

Consistia, basicamente, em uma coluna vertical de seção transversal retangular em acrílico. A alimentação era feita pela parte superior da coluna. Um fluxo de ar, controlado para proporcionar uma flutuação uniforme das partículas ao longo da coluna, era injetado na coluna através de um ventilador centrífugo ( marca Jomar, tipo FT2, 1 cv, 2,2 A, 3600 rpm e 220/380 V). Para medir a velocidade, foi colocado na corrente de ar um tubo de Pitot.



Onde:

A - ventilador centrífugo

B - tela

C - saída do produto

D - registro de entrada do produto

E - adaptação para o tubo de Pitot

F - depósito de material

G - saída do material leve

Figura 3.2 - Esquema da coluna pneumática para determinação da velocidade terminal.

### 3.2.10 - Determinação do poder calorífico

O poder calorífico da amostra seca de sabugo de milho foi determinado através de uma bomba calorimétrica, do laboratório do Departamento de Térmica e Fluidos na Faculdade de Engenharia Mecânica, através do método da ABNT, norma P-MB-454-IBP, de 1968. A metodologia para a determinação do poder calorífico foi extraída da norma P-MB-454-IBP-ABNT de 1968 e sintetizada em um apostila didática. Um desenho esquemático da bomba calorimétrica está apresentado na Figura 3.3.

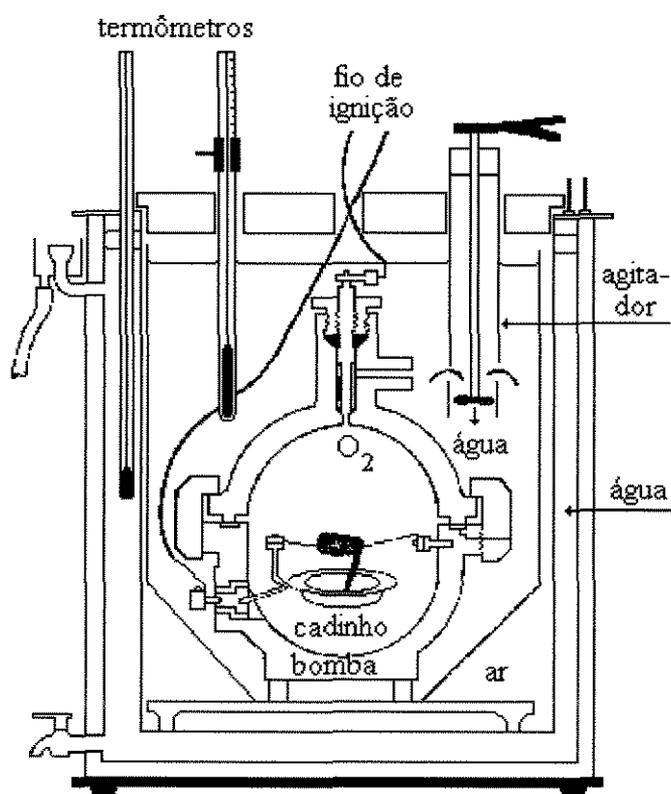


Figura 3.3 - Esquema da bomba calorimétrica.

A bomba calorimétrica é um equipamento frequentemente utilizado para a determinação do poder calorífico tanto de combustíveis sólidos, quanto líquidos. A metodologia consistiu na introdução da amostra do combustível em um recipiente metálico com atmosfera de oxigênio sob alta pressão, mergulhando-se a bomba em um recipiente de parede dupla e fazendo-se a ignição do combustível através de uma conexão elétrica externa. Mediu-se a temperatura da água em função do tempo antes e depois do processo de ignição. Sendo conhecidos a massa de água do sistema, a massa e o calor específico do recipiente e as curvas de aquecimento e

resfriamento da água, pode-se, a partir daí calcular a energia liberada durante o processo de combustão.

O poder calorífico da amostra seca foi calculado a partir da Equação 3.8:

$$H_s = \frac{T A - e_1 - e_2 - e_3}{p} \quad (3.8)$$

Uma descrição mais detalhada do método bem como todas as equações e constantes utilizadas, encontra-se no Apêndice A deste trabalho.

### 3.2.11 - Composição física

A composição física do sabugo de milho foi realizada no sentido de determinar os percentuais de cada componente presente no sabugo. CLARK e LATHROP (1953) apud BAGBY e WIDSTROM (1984) apresentam tal composição (item 2.2.5), porém sem especificar o teor de umidade da amostra.

## 3.3 - Apresentação dos resultados e análise

Os resultados dos testes de granulometria, em quatro teores de umidade, estão apresentados na Tabela 3.3.

Observando a última linha observa-se que, à medida que a umidade das partículas diminui, maior é a quantidade de partículas que resta na peneira. Tal conclusão, também observada por SILVA (1991), já era esperada, uma vez que, quando secas, as partículas perdem aderência ou sofrem desagregação. Além disso, muitos materiais biológicos com alto teor de umidade inicial, tendem a sofrer significativa contração de volume ao sofrerem um processo de secagem, ABALONE et al. (1994). Especificamente em relação ao sabugo de milho, QUIRINO & ALSINA (1986), já observaram um efeito de encolhimento o qual ocorre durante a secagem. Este efeito será mais acentuado quanto maior for o teor de umidade inicial do material.

Todos os valores de umidade estão expressos em base seca.

Tabela 3.3 - Análise granulométrica do sabugo de milho em quatro teores de umidade.

Peneira	Diâmetro, mm	Teor de umidade, (b.s.), %			
		0,11	1,34	2,06	2,73
		Fração ponderal retida na peneira, %			
+ 3	< 6,35	11,20	14,69	19,98	20,45
- 3+4	5,689	11,05	14,15	15,92	16,13
- 4 + 6	4,013	23,74	27,05	23,85	27,50
- 6 + 8	2,844	20,25	16,39	17,57	15,98
- 8 + 10	2,006	12,98	9,01	10,56	11,70
- 10	> 1,68	20,76	18,41	12,10	8,24

As Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam os resultados da Tabela 3.3 em termos da fração acumulada. Estas curvas, segundo FOUST et al (1982), mostram a fração ponderal acumulada com tamanhos menores que os das abscissas correspondentes. A Figura 3.8 mostra o gráfico comparativo entre as Figuras 3.4 a 3.7.

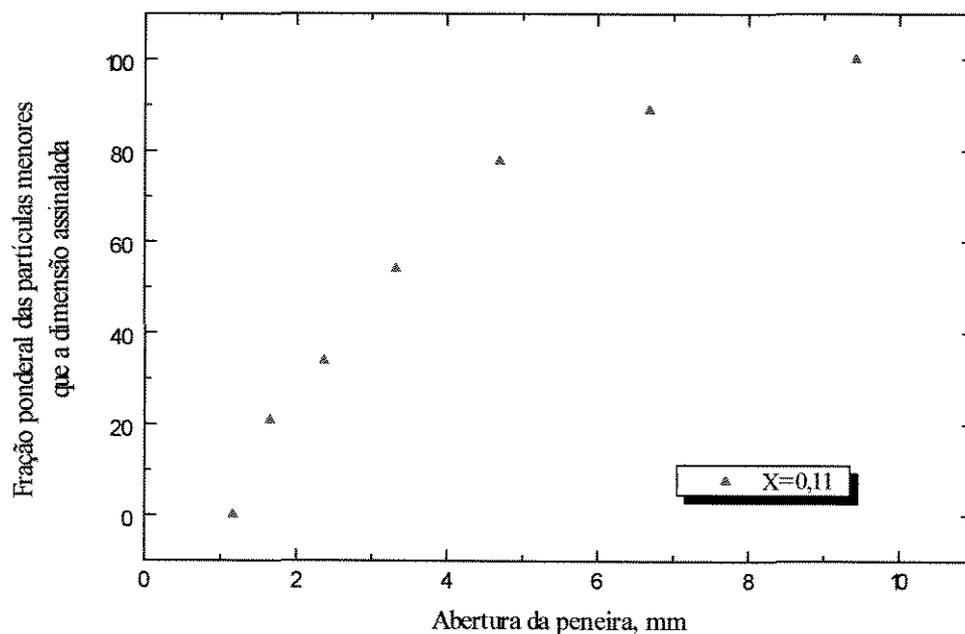


Figura 3.4 - Curva das frações ponderais acumuladas resultante da análise de peneira da Tabela 3.3 para X = 0,11 (b.s.)

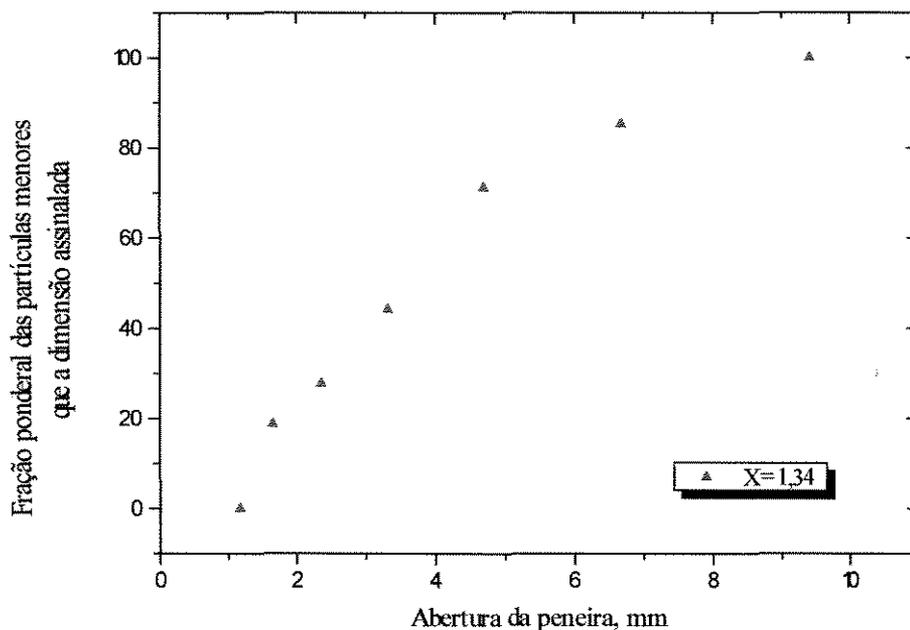


Figura 3.5 - Curva das frações ponderais acumuladas resultante da análise de peneira da Tabela 3.3 para X = 1,34 (b.s.).

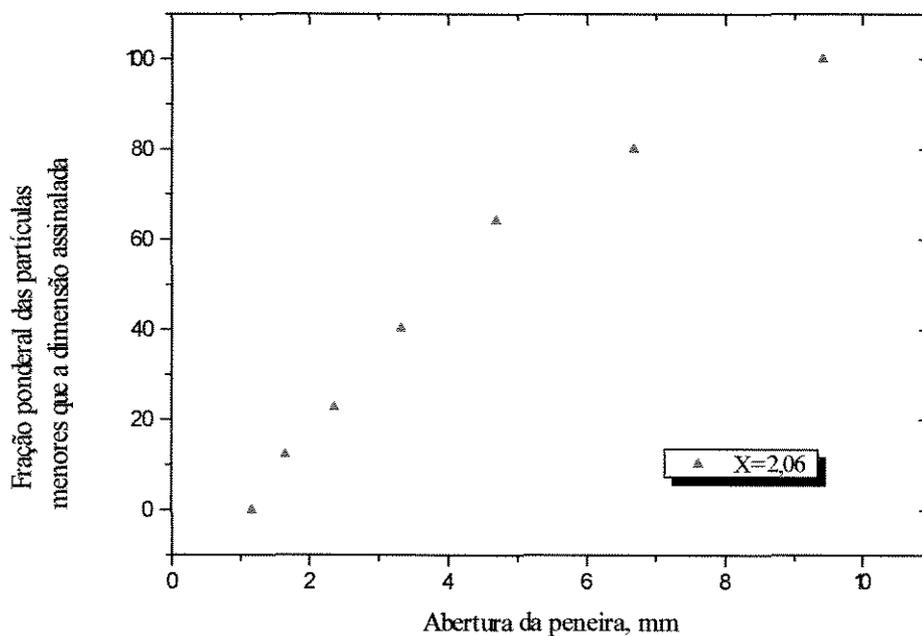


Figura 3.6 - Curva das frações ponderais acumuladas resultante da análise de peneira da Tabela 3.3 para X = 2,06 (b.s.).

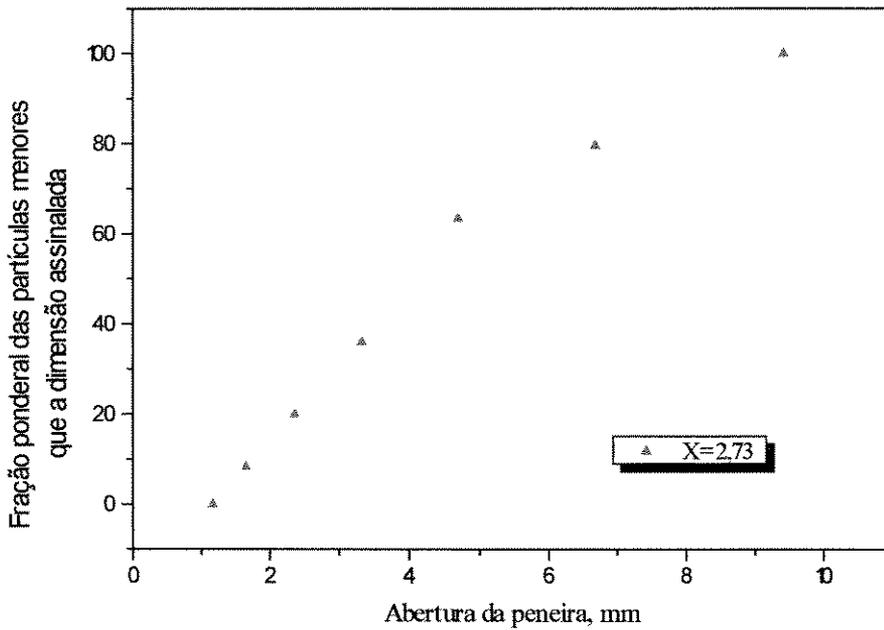


Figura 3.7 - Curva das frações ponderais acumuladas resultante da análise de peneira da Tabela 3.3 para X = 2,73 (b.s.).

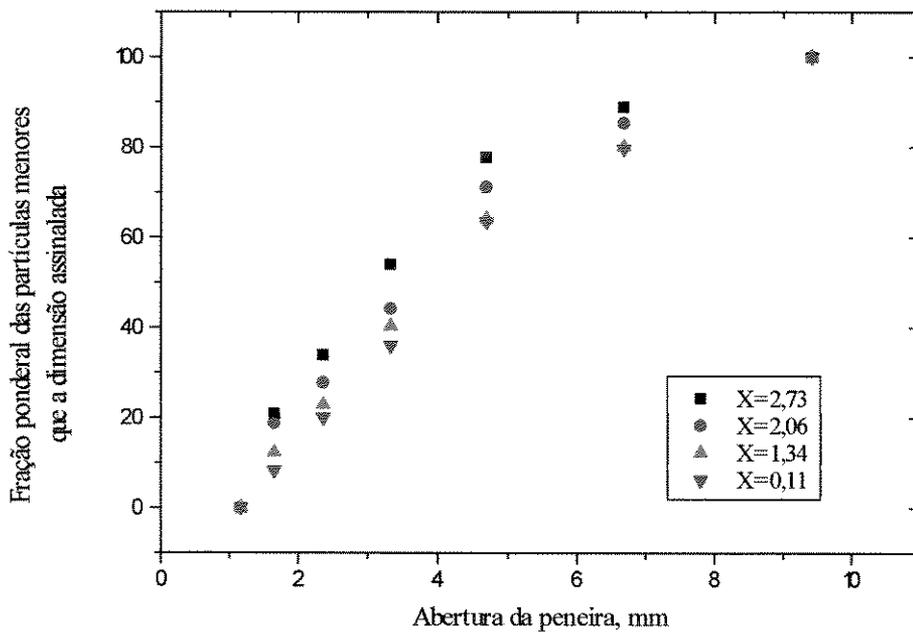


Figura 3.8 - Curva das frações ponderais acumuladas resultante da análise de peneira da Tabela 3.3 para os quatro teores de umidade estudados.

As Figuras 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12 apresentam graficamente os resultados da Tabela 3.3. Observa-se que a primeira coluna dos histogramas aumenta à medida que o teor de umidade das partículas diminui, confirmando graficamente que, quanto menor o teor de umidade, maior a quantidade de partículas finas nas últimas peneiras.

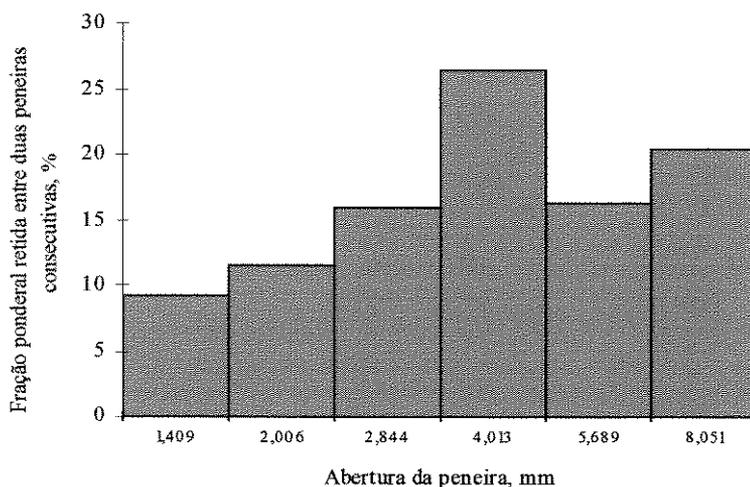


Figura 3.9 - Histograma da análise de peneira baseado da Tabela 3.3 para X = 2,73 (b.s).

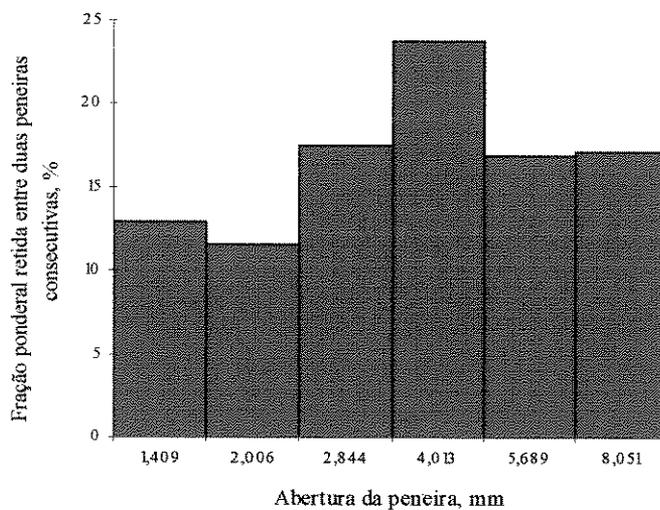


Figura 3.10 - Histograma da análise de peneira da Tabela 3.3 para X = 2,06 (b.s.).

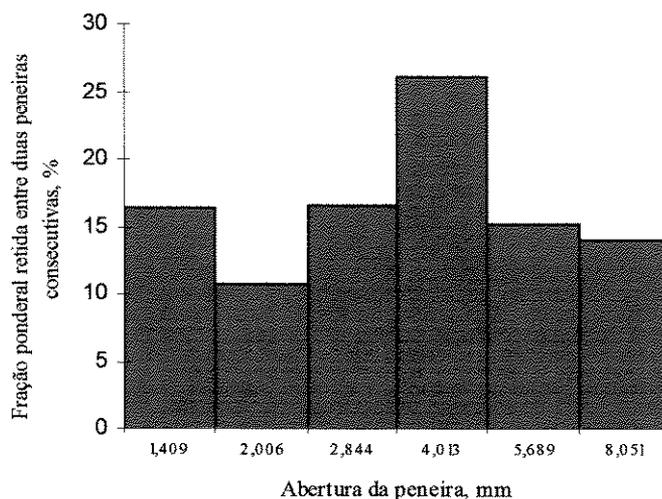


Figura 3.11 - Histograma da análise de peneira da Tabela 3.3 para  $X = 1,34$  (b.s.).

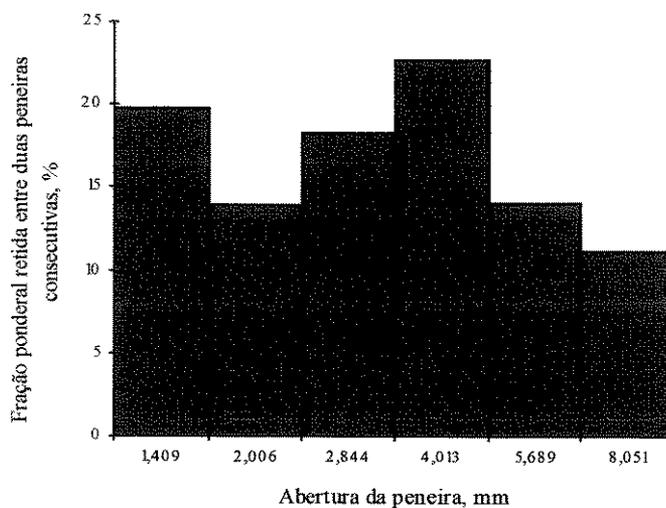


Figura 3.12 - Histograma da análise de peneira da Tabela 3.3 para  $X = 0,11$  (b.s.).

