

ESTUDO EXPERIMENTAL DO SECADOR  
PNEUMÁTICO VERTICAL

004/86

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À  
REDAÇÃO FINAL DA TESE  
DEFENDIDA POR LENIO JOSE  
GUERREIRO DE FARIA E  
APROVADA PELA COMISSÃO  
JULGADORA EM 17/02/86

*Car. Castagnino Fontane*

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DO SECADOR  
PNEUMÁTICO VERTICAL

Autor : Lênio José Guerreiro de Faria  
Orientador : Cesar Costapinto Santana

Tese submetida à Comissão de  
Pós-Graduação da Faculdade de  
Engenharia de Campinas - UNICAMP,  
como parte dos requisitos necessá  
rios para obtenção do grau de  
MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA

Campinas, SP - Brasil

Fevereiro de 1986

**/ U N I C A M P**  
**BIBLIOTECA CENTRAL**

A meus pais, Cesário e Lúcia,  
pela confiança e incentivo.

À minha esposa Nazarêth, pelo  
amor e compreensão, e a meus  
filhos, Tatiana, Júnior e  
Diego, pela alegria que trou-  
xeram.

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

Ao Professor Doutor Cesar Costapinto Santana, pela sua dedicada orientação e contínuo incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Ao José Roberto Rosa, pelo apoio na montagem do equipamento e indispensável auxílio na obtenção dos dados experimentais.

Ao Wilton Furquim, pelo auxílio na elaboração dos esquemas e gráficos que compõem o trabalho.

Ao Francisco Tomaz H. Verri pelo excelente trabalho fotográfico dos equipamentos utilizados.

À Margarida Seixas Maia e Odette Ropello, pelo esmero no serviço de datilografia.

Ao Departamento de Engenharia Química da FEC/UNICAMP, pelo uso de suas instalações.

Ao Departamento de Operações e Processos Químicos da UFPA, pelo apoio .

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES, pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo auxílio financeiro concedido para a montagem experimental.

Aos Professores, Colegas e Funcionários do DEQ/FEC/UNICAMP, pela amizade.

RESUMO

No desenvolvimento deste trabalho, é analisado o desempenho de um secador pneumático vertical em escala piloto. São realizados ensaios com partículas de areia com diâmetros médios de 0,46 mm e 0,55 mm e esferas de vidro com diâmetro médio de 0,24 mm, em um tubo de secagem de 4 m de altura e 5,25 cm de diâmetro interno, sendo obtidos perfis de umidade e de temperatura do ar e de pressão ao longo do secador, além dos conteúdos de umidade de entrada e saída dos sólidos. Psicrômetros desenvolvidos para medidas de umidade do ar a temperaturas superiores a 100°C, são utilizados na determinação dos perfis de umidade e temperatura. É apresentada uma simulação do secador, obtida através de um modelo unidimensional, onde são integradas as equações básicas de conservação da quantidade de movimento, energia e massa em sistemas particulados, sendo efetuada a comparação dos resultados da simulação com os valores experimentais.

ABSTRACT

This work is related with studies on the performance of a vertical pneumatic dryer on a well instrumented pilot plant. Experiences were realized with sand particles with a mean diameter of 0.46 mm and 0.55 mm and glass spheres with a mean diameter of 0.24 mm, in a drying tube with 4 m high and an inside diameter of 5.25 cm, aiming the determination of the air humidity, temperature and pressure profiles along the dryer, also entrance and exit moisture contents of solids can be obtained. Psychrometers were designed to measure the air humidity above 100°C and they are used to determine the humidity and temperature profiles. It is presented also a dryer simulation study that utilizes a unidimensional model, where the basic of the momentum, energy and mass conservation equations for particulated systems are integrated, and a comparison between the simulated and experimental results is done.

NOMENCLATURA

- a - área interfacial dos sólidos por unidade de volume do secador,  $m^2/m^3$
- $a_t$  - área externa do secador por unidade de volume do secador,  $m^2/m^3$
- A - área projetada da partícula normal à direção do movimento,  $m^2$
- A,B,C,D,E - constantes [equação (3.1)]
- c - constante de proporcionalidade [equação (2.3)]
- CD - coeficiente de arraste, adimensional
- CV - razão de sólidos por volume de suspensão, adimensional
- $C_{pg}$  - calor específico do ar seco, J/Kg K
- $C_{pl}$  - calor específico da água líquida, J/Kg K
- $C_{ps}$  - calor específico do sólido, J/Kg K
- $C_{pv}$  - calor específico do vapor d'água, J/Kg K
- $C_{pgm}$  - calor específico médio do ar úmido, J/Kg K
- $C_{psm}$  - calor específico médio do sólido úmido, J/Kg K
- d - diâmetro do orifício da placa, cm
- $d_p$  - diâmetro médio da partícula, m
- D - diâmetro interno do tubo de secagem, m
- $D_{AB}$  - coeficiente de difusão vapor d'água-ar,  $m^2/s$
- DMR(%) - desvio médio relativo, adimensional
- F - força resultante, N
- $F_A$  - força de arraste, N
- $F_F$  - força de flutuação, N
- $F_G$  - força externa, N
- g - aceleração da gravidade,  $m/s^2$

- GR - grau de saturação , adimensional
- $h$  - coeficiente de transferência de calor ar-sólido,  $W/m^2 K$
- $h$  - deflexão manométrica, cmCA
- $h_c$  - coeficiente de transmissão de calor por convecção livre,  $W/m^2 K$
- $h_i$  - coeficiente de transmissão de calor por convecção forçada,  $W/m^2 K$
- $h_p$  - coeficiente global de troca térmica entre o secador e o ambiente,  $W/m^2 K$
- $H$  - entalpia do ar úmido, KJ/Kg a.s
- $H_a$  - entalpia do ar seco, KJ/Kg
- $H_s$  - entalpia do ar úmido na saturação, KJ/Kg a.s
- $H_v$  - entalpia de vaporização da água à temperatura do sólido, J/Kg
- $H_v^0$  - entalpia de vaporização da água à  $0^\circ C$ , J/Kg
- $H_{ag}$  - entalpia da água líquida, KJ/Kg
- $H_{vp}$  - entalpia do vapor d'água, KJ/Kg
- $K_i$  - condutividade térmica do material isolante, W/m K
- $K_g$  - condutividade térmica do ar, W/m K
- $K_s$  - condutividade térmica do tubo de secagem, W/m K
- $K_y$  - coeficiente de transferência de massa ar-sólido,  $Kg/m^2 s$
- $m_s$  - massa da partícula, Kg
- $m_t$  - massa total dos sólidos, Kg
- $m_{ag}$  - massa da água, Kg
- $m_1$  - massa inicial de sólidos, Kg
- $m_2$  - massa final de sólidos , Kg
- $n$  - número de pontos, adimensional
- $P$  - pressão total ou barométrica, KPa



	página
<u>CAPÍTULO 4</u> <u>MONTAGEM EXPERIMENTAL DO SECADOR</u>	45
4.1. MATERIAIS UTILIZADOS	45
4.1.1. <u>Caracterização das Partículas</u>	45
4.1.2. <u>Umedecimento dos Sólidos</u>	46
4.1.3. <u>Determinação da Umidade dos Sólidos</u>	47
4.2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	47
4.2.1. <u>Sistema de Admissão e Controle da Vazão do Ar</u>	49
4.2.2. <u>Sistema de Aquecimento e Controle da Temperatura do Ar</u>	51
4.2.3. <u>Sistema de Alimentação e Controle dos Sólidos</u>	53
4.2.4. <u>Sistema Psicrométrico</u>	53
4.2.5. <u>Sistema de Separação e Coleta de Sólidos</u>	60
4.2.6. <u>Equipamentos Auxiliares</u>	60
4.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	62
4.4. MODO OPERACIONAL	64
<u>CAPÍTULO 5</u> <u>MODELAGEM MATEMÁTICA SIMPLIFICADA DO</u> <u>SECADOR</u>	68
5.1. HIPÓTESES DO MODELO	68
5.2. EQUAÇÕES BÁSICAS DO MODELO MATEMÁTICO	69
5.3. EQUAÇÕES AUXILIARES	75
5.4. SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO	78
<u>CAPÍTULO 6</u> <u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	81
6.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	81
6.2. RESULTADOS CALCULADOS	83
6.3. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS	91

$P_w$	- pressão parcial do vapor d'água, KPa
$P_{ws}$	- pressão de saturação de vapor d'água, KPa
$q$	- taxa de transferência de calor ar-sólido, J/s
$q_p$	- taxa de perda de calor para o ambiente, J/s
$r_e$	- raio exterior do isolante, m
$r_i$	- raio interior do tubo de secagem, m
$r_m$	- raio exterior do tubo de secagem, m
$R$	- constante dos gases para o ar seco, KJ/Kg K
$s$	- desvio padrão de distribuição, adimensional
$S$	- área da seção transversal do tubo de secagem, m <sup>2</sup>
$t$	- temperatura, °C
$t_a$	- temperatura do ambiente, °C
$t_g$	- temperatura do ar, °C
$t_s$	- temperatura do sólido, °C
$T$	- temperatura absoluta, K
$T_g$	- temperatura absoluta do ar, K
$T_s$	- temperatura absoluta do sólido, K
$TBS$	- temperatura de bulbo seco do ar, °C
$TBU$	- temperatura de bulbo úmido do ar, °C
$U$	- coeficiente global de troca térmica, W/m <sup>2</sup> K
$U_a$	- coeficiente volumétrico de transmissão de calor, W/m <sup>3</sup> K
$UR$	- umidade relativa, adimensional
$v_g$	- velocidade do ar, m/s
$v_s$	- velocidade da partícula, m/s
$v_t$	- velocidade terminal das partículas, m/s
$V$	- volume específico do ar úmido, m <sup>3</sup> /Kg a.s
$V_g$	- vazão volumétrica do ar, m <sup>3</sup> /s

- $V_s$  - vazão volumétrica de sólidos,  $m^3/s$   
 $V_{rel}$  - velocidade relativa ar-partícula,  $m/s$   
 $W_D$  - taxa de transferência de massa ar-sólido,  $Kg/s$   
 $W_g$  - vazão mássica do ar seco,  $Kg/s$   
 $W_s$  - vazão mássica dos sólidos secos,  $Kg/s$   
 $W_{sg}$  - razão de carga sólido-ar, adimensional  
 $X$  - conteúdo de umidade dos sólidos,  $Kg H_2O/Kg s.s$   
 $\bar{y}$  - valor médio, adimensional  
 $y_j$  - razão entre umidade experimental e calculada, adimensional  
 $Y$  - razão de umidade do ar,  $Kg H_2O/Kg a.s$   
 $Y_s$  - razão de umidade do ar na saturação,  $Kg H_2O/Kg a.s$   
 $Z$  - comprimento do tubo de secagem,  $m$

#### Letras Gregas

- $\gamma$  - indicador para o movimento da partícula, adimensional  
 $\Delta T_m$  - diferença de temperatura média entre ar e sólido,  $^{\circ}C$   
 $\epsilon$  - indicador para o movimento da partícula, adimensional  
 $\lambda$  - calor de adsorção,  $J/Kg$   
 $\mu_g$  - viscosidade do ar,  $Kg/m s$   
 $\rho_g$  - massa específica do ar,  $Kg/m^3$   
 $\rho_s$  - massa específica do sólido,  $Kg/m^3$

#### Subscritos

- $i$  - inicial  
 $f$  - final  
 $o$  - entrada do secador  
 $L$  - saída do secador

- s - à temperatura de bulbo seco  
 u - à temperatura de bulbo úmido

Grupos Adimensionais

- Nu - número de Nusselt,  $\frac{h \, dp}{K_g}$   
 Pr - número de Prandtl,  $\frac{\mu_g \, C_{pg}}{K_g}$   
 Re<sub>p</sub> - número de Reynolds,  $\frac{\rho_g \, dp V_{rel}}{\mu_g}$   
 Sc - número de Schmidt,  $\frac{\mu_g}{\rho_g \, D_{AB}}$   
 Sh - número de Sherwood,  $\frac{K_y \, dp}{\rho_g \, D_{AB}}$

SUMÁRIO

	página
<u>RESUMO</u>	iii
<u>ABSTRACT</u>	iv
<u>NOMENCLATURA</u>	v
<u>CAPÍTULO 1</u> <u>INTRODUÇÃO</u>	1
1.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE SECADORES PNEUMÁTICOS	1
1.2. APLICAÇÕES, VANTAGENS E LIMITAÇÕES	7
1.3. MOTIVAÇÃO À PESQUISA	10
1.4. OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO	11
<u>CAPÍTULO 2</u> <u>REVISÃO DA LITERATURA</u>	14
2.1. ASPECTOS GERAIS	14
2.2. ESTUDOS ENVOLVENDO MÉTODOS DE CÁLCULO COM ENFOQUE GLOBAL	16
2.3. ESTUDOS BASEADOS NAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DE CONSERVAÇÃO	19
<u>CAPÍTULO 3</u> <u>DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR DE UMIDADE</u>	25
3.1. CONCEPÇÃO DO MEDIDOR	25
3.2. DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DO MEDIDOR	26
3.3. OPERAÇÃO DO SISTEMA PSICROMÉTRICO	30
3.4. PROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES PRIMÁRIAS DO INSTRUMENTO	34
3.4.1. <u>Aspectos Introdutórios</u>	34
3.4.2. <u>Equações Utilizadas</u>	36
3.4.3. <u>Aplicação das Equações</u>	40
3.4.4. <u>Resultados Obtidos e Comparação com a Literatura</u>	41

	página
<u>CAPÍTULO 7</u> <u>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</u>	123
7.1. CONCLUSÕES	123
7.2. SUGESTÕES	124
<u>APÊNDICE A</u> <u>LISTAGEM DO PROGRAMA EMPREGADO NO CÁLCULO</u> <u>DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS DO AR</u>	126
<u>APÊNDICE B</u> <u>DADOS DE SAÍDA DAS PROPRIEDADES</u> <u>PSICROMÉTRICAS DO AR</u>	130
<u>APÊNDICE C</u> <u>LISTAGEM DO PROGRAMA EMPREGADO NA</u> <u>SIMULAÇÃO</u>	163
<u>APÊNDICE D</u> <u>DADOS DE SAÍDA DAS VARIÁVEIS CALCULADAS</u> <u>NA SIMULAÇÃO</u>	168
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	185

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE SECADORES PNEUMÁTICOS

O secador pneumático é um equipamento no qual a secagem ocorre enquanto o material úmido é transportado por uma corrente de gás quente, usualmente ar. Na sua forma mais simples, consiste essencialmente de um aquecedor de ar, dispositivo de alimentação de sólidos, tubo vertical no qual as partículas são transportadas e secas, e de uma unidade de separação e coleta dos sólidos secos, como esquematizado na figura 1.1.

O material úmido, convenientemente alimentado na parte inferior do secador, é transportado para cima de modo co-corrente pelo fluxo de ar quente através do tubo de secagem. Este ar deve ter uma velocidade capaz de carregar as partículas de maior dimensão através do secador. PERRY<sup>36</sup> estabelece que para as faixas granulométricas normalmente utilizadas nesse tipo de secador, o valor de 23 m/s pode ser usado como estimativa desta velocidade à temperatura de saída do ar. Embora admitindo que não existem regras precisas para se estabelecer o valor da velocidade do ar para efetuar o transporte, visto que as partículas menores tendem a aglomerar-se produzindo sólidos de tamanhos indeterminados, NONHEBEL e MOSS<sup>34</sup> indicam que a velocidade máxima em qualquer parte do tubo de secagem deve exceder em 2,5 a 3 m/s à velocidade limite de queda livre da partícula de maior tamanho. Na prática, a maioria dos secadores pneumáticos opera com velocidades do ar compreendida entre 10 e

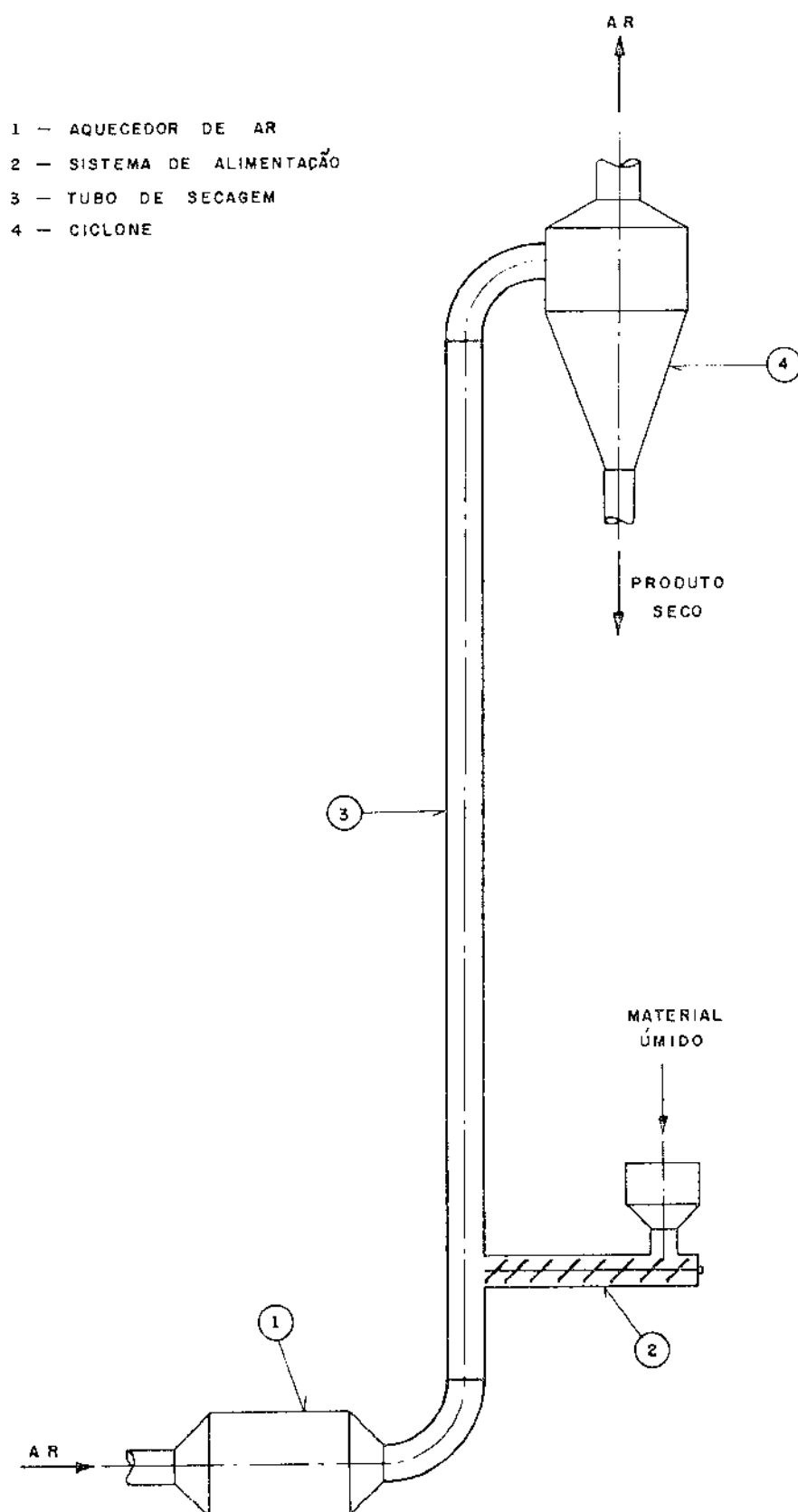


FIGURA 1.1 - SECADOR PNEUMÁTICO DE MODELO SIMPLES



30 m/s.

A velocidade relativa entre gás e partícula é um elemento importante para a transferência de calor e massa no processo de secagem pneumática, tendo um efeito significativo na seção de entrada, fazendo com que a maior parte da secagem ocorra nesta seção e na região do tubo próxima à alimentação dos sólidos. Para uma mesma temperatura do gás, essa velocidade aumenta no tubo vertical com o aumento do diâmetro dos sólidos, sendo vantajoso quando estão presentes partículas de tamanhos variados onde os sólidos de maior diâmetro, que secam mais lentamente, permanecem mais tempo no secador. Entretanto, não é aconselhável que a velocidade do gás de transporte e secagem exceda muito o valor da velocidade terminal das partículas maiores, pois segundo KNEULE<sup>25</sup> a velocidade relativa entre gás e partícula não aumentaria com isso, ocasionando também o efeito indesejável de abreviar ainda mais o pouco tempo de permanência dos sólidos no secador. De acordo com KNEULE<sup>23</sup>, a velocidade do gás de arraste pode ser considerada o dobro da velocidade terminal da maior partícula.

O cálculo da velocidade limite de queda livre ou velocidade terminal de partículas sólidas são comumente encontrados na literatura que trata da dinâmica de suspensões gás-sólido, como por exemplo em KLINZING<sup>20</sup>, KUNII e LEVENSPIEL<sup>25</sup>, GOVIER e AZIZ<sup>15</sup> e YANG<sup>52</sup>.

São apresentadas por PERRY<sup>36</sup> correlações para a estimativa da velocidade mínima de arraste no escoamento ascendente de gases e sólidos em tubos verticais para baixas razões

sólido-gás. As velocidades necessárias para o transporte se encontram tabeladas para sólidos de várias densidades. É indicado também um método iterativo de cálculo dessa velocidade através de nomogramas.

A secagem é usualmente muito rápida devido ao íntimo contato térmico entre o ar de arraste e os sólidos, sendo o vapor liberado dos sólidos transportados pela corrente de ar através do secador. O material seco é comumente separado da corrente de ar por meio de ciclone, ou quando necessário o pó emitido pode ser recuperado empregando-se precipitador eletrostático, lavador úmido ou coletor a sacos.

O tempo de residência das partículas nos secadores pneumáticos está geralmente na faixa de 0,5 a 5 segundos. Devido a isto, temperaturas muito altas podem ser usadas, ocasionando elevadas taxas de evaporação. No entanto, somente a umidade superficial pode ser eliminada, pois o tempo de residência dos sólidos é muito pequeno. A evaporação da umidade superficial ocorre essencialmente na temperatura de bulbo úmido do ar, pois até que seja completada a secagem, a película de umidade superficial impede que a temperatura do sólido fique acima da temperatura de bulbo úmido. Deste modo, o processo realizado num secador pneumático não pode ser controlado pela difusão, e sim pelas condições externas.

Nos secadores de grande porte é comum o emprego de dois ventiladores com o objetivo de manter uma pressão em torno da atmosférica no ponto de alimentação de sólidos úmidos, evitando que se tenha nesta região fuga ou ingresso de ar, faci-

litando desta forma a alimentação do material. Para evitar o vazamento excessivo de ar para ou do sistema no todo, é comum o uso de fechos rotativos de ar ou transportadores tipo parafuso na alimentação e na descarga dos sólidos.

A maioria dos secadores comerciais possui algum tipo de sistema de recirculação do material, com o intuito de fazer com que o tempo médio de permanência das partículas no secador fique em torno de 1 minuto. Este processo não deve ser utilizado quando for importante que cada partícula tenha o mesmo tempo de secagem, pois não há garantias de que elas sejam recicladas o mesmo número de vezes. Por outro lado, uma reciclagem parcial do produto seco, misturado com o material úmido, reduz o conteúdo de umidade dos sólidos na entrada melhorando consideravelmente o processo de alimentação no secador.

Uma grande variedade de materiais podem ser secados em secador pneumático. Várias modificações no sistema básico são feitas visando satisfazer os requerimentos industriais de cada material. O controle do diâmetro da partícula e da umidade na alimentação do material, e o controle da umidade do produto final, são fatores importantes no projeto dessas unidades.

Quando o material úmido consiste de grãos de tamanho uniforme com umidade relativamente baixa, formada principalmente de água superficial, e que já esteja no tamanho desejado para uma fácil dispersão na corrente de ar, um equipamento convencional de alimentação, como um transportador helicoidal tipo parafuso sem fim, garganta de venturi ou a associação de ambos, pode ser usado.

Contudo, há materiais onde a redução do tamanho das partículas torna-se necessário. Nestes casos, equipamentos de moagem, mistura e de peneiramento são integrados ao secador, geralmente operando simultaneamente com o auxílio de dispositivos de classificação e recirculação das partículas grosseiras. A escolha correta do tipo de alimentador, visando obter uma completa dispersão inicial do material na corrente de ar, é de fundamental importância, pois fornecendo uma maior área superficial ao produto, possibilita uma secagem mais rápida. BARR<sup>8</sup> apresenta um dispositivo capaz de romper as aglomerações de partículas, formado por um moinho de martelos com um desintegrador tipo roda com palhetas associado a um venturi, que proporciona uma fácil e rápida dispersão do material finamente dividido na corrente de ar.

Instalações típicas de secagem pneumática dotadas de sistemas de desintegração, pulverização e calcinação do material a secar, são mostradas e discutidas por GORDON<sup>14</sup>, onde o tratamento do material antes do processo de secagem visa a redução do tamanho e da umidade inicial, chegando a obter uma diminuição substancial da umidade de materiais com grande conteúdo d'água, como por exemplo em tortas de filtro, que por ação de misturador e moinho tipo gaiola, é finamente desintegrada e seu conteúdo de umidade inicial reduzido de 90 a 60% até 15 a 0,2%. São fornecidos por DĂSCĂLESCU<sup>12</sup> detalhes a respeito de vários dispositivos de alimentação utilizados em secadores pneumáticos comerciais, inclusive com dimensões e características de operação.

A redução do tamanho das partículas pelo princípio de trituração a jato é discutido em MASTERS<sup>28</sup>, onde o material úmido é transportado para a corrente de ar com alta velocidade, sofrendo uma dispersão e desaglomeração acompanhada por um efeito de moagem a jato, sem a necessidade de qualquer equipamento de moagem mecânico. Segundo MASTERS<sup>28</sup> um sistema operando dessa forma, permite a secagem em um volume consideravelmente menor que o equipamento tradicional de secagem pneumática.

Outros fatores importantes a serem considerados são o controle do conteúdo de umidade na alimentação e do produto final, que implicam em arranjos ou técnicas especiais para o tratamento de materiais, tais como tortas de filtro, de centrífugas ou lamas, e também para o aumento do tempo de residência das partículas no secador. Vários tipos de sistemas industriais de secagem pneumática, dotados de dispositivos adequados para mistura, classificação e recirculação de material grosso, ou com dutos de configurações diversas ou câmaras de expansão, de modo que permitam aumentar o tempo de residência dos sólidos no secador, além de sistemas com mais de um estágio e outros arranjos, são mostrados detalhadamente em WILLIAMS-GARDNER<sup>49</sup>, KNEULE<sup>23</sup>, PERRY<sup>36</sup>, BARR e BARR<sup>9</sup> e MASTERS<sup>28</sup>. Uma descrição de alguns desses sistemas comercialmente produzidos na Inglaterra é feita por NONHEBEL e MOSS<sup>34</sup>, que analisam suas vantagens particulares do ponto de vista da combinação de custo e características de funcionamento.

## 1.2. APLICAÇÕES, VANTAGENS E LIMITAÇÕES

A secagem pneumática encontra extensa aplicação em

muitos processos industriais. A técnica é economicamente utilizada quando se deseja a remoção da umidade superficial e a conversão em pó seco de materiais como tortas de filtro, bolos de centrífuga, lamas ou sólidos granulados. Sua especial aplicação é na secagem de materiais termicamente sensíveis, facilmente oxidáveis, inflamáveis ou explosivos, que não podem ficar expostos às condições do processo por períodos dilatados de tempo.

Produtos farmacêuticos, alimentos, produtos químicos orgânicos, minerais e cerâmicas, e uma grande variedade de materiais podem ser tratados adequadamente num equipamento de secagem pneumática. Na tabela 1.1 são listados alguns dos diversos materiais que têm sido secados em secadores pneumáticos.

As vantagens dos secadores pneumáticos comumente citadas na literatura são :

- a) O desnecessário uso de equipamento adicional para transporte dos sólidos, já que os mesmos são transportados através do secador durante a secagem.
- b) Um tempo de contato curto e operação em correntes paralelas, permitindo uma secagem satisfatória de materiais termicamente sensíveis.
- c) Devido ao pouco tempo de residência dos sólidos, possibilidade do uso de altas temperaturas de entrada e baixas vazões de ar, resultando num elevado rendimento térmico.
- d) A instalação ocupa pouco espaço da planta industrial.

Tabela 1.1 - Alguns materiais processados em secadores  
pneumáticos<sup>a</sup>

---

Ácido adípico, hidróxido de alumínio, sulfato de amônia, carbonato de bário, cloreto de bário, sulfato de bário, bentonita, ácido bórico, arsenato de cálcio, carbonato de cálcio, hidróxido de cálcio, sulfato de cálcio, resíduos de caseína, carboximetilcelulose, pasta de giz, citratos, argila, lama de carvão, carvão miúdo (retirado da mina e lavado), terra diatomácea, fosfato dicálcico, corantes, fertilizantes, massas de ornamento, bolo de filtro, agente limpador de gás, gesso, caulim, areia de caulim, farinha fóssil, arsenato de chumbo, fosfato de chumbo, fosfito de chumbo, cal (hidratada), calcáreo argiloso, lama de cal, carbonato de magnésio, sulfato de magnésio, turfa, pigmentos, plásticos, plásticos (material bruto), sais de potássio, aluminato de sódio, carbonato de sódio, cloreto de sódio, hiposulfito de sódio, perborato de sódio, sulfato de sódio, sulfito de sódio, fuligem, estearatos, pó de uréia para moldagem, minério de zinco concentrado por flotação, hidróxido de zinco.

---

a) THORPE<sup>42</sup>

- e) A redução de tamanho do material muitas vezes ocorrer simultaneamente com a secagem.
- f) A unidade ser compacta com ausência de partes móveis, resultando num custo de investimento relativamente baixo do equipamento e também num baixo custo de manutenção.

Suas principais limitações são :

- a) Surgimento de problemas operacionais no caso do material úmido na alimentação, ter uma grande proporção de aglomerados, dificultando a dispersão dos sólidos.
- b) Necessidade de um sistema eficiente de coleta de pó, principalmente quando se trabalha com material tóxico.
- c) Rápida erosão dos elementos do tubo de secagem, normalmente os curvos, na secagem de materiais abrasivos.
- d) Considerável extensão do tempo de residência das partículas no secador quando o reciclo é utilizado, além do que, as partículas não terão o mesmo tratamento em secadores com circulação.
- e) O curto tempo de residência das partículas no secador faz com que, frequentemente, a umidade interna não seja removida.
- f) Normalmente não ser adequado ao tratamento de materiais com alto conteúdo de umidade inicial.

### 1.3. MOTIVAÇÃO À PESQUISA

Os secadores pneumáticos têm sido usados em escala crescente em muitos processos industriais, devido principalmente



te às vantagens inerentes a esse tipo de equipamento e à sua versatilidade no tratamento de uma numerosa variedade de materiais, especialmente na remoção da umidade superficial.

Considerando o universo dos trabalhos em secagem, são relativamente poucos os estudos encontrados na literatura concernentes ao assunto, principalmente os que envolvem o cálculo detalhado das variáveis do processo, apesar do grande número de aplicações da secagem pneumática na tecnologia química e nas indústrias de bens de consumo, constituindo-se num processo de indiscutível importância, sendo economicamente viável e especialmente apropriado para muitas classes de materiais.

Deste modo, torna-se importante o estudo desses secadores, sobretudo visando a obtenção de dados experimentais durante a operação com materiais adequados à esse tipo de secagem, os quais constituem as informações básicas necessárias ao dimensionamento de unidades industriais.

#### 1.4. OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO

O desenvolvimento deste estudo é baseado principalmente nas determinações experimentais dos perfis longitudinais de umidade e de temperatura do ar, na secagem de sólidos granulados contendo essencialmente água superficial, utilizando um secador pneumático vertical em escala piloto.

Desta forma, existe a necessidade de se ter um dispositivo capaz de medir adequadamente umidades do ar na faixa de temperaturas comumente utilizadas num processo de secagem pneumática, bem como de um método de cálculo dessa variável a par-

tir dos dados gerados pelo instrumento de medida. A interpretação dos dados experimentais obtidos no secador, pode ser realizada através de uma simulação matemática baseada nas equações fundamentais de conservação de quantidade de movimento, energia e massa.

Assim, este trabalho visa alcançar os seguintes objetivos :

- a) Desenvolver um dispositivo capaz de medir com boa precisão, sobretudo umidades e temperaturas do ar, na faixa de 60 a 300°C.
- b) Elaborar um programa relativamente simples para microcomputador em linguagem BASIC, adequado ao cálculo das propriedades psicrométricas do ar ao longo do tubo de secagem, a partir das informações primárias dadas pelo dispositivo de medida de umidade.
- c) Com isso, realizar medidas dos perfis longitudinais de umidade e de temperatura do ar para várias condições de operação. Determinar também conteúdo de umidade e temperatura inicial e final dos sólidos utilizados e a distribuição de pressões da suspensão ao longo do tubo de secagem.
- d) Realizar um estudo experimental de sensibilidade paramétrica da umidade e temperatura do ar, para várias condições iniciais do conteúdo de umidade dos sólidos, temperatura do ar e da vazão mássica dos sólidos e do ar.
- e) Apresentar uma modelagem matemática simplificada para o secador, e um programa de computador digital em linguagem FOR

TRAN, visando a interpretação dos resultados experimentais, através de comparações entre os dados obtidos para umidade e temperatura do ar e para conteúdo de umidade dos sólidos, sendo este último calculado a partir das determinações experimentais da umidade do ar por balanço de massa. Obter também os perfis calculados do conteúdo de umidade e de temperatura dos sólidos e da velocidade relativa entre o ar e as partículas.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1. ASPECTOS GERAIS

As interações entre os processos de transferência de quantidade de movimento, calor e massa que ocorrem durante a operação realizada num secador pneumático são complexas. Isto se deve principalmente a que no ponto de alimentação dos sólidos no tubo de secagem, a velocidade relativa entre eles e o gás de transporte é máxima, resultando altos coeficientes de transferência de calor e massa. Neste ponto, a força motriz diferença de temperatura entre o ar e os sólidos é alta. Contudo, o material úmido que geralmente é alimentado com temperatura próxima da ambiente, ocasiona uma força motriz transferência de massa inicialmente pequena, pois a pressão de vapor de equilíbrio da água associada ao material é baixa. Uma vez no tubo de secagem, os sólidos aceleram causando um rápido decréscimo nos coeficientes de transferência de calor e massa, mas, o aumento gradual da temperatura do material incrementa a taxa de transferência de massa. Entretanto, esta taxa experimenta um decréscimo ao longo do tubo de secagem à medida em que o ar torna-se saturado com vapor d'água, diminuindo então a secagem.

Devido a complexidade dos fenômenos de transporte que ocorrem num secador pneumático, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos experimentais e de métodos de cálculo precisos, que associados, contribuam para o projeto adequado desses equipamentos.

Poucos trabalhos experimentais utilizando secadores pneumáticos estão publicados na literatura, sendo a maior parte deles, estudos empregando unidades em escala piloto. JEWELL, HARPER e PLANK<sup>16</sup> usando um secador pneumático em escala piloto, contendo até cinco câmaras de expansão, levantaram dados experimentais na secagem de tabaco picado. Partindo de medidas do conteúdo de umidade do produto na entrada e na saída, umidade e velocidade do ar, vazão de sólidos e volumes do secador, estabeleceram uma correlação para a estimativa do coeficiente volumétrico de transmissão de calor, havendo boa concordância na comparação entre os valores obtidos pela correlação com dados de fábrica para esse coeficiente.

DEBRAND<sup>13</sup> desenvolveu uma correlação para o cálculo do coeficiente médio de transmissão de calor entre gás e sólido, partindo de determinações experimentais da velocidade das partículas e da transferência de calor num secador pneumático de vidro pyrex, em escala piloto, utilizando folha de tomate picada. As medidas das variáveis operacionais nas zonas de alimentação, nas curvas e no ciclone, indicaram que elas representam regiões de elevado fluxo de calor entre o gás e as partículas.

KMIEĆ, MIELCZARSKI e PAJAKOWSA<sup>21</sup> e KMIEĆ e MIELCZARSKI<sup>22</sup>, estudaram as características hidrodinâmicas de um secador pneumático contendo dois tipos de câmaras de jorro, utilizando como materiais sementes de nabo e sílica gel. Os experimentos conduziram ao estabelecimento de uma correlação para o coeficiente de atrito entre os sólidos e as paredes do secador, onde é considerado o efeito da população de partículas

durante o processo.

As informações publicadas sobre os dados operacionais de instalações industriais de secagem pneumática também é escassa. GORDON<sup>14</sup>, BARR e BARR<sup>9</sup> e WILLIAMS-GARDNER<sup>49</sup> apresentam dados sobre operação e desempenho de alguns tipos de secadores comercialmente disponíveis, no tratamento de materiais como carvão, argila, bolo de filtro, lodo, despejos, ácido adípico, estearato metálico e fécula de batata e de milho.

## 2.2. ESTUDOS ENVOLVENDO MÉTODOS DE CÁLCULO COM ENFOQUE GLOBAL

Os métodos tradicionais de dimensionamento de secadores pneumáticos baseiam-se na troca térmica e empregam uma equação da forma:

$$q = U A \Delta T_m \quad (2.1)$$

na qual  $q$  representa a taxa de transferência de calor entre ar e sólidos,  $U$  o coeficiente global de troca térmica,  $A$  é a área total dos sólidos exposta à transferência de calor dentro do secador e  $\Delta T_m$  é a diferença de temperatura média entre o ar e os sólidos.

Alguns métodos de cálculo desses termos são apresentados na literatura. Assim é que WILLIAMS-GARDNER<sup>49</sup> determina o coeficiente global de troca térmica entre ar e sólidos através da relação:

$$U = \frac{2 K_g}{d_p} \quad (2.2)$$

onde  $K_g$  é a condutividade térmica do ar e  $d_p$  o diâmetro médio

das partículas. A equação (2.2) é empregada somente a uma esfera num fluido infinito e estagnado, ou seja, para números de Reynolds,  $Re_p$ , próximos de zero. Estas condições não se verificam num secador pneumático, supondo-se que valores indevidamente menores de  $U$  sejam produzidos por essa equação.

Uma expressão similar à equação (2.1) é recomendada por PERRY<sup>36</sup>, onde os termos  $U$  e  $A$  são agrupados num único coeficiente,  $U_a$ , denominado coeficiente volumétrico de transmissão de calor, dado pela equação:

$$U_a = \frac{c (W_g / S)^{0,67}}{D} \quad (2.3)$$

na qual  $c$  é uma constante de proporcionalidade,  $W_g$  a vazão mássica do gás e  $S$  e  $D$  são respectivamente a área da seção transversal e o diâmetro do tubo de secagem. Esta expressão, usada para secadores rotatórios, é indicada como uma forma de dimensionar secadores pneumáticos a título de estimativa, considerando que a eficiência do contato é da mesma ordem de grandeza que a do contato provocado pelas peças elevadoras de um secador rotatório, e que o fator controlante seja a diferença entre a velocidade do gás e a dos sólidos. Contudo, esta consideração é imprópria, devido a grande diferença que existe entre os mecanismos de contato gás-sólido nos dois secadores. Enquanto que nos secadores rotatórios o material fica na forma de um leito empacotado a maior parte do tempo, nos pneumáticos está sempre na forma de uma fase dispersa diluída.

Uma maneira experimental de obtenção do coeficiente volumétrico de transmissão de calor, utilizando um secador pneu

mático em escala de laboratório, é apresentada por NONHEBEL e MOSS<sup>34</sup>, que discutem também a aplicabilidade desses resultados ao projeto de unidades industriais. É recomendada pelos autores a correlação de JOHNSTONE, PIGFORD e CHAPIN<sup>17</sup> para a estimativa do coeficiente de transmissão de calor gás-sólido, necessário ao cálculo do tempo de secagem, baseado na transferência de calor.

A determinação do coeficiente global de transferência de calor gás-sólido pelos princípios até então indicados, o consideram constante ao longo do secador. Na prática, as variações que ocorrem na velocidade relativa entre gás e sólidos, ocasionam um decréscimo deste coeficiente ao longo do tubo de secagem.

O cálculo da área dos sólidos no secador, proposto por WILLIAMS-GARDNER<sup>49</sup>, é realizado considerando que as partículas têm velocidade idêntica à do ar de transporte. É também suposto que a área superficial dos sólidos por unidade de volume, não varia ao longo do secador. O cálculo é então feito apenas com base na velocidade do ar, mas, como em alguns casos os sólidos movem-se muito mais lentamente que o ar, espera-se desta forma, valores mais baixos para esta área.

O método para dimensionamento de secadores pneumáticos indicado por PERRY<sup>36</sup>, implica também num valor invariável para o coeficiente  $U_a$  através do equipamento. Contudo, o efeito combinado da diminuição de  $U$  e  $a$  ao longo do tubo de secagem, implica no decréscimo do coeficiente volumétrico de transmissão de calor.



WILLIAMS-GARDNER<sup>49</sup> e NONHEBEL e MOSS<sup>34</sup>, sugerem que  $\Delta T_m$  seja definido como a diferença de temperatura média logarítmica entre o ar e os sólidos na entrada e saída do secador. PERRY<sup>36</sup>, por sua vez, sugere que o termo  $\Delta T_m$  deve ser calculado como a média logarítmica entre os abaixamentos de bulbo úmido do ar nas extremidades de entrada e saída do secador. Este procedimento é efetuado sem levar em conta os efeitos de transferência de massa, o calor sensível requerido pelos sólidos e as perdas de calor existentes durante a realização de secagem.

A discussão apresentada sobre algumas das imprecisões cometidas ao se tratar o problema da secagem pneumática da maneira tradicional, demonstra que os métodos discutidos no presente parágrafo se mostraram com limitações para o correto dimensionamento de secadores pneumáticos, já que as informações expostas são de natureza global, não obtendo-se detalhes sobre as variáveis envolvidas. Desse modo, esses métodos se mostram úteis apenas para estimativas preliminares ao projeto desses equipamentos.

### 2.3. ESTUDOS BASEADOS NAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DE CONSERVAÇÃO

Com o contínuo progresso dos estudos sobre a transferência de quantidade de movimento, calor e massa entre partículas e gás de transporte, associado à possibilidade cada vez mais crescente da utilização de microcomputadores no cálculo matemático dos processos físicos que ocorrem no tubo de secagem, a modelagem matemática constitui-se numa excelente técnica para a resolução do problema de dimensionamento de secadores pneumáticos.

Nesse sentido, COGGAN<sup>11</sup> utilizou uma simulação matemática para um protótipo de secador pneumático anular, prevenindo seu desempenho com boa precisão. A técnica foi baseada na divisão do secador num discreto número de estágios, aplicando as equações de balanço e das taxas de transferência a cada um deles, onde os parâmetros desconhecidos foram determinados ajustando o modelo a dados experimentais. Mais tarde THORPE, WINT e COGGAN<sup>41</sup> aplicaram a mesma técnica, embora utilizando um procedimento algébrico mais simplificado, na simulação matemática de secador pneumático convencional e anular, estabelecendo comparações entre eles para uma ampla faixa de condições de operação e prevendo com boa precisão os parâmetros de saída.

De um modo geral, o desenvolvimento das modelagens matemáticas se baseia nas equações fundamentais das taxas de transferência de quantidade de movimento, calor e massa para a simulação do processo de secagem. Através da integração de equações diferenciais ordinárias, são obtidos os perfis axiais de velocidade, conteúdo de umidade e temperatura das partículas, e de umidade e temperatura do ar.

