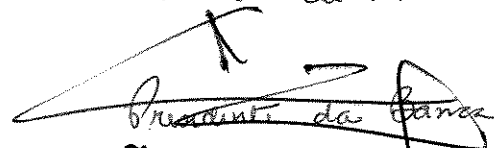


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Sareu

Este exemplar corresponde a redação final da tese de doutorado defendida por Felix Emilio Prado Cornejo e aprovada pela Comissão Julgadora em 15 de maio de 1997.
Campinas, 16 de julho de 1997


Presidente da Banca

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM
SECADOR COM PROMOTORES
ESTACIONÁRIOS DE MISTURA

Campinas -SP
março de 1997

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

C814c Cornejo, Felix Emilio Prado
 Construção e avaliação de um secador com promotores
 estacionários de mistura / Felix Emilio Prado Cornejo.--
 Campinas, SP: [s.n.], 1997.

 Orientador: Kil Jin Park.
 Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
 Faculdade de Engenharia Agrícola.

 1. Cereais - Secagem. 2. Massa - Transferência. 3.
 Calor - Transmissão. I. Park, Kil Jin. II. Universidade
 Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola.
 III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM
SECADOR COM PROMOTORES
ESTACIONÁRIOS DE MISTURA**

FELIX EMILIO PRADO CORNEJO

Engenheiro Mecânico

Mestre em Engenharia Agrícola

Prof.Dr. KIL JIN PARK

Orientador

**Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola
da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Agrícola.**

Campinas -SP

março de 1997



Dedico este trabalho a um ser humano digno de respeito.

Por sua honradez, caracter e amizade.

Kil Jin Park.

AGRADECIMENTOS

A **Deus** pela força espiritual que me deu no transcorrer deste trabalho;

Ao Prof. Dr. **KIL JIN PARK**, amigo e orientador pela sua dedicação, paciência, respeito e por me permitir absorver um pouco de sua experiência e conhecimento;

A **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, pela oportunidade de realizar este trabalho;

A **Faculdade de Engenharia Agrícola / UNICAMP**, por me permitir cursar e obter este título nesta honrosa instituição;

A **Dra. Marília Nutti**, chefe do **Centro Nacional de Pesquisa de Tecnologia Agroindustrial de Alimentos / EMBRAPA**, pelo seu estímulo e apoio na conclusão deste trabalho;

Ao **Dr. Moacir Pedroso Junior**, chefe do **Centro de Pesquisa de Informática para a Agricultura / EMBRAPA**, pela sua amizade e apoio sem o qual esta tese seria muito mais difícil de ser concluída;

Ao **Dr. José Ruy Porto de Carvalho**, pela sua brilhante capacidade no auxílio da análise estatística.

Ao Prof. Dr. **João Domingos Biagi**, pelo apoio e participação na banca de qualificação e defesa de tese;

Ao Prof. Dr. **Jaime Toledo Piza e Almeida Neto**, pelo apoio e participação na banca de qualificação e defesa de tese;

Ao Prof. Dr. **Satoshi Tobinaga**, por sua participação na banca de defesa de tese.

Ao Prof. Dr. **Javier Teles Romero**, por sua amizade e participação na banca de defesa de tese;

A Prof^a. **Enny Terezinha Martucci**, pela sua amizade e participação na banca de defesa de tese;

Ao Prof.Dr. **José Gilberto Jardine**, pelo companheirismo durante muitos anos de atividade profissional e por sua participação na banca de defesa de tese;

A amiga **Regina Isabel Nogueira**, por seu estímulo e parceria profissional;

A amiga **Vânia Aparecida Bellodi Sant'Ana Furlan** por sua amizade e estímulo;

Aos amigos **Sérgio Macedo Pontes, Claudio Souza da Silva e Élio di Franco**, na construção e coleta dos dados experimentais;

Aos amigos do **CTAA** e do **CNPTIA**, pelo encorajamento e estímulo durante a confecção desta tese;

Aos amigos e companheiros do **Departamento de Engenharia de Alimentos/CTAA**;

Aos amigos **Luís Felipe Toro Alonso** e **Fernando Pedro Reis Brod**, por me permitir fazer parte de sua equipe e pela colaboração durante a redação da tese;

Ao amigo **Ailton da Costa**, pela revisão do projeto original;

A minha mãe **Maria da Penha Prado** pelos valores que me passou;

A minha **Maria Cristina de Souza** pela sua ajuda, estímulo e carinho;

Aos meus queridos filhos e amigos **Danielle Rocha Cornejo, Luciane Rocha Cornejo e Felix Rocha Cornejo** e;

A **todos** que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

NOMENCLATURA.(1).....	i
NOMENCLATURA (2)	iv
ÍNDICE DE FÍGURAS.....	vii
ÍNDICE DE QUADROS.....	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1) INTRODUÇÃO.....	1
2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1) TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	7
a. CONDUÇÃO.....	7
b. CONVECÇÃO.....	8
c. PERFIS DE TEMPERATURA DO GÁS E DO SÓLIDO.....	19
d. PROMOTORES ESTACIONÁRIOS.....	23
2.2) SECAGEM.....	24
2.2.1) ISOTÉRMAS.....	28
2.2.2) TEORIA DE SECAGEM.....	31
2.3) SISTEMAS DE SECAGEM PARA GRÃOS.....	55
2.3.1) SECADORES.....	55
2.3.2) SECA-AERAÇÃO.....	62
3) MATERIAL E MÉTODOS.....	64
3.1) MATÉRIA PRIMA.....	65
3.2) TÉRMOMETRIA.....	66
3.3) EQUIPAMENTOS DE APOIO.....	66
3.4) CONSTRUÇÃO DE UMA UNIDADE LABORATORIAL DE SECAGEM.....	67
3.5) UNIDADE EM ESCALA PILOTO.....	72

3.5.1) CONTROLE OPERACIONAL E EXPERIMENTAL DA UNIDADE PILOTO.....	75
3.6) INSTRUMENTAÇÃO.....	76
3.6.1) VAZÃO DE GÁS.....	76
3.6.2) VELOCIDADE MÉDIA DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS.....	77
3.6.3) TEMPERATURAS.....	77
3.6.4) UMIDADES.....	77
3.7) RESFRIAMENTO.....	77
3.8) CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS.....	78
3.9) TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	79
3.9.1) DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TROCA TÉRMICA, UTILIZANDO O CONCEITO DE TROCADORES DE CALOR.....	80
3.9.2) UTILIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DE SARTORI (1986), PARA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	81
3.9.3) OBTENÇÃO DOS NÚMEROS ADIMENSIONAIS DE NUSSELT, REYNOLDS E PRANDTL.....	82
3.10) SECAGEM.....	82
3.10.1) DETERMINAÇÃO DA ADIMENSIONAL DE UMIDADE.....	82
3.10.2) MODELO DE DIFUSÃO LÍQUIDA DE FICK.....	83
3.10.3) DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO ADIMENSIONAL DE UMIDADE PELO MODELO DE PAGE.....	84
3.10.4) DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DO GRÃO DURANTE O AQUECIMENTO E O RESFRIAMENTO.....	84
4) RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	85
4.1) UMIDIFICAÇÃO DOS GRÃOS.....	85
4.2) TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	85
4.2.1) DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE CALOR ENTRE A PARTÍCULA SUBMETIDA A SECAGEM E O FLUXO DO AR NO SECADOR.....	85
4.2.2) DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TROCA TÉRMICA, UTILIZANDO O CONCEITO DE TROCADORES DE CALOR.....	86
4.2.3) UTILIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DE SARTORI (1986), PARA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	88