A Tabela 3.4 apresenta, para diferentes teores de umidade, os resultados obtidos para o diâmetro médio da partícula, densidade aparente, densidade efetiva, porosidade e ângulo de talude, respectivamente.

Tabela 3.4 - Características das partículas de sabugo de milho

<b>Teor de umidade (b.s.)</b>	<b>Diâmetro médio, mm</b>	<b>Densidade aparente, g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Porosidade</b>	<b>Ângulo de talude, graus</b>
2,73	3,33	0,103	0,91	34,4
2,06	3,11	0,110	0,90	34,4
1,34	2,96	0,115	0,90	34,8
0,11	2,70	0,122	0,89	35,1

Em consequência da análise granulométrica já descrita nos parágrafos anteriores, pode-se concluir, pela Tabela 3.4, que o diâmetro médio da partícula diminui com a redução da umidade. Observou-se que, para uma redução de 96 % (em base seca), em relação ao primeiro teste, no teor de umidade das partículas de sabugo de milho, a redução do diâmetro foi de apenas 19 %.

O valor obtido para a densidade efetiva do material completamente seco foi de 1,177 g/cm<sup>3</sup>.

A Tabela 3.5 apresenta os resultados da velocidade terminal das partículas em função do diâmetro médio, e como era esperado, as partículas de diâmetro maior apresentaram maiores velocidades terminais.

Para as partículas de sabugo de milho foram obtidos os seguintes valores para o poder calorífico e para calor específico respectivamente: 3796,36 kcal/kg seco e 0,782 kcal/ kg °C. Pela Tabela 3.6 pode-se fazer uma comparação entre o poder calorífico determinado neste trabalho com de outros autores. Observa-se um valor dentro da faixa em relação aos da literatura.

Tabela 3.5 - Velocidade terminal das partículas

<b>Teor de umidade (b.s.)</b>	<b>Diâmetro médio, mm</b>	<b>Velocidade terminal, m/s</b>
2,73	3,33	11,013
2,06	3,11	9,802
1,34	2,96	8,500
0,11	2,70	8,128

Tabela 3.6 - Comparação do poder calorífico obtido com outros trabalhos

<b>Poder calorífico, kcal/kg (seco)</b>	<b>Autor</b>
3804,35	KUMAR et al (1984) apud SILVA (1991)
3752	FOLEY e VANDER HOOVEN (1981)
3796,36	presente trabalho

A Tabela 3.7 apresenta os resultados obtidos da composição física do sabugo de milho. Como os dados obtidos na literatura não apresentaram o teor de umidade em que foi determinada a composição física, não foi possível fazer uma comparação entre os valores obtidos neste trabalho. Porém, observa-se que os resultados obtidos neste trabalho, estão na mesma ordem de grandeza dos percentuais da literatura.

Tabela 3.7 - Composição física do sabugo de milho para 73 % de umidade (b.u.), juntamente com os dados da literatura.

<b>Componente</b>	<b>% (neste trabalho)</b>	<b>% (CLARK e LATHROP)</b>
anel lenhoso	57,35	60,30
palha	36,04	37,80
medula	6,61	1,90

## **4 - CINÉTICA DE SECAGEM**

### **4.1 - Introdução**

No presente trabalho, a cinética de secagem foi realizada de maneira qualitativa, sendo uns dos motivos, a própria limitação do aparelho utilizado para a realização dos testes. No entanto, o estudo da cinética de secagem teve grande importância pois possibilitou a determinação do teor de umidade de equilíbrio do material, a estimativa do tempo de secagem, etc.

No aparelho utilizado, a amostra permanecia estática e o fornecimento de calor era por radiação (não havendo, portanto, convecção) e sem sistema de exaustão de ar. Com isso, a umidade relativa do ambiente era gradativamente alterada. Outra limitação do aparelho era a impossibilidade de variar a temperatura, não sendo possível, portanto, obter dados para a curva de teor de umidade em função desta. Em consequência disto, não foram indicados os parâmetros considerados importantes no estudo da cinética de secagem como umidade relativa, vazão e temperatura do ar.

Caso se comportassem como grãos, as partículas de sabugo de milho talvez não apresentassem o período de secagem à taxa constante, pois de acordo com BROOKER et al (1974), grãos e cereais em geral apresentam apenas o período de secagem à taxa decrescente.

Como já fora mencionado na revisão bibliográfica, a secagem cessa quando o teor de umidade de equilíbrio é atingido (nas condições em que foram realizados os experimentos), isto é, quando a pressão de vapor na superfície do sólido for igual à pressão parcial do vapor no agente secante.

### **4.2 - Experimentos de cinética**

No presente estudo, a cinética de secagem foi determinada utilizando-se uma balança de umidade digital da marca A&D, modelo AD-4713, com erro de 0,1%, mostrada na Figura 4.1.

Foram realizados os seguintes testes em relação ao material:

- cinética das partículas de sabugo de milho moído com diferentes teores de umidade inicial,

- cinética de fatias de sabugo de milho com diferentes espessuras,
- cinética das diferentes partes do sabugo: anel lenhoso, palha e medula.

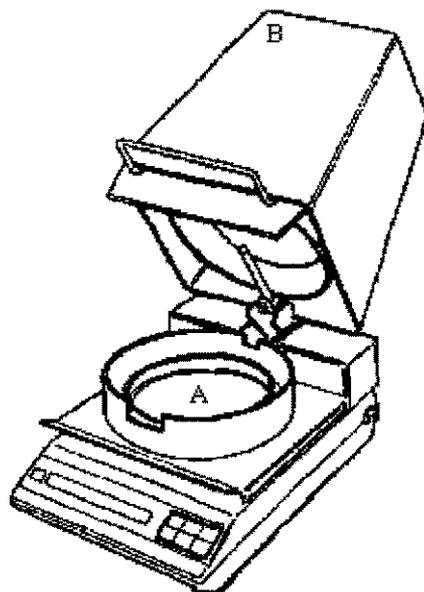


Figura 4.1 - Balança de umidade digital utilizada para os testes de cinética de secagem.

Para as partículas moídas, foram feitos testes em quatro níveis de umidade, sendo que cada amostra pesava aproximadamente 10 gramas. Cada amostra era colocada no compartimento A, fechando em seguida o compartimento B (Figura 4.1). A temperatura utilizada foi de 100 °C, e o teste finalizava quando o display não acusava mais variação de massa do material com o tempo.

Em relação às fatias, foram feitos testes de cinética com as espessuras de 1 cm, 5 mm e 1mm. Para que não houvesse variação no teor de umidade inicial das amostras, estas foram mantidas em saquinhos plásticos fechados hermeticamente. Para as fatias com espessura de 1 cm, os testes foram feitos em duas posições diferentes: uma “ em pé ”, onde a seção transversal da fatia permaneceu em contato com o prato amostrador (compartimento “A”) e “ deitada ”, onde a parte externa da fatia relativa à palha grossa permaneceu em contato com o prato amostrador.

Em seguida, foram cortadas fatias finas de aproximadamente 2 mm e extraídas cuidadosamente suas três partes distintas. A cinética foi feita para cada uma delas separadamente.

Para cada um destes casos, foram determinadas as curvas de secagem e de taxa de secagem, sendo que as últimas possibilitaram verificar os períodos de secagem presentes no processo.

### 4.3 - Resultados obtidos e análise

As curvas de secagem para as partículas em diferentes teores de umidade estão apresentadas na Figura 4.2.

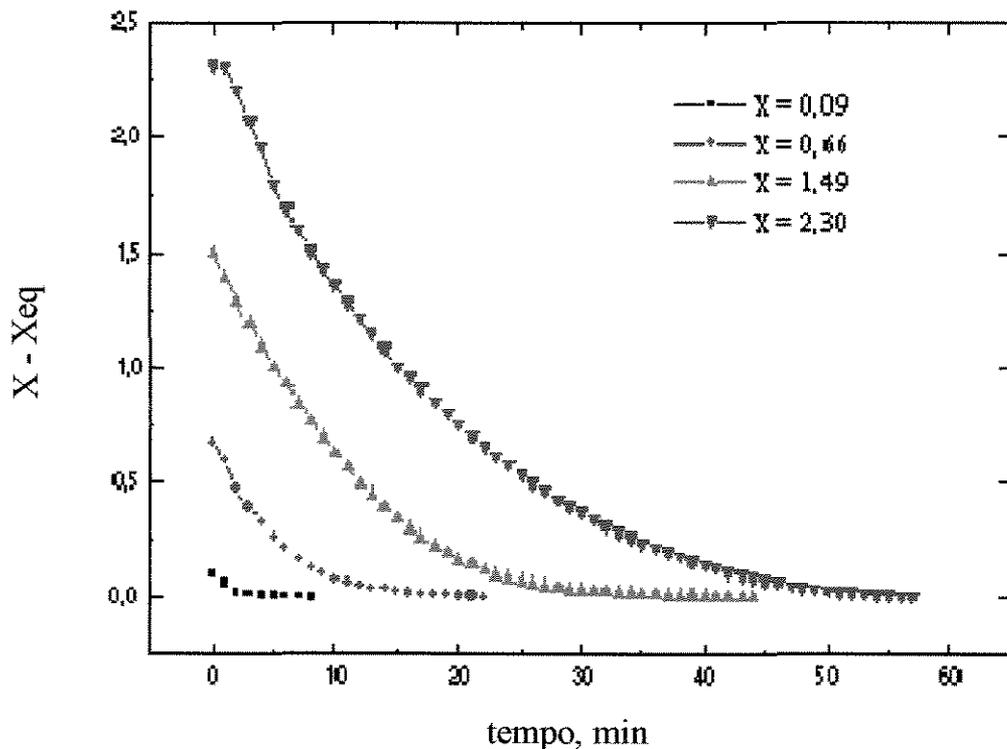


Figura 4.2 - Curvas de secagem das partículas de sabugo de milho para diferentes teores de umidade inicial.

Segundo STRUMILLO e KUDRA (1986) a variação da umidade do material com o tempo é fortemente influenciada pelos parâmetros do processo pelo qual ocorre a secagem, como a temperatura, teor inicial de umidade e pressão. Pode-se observar na Figura 4.2 que as amostras com menores teores de umidade inicial obtiveram um tempo menor para atingir o teor de umidade de equilíbrio, nas condições em que foram realizados os experimentos.

A Figura 4.3 mostra as curvas de secagem de fatias cortadas em três espessuras diferentes. Para teores de umidade inicial relativamente próximos, o parâmetro espessura

influenciou o tempo de secagem das amostras, sendo que a amostra de espessura 1 cm levou o dobro do tempo para atingir o teor de umidade de equilíbrio.

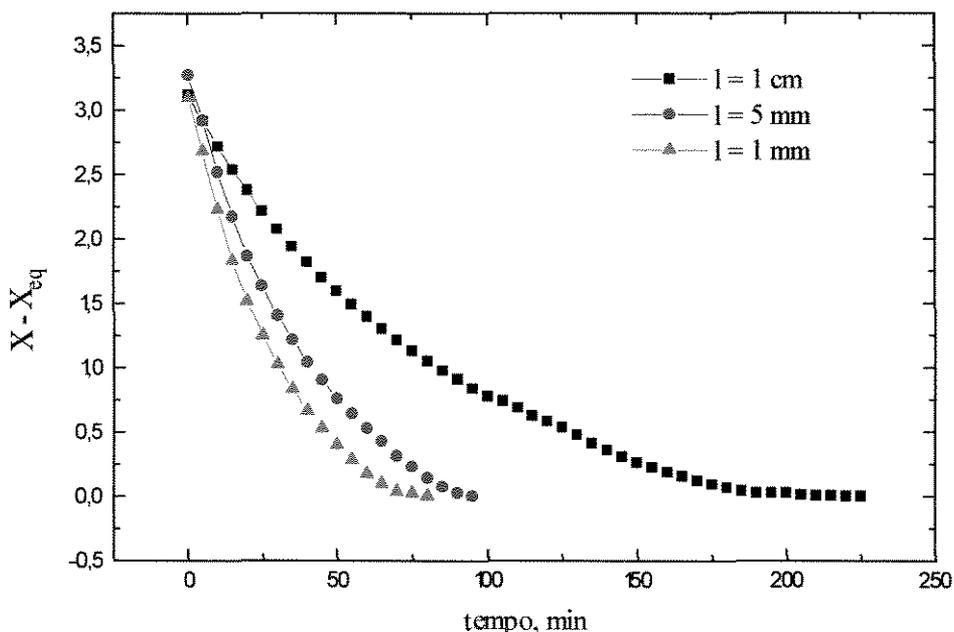


Figura 4.3 - Curvas de secagem de fatias de sabugo de milho em três espessuras diferentes.

Na Figura 4.4 estão apresentadas as curvas de secagem para as amostras de espessura 1 cm em duas posições. A posição “em pé” levou um tempo maior para atingir o teor de umidade de equilíbrio em relação à outra posição.

As Figura 4.5, 4.6 e 4.7 mostram as curvas de secagem para cada uma das partes do sabugo de milho (ver figura 2.2):

- medula
- anel lenhoso
- palha.

Observou-se que a medula “perde água” muito rapidamente, em relação as outras partes, levando um tempo aproximadamente 75 % menor que o anel lenhoso e 50 % menor que a palha para que o teor de umidade de equilíbrio seja atingido, nas condições em que foram realizados os experimentos de cinética. Nas Figuras 4.8 e 4.9 estão plotadas as curvas relativas às partes constituintes do sabugo para fins comparativos. Estas figuras mostram que as curvam em que

está presente o anel lenhoso tenderam a levar tempos maiores para atingir o teor de umidade de equilíbrio.

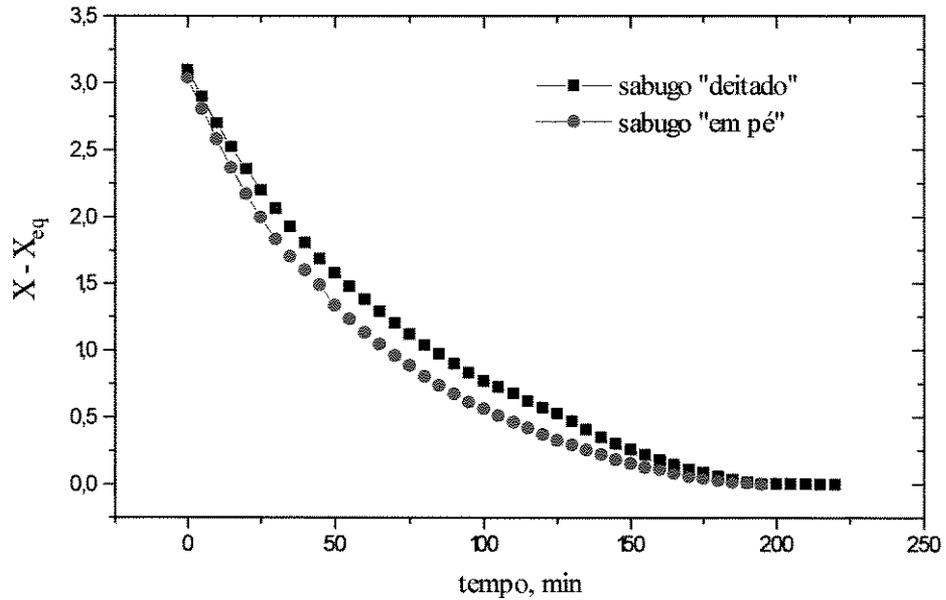


Figura 4.4 - Curvas de secagem do sabugo em duas posições diferentes.

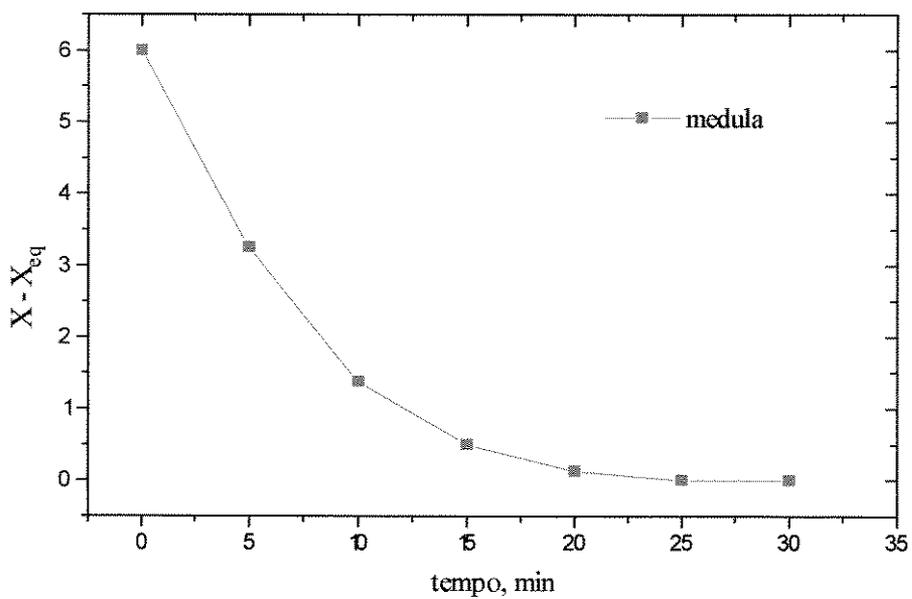


Figura 4.5 - Curva de secagem da medula do sabugo de milho.

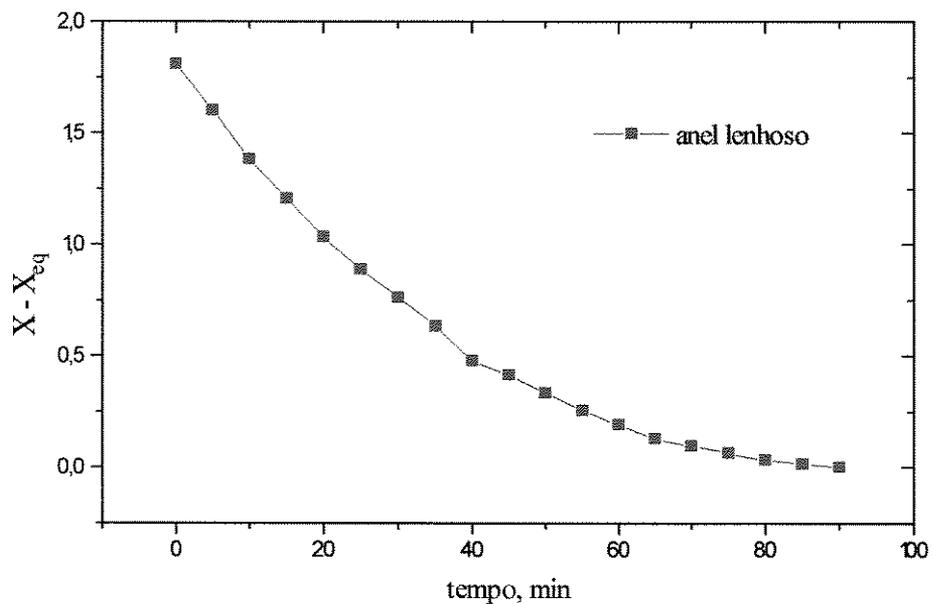


Figura 4.6 - Curva de secagem do anel lenhoso do sabugo de milho.

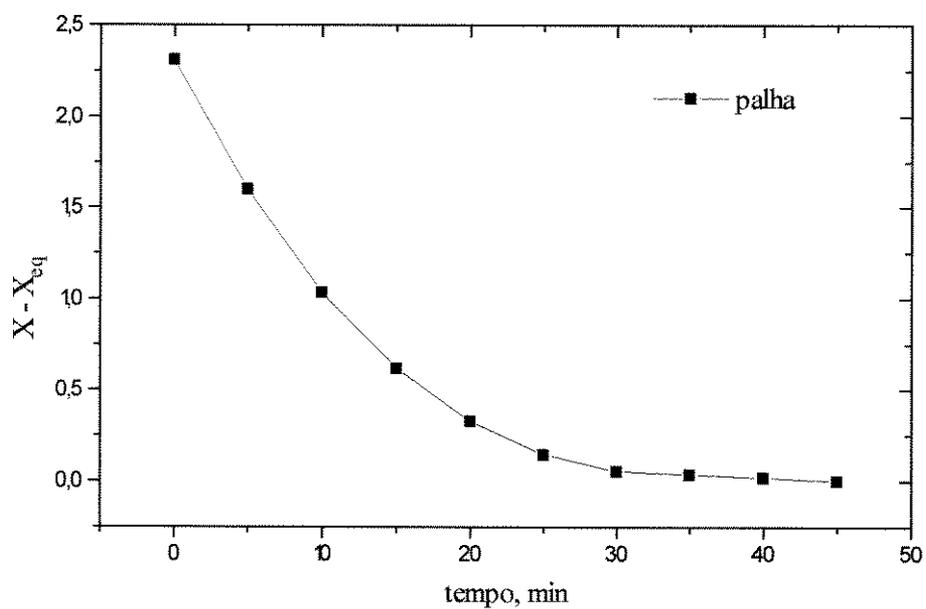


Figura 4.7 - Curva de secagem da palha do sabugo de milho.