Determinações experimentais dos perfis longitudinais da velocidade relativa ar-sólidos, da umidade e temperatura do ar e do conteúdo de umidade de sólidos, na secagem de esferas de PVC, foram feitas por ANDRIEU e BRESSAT<sup>3</sup> numa unidade piloto de secagem pneumática. Esses resultados são comparados com os obtidos através de um modelo matemático do secador, com boa concordância entre os parâmetros experimentais e os simulados. As equações básicas que constituem esse modelo são:

$$\frac{d V_{rel}}{dt} = \frac{1}{v_s} \left[ \epsilon g \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_s} - \gamma \frac{1}{2} \rho_g \frac{A V_{rel}^2 CD}{m_s} \right] \quad (2.4)$$

na qual  $m_s$  representa a massa da partícula, considerada como sendo esférica, e os indicadores  $\epsilon$  e  $\gamma$  assumem os valores de 1 ou -1, conforme a trajetória das partículas seja ascendente ou descendente, e  $v_g > v_s$  ou  $v_s > v_g$ , respectivamente..

$$\frac{dY}{dz} = \frac{K_y}{W_g} (Y_s - Y) a S \quad (2.5)$$

$$\frac{dX}{dz} = - \frac{W_g}{W_s} \frac{dY}{dz} \quad (2.6)$$

$$\frac{dt_g}{dz} = \frac{[h a (t_g - t_s) + h_p a_t (t_g - t_a) - K_y a (Y_s - Y) C_{pv} t_g] S}{W_g C_{pgm}} \quad (2.7)$$

$$\frac{dt_s}{dz} = \frac{[h (t_g - t_s) - K_y (Y_s - Y) (H_V^0 + C_{pv} t_g)] a S}{W_s C_{psm}} \quad (2.8)$$

onde a área interfacial do sólido por unidade de volume do secador é dada por:

$$a = \frac{6}{d_p} \frac{W_s \rho_g}{W_g \rho_s} \quad (2.9)$$

Uma análise numérica similar é efetuada por MUJUMDAR<sup>32</sup>, que no entanto considera os termos referentes à variação longitudinal da umidade dos sólidos e do ar, nas equações de variação da temperatura dos sólidos e do ar, respectivamente. O con

junto de equações é expresso então da seguinte forma:

$$\frac{dv_s}{dz} = \frac{3}{4} CD \frac{\rho_g}{\rho_s} \frac{1}{d_p} \frac{(v_g - v_s)^2}{v_s} - \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_s} \frac{g}{v_s} \quad (2.10)$$

Considerando que no regime de fluxo estabelecido, a velocidade relativa gás-partícula é igual à velocidade terminal, dada por :

$$V_{rel} = v_t = v_g - v_s \quad (2.11)$$

$$\frac{dY}{dz} = 6 \frac{W_s}{W_g} \frac{K_y (Y_s - Y)}{v_s \rho_s d_p} \quad (2.12)$$

$$\frac{dX}{dz} = - 6 \frac{K_y (Y_s - Y)}{v_s \rho_s d_p} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{dt_g}{dz} = 6 \frac{W_g}{W_s} \frac{\left[ K_y (Y_s - Y) (H_v^0 + C_{pv} t_s) - h (t_g - t_s) \right]}{C_{pgm} v_s \rho_s d_p} \\ - \frac{(C_{pv} t_g + H_v^0)}{C_{pgm}} \frac{dY}{dz} - \frac{\pi D K_s (t_g - t_a)}{W_g C_{pgm}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\frac{dt_s}{dz} = \frac{\left[ 6 h (t_g - t_s) - K_y (Y_s - Y) (H_v^0 + C_{pv} t_s) \right]}{C_{psm} v_s \rho_s d_p} - \frac{(C_{pl} t_s - \lambda)}{C_{psm}} \frac{dX}{dz} \quad (2.15)$$

onde a área interfacial do sólido, é dada por:

$$a = \frac{6}{d_p} \quad (2.16)$$

É sugerido também que o coeficiente de troca térmica entre gás e sólido seja obtido pela correlação de BANDROWSKI e KACZMARZYK<sup>7</sup> que considera o efeito da concentração de partículas, embora este fato não seja levado em conta na demais equações que constituem o modelo.

MARTIN e SALEH<sup>27</sup>, utilizando carbonato de cálcio e esferas de PVC como materiais de estudo, mediram os perfis longitudinais de temperatura do ar e de umidade dos sólidos, sendo este último obtido por um engenhoso dispositivo de coleta das amostras sólidas, instalado ao longo do secador. Esses resultados são comparados com uma modelagem matemática, análoga às que já foram citadas, a não ser pela equação da taxa de secagem necessária, a qual é conseguida experimentalmente num secador de leite fluidizado em escala de laboratório.

Um tratamento baseado nos mesmos princípios é desenvolvido por MATSUMOTO e PEI<sup>29</sup>, que num estudo subsequente<sup>30</sup> apresentam uma solução analítica para a secagem pneumática de grãos durante o período de secagem a taxa decrescente, baseada na equação da difusão, concluindo que somente para números de Biot maiores que 100 a resistência interna torna-se o fator dominante para o processo de secagem.

Visando a interpretação de dados experimentais de uma instalação piloto para secagem pneumática de carvão granulado, MENDES<sup>31</sup> desenvolveu um modelo matemático que leva em conta a composição granulométrica do produto a secar. A simulação apresentada reproduz satisfatoriamente os resultados experimentais, sendo mostrada a influência da granulometria do material no de

correr da secagem, através da análise dos perfis de temperatura do gás e dos sólidos e do conteúdo de umidade do material, nos ensaios de cada fração do produto.

Recentemente NEBRA<sup>33</sup> obteve dados experimentais na secagem de bagaço de cana, para efeito de comparação com um modelo matemático especialmente desenvolvido para o sistema, o qual utiliza gases de exaustão de caldeira como fluido de transporte e secagem. A granulometria do material também é considerada no desenvolvimento da simulação matemática, para o qual foi realizado um estudo experimental de caracterização de tamanho e forma das partículas e obtida uma correlação para o cálculo do coeficiente de arraste entre gases e sólidos. A simulação foi desenvolvida para um secador pneumático, em escala industrial, constituído por um injetor, coluna principal e um ciclone, para o qual foi apresentado também um equacionamento matemático, permitindo desse modo a análise de seu funcionamento como um secador em relação à unidade total, visando a otimização do sistema industrial.

Os procedimentos a serem efetuados para uma eficiente operação num secador pneumático, usando a modelagem matemática como instrumento de cálculo, são recomendados e discutidos por THORPE<sup>42</sup>, que considera a simulação matemática associada à experimentos em planta piloto, a melhor técnica para o dimensionamento de secadores pneumáticos industriais.

### CAPÍTULO 3

#### DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR DE UMIDADE

##### 3.1. CONCEPÇÃO DO MEDIDOR

A correta determinação da umidade do ar nos diversos estágios da operação de secagem é essencial aos propósitos do presente estudo.

A medida da umidade da mistura vapor d'água-ar é obtida normalmente através de equipamentos convencionais, tais como célula de ponto de orvalho, higrômetro e psicrômetro. Destes instrumentos, o psicrômetro é o mais simples, barato e de fácil operação, embora sem modificações especiais, seu uso esteja limitado a temperaturas do ar abaixo de  $100^{\circ}\text{C}$ , sendo também essa temperatura o limite superior de operação para os outros dois instrumentos.

Medir precisamente conteúdo de umidade torna-se mais difícil acima de  $100^{\circ}\text{C}$  e comercialmente só são encontrados instrumentos projetados para medir umidades abaixo de  $100^{\circ}\text{C}$ , que não têm precisão à temperaturas mais altas. Assim, surgiu a necessidade de se desenvolver um equipamento simples com capacidade de medir adequadamente a umidade da corrente de ar para as temperaturas alcançadas no secador pneumático, quase sempre acima de  $100^{\circ}\text{C}$ .

Seguindo as idéias de KENT e ROSEN<sup>19</sup> foi projetado neste trabalho e construído pela TECNOCRIO LTDA-SP, o psicrômetro de dupla mecha empregado como medidor da umidade e demais propriedades psicrométricas do ar de secagem. A dificuldade de

se manter úmida a mecha de bulbo úmido à temperaturas elevadas é contornada pelo uso de um dispositivo para suprimento de água pré-aquecida para essa mecha, o que permite mantê-la umedecida mesmo a altas temperaturas, possibilitando dessa forma a aplicação do medidor acima de  $100^{\circ}\text{C}$ .

O dispositivo de pré-aquecimento e reposição da água para a mecha de bulbo úmido e a mecha auxiliar, constituem a especial característica do psicrômetro de dupla mecha utilizado neste trabalho como medidor do perfil de umidade do ar ao longo do secador pneumático.

### 3.2. DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DO MEDIDOR

O principal cuidado a ser tomado na operação de psicrômetros é com a indicação correta da temperatura de bulbo úmido. Métodos de medida desta temperatura estão bem documentados pela ASHRAE<sup>4</sup>.

Na medida da temperatura de bulbo úmido, TBU, o ar não saturado passa sobre uma mecha úmida em íntimo contato com um sensor de temperatura. Quando a transferência de calor do ar para a superfície da mecha úmida estiver em equilíbrio com a taxa de calor latente perdido pela água evaporada da mecha, a TBU é indicada.

A determinação de TBU com temperatura de bulbo seco do ar acima de  $100^{\circ}\text{C}$  requer um cuidadoso controle das condições do instrumento<sup>51</sup>. Trabalhar com temperaturas de bulbo seco, TBS, dessa ordem sem precauções especiais, ocasiona a secagem da mecha de bulbo úmido. Mantê-la saturada com água constitui



a maior dificuldade em medidas de umidades a altas temperaturas.

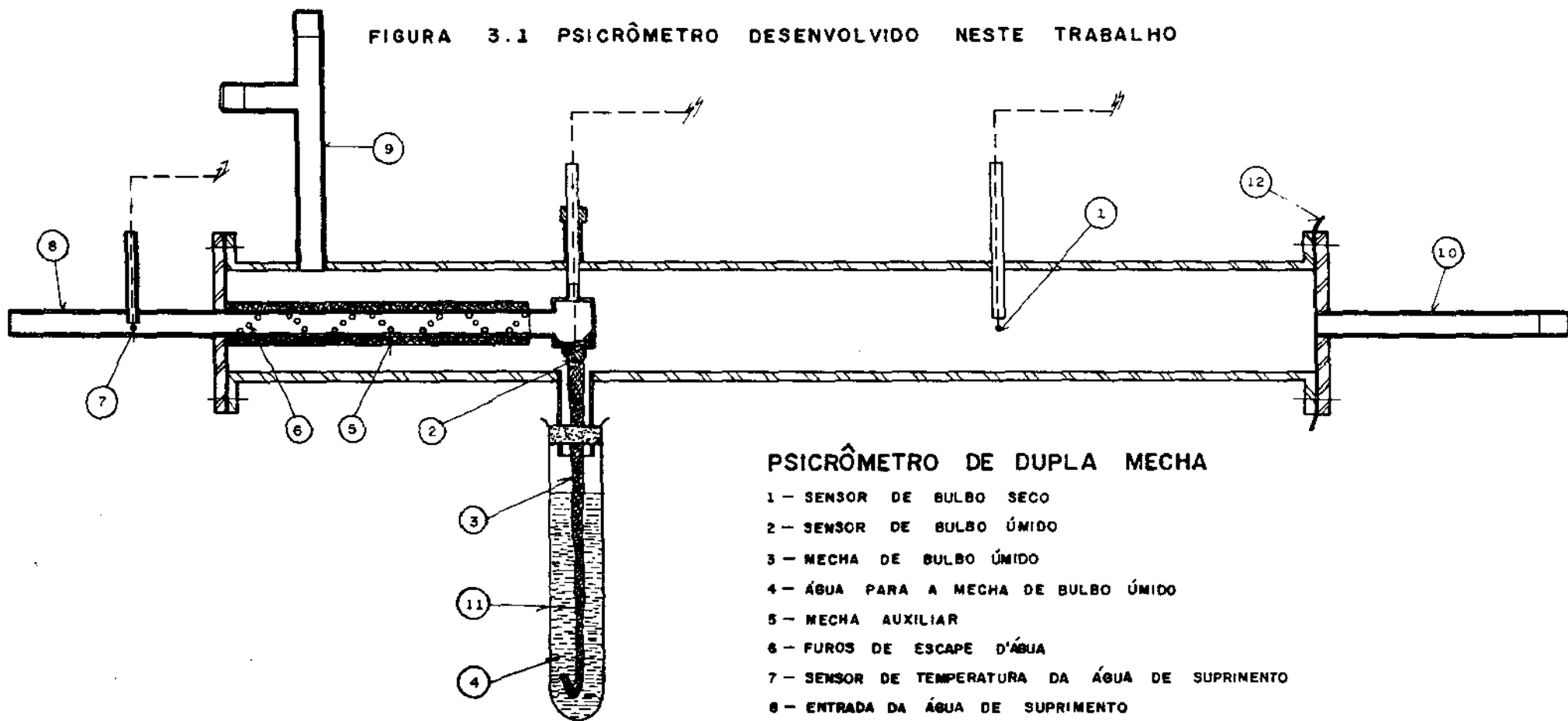
É apresentado pela ASHRAE<sup>4,6</sup> uma discussão detalhada a respeito da confecção e utilização da mecha de bulbo úmido, sua correta colocação no sensor de temperatura, bem como da faixa de velocidade apropriada para a corrente de ar que deve passar por essa mecha, além de outras importantes observações pertinentes à utilização adequada de psicrômetros e suas limitações. Estas precauções foram tomadas nas determinações experimentais das propriedades psicrométricas do ar neste trabalho. Foi observado quanto possível o método padrão de uso de psicrômetro de aspiração apresentado no ASHRAE STANDARD DRAFT<sup>6</sup>.

O psicrômetro desenvolvido neste trabalho é constituído por um corpo cilíndrico de aço inoxidável AISI 316 com 2,6cm de diâmetro interno e 20cm de comprimento, contendo sensores de temperatura de bulbo seco, bulbo úmido e para a água de suprimento, além do dispositivo que mantém umedecida a mecha de bulbo úmido, como mostrado na Figura (3.1).

Ar úmido é admitido no tubo de amostragem (10), passa pelos sensores de bulbo seco (1) e de bulbo úmido (2), numa velocidade acima do limite inferior de 1,52 m/s recomendada pela ASHRAE<sup>4</sup> para mecha com termopar fino, e sai pela linha de ar (9) após ter passado sobre a mecha auxiliar (5) que envolve parte do tubo de entrada da água de suprimento (8).

O ar era succionado por uma bomba de vácuo de 1,5 cv nos testes preliminares com o psicrômetro, mas, quando instalado no secador, verificou-se que o próprio soprador da montagem

FIGURA 3.1 PSICRÔMETRO DESENVOLVIDO NESTE TRABALHO



PSICRÔMETRO DE DUPLA MECHA

- 1 - SENSOR DE BULBO SECO
- 2 - SENSOR DE BULBO ÚMIDO
- 3 - MECHA DE BULBO ÚMIDO
- 4 - ÁGUA PARA A MECHA DE BULBO ÚMIDO
- 5 - MECHA AUXILIAR
- 6 - FUROS DE ESCAPE D'ÁGUA
- 7 - SENSOR DE TEMPERATURA DA ÁGUA DE SUPRIMENTO
- 8 - ENTRADA DA ÁGUA DE SUPRIMENTO
- 9 - LINHA DE AR PARA A BOMBA DE VÁCUO E PRÉ - AQUECEDOR
- 10 - ENTRADA DA AMOSTRA DE AR
- 11 - TUBO DE DEPÓSITO D'ÁGUA
- 12 - TELA

experimental fornecia maior velocidade do ar através dos sensores de temperatura, contribuindo desta forma para uma melhor medida de TBU.

Água pré-aquecida flui para o psicrômetro pelo tubo (8) onde sua temperatura é registrada pelo sensor (7), passa através dos furos de escape (6) causando a umidificação da mecha auxiliar (5) com o objetivo de manter a temperatura da água de suprimento o mais próximo possível da temperatura de bulbo úmido. Parte dessa água é evaporada da mecha auxiliar fazendo com que a temperatura do restante da água de suprimento fique próxima da TBU ao entrar em contato com a mecha de bulbo úmido (3). O excesso da água de suprimento (4) usada para umedecer essa mecha é coletado no depósito (11), o qual é isolado termicamente para garantir um suprimento extra de água na temperatura adequada para a mecha de bulbo úmido.

A água contida no depósito (11) tem a função básica de manter umedecida a mecha de bulbo úmido quando esse tubo estiver total ou parcialmente cheio, sendo a água nele contida constantemente absorvida pela mecha durante o processo de medida. No caso do nível da água desse reservatório baixar até a metade do seu comprimento, a reposição torna-se necessária.

A mecha de bulbo úmido é feita de algodão hidrófilo enrolado com gaze cirúrgica, preso ao termopar com linha de algodão. A mecha auxiliar é uma gaze cirúrgica que cobre parte do tubo (8) no interior do psicrômetro. Como o perfeito funcionamento dessas mechas influencia decisivamente o valor de TBU, uma constante inspeção do estado geral e limpeza era rea-

lizada no início de cada corrida.

Quando em operação no secador, as partículas sólidas eram retidas pela tela (12) colocada na flange de entrada do psicrômetro. Por precaução, uma outra tela era fixada na conexão do tubo (10) com o próprio tubo de secagem.

Possíveis erros de radiação para o sensor de bulbo úmido são reduzidos através da localização apropriada desta mecha no medidor, numa disposição que proporciona paredes de proteção para o sensor com moderada condutividade térmica,  $17,3 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  e baixa emissividade, 0,31. Todos os sensores de temperatura empregados são formados por pares termoelétricos de cobre-constantan.

O psicrômetro usado neste trabalho não foi calibrado apropriadamente devido ao fato de equipamentos comerciais não serem disponíveis para as condições de altas temperaturas deste estudo, e também por não dispormos de uma câmara de mistura adiabática, tal como foi utilizado no trabalho de KENT, ROSEN e HARI<sup>18</sup> na calibração do medidor de umidade. Assim, foi realizada somente comparações entre o psicrômetro de dupla mecha com psicrômetro de aspiração tipo Assman e com psicrômetro de giro à temperatura ambiente, havendo boa concordância entre os instrumentos testados.

A Figura (3.2) mostra detalhadamente as partes integrantes do psicrômetro de dupla mecha construído.

### 3.3. OPERAÇÃO DO SISTEMA PSICROMÉTRICO

O sistema completo de medida das amostras do ar de se

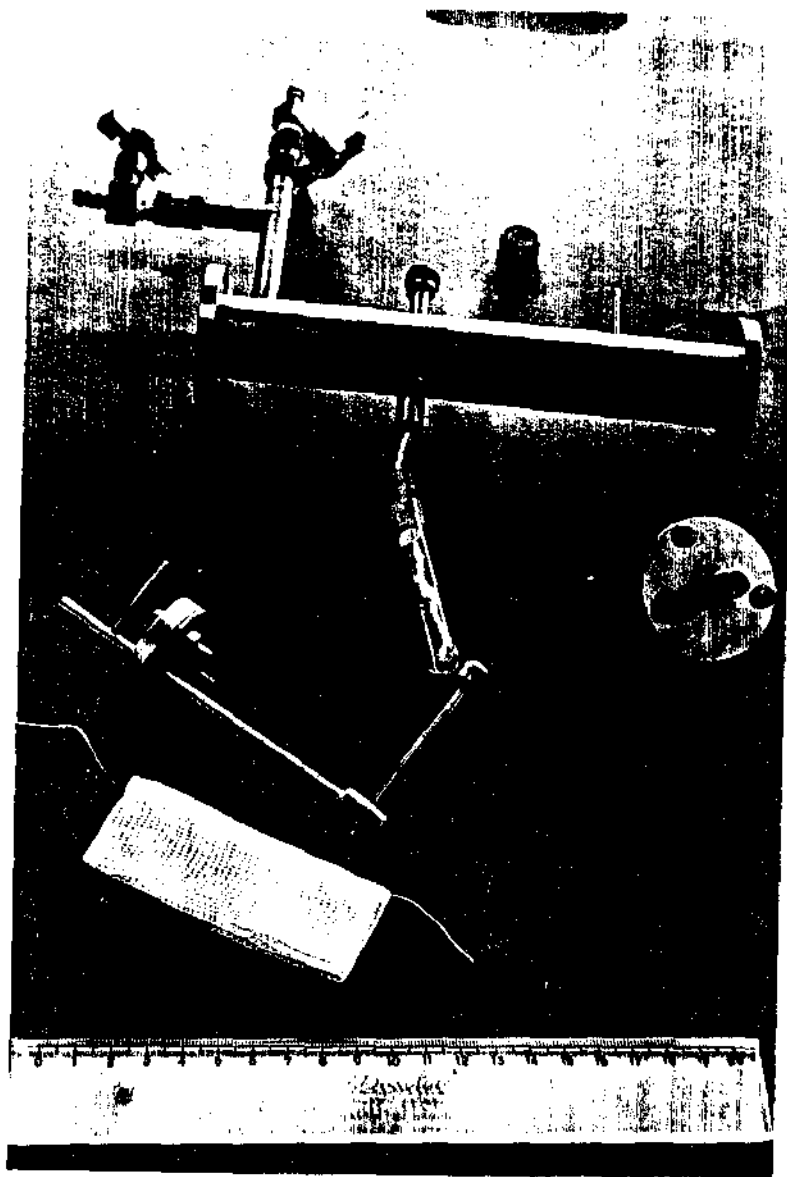


Figura 3.2 - Detalhes do psicrômetro construído neste trabalho

cagem, visando a obtenção do perfil de umidade ao longo do secador, é apresentado na Figura (3.3). Além do psicrômetro de dupla mecha, o conjunto envolve ainda um tanque para armazenar água de suprimento, pré-aquecida com o próprio ar proveniente do secador. O controle do fluxo deste ar é realizado com a finalidade de manter a água de suprimento aquecida no tanque numa temperatura ao redor da TBU, para quando necessário efetuar a reposição para a mecha de bulbo úmido na temperatura adequada.

As medidas são realizadas de acordo com os seguintes procedimentos:

- a) Ler nos milivoltímetros (7) a TBS e TBU indicadas pelo psicrômetro, conforme seleção feita nas chaves (6), para a amostra de ar (1) succionada da mistura ar-sólidos no tubo de secagem (14) pela bomba de vácuo (12).
- b) Acionar a chave seletora para a temperatura da água de reposição medida em (5), e verificar se o valor se encontra ao redor da TBU indicada anteriormente. Se não estiver, abrir a válvula (9) que dá acesso à serpentina (13) para aquecer a água de suprimento no tanque.
- c) Se necessário, proceder a reposição para a mecha de bulbo úmido através do uso da válvula de controle d'água (11).
- d) Quando o aquecimento da água no tanque (10) não for necessário, desviar o fluxo de ar saturado para a atmosfera, pois conforme as razões já expostas, foi dispensável o uso da bomba de vácuo no sistema psicrométrico operando no secador pneumático.

## SISTEMA PSICROMÉTRICO

- 1 - TOMADA DA AMOSTRA DE AR
- 2 - PSICRÔMETRO
- 3 - TEMPERATURA DE BULBO SECO
- 4 - TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO
- 5 - TEMPERATURA DA ÁGUA DE SUPRIMENTO
- 6 - CHAVE SELETORA
- 7 - MILIVOLTÍMETRO DIGITAL
- 8 - CHAVE MAGNÉTICA
- 9 - CONTROLE DE FLUXO DE AR
- 10 - TANQUE COM ÁGUA DE SUPRIMENTO
- 11 - CONTROLE DA ÁGUA DE SUPRIMENTO
- 12 - BOMBA DE VÁCUO
- 13 - SERPENTINA
- 14 - TUBO DE SECASEM

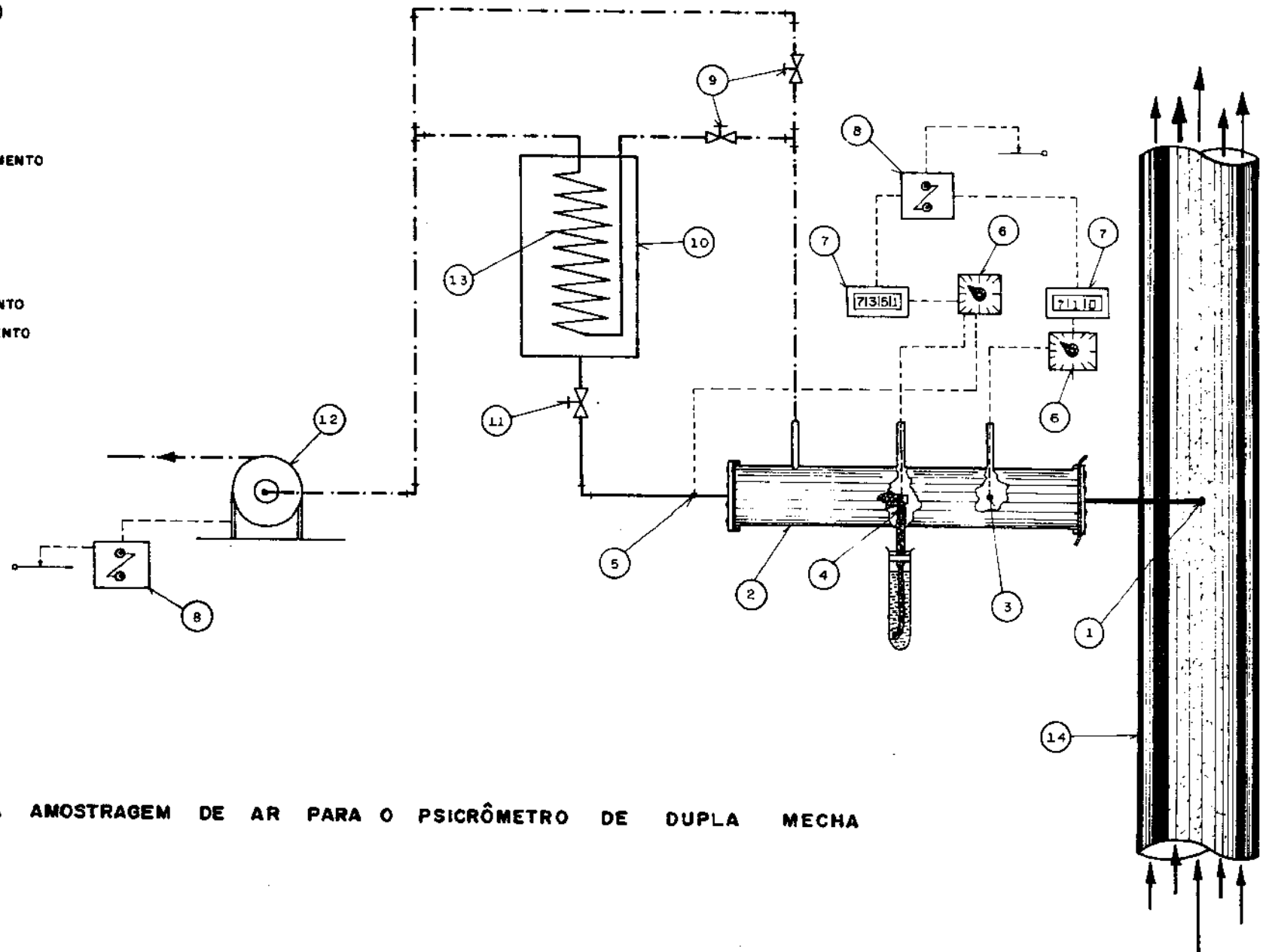


FIGURA 3.3 CONJUNTO DA AMOSTRAGEM DE AR PARA O PSICRÔMETRO DE DUPLA MECHA

### 3.4. PROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES PRIMÁRIAS DO INSTRUMENTO

#### 3.4.1. Aspectos Introdutórios

É comum nos processos que envolvem o cálculo das propriedades psicrométricas do ar úmido o conhecimento das temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido, e da pressão barométrica ou pressão total da mistura ar-vapor d'água,  $P$ , medidas através do uso de higrômetros de bulbo seco e bulbo úmido e por manômetros.

Em muitos desses processos, como é o caso da secagem de sólidos, a temperatura do ar de secagem é algumas vezes superior a  $100^{\circ}\text{C}$ , surgindo então a necessidade de se determinar as grandezas físicas envolvidas a temperaturas dessa ordem, a partir dos dados fornecidos de TBS, TBU e  $P$ . Além dos citados neste estudo, outros cuidados especiais para a construção, operação e controle de psicrômetros que permitam a obtenção precisa de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido mesmo a altas temperaturas, são apresentados por WEXLER e BROMBACHER<sup>47</sup>, WORRAL<sup>51</sup> e por KENT, ROSEN e HARI<sup>18</sup>.

Subrotinas e programas para o cálculo numérico das propriedades psicrométricas do ar, utilizando equações baseadas na suposição de gás perfeito e na lei de Dalton para a mistura ar-vapor d'água, são frequentes na literatura especializada em secagem de produtos agrícolas ou em aplicações meteorológicas, geralmente à temperaturas máximas de  $110^{\circ}\text{C}$ , conforme os trabalhos de AGRAWAL e RAO<sup>2</sup>, SPOFFORD<sup>39</sup>, WEISS<sup>46</sup>, WORBS<sup>50</sup> e WILHELM<sup>48</sup>. A literatura é omissa com relação a um tratamento similar para o caso de temperaturas mais elevadas.



Um dos objetivos deste trabalho é então desenvolver uma subrotina para o cálculo numérico das propriedades psicrométricas do ar úmido baseada na suposição de gás perfeito e na lei de Dalton, que forneça resultados satisfatórios para cálculos em Engenharia, a partir do conhecimento de TBS, TBU e P para temperaturas de operação na faixa de 60 a 300°C.

A partir dessas medidas podemos obter as seguintes propriedades do ar úmido: umidade relativa, UR, entalpia, H, razão de umidade, Y, grau de saturação, GS, e volume específico, V, além da pressão de saturação, Pws, e pressão parcial, Pw, para o vapor d'água. Esses valores podem ser calculados numericamente usando as informações disponíveis no ASHRAE HANDBOOK OF FUNDAMENTALS<sup>5</sup>. A subrotina apresentada neste trabalho é desenvolvida utilizando algumas equações básicas da ASHRAE<sup>5</sup> modificadas para as unidades do sistema SI, outras equações ajustadas por análise de regressão a dados tabelados na literatura e também correlações que melhor representem as variáveis envolvidas dentro da faixa de trabalho proposta.

A determinação de todas as propriedades do ar a partir do conhecimento de TBS, TBU e P está fundamentada na regra das fases de Gibbs. Considerando que o ar úmido seja composto por ar seco e vapor d'água, e, o ar seco uma mistura com razão constante entre as massas de oxigênio e nitrogênio, a regra das fases fornece três graus de liberdade para esse sistema. Assim, três propriedades intensivas serão suficientes para a determinação das demais propriedades do sistema.

### 3.4.2. Equações Utilizadas

#### a) Pressão de Saturação

A pressão de saturação da água é um cálculo frequente em análises psicrométricas, e sua predição influencia decisivamente as outras propriedades psicrométricas, pois são todas uma função dessa pressão.

A determinação das pressões de saturação da água à TBS e TBU é feita através da correlação de ABRAMS-MASSALDI-PRAUSNITZ<sup>1</sup>, indicada na equação (3.1), que representa bem os dados de pressão de saturação na faixa de 60 a 374,12°C:

$$\ln P_{ws} = A + BT^{-1} + C \ln T + DT + ET^2 \quad (3.1)$$

As constantes dessa correlação foram obtidas por TOFIK<sup>43</sup> a partir dos dados de Temperatura-Pressão de VARGAFTIK<sup>44</sup>, e são listadas a seguir:

$$\begin{aligned} A &= 26,2561 & B &= - 6176,33 & C &= 0,33426 \\ D &= - 0,01753 & E &= 1,07088 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

A correlação prediz os dados de pressão de saturação com desvio médio de 0,05% e máximo de 0,18% em relação aos valores tabelados dentro da faixa de temperatura estipulada.  $P_{ws}$  é dado em mmHg e T em K, sendo necessário multiplicar o valor encontrado para  $P_{ws}$  pelo fator 0,13332237 para a conversão em KPa.

## b) Entalpia

A combinação da primeira lei da termodinâmica, lei de Dalton para pressões parciais, definição de entalpia, equação dos gases perfeitos e o conceito de frações molares, associadas com a consideração de que no caso de gases perfeitos a energia interna é somente uma função da temperatura, resulta que a entalpia de uma mistura de gases perfeitos é igual a soma das entalpias individuais de seus componentes. Então, supondo que o ar úmido se comporte como uma mistura de gases perfeitos, a baixas pressões e temperaturas distantes da condensação, constituída por ar seco e vapor d'água, podemos escrever:

$$H = H_a + Y H_{vp} \quad (3.2)$$

As entalpias do ar seco,  $H_a$ , vapor d'água,  $H_{vp}$ , e também da água líquida,  $H_{ag}$ , necessárias à determinação das propriedades psicrométricas do ar úmido, são calculadas através de correlações obtidas por análise de regressão, a partir de dados de Temperatura-Entalpia fornecidos por RIVKIN<sup>37</sup> e SCHMIDT<sup>38</sup>, na faixa de 50 a 300°C. Este procedimento resulta numa aproximação mais precisa para o cálculo das entalpias dos componentes envolvidos, pois não considera que elas sejam uma função linear da temperatura, o que somente se verifica até 100°C.

A análise de regressão para valores tabelados das entalpias em função da temperatura foi feita pelo método dos mínimos quadrados, obtendo-se coeficientes de determinação e de correlação bem próximos da unidade. Com base nesses ajustes são propostas formas polinomiais para as entalpias do ar seco,

vapor d'água e da água líquida, expressas pelas equações (3.3), (3.4) e (3.5), respectivamente:

$$H_a = 0,507575 + 0,992956 t + 0,00008 t^2 + 1,71509 \times 10^{-9} t^3 \quad (3.3)$$

$$H_{vp} = 2491,66 + 2,18415 t + 0,004255 t^2 + 0,000013 t^3 - 4,5509 \times 10^{-8} t^4 \quad (3.4)$$

$$H_{ag} = -8,28965 + 4,43619 t + 0,002479 t^2 + 0,000009 t^3 \quad (3.5)$$

Todos os cálculos foram realizados adotando  $0^\circ\text{C}$  como nível de referência para todas as entalpias, expressas em KJ/Kg, e  $t$  em  $^\circ\text{C}$ .

#### c) Relações para gases perfeitos

Usando equações válidas para gases perfeitos e levando em conta as definições de razão de umidade, grau de saturação e umidade relativa, as seguintes relações podem também ser desenvolvidas:

$$Y_s = 0,62198 \frac{P_{ws}}{P - P_{ws}} \quad (3.6)$$

$$P_w = \frac{PY}{0,62198 + Y} \quad (3.7)$$

$$V = \frac{RT}{P - P_w} \quad (3.8)$$

$$GS = \frac{Y}{Y_s} \quad (3.9)$$

$$UR = \frac{P_w}{P_{ws}} \cdot 100 \quad (3.10)$$

## d) Razão de umidade

A equação básica de definição da temperatura termodinâmica de bulbo úmido é obtida de um balanço de energia para um processo de saturação adiabático, onde a entalpia do ar de entrada mais a entalpia da água acrescentada ao sistema deve ser igual a entalpia do ar saturado:

$$H + (Y_{s_u} - Y) H_{ag_u} = H_{s_u} \quad (3.11)$$

É necessário então considerar que a temperatura de bulbo úmido medida através do psicrômetro seja igual a temperatura termodinâmica de bulbo úmido. Esta consideração é válida, com suficiente rigor, para o caso de sistemas ar-água e será adotada em nossos cálculos.

As entalpias do ar de entrada e da água acrescentada ao sistema, podem ser calculadas através das equações (3.2) e (3.5), respectivamente.

A equação (3.2) pode ser reescrita em termos da temperatura termodinâmica de bulbo úmido, ou TBU, como:

$$H_{s_u} = H_{a_u} + Y_{s_u} H_{vp_u} \quad (3.12)$$

Substituindo as equações (3.2) e (3.12) na equação (3.11), e resolvendo para a razão de umidade:

$$Y = \frac{H_{a_s} - H_{a_u} + Y_{s_u} (H_{ag_u} - H_{vp_s})}{H_{ag_u} - H_{vp_s}} \quad (3.13)$$

As entalpias do ar seco e do vapor d'água são calculadas pelas equações (3.3) e (3.4). Os subscritos s e u significam que as propriedades são determinadas à TBS e TBU, respectivamente.

### 3.4.3. Aplicação das equações

As equações (3.1) a (3.10) e (3.13) são utilizadas para a determinação das propriedades psicrométricas do ar úmido. É apresentado a seguir um algoritmo para a solução destas equações através do uso de microcomputador, tendo como parâmetros de entrada TBS, TBU e P:

1. Entrar com os valores de TBS e TBU em °C e P em KPa.
2. Converter as temperaturas de entrada para K, pressão para KPa e tomar  $R = 0,28705 \text{ KJ/Kg K}$  como valor da constante dos gases para o ar.
3. Calcular a pressão de saturação da água e razão de umidade do ar úmido saturado à TBU:
  - a.  $P_{ws_u}$  usando a equação (3.1) a TBU.
  - b.  $Y_{s_u}$  usando a equação (3.6) e  $P_{ws_u}$ .
4. Calcular a pressão de saturação da água e razão de umidade do ar úmido saturado à TBS:
  - a.  $P_{ws_s}$  usando a equação (3.1) e TBS.
  - b.  $Y_{s_s}$  usando a equação (3.6) e  $P_{ws_s}$ .
5. Determinar a razão de umidade através da equação (3.13) e de  $Y_{s_u}$ , calculando primeiramente os valores de:
  - a.  $H_{a_s}$  usando a equação (3.3) e TBS.

- b.  $Ha_u$  usando a equação (3.3) e TBU.
  - c.  $Hag_u$  usando a equação (3.5) e TBU.
  - d.  $Hvp_s$  usando a equação (3.4) e TBS.
6. Calcular a pressão parcial do vapor d'água pela equação (3.7), usando Y e P.
  7. Calcular o grau de saturação do ar úmido pela equação (3.9), usando Y e  $Ys_s$ .
  8. Calcular a umidade relativa do ar úmido pela equação (3.10), usando Pw e  $Pws_s$ .
  9. Calcular a entalpia do ar úmido pela equação (3.2), usando  $Ha_s$ , Y e  $Hvp_s$ .
  10. Calcular o volume específico do ar úmido pela equação (3.8), usando os valores de R, TBS, P e Pw.

#### 3.4.4. Resultados obtidos e comparação com a literatura

De acordo com o algoritmo apresentado, foi desenvolvida uma subrotina em linguagem BASIC e calculados os valores das propriedades psicrométricas do ar. Os resultados para uma ampla faixa de condições de TBS e TBU à pressão total de 1 atm (101,325 KPa) são mostradas na Tabela (3.1). Os cálculos de  $Ys_s$  e de GS não foram computados devido a restrições inerentes a essas propriedades quando a temperatura de bulbo seco é da ordem de 100°C à pressão de 1 atm. O fato de  $Pws_s$  apresentar valores maiores que 101,325 KPa para temperaturas acima de 100°C à pressão atmosférica, limita o cálculo de  $Ys_s$  e consequentemente de GS nessas condições de temperatura e pressão.

Tabela 3.1 - Dados de saída para a subrotina desenvolvida a partir do algoritmo apresentado

	TBE(°C)	TBU(°C)	P(KPa)
	101.200	35.400	101.325
	103.900	56.000	101.325
	104.200	58.700	101.325
	104.300	67.300	101.325
	109.300	90.200	101.325
	115.600	50.100	101.325
	116.200	37.800	101.325
	116.200	47.300	101.325
	116.700	92.600	101.325
	120.100	67.200	101.325
	137.100	65.800	101.325
	150.200	67.400	101.325
	150.300	81.000	101.325
	165.400	94.800	101.325
	174.300	98.300	101.325
	177.100	82.900	101.325

PWSU(KPa)	YBU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)
6.7601	.0375	.0096	105.8014
16.5244	.1212	.0974	116.3381
18.7653	.1414	.1181	117.5605
27.7113	.2341	.2126	117.9704
70.6734	1.4341	1.4070	140.0203
12.4103	.0888	.0564	172.5246
6.5659	.0431	.0098	175.9182
11.0637	.0762	.0452	175.9182
77.3601	2.0078	1.9484	244.7248
27.5895	.2327	.1982	255.3573
25.9317	.2139	.1748	333.0152
27.8336	.2356	.1895	479.0626
49.3299	.5901	.5359	480.3474
90.3287	5.1092	4.8793	708.4621
95.3769	9.9734	9.5208	889.0605
53.2247	.6882	.6127	938.3388

PW(KPa)	UR(%)	V(m3/Kg)	H(KJ/Kg)
1.5475	1.463	1.0770	127.6481
13.7230	11.796	1.2355	365.8531
16.1657	13.751	1.2720	421.5534
25.0076	21.876	1.4348	675.1412
70.2642	50.181	3.5345	3894.9148
8.4307	4.887	1.2013	268.7332
1.5709	.893	1.1204	143.4191
6.8575	3.898	1.1831	238.8827
76.8063	31.385	4.6813	5417.0950
24.4817	9.587	1.4989	667.3584
22.2262	6.674	1.4888	615.0232
23.6611	4.939	1.5648	671.5433
46.8961	9.763	2.2333	1622.4639
89.8691	12.685	10.9890	13640.0992
95.1115	10.698	20.6948	26552.8837
50.2809	5.359	2.5321	1877.5131



Na Tabela (3.2) é mostrada uma comparação entre os valores calculados para a razão de umidade com os valores dados através de carta psicrométrica, para vários pares de TBS e TBU à 101,525 KPa obtidos por KENT e ROSEN<sup>19</sup>. Essa é a propriedade que sofre diretamente as maiores influências pelas modificações apresentadas no desenvolvimento das equações no presente trabalho, servindo então como um bom exemplo para comparações com valores dados na literatura e verificação da precisão dos resultados alcançados. Com efeito, dentro dos limites especificados, os valores de Y calculados mostram boa concordância com os dados da literatura, apresentando um desvio médio relativo da ordem de 3%.

Devido a simplicidade das equações, facilidade do método de solução e a precisão alcançada, a subrotina desenvolvida neste estudo é empregada como parte do programa utilizado no cálculo do perfil de umidade e demais propriedades do ar, para os dados obtidos experimentalmente com os psicrômetros à temperaturas acima de 100°C, conforme a listagem apresentada no Anexo A e os resultados exibidos no capítulo 6.

Tabela 3.2 : Comparação entre valores calculados e dados da literatura

TBS (°C)	TBU (°C)	Razão de Umidade (Kg de água/Kg ar seco)			
		Valor calculado <sup>a</sup>	Carta Psicrométrica <sup>b</sup>	Diferença	Desvio Relativo (%)
101,2	35,4	0,0096	0,0096	0,0000	0,000
103,9	56,0	0,0974	0,0960	0,0014	1,457
104,2	58,7	0,1181	0,1200	- 0,0019	1,609
104,3	67,3	0,2126	0,2020	0,0106	4,986
109,3	90,2	1,4070	1,4900	- 0,0830	5,899
115,6	50,1	0,0564	0,0540	0,0024	4,255
116,2	37,8	0,0098	0,0091	0,0007	7,145
116,2	47,8	0,0452	0,0445	0,0007	1,549
126,7	92,6	1,9484	2,0000	- 0,0516	2,648
128,1	67,2	0,1982	0,1900	0,0082	4,157
137,1	65,8	0,1748	0,1700	0,0048	2,746
150,2	67,4	0,1895	0,1900	- 0,0005	0,264
150,3	81,0	0,5359	0,5380	- 0,0021	0,392
165,4	96,8	4,8793	5,1600	- 0,2807	5,753
174,8	98,3	9,5208	9,5000	0,0208	0,218
177,1	82,9	0,6127	0,6450	- 0,0323	5,272
					Desvio Médio = 3,019%

a) Y calculado neste trabalho

b) ZIMMERMAN e LAVINE<sup>53</sup>

## CAPÍTULO 4

### MONTAGEM EXPERIMENTAL DO SECADOR

#### 4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Foram utilizados esferas de vidro e areia como materiais de estudo, visando as determinações experimentais em partículas bem caracterizadas quanto à forma, tamanho e propriedades térmicas e sem efeitos de higroscopia. A secagem desses materiais possui também importantes aplicações na indústria de silicatos.