4.2.4) OBTENÇÃO DOS NUMEROS ADIMENSIONAIS DE NUSSELT, REYNOLDS E PRANDTL.....	92
4.3) SECAGEM.....	96
4.3.1) DETERMINAÇÃO DA ADIMENSIONAL DE UMIDADE.....	96
4.3.2) MODELO DE DIFUSÃO LÍQUIDA DE FICK.....	97
4.3.3) DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO ADIMENSIONAL DE UMIDADE PELO MODELO DE PAGE.....	99
4.3.4) DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DO GRÃO DURANTE O AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO.....	103
4.3.5) SUGESTÕES.....	104
5) CONCLUSÕES.....	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
ANEXOS.....	120
1) DETERMINAÇÃO DOS BALANÇOS DE ENERGIA.....	121
2) DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	125
3) BASE DE CÁLCULO UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE SARTORI, PARA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	132
4) PROGRAMA DE ENTRADA DE DADOS NO SAS.....	137
4a) DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR SEGUNDO SARTORI (1986).....	143
5) BASE DE CÁLCULO, UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE ROSSI E ROA (1980), PARA OBTENÇÃO DA ADIMENSIONAL DE UMIDADE.....	149
6) TABELA DOS VALORES DETERMINADOS PELO PACOTE ESTATÍSTICO SAS.....	153
6a) CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE EFETIVA, UTILIZANDO O PROCEDIMENTO DE REGRESSÃO NÃO LINEAR DO SAS.....	154
6b) PROGRAMA DE ENTRADA DE DADOS NO SAS PARA O CÁLCULO DA SÉRIE DE FOURIER PARA 3, 5, 10, 14 e 20 TERMOS.....	160
7) DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE PELO MODELO DE PAGE (1949) E PAGE MODIFICADO.....	193
7a) PROGRAMA DE ENTRADA DE DADOS.....	195
8) DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DURANTE O AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO.....	227

8a) PROGRAMA DE ENTRADA DE DADOS.....	228
9) BASE DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS.....	239
10) BASE DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE NUSSELT E PRANDTL.....	241
11) PATENTE INDUSTRIAL.....	243

NOMENCLATURA (1)

A	$\psi T_{fo} - T_{so}$	$[\theta]$
a	constante da equação (47) (53)	adimensional
a'	área de transferência por unidade de volume no leito	$[L^2]$
a _w	atividade termodinâmica de água	adimensional
a*	área de transferência	$[L^2]$
B	$1 - \psi$	adimensional
b	constante da equação (47) (53)	adimensional
c	constante da equação (53)	adimensional
C _p	calor específico a pressão constante	$[L^2 T^{-2} \theta^{-1}]$
C _{se}	concentração massica de água no sólido (bs)	adimensional
D'	fator de profundidade do leito, referente ao modelo de Hukill	adimensional
D _c	diâmetro de dutos circulares (secador)	$[L]$
D _{ef}	difusividade efetiva da água no interior do sólido	$[L^2 T^{-1}]$
D _{li}	diâmetro linear maximo da partícula	$[L]$
D _p	diâmetro médio da partícula, definido pela equação,	$[L]$
E	entalpia perdida pelas paredes do sistema	$[L^2 T^{-2}]$
f	taxa local de secagem por unidade de volume	$[ML^{-3} T^{-1}]$
f	pressão do vapor de ar da secagem	$[ML^{-1} T^{-2}]$
f _d	pressão do vapor na superfície do grão para temperatura T _d	$[ML^{-1} T^{-2}]$
G	densidade de fluxo de massa (velocidade massica)	$[ML^{-2} T^{-1}]$
g _n	definido na equação (20),	adimensional
H	altura do leito	$[L]$
<H>	entalpia média por umidade de massa	$[L^2 T^{-2}]$
h	coeficiente de transferência de calor	$[MT^{-3} \theta^{-1}]$
h ₁	coeficiente de transferência de calor convectivo, para equação (35)	$[MT^{-3} \theta^{-1}]$
h ₂	coeficiente de transferência de calor convectivo, para equação (35a)	$[MT^{-3} \theta^{-1}]$
h ₃	coeficiente de transferência de calor convectivo, para equação (35a)	$[MT^{-3} \theta^{-1}]$
h _e	coeficiente de transferência de calor convectivo, para esferas	$[MT^{-3} \theta^{-1}]$
k	condutividade térmica	$[MLT^{-3} \theta^{-1}]$
K	constante de secagem	$[T^{-1}]$

k_1	fator de intensidade de secagem	$[ML^{-2}T^{-1}\theta^{-1}]$
k_2	fator de intensidade de secagem	$[ML^{-2}T^{-1}\theta^{-1}]$
k_f	condutividade térmica do fluido	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
k_l	condutividade líquida	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
k_{mp}	coeficiente de transferência de massa	$[L^{-1}T]$
k_s	condutividade térmica do sólido	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
L	comprimento do secador	$[L]$
L_1	calor latente de água adsorvida	$[L^2T^{-2}]$
L_g	calor latente de vaporização de água no grão	$[L^2T^{-2}]$
m_a	massa de água	$[M]$
m_{sc}	massa de matéria seca	$[M]$
m_u	massa de matéria úmida	$[M]$
$\bar{m}$	vazão massica	$[MT^{-1}]$
Nu	número de Nusselt	adimensional
P	pressão	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P_{atm}	pressão atmosférica	$[ML^{-1}T^{-2}]$
Pr	número de Prandtl	adimensional
P_v	pressão de vapor de água no alimento	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P_{vo}	pressão de vapor de água saturada	$[ML^{-1}T^{-2}]$
q	fluxo térmico por convecção	$[ML^{-2}T^{-3}]$
Q_m	fluxo de massa	$[ML^{-2}T^{-1}]$
Q_q	fluxo de calor	$[ML^{-2}T^{-3}]$
R	conteúdo de umidade	adimensional
r	raio	$[L]$
R^*	constante universal dos gases	$[L^2T^{-2}MOL^{-1}\theta^{-1}]$
Re	número de Reynolds	adimensional
S	$6(1 - \varepsilon) / \phi D_p$, área da superfície das partículas, p/ unidade de volume do leito	$[L^{-1}]$
S_p	superfície específica do produto por unidade de massa	$[M^{-1}L^2]$
s	superfície específica de evaporação	$[M^{-1}L^2]$
T	temperatura	$[\theta]$
t	tempo	$[T]$