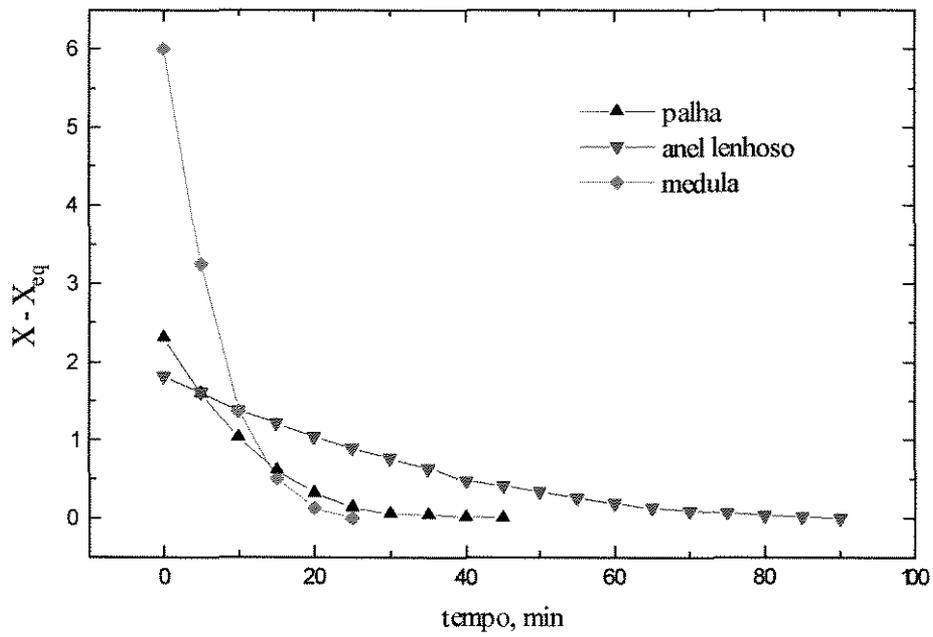


Figura 4.8 - Curva de secagem de cada parte separada do sabugo de milho.

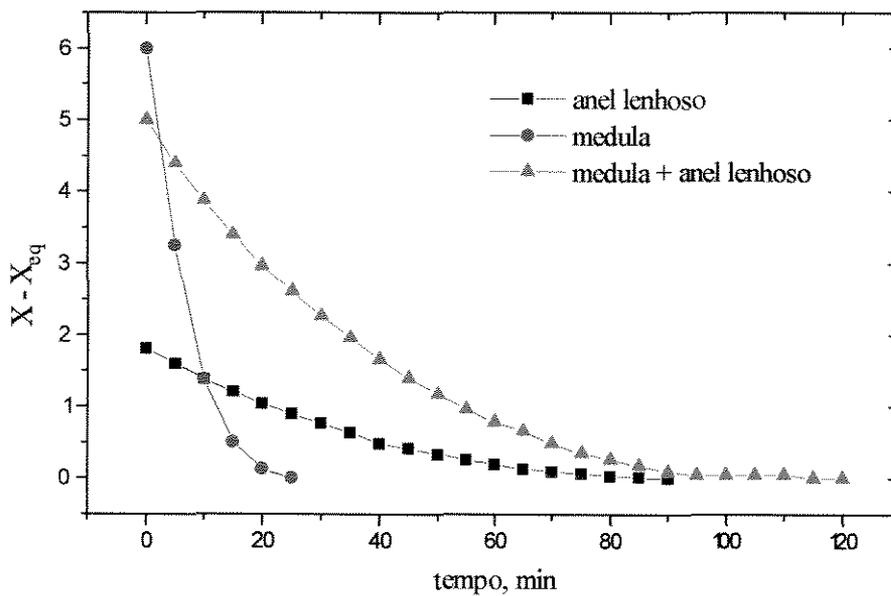


Figura 4.9 - Curvas de secagem do anel lenhoso, da medula e do conjunto medula-anel lenhoso do sabugo de milho.

A Figura 4.10 mostra todas as curvas de secagem para fins comparativos. Observa-se que esta figura apresenta curvas com várias inclinações bem como variados tempos de secagem (o termo “tempo de secagem” é utilizado aqui no sentido do tempo requerido para que o teor de umidade de equilíbrio fosse atingido).

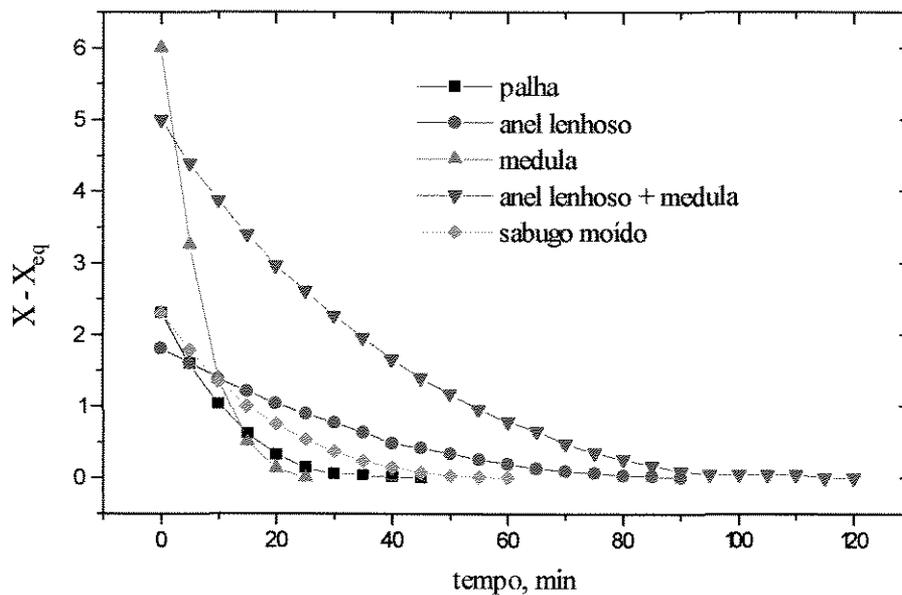


Figura 4.10 - Curvas de secagem dos diversos componentes individuais do sabugo de milho, do conjunto medula-anel lenhoso e do conjunto com todos os componentes.

As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 esquematizam as curvas de taxa de secagem obtidas por diferenciação numérica utilizando o programa MicroCal Origin<sup>®</sup> versão 2.94, relativas às partes constituintes do sabugo medula, palha e anel lenhoso, respectivamente. A Figura 4.14 esquematiza a curva de taxa de secagem para o sabugo inteiro.

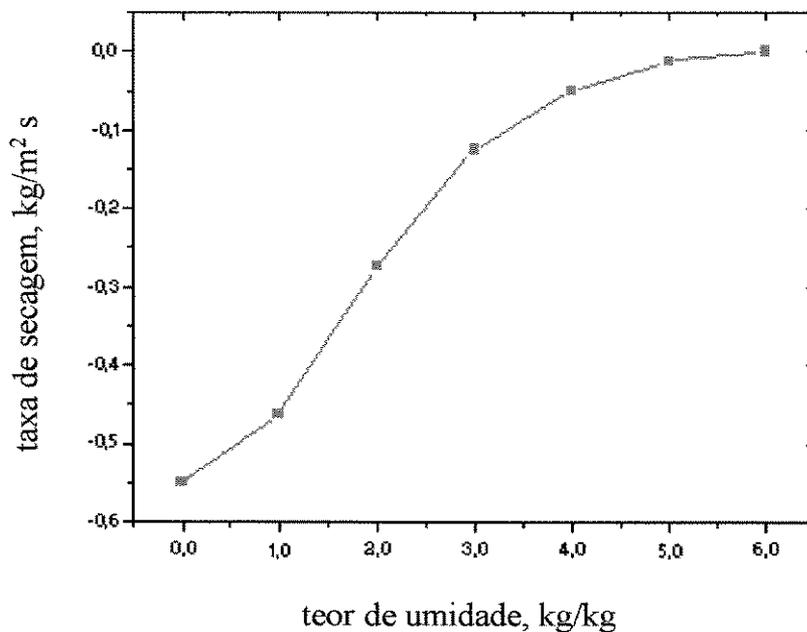


Figura 4.11 - Curva esquemática da taxa de secagem para a medula.

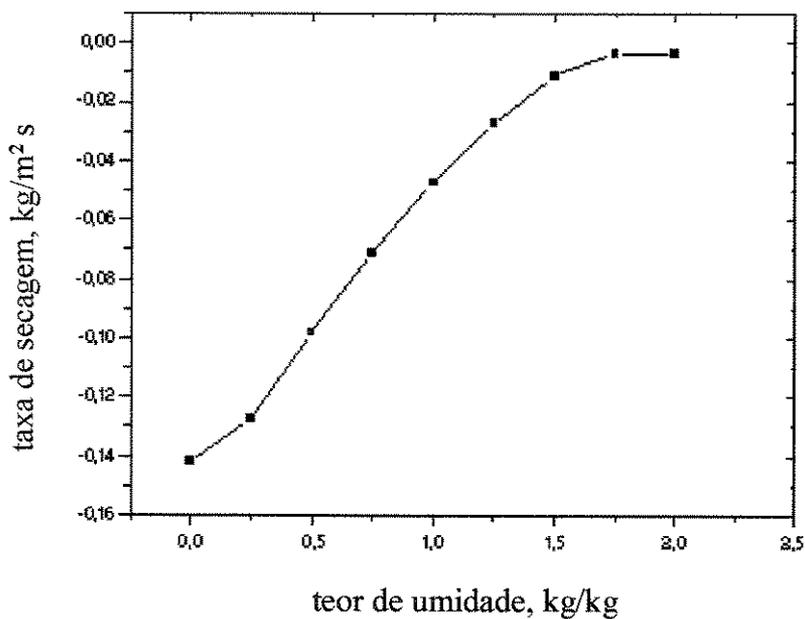


Figura 4.12 - Curva esquemática da taxa de secagem para a palha.

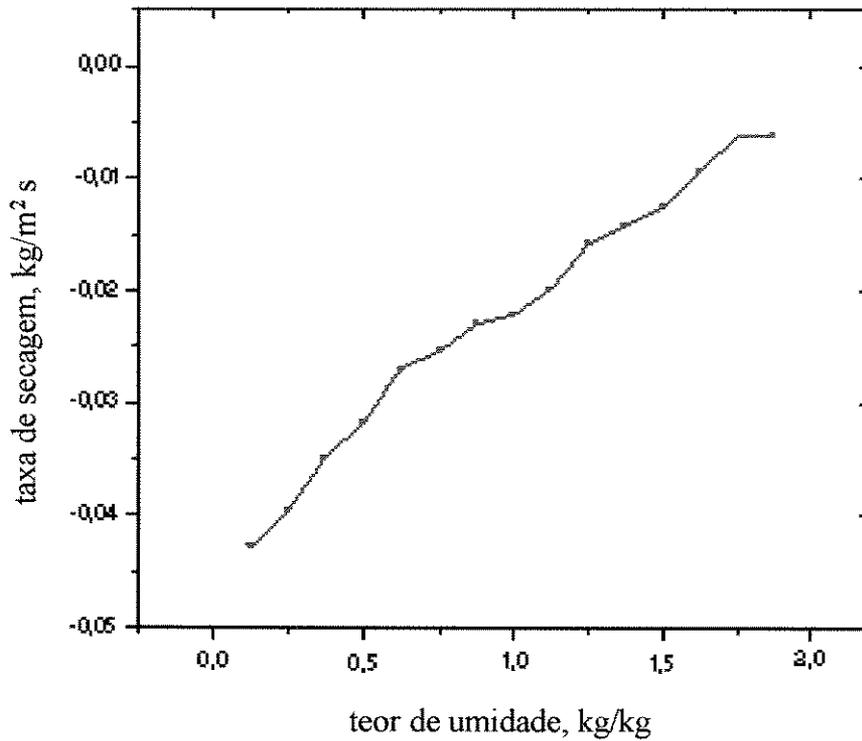


Figura 4.13 - Curva esquemática da taxa de secagem para o anel lenhoso.

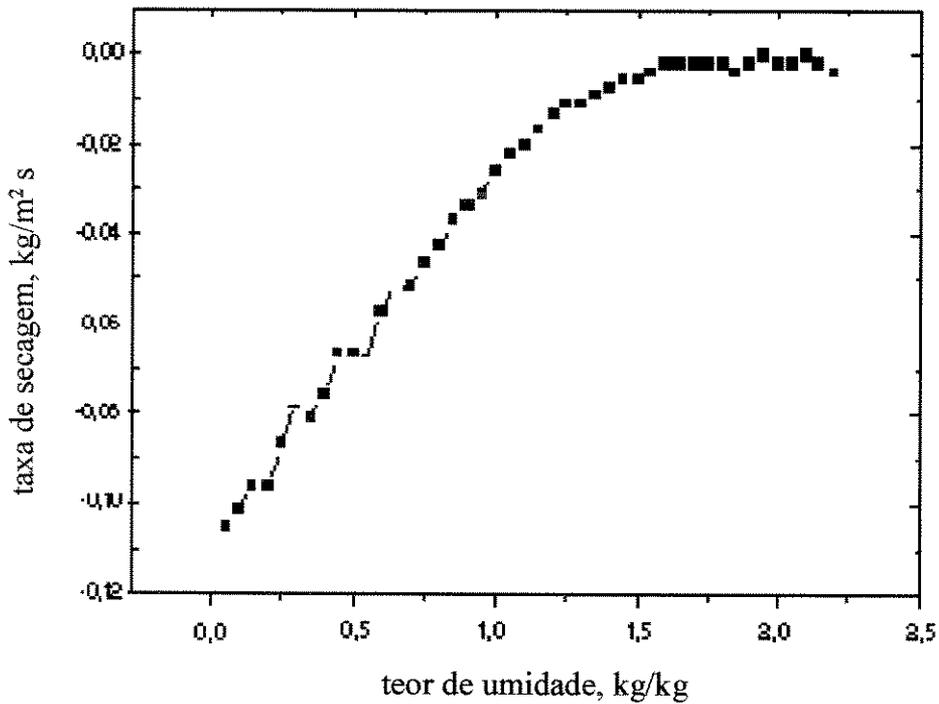


Figura 4.14 - Curva esquemática da taxa de secagem para o sabugo de milho moído, constituído de medula, anel lenhoso e palha .

As Figuras 4.11, 4.12 mostram que o período de secagem à taxa constante é muito pequeno quando comparado com o período à taxa decrescente. Porém a Figura 4.14 apresenta ambos os períodos. A Figura 4.13 praticamente não apresenta o período à taxa constante.

Observa-se, nas Figuras 4.11, 4.12, e 4.14 que a medula e a palha apresentaram curvas de taxa de secagem semelhantes, quanto ao seu formato, ao contrário do anel lenhoso (Figura 4.13). Na literatura pesquisada relacionada ao sabugo de milho, as propriedades químicas e físicas, composição, análise elementar, etc, eram sempre apresentadas para o anel lenhoso separadamente e para a medula/palha juntas (Tabelas 2.5 e 2.6). Provavelmente as duas últimas realmente possuam comportamentos similares. Um exemplo desta discussão pode ser citado em relação à dureza (Mohs), que do anel lenhoso é 4,5 e 1,0 para a medula/palha (Tabela 2.6). Não foi encontrada explicitamente na literatura se a dureza do material influi na secagem, apesar de que, segundo BROOKER et al (1974), o teor de umidade crítico do produto depende das suas características como forma, tamanho, etc. Em relação às curvas de secagem, a medula apresentou o menor tempo de secagem, e conseqüentemente maior taxa, o anel lenhoso apresentou maior tempo com maior taxa, e a palha apresentou valores intermediários em relação aos anteriores.

Uma observação importante quanto ao material cabe ser salientada. Os grãos de milho foram “cortados” do sabugo de modo que resíduos dos mesmos permaneciam no sabugo, em especial, na parte referente à palha. Tal fato poderia explicar a presença do período à taxa constante na Figura 4.14.

#### **4.4 - Conclusões**

O sabugo de milho moído não se apresenta como grãos propriamente ditos, porém o anel lenhoso apresentou comportamento cinético semelhante àqueles não possuindo o período de secagem à taxa constante, mas apenas o período decrescente.

A medula e a palha apresentaram curvas de taxa de secagem semelhantes, ao contrário do anel lenhoso que apresentou uma conformação distinta. É bem provável que as primeiras possuam propriedades cinéticas muito parecidas, pois a própria literatura apresenta as propriedades do anel lenhoso separadamente do conjunto palha/medula.

## **5 - EXPERIMENTOS REALIZADOS NO CICLONE**

### **5.1 - Introdução**

O estudo experimental no ciclone consistiu na realização dos experimentos para duas condições distintas: ciclone operando com as partículas de sabugo de milho (experimentos de secagem) e apenas com ar puro. Em ambos os casos foram determinados os perfis de temperatura do ar nas saídas superior e inferior do equipamento, indicadas na Figura 5.1. Os experimentos foram realizados utilizando diferentes condições de operação cujas variáveis foram a temperatura de aquecimento do ar, a vazão de ar, a vazão de sólidos e a granulometria do material, com o objetivo de analisar a influência destas variáveis sobre a secagem das partículas, isto é, na redução do teor de umidade destas. Os valores das variáveis utilizadas nos experimentos estão apresentados e discutidos nos itens 5.5 e 5.6.

Nos experimentos de secagem também foram realizados reciclos de material.

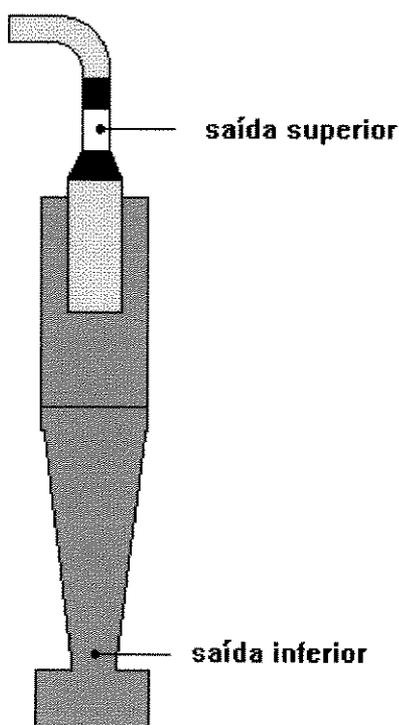
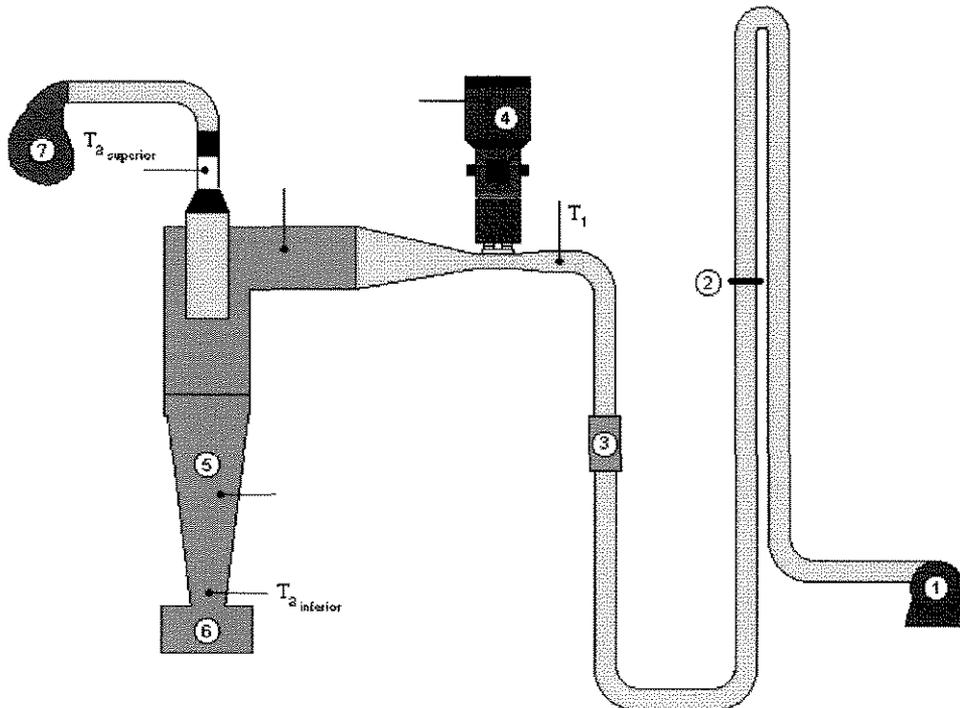


Figura 5.1 - Esquema do ciclone indicando os pontos onde foram lidas as temperaturas para a determinação do perfil.

## 5.2 - Descrição do sistema experimental

O sistema onde foram realizados os experimentos foi montado no laboratório do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

Um desenho esquemático do sistema experimental está apresentado na Figura 5.2.



Legenda:

- |                                    |                          |
|------------------------------------|--------------------------|
| 1. ventilador                      | 5. ciclone               |
| 2. placa de orifício               | 6. coletor de partículas |
| 3. sistema de aquecimento          | 7. filtro-saco           |
| 4. silo de alimentação dos sólidos | —• termopares            |

Figura 5.2 - Esquema do sistema experimental utilizado.

O ar era insuflado no sistema através de um ventilador da marca SEI, tipo RC, com capacidade de pressão de 533 mm de coluna d'água, vazão de 10,5 m<sup>3</sup>/min e potência de 3 HP.

A tubulação do equipamento foi feita com tubos de PVC, com diâmetro de 4 polegadas.

O sistema de aquecimento do ar consistia em um aquecedor montado com chapas de aço carbono, formado por 17 resistências da marca “Anluz”, totalizando uma potência de 34 kW.