##### 4.1.1. Caracterização das Partículas

As esferas de vidro sódico-cálcico foram fornecidas pela POTTERS INDUSTRIAL LTDA - SP, com características especificadas em catálogo pelo próprio fabricante. As partículas de areia foram obtidas por separação granulométrica em conjunto de peneiras conforme a série tyler  $\neq 28 \neq 32 \neq 35 \neq 42$ , sendo usadas as que ficaram retidas nas malhas  $\neq 32$  e  $\neq 35$  correspondendo aos diâmetros médios de 0,55 e 0,46 mm, respectivamente. O calor específico da areia seca foi obtido na literatura<sup>36</sup> e a massa específica determinada através da técnica picnométrica.

A tabela (4.1) apresenta características das partículas utilizadas.

Tabela 4.1 - Caracterização das partículas sólidas

Material	Especificação	Diâmetro médio (mm)	Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/Kg°C)
Esféras de vidro	AB	0,24	2500	754,0
Areia	≠ 32	0,55	2715	799,7
Areia	≠ 35	0,46	2622	799,7

#### 4.1.2. Umedecimento dos sólidos

O procedimento para umedecer o material a ser utilizado nos experimentos consistia em borrifar água aos sólidos secos sob constante movimento, visando homogeneidade do meio. A massa úmida era armazenada em recipiente fechado para ser utilizada nas corridas do dia seguinte.

Medidas de umidade em amostras de sólidos tratados desta maneira mostraram boa distribuição da água no material, sendo raramente necessário a repetição do processo.

A quantidade de água a ser adicionada à massa total de sólidos,  $m_t$ , de umidade conhecida  $X_i$ , com o propósito de obter a mesma massa com umidade final  $X_f$  era determinada pelo uso da relação,

$$m_{ag} = m_t \frac{X_f - X_i}{1 + X_i} \quad (4.1)$$

deduzida a partir da definição de razão de umidade dos sólidos, onde a quantidade calculada de água,  $m_{ag}$ , era adicionada à

massa  $m_t$  conforme procedimento descrito acima, alcançando um valor em torno da umidade desejada  $X_f$ . Este método foi empregado somente para orientação qualitativa das umidades do material, sem qualquer compromisso com valores pré-fixados em nenhuma das corridas experimentais.

#### 4.1.3. Determinação da Umidade dos Sólidos

O teor de umidade dos sólidos foi determinado através da perda de massa verificada em estufa.

Do material em questão, três amostras de aproximadamente 50 g cada eram pesadas em placas de petri previamente taradas, limpas e secas. O conjunto permanecia na estufa à temperatura de 150°C durante 2 horas, condição estipulada para o material atingir a característica de sólido seco, depois resfriado em dessecador contendo sílica gel e então pesado novamente.

A perda de massa dava o conteúdo de umidade em termos da quantidade de água evaporada por quantidade de sólido seco, segundo a relação:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \quad (4.2)$$

na qual  $m_1$  e  $m_2$  representam as massas inicial e final da amostra, respectivamente. Considerava-se a umidade dos sólidos como sendo a média entre as umidades das três amostras.

#### 4.2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

A figura (4.1) mostra o aspecto geral da montagem experimental, em escala piloto, desenvolvida neste trabalho. A

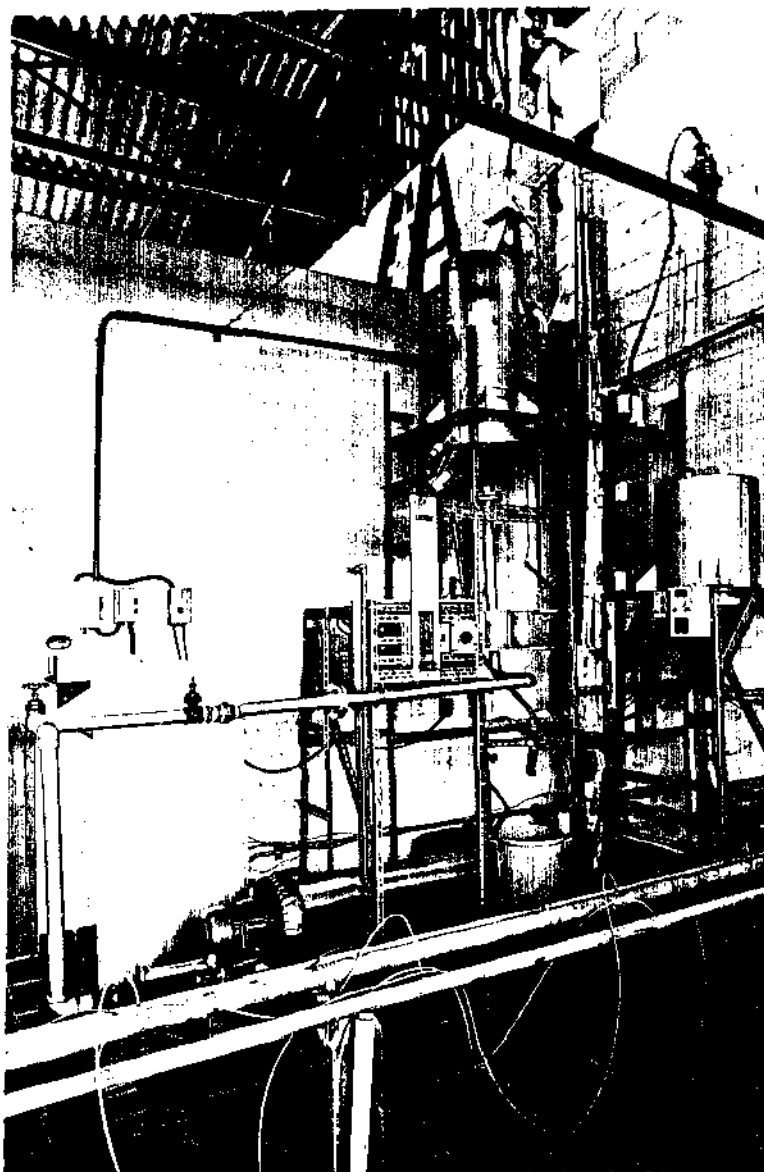


Figura 4.1 - Aspecto Geral do Secador Pneumático

operação se realiza de modo contínuo sendo a mistura ar-sólidos transportada à pressão positiva para a seção de secagem constituída por um tubo vertical de 4 m de altura e 5,25 cm de diâmetro interno, isolado com calha de fibra de vidro com 6,35 cm de espessura.

Para uma descrição mais detalhada dividiremos a instalação nas seguintes partes :

#### 4.2.1. Sistema de Admissão e Controle da Vazão do Ar

Conforme indicado na figura (4.2), o equipamento para injeção do ar utilizado como gás de secagem, consta de um soprador modelo S100-L2 de rotor fechado, fabricado pela EBERLE S.A. com motor assíncrono trifásico de 4 cv trabalhando em regime contínuo a 3475 rpm, com capacidade dada em placa de  $2 \text{ m}^3/\text{min}$  e 2000 mmCA.

Para a medida da vazão a montagem dispõe de uma placa de orifício concêntrico com arestas quadradas de diâmetro,  $d$ , igual a 3,97 cm, localizada à entrada do soprador. Este medidor é instalado numa flange na extremidade de um tubo conectado ao bocal de sucção do soprador, com diâmetro,  $D$ , igual a 5,25 cm e 27 cm de comprimento. A vazão de ar é então determinada através da leitura da deflexão manométrica em mmCA, observada num manômetro de tubo em U com uma das extremidades aberta à atmosfera. A tomada de pressão está fixada à 2 cm da placa.

A equação obtida na calibração da placa de orifício foi desenvolvida considerando a tomada de pressão situada a  $0,4 D$  da placa e essa à  $4 D$  do bocal do soprador. Para este

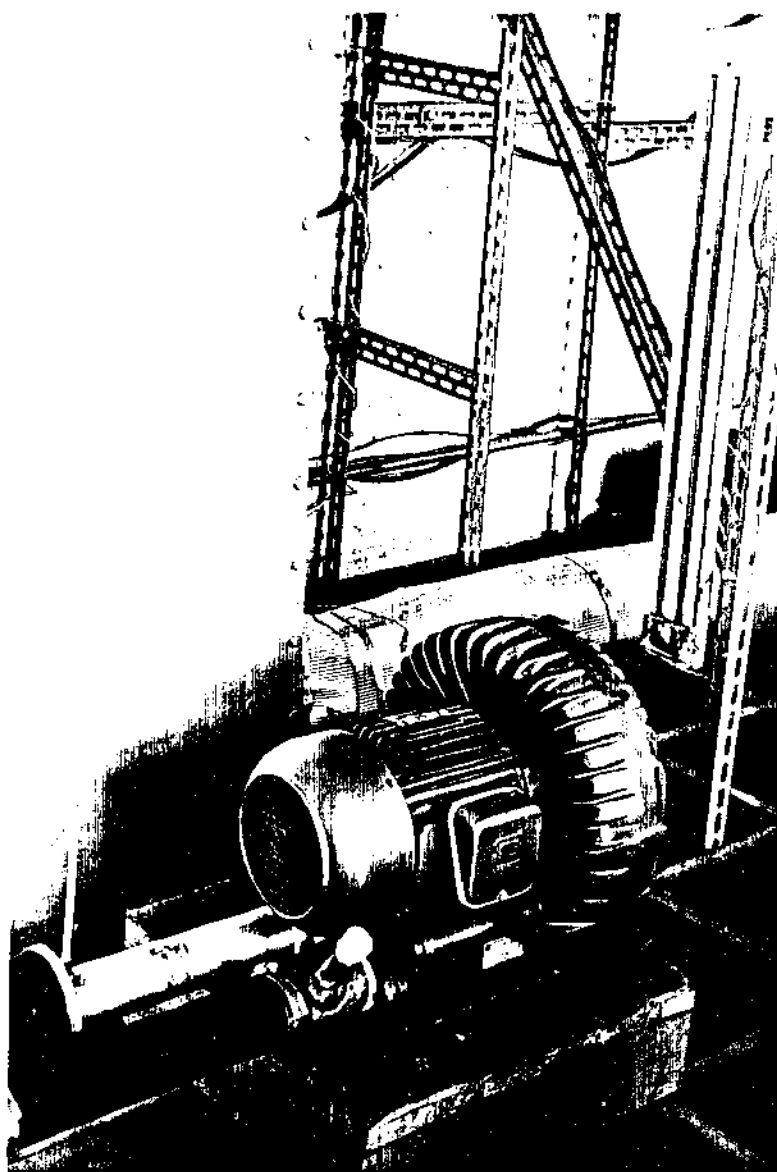


Figura 4.2 - Admissão e Medida da Vazão do Ar



tipo de arranjo o coeficiente de descarga do orifício é igual a 0,601 para  $0,2 < d/D < 1,0$ .

Nestas condições, a vazão mássica de ar seco é calculada pela equação ,

$$W_g (\text{Kg/h}) = 7,81 \times 10^{-3} d^2 (\text{mm}) \sqrt{h (\text{mmCA})} \quad (4.3)$$

que adequada aos dados experimentais e às unidades utilizadas fica :

$$W_g (\text{Kg/s}) = 1,081253 \times 10^{-2} \sqrt{h (\text{cmCA})} \quad (4.4)$$

onde  $h$  é a deflexão manométrica.

O controle da vazão de ar é feito através do manuseio de válvulas tipo globo dispostas na região de descarga do soprador.

#### 4.2.2. Sistema de Aquecimento e Controle da Temperatura do Ar

O conjunto apresentado na figura (4,3) é empregado no aquecimento do ar de secagem e consiste basicamente em três pares de resistências elétricas, sendo duas fixas de 3 Kw cada e outra variável controlada por termostato, chegando a atingir potência máxima de 2 Kw.

A variação da temperatura de entrada do ar é alcançada através de controle liga/desliga das chaves magnéticas nas quais se encontram ligadas as resistências fixas, sendo o ajuste fino realizado com a resistência variável controlada por um termostato possuindo um par termoelétrico de Ferro-Constantan, localizado à saída do aquecedor, como referência de tempe

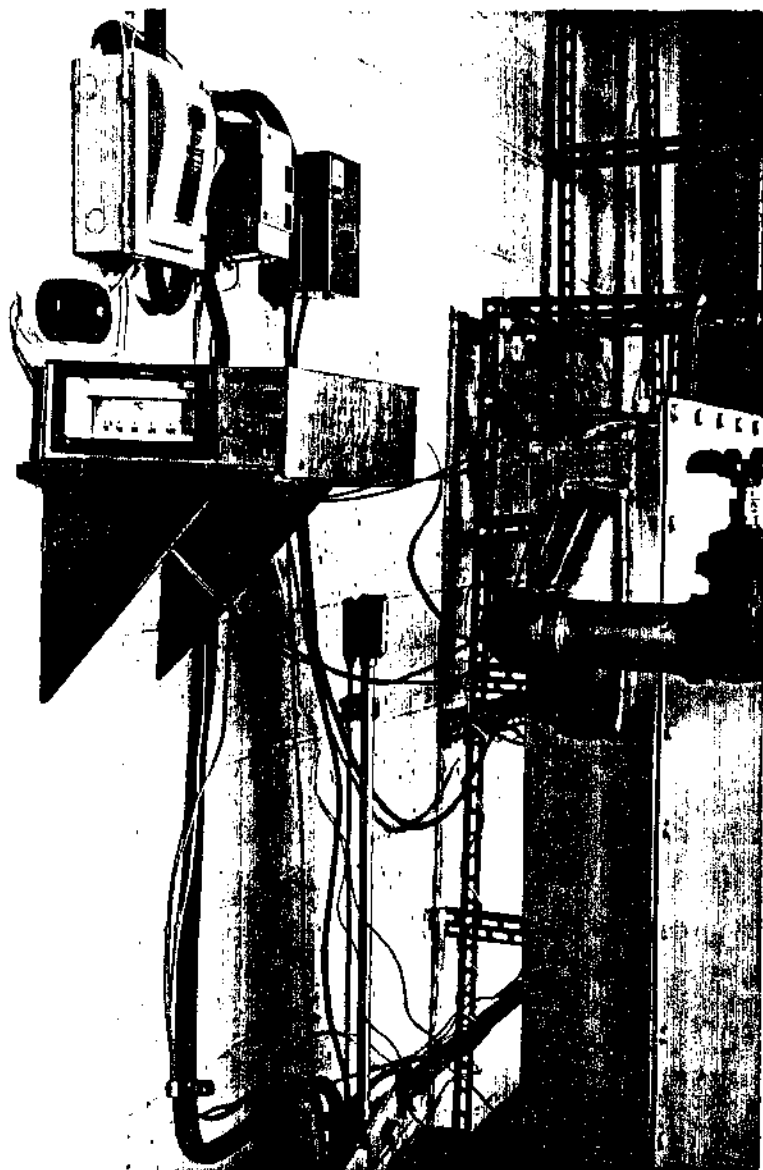


Figura 4.3 - Aquecimento e Controle da Temperatura do Ar

ratura.

#### 4.2.3. Sistema de Alimentação e Controle dos Sólidos

O sistema de alimentação é composto por um reservatório cilíndrico de base cônica com capacidade de 150 litros para armazenar os sólidos úmidos, e um alimentador helicoidal tipo parafuso sem fim, que descarrega na garganta de um venturi disposto na seção vertical do secador. Este alimentador é equipado com motoredutor compacto de corrente contínua reversível e potência de 1/2 hp, conectado a um variador de velocidade com comando eletrônico em gabinete à prova de pó, com acionamento manual no painel e rotação de saída máxima de 340 rpm, fabricados pela DIACTI ELETRÔNICA INDUSTRIAL E METALURGIA LTDA-SÃO PAULO.

Desta forma é obtida a variação da vazão de entrada do material e sua temperatura é determinada através de um termopar de cobre-constantan fixado na base do silo, abaixo da válvula de descarga dos sólidos úmidos.

A figura (4.4) exhibe o sistema de alimentação com detalhes do silo e variador de velocidade, ao passo que na figura (4.5) são evidenciados o motoredutor, alimentador helicoidal, visor, válvula de descarga e o termopar referido anteriormente.

#### 4.2.4. Sistema Psicrométrico

A instrumentação completa do sistema psicrométrico está descrita no Capítulo 3, com indicação detalhada sobre a medida e controle das variáveis empregadas na determinação da

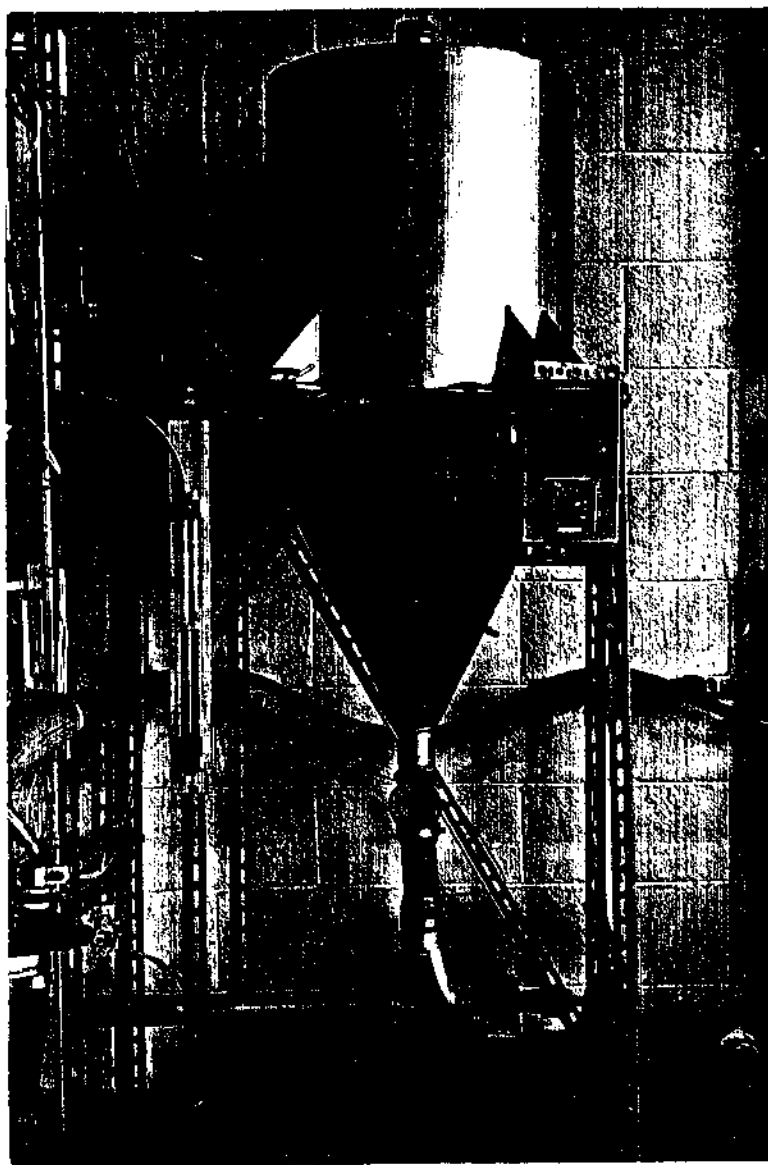


Figura 4.4 - Silo e Variador de Velocidade de Alimentação

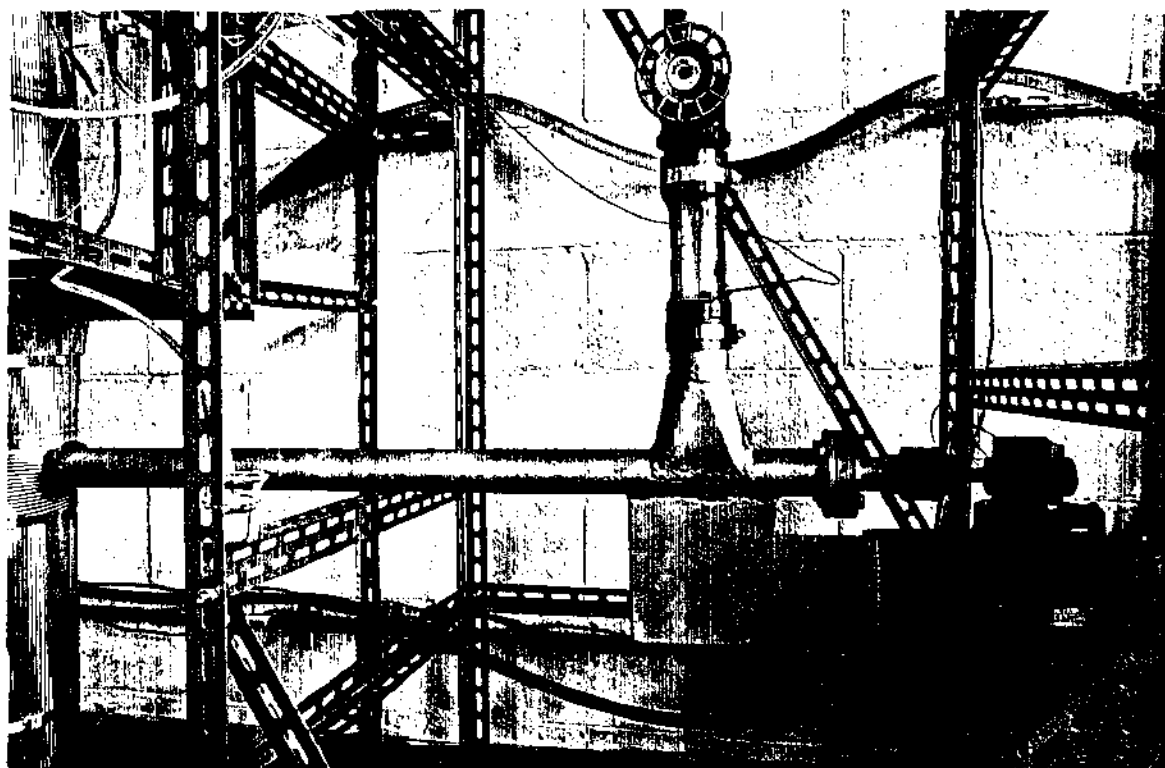


Figura 4.5 - Alimentador Helicoidal e Medida da Temperatura dos Sólidos

umidade e demais propriedades psicrométricas da corrente de ar úmido.

Na seção de teste vertical, os psicrômetros estão distanciados entre si de 50 cm, sendo o sensor de cota mais baixa instalado a 70 cm acima do ponto de alimentação dos sólidos, cobrindo uma faixa de 2,2 m do tubo de secagem. O psicrômetro para medida da umidade inicial do ar de transporte e secagem se encontra fixado 20 cm abaixo da seção de alimentação de sólidos.

É apresentado aqui o sistema psicrométrico instalado no secador pneumático para a obtenção do perfil axial de umidades do ar. Foram usadas cinco destas unidades dispostas longitudinalmente em seções transversais distintas, três das quais são mostradas na figura (4.6) onde se vê também à esquerda as tomadas de pressão ao longo do tubo de secagem. Na figura (4.7) aparece o medidor de cota 2,2 m com detalhes do aquecimento da água de reposição para a mecha de bulbo úmido, e o respectivo controle de vazão e temperatura.

Ainda como parte integrante do sistema, o painel de medição exibido na figura (4.8) é composto por chaves seletoras de termoparres, milivoltímetros digitais MD-045 fabricados pela ECB - Equipamentos Científicos do Brasil - SP, tendo ao centro o multimanômetro onde são indicadas as variações de pressão ao longo do secador.

O arranjo permite a seleção e leitura simultânea das temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e da água de reposição para cada ponto desejado, além das temperaturas de entrada e saída dos sólidos e do ambiente.

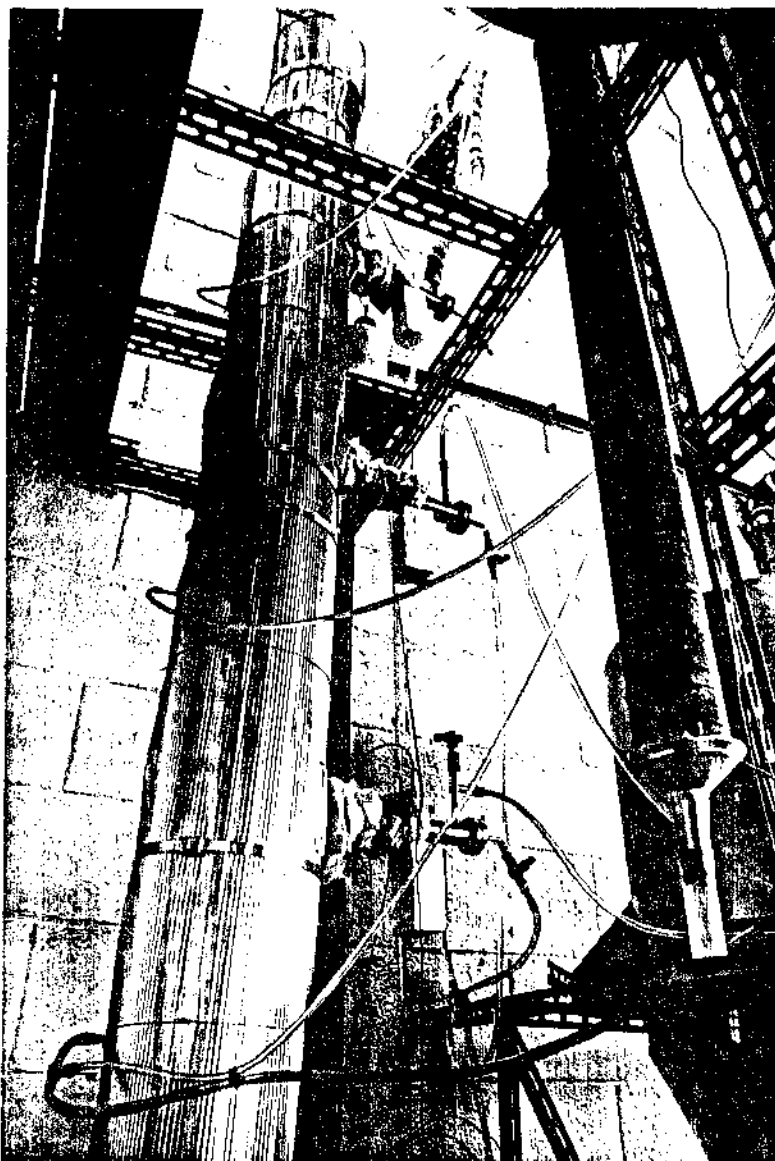


Figura 4.6 - Vista Geral da Medida do Perfil de Umidade e  
Pressão



Figura 4.7 - Sistema Psicrométrico Instalado para a Medida dos Perfis Longitudinais de Umidade e Temperatura



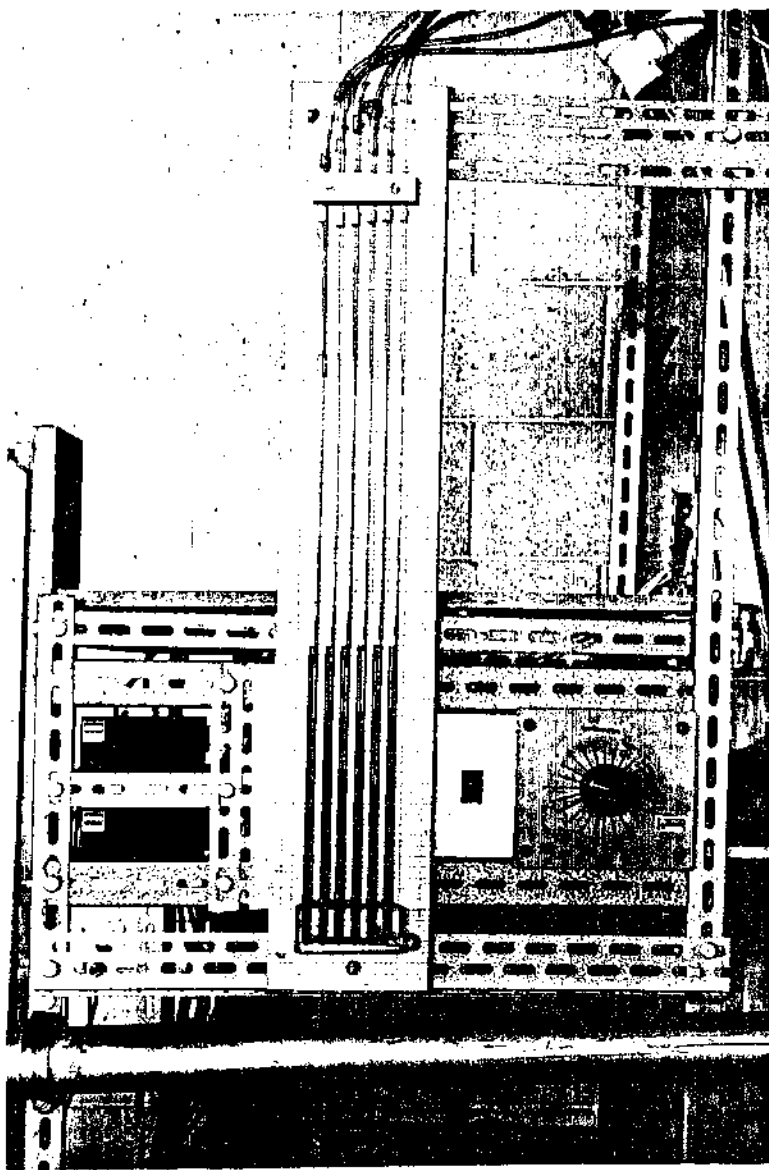


Figura 4.8 - Painel de Medição

Todos os termopares utilizados são do tipo T (cobre-constantan) e bitola 28, com uma junção de referência para cada chave seletora, constituída por um termopar do mesmo tipo mantido a 0°C.

#### 4.2.5. Sistema de Separação e Coleta de Sólidos

A figura (4.9) mostra a disposição empregada na separação e coleta do material seco. Consta principalmente de separador gravitacional, ciclone coletor com filtro de bolsa, e de uma válvula tipo borboleta para desvio de fluxo. A válvula localizada na saída inferior do separador gravitacional serve para retirar amostras de sólidos e usá-las para determinar a temperatura por método calorimétrico.

A medida da vazão mássica dos sólidos é feita através da pesagem do material recolhido em intervalos de tempo conhecidos, por ação da válvula desviadora de fluxo que descarrega sólidos já processados num resfriador tipo leito fluidizado quando em operação normal, de onde são retiradas após arrefecimento com ar ambiente insuflado pelo soprador e umedecidas novamente para posterior utilização.

#### 4.2.6. Equipamentos Auxiliares

São incluídos ainda alguns equipamentos auxiliares para a obtenção e tratamento dos dados experimentais, formados principalmente por uma balança eletrônica com mostrador digital de resposta rápida modelo LIBROR-BE 2800 fabricada pela INSTRUMENTOS CIENTÍFICOS C.G. LTDA - SP e por uma estufa com regulagem automática de temperatura até 250°C fabricada pela



Figura 4.9 - Sistema de Separação Gás-Sólido

OLIDEF CZ - SP, utilizados na determinação de umidades e vazões dos sólidos. Um compressor modelo 141 da PRIMAR LTDA - SP com deslocamento de 57 litros de ar por minuto é usado para tirar material que acaso fique retido no trecho do tubo de amostragem, antes da tela para retenção de sólidos nos psicrômetros, ao final de cada corrida.

As variações de pressão são medidas em mmCA através de multimanômetro, sendo o valor absoluto da pressão em cada ponto ao longo do tubo de secagem alcançado por meio de um manômetro, com um dos ramos aberto à atmosfera e leitura em mmCA, acoplado no ponto de cota mais baixa, num arranjo que permite estabelecer a pressão média de trabalho usada em nossos trabalhos.

No correlacionamento dos dados experimentais foi utilizado um microcomputador ITAUTEC I-7000 JE com 64 kbyte de memória RAM operado em linguagem BASIC, e um computador digital DEC/PDP-10 em linguagem FORTRAN, para processamento dos dados na modelagem matemática do secador a partir dos valores iniciais das variáveis obtidas experimentalmente.

#### 4.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

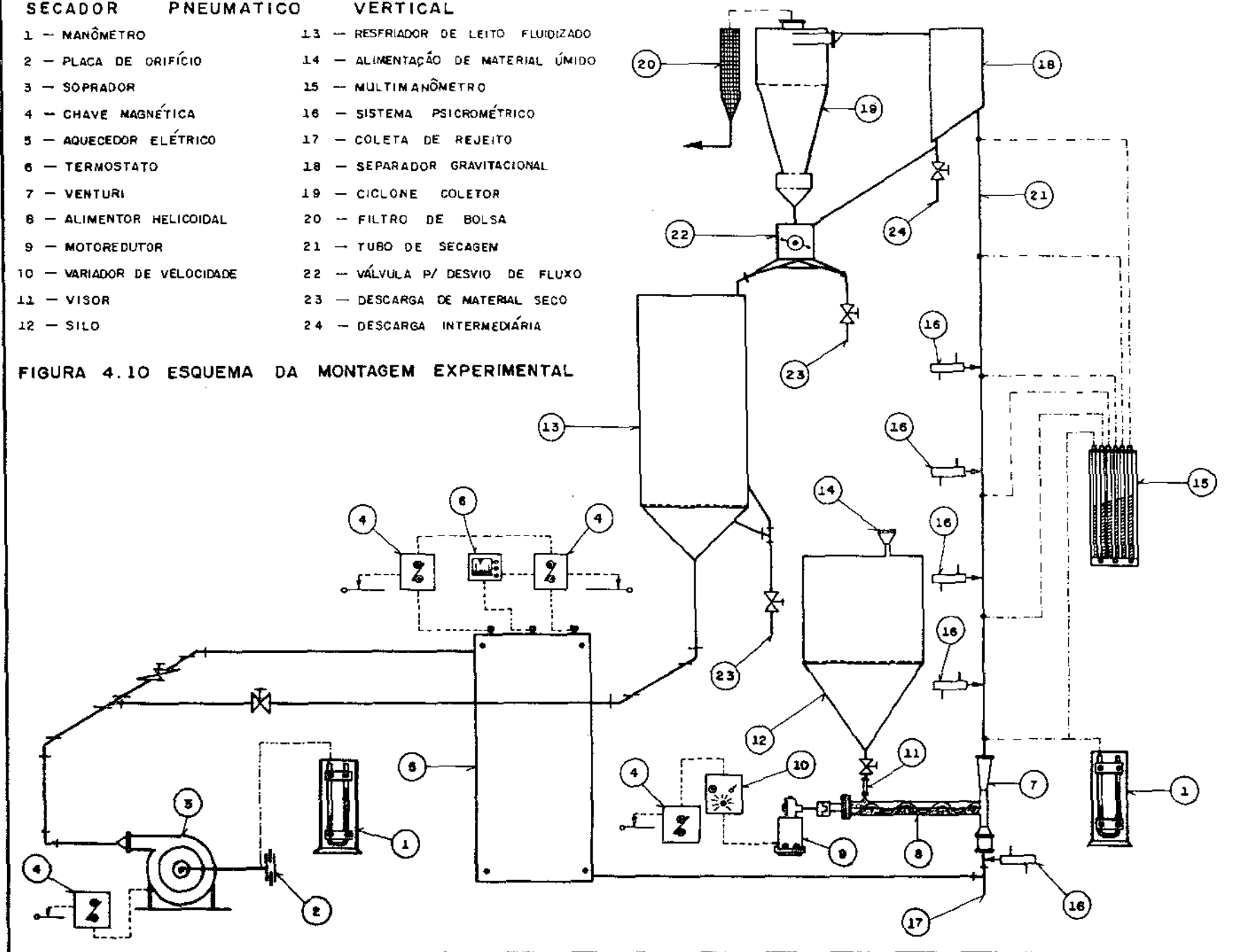
A montagem experimental do secador é mostrada na figura (4.10), com a instrumentação que permite a determinação e controle das variáveis dinâmicas e térmicas, além do acompanhamento e medida da umidade do ar em vários pontos do secador e das umidades de entrada e saída dos sólidos.

Ar ambiente é insuflado no sistema através do soprador (3), com sua vazão determinada pelo conjunto placa de orifício calibrada (2) e manômetro (1), seguindo para o aquecedor

### SECADOR PNEUMÁTICO VERTICAL

- |                              |                                      |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1 -- MANÔMETRO               | 13 -- RESFRIADOR DE LEITO FLUIDIZADO |
| 2 -- PLACA DE ORIFÍCIO       | 14 -- ALIMENTAÇÃO DE MATERIAL ÚMIDO  |
| 3 -- SOPRADOR                | 15 -- MULTIMANÔMETRO                 |
| 4 -- CHAVE MAGNÉTICA         | 16 -- SISTEMA PSICROMÉTRICO          |
| 5 -- AQUECEDOR ELÉTRICO      | 17 -- COLETA DE REJEITO              |
| 6 -- TERMOSTATO              | 18 -- SEPARADOR GRAVITACIONAL        |
| 7 -- VENTURI                 | 19 -- CICLONE COLETOR                |
| 8 -- ALIMENTOR HELICOIDAL    | 20 -- FILTRO DE BOLSA                |
| 9 -- MOTOREDUTOR             | 21 -- TUBO DE SECAGEM                |
| 10 -- VARIADOR DE VELOCIDADE | 22 -- VÁLVULA P/ DESVIO DE FLUXO     |
| 11 -- VISOR                  | 23 -- DESCARGA DE MATERIAL SECO      |
| 12 -- SILO                   | 24 -- DESCARGA INTERMEDIÁRIA         |

FIGURA 4.10 ESQUEMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL



elétrico (5) e sendo admitido no secador a uma temperatura desejada e mantida constante pelo termostado (6), para então promover a secagem das partículas que são introduzidas concorrentemente pelo alimentador helicoidal (8), o qual é provido de um controlador de velocidades (10), que permite variar a vazão de sólidos alimentados, através da mudança da velocidade de rotação do parafuso sem fim até um máximo de 340 rpm. A mistura ar-sólidos percorre o tubo de secagem (21), onde são registradas as leituras das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido nos sistemas psicrométricos (16).

A separação e coleta das partículas secas é feita através do separador (18) e do ciclone (19), que são recolhidas para a medida de vazão em (23) ou desviadas através da válvula (22) para o fluidizador (13). A distribuição de pressão ao longo do secador é medida no multimanômetro (15) e a pressão inicial no manômetro (1) fixado à saída do venturi (7).

A temperatura de entrada dos sólidos úmidos é medida por meio de um termopar no interior do visor (11) e a temperatura dos sólidos secos calorimetricamente na descarga intermediária (24).

#### 4.4. MODO OPERACIONAL

De uma maneira geral os ensaios realizados no secador pneumático seguiram as etapas descritas abaixo :

- a) Acionava-se o soprador, ajustando a válvula de controle do fluxo de ar para o aquecedor no valor desejado, de acordo com a deflexão manométrica produzida.

- b) Ligava-se as resistências elétricas do aquecedor numa disposição que permitisse obter a temperatura de trabalho. Para a maioria das vazões de ar utilizadas, temperaturas em torno de  $200^{\circ}\text{C}$  podiam ser alcançadas com as duas resistências fixas ligadas e a de controle posicionada no máximo, enquanto que para temperaturas menores, cerca de  $90^{\circ}\text{C}$ , bastava ligar a resistência variável no seu ponto máximo. Grande parte das corridas experimentais foram feitas com temperaturas de entrada do ar próxima de  $150^{\circ}\text{C}$  e para isso mantinha-se as resistências fixas ligadas e a de controle ao redor do valor mínimo.
- c) Verificava-se o perfeito funcionamento do sistema psicrométrico, principalmente a passagem do ar na velocidade adequada através dos sensores de temperatura, caso contrário, procedia-se a desobstrução de material retido na entrada dos psicrômetros usando-se o compressor.
- d) Ainda nos psicrômetros, era feita a inspeção dos tubos contendo água para as mechas, prevenindo que qualquer um deles ficasse vazio, enchendo-os com a água de reposição pré-aquecida.
- e) Depois de alcançado o valor da temperatura de trabalho em primeira instância, realizava-se o ajuste fino com a resistência variável até a estabilização da leitura no termostato, procedimento geralmente feito em torno de 20 minutos.
- f) Esperava-se então que as temperaturas de bulbo seco, TBS, e de bulbo úmido, TBU, indicadas nos psicrômetros, estabilizassem em valores de mesma ordem de grandeza ao longo do tubo

de secagem, situação em geral alcançada por volta de 40 minutos.

- g) Retirava-se amostras de sólidos previamente umedecidas de acordo com o procedimento descrito no item 4.1.2, para a de terminação da umidade inicial pelo método exposto em 4.1.3. Levava-se a efeito então o abastecimento do silo com cerca de 60 Kg de material úmido.
- h) Alcançado o equilíbrio térmico no secador, ajustava-se o variador de velocidades no número correspondente ao valor de sejado para a rotação do parafuso sem fim. Abria-se totalmente a válvula de descarga do silo e ligando em seguida o alimentador, iniciava-se a corrida experimental.
- i) Após os primeiros sólidos já processados serem recolhidos, fazia-se a leitura das deflexões manométricas que indicavam a vazão do ar de entrada, pressão no ponto de cota mais baixa e o perfil de pressões ao longo do secador.
- j) Lia-se no milivoltímetro o valor da temperatura ambiente.
- l) Dava-se início então a série de determinações dos pares de TBS e TBU para as cinco seções onde estavam instalados os sistemas psicrométricos. Visando trabalhar no regime estabelecido, essas leituras eram feitas geralmente após 20 mi nutos do início da corrida, embora em algumas delas o tempo estivesse limitado à quantidade de material a processar.
- m) Entre os intervalos de leituras de TBS e TBU, eram efetuadas as medidas da vazão mássica de sólidos, coletando três amostras de material seco em bechers de 1 litro previamente pesados, em intervalos de 1 minuto cada, verificando sempre



o desempenho do alimentador.

- n) Colhia-se os sólidos secos em frasco adiabático contendo termopar e determinava-lhes a temperatura. Esta medida era feita com os sólidos retirados na saída inferior do separador gravitacional, não correspondendo então à temperatura do material no tubo de secagem.
- o) Nesse tempo, amostras de sólidos secos eram colocadas em frascos rasos com vedação para o transporte até a estufa onde seria determinada a umidade final, conforme o item 4.1.3. Estas amostras foram coletadas de material que havia reali-zado o ciclo completo do processo de secagem.
- p) Desviando o ar de entrada de modo a não mais passar pelo aquecedor, procedia-se o resfriamento das partículas ainda retidas no fluidizador, para depois serem umidificadas e novamente secas em corridas posteriores.
- q) Desligava-se então o alimentador, as resistências elétricas do aquecedor, e por último o soprador, concluindo desta forma a corrida experimental. O tempo transcorrido em cada operação no secador pneumático pode ser estimado em 2 horas, e o tempo gasto desde a umidificação inicial dos sólidos até a determinação de sua umidade final fica em torno de 20 horas.

## CAPÍTULO 5

### MODELAGEM MATEMÁTICA SIMPLIFICADA DO SECADOR

Visando a interpretação dos dados obtidos, é aqui proposto um conjunto de equações diferenciais que representam um modelo unidimensional do secador pneumático.

#### 5.1. HIPÓTESES DO MODELO

Devido à difícil descrição matemática da dinâmica da suspensão e às interações existentes entre as transferências de massa e energia durante o processo de secagem, o desempenho do secador pneumático pode ser avaliado por um modelo com as seguintes considerações simplificadoras:

- a) As partículas sólidas são esféricas com diâmetro médio igual ao obtido da análise de peneiras.
- b) O material a secar tem um comportamento não higroscópico, está uniformemente distribuído em cada seção transversal do duto e não contrai durante a secagem.
- c) As partículas têm movimento retilíneo vertical, não sofrem influência das paredes do secador quando a concentração dos sólidos for baixa, e sua umidade e temperatura só variam longitudinalmente no tubo de secagem.
- d) A temperatura do sólido é uniforme e igual à temperatura de evaporação da água nele contida .
- e) O gás de secagem é constituído por uma mistura ideal de um componente inerte e vapor, tem perfil de velocidade plano

com temperatura e umidade uniformes nas seções transversais, as quais variam apenas com o comprimento do tubo de secagem.