T_d	temperatura da superfície do grão	$[\theta]$
T_s	temperatura da superfície	$[\theta]$
T_∞	temperatura do meio, $\sum_i N_i d_i = D_p \sum_i N_i$ Ni - nº de partículas com diâmetro di	$[\theta]$
u	$(T_s - T_{fo}) / (T_{so} - T_{fo})$	adimensional
U	coeficiente global de transferência de calor	$[MT^{-3}\theta^{-1}]$
UR	umidade relativa	adimensional
v	velocidade	$[LT^{-1}]$
v_p	velocidade da partícula no leito	$[LT^{-1}]$
v_s	velocidade de secagem	$[LT^{-1}]$
V_∞	velocidade no meio	$[LT^{-1}]$
V_e	volume específico	$[M^{-1}L^3]$
W_n	raízes da equação (21),	adimensional
x	coordenada na direção do escoamento do gás	$[L]$
x'	taxa de umidade	adimensional
X	$\frac{hS}{C_f G_f} x$	adimensional
Y	conteúdo de umidade	$[M_1 / M_2]$
z	variável espacial	adimensional

LETRAS GREGAS

α	difusividade térmica	$[L^2T^{-1}]$
ε	porosidade	adimensional
ξ	$k_s / h_f r$	adimensional
η	fator de umidade de tempo, referente ao modelo de Hukill	adimensional
γ	$k_s / \rho_s C_s v_p$	$[L]$
λ	$-hS(1 - \psi) / C_f G_f$	$[L^{-1}]$
ρ	densidade	$[ML^{-3}]$
λ	razão de torsão	adimensional
ρ_s	massa específica do sólido	$[ML^{-3}]$
ϕ	esfericidade, definido pela equação (55)	adimensional
ψ	$C_f G_f / C_s G_s$	adimensional
μ	viscosidade	$[ML^{-1}T^{-1}]$

NOMENCLATURA (2)

A	$\psi T_{fo} - T_{so}$	K
a	constante da equação (47) (53)	adimensional
a'	área de transferência por unidade de volume no leito	m'
a _w	atividade termodinâmica de água	adimensional
a*	área de transferência	m'
B	$1 - \psi$	adimensional
b	constante da equação (47) (53)	adimensional
c	constante da equação (53)	adimensional
C _p	calor específico a pressão constante	kJ/kgK
C _{se}	concentração massica de água no sólido (bs)	adimensional
D'	fator de profundidade do leito, referente ao modelo de Hukill	adimensional
D _c	diâmetro de dutos circulares (secador)	m
D _{ef}	difusividade efetiva da água no interior do sólido	m ² /s
D _{li}	diâmetro linear maximo da partícula	m
D _p	diâmetro médio da partícula, definido pela equação,	m
E	entalpia perdida pelas paredes do sistema	kJ/kg
f	pressão do vapor de ar da secagem	Pa
f _d	pressão do vapor na superfície do grão para temperatura T _d	Pa
G	densidade de fluxo de massa (velocidade massica)	kg/m ² s
g _n	definido na equação (20),	adimensional
H	altura do leito	m
<H>	entalpia média por unidade de massa	kJ/kg
h	coeficiente de transferência de calor	kJ/m ² sK
h ₁	coeficiente de transferência de calor convectivo, para equação (35)	kJ/m ² sK
h ₂	coeficiente de transferência de calor convectivo, para equação (35a)	kJ/m ² sK
h ₃	coeficiente de transferência de calor convectivo, para equação (35a)	kJ/m ² sK
h _e	coeficiente de transferência de calor convectivo, para esferas	kJ/m ² sK
k	condutividade térmica	W/mK ou kJ/msK
K	constante de secagem	s ⁻¹
k ₁	fator de intensidade de secagem	kg _{H2O} /m ² sK
k ₂	fator de intensidade de secagem	kg _{H2O} /m ² sK
k _f	condutividade térmica do fluido	kJ/msK ou W/mK
k _l	condutividade líquida	kJ/msK ou W/mK
k _{mp}	coeficiente de transferência de massa	kg/Pa m ² s
k _s	condutividade térmica do sólido	kJ/msK
L	comprimento do secador	m
L ₁	calor latente de água adsorvida	kJ/kg
L _g	calor latente de vaporização de água no grão	kJ/kg
m _a	massa de água	kg
m _{sc}	massa de matéria seca	kg

m_u	massa de matéria umida	kg
$\dot{m}$	vazão massica	kg/s
Nu	número de Nusselt	adimensional
P	pressão	Pa
P_{atm}	pressão atmosférica	Pa
Pr	número de Prandtl	adimensional
P_v	pressão de vapor de água no alimento	Pa
P_{vo}	pressão de vapor de água saturada	Pa
q	fluxo térmico por convecção	kJ/s
Q_m	fluxo de massa	kg/m ² s
Q_q	fluxo de calor	kJ/s
R	conteúdo de umidade	adimensional
r	raio	m
R^*	constante universal dos gases	kJ/kg mol K
Re	número de Reynolds	adimensional
S	$6(1 - \varepsilon) / \phi D_p$, área da superfície das partículas, p/ unidade de volume do leito	m ²
S_p	superfície específica do produto por unidade de massa	m ² /kg
s	superfície específica de evaporação	m ² /kg _{ms}
T	temperatura	K
t	tempo	s
T_d	temperatura da superfície do grão	K
T_s	temperatura da superfície	K
T_∞	temperatura do meio, $\sum_i N_i d_i = D_p \sum_i N_i$ Ni - nº de partículas com diâmetro di	K
u	$(T_s - T_{fo}) / (T_{so} - T_{fo})$	adimensional
U	coeficiente global de transferência de calor	kJ/m ² sK
UR	umidade relativa	adimensional
v	velocidade	m/s
v_p	velocidade da partícula no leito	m/s
v_s	velocidade de secagem	m/s
V_∞	velocidade no meio	m/s
V_e	volume específico	m ³ /kg
W_n	raízes da equação (21),	adimensional
x	coordenada na direção do escoamento do gás	m
x'	taxa de umidade	adimensional
X	$\frac{h S}{C_f G_f} x$	adimensional
Y	conteúdo de umidade	kg _{H2O} /kg _{ms}
z	variável espacial	adimensional

LETRAS GREGAS

α	difusividade térmica	m^2/s
ε	porosidade	adimensiona
ξ	$k_s / h_f r$	adimensional
η	fator de umidade de tempo, referente ao modelo de Hukill	adimensiona
γ	$k_s / \rho_s C_s v_p$	m
λ	$-hS(1 - \psi) / C_f G_f$	m^{-1}
ρ	densidade	kg/m^3
ρ_s	massa específica do sólido	kg/m^3
λ	razão de torção	adimensiona
ϕ	esfericidade, definido pela equação (55)	adimensiona
ψ	$C_f G_f / C_s G_s$	adimensional
μ	viscosidade	kg/ms