A alimentação dos sólidos foi feita por um sistema de alimentação da “Norma Equipamentos”, modelo DE-3, formado por um silo armazenador e uma calha vibratória. A intensidade da vibração podia ser controlada para proporcionar diferentes vazões de sólidos.

O ciclone utilizado no experimento foi produzido pela empresa Bernauer S.A., sendo do tipo 20/16. Na saída superior foi colocado um saco receptor de material a fim de coletá-lo, e desse modo, impedir que houvesse o escape das partículas para a atmosfera ambiente. O ciclone, bem como todo o aparato a partir do aquecedor, foi isolado com lã de rocha e revestido com alumínio corrugado.

### 5.3 - Medições

#### 5.3.1 - Vazão de Ar

Para determinar a vazão do ar, foi colocada uma placa de orifício concêntrico de diâmetro  $d$  (ver Figura 5.3), em um ponto do escoamento na tubulação. As tomadas de pressão foram dispostas na forma “radius taps” isto é, a  $1D$  e a  $\frac{1}{2}D$ . Sendo  $D = 4$  polegadas e  $d = 3$  polegadas, a relação entre os diâmetros,  $\beta$ , é dada pela razão  $d/D = \frac{3}{4} = 0,75$ . A escolha desta tomada foi devido aos limites de  $D$  e  $d$ , DELMÉE (1983). Os valores das diferenças de pressão foram lidos em um manômetro de tubo inclinado da marca “Meriam Instrument”, em polegadas de etanol, com menor divisão de 0,01 in de etanol.

Antes da placa de orifício, foi acoplado um termômetro de mercúrio comum “Incoterm”, cuja menor divisão era de  $1^{\circ}\text{C}$ , a fim de determinar a temperatura de entrada do ar no sistema.

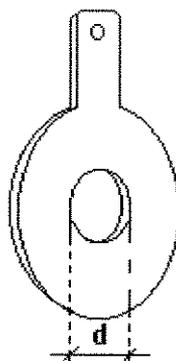


Figura 5.3 - Esquema da placa de orifícios concêntricos utilizada

As equações para os cálculos da vazão de ar foram propostas por DELMÉE (1983).

$$Q_{\text{ar}} = CE\beta^2 A_s \left( \frac{2\Delta P}{\rho_{\text{ar,u}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

Onde:

$$CE = CEL + Br \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

$$Re = \frac{4Q_{\text{ar}}}{\nu\pi D} \quad (5.3)$$

$$CEL = 0,6024 - 0,030352D_1^{-\frac{1}{4}} + (0,3760 + 0,16292D_1^{-\frac{1}{4}}) \cdot \left[ \frac{0,16129}{D^2\beta^2 + 0,0635D} + \beta^4 + 1,5\beta^{16} \right] \quad (5.4)$$

$$Br = 0,0002 + \frac{0,02794}{D} + \left( 0,0038 + \frac{0,01016}{D} \right) [\beta_1^2 + (16,5 + 0,19685D)\beta^{16}] \quad (5.5)$$

Nas equações acima, “C” é definido como o coeficiente de descarga, e, segundo DELMÉE (1983), é um fator que leva em consideração todos os elementos de um escoamento real. De acordo com o elemento deprimogênio escolhido, o coeficiente de descarga é função do diâmetro da tubulação (D), do número de Reynolds ( $Re_D$ ), e da relação entre os diâmetros ( $\beta$ ); “E” representa o fator de velocidade de aproximação. O produto do coeficiente de descarga pelo fator de velocidade de aproximação, resulta no coeficiente de vazão (CE).

A densidade do ar úmido,  $\rho_{\text{a,u}}$ , foi calculada pela equação geral dos gases ideais, nas condições de temperatura e pressão nas quais este atravessava a placa de orifício:

$$\rho_{ar,u} = \frac{P_{abs} M_{ar,u}}{RT} \quad (5.6)$$

Equações auxiliares bem como as constantes utilizadas para o cálculo da vazão de ar, estão apresentadas no Apêndice B deste trabalho.

### 5.3.2 - Vazão de sólidos

A determinação da vazão dos sólidos consistiu na pesagem dos sólidos coletados durante cada corrida. A duração de cada teste era de 25-35 minutos, e pesando-se a massa coletada durante este período, calculava-se a vazão pela razão massa/tempo.

Para a determinação da massa coletada foi utilizada uma balança eletrônica “Polimate”, com capacidade de 4 kg e menor divisão de 0,01g, e para medir o tempo foi utilizado um cronômetro “Technos”, menor divisão 0,2 segundos.

### 5.3.3 - Massa de sólidos remanescentes

A massa de sólidos remanescentes,  $m_r$ , foi determinada através da pesagem das partículas coletadas no momento em que eram desligados, simultaneamente, o ventilador e a alimentação de sólidos.

### 5.3.4 - Tempo de permanência das partículas

Para a determinação do tempo médio de permanência das partículas no interior do ciclone, foi utilizada a técnica proposta por SZEKELY & CARR (1966), utilizada por HUNDEBOL & KUMAR (1987), LEDE et al.(1989), GODOY (1989) e SILVA (1991) apud GODOY et al. (1992). Consiste na razão entre a massa de sólidos remanescentes e a vazão de sólidos, ambas as metodologias já descritas anteriormente.

$$\tau = \frac{m_r}{W_p} \quad (5.7)$$

### **5.3.5 - Temperatura de saída dos sólidos**

Assim que terminava uma corrida, uma amostra de material era imediatamente colocada em um frasco de Dewar (18 cm de altura por 6,5 cm de diâmetro) isolado, enchendo-o completamente, sendo a temperatura desta lida através de um termômetro digital tipo caneta previamente calibrado.

### **5.3.6 - Perfil de temperatura**

Para a determinação do perfil de temperatura do ar, foram medidas as temperaturas nos seguintes pontos do equipamento (ver Figura 5.1):

- saída superior do ciclone
- saída inferior do ciclone.

Ambas as temperaturas acima foram medidas através de termopares previamente calibrados do tipo “T”, marca IOPE, com proteção de aço inoxidável, os quais foram conectados a um pirômetro digital IOPE, modelo SP-G22, que registrava as temperaturas em °C. Esta conexão foi feita por meio de uma chave seletora com sistema de comutação digital de alta sensibilidade, também da marca IOPE, modelo CSE-12.

No Apêndice B encontram-se as equações de calibração dos termopares, bem como do termômetro digital tipo caneta.

## **5.4 - Testes pré-seletivos**

Foram realizados testes antes do início dos experimentos de secagem propriamente ditos, sendo a metodologia descrita comum tanto para os experimentos de secagem, quanto para o ciclone operando apenas com ar.

Como era necessário definir as temperaturas do ar de entrada no ciclone que seriam utilizadas nos experimentos, foram realizados testes prévios combinando o acionamento das resistências com as regulagens de vazão no próprio ventilador. Ligado o ventilador juntamente com a resistência selecionada, a temperatura indicada por um termopar colocado na parede do ciclone aumentava gradualmente até um valor constante, o qual seria a temperatura do teste. O

tempo necessário para que cessassem as oscilações de temperatura era de aproximadamente 90 minutos.

Procedimento similar foi feito para pré-selecionar as vazões de sólidos para os experimentos de secagem. Para diversos níveis de vibração da calha vibratória, os sólidos eram alimentados no sistema durante um certo intervalo de tempo, e decorrido este, era pesada a massa coletada e determinada a vazão mássica em vários níveis.

Através da metodologia descrita acima, foram obtidos sete níveis de temperatura do ar de entrada no ciclone e nove para a vazão de sólidos. As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os resultados dos testes pré-seletivos para as sete temperaturas bem como para as vazões de sólidos, respectivamente. É importante explicar que na Tabela 5.1, o termo “vazão no ventilador” refere-se à abertura lateral deste, e considerou-se a vazão mínima para a marca de 50 % de abertura, e a máxima para 100 % aberta. Não foi possível a obtenção da temperatura utilizando a vazão mínima no ventilador combinada com 16 kW de potência.

Tabela 5.1 - Temperaturas de entrada do ar no ciclone obtidas dos testes pré-seletivos

<b>Teste</b>	<b>Potência, kW</b>	<b>Vazão no Ventilador</b>	<b>Temperatura, °C</b>
1	6	mínima	95,8
2	6	máxima	100,7
3	10	máxima	147,7
4	10	mínima	163,4
5	12	máxima	170,3
6	12	mínima	178,1
7	16	máxima	222,2

Tabela 5.2 - Vazões de sólidos obtidas dos testes pré-seletivos

<b>Teste</b>	<b>Vazão no ventilador</b>	<b>Vibração</b>	<b>w<sub>p</sub> g/min</b>
1	mínima	mínima	13,44
2	máxima	mínima	18,99
3	mínima	2º ponto	25,07
4	máxima	1º ponto	27,56
5	mínima	máxima	28,77
6	máxima	2º ponto	34,17
7	máxima	máxima	49,07
8	máxima	mínima	29,78
9	mínima	mínima	26,75

Todos os valores de temperatura de entrada do ar, vazão de ar e vazão de sólidos que foram utilizados para a realização dos experimentos estão apresentados no Apêndice D. Abaixo estão apresentados apenas os limites de cada um. Os valores não estão apresentados no S.I. para uma melhor análise e visualização da ordem de grandeza.

**Faixa de Temperatura:** 95 - 222 °C

**Faixa de vazão de ar:** 155 - 235 m<sup>3</sup>/h

**Faixa de vazão de sólidos:** 13 - 49 g/min

Uma observação importante em relação à temperatura do ar de saída é que, neste trabalho, esta foi considerada a média ponderada entre as temperaturas obtidas a partir do perfil de temperatura superior.

### **5.5 - Ciclone operando com partículas - secagem**

Para os testes de secagem, após ligado o equipamento, as medições eram feitas apenas quando o termopar localizado na parede do ciclone, não acusasse mais qualquer variação de temperatura, isto é, quando o sistema atingisse o regime permanente apenas com ar. Em seguida,

era acionada a alimentação, e aguardava-se atingir um novo valor de temperatura estacionária com a presença dos sólidos. A massa coletada durante este período era descartada. Somente a partir deste momento os testes realmente tinham início, com as medições das temperaturas do ar de entrada, temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido, bem como da queda de pressão. Além disso, eram anotadas as temperaturas nos seis pontos do equipamento, (ver Figura 5.2) e o valor da pressão atmosférica em um barômetro adjacente ao laboratório dos testes.

Os perfis radiais de temperatura nas saídas do ciclone foram obtidos fazendo as medições das temperaturas nos dois pontos extremos do ciclone medindo-se de 0,5 em 0,5 cm da parede até o centro. O valor da temperatura em cada ponto era anotado quando cessassem as oscilações. Cada teste durava, em média, 30 minutos, tempo este suficiente para que cessassem as oscilações de temperatura indicada no pirômetro.

Após cada corrida, era rapidamente determinada a temperatura do material, o que era feito utilizando-se um frasco de Dewar devidamente isolado. Após este procedimento, aproximadamente 50 gramas de material era mantida em sacos plásticos hermeticamente fechados, para posterior determinação da umidade. O teor de umidade da amostra antes da secagem era determinado. Em seguida, iniciava-se nova corrida, repetindo o mesmo procedimento descrito anteriormente.

É importante salientar que, apesar de terem sido realizados os testes pré-seletivos para a temperatura e vazão de sólidos (ver item 5.5), nem sempre foi possível obter, nos experimentos de secagem propriamente ditos, valores exatamente iguais aos destes testes. O sistema de alimentação, por exemplo, apesar de possuir calha vibratória, apresentou algumas falhas, como a vibração sem escoamento de material para o interior do ciclone. Em decorrência disto, era sempre necessária a presença de uma pessoa junto ao silo a fim de evitar esta parada e a consequente interrupção de entrada do material no ciclone. Devido ao fato de cada pessoa controlar de maneira diferente, não obtinha-se a mesma vazão de sólidos dos testes pré-seletivos devido ao erro aleatório que ocorria. Alguns fatores, tais como a temperatura ambiente, afetavam a temperatura de entrada do ar, diferindo também dos valores dos testes. Não fossem estes problemas, seria necessária a realização de 22 testes, aproximadamente, sem repetições e reciclos. A solução para isto foi realizar um número bem maior de testes a fim de obter todos os valores desejados. Baseado nisto, foram realizados um total de 65 experimentos de secagem, sendo 8 reciclos.

Do total de experimentos foram selecionados dois níveis duas temperaturas de entrada de ar no ciclone:  $T_{(ar)} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $T_{(ar)} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$  em dois níveis de vazão de alimentação de sólidos: 12 g/min e 20 g/min, para a análise da influência das variáveis sobre a redução da umidade.

As planilhas de cálculo referentes aos experimentos de secagem encontram-se no Apêndice D deste trabalho. Encontra-se também no Apêndice D, as Equações dos balanços de massa e de energia para o sistema.

### **5.5.1 - Reciclos**

Os reciclos foram realizados com a finalidade de obter o produto final seco com 0,11 de umidade (b.s.). Através dos testes realizados, observou-se que, mesmo utilizando pequenas vazões de sólidos combinada com altas temperaturas, não foi possível obter níveis de umidade abaixo de 50 % (b.u.), com apenas uma passagem do material no ciclone.

### **5.6 - Ciclone operando sem partículas**

Para o ciclone operando sem partículas sólidas, a metodologia é a mesma descrita anteriormente, porém apenas com a determinação do perfil de temperatura nas saídas inferior e superior do ciclone. Neste caso, foram realizados testes com as 7 temperaturas de entrada do ar. Similarmente, a cada nova temperatura, aguardava-se o regime permanente.

No Apêndice D encontram-se as planilhas contendo todos os cálculos referentes aos experimentos realizados para este caso.

## **6 - RESULTADOS OBTIDOS NO CICLONE E ANÁLISE**

Neste ítem são analisadas as influências das variáveis (fatores) temperatura de aquecimento do ar, vazão de ar, vazão de alimentação dos sólidos e granulometria do material na retirada de umidade (resposta) das partículas de sabugo de milho secas no ciclone, bem como são apresentados os perfis de temperatura do ar obtidos para os testes de secagem e para o ciclone operando apenas com ar.

A variável de interesse neste estudo de secagem é a redução do teor de umidade ( em base seca) das partículas de sabugo de milho, o qual foi calculado pela Equação 3.5:

$$X_{bs} = \frac{\text{massa de agua}}{\text{massa de material seco}} \quad (3.5)$$

Os resultados obtidos para os testes de secagem no ciclone secador estão apresentados na Tabela 6.1, onde encontram-se os dados de entrada e saída de temperatura e umidade tanto do ar quanto das partículas, bem como vazão de ar e vazão de sólidos. Os dados utilizados para o cálculo da vazão de ar encontram-se no Apêndice D. É importante ressaltar que são apresentados na Tabela 6.1 apenas os resultados obtidos segundo o planejamento fatorial, o qual é explicado no sub-ítem 6.1. Todos os demais experimentos de secagem realizados encontram-se no Apêndice D deste trabalho.

Tabela 6.1 - Resultados dos experimentos de secagem das partículas de sabugo de milho no ciclone

Teste	$Q_{ar}$ , kg/s	$T_{e,ar}$ , °C	$T_{s,ar}$ , °C	$Y_e$	$Y_s$	$w_p \cdot 10^4$ , kg/s	$X_1$	$X_2$	$T_{p,1}$	$T_{p,2}$
1	0,0353	160	150	0,013	0,020	2,00	2,19	1,06	17,1	37,3
2	0,0353	180	157	0,014	0,018	2,00	2,24	1,45	19,0	38,5
3	0,0449	160	141	0,015	0,018	2,00	2,33	1,15	20,5	31,5
4	0,0449	180	153	0,022	0,031	2,00	2,27	0,56	18,9	27,3
5	0,0353	160	153	0,011	0,019	3,33	2,15	1,45	21,9	34,6
6	0,0353	180	152	0,010	0,017	3,33	2,21	1,34	24,9	36,4
7	0,0449	160	145	0,014	0,020	3,33	2,15	1,29	19,3	26
8	0,0449	180	158	0,016	0,021	3,33	2,22	1,33	18,7	30,3
9	0,0449	160	140	0,015	0,020	2,00	2,22	1,19	22,6	30,5
10	0,0353	180	161	0,013	0,019	3,33	2,22	1,52	21,5	33,7

A influência dos fatores sobre a redução da umidade foi analisada estatisticamente através dos efeitos de cada um destes obtidos pelo planejamento fatorial sobre o qual será feita uma breve explicação.

### **6.1 - Planejamento fatorial**

Segundo BARROS NETO et al (1995), a determinação da influência de uma ou mais variáveis sobre uma outra variável de interesse (resposta), consiste em um dos problemas mais comuns que um pesquisador enfrenta. A execução de um planejamento fatorial seria uma solução adequada para este problema. Para tal procedimento, é necessário, primeiramente, especificar quais os níveis de estudo serão utilizados para cada fator em questão, que serão empregados nos experimentos. Feita esta determinação, realiza-se todos os experimentos combinando-se os fatores com os níveis, combinação esta obtida a partir da matriz de planejamento. Se existirem 3 fatores com dois níveis cada um (o presente trabalho), serão necessários  $2 \times 2 \times 2 = 8$  experimentos para o planejamento fatorial completo, o qual é chamado *planejamento fatorial  $2^3$* . Genericamente falando, se houver  $N_1$  níveis para a variável 1,  $N_2$  níveis para a variável 2,  $N_3$  níveis para a variável 3, ...,  $N_i$  níveis para a variável  $i$ , o planejamento será um fatorial  $N_1 \times N_2 \times N_3 \times \dots \times N_i$ . Este é o número mínimo de experimentos a ser realizado, porém, para obter-se uma estimativa do erro experimental, torna-se necessária a realização de duplicatas. Após a realização dos experimentos, são quantificados os efeitos de cada fator sobre a resposta e, posteriormente, são aplicados testes estatísticos a fim de verificar a confiabilidade dos resultados obtidos através da construção de intervalos de confiança.

Nos próximos itens está apresentada a análise dos resultados obtidos dos experimentos de secagem, à luz do planejamento fatorial, e baseado na Tabela 6.1.

### **6.2 - Estimativa dos efeitos**

A Tabela 6.2 apresenta os valores das variáveis utilizadas com os respectivos níveis. A convenção utilizada é: sinal (-) para o nível menor e sinal (+) para o nível maior.

Tabela 6.2 - Valores das variáveis utilizadas no planejamento fatorial de experimentos

Níveis	Fatores		
	Temperatura do ar °C	Vazão de ar kg/s	Vazão de sólidos kg/s
( - )	160	0,0353	$2,00 \cdot 10^{-4}$
( + )	180	0,0449	$3,33 \cdot 10^{-4}$

Para o cálculo dos efeitos é necessária a realização de 4 passos:

- aplicação dos sinais da matriz às respostas correspondentes aos ensaios;
- soma algébrica destes resultados;
- divisão pelo número de sinais (+ ou -) do planejamento.

A Tabela 6.3 apresenta a matriz contendo os efeitos principais ( temperatura do ar, vazão de ar e vazão de sólidos), bem como o valor numérico das respostas, representadas pela redução do teor de umidade das partículas. Esta tabela é a própria Tabela 6.1

Tabela 6.3 - Matriz resultante de um planejamento fatorial  $2^3$ 

Ensaio	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Resposta, %
1	-	-	-	51,41
2	+	-	-	35,39
3	-	+	-	50,51
4	+	+	-	75,24
5	-	-	+	32,56
6	+	-	+	39,32
7	-	+	+	39,92
8	+	+	+	40,04
9	***	***	***	46,03
10	***	***	***	31,64

Onde:

**Fator 1** = temperatura do ar (especificamente, temperatura de entrada do ar no ciclone para os experimentos de secagem),  $T_{ar}$

**Fator 2** = vazão do ar,  $Q_{ar}$

**Fator 3** = vazão de alimentação de sólidos,  $w_p$ .

As duas últimas linhas da Tabela 6.3 são os testes que foram realizados em duplicata, com a finalidade de obter o erro dos efeitos, calculado nas próximas linhas. O teste 9 é a duplicata do teste 3, e o teste 10, duplicata do teste 6.

Como é necessária a análise da interação entre estes fatores sobre a resposta, foi construída a Tabela 6.4, a qual foi obtida pela multiplicação dos sinais de cada fator.

Tabela 6.4 - Coeficientes de contraste para um fatorial  $2^3$

Teste	Média	1	2	3	12	13	23	123	Redução, %
1	+	-	-	-	+	+	+	-	51,41
2	+	+	-	-	-	-	+	+	35,39
3	+	-	+	-	-	+	-	+	50,51
4	+	+	+	-	+	-	-	-	75,24
5	+	-	-	+	+	-	-	+	32,56
6	+	+	-	+	-	+	-	-	39,32
7	+	-	+	+	-	-	+	-	39,92
8	+	+	+	+	+	+	+	+	40,04

Através desta Tabela pode-se calcular todos os efeitos, tanto principais quanto secundários, uma vez que estão apresentados todos os sinais necessários. A Equação 6.1 exemplifica o cálculo do efeito para a temperatura (terceira coluna da Tabela 6.4), sendo que, para os demais fatores, o cálculo é similar, sempre seguindo os sinais da Tabela 6.4.

$$(\text{Efeito})_T = \frac{1}{4} [(-51,41 + 35,39 - 50,51 + 75,24 - 32,56 + 39,32 - 39,92 + 40,04)] \quad (6.1)$$

$$(\text{Efeito})_T = 3,8975.$$

De acordo com BARROS NETO (1995), tanto os efeitos principais quanto de interação são calculados utilizando-se todas as respostas observadas, não havendo, portanto, informações ociosas no planejamento.