- f) As taxas de sólidos e de ar secos são constantes ao longo do secador, sendo pequena a massa de ar acelerada com as partículas na região de entrada.
- g) As áreas para transferência de calor e massa entre gás e partículas são idênticas.
- h) São desprezados os efeitos da população de partículas, considerando-se sistemas com baixas concentrações (sistemas diluídos) para o cálculo dos coeficientes fenomenológicos.

## 5.2. EQUAÇÕES BÁSICAS DO MODELO MATEMÁTICO

Com o auxílio da figura (5.1) e de acordo com as hipóteses apresentadas, é proposta a seguinte formulação :

### a) Para a velocidade relativa gás-partícula

Para uma partícula de massa  $m_s$ , movendo-se por ação da força externa  $F_G$  através de um fluido à velocidade  $V_{rel}$ , a força resultante na direção de  $V_{rel}$  é dada por :

$$F = F_G - F_F - F_A \quad (5.1)$$

onde  $F_F$  é a força de flutuação devido ao deslocamento do fluido de massa específica  $\rho_g$  pela partícula de massa específica  $\rho_s$ , e  $F_A$  é a força de arraste dada pela equação :

$$F_A = C_D \frac{\rho_g A V_{rel}^2}{2} \quad (5.2)$$

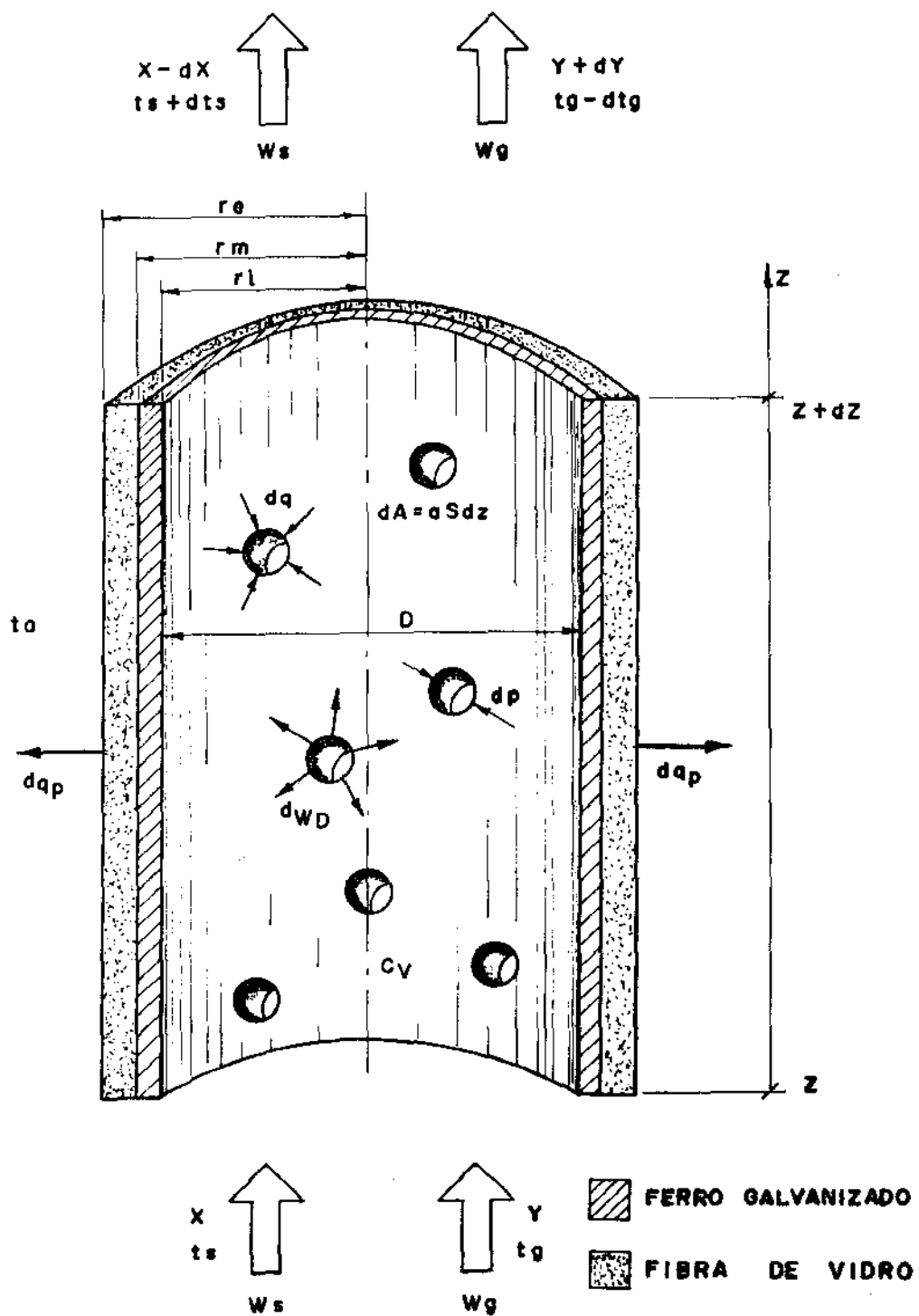


FIGURA 5.1 ESQUEMA DO COMPRIMENTO DIFERENCIAL DO SECADOR PNEUMÁTICO

A equação (5.1) pode ser reescrita como

$$F = m_s g - m_s g \frac{\rho_g}{\rho_s} - CD \frac{\rho_g A V_{rel}^2}{2} \quad (5.3)$$

onde a massa da partícula, sua área projetada,  $A$ , e a força resultante são expressas por

$$m_s = \frac{\pi dp^3 \rho_s}{6} \quad (5.4)$$

$$A = \frac{\pi dp^2}{4} \quad (5.5)$$

$$F = m_s \left( \frac{d V_{rel}}{dt} \right) \quad (5.6)$$

substituindo na equação (5.3), obtém-se a equação do movimento

$$\frac{d V_{rel}}{dt} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)}{\rho_s} - \frac{3}{4} CD \frac{\rho_g V_{rel}^2}{\rho_s dp} \quad (5.7)$$

mas,

$$\frac{d V_{rel}}{dt} = \frac{d V_{rel}}{dz} v_s \quad (5.8)$$

então

$$\frac{d V_{rel}}{dz} = \frac{1}{v_s} \left[ \frac{g(\rho_s - \rho_g)}{\rho_s} - \frac{3}{4} CD \frac{\rho_g V_{rel}^2}{\rho_s dp} \right] \quad (5.9)$$

onde o coeficiente de arraste  $CD$  é função do número de Reynolds calculado para a partícula.

b) Para a umidade do gás e conteúdo de umidade do material

Um balanço de massa para o componente água no comprimento diferencial  $dz$  mostrado na figura (5.1) fornece:

$$W_s dX + W_g dY = 0 \quad (5.10)$$

com a expressão cinética do fluxo de massa

$$W_s dX + K_y (Y^s - Y) dA = 0 \quad (5.11)$$

sendo  $Y^s$  a razão de umidade do ar saturado à temperatura do sólido, e

$$dA = a S dz \quad (5.12)$$

com

$$a = \frac{6}{dp} CV \quad (5.13)$$

onde  $CV$  expressa a razão de sólidos por volume da suspensão, calculada pela relação :

$$CV = \frac{V_s}{V_s + V_g} \cong \frac{V_s}{V_g} \quad (5.14)$$

onde foi considerada uma mistura gás-sólido diluída na qual  $V_s$  e  $V_g$  são as vazões volumétricas de sólido e gás na posição  $z$ , respectivamente. Assim,  $CV$  pode ser representado por :

$$CV = \frac{W_s \rho_g}{W_g \rho_s} \quad (5.15)$$

Após rearranjo das equações temos:

$$\frac{dY}{dz} = \frac{6 \rho_g W_s}{dp \rho_s W_g} K_y (Y_s - Y) S \quad (5.16)$$

e

$$\frac{dX}{dz} = - \frac{W_g}{W_s} \frac{dY}{dz} \quad (5.17)$$

c) Para a temperatura do gás e do material

Para o comprimento diferencial, as taxas de calor e massa podem ser expressas por :

$$dq = h a (t_g - t_s) S dz \quad (5.18)$$

para o calor sensível perdido pelo ar, e

$$dq_p = h_p a_t (t_g - t_a) S dz \quad (5.19)$$

para o calor perdido para o ambiente, onde  $h_p$  e  $a_t$  representam respectivamente o coeficiente médio de transmissão de calor e a área de troca térmica entre o secador e as vizinhanças por unidade de volume de secador. O valor de  $h_p$  pode ser obtido através da expressão :

$$\frac{1}{h_p} = \frac{1}{h_i} + \frac{r_i}{K_s} \ln \frac{r_m}{r_i} + \frac{r_i}{K_i} \ln \frac{r_e}{r_m} + \frac{r_i}{r_e} \frac{1}{h_e} \quad (5.20)$$

na qual  $r_i, r_m$  e  $r_e$  são os raios interior, exterior do tubo e exterior do isolante, respectivamente. Os termos  $K_s$  e  $K_i$  representam as condutividades térmicas do tubo e do material iso

lante, e  $h_e$  e  $h_i$  são os coeficientes de troca térmica por convecção livre e forçada, calculados a partir de correlações da das na literatura<sup>55</sup>,

e,

$$dW_D = K_y a (Y_s - Y) S dz \quad (5.21)$$

para a taxa de transferência de massa.

Na condição de estado estacionário, um balanço de calor na fase gasosa fornece :

$$\begin{aligned} & \left[ h_a (t_g - t_s) + h_p a_t (t_g - t_s) - K_y a (Y_s - Y) C_{pv} t_s \right] S dz + \\ & + W_g \left[ C_{pgm} dt_g + (C_{pv} t_g + H_v) dY \right] = 0 \end{aligned} \quad (5.22)$$

daí

$$\begin{aligned} \frac{dt_g}{dz} = & - \left[ \frac{h_a (t_g - t_s) + h_p a_t (t_g - t_s) - k_y a (Y_s - Y) C_{pv} t_s}{W_g C_{pgm}} \right] S - \\ & - \frac{C_{pv} t_g + H_v}{C_{pgm}} \frac{dY}{dz} \end{aligned} \quad (5.23)$$

onde  $H_v$  é a entalpia de vaporização à temperatura do sólido  $t_s$  e  $C_{pgm}$  representa o calor específico médio do ar úmido dado por

$$C_{pgm} = C_{pg} + C_{pv} Y \quad (5.24)$$

onde  $C_{pg}$  e  $C_{pv}$  são respectivamente o calor específico do ar se co e do vapor d'água.



De maneira análoga, para a fase sólida temos:

$$W_s (C_{psm} dt_s + C_{pl} t_s dX) - \left[ h (t_g - t_s) - K_y (Y_s - Y) (C_{pv} t_g + H_v) \right] a S dz = 0 \quad (5.25)$$

que resulta em

$$\frac{dt_s}{dz} = \left[ \frac{h (t_g - t_s) - K_y (Y_s - Y) (C_{pv} t_g + H_v)}{W_s C_{psm}} \right] a S - \frac{C_{pl} t_s}{C_{psm}} \frac{dX}{dz} \quad (5.26)$$

onde  $C_{psm}$  representa o calor específico médio do sólido úmido dado pela expressão

$$C_{psm} = C_{ps} + C_{pl} X \quad (5.27)$$

na qual  $C_{ps}$  e  $C_{pl}$  são os calores específicos do sólido seco e da água líquida, respectivamente.

### 5.3. EQUAÇÕES AUXILIARES

As propriedades físicas e os coeficientes locais de transferência de momentum, calor e massa necessários para a solução das equações diferenciais representativas do modelo, são estimados através de correlações existentes na literatura.

O coeficiente de arraste,  $CD$ , uma função do número de Reynolds calculado para a partícula,  $Re_p$ , é obtido de uma das relações abaixo, segundo LEVA<sup>26</sup>:

$$CD = \frac{24}{Re_p} \quad Re_p < 2 \quad (5.28)$$

$$CD = 18,5 Re_p^{-0,6} \quad 2 < Re_p < 500 \quad (5.29)$$

$$CD = 0,44 \quad Re_p > 500 \quad (5.30)$$

onde,

$$Re_p = \frac{\rho_g d_p V_{rel}}{\mu_g} \quad (5.31)$$

e

$$V_{rel} = v_g - v_s \quad (5.32)$$

O coeficiente de transferência de calor gás-partícula é calculado através da correlação de KRAMERS<sup>24</sup>, válida para esfera em escoamento forçado num meio infinito, que expressa

$Nu = f(Re_p, Pr)$  na forma :

$$Nu = 2 + 1,3 Pr^{0,15} + 0,66 Pr^{0,31} Re_p^{0,5} \quad (5.33)$$

onde,

$$Pr = \frac{\mu_g C_{pg}}{K_g} \quad (5.34)$$

e

$$Nu = \frac{h d_p}{K_g} \quad (5.35)$$

Substituindo-se a relação (5.35) em (5.33), resulta:

$$h = (2 + 1,3 Pr^{0,15} + 0,66 Pr^{0,31} Re_p^{0,5}) \frac{K_g}{d_p} \quad (5.36)$$

O coeficiente de transferência de massa gás-partícula, devido a alta turbulência do fluxo, é calculado com base no

coeficiente de transferência de calor usando a analogia de CHILTON-COLBURN<sup>10</sup>:

$$K_y = \frac{h}{C_{pg}} \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} \quad (5.37)$$

onde

$$Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AB}} \quad (5.38)$$

Das propriedades físicas envolvidas, a massa específica e viscosidade do gás são as que experimentam mudanças apreciáveis no decorrer do processo de secagem como resultado das progressivas variações na velocidade relativa, temperatura e umidade.

A massa específica é obtida da relação citada por MATSUMOTO e PEI<sup>29</sup> :

$$\rho_g = \rho_{g0} \left( \frac{T_{g0}}{T_g} \right) \left( \frac{1 + Y}{1 + 1,6078 Y} \right) \quad (5.39)$$

na qual,

$$\rho_{g0} = \frac{1}{V} \quad (5.40)$$

onde V é o volume específico do ar de entrada, obtido a partir dos dados experimentais pela equação (3.8).

A viscosidade do ar é calculada através da correlação de STRUMILLO<sup>40</sup>, citada por MUJUMDAR<sup>32</sup>, válida para temperaturas do ar na faixa de 0 a 360°C:

$$\mu_g = 3,9895 \times 10^{-8} T_g + 0,6644 \times 10^{-5} \quad (5.41)$$

O cálculo da entalpia de vaporização à temperatura do material, é feito empregando-se a correlação de WATSON<sup>45</sup>, na forma :

$$H_V = 2,26 \times 10^6 \left[ \frac{1 - (T_s/647,3)}{0,42853} \right]^{0,58} \quad (5.42)$$

Foi avaliada a taxa de calor perdido para o ambiente, dada pela equação (5.19) com os coeficientes e propriedades físicas necessários ao cálculo de  $h_p$  através da equação (5.20) obtidos da literatura<sup>35</sup>. Os valores encontrados para a referida taxa foram muito pequenos em comparação com os demais termos da equação (5.23) a ponto de sua inclusão não ter influência nos valores de  $t_g$  obtidos por essa equação, além do que o método de cálculo de  $q_p$  envolvia processo iterativo.

Assim, a parcela referente às perdas de calor para o ambiente que consta na equação (5.23) é abandonada, constituindo-se em mais uma consideração do modelo matemático, não sendo por isso citado os pormenores do cálculo nem as correlações utilizadas para tal.

A razão de umidade do ar saturado à temperatura  $t_s$ , é obtida no cálculo das propriedades psicrométricas do ar úmido desenvolvido no capítulo 3.

#### 5.4. SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO

As equações diferenciais relacionadas a seguir, associadas às equações auxiliares, representam o modelo matemático do secador,

$$\frac{d V_{rel}}{dz} = \frac{1}{v_s} \left[ \frac{g(\rho_s - \rho_g)}{\rho_s} - \frac{3}{4} CD \frac{\rho_g V_{rel}^2}{\rho_s d_p} \right] \quad (5.9)$$

$$\frac{dY}{dz} = \frac{6 \rho_g W_s}{d_p \rho_s W_g} K_y (Y_s - Y) S \quad (5.16)$$

$$\frac{dX}{dz} = - \frac{W_g}{W_s} \frac{dY}{dz} \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{dt_g}{dz} = & - \left[ \frac{h(t_g - t_s) - K_y (Y_s - Y) C_{pv} t_s}{W_g C_{pgm}} \right] a S - \\ & - \frac{C_{pv} t_g + H_v}{C_{pgm}} \frac{dY}{dz} \end{aligned} \quad (5.23a)$$

$$\frac{dt_s}{dz} = \left[ \frac{h(t_g - t_s) - K_y (Y_s - Y) (C_{pv} t_g + H_v)}{W_s C_{psm}} \right] a S -$$

$$- \frac{C_{pl} t_s}{C_{psm}} \frac{dX}{dz} \quad (5.26)$$

e são integradas em relação a altura  $z$ , no intervalo compreendido desde a seção de alimentação de sólidos úmidos,  $z = 0$ , até a seção de saída dos sólidos do tubo de secagem,  $z = L$ , onde  $L$  é igual a 4 m.

A resolução do conjunto de equações do modelo matemático é realizada numericamente pelo método de Runge-Kutta-Gill de 4ª ordem, utilizando um programa de computador escrito em linguagem FORTRAN, com as seguintes condições de contorno :

$$z = 0 : X = X_0, t_s = t_{s0}, Y = Y_0, t_g = t_{g0}, V_{rel} = V_{rel0}$$

$$z = L : X=X_L, t_s=t_{sL}, Y=Y_L, t_g=t_{gL}, V_{rel}=V_{relL}$$

obtendo-se os perfis de  $X(z)$ ,  $t_s(z)$ ,  $Y(z)$ ,  $t_g(z)$  e  $V_{rel}(z)$ .

## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 6.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Através da operação do sistema de secagem pneumática utilizado neste trabalho, foram medidos os perfis longitudinais de umidade e de temperatura do ar, para partículas de areia com diâmetros médios de 0,46 mm e 0,55 mm, e para esferas de vidro com diâmetro médio de 0,24 mm, num total de 32 corridas experimentais. A umidade inicial dos sólidos variou entre 2,5 g H<sub>2</sub>O/Kg sólido seco e 19,3 g H<sub>2</sub>O/Kg sólido seco, cobrindo uma faixa de vazões mássicas de 11,41 Kg sólido seco/h a 52,31 Kg sólido seco/h para as partículas, e de 74,88 Kg ar seco/h a 164,23 Kg ar seco/h para o ar de transporte e secagem, cuja temperatura de entrada variou de 93,1°C a 213,8°C. Os valores mínimos e máximos utilizados experimentalmente para as variáveis operacionais de cada material, estão indicados na tabela (6.1).

Visando um estudo experimental de sensibilidade paramétrica da umidade e da temperatura do ar, foram realizadas medidas dessas variáveis ao longo do tubo de secagem, para várias condições iniciais do conteúdo de umidade dos sólidos, temperatura e vazão mássica do ar, e da vazão mássica dos sólidos. Exemplos dos perfis de  $Y(z)$  e de  $t_g(z)$  obtidos através dessa análise, são mostrados nas figuras (6.1) a (6.12), nas quais é possível verificar a influência das variáveis em estudo ao longo do secador.

Tabela 6.1 - Faixa de Valores das Variáveis Operacionais para Cada Material

Especificação do Material	Esferas de vidro (AB) dp = 0,24 mm		Areia dp = 0,55 mm		Areia dp = 0,46 mm	
	Variáveis (Unidades)	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo
X (g/Kg s.s.)	2,5	6,9	5,9	19,3	4,9	16,4
$W_s$ (Kg/h)	18,11	52,31	15,70	46,80	11,41	39,35
$W_g$ (Kg/h)	74,88	161,42	110,09	163,30	118,08	164,23
$W_{sg}$ (adimensional)	0,144	0,559	0,134	0,401	0,097	0,315
$t_g$ (°C)	93,1	213,8	93,7	204,5	95,5	208,2



Os dados experimentais obtidos na secagem pneumática dos materiais estudados, estão indicados detalhadamente na ta bela (6.2) para todas as corridas efetuadas, sendo que os valo res da pressão da mistura ar-sólidos, medidos ao longo do tubo de secagem, são mostrados na tabela (6.3). Em todos os cálcu los foi adotado o valor da pressão total da suspensão como sen do constante e igual a 95 kPa, ao longo do comprimento do tubo de secagem sob análise. Este valor, que corresponde à pressão atmosférica local, foi considerado constante levando em conta a pequena variação existente entre o valor inicial e final des sa pressão ao longo do secador, atingindo no máximo 0,382 kPa, ou aproximadamente 3 mmHg, para todas as corridas experimen tais.

A umidade e demais propriedades psicrométricas do ar foram obtidas através do programa listado no apêndice A, desen volv ido para calcular os valores dessas propriedades ao longo do tubo de secagem, em função dos resultados da temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido do ar, fornecidos pelos psicrômetros à pressão total de 95 kPa. Os dados de saída para todas as corridas experimentais estão indicados no apêndice B.

## 6.2. RESULTADOS CALCULADOS

Com o conhecimento dos parâmetros iniciais da opera ção, associadas aos que são fornecidos através do programa de cálculo das propriedades psicrométricas do ar, foi possível a determinação dos perfis longitudinais da velocidade relativa ar-partícula, do conteúdo de umidade e da temperatura dos sóli dos, e da umidade e temperatura do ar, através da simulação do

Tabela 6.2 - Resultados Experimentais do Secador Pneumático

Unidades :  $W_s$  (Kg sólido seco/s),  $W_g$  (Kg ar seco/s),  $W_{sg}$  ( $=W_s/W_g$ , adimensional),  
 $t_g$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_s$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $Y$  (Kg  $\text{H}_2\text{O}$ /Kg ar seco),  $X$  (Kg  $\text{H}_2\text{O}$ /Kg sólido seco)

Esferas de vidro (AB) -  $dp = 0,24$  mm

Posição	Z(m)	Entrada	0,70	1,20	1,70	2,20	Saída
Medidas	n <sup>o</sup>	1	2	3	4	5	-
Corrida 1	$t_g$	142	120,7	112,7	109,4	101,7	
$W_s=0,01211$	$t_s$	23,9					72,1
$W_g=0,03385$	Y	0,0247	0,0257	0,0258	0,0260	0,0260	
$W_{sg}=0,358$	X	0,0025					$0,353 \times 10^{-3}$
Corrida 2	$t_g$	141,8	117,6	105,5	102,8	99,8	
$W_s=0,00652$	$t_s$	23,8					75,9
$W_g=0,03385$	Y	0,0370	0,0381	0,0384	0,0386	0,0391	
$W_{sg}=0,193$	X	0,0055					$0,289 \times 10^{-3}$
Corrida 3	$t_g$	141,2	115,0	100,4	96,8	94,8	
$W_s=0,00652$	$t_s$	23,0					92,9
$W_g=0,03385$	Y	0,0395	0,0405	0,0409	0,0412	0,0412	
$W_{sg}=0,193$	X	0,0069					$0,162 \times 10^{-3}$
Corrida 4	$t_g$	150,0	124,0	114,2	108,5	107,9	
$W_s=0,00738$	$t_s$	25,9					84,4
$W_g=0,03419$	Y	0,0279	0,0281	0,0284	0,0285	0,0286	
$W_{sg}=0,216$	X	0,0045					$0,366 \times 10^{-3}$
Corrida 5	$t_g$	149,2	122,8	113,8	107,2	103,6	
$W_s=0,00946$	$t_s$	24,7					96,1
$W_g=0,03419$	Y	0,0387	0,0398	0,0400	0,0410	0,0430	
$W_{sg}=0,277$	X	0,0046					$0,527 \times 10^{-3}$
Corrida 6	$t_g$	150,0	121,7	111,5	104,1	101,3	
$W_s=0,01453$	$t_s$	24,4					90,5
$W_g=0,03419$	Y	0,0501	0,0518	0,0522	0,0523	0,0523	
$W_{sg}=0,425$	X	0,0046					$0,137 \times 10^{-3}$
Corrida 7	$t_g$	93,1	83,0	78,1	71,6	69,1	
$W_s=0,00893$	$t_s$	23,9					60,9
$W_g=0,03647$	Y	0,0270	0,0276	0,0278	0,0280	0,0281	
$W_{sg}=0,245$	X	0,0038					$0,636 \times 10^{-3}$

Continuação da Tabela 6.2.

Corrida 8	$t_g$	140,3	113,6	109,2	99,1	98,5	
$W_s=0,01064$	$t_s$	24,7					85,9
$W_g=0,03586$	Y	0,0352	0,0368	0,0372	0,0382	0,0384	
$W_{sg}=0,297$	X	0,0038					$0,290 \times 10^{-3}$
Corrida 9	$t_g$	213,8	144,4	131,8	112,3	108,1	
$W_s=0,00818$	$t_s$	24,4					92,6
$W_g=0,03619$	Y	0,0364	0,0382	0,0384	0,0385	0,0390	
$W_{sg}=0,226$	X	0,0038					$0,127 \times 10^{-3}$
Corrida 10	$t_g$	162,4	135,3	125,0	116,7	112,9	
$W_s=0,00842$	$t_s$	26,1					78,9
$W_g=0,04484$	Y	0,0242	0,0252	0,054	0,0255	0,0256	
$W_{sg}=0,188$	X	0,0044					$0,638 \times 10^{-3}$
Corrida 11	$t_g$	160,9	125,0	116,9	106,6	104,1	
$W_s=0,00503$	$t_s$	24,2					88,9
$W_g=0,03487$	Y	0,0229	0,0235	0,0236	0,0238	0,0240	
$W_{sg}=0,144$	X	0,0035					$0,556 \times 10^{-3}$
Corrida 12	$t_g$	163,2	125,2	112,7	102,3	101,1	
$W_s=0,01162$	$t_s$	24,5					81,9
$W_g=0,02080$	Y	0,0484	0,0509	0,0510	0,0511	0,0512	
$W_{sg}=0,559$	X	0,0040					$0,409 \times 10^{-3}$

## Continuação da Tabela 6.2

Areia -  $d_p = 0,55$  mm

Posição	Z (m)	Entrada	0,70	1,20	1,70	2,20	Saída
Medidas	nº	1	2	3	4	5	-
Corrida 13	$t_g$	93,7	79,5	65,1	64,4	63,7	
$W_s = 0,00820$	$t_s$	26,8					57,5
$W_g = 0,03244$	Y	0,0474	0,0486	0,0487	0,0488	0,0490	
$W_{sg} = 0,253$	X	0,0065					$0,386 \times 10^{-3}$
Corrida 14	$t_g$	204,5	175,6	146,4	125,2	117,6	
$W_s = 0,00820$	$t_s$	23,4					92,4
$W_g = 0,03244$	Y	0,0488	0,0510	0,0511	0,0513	0,0513	
$W_{sg} = 0,253$	X	0,0065					0
Corrida 15	$t_g$	144,0	125,7	107,5	96,8	93,7	
$W_s = 0,00436$	$t_s$	23,9					60,5
$W_g = 0,03244$	Y	0,0289	0,0301	0,0306	0,0308	0,0310	
$W_{sg} = 0,134$	X	0,0073					$0,110 \times 10^{-3}$
Corrida 16	$t_g$	145,6	119,2	101,3	93,3	89,6	
$W_s = 0,01300$	$t_s$	25,7					78,1
$W_g = 0,03244$	Y	0,0520	0,0542	0,0544	0,0547	0,0550	
$W_{sg} = 0,401$	X	0,0073					0
Corrida 17	$t_g$	156,5	133,6	116,1	111,7	111,0	
$W_s = 0,00858$	$t_s$	25,4					69,1
$W_g = 0,03058$	Y	0,0537	0,0555	0,0557	0,0561	0,0563	
$W_{sg} = 0,281$	X	0,0078					$0,116 \times 10^{-3}$
Corrida 18	$t_g$	157,3	136,5	127,5	117,8	116,2	
$W_s = 0,00858$	$t_s$	24,7					83,7
$W_g = 0,04536$	Y	0,0470	0,0479	0,0481	0,0484	0,0486	
$W_{sg} = 0,189$	X	0,0078					$0,186 \times 10^{-3}$
Corrida 19	$t_g$	157,3	130,2	121,9	115,3	111,7	
$W_s = 0,00614$	$t_s$	24,9					72,3
$W_g = 0,03462$	Y	0,0399	0,0415	0,0417	0,0419	0,0420	
$W_{sg} = 0,177$	X	0,0074					$0,390 \times 10^{-3}$

Continuação da Tabela 6.2

Corrida 20	$t_g$	156,1	127,9	119,2	114,0	108,9	
$W_s=0,00614$	$t_s$	25,1					76,1
$W_g=0,03462$	Y	0,0674	0,0692	0,0698	0,0705	0,0710	
$W_{sg}=0,177$	X	0,0193					$0,280 \times 10^{-3}$
Corrida 31	$t_g$	150,1	123,4	115,7	108,7	106,4	
$W_s=0,00644$	$t_s$	24,9					77,5
$W_g=0,03913$	Y	0,0299	0,0310	0,0313	0,0315	0,0316	
$W_{sg}=0,165$	X	0,0059					$0,264 \times 10^{-3}$

Continuação da Tabela 6.2

Areia -  $d_p = 0,46 \text{ mm}$ 

Posição	Z(m)	Entrada	0,70	1,20	1,70	2,20	Saída
Medidas	nº	1	2	3	4	5	-
Corrida 21	$t_g$	95,5	76,3	69,6	60,5	56,6	
$W_s = 0,01032$	$t_s$	24,3					50,3
$W_g = 0,03280$	Y	0,0482	0,0492	0,0496	0,0498	0,0501	
$W_{sg} = 0,315$	X	0,0055					0
Corrida 22	$t_g$	146,7	112,1	100,6	85,4	84,3	
$W_s = 0,00635$	$t_s$	25,9					67,1
$W_g = 0,03280$	Y	0,0330	0,0338	0,0339	0,0341	0,0343	
$W_{sg} = 0,194$	X	0,0055					$0,163 \times 10^{-3}$
Corrida 23	$t_g$	208,2	155,1	141,4	119,2	115,0	
$W_s = 0,00635$	$t_s$	25,7					82,3
$W_g = 0,03280$	Y	0,0341	0,0357	0,0358	0,0360	0,0363	
$W_{sg} = 0,194$	X	0,0055					0
Corrida 24	$t_g$	149,1	124,6	119,2	113,8	113,4	
$W_s = 0,00638$	$t_s$	25,9					75,4
$W_g = 0,04046$	Y	0,0544	0,0557	0,0559	0,0561	0,0562	
$W_{sg} = 0,158$	X	0,0087					$0,161 \times 10^{-3}$
Corrida 25	$t_g$	148,7	113,7	111,3	98,5	94,2	
$W_s = 0,00855$	$t_s$	24,8					84,3
$W_g = 0,04046$	Y	0,0559	0,0569	0,0575	0,0578	0,0580	
$W_{sg} = 0,211$	X	0,0087					0
Corrida 26	$t_g$	148,9	116,5	110,2	97,6	92,4	
$W_s = 0,01093$	$t_s$	24,9					81,2
$W_g = 0,04046$	Y	0,0586	0,0596	0,0599	0,0604	0,0611	
$W_{sg} = 0,270$	X	0,0087					0
Corrida 27	$t_g$	150,2	114,8	103,0	98,7	94,2	
$W_s = 0,00527$	$t_s$	25,1					60,7
$W_g = 0,03504$	Y	0,0375	0,0388	0,0389	0,0411	0,0417	
$W_{sg} = 0,150$	X	0,0078					$0,124 \times 10^{-3}$

Continuação da Tabela 6.2

Corrida 28	$t_g$	150,0	124,6	121,5	108,7	107,5	
$W_s=0,00527$	$t_s$	24,5					80,8
$W_g=0,04562$	Y	0,0348	0,0355	0,0358	0,0360	0,0363	
$W_{sg}=0,116$	X	0,0078					0
Corrida 29	$t_g$	149,2	119,0	105,3	96,5	93,6	
$W_s=0,00317$	$t_s$	25,9					68,2
$W_g=0,03280$	Y	0,0458	0,0472	0,0479	0,0481	0,0483	
$W_{sg}=0,097$	X	0,0164					0
Corrida 30	$t_g$	148,0	120,7	116,5	106,4	104,3	
$W_s=0,00530$	$t_s$	25,7					74,1
$W_g=0,03280$	Y	0,0234	0,0244	0,0246	0,0247	0,0249	
$W_{sg}=0,162$	X	0,0049					$0,143 \times 10^{-3}$
Corrida 32	$t_g$	150,0	124,0	122,8	113,8	112,3	
$W_s=0,00755$	$t_s$	25,0					82,4
$W_g=0,03943$	Y	0,0366	0,0378	0,0382	0,0383	0,0387	
$W_{sg}=0,191$	X	0,0058					$0,135 \times 10^{-3}$

Tabela 6.3 - Distribuição de Pressões no Tubo de Secagem

Pressões (KPa)

Posição	Z(m)	0,92	1,42	1,92	2,42	2,92	3,42
Medidas	nº	1	2	3	4	5	6
Corridas	1	95,588	95,549	95,471	95,432	95,344	95,305
	2	95,588	95,549	95,471	95,432	95,344	95,305
	3	95,588	95,549	95,480	95,441	95,363	95,314
	4	95,588	95,549	95,471	95,432	95,354	95,305
	5	95,588	95,549	95,480	95,441	95,353	95,304
	6	95,588	95,549	95,471	95,432	95,344	95,305
	7	95,367	95,318	95,220	95,181	95,013	95,054
	8	95,367	95,338	95,269	95,230	95,142	95,093
	9	95,367	95,328	95,240	95,201	95,103	95,044
	10	95,980	95,931	95,804	95,745	95,608	95,598
	11	95,588	95,549	95,480	95,441	95,353	95,343
	12	95,245	95,206	95,157	95,128	95,089	95,079
	13	95,490	95,451	95,392	95,363	95,285	95,246
	14	95,490	95,461	95,412	95,383	95,314	95,255
	15	95,392	95,363	95,304	95,275	95,206	95,157
	16	95,490	95,461	95,412	95,392	95,323	95,284
	17	95,490	95,470	95,431	95,411	95,342	95,303
	18	95,882	95,843	95,823	95,784	95,755	95,667
	19	95,490	95,461	95,392	95,363	95,285	95,226
	20	95,490	95,461	95,412	95,383	95,324	95,275
	21	95,490	95,470	95,411	95,382	95,313	95,274
	22	95,490	95,470	95,392	95,372	95,294	95,255
	23	95,490	95,470	95,401	95,372	95,294	95,245
	24	95,637	95,608	95,539	95,510	95,422	95,363
	25	95,735	95,696	95,598	95,559	95,432	95,383
	26	95,735	95,686	95,598	95,559	95,451	95,412
	27	95,441	95,421	95,362	95,333	95,264	95,225
	28	95,833	95,804	95,706	95,667	95,530	95,461
	29	95,392	95,372	95,323	95,303	95,234	95,195
	30	95,441	95,421	95,372	95,352	95,283	95,234
	31	95,637	95,608	95,520	95,491	95,393	95,364
	32	95,637	95,608	95,520	95,491	95,383	95,334



secador, baseando-se nas equações fundamentais de conservação da quantidade de movimento, energia e massa. O programa desenvolvido para solucionar as equações propostas na modelagem matemática do secador, está listado no apêndice C, para todas as corridas efetuadas neste trabalho.

Um gráfico típico do perfil da velocidade relativa ar-partícula é mostrado na figura (6.13), e alguns exemplos do comportamento do conteúdo de umidade dos sólidos ao longo do tubo de secagem, são indicados na figura (6.14), onde se vê também os valores desse parâmetro, obtidos experimentalmente na entrada e saída do secador.

Com o intuito de se interpretar os resultados obtidos experimentalmente, foram realizadas comparações entre estes e os resultados da modelagem matemática, através de gráficos dos perfis longitudinais da umidade e temperatura do ar e do conteúdo de umidade dos sólidos, para o qual foram medidos os valores nas extremidades do secador, sendo os intermediários obtidos por balanço de massa, através das medidas da umidade do ar ao longo do tubo de secagem. Um gráfico típico é indicado na figura (6.15). Exemplos de comparações entre os resultados calculados e experimentais para as umidades do ar e para as temperaturas do ar e dos sólidos, estão indicados nas figuras (6.16) a (6.25).

### 6.3. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

Com o objetivo de analisar de uma forma abrangente os resultados experimentais e calculados da umidade do ar, foi rea

lizado um estudo estatístico dessa variável para os  $n$  pontos obtidos, expresso através do cálculo do valor médio,  $\bar{y}$ , indicado na equação (6.1), do desvio médio relativo, DMR(%), indicado na equação (6.3) e também do desvio padrão de distribuição,  $s$ , conforme a equação (6.4).

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (6.1)$$

onde,

$$y_i = \frac{Y_{\text{experimental}}}{Y_{\text{calculada}}} \quad (6.2)$$

$$\text{DMR}(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Abs} \left[ \frac{Y_{i(\text{exp})} - Y_{i(\text{calc.})}}{Y_{i(\text{exp.})}} \right] \cdot 100 \quad (6.3)$$

$$s = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (6.4)$$

Os resultados dessa análise estão indicados na tabela (6.4), demonstrando haver boa concordância entre os valores experimentais e calculados, conforme os baixos desvios observados entre eles.

Nas figuras (6.1) e (6.2) é mostrada a influência da umidade inicial dos sólidos nas variações de umidade e de temperatura do ar ao longo de 2,2 m do tubo de secagem. Verifica-se que à medida em que aumenta o teor de umidade dos sólidos na entrada do sistema, ocorre também um aumento na umidade do ar para a mesma seção transversal do secador, e uma consequente

lizado um estudo estatístico dessa variável para os n pontos obtidos, expresso através do cálculo do valor médio,  $\bar{y}$ , indicado na equação (6.1), do desvio médio relativo, DMR(%), indicado na equação (6.3) e também do desvio padrão de distribuição, s, conforme a equação (6.4).

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (6.1)$$

onde,

$$y_i = \frac{Y_{\text{experimental}}}{Y_{\text{calculada}}} \quad (6.2)$$

$$\text{DMR}(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Abs} \left[ \frac{Y_{i(\text{exp})} - Y_{i(\text{calc.})}}{Y_{i(\text{exp.})}} \right] \cdot 100 \quad (6.3)$$

$$s = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (6.4)$$

Os resultados dessa análise estão indicados na tabela (6.4), demonstrando haver boa concordância entre os valores experimentais e calculados, conforme os baixos desvios observados entre eles.

Nas figuras (6.1) e (6.2) é mostrada a influência da umidade inicial dos sólidos nas variações de umidade e de temperatura do ar ao longo de 2,2 m do tubo de secagem. Verifica-se que à medida em que aumenta o teor de umidade dos sólidos na entrada do sistema, ocorre também um aumento na umidade do ar para a mesma seção transversal do secador, e uma conseqüente

Tabela 6.4 - Análise Estatística Entre Umidade do Ar Experimental e Calculada

Material	Número de Pontos Analisados	Valor Médio	Desvio Padrão	Desvio Médio Relativo(%)
Esferas de vidro(AB) dp = 0,24 mm	60	1,011	0,010	1,57
Areia dp = 0,55 mm	45	1,023	0,004	2,23
Areia dp = 0,46 mm	55	1,020	0,006	1,74

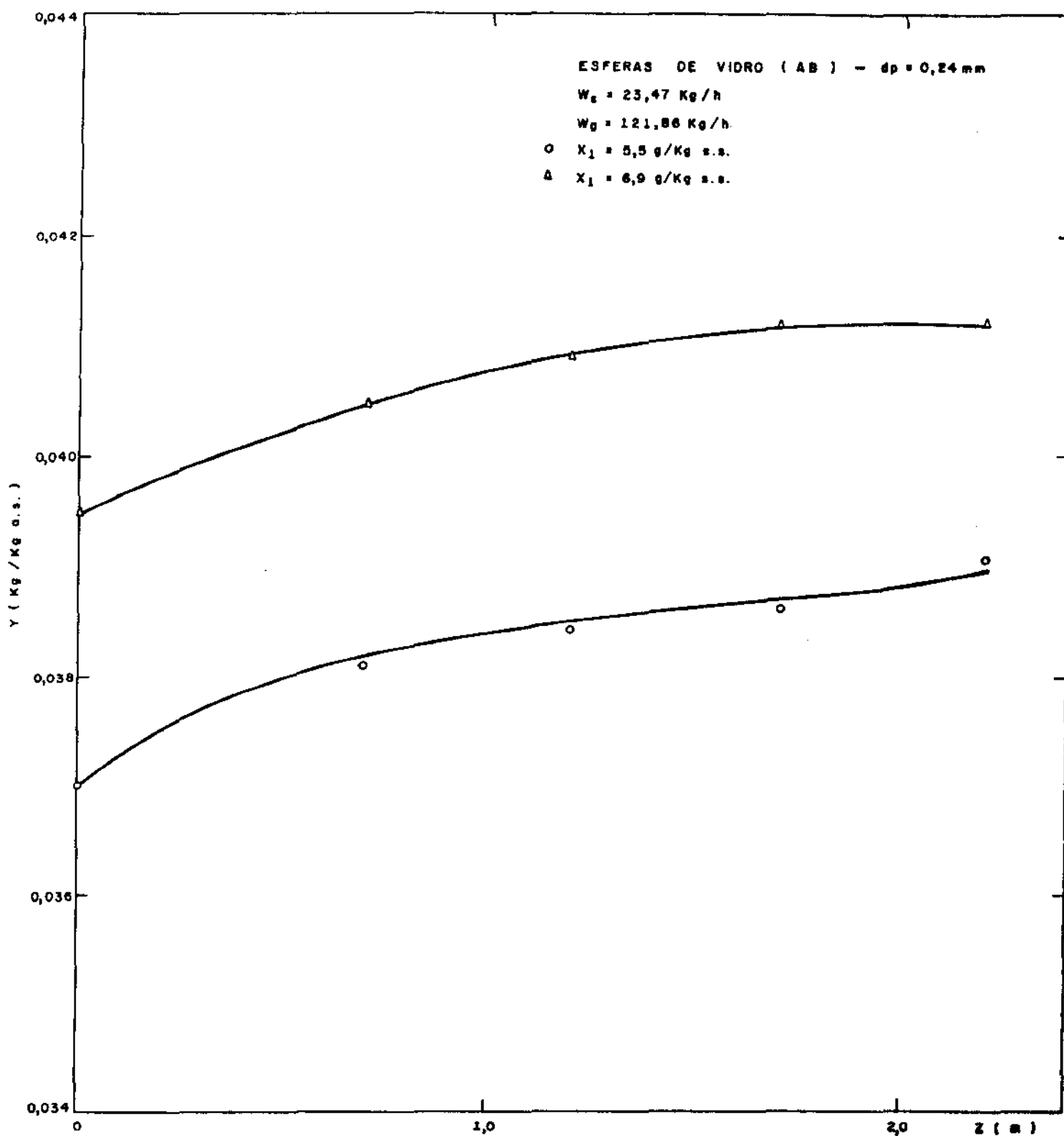


FIGURA 6.1 - PERFIL DE UMIDADE DO AR ( INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE ENTRADA DOS SÓLIDOS )

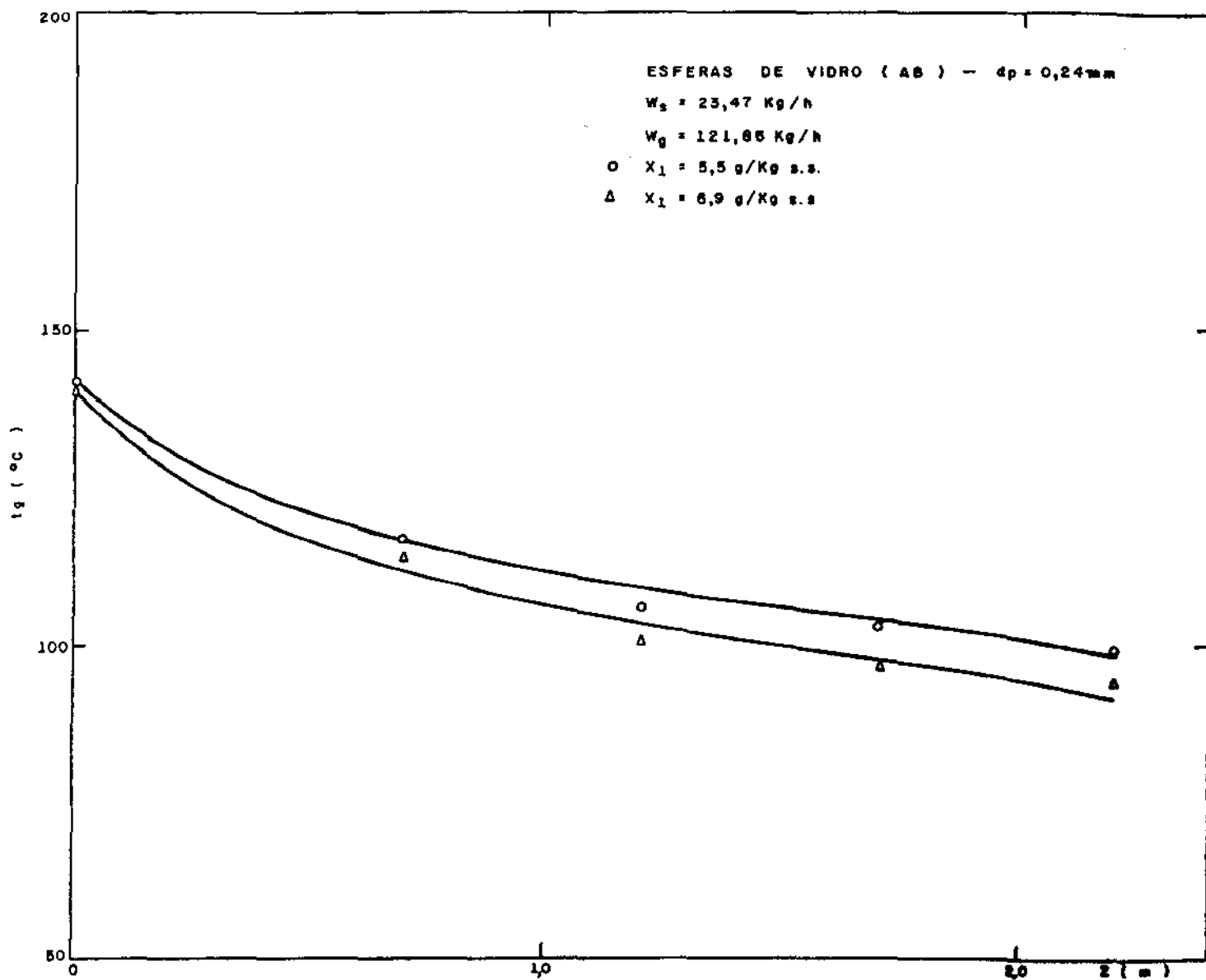


FIGURA 6.2 — PERFIL DE TEMPERATURA DO AR ( INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE ENTRADA DOS SÓLIDOS )

diminuição na temperatura do ar, decorrente da maior transferência de água dos sólidos para a fase gasosa. Este é o resultado esperado, já que as vazões mássicas do sólido e do ar permanecem constantes, havendo portanto, maior quantidade de água na fase sólida.