SUBSCRITO

ag	água	o	condição inicial
bh	bulbo úmido do ar	p	partícula
d	superfície do grão	q	calor
e	esfera	r	estado de referência
en	entrada	s	sólido
eq	condição de equilíbrio	sd	saída
f	fluido, ar ou gas	s_s	sólido seco
gr	grão	sts	seção transversal do secador
l	líquido	tc	trocador de calor
li	linear	u	matéria úmida
m	médio	v	vapor
ms	massa seca	v_o	vapor saturado

Obs. Foi utilizado para representar as unidades internacionais, simbologias que indicam dimensões:

- [M] - massa
- [L] - comprimento
- [T] - tempo
- [θ] - temperatura

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 -	Esquema de um escoamento em contracorrente.....	20
Figura 2 -	Apresentação de forma simplificada da umidade existente nos grãos.....	26
Figura 3 -	Desenho esquemático de um grão e sua proporção variável de água e matéria seca.....	26
Figura 4 -	Representação esquemática da fixação de água no grão (milho a 15°C), fonte: LASSERAN (1978).....	28
Figura 5 -	Representação gráfica de uma isoterma, fonte: BALABAN (1984).....	29
Figura 6 -	Representação esquemática do modelo físico.....	32
Figura 7 -	Transporte da água do interior do sólido para a superfície de secagem.....	32
Figura 8 -	Representação esquemática do modelo de THOMPSON et alli (1968).....	47
Figura 9 -	Desenho esquemático de um silo secador móvel.....	56
Figura 10 -	Secador móvel com sistema de carga contínua.....	57
Figura 11 -	Secador de torre.....	58
Figura 12 -	Caracterização do fluxo.....	59
Figura 13 -	Secador de torre utilizado para secagem de sementes (1) e secador de torre para secagem de grãos(2).....	60
Figura 14 -	Detalhe construtivo do secador de torre.....	61
Figura 15 -	Desenho das unidades construídas para os testes experimentais.....	65
Figura 16 -	Representação esquemática dos dispositivos instalados no interior da torre.....	69

Figura 17 -	Alimentador vibratório.....	69
Figura 18 -	Detalhamento da unidade laboratorial.....	71
Figura 19 -	Detalhamento da unidade piloto (vista lateral).....	73
Figura 20 -	Detalhamento da unidade piloto (vista frontal).....	74
Figura 21 -	Esquema do controle operacional e experimental da unidade piloto.....	75
Figura 22 -	Ln de Nusselt x Ln de Reynolds para aquecimento utilizando o coeficiente de transferência de calor calculado pela eq. 42a.....	93
Figura 22a-	Ln de Nusselt x Ln de Reynolds para aquecimento utilizando o coeficiente de transferência de calor calculado pela eq. 42a, considerando Re(partícula).....	94
Figura 23 -	Ln de Nusselt x Ln de Reynolds para aquecimento utilizando o coeficiente de transferência de calor calculado pela eq. 42b.....	94
Figura 23a-	Ln de Nusselt x Ln de Reynolds para aquecimento utilizando o coeficiente de transferência de calor calculado pela eq. 42b, considerando Re(partícula).....	95
Figura 24 -	Ln de Nusselt x Ln de Reynolds para resfriamento utilizando o coeficiente de transferência de calor calculado pela eq. 42b.....	95
Figura 25 -	Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 1.....	99
Figura 26 -	Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 2.....	100
Figura 27 -	Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 3.....	100
Figura 28 -	Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 4.....	101
Figura 29 -	Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 5.....	101

Figura 30 -	Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 6.....	102
Figura 31 -	Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 7.....	102
Figura 32a -	Representação esquemática da unidade industrial (vista lateral).....	106
Figura 32b -	Representação esquemática da unidade industrial (vista frontal).....	107

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 -	Correlações para o coeficiente de transferência de calor - leito fixo, fonte: CALADO (1993).....	19
Quadro 2 -	Correlações para o coeficiente de transferência de calor - leito deslizante, fonte: SARTORI (1986).....	19
Quadro 3 -	Modelos de isotermas de sorção, fonte: CALADO (1992).....	31
Quadro 4 -	Equações para difusividade efetiva, fonte: CALADO (1992).....	43
Quadro 5 -	Constante de secagem para o modelo exponencial.....	44
Quadro 6 -	Parâmetros do modelo de PAGE, fonte: CALADO (1992).....	51
Quadro 7 -	Parâmetros do modelo de OVERHULTS, fonte: CALADO (1992).....	51
Quadro 8 -	Taxa da perda de umidade durante a secagem de produtos agrícolas, fonte: GODOI (1996).....	52
Quadro 9 -	Condições operacionais da unidade piloto.....	78
Quadro 10 -	Variáveis experimentais.....	78
Quadro 11 -	Cálculo dos balanços de energia.....	85
Quadro 12 -	Caracterização do grão de soja.....	86
Quadro 13 -	Propriedades do ar.....	86
Quadro 14a -	Coeficientes de transferência de calor, considerando a área da seção transversal do secador.....	86
Quadro 14b -	Erros relativos dos coeficientes convectivos de transferência de calor, considerando a área da seção transversal do secador.....	87
Quadro 15a -	Coeficientes de transferência de calor, considerando a área de um trocador de calor.....	87

Quadro 15b-	Erros relativos dos coeficientes convectivos de transferência de calor, considerando a área de um trocador de calor.....	88
Quadro 16 -	Adimensionais de temperatura durante o aquecimento do grão, a cada passagem pela torre.....	88
Quadro 17 -	Adimensionais de temperatura durante o resfriamento do grão, a cada passagem pela torre.....	90
Quadro 18 -	Coefficiente convectivo de transferência de calor, utilizando a temperatura média do fluido durante o aquecimento.....	91
Quadro 19 -	Coefficiente convectivo de transferência de calor, utilizando a temperatura média do sólido durante o aquecimento.....	91
Quadro 20 -	Erros relativos dos coeficientes convectivos obtidos utilizando as temperaturas médias do sólido e do fluido.....	92
Quadro 21 -	Coefficientes de transferência de calor, utilizando a temperatura média do sólido no resfriamento.....	92
Quadro 22 -	Umidades de equilíbrio.....	96
Quadro 23 -	Adimensional de umidade durante o aquecimento e resfriamento.....	97
Quadro 24 -	Valores de difusividade adimensionais do conteúdo de umidade, experimental e calculado, erro relativo utilizando 20 termos da série.....	98
Quadro 25a-	Percentual de decréscimo de umidade no aquecimento e no resfriamento.....	103
Quadro 25b-	Variação do conteúdo de umidade durante o aquecimento e resfriamento.....	103

RESUMO

Com o objetivo de avaliar as transferências de calor e massa durante a secagem da soja (*Glycine max. L. Merrill*), foi construído um secador composto por duas secções, uma de aquecimento e outra de resfriamento. Na secção de aquecimento foram instalados promotores estacionários de mistura de sólidos, objeto da patente industrial nº 8700583.