Como já havia sido mencionado, foram realizadas duas duplicatas, as quais são suficientes para a estimativa do erro experimental e cuja extensão fornecerá subsídios para concluir se os efeitos dos fatores estudados são (ou não) estatisticamente significativos sobre a resposta. Para o experimento 3, obteve-se uma resposta de 50,51 % e 46,03 % para a duplicata (experimento 9); para o experimento 6, a resposta foi de 39,32 % e 31,64 % para a duplicata (experimento 10). Através das Equações 6.2, 6.3, e 6.4, calculou-se a variância para cada experimento, a variância experimental e o erro padrão do efeito.

$$S^2 = \frac{1}{N - 1} \left[ (x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 \right] \quad (6.2)$$

$$S_{\text{exp}}^2 = \frac{v_1 S_1^2 + v_2 S_2^2}{v_1 + v_2} \quad (6.3)$$

$$S_{\text{efeito}} = \left( \frac{S_{\text{exp}}^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.4)$$

Onde: N = número de experimentos em duplicata realizados

x = resposta de cada experimento

$\bar{x}$  = média entre os dois valores

v = número de graus de liberdade

Fazendo-se os cálculos para dois graus de liberdade, obtém-se um erro padrão dos efeitos de 3,1431.

Neste trabalho, os efeitos foram calculados através dos programas ENTRADA, EDITAR e FATORIAL (BARROS NETO et al, 1995), cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Efeitos calculados para o planejamento fatorial baseado na Tabela 6.4

Fatores	Estimativa $\pm$ erro padrão
média global	45,54 $\pm$ 1,57
T <sub>ar</sub>	3,89 $\pm$ 3,14
Q <sub>ar</sub>	10,75 $\pm$ 3,14
w <sub>p</sub>	-15,17 $\pm$ 3,14
T <sub>ar</sub> Q <sub>ar</sub>	8,52 $\pm$ 3,14
T <sub>ar</sub> w <sub>p</sub>	-0,45 $\pm$ 3,14
Q <sub>ar</sub> w <sub>p</sub>	-7,71 $\pm$ 3,14
T <sub>ar</sub> Q <sub>ar</sub> w <sub>p</sub>	-11,84 $\pm$ 3,14

Em relação à Tabela 6.5 é imprescindível saber quais efeitos são significativos, isto é, quais realmente influirão na resposta desejada. A fim de decidir quais os efeitos calculados são de fato significativos, é necessário aplicar um teste estatístico, que neste caso é o “t” de Student ao nível de confiança de 95 % com dois graus de liberdade. A escolha deste teste, além de muito utilizado em análises estatísticas, justifica-se pelo fato de apresentar uma boa aplicabilidade quando o tamanho da amostra é pequena (menor que 30), AQUINO FILHO (1995). Recorrendo-se às tabelas estatísticas, o valor correspondente de t é 2,920. Com isto, são significativos apenas os efeitos que apresentarem valores absolutos maiores que  $2,920 \times 3,1431 = 9,1778$ . Na prática, isto significa que os efeitos que possuírem valor em módulo maior que o produto ( $t \cdot S_{\text{efeito}}$ ) são significativos, onde  $S_{\text{efeito}}$  foi calculado pelas Equações 6.2 - 6.4. Sendo este produto 9,1780 e pela Tabela 6.5, conclui-se que são significativos os efeitos dos seguintes fatores:

- vazão de ar, Q<sub>ar</sub>
- vazão de sólidos, w<sub>p</sub>
- interação tripla temperatura do ar - vazão de ar - vazão de sólidos, T<sub>ar</sub> Q<sub>ar</sub> w<sub>p</sub>.

### 6.2.1 - Interpretação dos efeitos obtidos

Na Tabela 6.5 observa-se que alguns efeitos apresentaram sinais positivos e outros, sinais negativos. O sinal positivo significa que o aumento de nível (a passagem do nível menor para o

maior) proporciona um ganho na resposta, isto é, aumenta a retirada da umidade das partículas, beneficiando a secagem. O sinal negativo, ao contrário, indica que o aumento de nível proporciona uma perda na resposta, diminuindo a retirada de umidade e prejudicando a secagem das partículas. Em relação aos efeitos principais, uma vez que a temperatura e a vazão de ar apresentaram efeitos com sinais positivos, o aumento de nível destes fatores contribuiu para a retirada de umidade. Por outro lado, a vazão de sólidos apresentou um efeito com sinal negativo ao passar do nível menor para o maior, diminuindo, portanto, a retirada de umidade das partículas. O módulo do efeito quantifica o ganho ou a perda na resposta, concluindo-se que, quanto maior for, mais significativo será o fator.

Partindo da explicação acima e analisando separadamente cada fator a partir das Tabelas 6.2, 6.4 e 6.5, observa-se que a elevação da temperatura de entrada do ar nos experimentos de secagem em 11 % (de 160 °C para 180 °C), reduziu-se a umidade das partículas em 3,89 % em média. A vazão de ar, ao ser aumentada 22,35 % (de 0,0353 kg/s para 0,0449 kg/s), provocou uma redução de umidade de 10,75 % em média. Aumentando-se a vazão de sólidos em 75 % (de  $2,00 \cdot 10^{-4}$  kg/s para  $3,33 \cdot 10^{-4}$ ), houve uma redução na retirada da umidade das partículas de 15,17 % em média. Observa-se que, apesar do efeito isolado da temperatura não ser significativo, a sua interação com a vazão de ar e de sólidos o é, sendo que esta interação tripla dos fatores contribui no sentido de diminuir a retirada da umidade das partículas.

Baseado na discussão acima em consequência dos efeitos significativos e não-significativos, pode-se chegar a uma conclusão muito importante observando as colunas 3, 4 e 5 relativas ao teste 4 da Tabela 6.4. Este experimento foi realizado com o nível maior de temperatura de entrada e de vazão de ar juntamente com o nível menor da vazão de sólidos, e proporcionou a maior redução de umidade de todo o planejamento: 75,17 %. Seguindo o mesmo raciocínio, o experimento 5, realizado com a menor temperatura, menor vazão de ar e maior vazão de sólidos apresentou a menor redução de umidade: 32,56 %.

Esta análise estatística apresenta conclusões coerentes em relação à análise física, pois tanto o aumento da temperatura quanto da vazão de ar propiciam o aumento das trocas de calor do sistema, melhorando o contato gás-partícula, beneficiando a secagem.

Pela discussão acima poderia parecer incoerente o fator temperatura não ser significativo em um experimento de secagem, e sim a vazão de alimentação dos sólidos. Porém, deve-se observar que o aumento da temperatura foi de apenas 11 % contra 75 % da vazão de sólidos. A concentração das partículas influi no sistema pois ao entrar com temperatura mais baixa, resfria a corrente de ar, fato este que influirá diretamente na retirada da umidade das partículas. Tais

estudos e observações já haviam sido feitos por SILVA (1991), CREMASCO e NEBRA (1994), dentre outros.

As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 mostram graficamente a análise anterior para os efeitos principais.

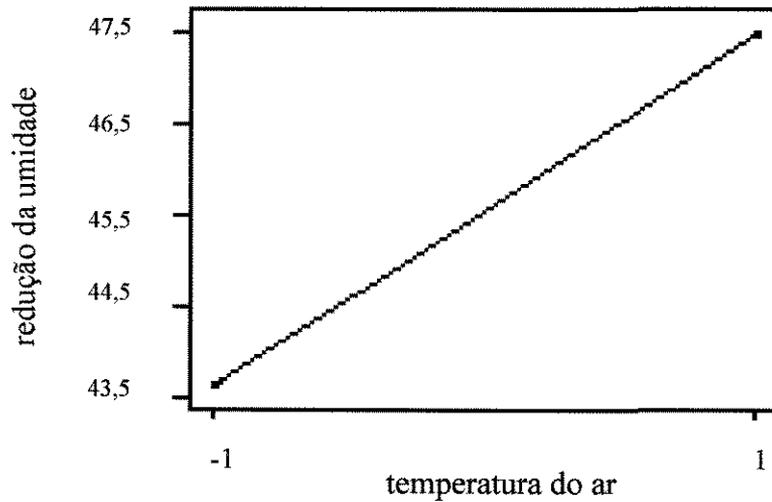


Figura 6.1 - Efeito da temperatura sobre a redução do teor de umidade das partículas.

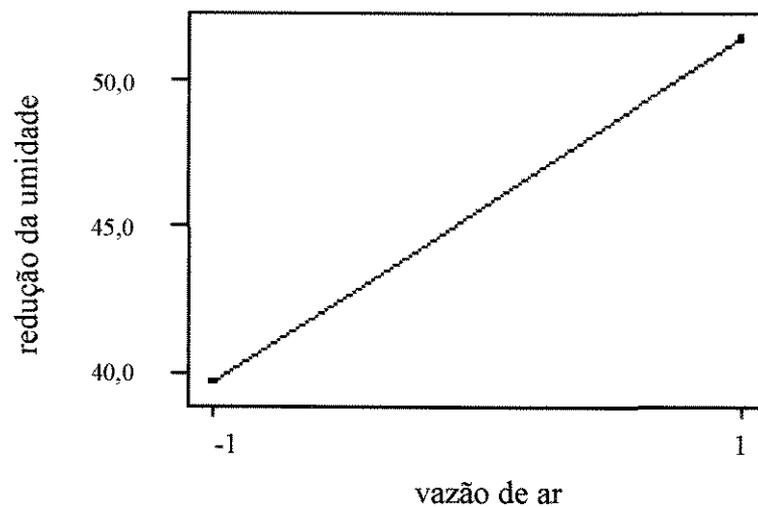


Figura 6.2 - Efeito da vazão de ar sobre a redução do teor de umidade das partículas.

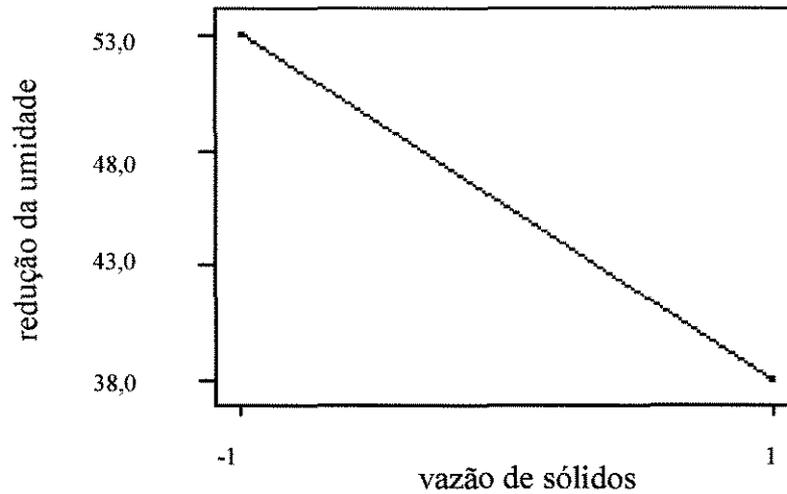


Figura 6.3 - Efeito da vazão de sólidos sobre a redução do teor de umidade das partículas.

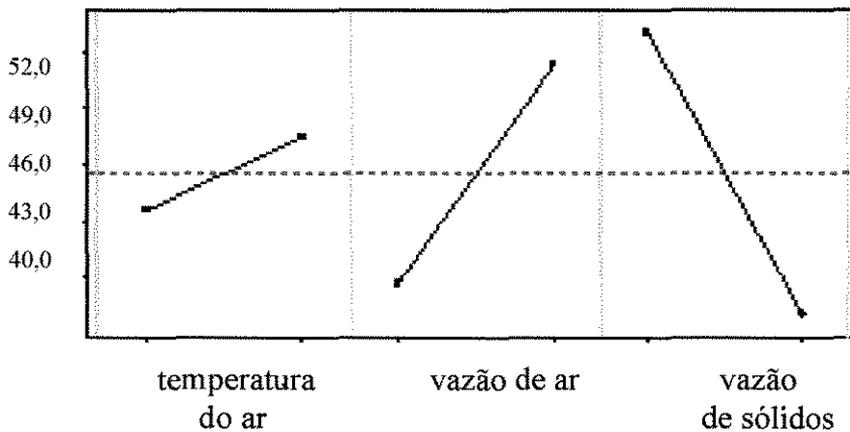


Figura 6.4 - Efeitos principais sobre a redução do teor de umidade indicando a média.

Nestas figuras, o efeito do fator sobre a resposta é obtido pela diferença entre o valor superior (1) do efeito e o inferior (-1), em relação ao eixo das ordenadas (resposta). O valor do efeito nestas Figuras, como era esperado, deve ser exatamente igual ao valores apresentados na Tabela 6.5. Na Figura 6.1, por exemplo, a diferença entre a extremidade superior da reta (em relação ao eixo das ordenadas) deve ser aproximadamente 3,89. Analogamente, esta diferença deve ser 10,75 na Figura 6.2 e 15,17 na Figura 6.3. O coeficiente angular da curva da Figura 6.3 (efeito da vazão de sólidos), é negativo. Isto já era esperado, já que houve uma diminuição da resposta ao elevar-se o nível do fator.

### 6.3 - Influência da granulometria das partículas

O fator granulometria não fez parte do planejamento fatorial, pois a inclusão de um quarto fator acarretaria em um planejamento fatorial  $2^4$ , o qual implicaria em uma maior complexidade.

A Tabela 6.6 apresenta alguns resultados realizados com diferentes granulometrias. Como a granulometria não fez parte do planejamento fatorial, nada se pode afirmar quanto às interações deste fator com os demais. Contudo, analisando a Tabela 6.6, não poderia ser afirmado que a granulometria das partículas influenciou na redução de umidade das partículas. Uma possível explicação para este fato poderia ser a proximidade entre os valores dos diâmetros médios, cuja diferença é de apenas 10,5 %, pertencendo a uma mesma classificação. Seria interessante, para se fazer uma boa análise, realizar testes de secagem em dois níveis bem distintos de granulometria.

Tabela 6.6 - Resultados experimentais em níveis diferentes de granulometria

Teste	$D_p$ mm	$Q_{ar}$ kg/s	$w_p \cdot 10^4$ kg/s	$X_1$	$X_2$	$T_{e,ar}$ °C	$T_{s,ar}$ °C	Redução %
1	3,33	0,0433	2,21	2,25	1,45	196	170	35,5
2	2,98	0,0434	2,27	2,23	1,35	198	166	39,46
3	3,33	0,0500	3,50	2,38	1,37	173	151	42,43
4	2,98	0,0497	3,48	2,41	1,40	172	151	41,90
5	3,33	0,0470	3,05	1,97	1,51	108	94	23,35
6	2,98	0,0471	3,00	1,98	1,56	108	94	21,21

### 6.4 - Perfil de temperatura para os testes de secagem

São apresentados neste item, os perfis de temperatura obtidos em alguns experimentos de secagem. No Apêndice D deste trabalho encontram-se as planilhas contendo todas as temperaturas obtidas nos perfis. Em todas as Figuras foi utilizada a seguinte simbologia (ver Figura 5.1):

- $T_3$  = termopar localizado na saída superior do ciclone.

- $T_8$  = termopar localizado na saída inferior do ciclone.

A Figura 6.5 apresenta os perfis de temperatura para os experimentos 4 e 5, os quais são os testes que apresentaram maior e menor redução de umidade, respectivamente.

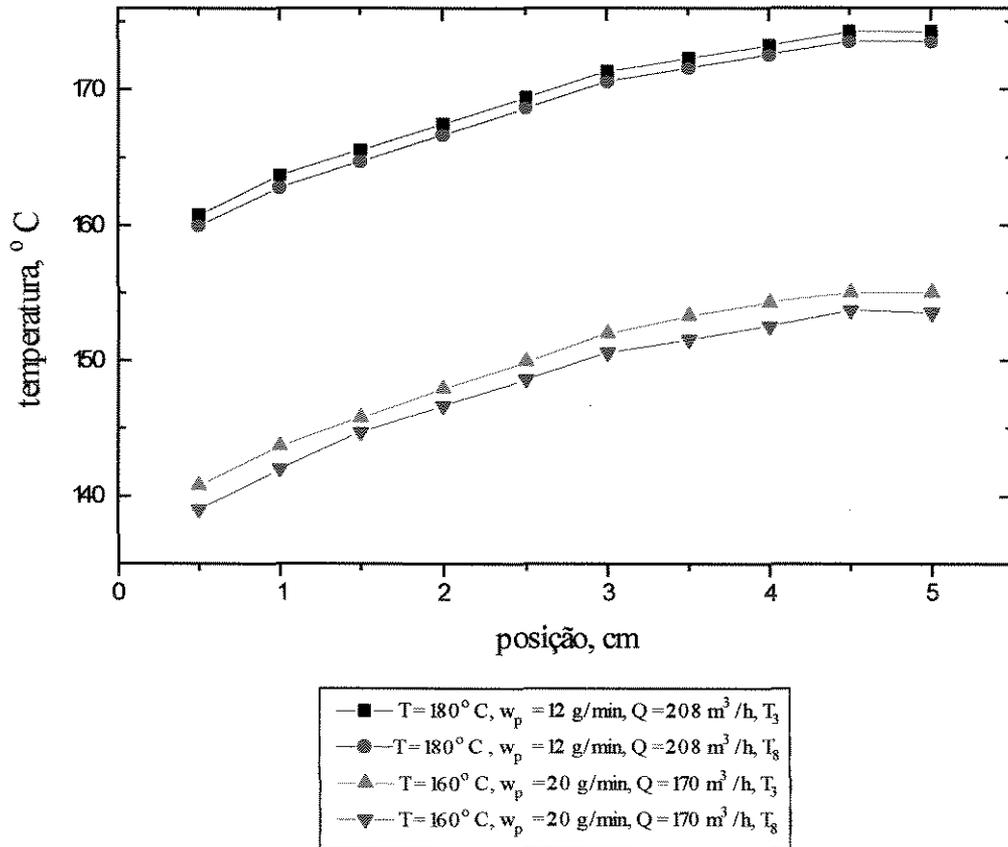


Figura 6.5 - Perfil de temperatura do ar no ciclone para os testes de secagem que apresentaram a maior e menor redução do teor de umidade.

As Figuras 6.6, 6.7 e 6.8 mostram a influência da temperatura, da vazão de ar e da vazão de alimentação de sólidos respectivamente, sobre o perfil de temperatura do ar.

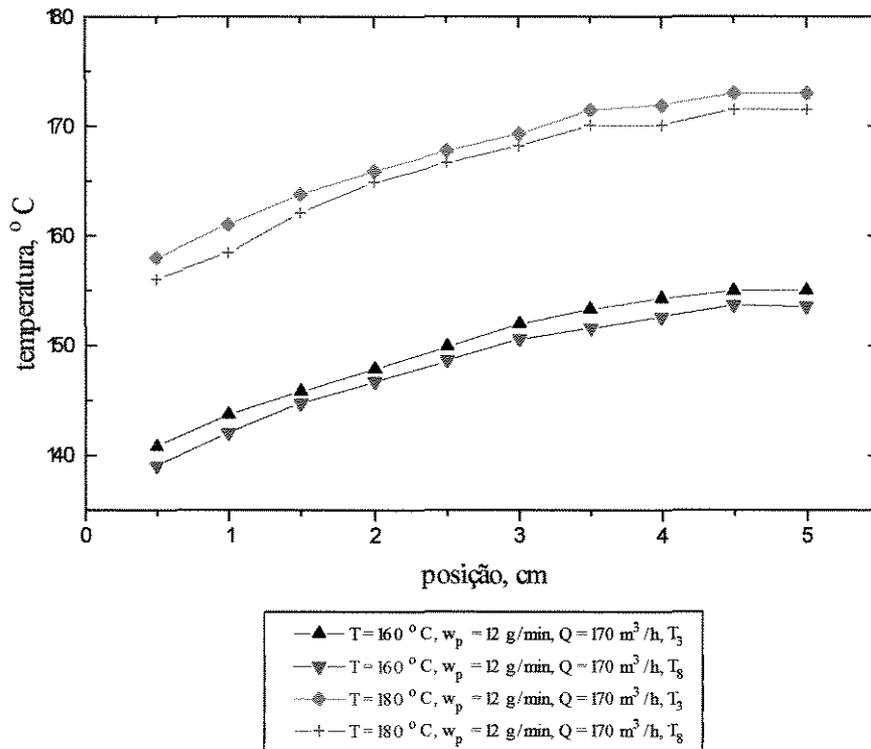


Figura 6.6 - Perfil de temperatura do ar no ciclone para os testes de secagem - influência da temperatura.