A influência da temperatura de entrada do ar nos perfis longitudinais de  $Y(z)$  e  $t_g(z)$  é mostrada nas figuras (6.3) a (6.6). Verifica-se que há um aumento acentuado da umidade do ar à medida que se aumenta a temperatura de entrada do ar, principalmente no trecho inicial do secador, o que significa uma diminuição do conteúdo de umidade dos sólidos, ou seja, um aumento na taxa de secagem, tendendo a um valor estável após uma certa altura do tubo de secagem. Este fato ocorre com menos intensidade para temperaturas iniciais do ar menores que  $100^{\circ}\text{C}$ , como se observa na figura (6.3) para a corrida com temperatura inicial de  $93,7^{\circ}\text{C}$ , embora não haja também muita variação na corrida com  $146,7^{\circ}\text{C}$  da figura (6.5), o que se explica pela menor quantidade de sólidos a secar e com menor teor de umidade inicial, como mostram os valores indicados nesse gráfico. Este comportamento está de acordo com a grande influência da força motriz diferença de temperatura entre o ar e o material, sobretudo durante o processo inicial da secagem pneumática.

Uma análise similar pode ser feita através das figuras (6.7) a (6.10), que mostram a influência da vazão mássica do ar nos perfis longitudinais de umidade e de temperatura do ar. Observa-se que quando ocorre o aumento da vazão de ar, há

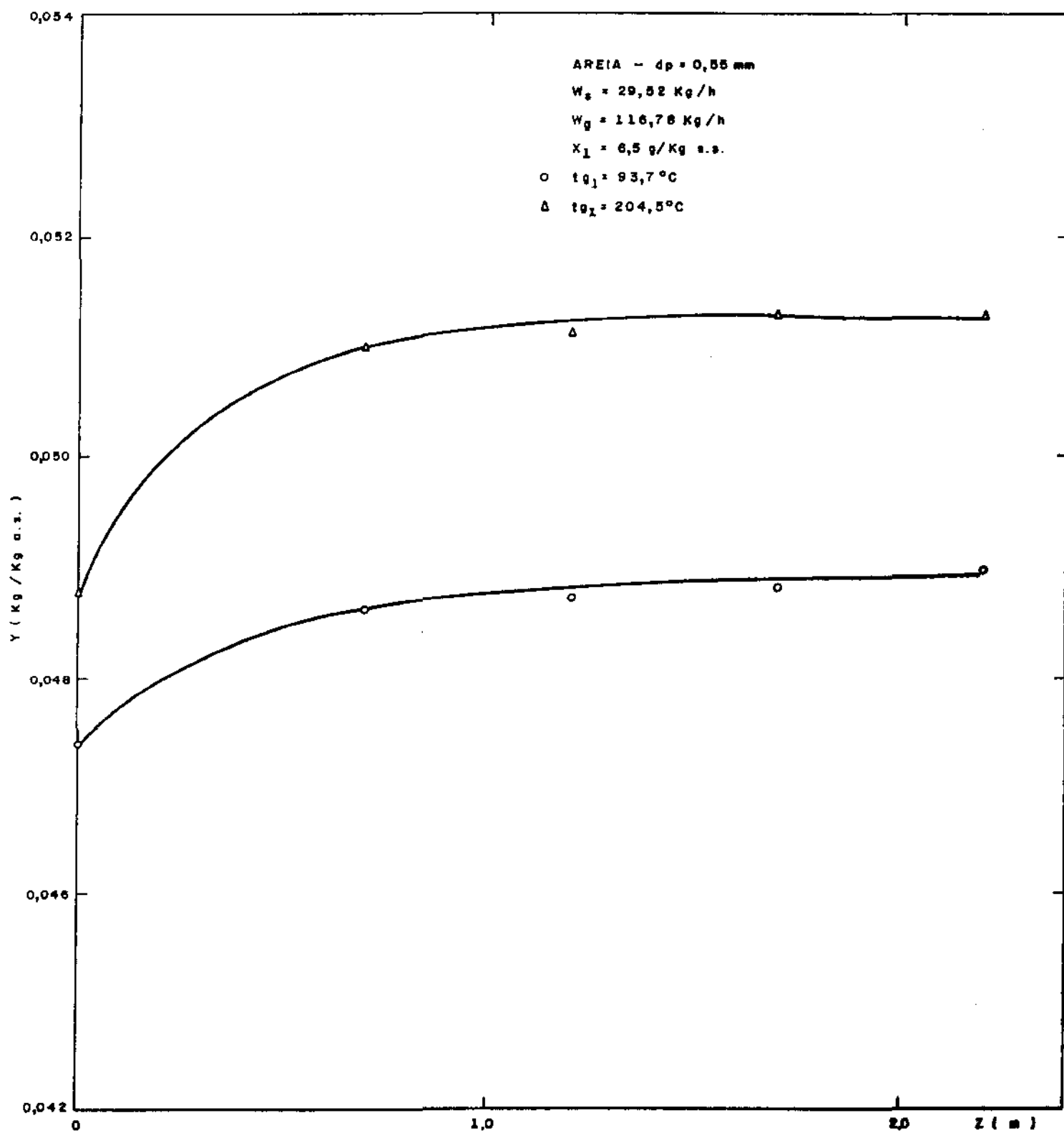


FIGURA 6.3 - PERFIL DE UMIDADE DO AR ( INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ENTRADA DO AR )



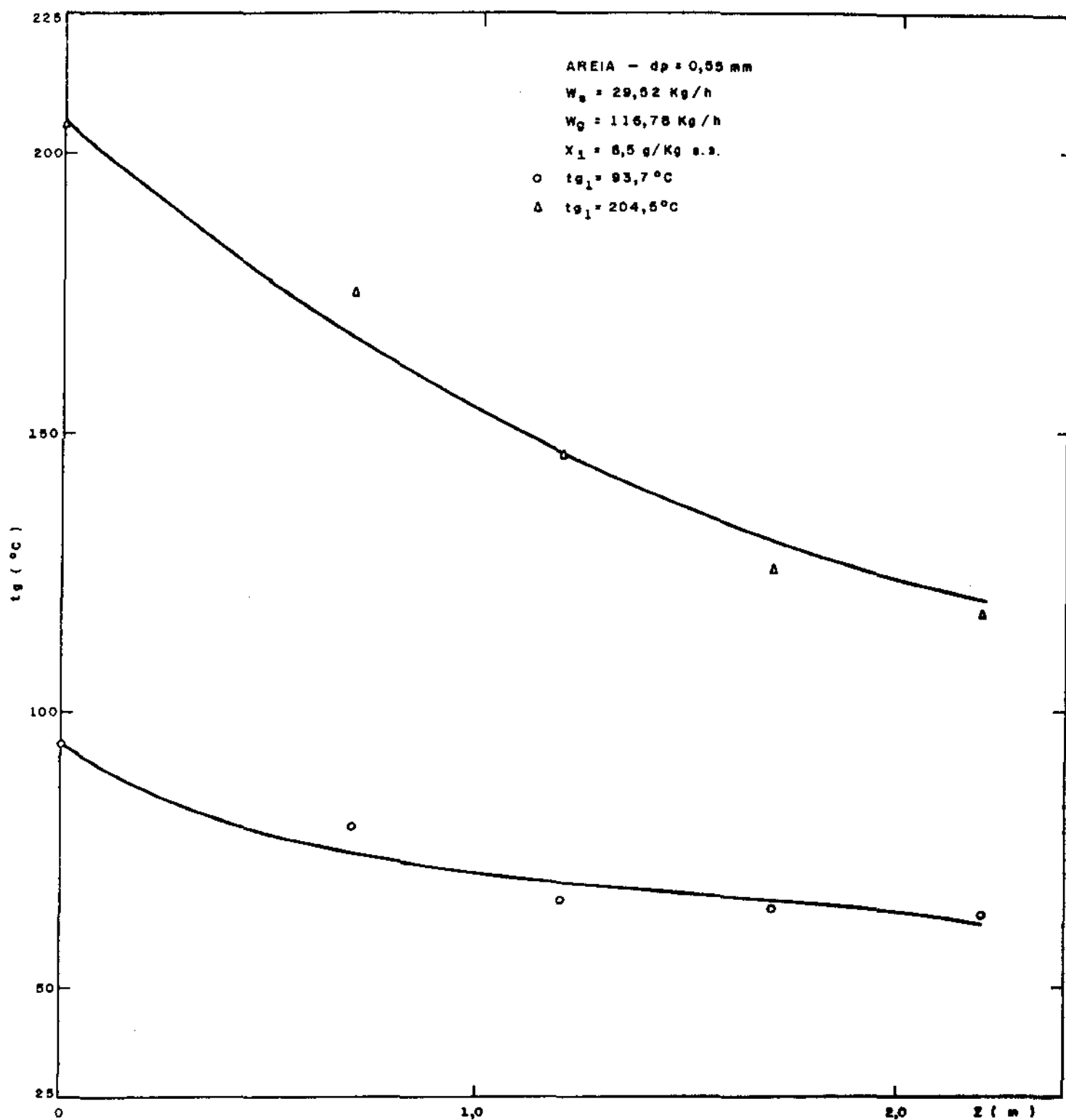


FIGURA 6.4 - PERFIL DE TEMPERATURA DO AR ( INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ENTRADA DO AR )

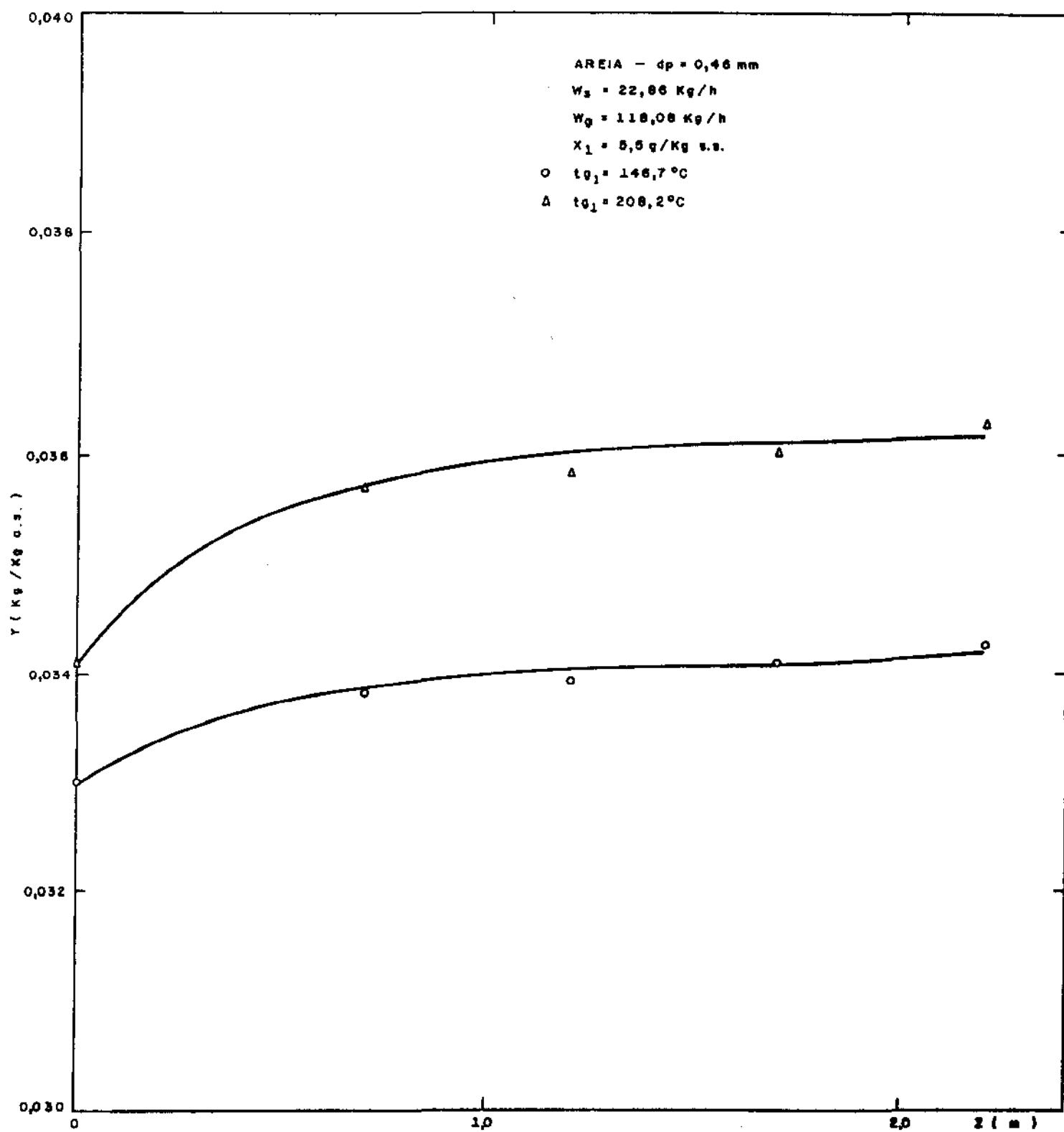


FIGURA 6.5 — PERFIL DE UMIDADE DO AR (INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ENTRADA DO AR)

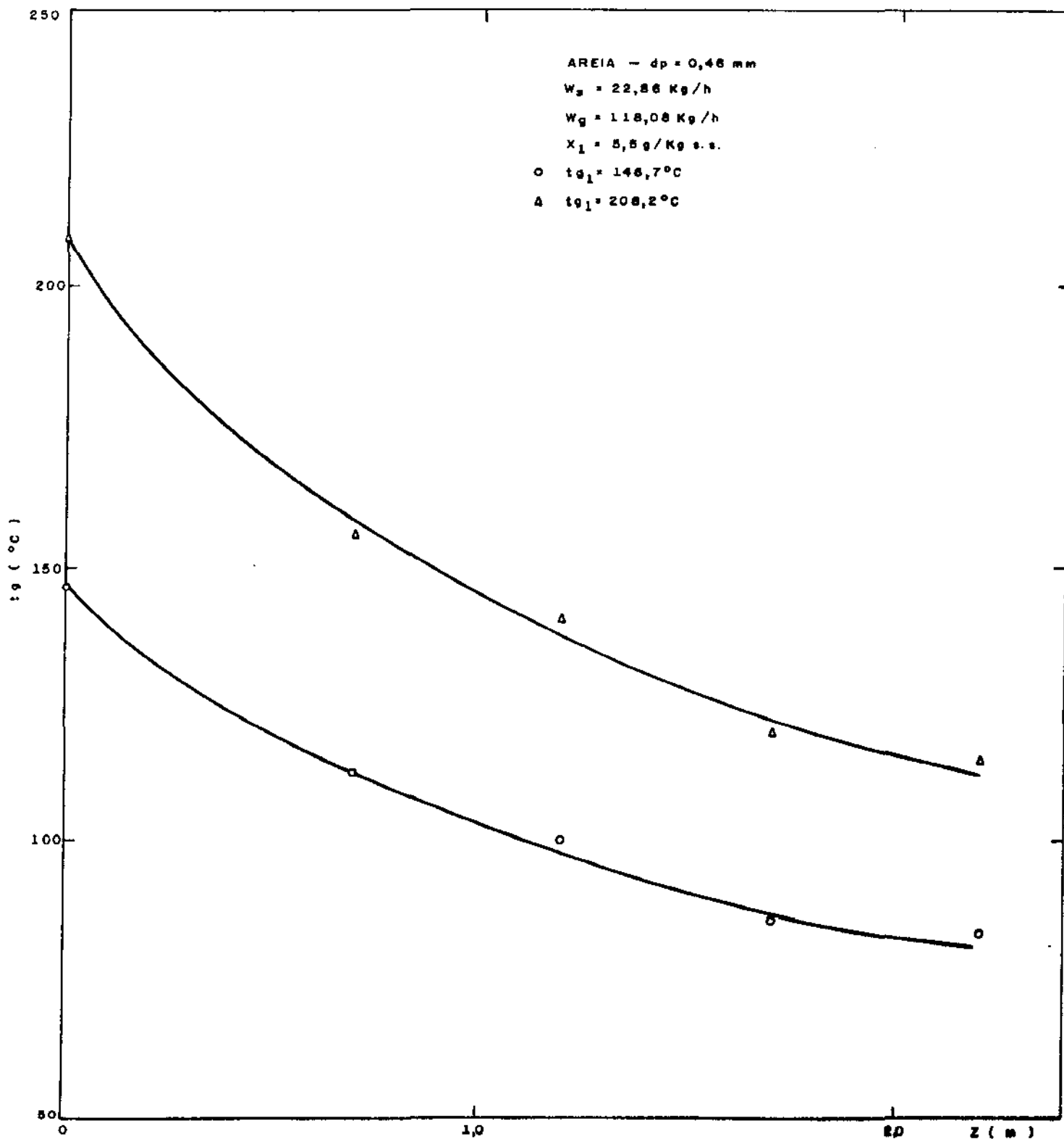


FIGURA 6.6 - PERFIL DE TEMPERATURA DO AR ( INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ENTRADA DO AR )

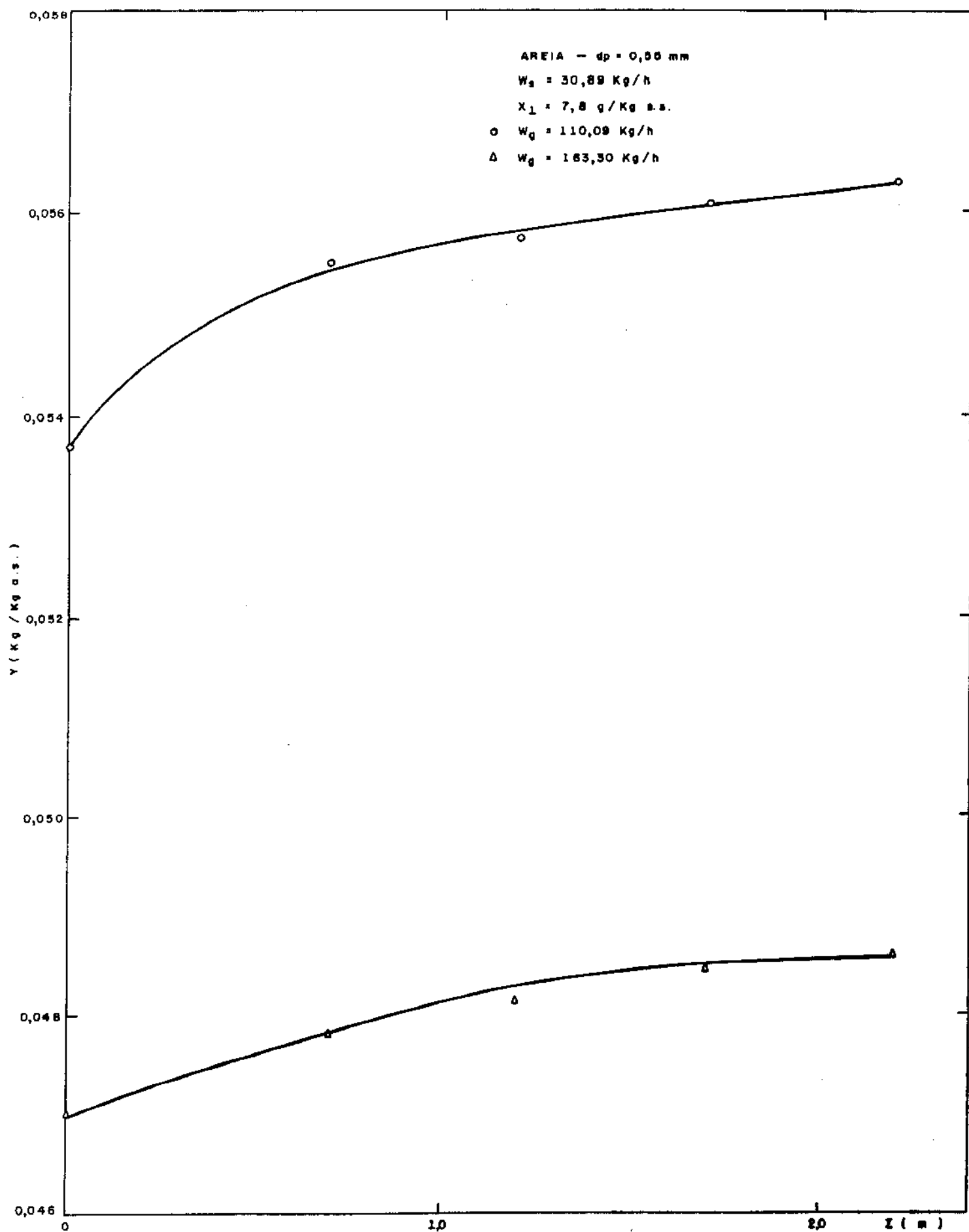


FIGURA 6.7 — PERFIL DE UMIDADE DO AR ( INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO AR )

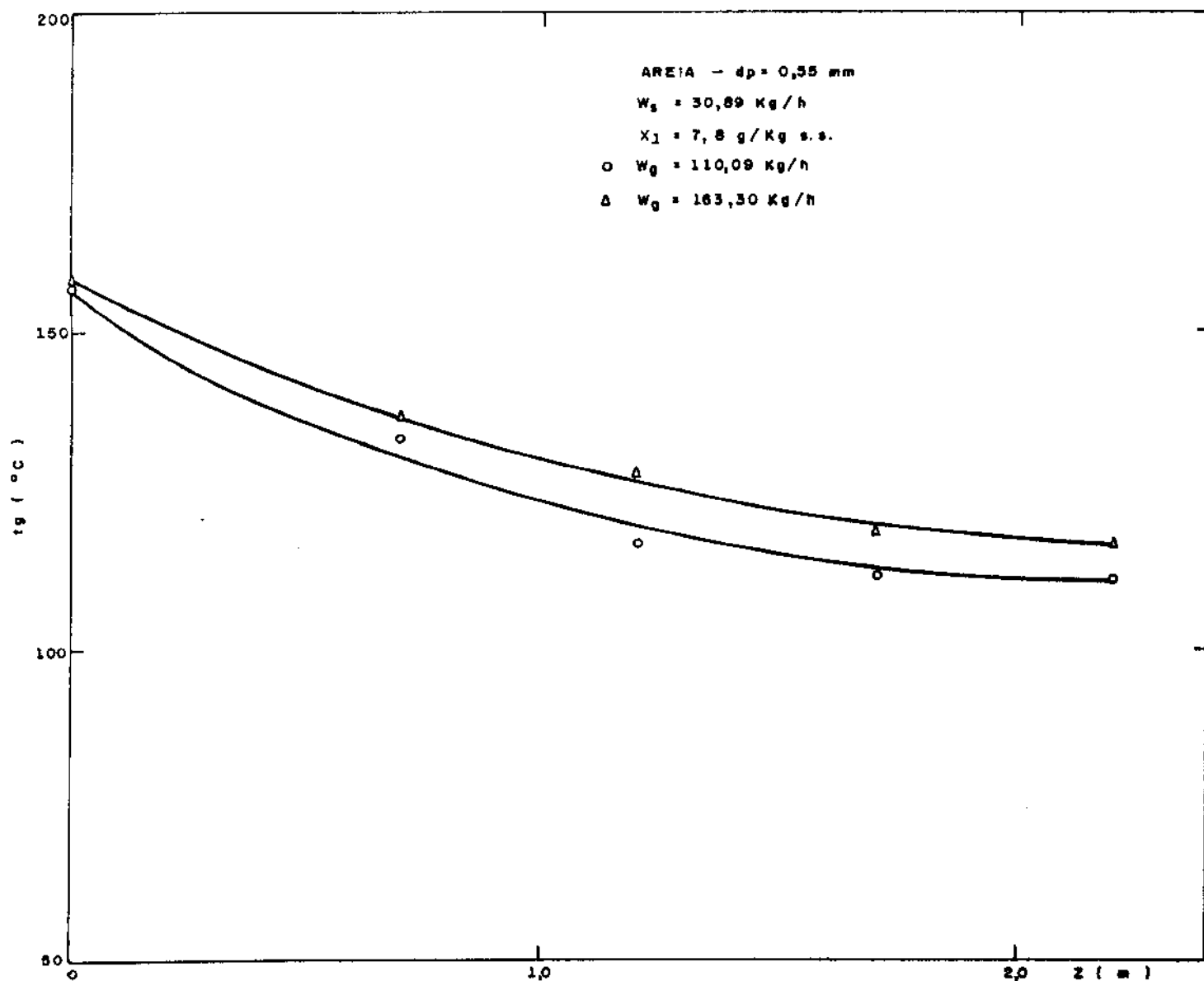


FIGURA 6.8 - PERFIL DE TEMPERATURA DO AR ( INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO AR )

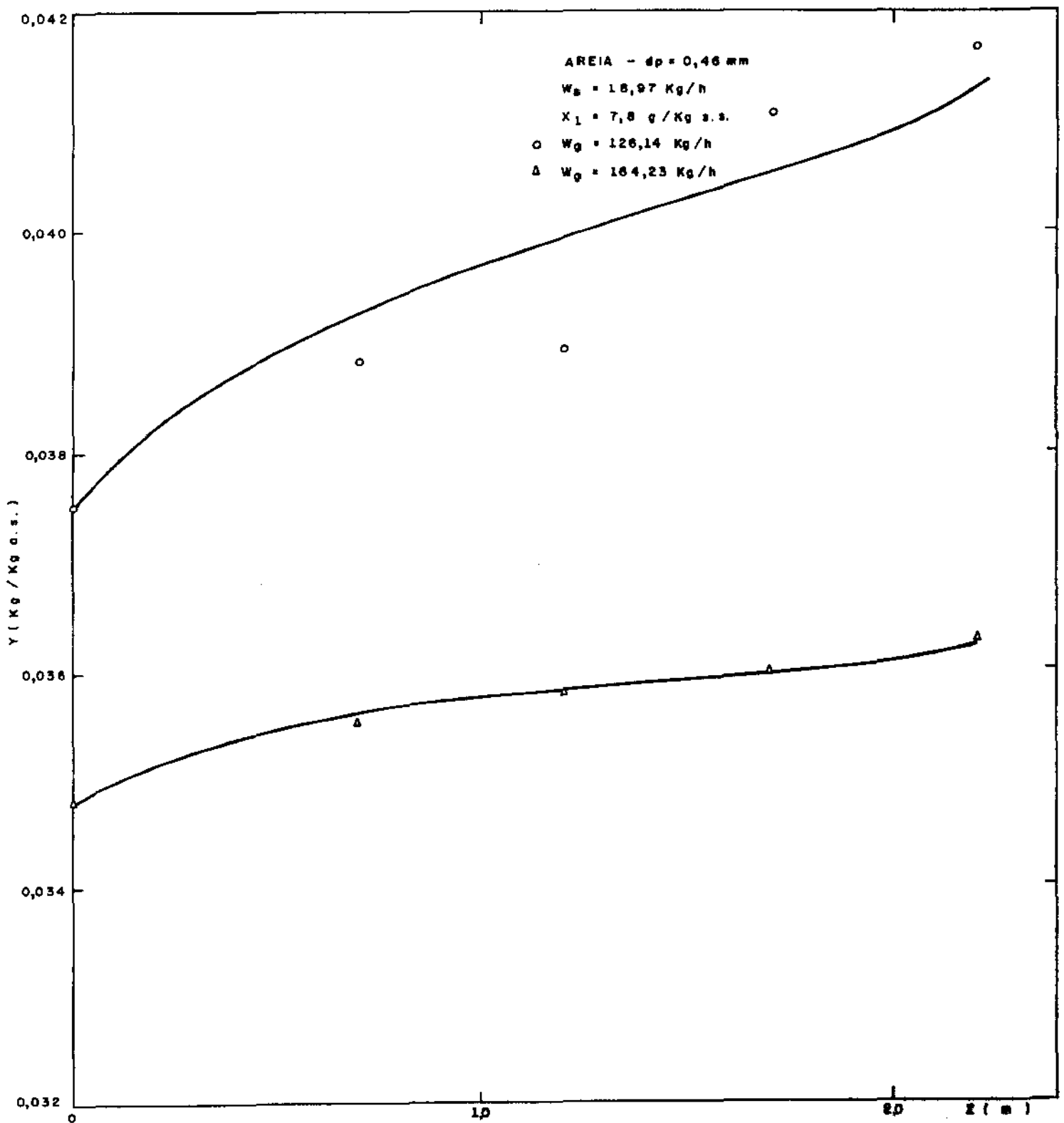


FIGURA 6.9 - PERFIL DE UMIDADE DO AR ( INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO AR )

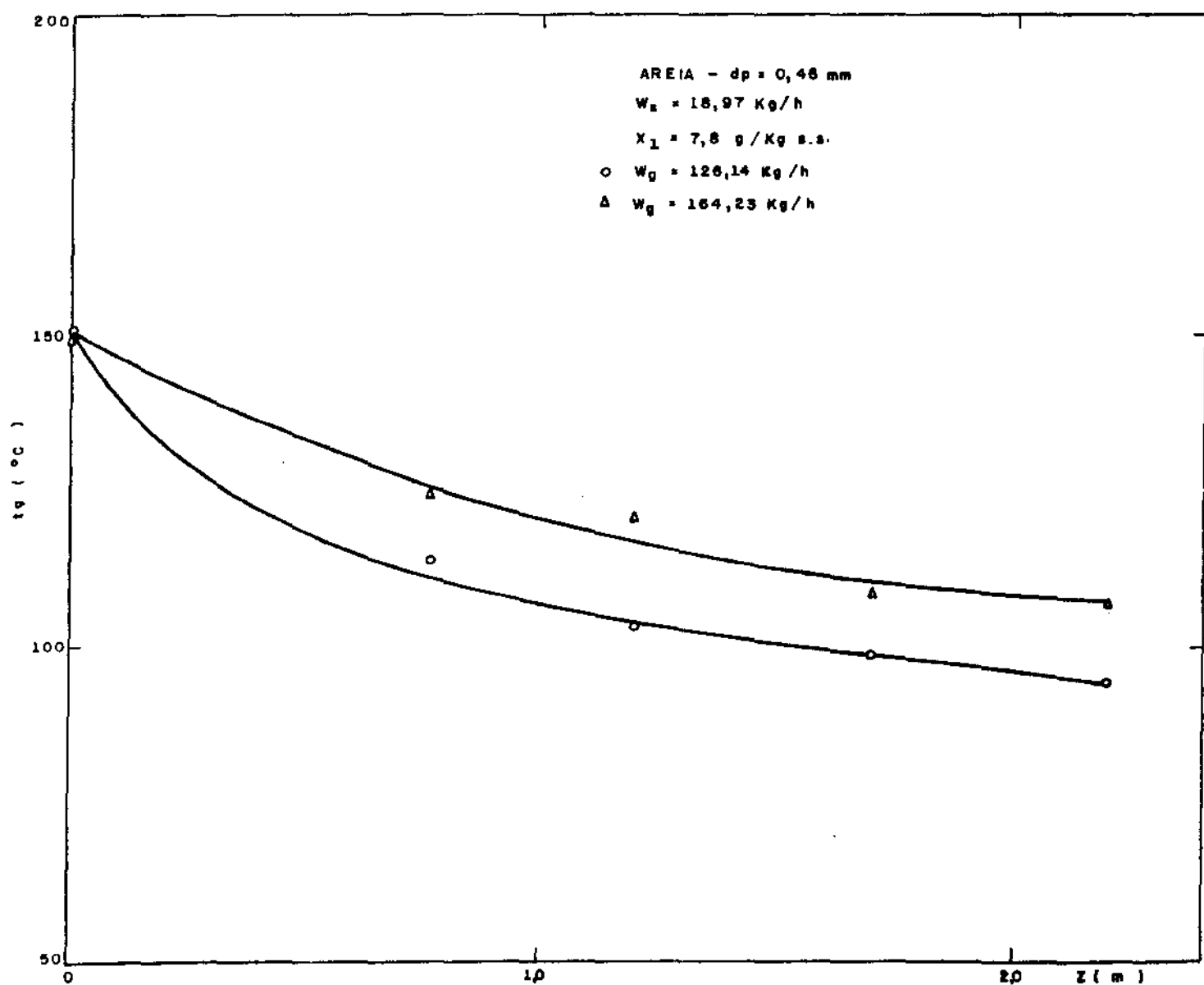


FIGURA 6.10 - PERFIL DE TEMPERATURA DO AR ( INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO AR )

uma diminuição na umidade e na temperatura do ar ao longo do tubo de secagem. Isto se deve principalmente à maior aceleração dos sólidos quando em contato com o ar, ocasionando menores coeficientes de transferência de calor e massa entre ar e partículas, e à conseqüente diminuição do tempo de residência das partículas no secador, já que os demais parâmetros permaneceram inalterados. Este fato demonstra que além da importância que a vazão de ar desempenha para a estabilidade do transporte pneumático, pode ser também empregada no controle da secagem de materiais com uma certa umidade e temperatura final do ar estipulada, devido a influência que sua variação exerce nos valores desses parâmetros, como pode ser observado através dos gráficos apresentados.

Nas figuras (6.11) e (6.12) é mostrada a influência da vazão mássica de sólidos nos perfis  $Y(z)$  e  $t_g(z)$ , verificando-se que à medida que se aumenta a vazão mássica de sólidos, há um aumento na umidade do ar e uma conseqüente diminuição na temperatura do ar, para a mesma seção transversal do tubo de secagem. Também nesse caso, os resultados experimentais axibem um comportamento consistente no que diz respeito às variações dos parâmetros de secagem, pois mantidas constantes as outras variáveis, uma massa maior de sólidos alimentados, ocasiona uma quantidade maior de água eliminada do material durante o processo.

O perfil calculado da velocidade relativa entre o ar e as partículas indicado na figura (6.13), representa um gráfico típico do comportamento desse parâmetro ao longo do secador, o qual evidencia a rápida aceleração dos sólidos ao contacta-



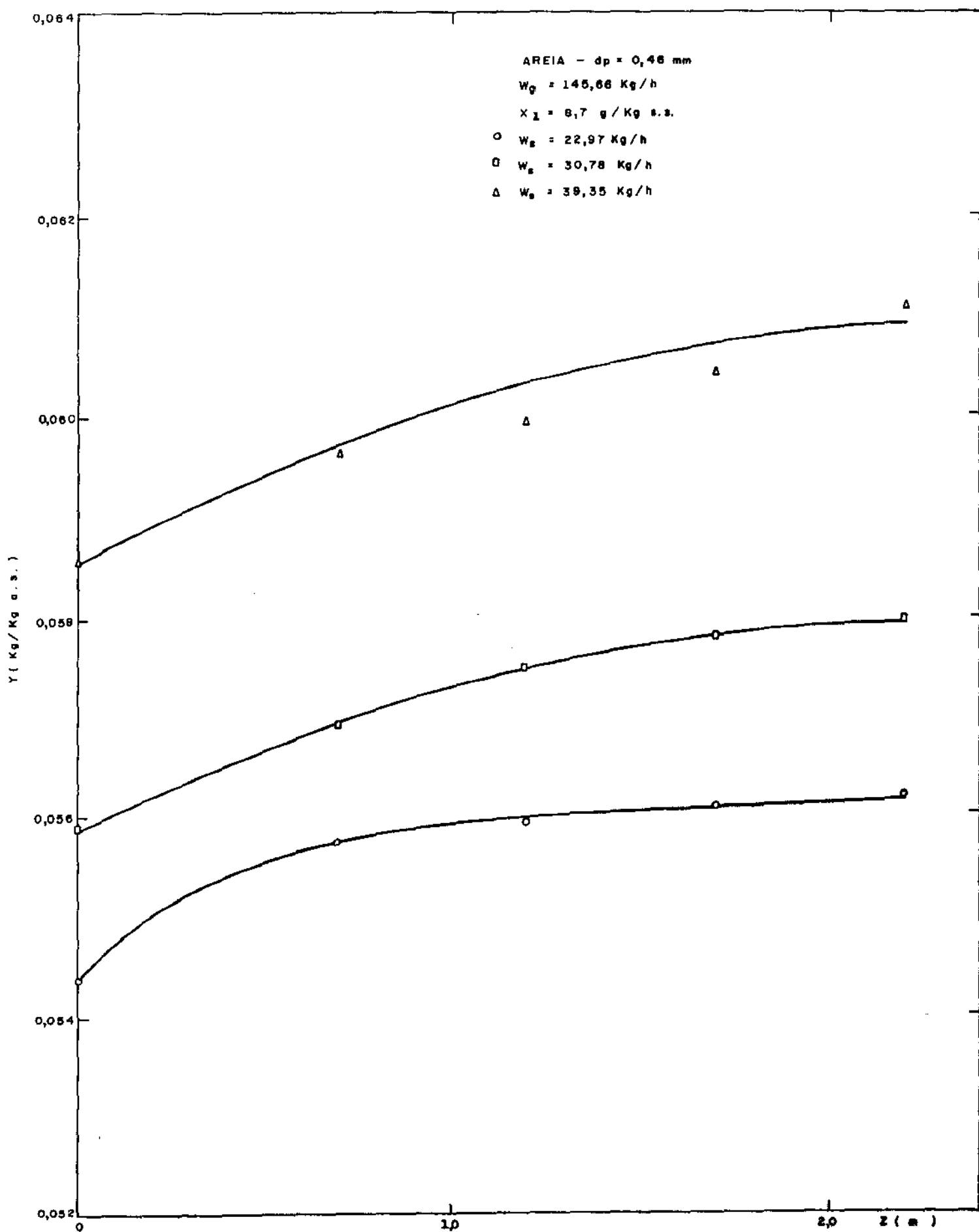


FIGURA 6.11 - PERFIL DE UMIDADE DO AR ( INFLUÊNCIA DA VAZÃO DOS SÓLIDOS )

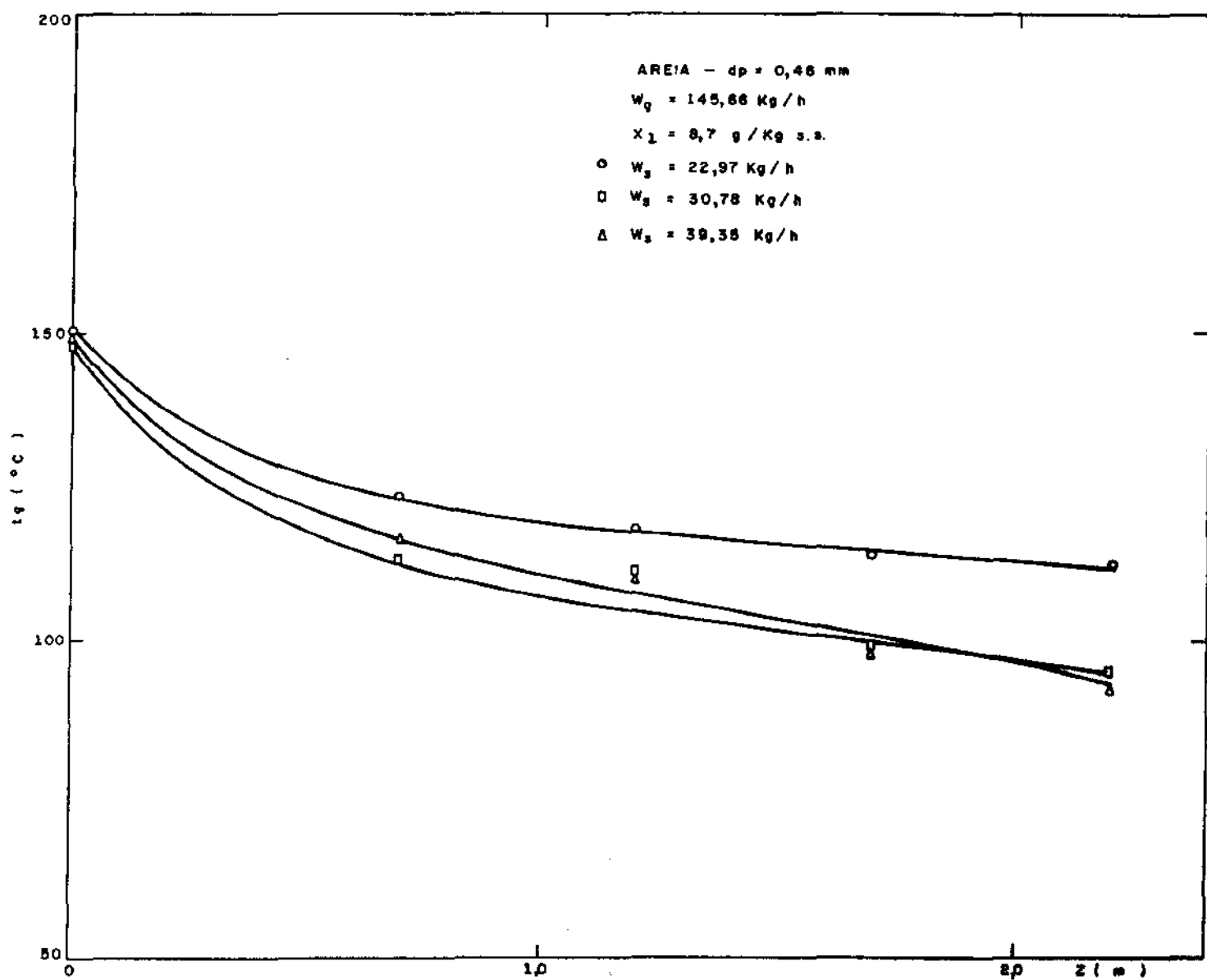


FIGURA 6.12 - PERFIL DE TEMPERATURA DO AR ( INFLUÊNCIA DA VAZÃO DOS SÓLIDOS )

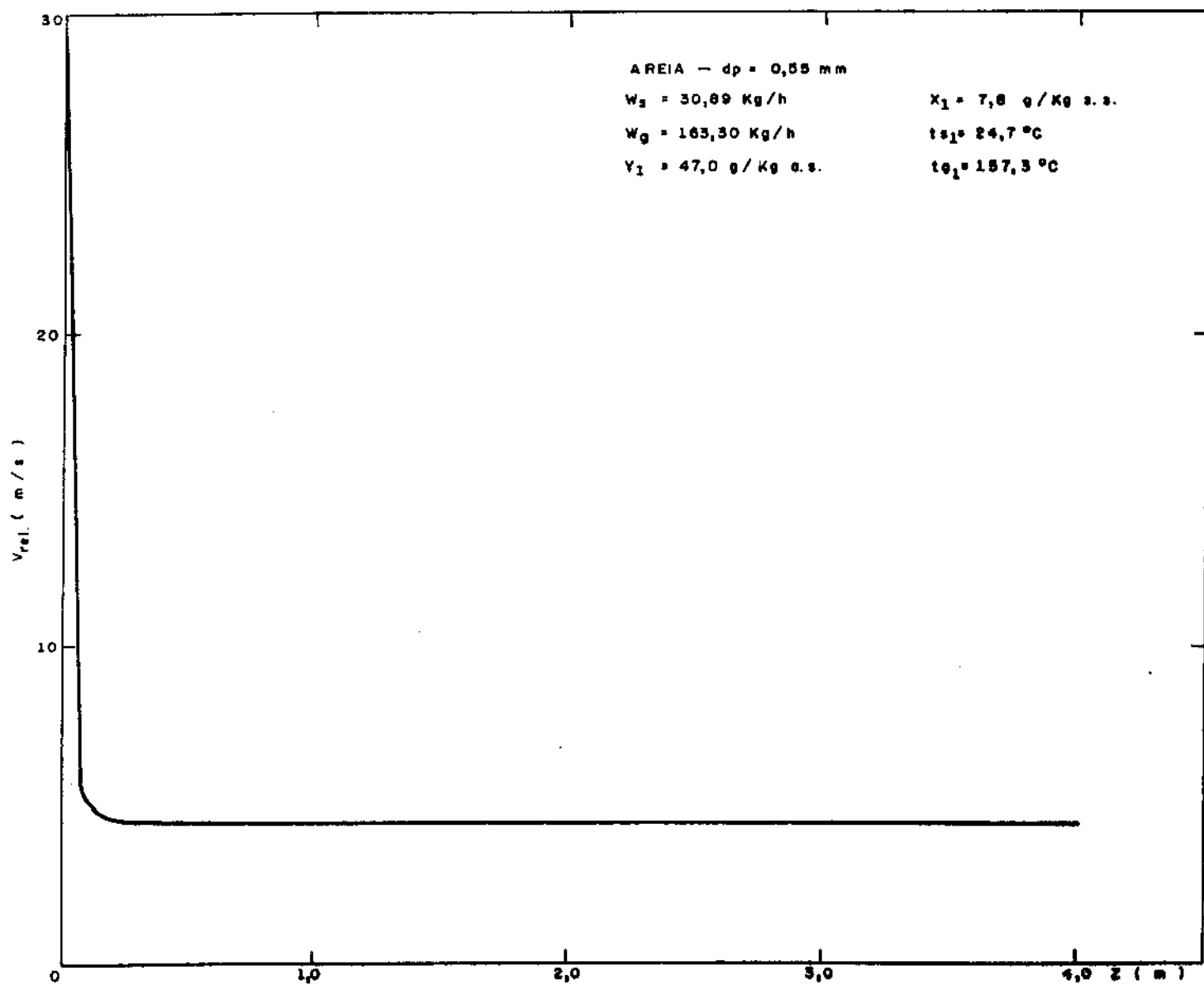


FIGURA 6.13 - PERFIL DE VELOCIDADE RELATIVA AR - PARTÍCULA

rem com o ar à uma velocidade muito mais alta. É atingido logo acima da seção de entrada, um valor de velocidade relativa bem menor que o inicial, permanecendo estável ao longo do tubo de secagem. Os perfis de  $V_{rel}(z)$  para todas as corridas efetuadas, estão nos dados de saída do programa da simulação matemática, indicados no apêndice D.