Para obter a equação de dimensionamento deste sistema, foi utilizado o conceito de trocadores de calor para calcular os coeficientes globais de transferência de calor. Os coeficientes globais obtidos foram $0,1496 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ a $0,3784 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ quando referido a área seccional e $0,0131 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ a $0,0333 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ quando referido a área média logarítmica do trocador de calor.

Para o estudo dos fenômenos de transferência de calor, foram calculados os coeficientes convectivos de transferência de calor utilizando os conceitos de FURNAS (1930) aplicados por SARTORI (1986). Estes coeficientes convectivos permitiram a obtenção da correlação adimensional do tipo $Nu = f(Re^b)$. O expoente b apresentou os valores de $-0,5163$ utilizando a temperatura média do fluido e $-0,3357$ utilizando a temperatura média do sólido.

O comportamento da secagem no presente equipamento foi analisado utilizando as equações de FICK, PAGE e PAGE modificado. As difusividades efetivas situaram-se entre $1,60 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ a $4,85 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. Os coeficientes de PAGE obtidos foram, k variando de $0,0001$ a $0,0089$ e c variando de $0,3663$ a $1,0339$. Os coeficientes de PAGE modificado obtidos foram, A variando de $0,9803$ a $0,9954$, k de 0 a $0,0086$ e c de $0,3669$ a $1,0829$.

Secando soja (*Glycine max. L. Merrill*), o sistema alcança $42,44\%$ a $77,65\%$ na redução do conteúdo de umidade durante o aquecimento e $22,35\%$ a $57,56\%$ na redução do conteúdo de umidade durante o resfriamento. O decréscimo de umidade durante o aquecimento foi de $0,2005$ para $0,1527 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ms}}$ e durante o resfriamento de $0,1527$ para $0,1308 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ms}}$.

Os resultados obtidos demonstram que esta patente industrial para secagem de materiais granulares pode ser utilizada para a secagem de grãos.

ABSTRACT

An dryer was build, in two different sections (heating and cooling) , to evaluate heat and mass transfer during soybean (*Glycine max. L. Merrill*) drying. In the heat section, a set of solids static mixers was installed (industrial patent n° 8700583).

The concept of heat exchangers was applied to calculate the global heat transfer coefficients and dimensioning the system. The global heat transfer coefficients referring the section surface ranged between 0,1496 kJ/m².s.K and 0,3784 kJ/m².s.K, referring the mean logarithmic heat transfer surface it ranged between 0,0131 kJ/m².s.K and 0,0333 kJ/m².s.K.

The concepts to convective heat transfer coefficients developed by FURNAS (1930) and applied by SARTORI (1986) were used to study the heat transfer phenomena. These coefficients allowed to obtain dimensionless correlations such as $Nu = f(Re^b)$. The b exponent obtained applying the fluid average temperature was -0,5163 and applying the solid average temperature was -0,3357.

The drying behavior in the equipment was analyzed using FICK, PAGE and PAGE modified equations. The effective diffusivities ranges between $1,60 \times 10^{-11}$ m²/s and $4,85 \times 10^{-11}$ m²/s. The PAGE equation coefficients obtained were, k ranging from 0,0001 to 0,0089 and c ranging from 0,3663 to 1,0339. The PAGE modified equation coefficients obtained were, A ranging from 0,9803 to 0,9954, k ranging from 0 to 0,0086 and c ranging from 0,3669 to 1,0829.

Drying soybean (*Glycine max. L. Merrill*), the system leads from 42,44% to 77,65% of moisture content reduction during heating and 22,35 % to 57,56 % of moisture content reduction while cooling. The moisture content decrease ranged from 0,2005 to 0,1527 kg H₂O/kg_{ms} during heating and 0,1527 to 0,1308 kg H₂O / kg_{ms} while cooling.

The results obtained shows that the industrial patent for drying of particulate materials may be used to grain drying.

1) INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a pesquisa agropecuária contribuiu decisivamente para o aumento das safras agrícolas brasileiras. Cresceram as safras sem o proporcional aumento das áreas plantadas, provando que o país, com o uso de tecnologias adequadas, é capaz de aumentar a produtividade agrícola.

O objetivo primordial da pesquisa brasileira é basicamente a contribuição do bem-estar social e econômico da sociedade, gerando e transferindo, para os diversos segmentos que compõem o complexo agroindustrial brasileiro, tecnologias que garantam a competitividade e a qualidade dos produtos oferecidos no mercado.

O Brasil produziu nos últimos sete anos uma média de 59 milhões de toneladas de grãos (arroz, feijão, trigo, milho e soja). A disponibilidade interna desses produtos e dos demais alimentos, tradicionalmente consumidos no país, é superior às necessidades diárias de calorias e proteínas de uma população equivalente a brasileira.

Em outras palavras, a fome, que aflige 32 milhões de brasileiros, não se explica pela falta de alimentos. O problema alimentar reside no descompasso entre o poder aquisitivo de um amplo segmento da população e o custo de aquisição de uma quantidade de alimentos compatível com a necessidade do trabalhador e de sua família.

Não é de hoje que o paradoxo da fome, em um país que possui condições plenas para garantir uma oferta abundante de alimentos, vem desafiando os governantes.

A cada ano uma parcela expressiva da produção agrícola (cerca de 20 %) é perdida por deficiências de armazenagem, transporte e manuseio, ao mesmo tempo

em que aumenta o número de brasileiros que não conseguem manter padrões mínimos de alimentação. Alimentos se deterioram em algumas regiões mais desenvolvidas do país, enquanto nos rincões mais distantes, nas regiões mais pobres, um número expressivo de pessoas não dispõem do que comer, (PELIANO,1993).

O desenvolvimento de um país do terceiro mundo na agricultura, depende do esforço político de seus governantes e de pesquisas voltadas a soluções práticas, a fim de resolver os problemas existentes na produção.

Os grãos, após a colheita, são estocados ou beneficiados, devendo passar por processos de secagem e resfriamento que tem por finalidade preservar a qualidade do produto por um longo período de tempo.

A secagem é o método mais antigo e ainda o mais usado para conservar as matérias primas agropecuárias, por permitir a armazenagem por vários meses à temperatura ambiente.

O agricultor brasileiro ainda utiliza muito a secagem de grãos feita na planta, dependendo das condições climáticas, sendo esta técnica a de menor investimento, porém, existem grandes desvantagens em sua utilização, como a dependência das condições meteorológicas que pode conduzir a deterioração e a incidência de pragas.

Além disso, quando as produções aumentam muito, como no Brasil, nos últimos anos, é necessário colher antecipadamente os grãos com alto teor de umidade (na ordem de 18 %) para otimizar o uso das colhedeiças.

A secagem artificial de grãos no Brasil é uma operação praticada principalmente pelas cooperativas agrícolas e pelas indústrias de processamento.