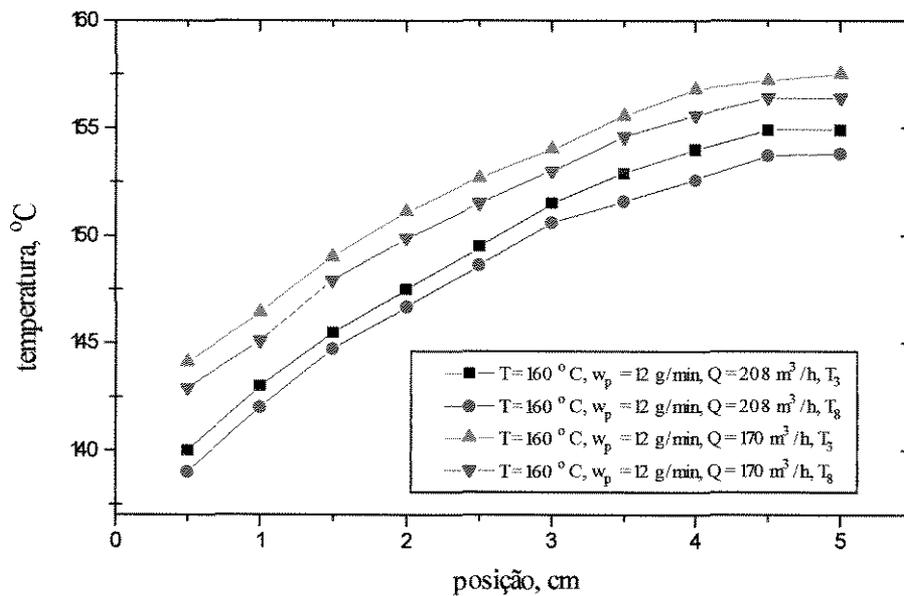


Figura 6.7 - Perfil de temperatura do ar no ciclone para os testes de secagem - influência da vazão de ar.

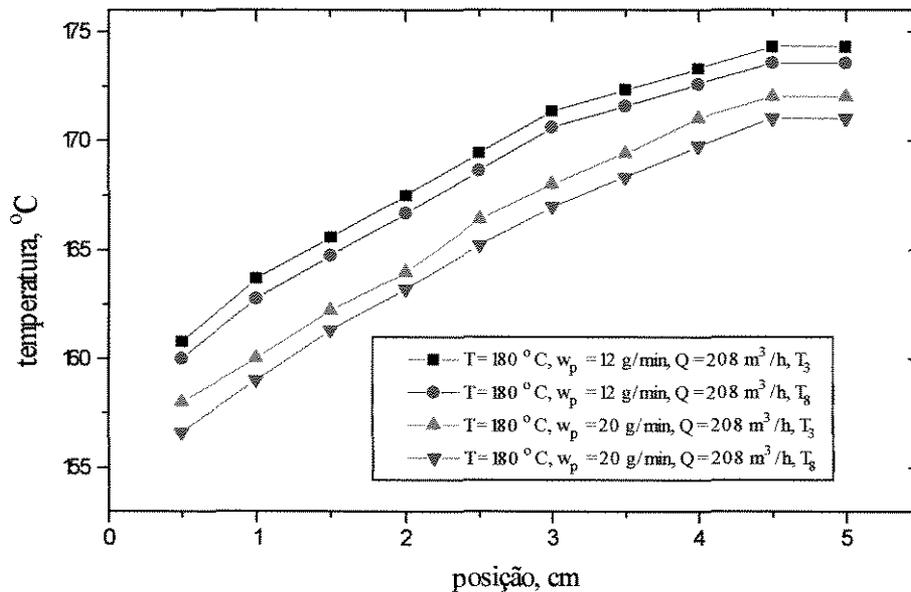


Figura 6.8 - Perfil de temperatura do ar no ciclone para os testes de secagem - influência da vazão de sólidos.

Observa-se em todas as curvas que a maior variação da temperatura ocorreu próximo à parede do ciclone. Segundo SILVA (1991), este comportamento se deve ao fato de que é na região próxima à parede onde efetivamente estão acontecendo as perdas de calor. CREMASCO (1994) obteve conclusão semelhante, justificando este decréscimo da temperatura próximo à parede lateral do ciclone devido às perdas de calor que ocorrem nesta região, as quais resfriam o escoamento.

Na Figura 6.8 pode-se observar que o aumento da vazão de sólidos provocou um abaixamento no perfil de temperatura do ar, confirmando as observações feitas no item 6.2.1 quanto à presença de sólidos na corrente gasosa.

É importante salientar que SILVA (1991), em seu trabalho de secagem ciclônica de borra de café, considerou o valor da temperatura de saída do ar a temperatura do centro. Neste trabalho, no entanto, como já foi dito no capítulo 5, a temperatura de saída do ar foi obtida através da média ponderada entre as temperaturas obtidas a partir do perfil na saída superior, uma vez que o perfil de temperatura no ciclone, o qual foi obtido fazendo-se as medições de temperatura radialmente desde 0,5 cm da parede (na parte cilíndrica) até o centro do ciclone (15,5 cm), demonstrou variação acentuada de temperatura.

A Figura 6.9 apresenta os perfis para a menor e para a maior temperatura de entrada do ar no ciclone e a Figura 6.10 apresenta o perfil para todas as sete temperaturas de entrada do ar no ciclone. No Apêndice D estão as tabelas com as temperaturas obtidas dos perfis.

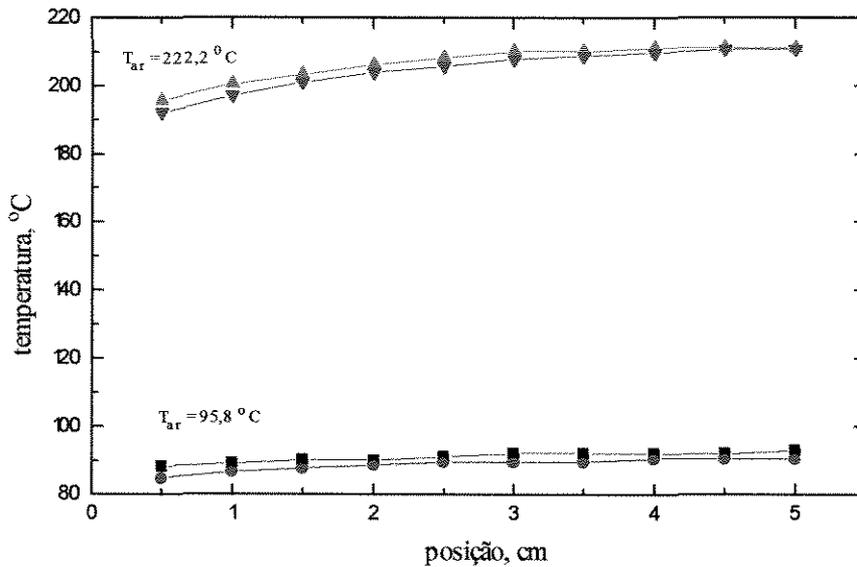


Figura 6.9 - Perfil de temperatura do ar no ciclone operando apenas com ar.

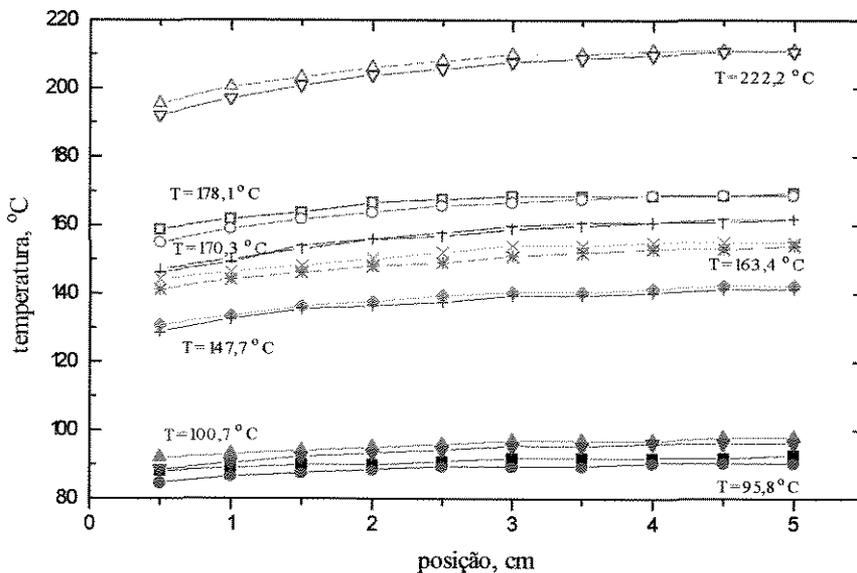


Figura 6.10 - Perfil de temperatura das sete temperaturas de entrada de ar no ciclone operando apenas com ar.

Como nos experimentos de secagem, observa-se também uma maior variação da temperatura próxima à parede do ciclone, sendo que este efeito é mais acentuado à medida que a temperatura se eleva.

Observa-se que nas Figuras 6.9 e 6.10 as temperaturas de saída do ar tanto superior quanto inferior apresentaram valores muito próximos, ao contrário dos experimentos de secagem. Isto vem a confirmar mais uma vez a significativa influência dos particulados sobre a corrente gasosa e, conseqüentemente, sobre o perfil de temperatura do ar.

A Figura 6.11 apresenta os perfis para uma mesma temperatura de entrada do ar para teste de secagem e teste no ciclone operando apenas com ar. Nesta Figura, para a mesma temperatura de entrada do ar, os perfis para os experimentos de secagem apresentaram mais suavizados em relação aos demais. Estes resultados concordam com os trabalhos de SZEKELY e CARR (1966), os quais, em seus estudos sobre a transferência de calor em ciclones, também realizaram experimentos com ciclone operando com ar bem com partículas sólidas. Os autores observaram que em todos os casos (já que utilizaram vários tipos de sólidos) ocorreu um decréscimo da temperatura do gás com a presença dos sólidos. Ainda segundo os autores, até mesmo uma pequena concentração de sólidos era suficiente para formar uma barreira efetiva para a passagem do calor.

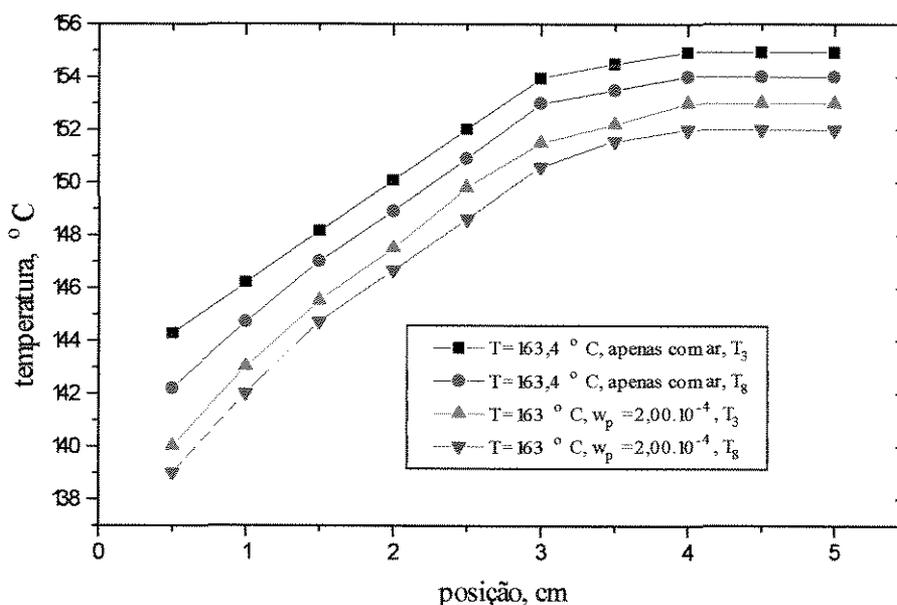


Figura 6.11 - Perfil de temperatura para teste de secagem e ciclone operando apenas com ar.

## 6.5 - Reciclos

A Tabela 6.7 apresenta os resultados dos testes de secagem com reciclo realizados no ciclone. Através destes testes observou-se que, dependendo das condições de entrada, foi necessário reciclar o material mais de uma vez. A Tabela 6.7 também mostra que o teste 1 foi o que apresentou melhor resultado, pois após a realização de dois reciclos foi atingido o teor de umidade desejado de 0,11 (10% (b.u.)). Além disso, as condições de operação em que foi realizado este teste, mostrou que este teor de umidade foi atingido quando foi utilizada a maior temperatura de ar de entrada, a menor vazão de ar e vazões de sólidos intermediárias. Nos demais testes, nem a realização de um terceiro reciclo foi suficiente para reduzir a umidade para o teor desejado. É importante ressaltar que esta análise está sendo feita sem levar em conta as interações entre os fatores temperatura-vazão.

Apesar do teste de secagem com dois reciclos a 250 °C ter atingido o teor de umidade desejado, deve ser levado em consideração os custos energéticos que acarretariam, ao ser utilizada uma temperatura tão alta.

Tabela 6.7- Resultados experimentais obtidos nos testes com reciclo de material.

Teste	Q, kg/s	$w_p \cdot 10^4$ , kg/s	$T_{e,ar}$ °C	$T_{s,ar}$ °C	$X_1$	$X_2$	Redução, %
1	0,0443	3,89	252	208	2,58	1,45	43,80
(1°R)	0,0443	2,62	255	215	1,45	0,53	63,44
(2°R)	0,0444	1,51	246	217	0,53	0,11	79,24
2	0,0506	4,79	106	95	2,78	2,40	13,66
(1°R)	0,0506	3,69	103	97	2,40	1,59	33,75
(2°R)	0,0506	3,00	103	98	1,59	1,16	27,04
(3°R)	0,0506	3,86	103	97	1,15	0,55	52,17
3	0,0546	1,45	178	151	2,12	1,33	37,26
(1°R)	0,0544	2,35	179	153	1,33	0,91	31,57
(2°R)	0,0543	3,18	179	152	0,91	0,63	30,76
(3°R)	0,0542	2,57	179	153	0,63	0,25	60,31

Uma observação importante cabe ser salientada em relação à Tabela 6.7. Apesar de os valores de vazão de sólidos estejam apresentados em base seca, não permanecem constantes durante os reciclos, até mesmo mantendo constante o ponto de atuação do alimentador de sólidos. Uma explicação para tal fato consiste na grande dificuldade de se manter constante a vazão de sólidos, pois estes tendem a sofrer desagregação à medida que vão sofrendo o processo de secagem. Além disso, ao diminuir-se o teor de umidade das partículas, a sua densidade sofre alteração, sendo que este fator influi diretamente na vazão de sólidos. Como o sistema de alimentação é vibratório, a densidade e o teor de umidade das partículas influenciam a vazão de sólidos para mesmos graus de vibração. A terceira explicação para tal fato diz respeito ao tempo de residência das partículas no ciclone, que está diretamente relacionado com a razão entre a vazão de ar e a vazão de sólidos. Portanto, qualquer variação nesta razão, o tempo de residência também sofrerá variação e, conseqüentemente, a vazão de sólidos.

Baseado no parágrafo acima, pode-se concluir que é muito difícil manter constante a vazão de sólidos durante reciclos em testes de secagem realizados em ciclones.

### **6.6 - Tempo de residência das partículas**

A Tabela 6.8 apresenta os valores obtidos para os tempos de residência das partículas de sabugo de milho no interior do ciclone, nas condições em que foram realizados os experimentos.

Tabela 6.8 - Tempo de residência das partículas em função da vazão de sólidos ( $X = 3,3$  bs).

<b>Vazão de sólidos, kg/s . 10<sup>4</sup></b>	<b>Tempo de residência, s</b>
2,00	16,20
3,33	14,01
8,57	9,87
10,03	10,98

Observou-se que, exceto o teste 4, houve um decréscimo no tempo de residência das partículas no interior do ciclone à medida que a vazão de sólidos aumentou, concordando com resultados obtidos por SILVA (1991).

## 7 - CONCLUSÕES

A partir do trabalho realizado chegou-se a algumas conclusões:

- As partículas secas de sabugo de milho apresentaram um poder calorífico médio de 3800 kcal/kg, o que significa que podem ser utilizadas como combustível alternativo sólido;
- Em relação à cinética de secagem, os constituintes correspondentes à palha e à medula do sabugo de milho apresentaram curvas de secagem semelhantes, ao contrário do anel lenhoso que apresentou uma conformação completamente diferente das demais. Com isso, concluiu-se que tal fato pode estar relacionado com a alta dureza do anel lenhoso. Nas condições em que os testes foram realizados, apenas o anel lenhoso não apresentou o período de secagem à taxa constante.
- Os experimentos realizados no ciclone mostraram que o equipamento possui a capacidade de secar partículas, apesar do tempo de permanências das mesmas no interior do equipamento ser relativamente baixo. Baseado nisto, a secagem de materiais termo-sensíveis no ciclone seria mais eficiente.
- Nos experimentos de secagem, a análise dos fatores sobre a resposta nos níveis em que foram estudados, mostrou que o aumento da temperatura do ar de entrada não foi significativo e que o aumento da vazão de ar contribuiu para reduzir o teor de umidade das partículas. Entretanto, a principal influência sobre a redução da umidade das partículas foi a vazão de sólidos, onde o aumento desta provocou uma redução na retirada de umidade das partículas.
- Os dois níveis de granulometria estudados não influenciaram a redução do teor de umidade por apresentarem diferença muito pequena, de apenas 10 % entre eles.
- O teor de umidade desejado de 0,11 (10 % em base úmida) só foi atingido nos experimentos de secagem quando foram realizados recícos. Além disso, para as condições em que foram realizados, foi necessário que o material fosse reciclado mais de uma vez e que a temperatura do ar de entrada fosse muito elevada, 250 °C.

↳ Com relação aos perfis de temperatura do ar para os experimentos de secagem, verificou-se que a presença dos sólidos particulados provocou um abaixamento no perfil. Além disso, as curvas dos perfis mostraram que a maior variação de temperatura acontece próxima à região da parede do ciclone, pois é nesta região onde aconteciam as perdas de calor. Os perfis de temperatura mostraram também que a temperatura de saída do ar no ciclone deve ser considerada como a média ponderada entre os valores das temperaturas do perfil.

## 8 - SUGESTÕES

Em relação ao material, seria interessante uma pesquisa mais profunda em relação à cinética de secagem dos diversos componentes do sabugo de milho. Poder-se-ia desenvolver um estudo cinético comparativo entre os componentes relativos ao sabugo e aos grãos de milho propriamente ditos, com a finalidade de verificar as diferenças entre as curvas e taxas de secagem. Além disso, um estudo poderia ser desenvolvido também em relação à dureza do anel lenhoso, aproveitando-a para algum fim.

No equipamento, um controle satisfatório das variáveis temperatura de entrada do ar e vazão de sólidos por meio de um dispositivo para tal fim seria interessante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABALONE, R.M., LARA, M.A. ; PIACENTINI, R.D. Drying of biological products with significant volume variation. Experimental and modeling results for potato drying *Drying Technology*, v.2, n. 3, p. 629-647, 1994.
- ABEELS, P.F.J. Biomass harvesting technology and energy balance. In: FERRERO, G.L.; GRASSI, G.; WILLIAMS, H.E. *Biomass energy: from harvesting to storage*, Elsevier Applied Science, New York:, 1986.
- ABIA - Associação Brasileira das Indústrias da Alimentação. For Editora e Promotora Ltda, São Paulo, 1994-95.
- ANONIMUS Let residue disposal pay for itself *Power*, fevereiro, p. 60-61, 1971.
- AVELAR, B.C *Cultura do milho* In: EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, Sete Lagoas, 1980.
- BAGBY, M.O.; WIDSTROM, N.W. Biomass uses and conversions In: WATSON, S.A.; RAMSTAD, P.E. *Corn: Chemistry and Technology*, Ed. St. Paul: The American Association of Cereal Chemists, 1984.
- BARROS NETO, B. de; SCARMINIO, I.S. e BRUNS, R.E. - *Planejamento e otimização de experimentos*. Editora da Unicamp; Campinas/ SP, 1995.
- BEECKMANS, J.M.; MORIN, B. The effect of particulate solids on pressure drop across a cyclone. *Powder Technology*, v. 2, p. 227-232, 1987.
- BIAGI, J.D.; VALENTINI, S.R.T.; QUEIROZ, D.M. Secagem de produtos agrícolas In: CORTEZ, L.A.; MAGALHÃES, P.C.G. (coord.) *Introdução à Engenharia Agrícola*, Campinas, Editora da UNICAMP, 1993.

- BIFFIN, M.; SYRED, N.; SAGE, P. Enhance collection efficiency for cyclone dust separators. *Chemical Engineering Research Design.*, v. 62, n. 4, p. 261-265, 1984.
- BROOKER, D.B, ARKEMA, F.W. e HALL, C.W. *Drying Cereals Grains*, The Avi Publishing Company, Inc, Connecticut, 1982.
- CAMPOS, T. de; CANECHIO FILHO, V.C. *Principais Culturas* Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas, 1978.
- CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. *Biomassa - Coadjuvante na Oferta Total de Energia*. Coleção José Ermínio de Moraes, vol. 8, 1980.
- CORNEJO, F.E.P. *Estudos dos parâmetros de secagem e construção de um secador de baixo custo para filés salgados de pescado*, Tese de mestrado, FEAGRI/UNICAMP, Campinas, SP, 1987.
- CREMASCO, M.A. ; NEBRA, S.A. Estudo experimental da influência de particulados na transferência de calor gás-parede em um ciclone, *Anais do XXI Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos (ENEMP)*, Ouro Preto, MG, v. 1, p. 301-311, 1994.
- CREMASCO, M.A.; MOMPEAN da CRUZ, G.M. ; NEBRA, S.A. Experimental study of the gas-wall heat transfer, in *Proceedings of the International Symposium on Heat and Mass Transfer in Energy Systems and Environmental Effects*, v.1, Cancun, México, 1993.
- DALBELLO, O. *Eficiência do processo de secagem do amendoim ( Arachis hypogaea ) e milho-pipoca ( Zea mays L .)*, Tese de mestrado, FEAGRI/ UNICAMP, Campinas (SP), 1995.
- DAL FABRO, I.M. e DIAS, E.L. *Gasogênio* Série Tecnologia Agroindustrial. São Paulo, 1982.