As comparações entre os parâmetros calculados e experimentais que constam nas figuras (6.14) a (6.25), demonstram a boa concordância entre os valores das variáveis operacionais obtidas pelos dois procedimentos, observando-se também um comportamento adequado com relação às diferentes condições experimentais do processo. Deve-se destacar a influência que houve na umidade inicial do ar, devido as mudanças nas condições de entrada da umidade e vazão dos sólidos e da temperatura e vazão do ar, não se tendo portanto o controle desse parâmetro durante a realização das determinações experimentais no secador.

A determinação experimental da temperatura de saída dos sólidos, não corresponde ao valor dentro do tubo de secagem, pois não foi medida na seção final de teste, e sim utilizando as partículas retidas abaixo do separador gravitacional, ou seja, material que já havia sido separado do ar, ficando sujeito a um período maior de exposição aos gases quentes de saída.

De acordo com os resultados experimentais e calculados exibidos nos apêndices B e D, as temperaturas dos sólidos ao longo do tubo de secagem, são praticamente da mesma ordem de grandeza que as correspondentes temperaturas de bulbo úmido do

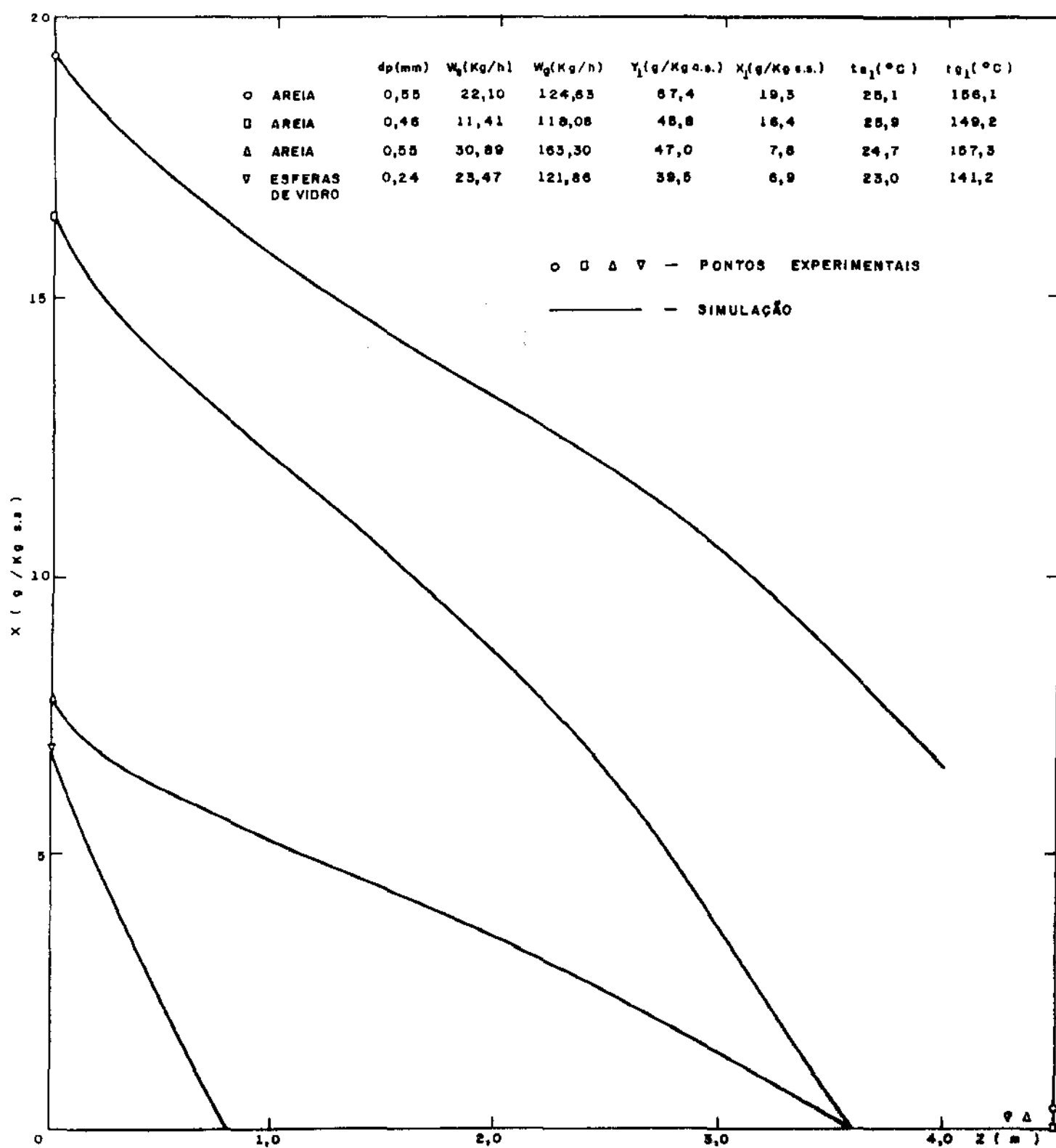


FIGURA 6.14 - PERFIS DE CONTEÚDO DE UMIDADE DOS SÓLIDOS

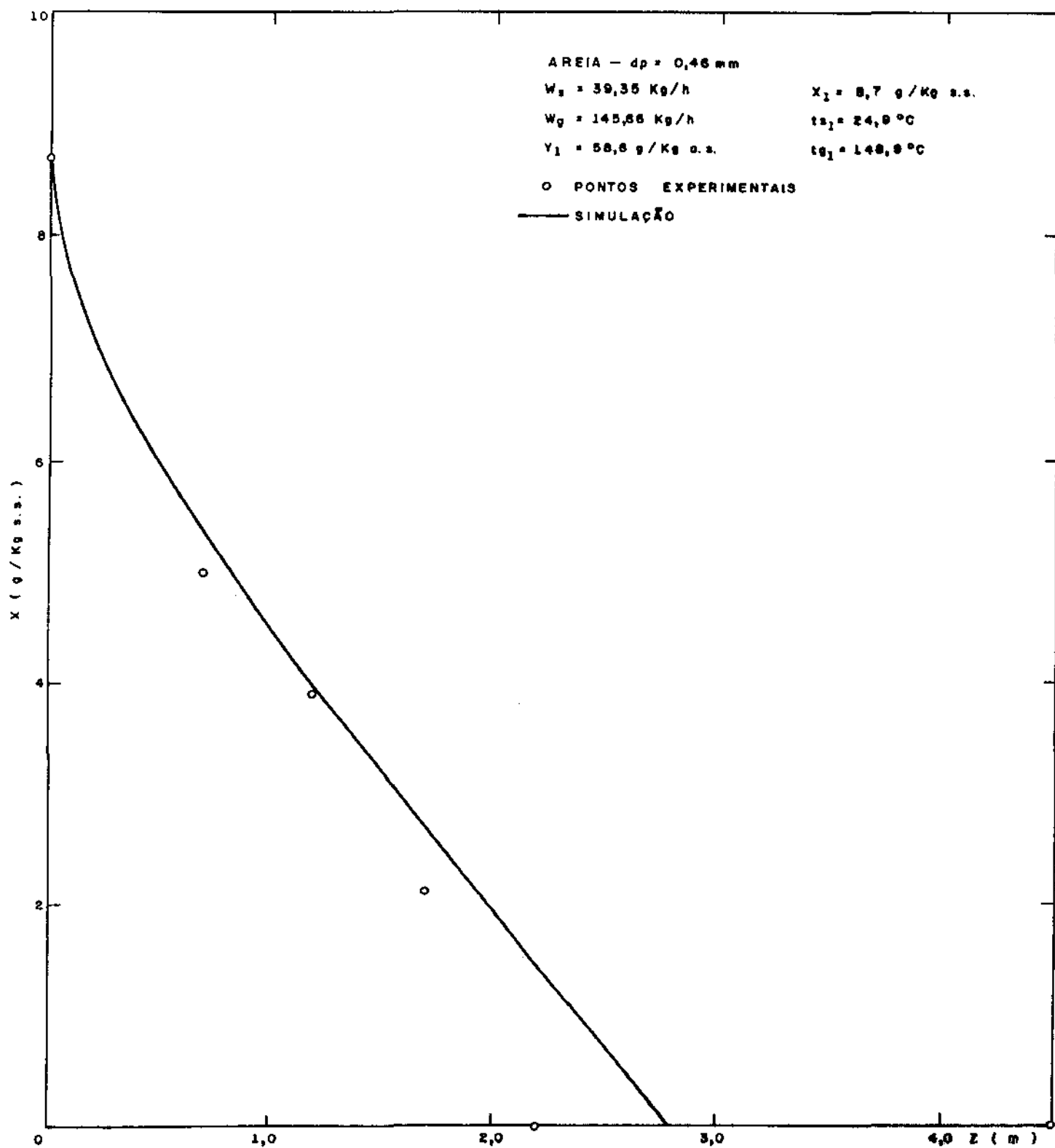


FIGURA 6.15 - COMPARAÇÃO ENTRE CONTEÚDO DE UNIDADE DOS SÓLIDOS CALCULADO E EXPERIMENTAL

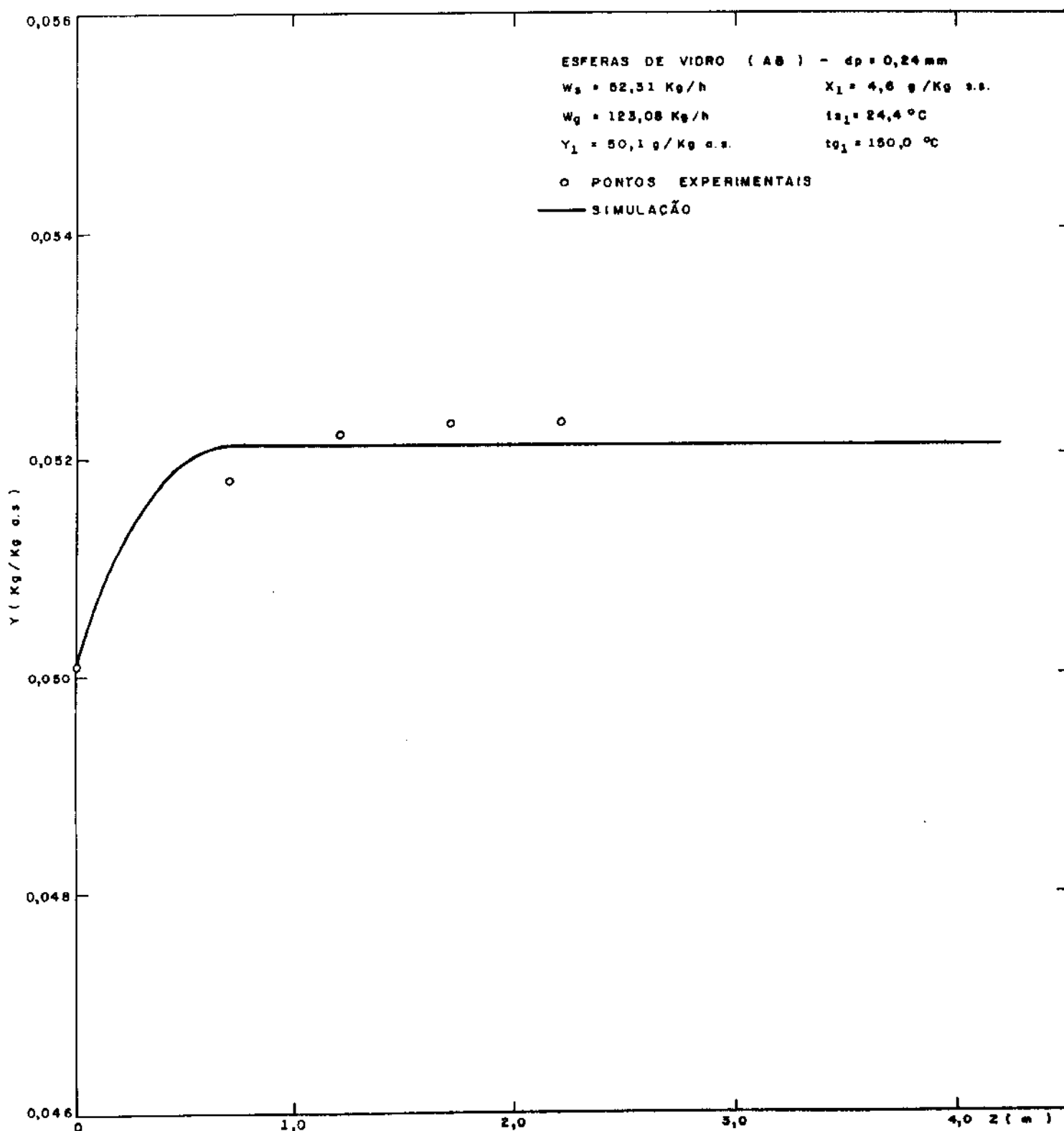


FIGURA 6.16 - COMPARAÇÃO ENTRE UNIDADE DO AR CALCULADA E EXPERIMENTAL

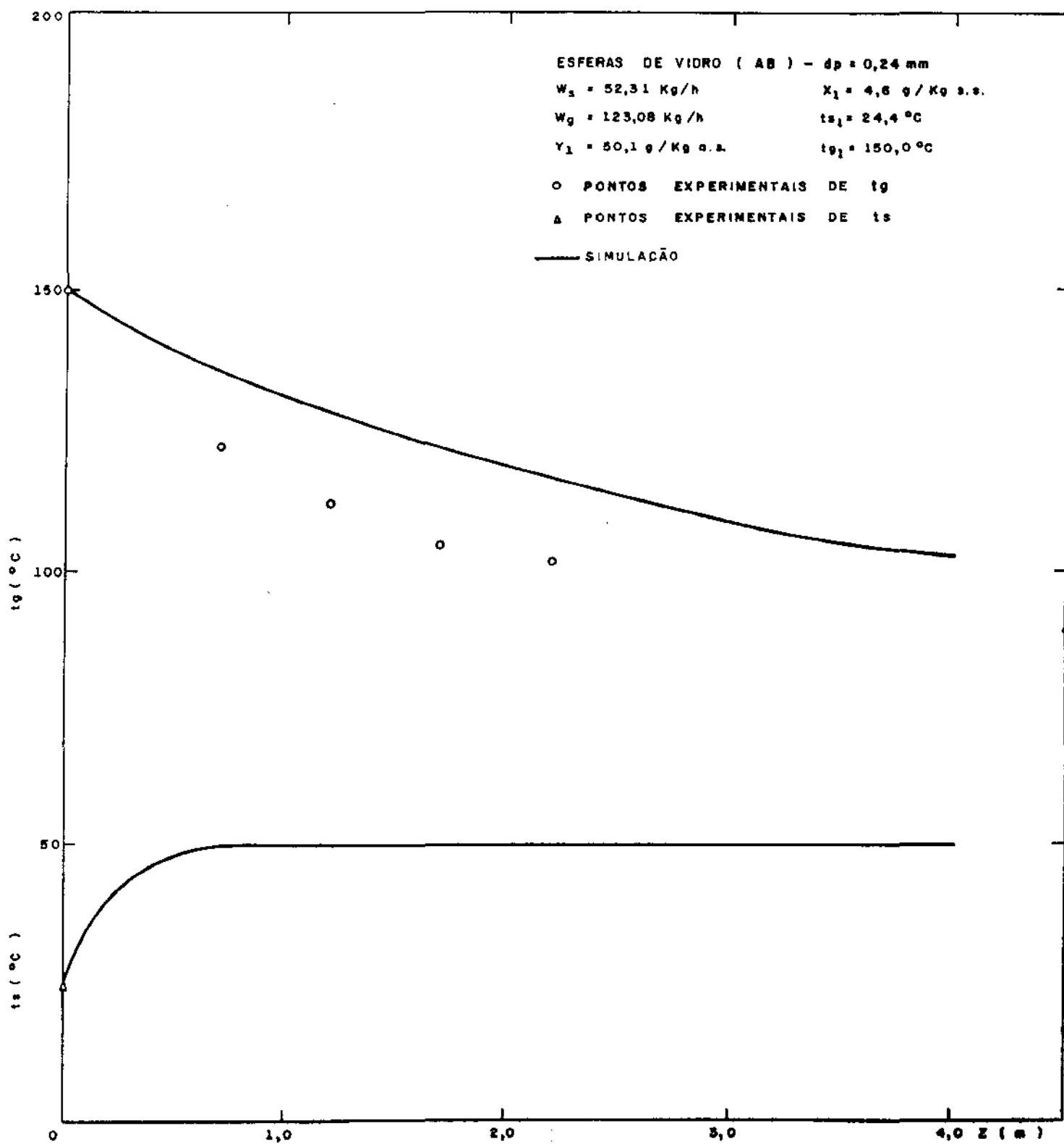


FIGURA 6.17 - COMPARAÇÃO ENTRE TEMPERATURAS DO AR E DOS SÓLIDOS CALCULADAS E EXPERIMENTAIS



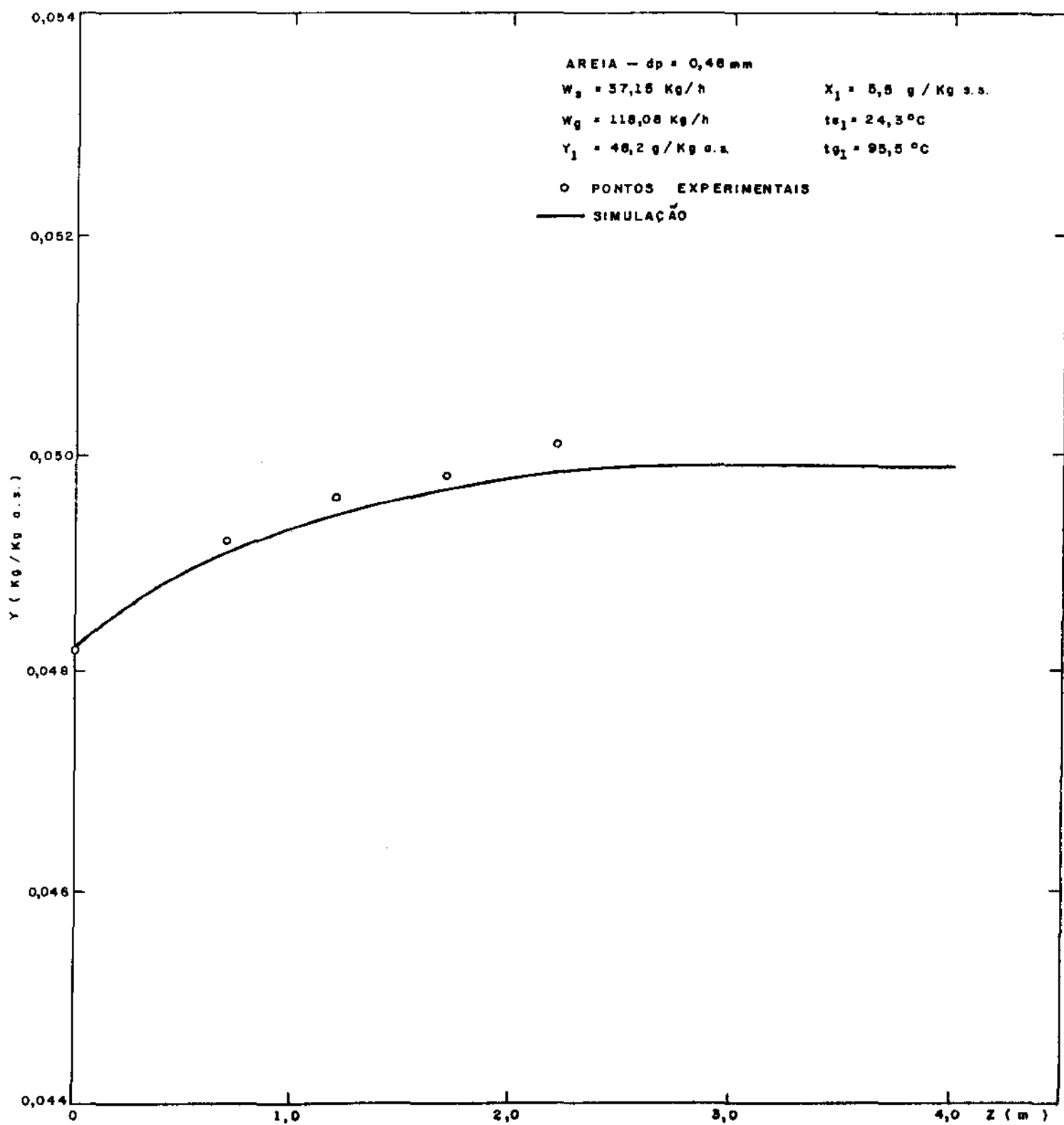


FIGURA 6.18 - COMPARAÇÃO ENTRE UMIDADE DO AR CALCULADA E EXPERIMENTAL

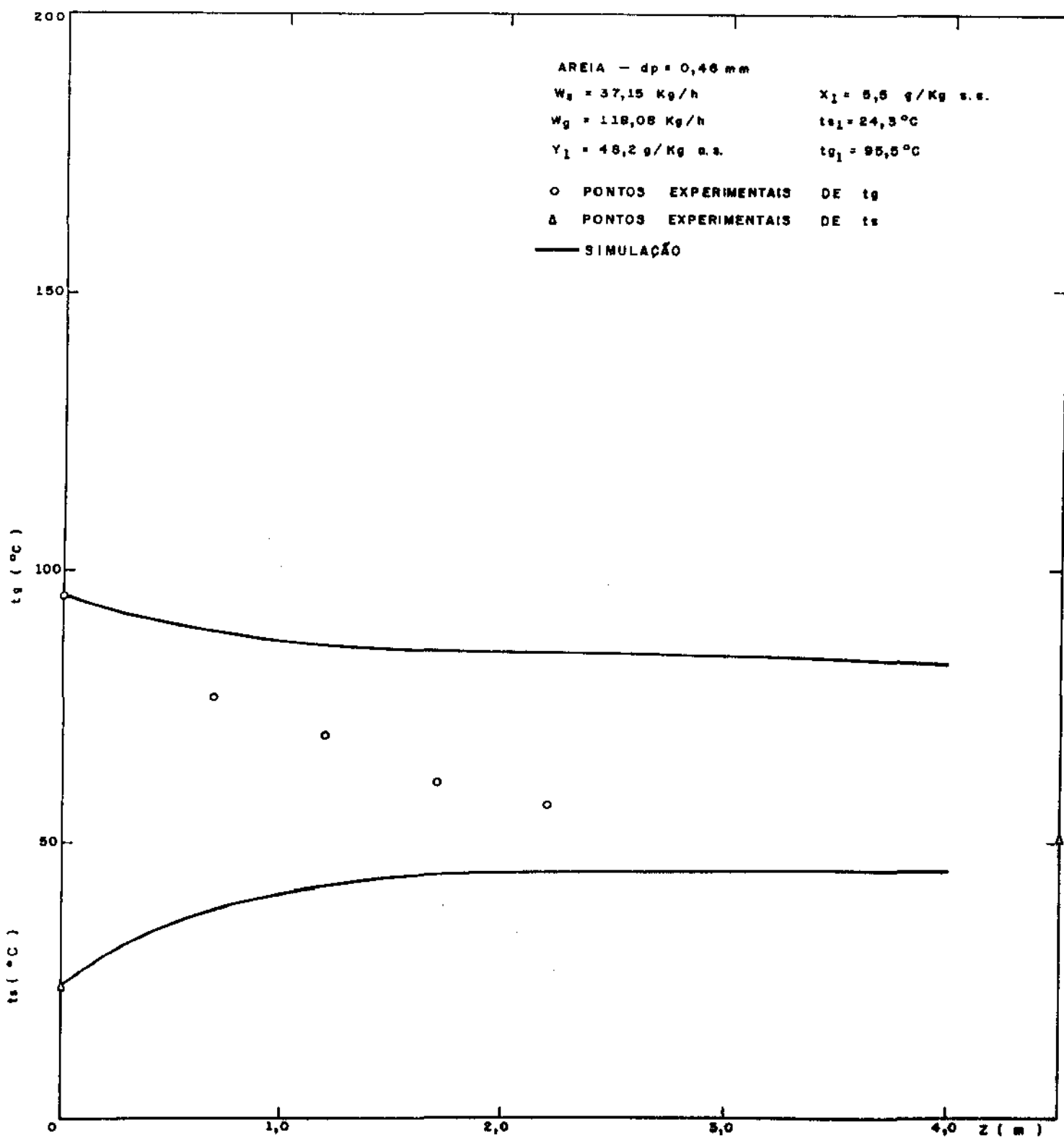


FIGURA 6.19 - COMPARAÇÃO ENTRE TEMPERATURAS DO AR E DOS SÓLIDOS CALCULADAS E EXPERIMENTAIS

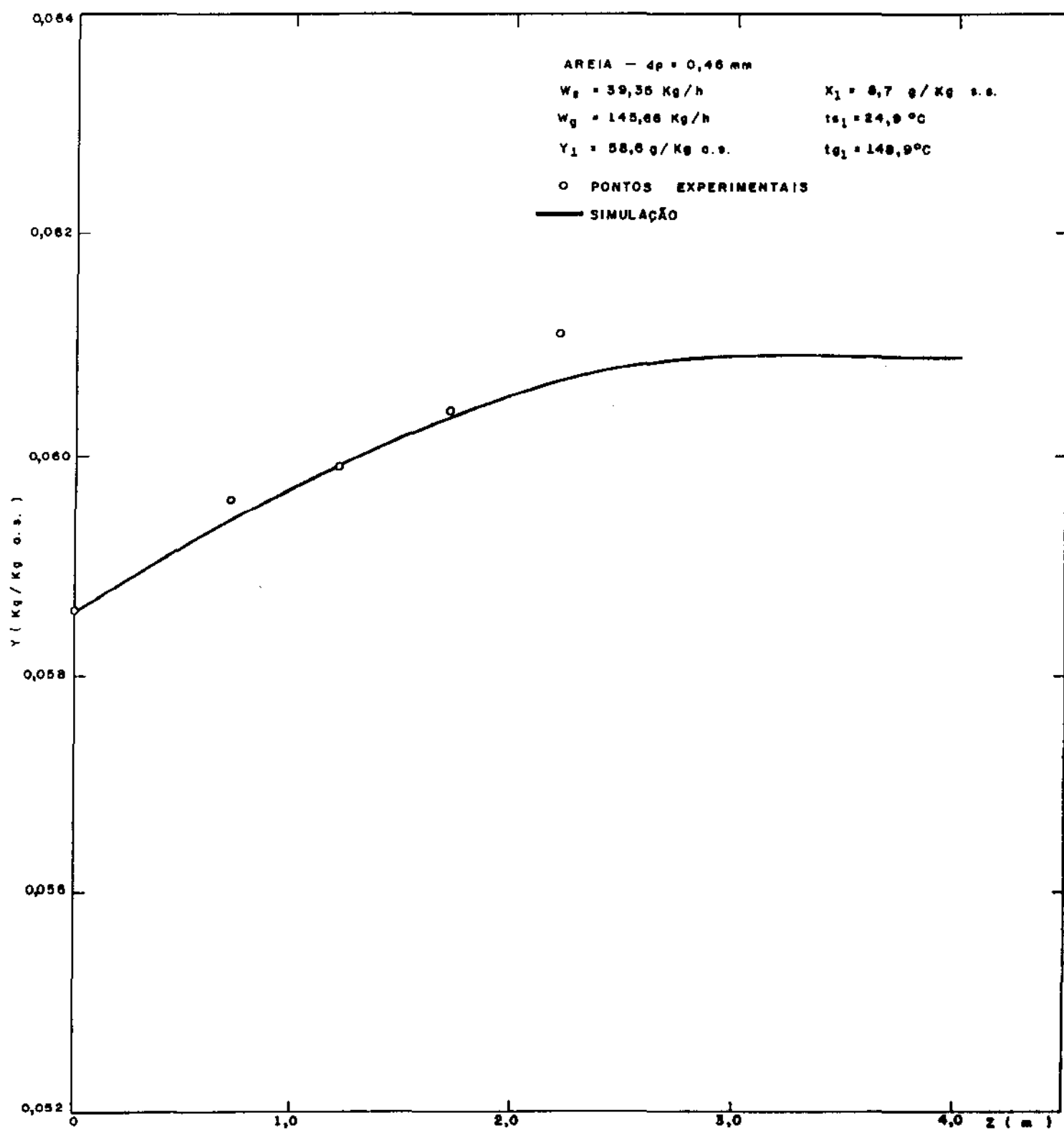


FIGURA 6.20 - COMPARAÇÃO ENTRE UNIDADE DO AR CALCULADA E EXPERIMENTAL

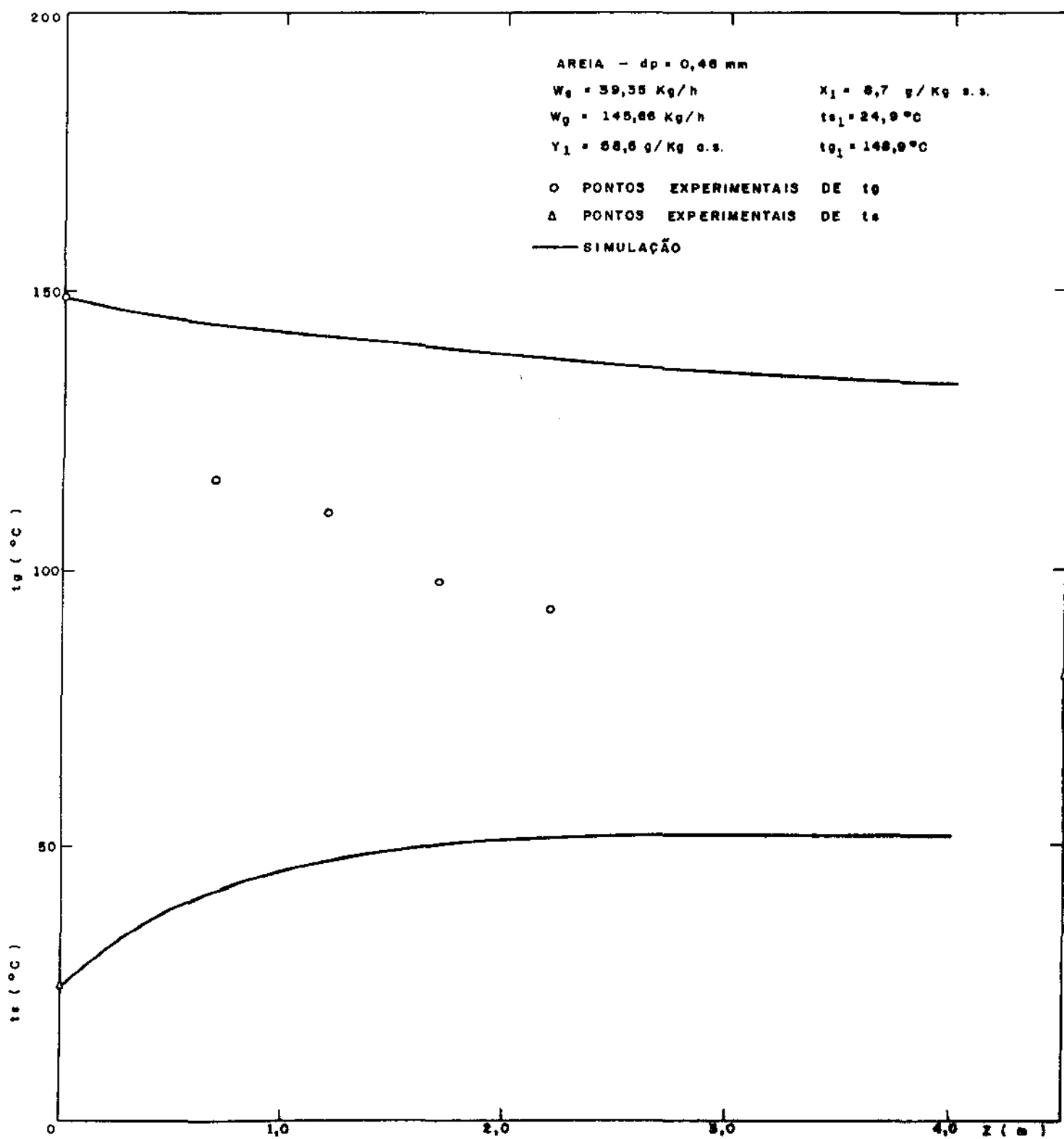


FIGURA 6.21 - COMPARAÇÃO ENTRE TEMPERATURAS DO AR E DOS SÓLIDOS CALCULADAS E EXPERIMENTAIS

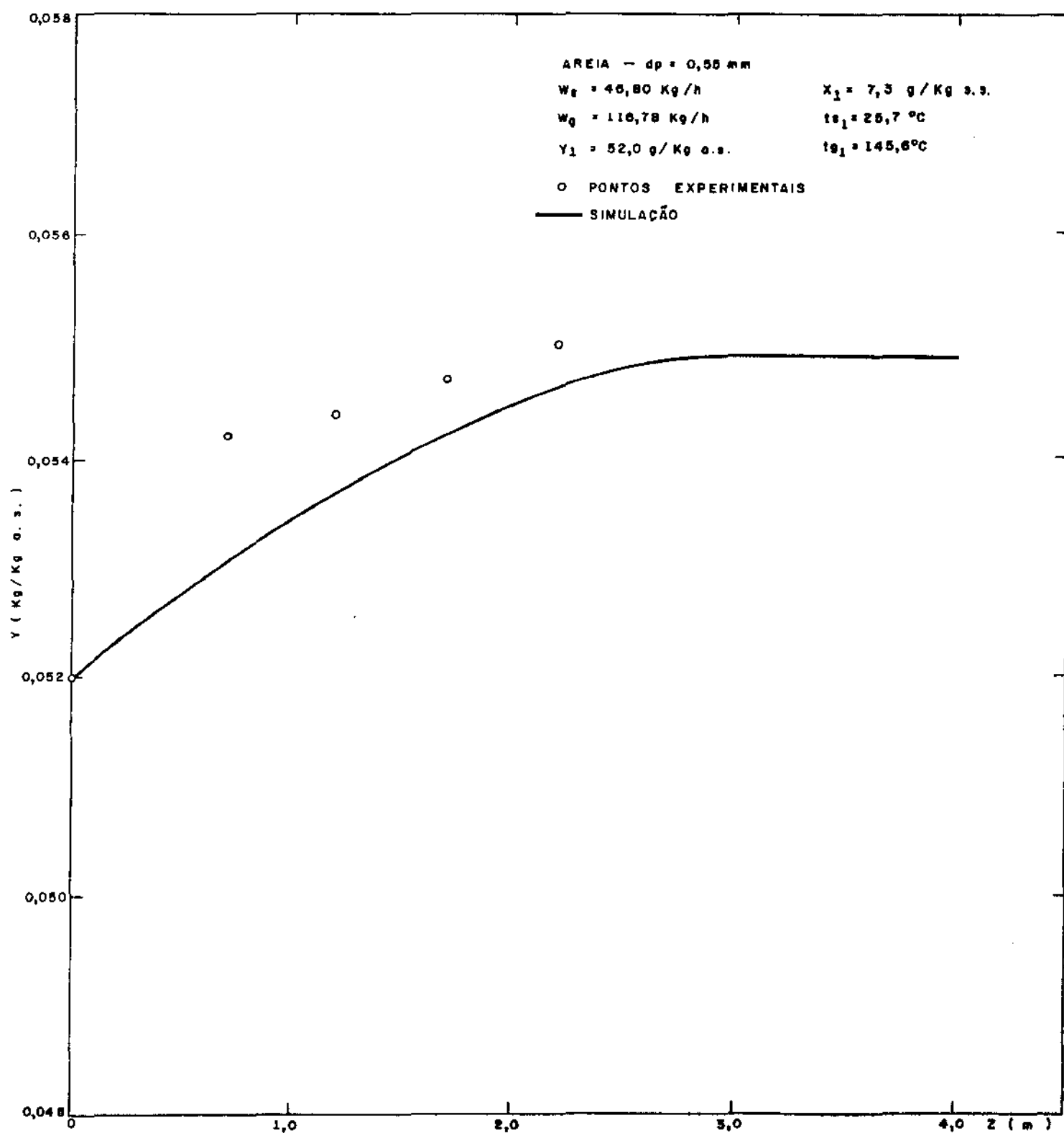


FIGURA 6.22 - COMPARAÇÃO ENTRE UMIDADE DO AR CALCULADA E EXPERIMENTAL

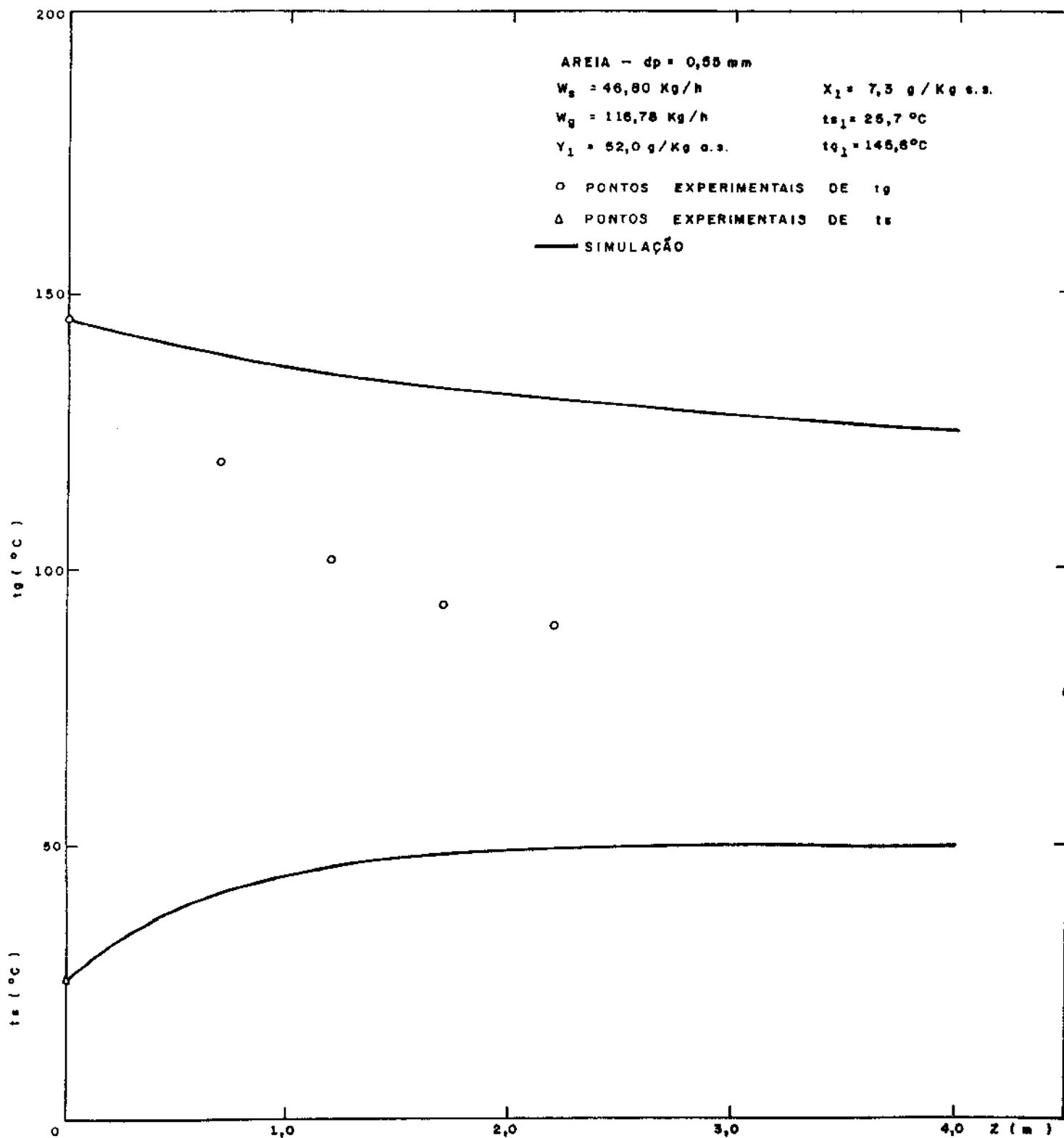


FIGURA 6.23 — COMPARAÇÃO ENTRE TEMPERATURAS DO AR E DOS SÓLIDOS CALCULADAS E EXPERIMENTAIS

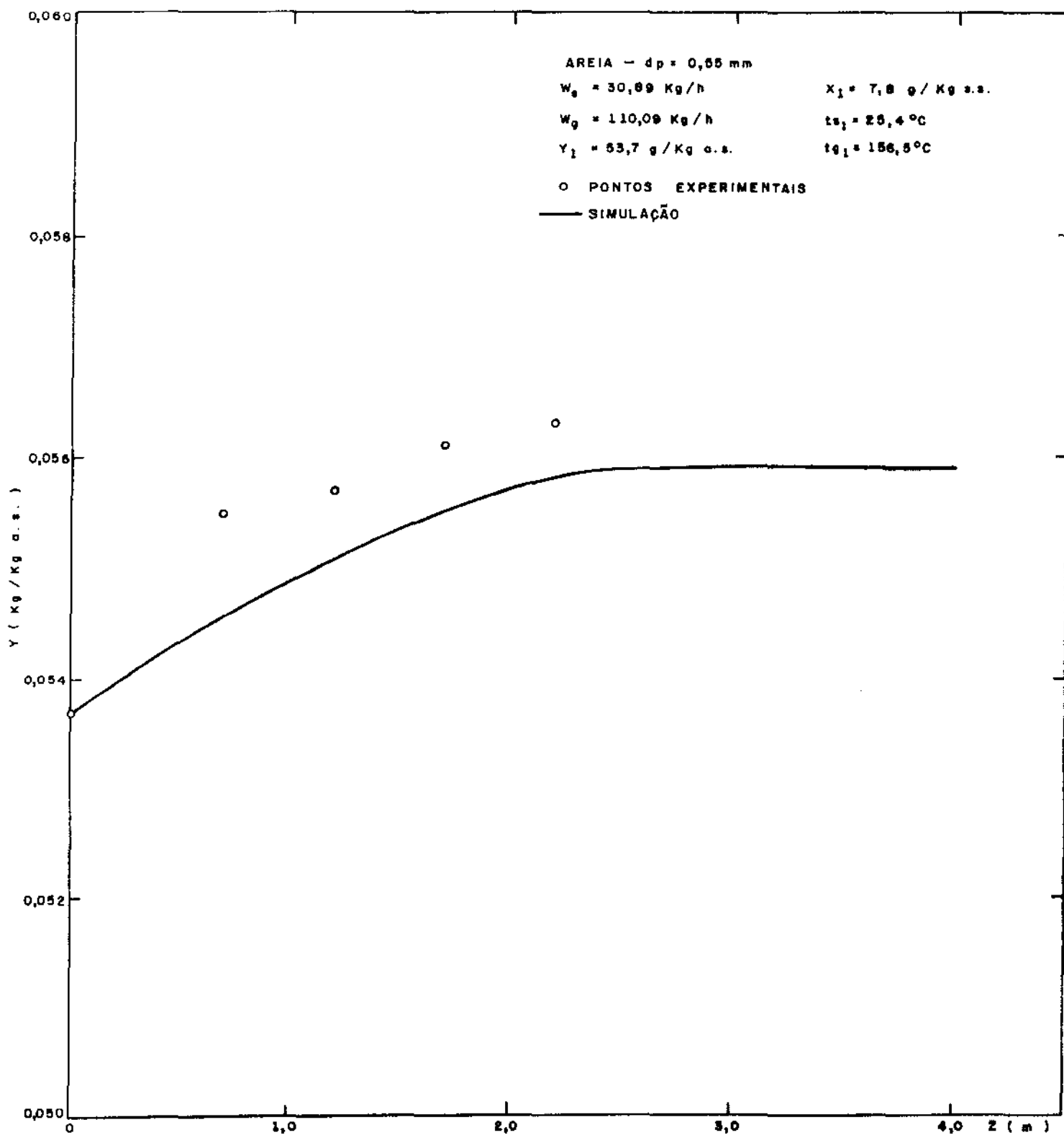


FIGURA 6.24 - COMPARAÇÃO ENTRE UMIDADE DO AR CALCULADA E EXPERIMENTAL

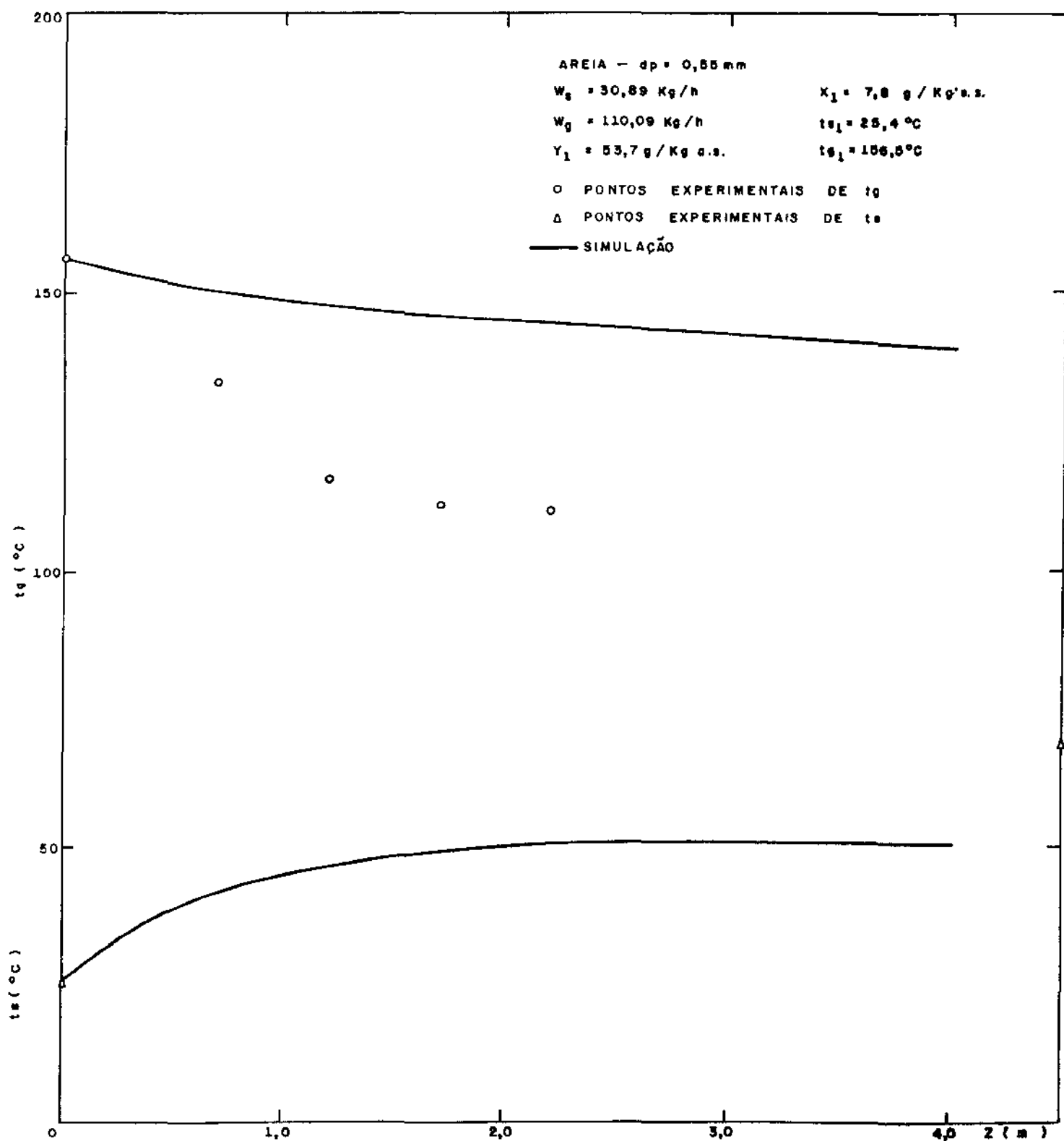


FIGURA 6.25 — COMPARAÇÃO ENTRE TEMPERATURAS DO AR E DOS SÓLIDOS CALCULADAS E EXPERIMENTAIS



ar, obtidas experimentalmente. Como a evaporação da umidade superficial ocorre aproximadamente à TBU do ar, nos parece razoável a hipótese feita na simulação, em que o cálculo da variação longitudinal da umidade do ar saturado, é feito em função da variação da temperatura dos sólidos, através dos procedimentos desenvolvidos no capítulo 3. O valor da temperatura dos sólidos ao longo do tubo de secagem, é obtido da solução de uma equação apropriada, integrante da modelagem matemática.

Acredita-se que desvios menores seriam alcançados, se os coeficientes fenomenológicos fossem determinados experimentalmente e seus valores utilizados nas equações que constituem o modelo matemático do secador.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 7.1. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pelas determinações experimentais e pela simulação matemática, na operação efetuada com a instalação piloto de secagem pneumática neste trabalho, conclui-se que:

- a) O dispositivo desenvolvido para a medida de umidade à temperaturas situadas na faixa de 93 a 214°C, se mostrou adequado para os objetivos do presente estudo, apresentando sensibilidade quanto às variações dos parâmetros operacionais analisados.
- b) O método para a determinação das propriedades psicrométricas do ar ao longo do tubo de secagem, através do programa elaborado para esse fim, foi apropriado ao tratamento dos dados do sistema psicrométrico, pela simplicidade das equações envolvidas, facilidade do cálculo e a precisão obtida.
- c) Embora numa faixa limitada de umidades, houve boa concordância entre os resultados da modelagem matemática e os resultados experimentais para a umidade do ar e demais variáveis pertinentes ao longo do secador, como mostra o baixo desvio exibido entre eles e as comparações apresentadas em gráficos, apesar das hipóteses ainda demasiadamente restritivas em que se fundamenta a modelagem e a simulação realizada no presente trabalho.

- d) As características do secador e os resultados experimentais obtidos, embora ainda numa faixa limitada, indicaram a possibilidade da secagem dos materiais utilizados neste estudo, com facilidade de controle das variáveis operacionais.
- e) O sistema experimental montado neste trabalho, corresponde a um secador pneumático vertical com instrumentação adequada para a realização de ensaios em escala piloto, operando-se com sólidos granulados. A unidade se mostrou de tamanho conveniente e de projeto apropriado para efetuar as medidas das variáveis operacionais, permitindo desse modo a avaliação e o acompanhamento do processo de secagem.

## 7.2. SUGESTÕES

Para dar continuidade aos estudos realizados neste trabalho, sugere-se:

- a) Melhorar o sistema de alimentação de sólidos, de modo que permita a utilização de materiais com conteúdo de umidade inicial mais elevado.
- b) A obtenção de dados experimentais com sólidos de maior granulometria e de massas específicas diferentes, e estudar então a influência da composição granulométrica do material com relação à variação de umidade do produto no secador.
- c) Desenvolver um método de coleta de sólidos ao longo do tubo de secagem, visando determinar experimentalmente o perfil do conteúdo de umidade dos sólidos, seguindo a linha de idéias propostas por MARTIN e SALEH<sup>27</sup>.

- d) Desenvolver uma modelagem matemática considerando o efeito da população de partículas, visando evidenciar sua influência no processo de secagem em regime de fase densa.
- e) Para cobrir uma faixa mais abrangente de condições experimentais, a utilização de secadores com duto de configuração, diâmetro e comprimento diferente do que foi empregado neste estudo.
- f) Com o objetivo de se ter uma melhor precisão na obtenção dos coeficientes fenomenológicos,  $K_y$  e  $h$ , sugere-se a sua determinação experimental em equipamentos que envolvam o contato gás-sólido em condições similares às que ocorrem nos secadores pneumáticos.

APÊNDICE A

LISTAGEM DO PROGRAMA EMPREGADO NO CÁLCULO  
DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS DO AR

```

100 REM PROGRAMA PSI.BAS*CALCULA PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS DO AR DE 0 A 300°C*
110 PRINT "NÚMERO DA CORRIDA"; INPUT NUMERO
120 LPRINT SPC(34); "CORRIDA"; NUMERO
130 LPRINT:LPRINT:LPRINT
140 PRINT "NÚMERO DE PONTOS CONHECIDOS";
150 INPUT N
160 DEFBL TBS(10),TBU(10),PWSU(10),PWSS(10),TUK(10),TSK(10),YSU(10),YSS(10),Y(10),GS(10),PW(10),UR(10)
170 DEFBL V(10),H(10),EU(10),ES(10),FU(10),FS(10),JU(10),JS(10),HAS(10),HAU(10),HAG(10),HVS(10)
180 DEFBL HVU(10),HU(10),AS(10),AU(10),BS(10),BU(10),CS(10),CU(10),D(10),ETBS(10),ETBU(10),ETBS1(10),ETBU1(10)
190 FOR I=1 TO N
200 PRINT "ETBS,ETBU,P,Z do ponto";I;
210 INPUT ETBS(I),ETBU(I),P(I),Z(I)
220 NEXT
230 REM CONVERSÃO DE mV EM °C PARA O PAR Cu-Ct
240 A1=2.5661297*(10**(-2))
250 A2=-6.1954869*(10**(-7))
260 A3=2.2181644*(10**(-11))
270 A4=-3.55009*(10**(-16))
280 R=0.28705
290 LPRINT SPC(8); "Z(m)"; SPC(5); "P(KPa)"; SPC(6); "ETBS(mV)"; SPC(3); "TBS(°C)"; SPC(5); "ETBU(mV)"; SPC(3); "TBU(°C)"
300 LPRINT
310 FOR I=1 TO N
320 ETBS1(I)=1000*ETBS(I)
330 ETBU1(I)=1000*ETBU(I)
340 TBS(I)=A1*ETBS1(I)+A2*(ETBS1(I)**2)+A3*(ETBS1(I)**3)+A4*(ETBS1(I)**4)+0.10
350 TBU(I)=A1*ETBU1(I)+A2*(ETBU1(I)**2)+A3*(ETBU1(I)**3)+A4*(ETBU1(I)**4)+0.10
360 LPRINT (" f12.1, f11.3, f13.3, f10.1, f13.3, f10.1") Z(I),P(I),ETBS(I),TBS(I),ETBU(I),TBU(I)
370 NEXT
380 LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT
390 FOR I=1 TO N
400 TUK(I)=TBU(I)+273.15
410 TSK(I)=TBS(I)+273.15
420 NEXT
430 FOR I=1 TO N
440 IF TBS(I)>100 THEN GOTO 670
450 NEXT
460 REM CÁLCULO DAS PROPRIEDADES DE 0 A 100°C
470 FOR I=1 TO N
480 AU(I)=89.63121+0.023998970*TUK(I)-1.1654551*(10**(-5))*(TUK(I)**2)
490 AS(I)=89.63121+0.023998970*TSK(I)-1.1654551*(10**(-5))*(TSK(I)**2)
500 BU(I)=-1.2810336*(10**(-8))*(TUK(I)**3)+2.0998405*(10**(-11))*(TUK(I)**4)

```

```

510 BS(I)=-1.2810336*(10**(-8))*(TSK(I)**3)+2.0998405*(10**(-11))*(TSK(I)**4)
520 CS(I)=(-7511.52/TSK(I))-12.150799*LN(TSK(I))
530 CU(I)=(-7511.52/TUK(I))-12.150799*LN(TUK(I))
540 PWSS(I)=EXP(AS(I)+BS(I)+CS(I))
550 PWSU(I)=EXP(AU(I)+BU(I)+CU(I))
560 YSS(I)=0.62198*(PWSS(I)/(P(I)-PWSS(I)))
570 YSU(I)=0.62198*(PWSU(I)/(P(I)-PWSU(I)))
580 Y(I)=-((2501-2.411*TBU(I))*YSU(I)-1.006*(TBS(I)-TBU(I)))/(2501+1.775*TBS(I)-4.186*TBU(I))
590 GS(I)=Y(I)/YSS(I)
600 PW(I)=(P(I)*Y(I))/(0.62198+Y(I))
610 UR(I)=(PW(I)/PWSS(I))*100
620 H(I)=1.006*TBS(I)+Y(I)*(2501+1.775*TBS(I))
630 V(I)=R*TSK(I)/(P(I)-PW(I))
640 NEXT
650 GOTO 1100
660 REM CÁLCULO DAS PROPRIEDADES DE 100 A 300=C
670 CA=0.507575
680 CA1=0.992956
690 CA2=0.000008
700 CA3=1.71509*(10**(-9))
710 CAG=-8.28965
720 CAG1=4.43619
730 CAG2=0.002479
740 CAG3=0.000009
750 CV=2491.66
760 CV1=2.18415
770 CV2=-0.004255
780 CV3=0.000013
790 CV4=-4.5509*(10**(-8))
800 A=26.2561
810 B=-6176.33
820 C=0.33426
830 D=-0.01753
840 E=1.07088*(10**(-5))
850 CONV=0.13332237
860 FOR I=1 TO N
870 EU(I)=A+B/TUK(I)+D*TUK(I)
880 ES(I)=A+B/TSK(I)+D*TSK(I)
890 FU(I)=C*LN(TUK(I))+E*(TUK(I)**2)
900 FS(I)=C*LN(TSK(I))+E*(TSK(I)**2)

```

```

910 JU(I)=EU(I)+FU(I)
920 JS(I)=FS(I)+FS(I)
930 PWSU(I)=CONV*EXP(JU(I))
940 PWSS(I)=CONV*EXP(JS(I))
950 YSS(I)=0.62198*(PWSS(I)/(P(I)-PWSS(I)))
960 YSU(I)=0.62198*(PWSU(I)/(P(I)-PWSU(I)))
970 HAS(I)=CA+CA1*TBS(I)+CA2*(TBS(I)**2)+CA3*(TBS(I)**3)
980 HAU(I)=CA+CA1*TBU(I)+CA2*(TBU(I)**2)+CA3*(TBU(I)**3)
990 HAG(I)=CAG+CAG1*TBU(I)+CAG2*(TBU(I)**2)+CAG3*(TBU(I)**3)
1000 HVS(I)=CV+CV1*TBS(I)+CV2*(TBS(I)**2)+CV3*(TBS(I)**3)+CV4*(TBS(I)**4)
1010 HVU(I)=CV+CV1*TBU(I)+CV2*(TBU(I)**2)+CV3*(TBU(I)**3)+CV4*(TBU(I)**4)
1020 HU(I)=HAU(I)+YSU(I)*HVU(I)
1030 Y(I)=(HAS(I)-HU(I)+YSU(I)*HAG(I))/(HAG(I)-HVS(I))
1040 GS(I)=Y(I)/YSS(I)
1050 PW(I)=(P(I)*Y(I))/(0.62198+Y(I))
1060 UR(I)=(PW(I)/PWSS(I))*100
1070 H(I)=HAS(I)+Y(I)*HVS(I)
1080 V(I)=R*TSK(I)/(P(I)-PW(I))
1090 NEXT
1100 LPRINT SPC(8); "PWSU(KPa)"; SPC(4); "YSU(Kg/Ka)"; SPC(4); "Y(Ka/Ka)"; SPC(4); "PWSS(KPa)"; SPC(4); "YSS(Ka/Ka)"
1110 LPRINT
1120 FOR I=1 TO N
1130 IF YSS(I)=0 THEN GOTO 1160
1140 LPRINT ("f16.4, f13.4, f13.4, f14.4") PWSU(I); YSU(I); Y(I); PWSS(I)
1150 GOTO 1170
1160 LPRINT ("f16.4, f13.4, f13.4, f14.4, f12.4") PWSU(I); YSU(I); Y(I); PWSS(I); YSS(I)
1170 NEXT
1180 LPRINT: LPRINT
1190 LPRINT SPC(12); "GS"; SPC(7); "PW(KPa)"; SPC(7); "UR(%)"; SPC(7); "V(m3/Ka)"; SPC(5); "H(KJ/Ka)"
1200 LPRINT
1210 FOR I=1 TO N
1220 IF GS(I)=0 THEN GOTO 1250
1230 LPRINT ("f28.4, f13.4, f13.4, f14.4") PW(I); UR(I); V(I); H(I)
1240 GOTO 1260
1250 LPRINT ("f16.4, f12.4, f13.4, f13.4, f14.4") GS(I); PW(I); UR(I); V(I); H(I)
1260 NEXT
1270 LPRINT: LPRINT
1280 LPRINT SPC(8); "-----"
1290 LPRINT: LPRINT: LPRINT
1300 END

```



APÊNDICE B

DADOS DE SAÍDA DAS PROPRIEDADES  
PSICROMÉTRICAS DO AR

## CORRIDA 1

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.290	142.0	1.800	44.4
.7	95.000	5.250	120.7	1.713	42.3
1.2	95.000	4.870	112.7	1.675	41.4
1.7	95.000	4.710	109.4	1.661	41.1
2.2	95.000	4.350	101.7	1.621	40.2

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
9.3032	.0675	.0247	382.1865	
8.3589	.0600	.0257	202.9946	
7.9721	.0570	.0258	157.0196	
7.8334	.0559	.0260	140.2730	
7.4480	.0529	.0260	107.6595	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	3.6337	.9508	1.3042	210.7340
	3.7672	1.8558	1.2391	191.0203
	3.7791	2.4068	1.2143	182.9168
	3.8145	2.7193	1.2041	180.0531
	3.8123	3.5411	1.1800	171.9749

---

## CORRIDA 2

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.280	141.8	1.920	47.2
.7	95.000	5.100	117.6	1.832	45.2
1.2	95.000	4.530	105.5	1.783	44.0
1.7	95.000	4.400	102.8	1.772	43.7
2.2	95.000	4.260	99.8	1.764	43.6

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
10.7490	.0794	.0370	380.0345	
9.6721	.0705	.0381	183.7554	
9.1121	.0660	.0384	123.1269	
8.9901	.0650	.0386	111.7944	
8.9023	.0643	.0391	100.5188	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	5.3332	1.4033	1.3283	244.0399
	5.4774	2.9808	1.2528	221.1762
	5.5265	4.4885	1.2149	209.3913
	5.5468	4.9616	1.2063	206.7713
	5.6198	5.5908	1.1977	205.0107

---

## CORRIDA 3

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.250	141.2	1.940	47.7
.7	95.000	4.980	115.0	1.846	45.5
1.2	95.000	4.290	100.4	1.786	44.1
1.7	95.000	4.120	96.8	1.772	43.7
2.2	95.000	4.030	94.8	1.764	43.6

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
11.0071	.0815	.0395	373.6333	
9.8372	.0718	.0405	169.4018	
9.1456	.0663	.0409	102.8565	
8.9901	.0650	.0412	90.1541	11.5715
8.9023	.0643	.0412	83.9478	4.7243

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m3/Kg)	H(KJ/Kg)
	5.6668	1.5167	1.3313	250.1245
	5.8127	3.4313	1.2494	225.1948
	5.8628	5.7000	1.2030	210.5232
.0036	5.8964	6.5403	1.1917	207.2670
.0087	5.9084	7.0382	1.1856	205.4184

---

## CORRIDA 4

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.690	150.0	1.866	46.0
.7	95.000	5.410	124.0	1.756	43.4
1.2	95.000	4.940	114.2	1.713	42.3
1.7	95.000	4.670	108.5	1.686	41.7
2.2	95.000	4.640	107.9	1.684	41.7

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kq)	Y(Kq/Kq)	PWSS(KPa)	YSS(Kq/Kq)
10.0771	.0738	.0279	476.0641	
8.8152	.0636	.0281	225.1841	
8.3589	.0600	.0284	164.8150	
8.0825	.0578	.0285	136.3116	
8.0623	.0577	.0286	133.3980	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kq)	H(KJ/Kq)
	4.0774	.8565	1.3358	227.7785
	4.1078	1.8242	1.2543	201.0789
	4.1462	2.5157	1.2239	191.5194
	4.1563	3.0491	1.2060	185.7218
	4.1700	3.1260	1.2042	185.3158

---

## CORRIDA 5

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.650	149.2	1.963	48.2
.7	95.000	5.350	122.8	1.871	46.1
1.2	95.000	4.920	113.8	1.835	45.2
1.7	95.000	4.610	107.2	1.817	44.8
2.2	95.000	4.440	103.6	1.822	44.9

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
11.3101	.0841	.0387	465.9693	
10.1378	.0743	.0398	216.6557	
9.7072	.0708	.0400	162.5579	
9.4977	.0691	.0410	130.5331	