As técnicas de secagem variam conforme as características do produto e a finalidade a qual se destinam. A utilização de técnicas inadequadas de secagem pode comprometer de maneira significativa as qualidades nutricionais e fisiológicas do produto.

Os parâmetros que afetam a taxa de secagem, quando se seca grãos utilizando ar forçado, são: temperatura e umidade relativa ambiente, temperatura e a vazão do ar de secagem, teor de umidade inicial e de equilíbrio dos grãos e quando for o caso, velocidade desses grãos no secador.

Os parâmetros de secagem citados não são independentes, isto quer dizer que eles afetam a taxa de secagem como um conjunto de fatores e não isoladamente. O manejo adequado desses parâmetros permite que se determine qual o equipamento adequado para condições de secagem específicas.

A temperatura e umidade relativa do ambiente muitas vezes não são consideradas como de importância para a secagem a altas temperaturas. Estes dois parâmetros não têm influência sobre a taxa de secagem. Entretanto, eles determinam a quantidade de calor sensível necessária para se atingir a temperatura de secagem. Quanto menor a temperatura ambiente, maior será o gasto de energia para o aquecimento desse ar, revertendo em maior custo de secagem.

A velocidade com que o material passa no secador (na maioria das vezes mencionado como fluxo de massa) pode influenciar a taxa de secagem, a eficiência do processo e a qualidade final do produto, BALABAN (1984).

Na prática, como em muitos trabalhos científicos, a temperatura do ar de secagem para sementes não deve ser superior a 40°C. Esta afirmativa é incompleta, uma vez que o tempo de exposição do produto ao ar de secagem é um fator a ser considerado.

DALPASQUALE (1983), observou na secagem de soja utilizando um secador concorrente, que os parâmetros, temperatura do ar de secagem e fluxo de grãos são fatores que afetam a qualidade do produto. Em vista disso, ele sugere que seja utilizado o termo “tempo de residência do produto no secador” para se definir melhor as condições de secagem.

O tempo de residência pode aparecer explicitamente como um valor definido ou implicitamente mencionando-se a temperatura de secagem e velocidade do produto no secador.

Nas últimas décadas, foram muitos os trabalhos experimentais desenvolvidos na área de secagem, sendo poucos aqueles absorvidos pelas indústrias.

A secagem artificial é um processo altamente dispendioso em energia térmica para o aquecimento e mecânica para movimentação do ar. Da energia requerida no processamento de produtos agropecuários, 65 a 89,5% de toda a energia gasta é utilizada pelo processo de secagem (MEYER et alii, 1982), que depende fortemente das condições de operação e da umidade que se pretende retirar do produto.

O secador de grãos é um dispositivo que usa uma fonte térmica para aquecer o ar ambiente e um ventilador para forçar a movimentação deste ar aquecido, com a finalidade de remover a umidade de um determinado produto a ser seco. Entre os secadores industriais, a técnica de leito deslizante é a mais utilizada. O secador em leito deslizante pode ter diferentes configurações de acordo com as direções de escoamento do ar e do sólido. Os três tipos clássicos destes secadores apresentam escoamentos contracorrente, escoamentos cocorrentes e escoamentos cruzados.

Para a realização deste trabalho, foram efetuadas visitas técnicas a diversas unidades de beneficiamento de grãos, sementes e indústrias fabricantes de secadores.

As indústrias de beneficiamento de grãos (soja) utilizam secador de torre, com capacidade para 1200 ton./dia, sendo um de seus maiores problemas o desgaste mecânico devido ao atrito da matéria prima com as chapas metálicas.

Estes secadores operam com temperaturas de 100°C, sendo a remoção da umidade efetuada com uma matéria-prima muito heterogênea proveniente de diversos produtores.

Em função do grande volume de material processado por dia, o controle operacional existente é limitado e não se consegue ter uma idéia da variação de umidade deste produto quando armazenado.

Tem sido realizadas tentativas, por alguns fabricantes, no sentido de melhorar a eficiência de seus secadores, como por exemplo a inclinação das calhas para um melhor deslocamento da massa de grãos ao longo da torre de aquecimento e de resfriamento, com vistas à homogenização da umidade do grão. Sensores de temperatura ao longo da torre acionam células de descarga que por sua vez, controlam o tempo de exposição do produto.

Nas indústrias de beneficiamento de sementes, são utilizados basicamente dois tipos de secadores: os com capacidade para 15 t/h, que utilizam sistemas de cascata e os secadores estáticos. A temperatura utilizada é de 45°C e o tempo de secagem fica em torno de 4 a 6 horas para reduzir a umidade da soja de 17% para 13% base úmida.

Os que utilizam sistema estático são compostos por células metálicas com a introdução do ar aquecido por um tubo central perfurado. O seu desempenho é bastante comprometido em função da má distribuição do ar aquecido, levando de 6 a 8 horas para reduzir a umidade da soja de 17% para 13% base úmida.

Menção especial deve ser feita ao problema das sementes de soja, que pela dificuldade de manter a capacidade e o vigor germinativo até o plantio no ano seguinte, está se tornando um problema crônico no Brasil.

Dentre os grãos, destacam-se em termos de agricultura brasileira, o arroz, o amendoim, o milho, a soja e o trigo, os quais representam aproximadamente 90 % dos grãos produzidos para o consumo humano, sendo a soja uma das mais importantes fontes de óleo comestível e o subproduto obtido da extração que constitui numa das mais ricas fontes de proteínas para as indústrias alimentícias e de rações.

As pesquisas mais recentes em leito deslizante estão voltadas para a determinação experimental do parâmetro de troca térmica entre o ar e o sólido, e para aplicações onde a transferência de calor e massa são significativas.

Os objetivos do presente trabalho são a construção de um secador conforme reenvidecação da Patente Industrial nº 8700583 (1987), anexo(11). A novidade introduzida nesta patente é a existência de promotores estacionários de mistura de sólidos que permite uma melhor transferência de calor e massa entre o ar de secagem e o grão.

A construção de um secador modelo permite uma análise preliminar de seu funcionamento, possibilitando a construção de um secador em escala piloto para análise da transferência de calor e massa.

Com os resultados obtidos e com as informações dos sistemas de secagem existentes no mercado nacional visualiza-se a possibilidade da construção do presente sistema em escala comercial.

2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1) TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor pode ocorrer por três mecanismos diferentes: condução, convecção e radiação. Na secagem de grãos, utilizando um secador com promotores estáticos anulares de mistura, os mecanismos de transferência de calor predominantes são a condução nos sólidos e a convecção na interface sólido-fluido. O mecanismo da convecção está relacionado à condução da fina película de fluido adjacente à superfície de transferência de calor dos sólidos, HOLMAN (1972).