- DAUDIN, J.D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides, *Journal International de Science et de Technologie des Aliments*, v. 3, p. 1-36, 1983.
- DELMÉE, J. P. *Manual de medição de vazão*. Edgard Blücher, São Paulo, 1983.
- FANCELLI, A.L. Tecnologia da produção de milho In: FANCELLI, A.L.; LIMA, U. de A. Milho - produção, pré-processamento e transformação agroindustrial, *Série Extensão Agroindustrial*, v. 5, 1982.
- FOLEY, K.M.; VANDER HOOVEN, D.I.B. Properties and industrial uses of corncobs In: POMERANZ, Y.; MUNCK L. *Cereals - a renewable resource*. The American Association of Cereal Chemists, St. Paul, 1981.
- FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; BRYCE ANDERSEN, L. *Princípios das operações unitárias*. Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.
- FRANCO, G. *Tabela de composição química dos alimentos*. Escola Central de nutrição - FEFIEG, Biblioteca Planutre, 1974.
- GODOY, A. L. *Estudo teórico e experimental do tempo de permanência de partículas em ciclones de gás*, Tese de mestrado. FEM/Unicamp, Campinas (SP), 1989.
- GODOY, A. L.; SILVA, M.A.; NEBRA, S.A. Análise experimental do tempo de permanência de partículas em ciclones de gás. *Anais do XX Encontro sobre escoamento em meios porosos (ENEMP)*, v.2, São Carlos (SP) 1992. p.251-261.
- HALL, C.W. *Dictionary of drying* Marcel Dekker, Inc. N.Y. and Basel, 1979.
- HIMMELBLAU, D.M. *Engenharia Química - Princípios e Cálculos*. 4ª edição, Prentice/Hall do Brasil Rio de Janeiro, 1982.
- HOLMANN, J. P. *Transferência de calor*, 3ª edição, São Paulo: Mc Graw-Hill, 1977.

- IBGE *Brasil em números*. Secretaria de Planejamento, Orçamento e Coordenação, v. 3. Rio de Janeiro, 1995.
- KEEY, R. B. *Drying: principles and practice*, Pergamon Press, Oxford, 1972.
- KENT, N.L. *Technology of cereals*. 2<sup>nd</sup> edition, Pergamon Press, St Louis 1975.
- KENT, N.L. *Technology of cereals - An introduction for students of food science and agriculture*, 3<sup>rd</sup> edition, Pergamon Press, St Louis, 1983.
- KNEULE, F. *El secado*. Urmo, Castellon, 1966.
- KRAMERS, J.; BÜTTNER, H. The cyclone scrubber - a high efficiency wet separator *Chemical Engineering Technology*, v. 17, p. 73-80, 1994.
- LINDEN, A.J. ter Investigations into cyclone dust collectors. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, v. 160, p. 233-251, 1949.
- LORENZ, K.; KULP, K. *Handbook of cereal science and technology*. Marcel Dekker Inc., 1991.
- LUENGO, C.A. e EMMERICH, F. *Fabricação do carvão vegetal* Série Tecnologia Agroindustrial, São Paulo, 1982.
- MENON, A.S.; MUJUMDAR, A.S. Drying of solids: Principles, classification and selection of dryers In: MUJUMDAR, A.S. *Handbook of industrial drying*, Marcel Dekker Inc., New York, 1987.
- MIC - MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E COMÉRCIO. *Energia da Biomassa: Alavanca de uma nova política industrial*. Brasília, 1986.

- MI - MINISTÉRIO DO INTERIOR *Contribuição ao desenvolvimento da agroindústria* v. 15, GEIDA/FCTPTA, Campinas, 1974.
- MOHSENIN, N.N. *Physical properties of plant and animal materials. V. I: Structure, physical characteristics and mechanical properties*, Bordon and Beach Sci. Pub., New York, 1970.
- MOREY, R.V.; LANG, J.P. ; HANSEN, D.J., Processing and combustion of corncobs to dry corn *American Society of Agricultural Engineers*, v. 30, n. 5, p. 1466-1472, 1987.
- MOTHES, H. ; LÖFFLER, F. Prediction of particles removal in cyclones separators. *International Chemical Engineering*, v. 28, n. 2, p. 231-240, 1988.
- NAPIER-MUNN, T.J. Pressure drop in dense-medium cyclones *International Journal of Mineral Processing*, v.16, p. 209-230, 1986.
- NEBRA, S.A. *Secagem pneumática de bagaço de cana*. Tese de Doutorado. FEC/UNICAMP, Campinas (SP), 1985.
- OGAWA, A. Estimation of the collection efficiencies of the three types of the cyclones dust collectors from the standpoint of the flow patterns in the cylindrical cyclone dust collectors *Bulletin of JSME*. v. 27, n. 223, p. 64-69, 1984.
- PARKER, R.; JAIN, R.; CALVERT, S. *Environment Science Technology* v. 15, n. 4, p. 451-458, 1981.
- PATERNIANI, E.; GOODMAN, M.M. *Races of maize in Brazil* Cimmyt - Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo, México, 1977.
- PATTERSON, P. A. ; MUNZ, R. J. Cyclone collection efficiencies at very high temperatures. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 67, n. 2, p. 321-328, 1989.
- PERRY, R.H. ; CHILTON C.H., *Chemical Engineers' Handbook*, 5<sup>th</sup> edition. Mc Graw Hill Book Company, Tokyo, 1985.

- QUIRINO, M.H.G. ; ALSINA, O.L. de Cinética de secagem de sabugo de milho. *Anais do XIV Encontro sobre escoamento em meios porosos (ENEMP)*, v. 1, p. 127-143, 1986.
- RANZ, W. E. Wall flows in cyclone separator: a description of internal phenomena. *Aerosol Science and Technology*. v. 4, p. 417-432, 1985.
- ROSSI, S.J. *Psicrometria*. FUNAPE - Fundação de Apoio à Pesquisa e à Extensão, João Pessoa, 1987.
- ROSSI, S.J. ; ROA, G. *Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural* Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, São Paulo, 1980.
- SAGE, P.W. ; WRIGHT, M.A. The use of gas bleeds to enhance cyclone performance *Filtration and Separation*, p. 32-36, 1986.
- SERIE TECNOLOGIA INDUSTRIAL. *Fabricação do carvão vegetal*. Governo do Estado de São Paulo - Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia. São Paulo, 1985.
- SILVA, M. A. *Estudo da secagem em ciclone* Tese de Doutorado, FEM/Unicamp, Campinas (SP), 1991.
- SOKHANSANJ, S. Grain drying simulation with respect to energy conservation and grain quality In: MUJUMDAR, A. S. (ed) *Advances in drying*, v. 3, Hemisphere Publishing Co., 1984.
- STAIRMAND, C.J. The design and performance of cyclone separators. *Trans. Instn. Chem. Engrs.* v. 29, p. 356-383, 1951.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*. Gordon and Breach Sci. Pub., Montreaux;, 1986.

- SUMMER, R.J.; BRIENS, C.L.; BERGOUGNOU, M.A. Study of a novel uniflow cyclone design. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 65, 470-475, 1987.
- SZEKELY, J.; CARR, R. Heat transfer in a cyclone. *Chemical Engineering Science*, v. 21, p 1119-1132, 1966.
- TREFZ, M. ; MUSCHELKNAUTZ, E. Extend cyclone theory for gas flows with high solids concentrations, *Chemical Engineering Technology*, v. 16, p. 153-160, 1993.
- VANDER HOOVEN, D.I.B. Industrial and agri-chemical utilization of corncobs In: POMERANZ, Y.; CHAIRMAN *Industrial uses of cereals*,: Symposium Proceedings, St. Louis, 1973.
- VEGA, R.E. e ALVAREZ, P.I. Determinación experimental del coeficiente de fricción Cinético y ángulo de reposo de sólidos particulados *Anais do XXIV Encontro de Escoamento em Meios Porosos (atual COBRASP)*. Uberlândia, 1996.
- YEN, S.C.; LU, W-M.; SHUNG, S.C. Gas-solid heat transfer in a gas cyclone *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineering*, v. 21, n. 9, p. 197-206, 1990.
- YUU, S.; JOTAKI, T.; TOMITA, Y.; YOSHIDA, K. The reduction of pressure drop due to dust loading in a conventional cyclone. *Chemical Engineering Science*, v. 330, p. 1573-1580, 1978.
- ZHANG, Q.; LITCHFIELD, J.B. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*, v. 9, n. 1, p. 233-244, 1991.
- ZHOU, L. X.; SOO, S. L. Gas-solid flow and collection of solids in a cyclone separator. *Powder Technology*, v. 63, p. 45-63, 1990.

## APÊNDICE A

### A.1 - Determinação do calor específico das partículas:

Para a determinação do calor específico das partículas de sabugo de milho seco, determinou-se, primeiramente, o equivalente em água do tubo de Dewar,  $W$ , através do balanço para o sistema tubo de Dewar-água em equilíbrio, WORSNOP (1964):

$$m_{ag} C_{p_{ag}} (T_{i_{ag}} - T_{f_{sist.}}) = m_{tubo} C_{p_{tubo}} (T_{f_{sist.}} - T_{i_{tubo}}) \quad (A.1)$$

Onde:

$m_{tubo} C_{p_{tubo}} = W$  = equivalente em água do tubo de Dewar

$m_{ag}$  = massa de água

$C_{p_{ag}}$  = calor específico da água

$T_{i_{ag}}$  = temperatura inicial da água

$T_{f_{sist.}}$  = temperatura final do sistema tubo-água em equilíbrio

$T_{i_{tubo}}$  = temperatura inicial do tubo

$C_{p_{tubo}}$  = calor específico do tubo

O procedimento experimental consistiu na realização dos seguintes passos:

1. determinou-se a temperatura inicial do tubo, a qual era a própria temperatura ambiente, bem como sua massa;
2. colocou-se água quente no tubo e anotou-se a temperatura inicial. Quando esta não mais variasse, obtinha-se a temperatura de equilíbrio do sistema;
3. determinou-se a massa do sistema tubo-água.

Para as condições realizadas obteve-se os seguintes resultados:

$$T_{i_{tubo}} = 27,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{i_{ag}} = 92,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{f_{sist.}} = 89,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$m_{ag} = 227,56 \text{ g}$$

$$cp_{ag} = 1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

Substituindo estes valores na Equação A.1, tem-se:  $W = 12,84 \text{ cal/}^\circ\text{C}$ .

Para a determinação do calor específico das partículas, foi utilizada a Equação do balanço para o sistema tubo de Dewar-água-amostra, WORSNOP (1964):

$$m_{ag} C_{p_{ag}} (T_{i_{ag}} - T_{f_{sist.}}) = (W + m_{am.} C_{p_{am.}}) (T_{f_{sist.}} - T_{i_{tubo}}) \quad (\text{A.2})$$

Onde:

$$m_{tubo} C_{p_{tubo}} = W = \text{equivalente em água do tubo, cal/}^\circ\text{C}$$

$$m_{ag} = \text{massa de água, g}$$

$$C_{p_{ag}} = \text{calor específico da água, cal/g } ^\circ\text{C}$$

$$T_{i_{ag}} = \text{temperatura inicial da água, } ^\circ\text{C}$$

$$T_{f_{sist.}} = \text{temperatura final do sistema tubo-água-amostra em equilíbrio, } ^\circ\text{C}$$

$$T_{i_{tubo}} = \text{temperatura inicial do tubo, } ^\circ\text{C}$$

$$m_{tubo} = \text{massa do tubo, g}$$

$$C_{p_{tubo}} = \text{calor específico do tubo, cal/g } ^\circ\text{C}$$

$$m_{am.} = \text{massa da amostra, g}$$

Neste caso, os valores obtidos foram:

$$T_{i_{tubo}} = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{i_{ag}} = 93,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{f_{sist.}} = 88,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_{p_{ag}} = 1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

$$m_{ag} = 208,63 \text{ g}$$

$$m_{am} = 4,2 \text{ g}$$

$W = 12,84 \text{ cal/}^\circ\text{C}$  (dos cálculos anteriores).

Substituindo os valores acima em A.2 tem-se:  $cp_{am} = 0,782 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$ .

Obs.: os valores do calor específico da água deveriam ser tomados entre a temperatura inicial da mesma e a temperatura de equilíbrio do sistema. Porém, por estarem muito próximos da unidade, os cálculos foram feitos com este valor.

## A.2 - Determinação do poder calorífico das partículas

O poder calorífico das partículas de sabugo de milho seco foi determinado pelo método da bomba calorimétrica, e calculado a partir da Equação A.3:

$$H_s = \frac{(T.A.) - e_1 - e_2 - e_3}{p} \quad (\text{A.3})$$

Onde:

$H_s$  = poder calorífico superior, cal/g

$T$  = elevação da temperatura, determinada a partir da Equação A.4

$A$  = equivalente em água do calorímetro, em cal/  $^\circ\text{C}$ , determinado pela Equação A.5

$e_1, e_2, e_3$  = correções termométricas

$p$  = peso da amostra.

A elevação de temperatura ocorre logo após a queima da amostra, e para o calorímetro isotérmico, é calculada pela Equação A.4:

$$T = T_c - T_a - r_1 (b - a) - r_2 (c - b) \quad (\text{A.4})$$

Onde:

$T$  = elevação da temperatura corrigida,  $^\circ\text{C}$ ;

$a$  = tempo de ignição (instante em que se dá a ignição), s;

$b$  = tempo em que a elevação de temperatura alcança 60% do total, s;

$c$  = tempo do início do período no qual a variação de temperatura com o tempo torna-se constante, s;

$T_a$  = temperatura no momento da ignição (no instante  $a$ ), °C;

$T_c$  = temperatura no tempo  $c$ , °C;

$r_1$  = razão (unidade de temperatura/minuto) na qual a temperatura se elevou durante o período de 5 minutos, °C/min;

$r_2$  = razão na qual a temperatura se elevou durante o período de 5 minutos após o tempo  $c$ , °C/min.

Para a padronização, é necessária a determinação do equivalente em água do calorímetro utilizando ácido benzóico padrão como amostra. O equivalente em água do calorímetro é definido pela Equação A.5:

$$A = \frac{H \cdot P + e_1 + e_3}{T} \quad (\text{A.5})$$

Onde:

$A$  = equivalente em água do calorímetro, cal/°C;

$H$  = poder calorífico do ácido benzóico padrão, 6318 cal/g;

$P$  = peso da amostra de ácido benzóico, g;

$T$  = elevação da temperatura corrigida;

$e_1$  = correção para o calor de formação de ácido nítrico, cal;

$e_3$  = correção para o poder calorífico do fio de ignição, cal;

Os fatores de correção foram determinados para cada ensaio. Para o calor de formação do ácido nítrico  $e_1$ , é aplicada a correção de 1 caloria para cada mililitro de álcali padrão usado na titulação de ácido, neste caso, o valor do calor de formação é o próprio volume de álcali gasto na titulação do ácido. A correção para o calor de formação do ácido sulfúrico  $e_2$ , em calorias, é a aplicação de 1,4 kcal para cada grama de enxofre na amostra. Para o fio de ignição, o valor do poder calorífico corrigido depende do material. por exemplo, para fios de ferro n° 34 B, o valor de  $e_3$  é de 2,7 cal/cm; para fios de cromo C n° 34 B, o valor é de 2,3 cal/cm.

Para as condições realizadas, foram obtidos os seguintes valores para o cálculo do poder calorífico das partículas de sabugo de milho seco:

$$A = 312,26 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

$$T = 12,28994 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$e_1 = 3 \text{ cal}$$

$$e_2 = 0$$

$$e_3 = 34,5 \text{ cal}$$

$$p = 1,001 \text{ g}$$

que substituindo na Equação A.3 obtém-se  $H_s = 3796,36 \text{ cal/g}$ .

## APÊNDICE B

### B.1 - Equações auxiliares utilizadas para o cálculo da vazão de ar

Dada a equação para o cálculo da vazão de ar, DELMÉE (1983):

$$Q_{ar} = CE \beta_1^2 A_s \left( \frac{2\Delta P}{\rho_{ar,u}} \right)^{1/2} \quad (B.1)$$

Para o cálculo da densidade do ar úmido  $\rho_{a,u}$ , partiu-se da equação dos gases ideais:

$$PV = nRT \quad (B.2)$$

Rearranjando a Equação B.2 obtém-se:

$$\rho_{ar,u} = \frac{P_{abs} M_{ar,u}}{R T} \quad (B.3)$$

Onde:

$P_{abs}$  = pressão absoluta do ar,

$M_{ar,u}$  = mol do ar úmido,

R = constante universal dos gases

T = temperatura do ar

O mol do ar úmido foi calculado pela Equação B.4.

$$M_{ar,u} = \frac{1 + Y}{\frac{1}{M_{ar}} + \frac{Y}{M_{vap}}} \quad (B.4)$$

A umidade do ar foi calculada pela Equação B.5, VAN WYLEN (1976) apud SILVA (1991):

$$Y = \frac{Cp_{ar}(T_{bu} - T_{bs}) + M_{vap} / M_{ar} \left( P_{vap} / (P_{atm} - P_{vap}) \right) H_{ag-vap}}{H_{vap(T_{BS})} - H_{ag(T_{BU})}} \quad (B.5)$$

O calor específico do ar utilizado foi o calor específico médio, o qual foi obtido tendo como temperatura de referência a média entre a entrada e a saída de ar, SILVA (1991). Baseado nisso, para as condições estudadas  $Cp_{ar} = 1,0144 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ , HOLMAN (1983).

As temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido foram lidas num psicrômetro da marca Hidrologia do tipo de dois termômetros, com ventoinha; menor divisão  $0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Os pesos moleculares do ar e do vapor d'água são 28,97 e 18,016, respectivamente.

Calculou-se a pressão de vapor de saturação (em mmHg) do vapor d'água à temperatura de bulbo úmido (em K), pela equação de Antoine:

$$\ln(p_{vap}) = A - \frac{B}{T + C} \quad (B.6)$$

Sendo as constantes:  $A = 18,3036$   
 $B = 3816,44$   
 $C = 46,13.$

A pressão barométrica foi lida em um barômetro do tipo aneróide, situado no laboratório adjacente; menor divisão  $0,5 \text{ mbar}$ .

As expressões para os cálculos das entalpias da água líquida e do vapor são, respectivamente, as Equações B.7 e B.8, MENON e MUJUMDAR (1987):

$$H_{ag} = Cp_{ag} T_{(BS)} \quad (B.7)$$

$$H_{vap} = \Delta H_{vap} + Cp_{vap} T_{(BU)} \quad (B.8)$$

Onde:

$Cp_{ag} = 4,184 \text{ kJ/ Kg } ^\circ\text{C}$  (para  $T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), HOLMAN (1983)

$\Delta H = 40,65 \text{ kJ/gmol} \cong 2258 \text{ kJ/kg}$ , HIMMELBLAU (1982)

$C_{p_{\text{vap}}} = 1,985 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$  (para  $T = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), HOLMAN (1983)

A pressão absoluta do ar teve seu valor tomado antes da placa de orifício. Para isto, foi construída uma curva de calibração para a determinação da pressão manométrica em função da queda de pressão, mostrada na Figura B.1.

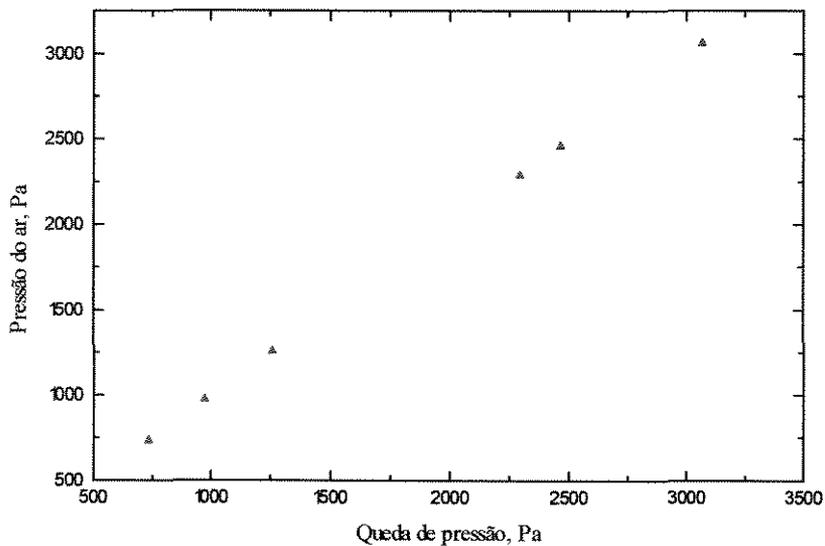


Figura B.1 - Curva de pressão manométrica do ar na placa de orifício em função da queda de pressão.