9.5555	.0696	.0430	115.1907	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	5.5615	1.1935	1.3554	256.5255
	5.7153	2.6380	1.2729	231.4847
	5.7356	3.5284	1.2443	222.3053
	5.8725	4.4989	1.2251	218.0350
	6.1482	5.3374	1.2172	219.6732

---

## CORRIDA 6

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.690	150.0	2.060	50.5
.7	95.000	5.300	121.7	1.975	48.5
1.2	95.000	4.810	111.5	1.940	47.7
1.7	95.000	4.460	104.1	1.912	47.0
2.2	95.000	4.330	101.3	1.901	46.8

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
12.6649	.0957	.0501	476.0641	
11.4710	.0854	.0518	209.7398	
11.0071	.0815	.0522	150.5677	
10.6472	.0785	.0523	116.9188	
10.5085	.0774	.0523	106.0394	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	7.0824	1.4877	1.3815	288.7370
	7.3032	3.4820	1.2925	262.8251
	7.3566	4.8859	1.2597	252.8022
	7.3707	6.3041	1.2356	245.0170
	7.3721	6.9522	1.2265	242.0178

---

## CORRIDA 7

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	3.950	93.1	1.588	39.4
.7	95.000	3.490	83.0	1.540	38.2
1.2	95.000	3.270	78.1	1.514	37.6
1.7	95.000	2.980	71.6	1.477	36.7
2.2	95.000	2.870	69.1	1.463	36.4

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
7.1347	.0505	.0270	78.7137	3.0061
6.7082	.0473	.0276	53.4236	.7992
6.4861	.0456	.0278	43.8759	.5338
6.1807	.0433	.0280	33.4269	.3377
6.0683	.0424	.0281	30.0317	.2875

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
.0090	3.9500	5.0181	1.1546	165.5766
.0346	4.0428	7.5675	1.1240	156.7142
.0521	4.0696	9.2752	1.1089	152.0711
.0829	4.0933	12.2456	1.0887	145.6619
.0978	4.1075	13.6770	1.0810	143.3061

---



## CORRIDA 8

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.210	140.3	1.898	46.7
.7	95.000	4.910	113.6	1.802	44.5
1.2	95.000	4.700	109.2	1.786	44.1
1.7	95.000	4.230	99.1	1.751	43.2
2.2	95.000	4.200	98.5	1.750	43.2

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
10.4709	.0770	.0352	365.2253	
9.3259	.0677	.0368	161.4383	
9.1456	.0663	.0372	139.2743	
8.7611	.0632	.0382	98.2229	
8.7503	.0631	.0384	95.9683	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	5.0912	1.3940	1.3202	237.6937
	5.3076	3.2877	1.2377	213.5627
	5.3558	3.8455	1.2242	209.8002
	5.4943	5.5937	1.1939	201.8409
	5.5194	5.7513	1.1922	201.6474

---

## CORRIDA 9

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	10.020	213.8	2.155	52.7
.7	95.000	6.410	144.4	1.941	47.7
1.2	95.000	5.790	131.8	1.894	46.6
1.7	95.000	4.850	112.3	1.814	44.7
2.2	95.000	4.650	108.1	1.800	44.4

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
14.1182	.1086	.0364	2055.1504	
11.0201	.0816	.0382	408.7341	
10.4210	.0766	.0384	285.3204	
9.4631	.0688	.0385	154.8457	
9.3032	.0675	.0390	134.3638	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	5.2477	.2553	1.5573	318.1161
	5.4984	1.3452	1.3391	250.1450
	5.5227	1.9356	1.2992	237.2717
	5.5392	3.5772	1.2368	216.8142
	5.5993	4.1673	1.2241	213.4980

---

## CORRIDA 10

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	7.320	162.4	1.880	46.3
.7	95.000	5.960	135.3	1.775	43.8
1.2	95.000	5.460	125.0	1.731	42.8
1.7	95.000	5.060	116.7	1.692	41.8
2.2	95.000	4.880	112.9	1.674	41.4

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
10.2479	.0752	.0242	657.6496	
9.0233	.0653	.0252	315.8699	
8.5474	.0615	.0254	232.4855	
8.1432	.0583	.0255	178.8706	
7.9621	.0569	.0256	158.1154	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	3.5587	.5411	1.3673	230.6719
	3.6940	1.1695	1.2840	204.9060
	3.7338	1.6060	1.2524	194.9398
	3.7462	2.0944	1.2264	186.4654
	3.7550	2.3749	1.2146	182.6768

---

## CORRIDA 11

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	7.240	160.9	1.861	45.8
.7	95.000	5.460	125.0	1.709	42.3
1.2	95.000	5.070	116.9	1.670	41.3
1.7	95.000	4.580	106.6	1.619	40.1
2.2	95.000	4.460	104.1	1.608	39.9

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
10.0166	.0733	.0229	632.1227	
8.3174	.0597	.0235	232.4855	
7.9223	.0566	.0236	180.0823	
7.4292	.0528	.0238	127.7163	
7.3262	.0520	.0240	116.9188	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	3.3766	.5342	1.3597	225.4912
	3.4635	1.4898	1.2487	189.7541
	3.4741	1.9292	1.2234	181.4846
	3.5008	2.7411	1.1914	171.1957
	3.5300	3.0192	1.1837	169.0775

---

## CORRIDA 12

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	7.360	163.2	2.090	51.2
.7	95.000	5.469	125.2	1.980	48.6
1.2	95.000	4.866	112.7	1.934	47.6
1.7	95.000	4.376	102.3	1.894	46.6
2.2	95.000	4.277	100.1	1.886	46.4

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
13.1099	.0996	.0484	670.6965	
11.5385	.0860	.0509	233.8188	
10.9291	.0809	.0510	156.5829	
10.4210	.0766	.0511	109.7944	
10.3218	.0758	.0512	101.8383	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	6.8595	1.0227	1.4211	298.2558
	7.1823	3.0717	1.3022	264.1033
	7.2007	4.5986	1.2613	250.8579
	7.2162	6.5724	1.2276	239.8815
	7.2249	7.0945	1.2208	237.7530

---

## CORRIDA 13

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	3.980	93.7	1.823	45.0
.7	95.000	3.330	79.5	1.771	43.7
1.2	95.000	2.690	65.1	1.703	42.1
1.7	95.000	2.660	64.4	1.701	42.1
2.2	95.000	2.630	63.7	1.700	42.0

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
9.5611	.0696	.0474	80.6429	3.4936
8.9727	.0649	.0486	46.3326	.5921
8.2488	.0591	.0487	25.0796	.2231
8.2283	.0590	.0488	24.3227	.2140
8.2180	.0589	.0490	23.5843	.2054

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
.0136	6.7245	8.3387	1.1930	220.6707
.0820	6.8825	14.8546	1.1486	208.2856
.2183	6.8974	27.5020	1.1019	192.8553
.2281	6.9141	28.4264	1.0999	192.4401
.2387	6.9426	29.4373	1.0980	192.2599

---

## CORRIDA 14

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	9.520	204.5	2.214	54.1
.7	95.000	8.000	175.6	2.147	52.6
1.2	95.000	6.510	146.4	2.056	50.4
1.7	95.000	5.470	125.2	1.984	48.7
2.2	95.000	5.100	117.6	1.955	48.1

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
15.0877	.1174	.0488	1705.8202	
13.9908	.1074	.0510	906.6422	
12.6065	.0952	.0511	431.8983	
11.5928	.0864	.0513	233.9673	
11.2040	.0832	.0513	183.7554	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m3/Kg)	H(KJ/Kg)
	6.9134	.4053	1.5564	343.1846
	7.1959	.7937	1.4672	318.6445
	7.2160	1.6708	1.3718	287.6703
	7.2431	3.0958	1.3031	265.3907
	7.2348	3.9372	1.2779	256.8887

---

## CORRIDA 15

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.390	144.0	1.851	45.6
.7	95.000	5.490	125.7	1.785	44.1
1.2	95.000	4.620	107.5	1.706	42.2
1.7	95.000	4.120	96.8	1.655	41.0
2.2	95.000	3.980	93.7	1.642	40.7

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
9.8967	.0723	.0289	404.2158	
9.1344	.0662	.0301	236.9525	
8.2865	.0594	.0306	131.4827	
7.7745	.0554	.0308	90.1541	11.5715
7.6483	.0545	.0310	80.6481	3.4951

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	4.2129	1.0422	1.3189	224.1321
	4.3844	1.8503	1.2633	208.2012
	4.4568	3.3897	1.2066	190.4070
.0027	4.4865	4.9764	1.1731	179.6772
.0089	4.5170	5.6009	1.1639	177.0637

---



## CORRIDA 16

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.470	145.6	2.060	50.5
.7	95.000	5.180	119.2	1.986	48.8
1.2	95.000	4.330	101.3	1.920	47.2
1.7	95.000	3.960	93.3	1.890	46.5
2.2	95.000	3.790	89.6	1.878	46.2

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
12.6649	.0957	.0520	422.5172	
11.6200	.0867	.0542	193.8328	
10.7490	.0794	.0544	106.0394	
10.3713	.0762	.0547	79.3573	3.1554
10.2233	.0750	.0550	69.0299	1.6533

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	7.3277	1.7343	1.3710	289.1571
	7.6141	3.9282	1.2889	266.6012
	7.6452	7.2098	1.2304	247.6632
.0173	7.6738	9.6700	1.2045	239.5291
.0333	7.7188	11.1818	1.1930	236.4032

---

## CORRIDA 17

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	7.020	156.5	2.108	51.6
.7	95.000	5.879	133.6	2.047	50.2
1.2	95.000	5.030	116.1	1.987	48.8
1.7	95.000	4.820	111.7	1.974	48.5
2.2	95.000	4.787	111.0	1.973	48.5

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
13.3830	.1020	.0537	565.7221	
12.4760	.0940	.0555	301.0194	
11.6337	.0868	.0557	175.2732	
11.4575	.0853	.0561	151.6285	
11.4440	.0852	.0563	148.1497	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	7.5454	1.3338	1.4103	305.5651
	7.7790	2.5842	1.3387	285.7420
	7.8066	4.4540	1.2814	267.2212
	7.8563	5.1813	1.2676	263.4449
	7.8805	5.3193	1.2657	263.1905

---

## CORRIDA 18

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	7.060	157.3	2.060	50.5
.7	95.000	6.022	136.5	1.996	49.0
1.2	95.000	5.581	127.5	1.965	48.3
1.7	95.000	5.110	117.8	1.931	47.5
2.2	95.000	5.035	116.2	1.926	47.4

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
12.6649	.0957	.0470	577.3888	
11.7569	.0878	.0479	327.6074	
11.3368	.0843	.0481	250.9047	
10.8903	.0805	.0484	184.9925	
10.8259	.0800	.0486	175.8688	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	6.6728	1.1557	1.3989	288.0410
	6.7928	2.0735	1.3332	268.2423
	6.8209	2.7185	1.3043	259.1120
	6.8650	3.7109	1.2732	249.4800
	6.8807	3.9124	1.2683	248.1091

---

## CORRIDA 19

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	7.060	157.3	2.003	49.2
.7	95.000	5.710	130.2	1.916	47.1
1.2	95.000	5.310	121.9	1.886	46.4
1.7	95.000	4.990	115.3	1.860	45.8
2.2	95.000	4.820	111.7	1.846	45.5

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
11.8536	.0887	.0399	577.3888	
10.6980	.0789	.0415	271.7477	
10.3218	.0758	.0417	211.1092	
10.0046	.0732	.0419	170.5637	
9.8372	.0718	.0420	151.6285	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	5.7319	.9927	1.3842	268.6318
	5.9362	2.1844	1.2999	243.8661
	5.9749	2.8303	1.2739	235.8252
	5.9933	3.5138	1.2526	229.0474
	6.0065	3.9614	1.2413	225.4827

---

## CORRIDA 20

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	7.000	156.1	2.202	53.8
.7	95.000	5.600	127.9	2.130	52.2
1.2	95.000	5.180	119.2	2.107	51.6
1.7	95.000	4.930	114.0	2.095	51.3
2.2	95.000	4.690	108.9	2.082	51.0

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
14.8862	.1156	.0674	559.9551	
13.7231	.1050	.0692	253.8953	
13.3677	.1019	.0698	193.8328	
13.1853	.1002	.0705	163.6834	
12.9900	.0985	.0710	138.2813	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	9.2910	1.6592	1.4377	342.9993
	9.5109	3.7460	1.3467	316.8091
	9.5906	4.9479	1.3187	308.9194
	9.6757	5.9112	1.3025	304.9667
	9.7382	7.0423	1.2864	300.6923

---

## CORRIDA 21

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	4.060	95.5	1.839	45.3
.7	95.000	3.190	76.3	1.763	43.5
1.2	95.000	2.890	69.6	1.735	42.9
1.7	95.000	2.490	60.5	1.692	41.8
2.2	95.000	2.320	56.6	1.676	41.5

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
9.7484	.0711	.0482	85.9700	5.9215
8.8849	.0642	.0492	40.7635	.4675
8.5832	.0618	.0496	30.6274	.2959
8.1364	.0583	.0498	20.3748	.1698
7.9751	.0570	.0501	16.9645	.1352

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
.0081	6.8380	7.9539	1.2002	224.8598
.1053	6.9643	17.0848	1.1395	206.5218
.1675	7.0139	22.9008	1.1182	200.1443
.2930	7.0377	34.5412	1.0888	190.6480
.3706	7.0837	41.7558	1.0765	187.2741

---

## CORRIDA 22

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.525	146.7	1.902	46.8
.7	95.000	4.840	112.1	1.764	43.6
1.2	95.000	4.300	100.6	1.710	42.3
1.7	95.000	3.600	85.4	1.636	40.5
2.2	95.000	3.550	84.3	1.632	40.4

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
10.5211	.0775	.0330	435.4563	
8.9023	.0643	.0338	153.7675	
8.3278	.0598	.0339	103.6451	
7.5906	.0540	.0341	58.7773	1.0093
7.5524	.0537	.0343	56.2914	.9045

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	4.7862	1.0991	1.3359	238.3125
	4.9022	3.1880	1.2274	204.0082
	4.9043	4.7318	1.1909	191.8744
.0338	4.9381	8.4014	1.1429	176.3895
.0379	4.9583	8.8083	1.1396	175.6103

---

## CORRIDA 23

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	9.720	208.2	2.122	52.0
.7	95.000	6.950	155.1	1.959	48.2
1.2	95.000	6.260	141.4	1.907	46.9
1.7	95.000	5.180	119.2	1.818	44.8
2.2	95.000	4.980	115.0	1.803	44.5

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
13.5987	.1039	.0341	1839.9028	
11.2570	.0836	.0357	545.7297	
10.5840	.0780	.0358	375.7579	
9.5092	.0692	.0360	193.8328	
9.3373	.0678	.0363	169.4018	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	4.9335	.2681	1.5341	305.9026
	5.1606	.9456	1.3684	254.7463
	5.1647	1.3745	1.3245	240.2322
	5.1927	2.6789	1.2542	217.2955
	5.2356	3.0906	1.2414	213.7015

---



## CORRIDA 24

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.645	149.1	2.090	51.2
.7	95.000	5.440	124.6	2.018	49.5
1.2	95.000	5.180	119.2	2.000	49.1
1.7	95.000	4.920	113.8	1.982	48.7
2.2	95.000	4.900	113.4	1.981	48.7

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
13.1099	.0996	.0544	464.7189	
12.0628	.0905	.0557	229.5435	
11.8121	.0883	.0559	193.8328	
11.5657	.0862	.0561	162.5579	
11.5521	.0861	.0562	160.3247	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	7.6437	1.6448	1.3874	299.6198
	7.8137	3.4040	1.3096	276.6681
	7.8324	4.0408	1.2921	271.1808
	7.8599	4.8351	1.2746	265.8192
	7.8683	4.9077	1.2734	265.5360

---

## CORRIDA 25

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.625	148.7	2.100	51.5
.7	95.000	4.915	113.7	1.988	48.8
1.2	95.000	4.800	111.3	1.984	48.7
1.7	95.000	4.200	98.5	1.939	47.7
2.2	95.000	4.000	94.2	1.924	47.3

PWSU(KPa)	YSU(Kq/Kq)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
13.2611	.1009	.0559	459.7422	
11.6473	.0869	.0569	161.9973	
11.5928	.0864	.0575	149.5127	
10.9941	.0814	.0578	95.9683	
10.8002	.0798	.0580	81.9555	3.9078

GS	PW(KPa)	UR(X)	V(m3/Kg)	H(KJ/Kg)
	7.8392	1.7051	1.3892	303.3490
	7.9585	4.9127	1.2757	267.7749
	8.0336	5.3732	1.2688	266.7056
	8.0820	8.4215	1.2273	253.6999
.0149	8.1095	9.8950	1.2134	249.5271

---

## CORRIDA 26

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.635	148.9	2.120	51.9
.7	95.000	5.050	116.5	2.020	49.6
1.2	95.000	4.750	110.2	2.000	49.1
1.7	95.000	4.160	97.6	1.958	48.1
2.2	95.000	3.920	92.4	1.944	47.8

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
13.5677	.1036	.0586	462.2255	
12.0909	.0907	.0596	177.6652	
11.8121	.0883	.0599	144.3231	
11.2437	.0835	.0604	93.0256	29.3050
11.0593	.0819	.0611	76.8244	2.6290

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	8.1793	1.7696	1.3953	310.8502
	8.3015	4.6725	1.2901	278.1229
	8.3413	5.7796	1.2698	272.0432
.0021	8.4129	9.0436	1.2292	259.6956
.0233	8.5009	11.0654	1.2132	255.8144

---

## CORRIDA 27

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.700	150.2	1.956	48.1
.7	95.000	4.970	114.8	1.828	45.1
1.2	95.000	4.410	103.0	1.776	43.8
1.7	95.000	4.210	98.7	1.780	43.9
2.2	95.000	4.000	94.2	1.766	43.6

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
11.2172	.0833	.0375	478.6132	
9.6253	.0701	.0388	168.2459	
9.0343	.0654	.0389	112.6360	
9.0787	.0657	.0411	96.7153	
8.9242	.0645	.0417	81.9555	3.9078