Encontra-se na literatura uma grande variação da quantidade de dados e de modelos existentes para a transferência de calor na interface sólido-fluido em meios porosos, como é o caso de grãos, entre diferentes tipos de leito. Assim, há um extenso tratamento para leitos fixos, fluidizados e partícula única na literatura, enquanto que para leitos deslizantes, leitos de jorro e transporte pneumático há, comparativamente, uma pequena quantidade de trabalhos, SARTORI (1986).

a. CONDUÇÃO

Na condução, a equação da energia, inserindo a 1ª lei de Fourier, pode ser escrita ,como:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

sendo:

- ρ - densidade, kg/m³
- C - calor específico, kJ/kg K
- T - temperatura, K
- t - tempo, s
- k - condutividade térmica, kJ/m.s.K

Quando a condutividade térmica é independente da temperatura ou da posição, a equação acima torna-se:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2)$$

sendo: α - difusividade térmica, m^2/s $\alpha = \frac{k}{\rho C}$

CARSLAW e JAGER (1959), apresentam uma extensa tabulação de soluções para esta equação, para diferentes condições de contorno e condições iniciais.

b. CONVECÇÃO

O fluxo térmico por convecção entre um contorno sólido e um fluido é dado pela equação:

$$q = a^* h (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

sendo: q - fluxo térmico por convecção, kJ/s
 a^* - área de transfêrencia, m^2
 h - coeficiente convectivo de transferência calor, $kJ/m^2 \cdot s.K$
 T_s - temperatura da superfície, K
 T_∞ - temperatura do meio, K

O coeficiente convectivo de transferência de calor é na realidade uma função complexa do escoamento do fluido, das propriedades térmicas do meio fluido e da geometria do sistema, além da sua dependência em relação à temperatura.

Para o estudo da convecção ao redor de sólidos (grãos), é necessário um estudo do escoamento sobre corpos bojudos. A diferença mais importante entre o escoamento sobre corpos bojudos e sobre uma placa plana se encontra no comportamento da camada limite.

O deslocamento da camada limite de um fluido, quando escoando sobre um corpo aerodinâmico, ocorre quando o aumento da pressão ao longo da superfície se

torna muito grande e se dá perto da parte traseira. Já num corpo bojudo, o ponto de separação ocorre muito longe da borda de ataque.

Num corpo bojudo, a resistência de atrito superficial é pequena comparada com a resistência de forma. A resistência de forma surge da separação do escoamento que impede que as linhas de corrente se fechem, induzindo uma região de baixa pressão na parte traseira do corpo. Essa diferença de pressão produz uma força resistente, além do atrito superficial.

Quando as partículas utilizadas no estudo da transferência convectiva de calor têm uma forma irregular, as equações para esferas produzem resultados satisfatórios se o diâmetro da esfera for substituído por um diâmetro equivalente, ou seja, o diâmetro de uma partícula esférica que tenha a mesma área superficial que a partícula de forma irregular, KREITH (1969).

O coeficiente total de resistência de uma esfera é apresentado em função do número de Reynolds. Em um intervalo de números de Reynolds entre 25 e 100.000, a equação recomendada por McADAMS (1954), para o cálculo do coeficiente convectivo médio por unidade de área para esferas aquecidas ou resfriadas por um gás em um leito estático, é:

$$\frac{h_e D_o}{k_f} = 0,37 \left(\frac{V_\infty \rho_\infty D_o}{\mu_f} \right)^{0,6} \quad (4)$$

sendo:

h_e - coeficiente convectivo de transferência de calor para esferas, W/mK

D_o - diâmetro da esfera, m

k_f - condutividade térmica do fluido, kJ/msK

V_∞ - velocidade no meio, m/s

ρ_∞ - densidade no meio, kg/m³

μ - viscosidade, kg/m s

A quantidade de dados e modelos existentes na literatura sobre a transferência de calor entre gás e sólido em meios porosos varia muito entre os diferentes tipos de leito, SARTORI (1986).

O autor fez um estudo do coeficiente de transmissão de calor entre sólido e fluido em leito deslizante, nas configurações de escoamentos em contracorrente, concorrentes e cruzados com situações de aquecimento e resfriamento de sólidos. Utilizou partículas de areia e vidro com diferentes granulometrias e grãos de milho, arroz e soja, empregando-se o ar como fluido percolante.

Os resultados mostraram coerência com os dados de literatura, com os valores do coeficiente de transferência de calor crescentes na ordem dos escoamentos concorrente, cruzados e contracorrente, tendendo assintoticamente a um mesmo valor para altos números de Reynolds.

Para o presente trabalho, o estudo do dimensionamento se aplica a um escoamento em contracorrente, portanto apresentamos a seguir uma revisão bibliográfica referente à transferência de calor entre o gás e o sólido em leito deslizante, na configuração de escoamento em contracorrente.

FURNAS (1930) , adotou as seguintes suposições para o desenvolvimento das equações:

- a convecção através da superfície do sólido é o mecanismo predominante no processo de troca térmica;
- os escoamentos ocorrem no interior de um tubo cilíndrico de diâmetro constante;
- o sólido é alimentado na extremidade superior da coluna e o gás aquecido é alimentado na parte inferior;
- as densidades dos fluxos de massas do gás e do sólido são constantes;
- propriedades físico-químicas são constantes ao longo do leito;
- processo ocorre em regime permanente.

A partir do balanço térmico no sistema, são obtidas as equações:

- fase fluida e fase sólida,

$$C_f G_f \frac{dT_f}{dx} = C_s G_s \frac{dT_s}{dx} \quad (5)$$

sendo:

- C_f - calor específico do fluido, kJ/kg K
- G_f - densidade do fluxo de massa (fluido), kg/m²s
- C_s - calor específico do sólido, kJ/kg K
- G_s - densidade do fluxo de massa (sólido), kg/m²s
- T - temperatura, K
- x - coordenada na direção de escoamento do gás, m

- definição do coeficiente de transferência de calor,

$$C_s G_s \frac{dT_s}{dx} = - h S (T_f - T_s) \quad (6)$$

sendo:

- C_s - calor específico do sólido, kJ/kg K
- G_s - densidade do fluxo de massa (sólido), kg/m²s
- T_s - temperatura (sólido), K
- T_f - temperatura (fluido), K
- h - coeficiente convectivo de transferência de calor entre o gás e o sólido, kJ/m² sK

Considerando que na região de entrada do gás, em $x = 0$, $T_f = T_{f0}$, e na região de entrada do sólido, em $x = L$, $T_s = T_{s1}$, FURNAS (1930) determinou os perfis de temperatura:

- fase fluida:

$$\ln \left[\frac{A + B T_f}{A + B T_{f0}} \right] = - \frac{B h S}{C_f G_f} x \quad (7)$$

- fase sólida:

$$\ln \left[\frac{A + B(T_s - T_{sl})}{A} \right] = B \frac{h S}{C_f G_f} (L - x) \quad (8)$$

onde,

$$A = \psi (T_{f0} - T_{so}) \quad (9)$$

$$B = 1 - \psi \quad (10)$$

$$\psi = \frac{C_f G_f}{C_s G_s} \quad (11)$$

Neste caso, o coeficiente de troca térmica é constante, porém FURNAS (1930) também usou uma dependência exponencial do coeficiente h em relação à temperatura no intervalo de 25 à 110°C e constatou que, embora as formas sejam facilmente integráveis, as equações resultantes são muito complexas e não devem ser aplicadas nos cálculos práticos. Concluiu, ainda, que é melhor considerar o coeficiente h constante e usar um valor médio no intervalo de variações das condições de operação de interesse.