A regressão linear da Figura B.1 forneceu os seguintes parâmetros, para a equação da reta no formato  $Y = A + B X$ :

$$A = 8,29567$$

$$B = 5,34995$$

$$R = 1,0.$$

## **B.2 - Curvas de calibração dos termopares e do termômetro digital tipo caneta**

Os termopares bem como o termômetro foram calibrados pelos alunos de iniciação científica do CNPq (cota do Projeto “Secagem de Resíduos Agro-industriais III”) Ruth Keiko Kuriyama e Douglas Ricardo Norberto, do curso de Engenharia Química, UNICAMP. Das regressões lineares das curvas, foram obtidas as seguintes equações:

- termômetro tipo caneta  $\Rightarrow T_p = 1,011 T_T - 0,778$
- termopar 1 (aquecedor)  $\Rightarrow T_p = 0,958 T_T - 3,060$
- termopar 2 (entrada do ciclone)  $\Rightarrow T_p = 0,980 T_T - 4,125$
- Termopar 3 (saída superior de ar)  $\Rightarrow T_p = 0,967 T_T - 4,623$
- Termopar 6 (silo alimentador)  $\Rightarrow T_p = 0,973 T_T - 5,266$
- Termopar 8 (saída inferior de ar)  $\Rightarrow T_p = 0,977 T_T - 5,290$

## **APÊNDICE C**

Relação de todas as indústrias produtoras de milho em conserva e/ou derivados consultadas para a realização deste trabalho:

- **CONIEXPRESS S/A.**

Rua Calçada das Begônias, 20 - sl.21.

Barueri/SP.

CEP 0653-000

- **CONSERVAS ODERICH**

Rua Oderich, 807.

São Sebastião do Cai/RS.

CEP 95760-000.

- **ISA DO BRASIL**

Praça da Liberdade, 262 - 2º andar.

São Paulo/SP.

CEP 01503-010.

- **SWIFT - ARMOUR S/A IND. e COM.**

Rua Irineu José Bordon, 215.

São Paulo/SP.

CEP 05120-060.

- **ADRAM S/A INDÚSTRIA e COMÉRCIO**

Rua 33, 880.

Mauá da Serra/PR.

CEP 86827-000.

- **ARISCO PRODUTOS ALIMENTÍCIOS LTDA.**

Av. Paulista, 2073, 24º andar - Horsa II.

São Paulo/SP. CEP 01311-020.

- **CEVAL ALIMENTOS S/A.**

Rodovia Jorge Lacerda, km 20, s/n.

Gaspar/SC.

CEP 89110-000.

- **CICA S/A.**

Rua Cica, 201.

Jundiaí/SP.

CEP 13206-900.

- **PAOLETTI - COMPANHIA IND. e MERCANTIL**

Rua Luis Coelho, 223.

São Paulo/SP.

CEP 01309-901.

- **COMPANHIA LORENZ**

Rua São Paulo, 3068.

Blumenau/SC

CEP 89030-000.

- **COOPERATIVA REGIONAL ALFA LTDA**

Rua Fernando Machado, 2580-D.

Chapecó/SC.

CEP 89803-900.

- **CONCÓRDIA LTDA (COOPERATIVA DE PRODUÇÃO E CONSUMO)**

Rua Dr. Maruri, 1563.

Concórdia/SC.

CEP 89700-000.

- **INDÚSTRIAS GRANFINO S/A**

Estrada Plínio Casado, 1525.

Nova Iguaçu/RJ.

CEP 26220-410.

- **MOINHO TUPY LTDA.**

Rua Emílio Kroni, 12

União da Vitória/PR.

CEP 84600-000.

- **NUTRISUL S/A PRODUTOS ALIMENTÍCIOS**

Rua Nereu Ramos, 55.

São Lourenço do Oeste/PR.

CEP 89990-000.

- **REFINAÇÕES DE MILHO BRASIL LTDA**

Praça da República, 468 7º andar.

São Paulo/SP.

CEP 01045-907.

## APÊNDICE D

### D.1 - Apresentação das planilhas de cálculo.

As planilhas abaixo contêm todos os resultados obtidos dos testes realizados no ciclone operando apenas com ar.

Tabela D.1 - Planilha de cálculo para o ciclone operando apenas com ar.

<b>Teste</b>	<b>T<sub>ar</sub>, °C</b>	<b>ΔP, kPa</b>	<b>T<sub>placa</sub>, °C</b>	<b>T<sub>BU</sub>, °C</b>	<b>T<sub>BS</sub>, °C</b>	<b>P<sub>atm</sub>, kPa</b>	<b>P<sub>(sat)</sub>, kPa</b>	<b>H(v), kJ/kg</b>	<b>H(v)*, kJ/kg</b>	<b>H(l), kJ/kg</b>	<b>H(lv), kJ/kg</b>	<b>Y</b>	<b>M<sub>(ar,u)</sub></b>	<b>ρ<sub>(ar)</sub>, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Q, m<sup>3</sup>/h</b>	<b>v, m/s</b>
1	87	0,166	31	19,8	21,2	95,1	3,218	2295,5	2298,3	82,84	2212,7	0,021	28,63	1,181	218,58	7,48
2	92	0,193	35	25,2	27,6	95,1	2,586	2306,2	2311,0	105,43	2200,8	0,017	28,71	1,170	236,42	8,09
3	135	0,168	32	21,8	24,4	95	3,218	2306,6	2309,8	106,27	2200,4	0,021	28,63	1,163	204,82	7,01
4	146	0,143	35	25,4	27	95,2	2,586	2299,5	2304,6	91,21	2208,3	0,016	28,71	1,181	219,76	7,52
5	153	0,172	32	19,4	24,8	94,9	2,227	2294,7	2305,4	81,16	2213,6	0,012	28,78	1,181	222,27	7,60
6	159	0,146	33	19,8	25,4	95	2,284	2295,5	2306,6	82,84	2212,7	0,012	28,77	1,176	206,22	7,05
7	198	0,143	31	18,4	24	95,2	2,091	2292,8	2303,9	76,98	2215,8	0,011	28,80	1,187	202,56	6,93

Para o cálculo da vazão de ar, utilizou-se as constantes CEL e Br (ver Equações 5.4 e 5.5) cujos valores foram, respectivamente 0,73348133 e 0,00409546.

A Tabela D.2 apresenta todos os resultados obtidos dos experimentos de secagem das partículas de sabugo de milho no ciclone. Por questão de espaço e para uma melhor visualização, A Tabela D.2 foi dividida em quatro partes.

Tabela D.2 - Resultados experimentais dos testes de secagem de partículas de sabugo de milho realizados no ciclone.

Teste	$Q_{ar}$ , kg/s	$T_{e,ar}$ , °C	$T_{s,ar}$ , °C	$Y_e$	$Y_s$	$w_p \cdot 10^4$ , kg/s	$X_1$	$X_2$	$T_{p1}$	$T_{p2}$	Redução %
1	0,0501	108	94	0,012	0,019	0,28	2,73	0,95	23,0	37,3	65,20
2	0,0501	107	92	0,011	0,017	1,52	3,04	2,00	25,1	32,6	34,21
3	0,0505	107	94	0,011	0,017	2,02	2,70	2,00	26,5	34,7	25,92
4	0,0500	109	94	0,013	0,018	3,58	2,83	2,00	27,9	31,1	29,32
5	0,0508	107	95	0,014	0,019	3,32	2,97	1,92	25,3	31,6	35,35
6	0,0508	105	96	0,011	0,020	2,31	2,92	2,03	24,6	33,4	30,48
7	0,0508	107	94	0,012	0,017	3,09	2,85	2,02	23,4	35,2	29,12
8	0,0508	108	94	0,011	0,017	3,91	2,94	2,28	23,4	33,6	22,44
9	0,0507	106	95	0,013	0,018	4,79	2,80	2,40	23,0	29,6	14,28
10	0,0507	103	98	0,012	0,022	3,69	2,40	1,60	27,0	38,8	33,33
11	0,0506	103	98	0,012	0,018	3,00	1,60	1,16	27,8	39,6	27,5
12	0,0506	103	98	0,012	0,024	3,86	1,16	0,55	28,0	38,9	52,58
13	0,0353	160	150	0,013	0,020	2,00	2,19	1,06	17,1	37,3	51,41
14	0,058	162	147	0,015	0,019	0,77	3,55	2,17	19,8	32,9	27,60
15	0,0449	160	141	0,015	0,018	2,00	2,33	1,15	20,5	31,5	50,51
16	0,0581	160	148	0,014	0,020	2,14	2,30	1,56	18,3	32,0	32,17
17	0,0353	160	153	0,011	0,019	3,33	2,15	1,45	21,9	34,6	32,56

Tabela D.2 - Resultados experimentais dos testes de secagem de partículas de sabugo de milho realizados no ciclone (continuação).

Teste	$Q_{ar}$ , kg/s	$T_{e,ar}$ , °C	$T_{s,ar}$ , °C	$Y_e$	$Y_s$	$w_p \cdot 10^4$ , kg/s	$X_1$	$X_2$	$T_{p1}$	$T_{p2}$	Redução %
18	0,0449	160	145	0,014	0,020	3,33	2,15	1,30	19,3	26	39,92
19	0,0449	160	140	0,015	0,020	2,00	2,22	1,40	22,6	30,5	46,03
20	0,0453	163	140	0,016	0,023	2,02	2,73	0,95	19,0	31,3	65,20
21	0,0398	162	141	0,022	0,031	3,58	3,04	2,00	18,5	35,7	34,21
22	0,0470	160	139	0,016	0,023	3,32	2,70	2,01	20,1	33,1	25,92
23	0,0397	161	143	0,011	0,019	2,31	2,83	2,06	20,1	30,0	29,32
24	0,0453	164	145	0,014	0,020	3,09	2,97	1,92	20,1	30,0	35,35
25	0,0450	170	159	0,016	0,021	3,91	2,92	2,03	22,8	31,4	30,47
26	0,0399	173	160	0,015	0,020	2,79	2,85	2,02	25,5	36,7	29,12
27	0,0505	173	158	0,013	0,019	3,69	2,94	2,28	19,9	32,8	22,44
28	0,0500	172	150	0,014	0,019	3,00	2,80	2,41	18,7	32,8	14,28
29	0,0502	171	154	0,012	0,021	3,06	2,40	1,60	19,0	27,3	33,33
30	0,0502	171	153	0,016	0,020	1,35	1,60	1,16	19,0	27,5	27,5
31	0,0497	171	153	0,019	0,028	1,46	1,16	0,55	19,0	30,0	52069
32	0,0395	175	155	0,015	0,020	1,58	3,55	2,57	18,6	31,0	27,68
33	0,0450	174	153	0,014	0,020	2,09	2,32	1,56	20,1	33,9	32,17
34	0,0471	174	154	0,014	0,019	2,20	2,19	1,06	21,2	33,9	51,59

Tabela D.2 - Resultados experimentais dos testes de secagem de partículas de sabugo de milho realizados no ciclone (continuação).

Teste	$Q_{ar}$ , kg/s	$T_{e,ar}$ , °C	$T_{s,ar}$ , °C	$Y_e$	$Y_s$	$w_p \cdot 10^3$ , kg/s	$X_1$	$X_2$	$T_{p1}$	$T_{p2}$	Redução %
35	0,0342	183	150	0,015	0,021	2,15	2,23	1,25	20,5	35,0	43,94
36	0,0353	180	157	0,014	0,018	2,00	2,24	1,45	19,0	38,5	35,39
37	0,0400	184	158	0,016	0,023	1,98	2,30	1,37	19,0	31,4	40,43
38	0,0449	180	153	0,022	0,031	2,00	2,27	0,56	18,9	27,3	75,24
39	0,0398	182	155	0,016	0,023	1,97	2,12	1,33	23,0	35,4	37,26
40	0,0353	180	152	0,010	0,017	3,33	2,21	1,23	24,9	36,4	39,32
41	0,0500	179	149	0,014	0,020	2,12	2,24	1,45	20,8	40,1	35,39
42	0,0449	180	158	0,016	0,021	3,33	2,22	1,26	18,7	30,3	40,04
43	0,0497	178	155	0,015	0,020	1,98	1,98	1,47	23,8	35,8	25,75
44	0,0353	180	161	0,013	0,019	3,33	2,22	1,22	21,5	33,7	33,43
45	0,0546	178	151	0,014	0,019	1,45	2,12	1,33	20,4	34,5	37,26
46	0,0544	179	153	0,014	0,018	2,35	1,33	0,91	21,0	37,5	31,57
47	0,0543	179	152	0,016	0,020	3,18	0,91	0,63	21,0	37,8	30,76
48	0,0542	179	153	0,020	0,031	2,57	0,63	0,25	23,0	44,0	60,31
49	0,0407	180	156	0,015	0,020	1,98	1,98	1,47	23,8	35,8	25,75
50	0,0353	181	160	0,013	0,018	3,33	2,22	1,22	21,5	33,7	31,34
51	0,0526	178	151	0,014	0,019	1,45	2,12	1,33	20,4	34,5	37,26

Tabela D.2 - Resultados experimentais dos testes de secagem de partículas de sabugo de milho realizados no ciclone (continuação).

Teste	$Q_{ar}$ , kg/s	$T_{e,ar}$ , °C	$T_{s,ar}$ , °C	$Y_e$	$Y_s$	$w_p \cdot 10^4$ , kg/s	$X_1$	$X_2$	$T_{p1}$	$T_{p2}$	Redução %
52	0,0540	218	186	0,013	0,018	1,15	2,44	1,28	30,5		47,56
53	0,0538	216	183	0,012	0,019	2,06	2,42	1,22	31,8		49,66
54	0,0542	216	186	0,014	0,020	5,02	2,19	1,38	30,4	45,9	36,72
55	0,0542	212	184	0,013	0,020	3,96	2,35	1,25	31,5	48,1	46,72
56	0,0430	200	189	0,020	0,026	2,74	2,33	1,30	30,1	45,9	44,19
57	0,0435	251	188	0,022	0,032	2,15	2,54	1,23	32,0	42,7	51,57
58	0,0441	254	195	0,022	0,036	1,56	2,60	1,06	32,0	45,6	59,03
59	0,0444	252	198	0,021	0,030	2,02	2,33	0,98	32,5	47,7	58,02
60	0,0439	255	189	0,019	0,028	2,43	2,33	0,98	33,4	47,7	57,92
61	0,0443	250	217	0,019	0,027	1,71	2,27	1,18	30,7	42,0	48,12
62	0,0439	220	190	0,021	0,033	2,53	2,04	1,21	32,2	41,3	40,61
63	0,0443	252	208	0,020	0,031	3,89	2,58	1,45	35,0	45,8	43,80
64	0,0443	255	215	0,021	0,030	2,62	1,45	0,53	37,3	51,6	63,44
65	0,0444	246	217	0,019	0,029	1,51	0,53	0,11	37,3	75,9	79,24

### D.2 - Balances de massa e energia para o sistema

A Figura D.1 esquematiza o sistema de secagem utilizado.

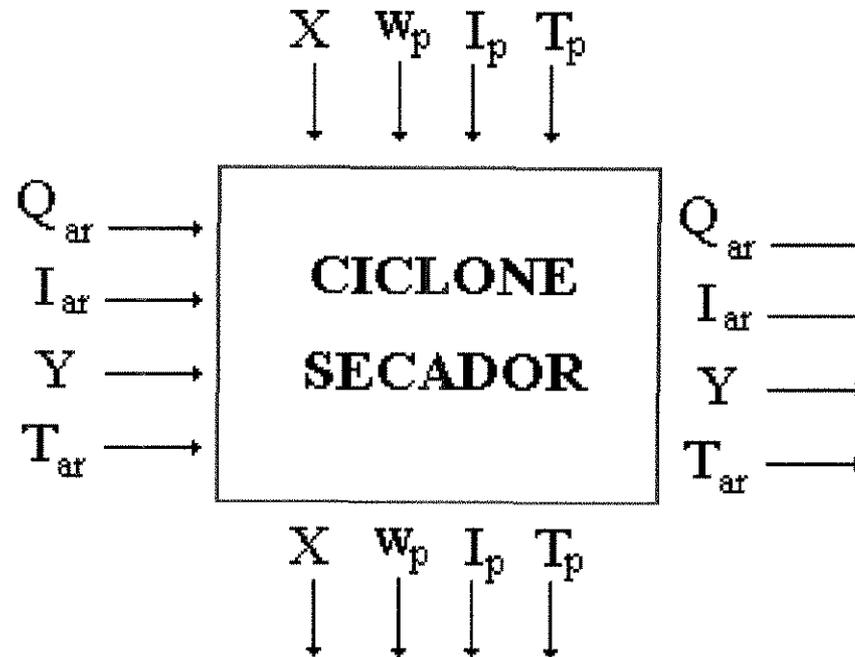


Figura D.1 - Esquema do sistema de secagem utilizado com as correntes de entrada e saída.

Atribuindo-se índice 1 para as correntes de entrada e 2 para as correntes de saída, obtém-se a Equação D.1 para o balanço de massa no sistema:

$$Q_{ar} Y_1 + w_p X_1 = Q_{ar} Y_2 + w_p + X_2 \quad (D.1)$$

A Equação D.2 apresenta o balanço de energia:

$$w_p T_{p1} C_{p1} + w_p T_{p1} C_{p_{ag}} X_1 + w_p \Delta H X_1 + Q_{ar} T_{ar1} C_{p_{ar}} + Q_{ar} T_{ar1} C_{p_{vap}} Y_1 + Q_{ar} \Delta H Y_1 - w_p T_{p2} C_{p1} - w_p T_{p2} C_{p_{ag}} X_2 - w_p \Delta H X_2 + \\ - Q_{ar} T_{ar2} C_{p_{ar}} Y_2 - Q_{ar} \Delta H Y_2 - Q_p = 0 \quad (D.2)$$

***D.3 - Perfis de temperatura***

As Tabelas D.3 e D.4 apresentam os perfis de temperatura para o ciclone operando apenas com ar, onde  $T^*$  = temperatura corrigida pelas equações de calibração dos termopares (Apêndice B).

Tabela D.3 - Perfis de temperatura para o ciclone operando apenas com ar para  $T = 95,8; 100,7$  e  $147,7$  °C

Teste 1 - $T_{e,ar} = 102$ °C (95,8 °C)				Teste 2 - $T_{e,ar} = 107$ °C (100,7 °C)				Teste 3 - $T_{e,ar} = 155$ °C (147,7 °C)			
$T_3$	$T_3^*$	$T_8$	$T_8^*$	$T_3$	$T_3^*$	$T_8$	$T_8^*$	$T_3$	$T_3^*$	$T_8$	$T_8^*$
96	88,209	92	84,594	100	92,077	96	88,502	138	128,823	139	130,31
97	89,176	94	86,548	101	93,044	98	90,456	142	132,691	142	133,44
98	90,143	95	87,525	102	94,011	100	92,410	145	135,592	144	135,39
98	90,143	96	88,502	103	94,978	101	93,387	147	137,526	145	136,37
99	91,110	97	89,479	104	95,945	102	94,364	149	139,460	146	137,35
100	92,077	97	89,479	105	96,912	103	95,341	150	140,427	148	139,30
100	92,077	97	89,479	105	96,912	103	95,341	150	140,427	148	139,30
100	92,077	98	90,456	105	96,912	104	96,318	151	141,394	149	140,28
100	92,077	98	90,456	106	97,879	104	96,318	152	142,361	150	141,26
101	93,044	98	90,456	106	97,879	104	96,318	152	142,361	150	141,26

Tabela D.4 - Perfis de temperatura para o ciclone operando apenas com ar para  $T = 163,4; 170,3$  e  $178,1$  °C

Teste 4 - $T_{e,ar} = 171$ °C (163,4 °C)				Teste 5 - $T_{e,ar} = 178$ °C (170,3 °C)				Teste 6 - $T_{e,ar} = 186$ °C (178,1 °C)			
$T_3$	$T_3^*$	$T_8$	$T_8^*$	$T_3$	$T_3^*$	$T_8$	$T_8^*$	$T_3$	$T_3^*$	$T_8$	$T_8^*$
154	144,295	150	141,26	156	146,229	156	147,122	169	158,8	164	154,938
156	146,229	153	144,191	159	149,13	159	150,053	172	161,701	168	158,846
158	148,163	155	146,145	164	153,965	162	152,984	174	163,635	171	161,777
160	150,097	157	148,099	166	155,899	165	155,915	177	166,536	173	163,731
162	152,031	158	149,076	168	157,833	166	156,892	178	167,503	175	165,685
164	153,965	160	151,03	170	159,767	168	158,846	179	168,47	176	166,662
164	153,965	161	152,007	171	160,734	169	159,823	179	168,47	177	167,639
165	154,932	162	152,984	171	160,734	170	160,8	179	168,47	178	168,616
165	154,932	162	152,984	172	161,701	170	160,8	179	168,47	178	168,616
165	154,932	163	153,961	172	161,701	171	161,777	180	169,437	178	168,616

Tabela D.5 - Perfis de temperatura para o ciclone operando apenas com ar para  $T = 222,2 \text{ }^\circ\text{C}$ 

<b>Teste 7 - <math>T_{e,ar} = 231 \text{ }^\circ\text{C}</math> (222,2 <math>^\circ\text{C}</math>)</b>			
$T_3$	$T_3^*$	$T_8$	$T_8^*$
207	195,546	202	192,064
212	200,381	207	196,949
215	203,282	211	200,857
218	206,183	214	203,788
220	208,117	216	205,742
222	210,051	218	207,696
222	210,051	219	208,673
223	211,018	220	209,65
223	211,018	221	210,627
223	211,018	221	210,627