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	5.3968	1.1276	1.3562	254.2524
	5.5806	3.3169	1.2455	220.3298
	5.5854	4.9588	1.2075	207.7638
	5.8856	6.0855	1.1978	209.1337
.0107	5.9714	7.2862	1.1843	205.9728

---

## CORRIDA 28

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.690	150.0	1.931	47.5
.7	95.000	5.440	124.6	1.836	45.3
1.2	95.000	5.290	121.5	1.826	45.0
1.7	95.000	4.680	108.7	1.772	43.7
2.2	95.000	4.620	107.5	1.769	43.7

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
10.8903	.0805	.0348	476.0641	
9.7190	.0709	.0355	229.5435	
9.6020	.0699	.0358	208.3772	
8.9901	.0650	.0360	137.2937	
8.9571	.0647	.0363	131.4827	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	5.0278	1.0561	1.3500	246.6194
	5.1239	2.2322	1.2704	221.6623
	5.1678	2.4800	1.2611	219.2338
	5.2005	3.7879	1.2207	206.2842
	5.2362	3.9824	1.2171	205.6343

---

## CORRIDA 29

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.650	149.2	2.023	49.7
.7	95.000	5.170	119.0	1.925	47.4
1.2	95.000	4.520	105.3	1.876	46.2
1.7	95.000	4.110	96.5	1.842	45.4
2.2	95.000	3.975	93.6	1.831	45.1

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
12.1332	.0911	.0458	465.9693	
10.8131	.0799	.0472	192.5504	
10.1988	.0748	.0479	122.2247	
9.7898	.0715	.0481	89.4473	10.0193
9.6603	.0704	.0483	80.3239	3.4042

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	6.5142	1.3980	1.3700	276.0396
	6.7052	3.4823	1.2750	247.5532
	6.7865	5.5525	1.2316	234.4232
.0048	6.8255	7.6307	1.2035	225.6962
.0142	6.8465	8.5236	1.1943	222.9546

---

## CORRIDA 30

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.593	148.0	1.812	44.7
.7	95.000	5.250	120.7	1.698	42.0
1.2	95.000	5.050	116.5	1.680	41.6
1.7	95.000	4.570	106.4	1.629	40.4
2.2	95.000	4.470	104.3	1.620	40.1

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
9.4402	.0686	.0234	451.8628	
8.2044	.0588	.0244	202.9946	
8.0221	.0574	.0246	177.6652	
7.5238	.0535	.0247	126.7879	
7.4386	.0528	.0249	117.7904	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	3.4411	.7615	1.3205	213.3625
	3.5857	1.7664	1.2367	187.5404
	3.6161	2.0354	1.2240	183.7571
	3.6250	2.8591	1.1923	173.3295
	3.6500	3.0987	1.1860	171.5766

---

## CORRIDA 31

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.695	150.1	1.886	46.4
.7	95.000	5.380	123.4	1.784	44.0
1.2	95.000	5.010	115.7	1.753	43.3
1.7	95.000	4.680	108.7	1.722	42.6
2.2	95.000	4.570	106.4	1.712	42.3

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
10.3218	.0758	.0299	477.3374	
9.1232	.0661	.0310	220.8883	
8.7827	.0634	.0313	172.9061	
8.4527	.0607	.0315	137.2937	
8.3485	.0599	.0316	126.7879	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	4.3583	.9130	1.3403	233.4107
	4.5035	2.0388	1.2578	208.1303
	4.5552	2.6345	1.2340	201.0020
	4.5763	3.3332	1.2123	194.0688
	4.5913	3.6212	1.2051	191.8922

---



## CORRIDA 32

Z(m)	P(KPa)	ETBS(mV)	TBS(°C)	ETBU(mV)	TBU(°C)
0.0	95.000	6.730	150.8	1.951	48.0
.7	95.000	5.410	124.0	1.857	45.8
1.2	95.000	5.350	122.8	1.855	45.7
1.7	95.000	4.920	113.8	1.818	44.8
2.2	95.000	4.850	112.3	1.816	44.8

PWSU(KPa)	YSU(Kg/Kg)	Y(Kg/Kg)	PWSS(KPa)	YSS(Kg/Kg)
11.1512	.0827	.0366	486.3220	
9.9685	.0729	.0378	225.1841	
9.9445	.0727	.0382	216.6557	
9.5092	.0692	.0383	162.5579	
9.4862	.0690	.0387	154.8457	

GS	PW(KPa)	UR(%)	V(m <sup>3</sup> /Kg)	H(KJ/Kg)
	5.2861	1.0869	1.3564	252.6509
	5.4484	2.4195	1.2730	227.4638
	5.4922	2.5350	1.2697	227.0157
	5.5072	3.3879	1.2411	217.7497
	5.5658	3.5944	1.2372	217.3431

---

APÊNDICE C

LISTAGEM DO PROGRAMA EMPREGADO NA SIMULAÇÃO

```

0      SIMULACAO DO SECADOR PNEUMATICO
0
      DIMENSION C(4, 10), X(10), F(10), Y(10), TITULO(12)
      COMMON/A/DP, ROG, DAB, XMIG, CPG, XKG, VS, VG, TGO, ROGO, TBU
      COMMON/H1/WS, ROS, WG, CPV, CPS, CPL, G, S, HW, D, P, V
      CALL IFILE(22, 'SSPV')
      READ(22, 5) (TITULO(I), I=1, 12)
5      FORMAT(12A5)
      WRITE(5, 15) (TITULO(I), I=1, 12)
15     FORMAT(77, 30X, 12A5, 77)
      READ(22, 10) ROS, DP, CPS, WS, WG, TGO, V, TBU
10     FORMAT(8G)
      K=4
      P=95000.
      G=9. 81
      ROGO=1. /V
      D=0. 0525
      CPL=4190.
      DAB=3. 86E-5
      XKG=0. 031
      CPG=1009. 8
      CPV=1890
      READ(22, 20) Z0, Z, XNDI
20     FORMAT(3G)
      READ(22, 30) (X(I), I=1, K)
30     FORMAT(4G)
      N=5
      S=3. 1426*(D**2. )/4.
      VS=WS/(S*ROS)
      VG=WG/(S*ROGO)
      X(S)=VG-VS
      WRITE(5, 40)
40     FORMAT(5X, 'Z(M)', 4X, 'X(KG/KG)', 4X, 'V(KG/KG)', 4X, 'TG(C)'/
      1, 4X, 'TSC(C)', 4X, 'VREL(M/S)', 7)
      WRITE(5, 50) Z0, (X(I), I=1, N)
50     FORMAT(F8. 1, F12. 4, F12. 4, F10. 1, F9. 1, F11. 2)
      PASSO=(Z-Z0)/XNDI
      J=0
65     CALL RKGILL(Z0, PASSO, N, X, F)
      J=J+1
      NDI=IFIX(XNDI)
      IF(J. EQ. (NDI/10)) GO TO 55
      GO TO 80
85     WRITE(5, 60) Z0, (X(I), I=1, N)
60     FORMAT(F8. 1, F12. 4, F12. 4, F10. 1, F9. 1, F11. 2)
      J=0
88     IF(Z0. LT. Z) GO TO 65

```

```

70      WRITE(5, 70)
        FORMAT(77, 5X, (S9C-' '), 77)
        STOP
        END

C
C      SUBROTINA RUNGE-KUTTA-GILL DE QUARTA ORDEM
C
        SUBROUTINE RKGILL(Z0, PASSO, N, X, F)
        DIMENSION C(4, 10), X(10), F(10), Y(10)
        DO 10 I=1, N
            Y(I)=X(I)
10         CONTINUE
            Z1=Z0
            CALL FUNC(X, F)
            DO 20 I=1, N
                C(1, I)=PASSO*F(I)
                X(I)=X(I)+C(1, I)/2.
20         CONTINUE
            Z0=Z0+PASSO/2.
            CALL FUNC(X, F)
            DO 30 I=1, N
                C(2, I)=PASSO*F(I)
                X(I)=Y(I)+((2. **0. 5)-1. ) *C(1, I)/2. +(2. -(2. **0. 5)) *C(2, I)/
30         CONTINUE
            CALL FUNC(X, F)
            DO 40 I=1, N
                C(3, I)=PASSO*F(I)
                X(I)=Y(I)-((2. **0. 5)*C(2, I)/2. +C(2. **0. 5)/2. +1. ) *C(3, I)
40         CONTINUE
            Z0=Z1+PASSO
            CALL FUNC(X, F)
            DO 50 I=1, N
                C(4, I)=PASSO*F(I)
                X(I)=Y(I)+((C(1, I)+C(4, I))/6. +(2. -(2. **0. 5)) *C(2, I)/2. +((2
50         CONTINUE
            IF(X(1). GT. 0. ) GO TO 85
            X(1)=0.
85         RETURN
        END

C
C      CALCULO DAS PROPRIEDADES FISICAS
C
        SUBROUTINE FUNC(X, F)
        DIMENSION F(10), X(10)

```

```

COMMON/PA/ DP, ROG, DAB, XMIG, CPG, XKG, VS, VG, TGO, ROGO, TBU
COMMON/PI/ NS, POS, WG, CPV, CPS, CPL, G, S, HV, D, P, V
TSK=273.15+X(4)
TGO=273.15+X(3)
ROG=ROGO*((TGO+273.15)/TGO)*((1+X(2)))/(1+X(2))*1.6078))
XMIG=3.9895E-8*TGO+0.6644E-5
HV=2.2567E6*((1-TSK/647.3)/0.42353)**0.38
REP=(DP*ROG*X(5))/XMIG
IF(REP.LT.2.)GO TO 100
IF(REP.LT.500.)GO TO 110
IF(REP.GT.500.)GO TO 200
100 CD=24./REP
GO TO 210
110 CD=18.5/(REP**0.6)
GO TO 210
200 CD=0.44
210 PR=(XMIG*CPG)/XKG
SC=XMIG/(ROG*DAB)
H=(2.+1.3*(PR**0.15)+(0.66*(PR**0.31)*(REP**0.5)))*(XKG/DP)
XKY=H/CPG*((PR/SC)**(2./3.))
A=(6.*ROG*NS)/(DP*ROS*WG)
CPGM=CPG+X(2)*CPV
CPSM=CPS+X(1)*CPL
C
C DEFINICAO DAS EQUACOES DIFERENCIAIS
C
F(5)=(XG*(ROS-ROG))/ROS-(3.*ROG*CD*X(5)*X(5))/(4.*ROS*DP)
1/V5
AS=89.63121+0.02399897*TSK-1.1654551E-5*(TSK**2.)
BS=-1.281033E-8*(TSK**3.)+2.0998405E-11*(TSK**4.)
CS=(-7511.52/TSK)-12.150799*2.303*ALOG10(TSK)
PWSU=1000.*EXP(AS+BS+CS)
VS=0.62198*(PWSU/(P-PWSU))
IF(VS.GT.X(2))GO TO 112
TUK=273.15+TBU
AS1=89.63121+0.02399897*TUK-1.1654551E-5*(TUK**2.)
BS1=-1.281033E-8*(TUK**3.)+2.0998405E-11*(TUK**4.)
CS1=(-7511.52/TUK)-12.150799*2.303*ALOG10(TUK)
PWSU1=1000.*EXP(AS1+BS1+CS1)
VS1=0.62198*(PWSU1/(P-PWSU1))
F(2)=(6.*ROG*NS*XKY*(VS1-X(2))*S)/(DP*ROS*WG*WG)
F(1)=-(WG/NS)*F(2)
GO TO 113
112 F(2)=(6.*ROG*NS*XKY*(VS-X(2))*S)/(DP*ROS*WG*WG)
F(1)=-(WG/NS)*F(2)
113 IF(X(1).LE.0.)GO TO 95
F(3)=-((CH*A*(X(3)-X(4)))-(XKY*A*(VS-X(2))*CPV*X(4))*S)/
1(WG*CPGM)-(CPV*X(3)+HV)/CPGM)*F(2)

```

```

F(4) = (CH*(X(3)-X(4)) - XKY*(YS-X(2))*CHV + CPV*X(4)))*A*5) / (WS
1*CPSM) - (CPL*X(4)) / CPSM)*F(1)
95 GO TO 86
F(1) = 0.
F(2) = 0.
F(3) = -((CH*A*(X(3)-X(4)) - XKY*A*(YS-X(2))*CPV*X(4)))*5) /
1*(WG*CPSM)
86 F(4) = (CH*(X(3)-X(4)) - XKY*(YS-X(2))*CHV + CPV*X(4)))*A*5) / (WS
1*CPSM)
IF (F(4) .LT. 0.) GO TO 400
GO TO 96
400 F(4) = 0.
96 RETURN
END

```

APÊNDICE DDADOS DE SAÍDA DAS VARIÁVEIS CALCULADAS NA SIMULAÇÃO

## CORRIDA 1

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0025	0.0247	142.0	23.9	20.38
0.4	0.0000	0.0256	134.0	40.2	1.60
0.8	0.0000	0.0256	129.1	42.7	1.60
1.2	0.0000	0.0256	124.5	42.7	1.60
1.6	0.0000	0.0256	120.1	42.7	1.60
2.0	0.0000	0.0256	115.9	42.7	1.60
2.4	0.0000	0.0256	111.8	42.7	1.60
2.8	0.0000	0.0256	107.9	42.7	1.60
3.2	0.0000	0.0256	104.3	42.7	1.60
3.6	0.0000	0.0256	100.8	42.7	1.60
4.0	0.0000	0.0256	97.4	42.7	1.60

---

## CORRIDA 2

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0055	0.0370	141.8	23.8	20.76
0.4	0.0020	0.0377	137.2	43.3	1.61
0.8	0.0000	0.0381	133.8	46.3	1.61
1.2	0.0000	0.0381	131.4	46.3	1.61
1.6	0.0000	0.0381	129.1	46.3	1.61
2.0	0.0000	0.0381	126.8	46.3	1.61
2.4	0.0000	0.0381	124.6	46.3	1.61
2.8	0.0000	0.0381	122.4	46.3	1.61
3.2	0.0000	0.0381	120.3	46.3	1.61
3.6	0.0000	0.0381	118.2	46.3	1.61
4.0	0.0000	0.0381	116.2	46.3	1.61

---



## CORRIDA 3

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	IG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0069	0.0395	141.2	23.0	20.81
0.4	0.0032	0.0402	136.6	43.5	1.61
0.8	0.0000	0.0408	132.6	46.9	1.61
1.2	0.0000	0.0408	130.3	46.9	1.61
1.6	0.0000	0.0408	128.0	46.9	1.61
2.0	0.0000	0.0408	125.8	46.9	1.61
2.4	0.0000	0.0408	123.7	46.9	1.61
2.8	0.0000	0.0408	121.5	46.9	1.61
3.2	0.0000	0.0408	119.5	46.9	1.61
3.6	0.0000	0.0408	117.5	46.9	1.61
4.0	0.0000	0.0408	115.5	46.9	1.61

---

## CORRIDA 4

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	IG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0045	0.0279	150.0	25.9	21.09
0.4	0.0015	0.0286	144.8	42.4	1.60
0.8	0.0000	0.0289	141.0	44.9	1.60
1.2	0.0000	0.0289	138.0	44.9	1.60
1.6	0.0000	0.0289	135.2	44.9	1.60
2.0	0.0000	0.0289	132.4	44.9	1.60
2.4	0.0000	0.0289	129.6	44.9	1.60
2.8	0.0000	0.0289	126.9	44.9	1.60
3.2	0.0000	0.0289	124.3	44.9	1.60
3.6	0.0000	0.0289	121.8	44.9	1.60
4.0	0.0000	0.0289	119.3	44.9	1.60

---

## CORRIDA 5

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0000	0.0387	149.2	24.7	21.40
0.4	0.0000	0.0397	142.5	44.4	1.61
0.8	0.0000	0.0400	138.2	47.1	1.61
1.2	0.0000	0.0400	134.7	47.2	1.61
1.6	0.0000	0.0400	131.5	47.2	1.61
2.0	0.0000	0.0400	128.2	47.2	1.61
2.4	0.0000	0.0400	125.1	47.2	1.61
2.8	0.0000	0.0400	122.1	47.2	1.61
3.2	0.0000	0.0400	119.1	47.2	1.61
3.6	0.0000	0.0400	116.3	47.2	1.61
4.0	0.0000	0.0400	113.5	47.2	1.61

---

## CORRIDA 6

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0046	0.0501	150.0	24.4	21.81
0.4	0.0007	0.0518	139.8	46.6	1.62
0.8	0.0000	0.0521	134.2	49.3	1.62
1.2	0.0000	0.0521	129.5	49.3	1.62
1.6	0.0000	0.0521	125.0	49.3	1.62
2.0	0.0000	0.0521	120.7	49.3	1.62
2.4	0.0000	0.0521	116.6	49.3	1.62
2.8	0.0000	0.0521	112.7	49.3	1.62
3.2	0.0000	0.0521	109.1	49.3	1.62
3.6	0.0000	0.0521	105.6	49.3	1.62
4.0	0.0000	0.0521	102.2	49.3	1.62

---

## CORRIDA 7

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	IG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0033	0.0270	93.1	23.9	19.44
0.4	0.0017	0.0275	89.1	35.6	1.60
0.8	0.0001	0.0279	86.3	37.9	1.60
1.2	0.0000	0.0279	84.5	38.0	1.60
1.6	0.0000	0.0279	82.7	38.0	1.60
2.0	0.0000	0.0279	80.9	38.0	1.60
2.4	0.0000	0.0279	79.2	38.0	1.60
2.8	0.0000	0.0279	77.6	38.0	1.60
3.2	0.0000	0.0279	76.0	38.0	1.60
3.6	0.0000	0.0279	74.5	38.0	1.60
4.0	0.0000	0.0279	73.0	38.0	1.60

---

## CORRIDA 8

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	IG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0058	0.0352	140.3	24.7	21.86
0.4	0.0005	0.0361	133.7	42.5	1.61
0.8	0.0000	0.0363	129.9	45.4	1.61
1.2	0.0000	0.0363	126.4	45.5	1.61
1.6	0.0000	0.0363	123.1	45.5	1.61
2.0	0.0000	0.0363	119.9	45.5	1.61
2.4	0.0000	0.0363	116.9	45.5	1.61
2.8	0.0000	0.0363	114.0	45.5	1.61
3.2	0.0000	0.0363	111.1	45.5	1.61
3.6	0.0000	0.0363	108.3	45.5	1.61
4.0	0.0000	0.0363	105.5	45.5	1.61

---

## CORRIDA 9

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0053	0.0304	213.9	24.4	26.02
0.4	0.0050	0.0373	207.2	48.0	1.60
0.8	0.0050	0.0373	203.4	52.4	1.60
1.2	0.0050	0.0373	199.6	52.6	1.60
1.6	0.0050	0.0373	196.0	52.6	1.60
2.0	0.0050	0.0373	192.4	52.6	1.60
2.4	0.0050	0.0373	188.9	52.6	1.60
2.8	0.0050	0.0373	185.4	52.6	1.61
3.2	0.0050	0.0373	182.0	52.6	1.61
3.6	0.0050	0.0373	178.7	52.6	1.61
4.0	0.0050	0.0373	175.4	52.6	1.61

## CORRIDA 10

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0044	0.0242	162.4	26.1	28.31
0.4	0.0026	0.0245	159.0	40.5	1.60
0.8	0.0000	0.0250	155.4	44.9	1.60
1.2	0.0000	0.0250	153.2	45.4	1.60
1.6	0.0000	0.0250	151.1	45.5	1.60
2.0	0.0000	0.0250	148.9	45.5	1.60
2.4	0.0000	0.0250	146.8	45.5	1.60
2.8	0.0000	0.0250	144.8	45.5	1.60
3.2	0.0000	0.0250	142.7	45.5	1.60
3.6	0.0000	0.0250	140.7	45.5	1.60
4.0	0.0000	0.0250	138.8	45.5	1.60

## CORRIDA 11

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0035	0.0229	160.9	24.2	21.89
0.4	0.0007	0.0233	157.3	41.6	1.59
0.8	0.0000	0.0234	154.8	44.9	1.60
1.2	0.0000	0.0234	152.6	45.1	1.60
1.6	0.0000	0.0234	150.5	45.1	1.60
2.0	0.0000	0.0234	148.4	45.1	1.60
2.4	0.0000	0.0234	146.3	45.1	1.60
2.8	0.0000	0.0234	144.3	45.1	1.60
3.2	0.0000	0.0234	142.2	45.1	1.60
3.6	0.0000	0.0234	140.3	45.1	1.60
4.0	0.0000	0.0234	138.3	45.1	1.60

## CORRIDA 12

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0040	0.0484	163.2	24.5	13.65
0.4	0.0000	0.0506	144.5	49.8	1.62
0.8	0.0000	0.0506	133.7	49.8	1.62
1.2	0.0000	0.0506	123.9	49.8	1.62
1.6	0.0000	0.0506	115.1	49.8	1.62
2.0	0.0000	0.0506	107.2	49.8	1.62
2.4	0.0000	0.0506	100.1	49.8	1.62
2.8	0.0000	0.0506	93.9	49.8	1.62
3.2	0.0000	0.0506	88.4	49.8	1.62
3.6	0.0000	0.0506	83.5	49.8	1.62
4.0	0.0000	0.0506	79.3	49.8	1.62

## CORRIDA 13

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0065	0.0474	93.7	26.8	17.87
0.4	0.0051	0.0477	92.2	33.9	4.44
0.8	0.0042	0.0480	90.9	38.6	4.44
1.2	0.0040	0.0480	90.1	41.3	4.44
1.6	0.0034	0.0482	89.2	42.8	4.44
2.0	0.0027	0.0484	88.2	43.6	4.44
2.4	0.0018	0.0486	87.2	44.0	4.44
2.8	0.0009	0.0488	86.1	44.2	4.44
3.2	0.0000	0.0490	85.1	44.3	4.44
3.6	0.0000	0.0490	84.6	44.3	4.44
4.0	0.0000	0.0490	84.1	44.3	4.44

## CORRIDA 14

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0065	0.0488	204.5	23.4	23.31
0.4	0.0044	0.0493	201.7	33.6	4.42
0.8	0.0030	0.0497	199.4	41.5	4.42
1.2	0.0025	0.0498	197.7	47.0	4.42
1.6	0.0013	0.0501	195.8	50.6	4.42
2.0	0.0000	0.0504	193.7	52.6	4.42
2.4	0.0000	0.0504	192.6	53.3	4.42
2.8	0.0000	0.0504	191.4	53.7	4.42
3.2	0.0000	0.0504	190.3	53.8	4.42
3.6	0.0000	0.0504	189.2	53.8	4.42
4.0	0.0000	0.0504	188.0	53.8	4.42

## CORRIDA 15

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0073	0.0289	144.0	23.9	19.76
0.4	0.0057	0.0291	142.8	31.1	4.38
0.8	0.0054	0.0292	142.0	36.3	4.38
1.2	0.0046	0.0293	141.2	40.0	4.38
1.6	0.0034	0.0294	140.2	42.3	4.38
2.0	0.0020	0.0296	139.1	43.8	4.38
2.4	0.0004	0.0298	138.1	44.6	4.38
2.8	0.0000	0.0299	137.4	44.8	4.38
3.2	0.0000	0.0299	136.9	44.8	4.38
3.6	0.0000	0.0299	136.3	44.8	4.38
4.0	0.0000	0.0299	135.8	44.8	4.39

## CORRIDA 16

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0073	0.0520	145.6	25.7	20.54
0.4	0.0050	0.0527	142.1	34.7	4.44
0.8	0.0042	0.0532	139.1	41.2	4.44
1.2	0.0038	0.0534	137.2	45.3	4.45
1.6	0.0029	0.0538	134.9	47.6	4.45
2.0	0.0010	0.0543	132.4	48.9	4.45
2.4	0.0002	0.0548	129.8	49.5	4.45
2.8	0.0000	0.0549	128.3	49.6	4.45
3.2	0.0000	0.0549	127.0	49.6	4.45
3.6	0.0000	0.0549	125.8	49.6	4.45
4.0	0.0000	0.0549	124.6	49.6	4.45

## CORRIDA 17

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0078	0.0537	156.5	25.4	19.91
0.4	0.0059	0.0542	153.8	35.3	4.45
0.8	0.0045	0.0546	151.5	42.4	4.45
1.2	0.0040	0.0548	150.0	46.7	4.45
1.6	0.0029	0.0551	148.1	49.2	4.45
2.0	0.0014	0.0555	146.0	50.4	4.45
2.4	0.0000	0.0559	144.0	51.0	4.45
2.8	0.0000	0.0559	143.0	51.0	4.45
3.2	0.0000	0.0559	142.0	51.0	4.45
3.6	0.0000	0.0559	141.0	51.0	4.45
4.0	0.0000	0.0559	140.0	51.0	4.45

---

## CORRIDA 18

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0079	0.0470	157.3	24.7	29.30
0.4	0.0065	0.0472	156.0	31.4	4.43
0.8	0.0052	0.0475	154.8	36.9	4.43
1.2	0.0047	0.0476	153.9	41.1	4.43
1.6	0.0043	0.0477	153.2	44.2	4.43
2.0	0.0037	0.0478	152.3	46.5	4.43
2.4	0.0028	0.0479	151.4	48.0	4.43
2.8	0.0018	0.0481	150.4	49.0	4.43
3.2	0.0007	0.0483	149.3	49.6	4.43
3.6	0.0000	0.0485	148.5	49.9	4.43
4.0	0.0000	0.0485	148.0	49.9	4.43

---



## CORRIDA 19

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0074	0.0399	157.3	24.9	22.13
0.4	0.0056	0.0402	155.7	32.8	4.41
0.8	0.0048	0.0404	154.5	38.8	4.41
1.2	0.0043	0.0405	153.5	42.9	4.41
1.6	0.0033	0.0406	152.4	45.6	4.41
2.0	0.0020	0.0409	151.1	47.2	4.41
2.4	0.0005	0.0411	149.8	48.2	4.41
2.8	0.0000	0.0412	148.9	48.5	4.41
3.2	0.0000	0.0412	148.3	48.5	4.41
3.6	0.0000	0.0412	147.6	48.5	4.41
4.0	0.0000	0.0412	147.0	48.5	4.41

## CORRIDA 20

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0193	0.0674	156.1	25.1	22.98
0.4	0.0178	0.0677	154.7	34.5	4.48
0.8	0.0162	0.0679	153.3	41.8	4.48
1.2	0.0153	0.0681	152.3	46.8	4.48
1.6	0.0148	0.0682	151.5	50.0	4.48
2.0	0.0138	0.0684	150.5	51.8	4.48
2.4	0.0125	0.0686	149.4	52.9	4.48
2.8	0.0111	0.0689	148.2	53.4	4.48
3.2	0.0096	0.0691	147.1	53.7	4.48
3.6	0.0081	0.0694	145.9	53.8	4.48
4.0	0.0065	0.0697	144.7	53.9	4.48

## CORRIDA 21

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	IG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0055	0.0482	76.5	24.3	18.18
0.4	0.0030	0.0487	75.1	34.1	3.53
0.8	0.0029	0.0490	71.1	39.9	3.53
1.2	0.0033	0.0492	69.8	42.6	3.53
1.6	0.0014	0.0495	68.3	43.9	3.53
2.0	0.0033	0.0498	66.5	44.4	3.53
2.4	0.0031	0.0499	65.5	44.4	3.53
2.8	0.0031	0.0499	64.8	44.4	3.53
3.2	0.0031	0.0499	64.3	44.4	3.53
3.6	0.0031	0.0499	63.3	44.4	3.53
4.0	0.0031	0.0499	62.5	44.4	3.53

-----



CAMP

## CORRIDA 22

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	IG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0055	0.0330	146.7	25.9	20.23
0.4	0.0038	0.0333	144.6	34.9	3.49
0.8	0.0031	0.0335	143.2	40.6	3.49
1.2	0.0017	0.0337	141.4	43.8	3.49
1.6	0.0000	0.0341	139.6	45.3	3.50
2.0	0.0000	0.0341	138.6	45.7	3.50
2.4	0.0000	0.0341	137.7	45.9	3.50
2.8	0.0000	0.0341	136.7	45.9	3.50
3.2	0.0000	0.0341	135.7	45.9	3.50
3.6	0.0000	0.0341	134.8	45.9	3.50
4.0	0.0000	0.0341	133.9	45.9	3.50

-----

CORRIDA 23

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	IG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0055	0.0341	208.2	25.7	23.24
0.4	0.0037	0.0345	205.7	36.8	3.48
0.8	0.0028	0.0346	203.8	44.3	3.48
1.2	0.0010	0.0350	201.6	48.8	3.48
1.6	0.0000	0.0352	199.8	50.8	3.49
2.0	0.0000	0.0352	198.5	51.5	3.49
2.4	0.0000	0.0352	197.2	51.8	3.49
2.8	0.0000	0.0352	196.0	51.8	3.49
3.2	0.0000	0.0352	194.7	51.8	3.49
3.6	0.0000	0.0352	193.5	51.8	3.49
4.0	0.0000	0.0352	192.2	51.8	3.49

---

CORRIDA 24

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	IG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0087	0.0544	149.1	25.9	25.92
0.4	0.0059	0.0547	147.7	35.5	3.54
0.8	0.0055	0.0549	146.4	42.3	3.54
1.2	0.0050	0.0550	145.6	46.5	3.54
1.6	0.0040	0.0551	144.6	48.9	3.54
2.0	0.0025	0.0554	143.4	50.1	3.54
2.4	0.0009	0.0556	142.3	50.8	3.54
2.8	0.0000	0.0558	141.3	51.0	3.54
3.2	0.0000	0.0558	140.8	51.0	3.54
3.6	0.0000	0.0558	140.2	51.0	3.54
4.0	0.0000	0.0558	139.7	51.0	3.54

---

## CORRIDA 25

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0087	0.0559	148.7	24.8	25.95
0.4	0.0069	0.0563	146.8	34.7	3.54
0.8	0.0053	0.0566	145.0	42.0	3.54
1.2	0.0049	0.0567	143.9	46.4	3.54
1.6	0.0039	0.0569	142.6	48.9	3.54
2.0	0.0025	0.0572	141.2	50.2	3.54
2.4	0.0019	0.0575	139.6	50.9	3.54
2.8	0.0010	0.0577	138.4	51.1	3.54
3.2	0.0000	0.0577	137.7	51.1	3.54
3.6	0.0000	0.0577	137.0	51.1	3.54
4.0	0.0000	0.0577	136.3	51.1	3.54

---

## CORRIDA 26

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0087	0.0586	148.9	24.9	26.07
0.4	0.0070	0.0591	146.5	35.0	3.55
0.8	0.0052	0.0595	144.2	42.4	3.55
1.2	0.0048	0.0596	142.9	46.9	3.55
1.6	0.0039	0.0599	141.3	49.4	3.55
2.0	0.0026	0.0603	139.4	50.7	3.55
2.4	0.0019	0.0607	137.5	51.3	3.55
2.8	0.0000	0.0609	136.0	51.5	3.55
3.2	0.0000	0.0609	135.1	51.5	3.55
3.6	0.0000	0.0609	134.2	51.5	3.55
4.0	0.0000	0.0609	133.3	51.5	3.55

---

## CORRIDA 27

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0078	0.0375	150.2	25.1	21.94
0.4	0.0056	0.0378	148.5	34.5	3.50
0.8	0.0051	0.0379	147.5	40.6	3.50
1.2	0.0040	0.0381	146.3	44.3	3.50
1.6	0.0024	0.0383	144.9	46.3	3.50
2.0	0.0004	0.0386	143.5	47.3	3.50
2.4	0.0000	0.0387	142.6	47.5	3.50
2.8	0.0000	0.0387	141.9	47.5	3.50
3.2	0.0000	0.0387	141.2	47.5	3.50
3.6	0.0000	0.0387	140.5	47.5	3.50
4.0	0.0000	0.0387	139.8	47.5	3.50

---

## CORRIDA 28

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0078	0.0348	150.0	24.5	28.44
0.4	0.0061	0.0350	148.9	31.9	3.50
0.8	0.0055	0.0351	148.3	37.4	3.50
1.2	0.0049	0.0351	147.6	41.2	3.50
1.6	0.0040	0.0352	146.9	43.8	3.50
2.0	0.0027	0.0354	146.1	45.4	3.50
2.4	0.0012	0.0356	145.2	46.4	3.50
2.8	0.0000	0.0357	144.4	46.9	3.50
3.2	0.0000	0.0357	144.0	46.9	3.50
3.6	0.0000	0.0357	143.5	46.9	3.50
4.0	0.0000	0.0357	143.1	46.9	3.50

---

## CORRIDA 29

Z(B)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0101	0.0458	149.2	25.9	20.75
0.4	0.0101	0.0460	148.1	36.1	3.52
0.8	0.0133	0.0461	147.3	42.7	3.52
1.2	0.0121	0.0462	146.5	46.4	3.52
1.6	0.0104	0.0464	145.7	48.3	3.52
2.0	0.0083	0.0466	144.7	49.2	3.52
2.4	0.0061	0.0468	143.7	49.6	3.52
2.8	0.0038	0.0470	142.7	49.8	3.52
3.2	0.0015	0.0472	141.7	49.8	3.52
3.6	0.0000	0.0474	140.9	49.8	3.52
4.0	0.0000	0.0474	140.5	49.8	3.52

## CORRIDA 30

Z(N)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	TG(C)	TS(C)	VREL(N/S)
0.0	0.0049	0.0234	148.0	25.7	20.00
0.4	0.0043	0.0235	146.7	33.5	3.47
0.8	0.0033	0.0237	145.2	38.6	3.47
1.2	0.0016	0.0239	143.6	41.6	3.47
1.6	0.0000	0.0242	142.0	43.1	3.47
2.0	0.0000	0.0242	141.1	43.5	3.47
2.4	0.0000	0.0242	140.3	43.7	3.47
2.8	0.0000	0.0242	139.4	43.7	3.48
3.2	0.0000	0.0242	138.5	43.7	3.48
3.6	0.0000	0.0242	137.6	43.7	3.48
4.0	0.0000	0.0242	136.8	43.7	3.48

## CORRIDA 31

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0057	0.0299	150.1	24.9	24.22
0.4	0.0064	0.0301	148.8	31.1	4.38
0.8	0.0072	0.0302	146.0	35.0	4.38
1.2	0.0077	0.0303	147.2	39.4	4.38
1.6	0.0024	0.0304	146.2	41.9	4.39
2.0	0.0018	0.0306	145.2	43.6	4.39
2.4	0.0005	0.0308	144.1	44.7	4.39
2.8	0.0000	0.0309	143.3	45.2	4.39
3.2	0.0000	0.0309	142.7	45.4	4.39
3.6	0.0000	0.0309	142.2	45.5	4.39
4.0	0.0000	0.0309	141.6	45.6	4.39

## CORRIDA 32

Z(M)	X(KG/KG)	Y(KG/KG)	FG(C)	TS(C)	VREL(M/S)
0.0	0.0058	0.0366	150.9	25.0	24.70
0.4	0.0038	0.0370	148.8	33.5	3.50
0.8	0.0033	0.0371	147.6	39.4	3.50
1.2	0.0025	0.0372	146.3	43.2	3.50
1.6	0.0011	0.0375	144.8	45.5	3.50
2.0	0.0000	0.0377	143.5	46.6	3.50
2.4	0.0000	0.0377	142.7	46.9	3.50
2.8	0.0000	0.0377	141.9	47.1	3.50
3.2	0.0000	0.0377	141.1	47.1	3.50
3.6	0.0000	0.0377	140.3	47.1	3.50
4.0	0.0000	0.0377	139.5	47.1	3.50

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ABRAMS, D.S.; MASSALDI, H.A.; PRAUSNITZ, J.M. Ind. Eng. Chem. Fundam., 13: 259, 1974.
- 2 - AGRAWAL, K.K. & RAO, H.V. A Computer model of psychrometric properties of air. Transactions of the ASAE, 17 (1): 67-73, 1974.
- 3 - ANDRIEU, J. & BRESSAT, R. Experimental and theoretical study of a pneumatic dryer. 3rd. Inter. Drying Symp. Birmingham, U.K., p.10, 1982.
- 4 - ASHRAE. Brochure on Psychrometry. New York, ASHRAE Inc., 1977.
- 5 - ASHRAE. Handbook of fundamentals. New York, ASHRAE Inc., 1972.
- 6 - ASHRAE. Standard Methods of measurement of moist air properties. ASHRAE Standard Draft, 1981.
- 7 - BANDROWSKI, J. & KACZMARZYK, G. Gas-to-particle heat transfer in vertical pneumatic conveying of granular materials. Chemical Engineering Science, 33: 1303-1310, 1978.
- 8 - BARR, D.J. Developments in flash drying. In: MUJUMDAR, A. S. Drying'80. New York, Hemisphere Publishing, 1980, v.1.
- 9 - BARR, P.J. & BARR, D.J. Drying. In: RADLEY, J.A. Starch production technology. London, Applied Science Publishers, 1976.
- 10- CHILTON, J.H. & COLBURN, C.P. Mass transfer (absorption) coefficients, prediction from data on heat transfer and fluid friction. Ind. Eng. Chem., 26: 183-187, 1934



- 11 - COGGAN, G.C. Innovation following computer studies in the design of drying plant. Chem. Eng. J., 2: 55-62, 1971.
- 12 - DĂSCĂLESCU, A. Le séchage et ses applications industrielles. Paris, Dunod, 1969.
- 13 - DEBRAND, S. Heat transfer during a flash drying process. Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., 13 (4): 396-404, 1974.
- 14 - GORDON, C.W. Flash drying. Chemical Engineering Progress, 45 (8): 477, 1949.
- 15 - GOVIER, G.W. & AZIZ, K. The flow of complex mixtures in pipes. New York, Robert Krieger publishing, 1977.
- 16 - JEWELL, J.N.; HARPER, D.O.; PLANK, C.A. Pneumatic conveying drying of cut tobacco. In: MUJUMDAR, A.S. Drying '80. New York, Hemisphere Publishing, 1980. v.1.
- 17 - JOHNSTONE, H.F.; PIGFORD, R.L.; CHAPIN, J.H. Heat transfer to clouds of falling particles. Trans. Amer. Inst. Chem. Eng., 37: 95-133, 1941.
- 18 - KENT, A.C.; ROSEN, H.N.; HARI, B.M. Determination of equilibrium moisture content of yellow-poplar sapwood above 100°C with aid of an experimental psychrometer. Wood Sci. and Technol., 15 (2): 93-103, 1981.
- 19 - KENT, A.C. & ROSEN, H.N. Measurement of humidity above temperature of 100°C with a double-wick wet bulb psychrometer. Drying Technology, 1 (1): 141-150, 1983.
- 20 - KLINZING, G.E. Gas-solid transport. New York, Mc Graw-Hill, 1981.

- 21 - KMIEĆ, A.; MIELCZARSKI, S.; PAJAKOWSKA, J. An experimental study on hydrodynamics of a system in a pneumatic flash dryer. Powder Technology, 20: 67-74, 1978.
- 22 - KMIEĆ, A. & MIELCZARSKI, S. Hydrodynamic characteristic of pneumatic flash dryers. In: MUJUNDAR, A.S. Drying'80. New York, Hemisphere Publishing, 1980. v.2.
- 23 - KNEULE, F. Das trocknen, Aarau Switzerland, Verlag Sauerländer, 1969.
- 24 - KRAMERS, H. Heat transfer from spheres to flowing media. Physica, 12 (2-3): 61-80, 1946.
- 25 - KUNII, D. & LEVENSPIEL, O. Fluidization engineering. New York, Robert Krieger Publishing, 1977.
- 26 - LEVA, M. Fluidization. New York, Mc Graw-Hill, 1959.
- 27 - MARTIN, H. & SALEH, A.H. The drying of fine granular material in a pneumatic drier. International Chemical Engineering, 24 (1): 13-22, 1984.
- 28 - MASTERS, K. Flash drying. São Paulo, USP, 1982. (Short course on drying fundamentals and practice, Departamento de Engenharia Química, EPUSP).
- 29 - MATSUMOTO, S. & PEI, D.C.T. A mathematical analysis of pneumatic drying of grains-I. Constant drying rate. Int. J. Heat Mass Transfer, 27 (6): 843-849, 1984.
- 30 - MATSUMOTO, S. & PEI, D.C.T. A mathematical analysis of pneumatic drying of grains-II. Falling rate drying. Int. J. Heat Mass Transfer, 27 (6): 851-855, 1984.
- 31 - MENDES, M.J. "Über die berechnung von stromtrocknern." Verfahrenstechnik, 12 (12): 791-794, 1978.

- 32 - MUJUMDAR, A.S. Drying of granular materials; lecture notes. Montreal, Department of chemical engineering, Mc Gill University, 1981.
- 33 - NEBRA, S.A. Secagem pneumática de bagaço de cana. Tese de Doutorado. Campinas, Departamento de Engenharia Mecânica, FEC, UNICAMP, 1985.
- 34 - NONHEBEL, G. & MOSS, A.A.H. Drying of solids in the chemical industry. London, Butterworth, 1971.
- 35 - ÖZİŞİK, M.N. Basic heat transfer. New York, Mc Graw-Hill, 1975.
- 36 - PERRY, R.H. Chemical engineers' handbook. 5.ed. New York, Mc Graw-Hill, 1973.
- 37 - RIVKIN, S.L. Propriedades termodinamicas de los gases. Moscow, Mir, 1979.
- 38 - SCHMIDT, E. Properties of water and steam in SI-Units. München, Springer-Verlag New York Inc., 1969.
- 39 - SPOFFORD, W.A. Air conditioner cooling and heating capacity and air flow calculated by computer. ASHRAE Transactions, 15 (1): 207-226, 1969.
- 40 - STRUMILLO, C. Podstawy teorii i techniki suszenia. Warszawa, WNT, 1975.
- 41 - THORPE, G.R.; WINT, A.; COGGAN, G.C., The mathematical modelling of industrial pneumatic driers. Trans. Instn. chem. Engrs., 51 : 339-348, 1973.
- 42 - THORPE, G.R. Pneumatic conveying driers. Chemical Industry Developments, p. 13, november, 1975.

- 43 - TOFIK, C.S. Utilização da equação de Clausius-Clapeyron na correlação e predição de propriedades termodinâmicas. Tese de Mestrado. Campinas, Departamento de Engenharia Química, FEC, UNICAMP, 1984.
- 44 - VARGAFTIK, N.B. Tables on the thermophysical properties of liquids and gases. 2.ed., Wiley, 1975.
- 45 - WATSON, K.M. Ind. Eng. Chem., 35: 398, 1943.
- 46 - WEISS, A. Algorithms for the calculation of moist air properties on a hand calculator. Transaction of the ASAE, 20 (6): 1133-1136, 1977.
- 47 - WEXLER, A. & BROMBACHER, W.G. Methods of measuring humidity and testing hygrometers. U.S. NBS Circular 512, 1951.
- 48 - WILHELM, L.R. Numerical calculation of psychrometric properties in SI Units. Transactions of the ASAE, 19 (2): 318-325, 1976.
- 49 - WILLIAMS-GARDNER, A. Industrial drying. London, Leonard Hill, 1971.
- 50 - WORBS, H.E. A friendly microprocessor approach to the determination of the thermodynamic properties of moist air. ASHRAE Transactions, 90 (1A): 46-57, 1984.
- 51 - WORRAL, R.W. Psychrometric determination of relative humidities in air with dry-bulb temperatures exceeding 212<sup>o</sup>F. In: WEXLER, A. Humidity and moisture measurements and control in science and industry. Washington D.C., International Symposium on Humidity and Moisture, 1963, v.1.

- 52 - YANG, W.C. Estimating the solid particle velocity in vertical pneumatic conveying lines. Ind. Eng. Chem. Fundam. 12 (3): 349-352, 1953.
- 53 - ZIMMERMAN, O.T. & LAVINE, I. Industrial research service's psychrometric tables and charts. Dover, Industrial Research Service, 1964.