A formulação do problema, levando-se em conta a condução térmica no interior da partícula, foi realizada por LOVELL e KARNOFSKY (1943).

As principais suposições consideradas, foram:

- o sólido se desloca com velocidade uniforme, devido a ação gravitacional e o escoamento de gás é contracorrente ao do sólido;
- as partículas são esferas de um mesmo diâmetro, que entram na parte superior do trocador com temperatura constante;
- o gás é alimentado na parte inferior do trocador de calor com temperatura constante;
- a troca térmica ocorre entre o gás e o sólido;

- na direção dos escoamentos, a condução de calor no gás é desprezível;
- não há fonte térmica nas partículas sem reação química;
- a condução térmica no interior da partícula é considerada;
- a parede do trocador é isolada termicamente do ambiente;
- as propriedades dos materiais são constantes.

Através de balanços térmicos são obtidas as equações:

- no leito:

$$C_f G_r \frac{dT_r}{dt} = h S (T_r - T_s|_r) \frac{dx}{dt} \quad (12)$$

$$C_f G_r \frac{dT_r}{dx} = h S (T_r - T_s|_r)$$

sujeita à condição de contorno na região de entrada do sólido: $T_f = T_{f1}$, em $x = 0$
 LOVELL e KARNOFSKY (1943) invertem o sentido desta coordenada em relação ao sentido utilizado por FURNAS (1930).

- na região de entrada do sólido:

$$C_f G_r (T_r - T_{r1}) = \frac{h S G_s}{(1 - \varepsilon) \rho_s} \int_0^t (T_r - T_s|_r) dt \quad (13)$$

$$C_f G_r (T_r - T_{r1}) = \frac{C_s G_s}{\frac{4}{3} \pi r^3} \int_0^r 4 \pi z^2 (T_r - T_{s1}) dz$$

- no sólido:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{k_s}{\rho_s C_s} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + \frac{2}{z} \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (14)$$

sujeita às seguintes condições:

$$T_s = T_{s1}, \text{ em } t = 0$$

(14a) (14b)

$$\frac{\partial T_s}{\partial z} = \frac{h}{k_s} (T_f - T_s|_r), \text{ em } z = r$$

Os autores não obtiveram a solução analítica do problema, porém determinaram uma solução aproximada por meio de uma modificação do método gráfico de Schmidt, método de NESSI e NISSOLE apud LOVELL e KARNOFSKY (1943).

A solução exata deste problema foi calculada por MUNRO e AMUNDSON (1950) através de uma relação diferencial equivalente à relação integral desenvolvida por LOVELL e KARNOFSKY (1943), obtendo a equação para a partícula no leito,

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + \frac{2}{z} \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right) = \frac{\rho_s C_s}{k_s} \left(\frac{\partial T_s}{\partial t} \right) \quad (15)$$

As esferas se deslocam com uma velocidade uniforme, $v_p = x/t$, onde x é a coordenada da distância em relação à parte superior do trocador, logo

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + \frac{2}{z} \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right) = \frac{v_p \rho_s C_s}{k_s} \left(\frac{\partial T_s}{\partial x} \right) \quad (16)$$

Com a suposição, de que as esferas são partículas de um mesmo tamanho e que entram na parte superior do trocador com temperatura constante, implica que $T_s = T_{s1}$, em $x = 0$. A consideração de que existe uma resistência à transferência de calor entre as partículas e o gás foi descrita pela igualdade

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = h [T_f - T_s(z)] \quad (17)$$

A relação entre as temperaturas do gás e do sólido foi obtida a partir do balanço térmico entre duas secções do leito, desprezando a condução no gás, na direção dos escoamentos,

$$\frac{3\psi\gamma}{r} \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \Big|_{z=r} = \frac{dT_f}{dx} \quad \text{onde, } \gamma \equiv \frac{k_s}{\rho C_s v_p} \quad (18)$$

A condição de contorno para esta equação foi $T_f = T_{f1}$, em $x = 0$.

A solução deste conjunto de equações foi obtida por meio da transformada de Laplace em relação à variável x .

Os perfis de temperatura do gás e do sólido, ao longo do leito, foram determinados para os casos de $\psi \neq 1$ e $\psi = 1$:

Para $\psi \neq 1$

- perfil de temperatura do sólido:

$$T_s(z, x) = T_{s1} + \frac{T_{s1} - T_{f1}}{\psi - 1} - \frac{2r(T_{s1} - T_{f1})}{z} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{w_n z}{r}}{g_n \sin w_n} \exp\left(-\frac{\gamma}{r^2} w_n^2 x\right) \quad (19)$$

onde,

$$g_n = 2(1 - \xi) - 3\psi - \xi w_n^2 + \frac{3\psi + (\xi - 1)w_n^2}{3\psi + \xi w_n^2} (1 + 2\xi) \quad (20)$$

$$\xi \equiv \frac{k_s}{h_f r}$$

e w_n são as raízes da equação,

$$[-3\psi + (1 - \xi)w_n^2] \sin w_n + (3\psi + \xi w_n^2)w_n \cos w_n = 0 \quad (21)$$

- perfil de temperatura do gás:

$$\frac{T_f - T_{s1}}{T_f - T_{s1}} = 1 + 6\psi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \exp\left(-\frac{w_n^2 \gamma x}{r^2}\right)}{(3\psi + \xi w_n^2) - 3(3\psi + \xi w_n^2) + w_n^2 (1 + 2\xi)} \quad (22)$$

- temperatura média das partículas na saída do trocador:

$$\bar{T}_s = T_{sl} + \frac{T_{sl} - T_{fl}}{\psi - 1} + 6 (T_{sl} - T_{fl}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{\gamma}{r^2} w_n^2 x\right)}{(3\psi + \xi w_n^2)^2 - 3(3\psi + \xi w_n^2) + w_n^2 (1 + 2\xi)} \quad (23)$$

ou

$$\frac{T_s - T_{sl}}{T_{sl} - T_{fl}} = \frac{1}{\psi - 1} + 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{\gamma}{r^2} w_n^2 x\right)}{(3\psi + \xi w_n^2)^2 - 3(3\psi + \xi w_n^2) + (1 + 2\xi) w_n^2} \quad (24)$$

onde, a temperatura média das partículas na saída inferior do trocador é definida pela equação:

$$\bar{T}_s(x) = \frac{3}{r^3} \int_0^r z^2 T_s(z, x) dx \quad (25)$$

para $\psi = 1$

- perfil de temperatura do sólido:

$$T_s(z, x) = \left[-\frac{15x}{r^2(1+5\xi)} - \frac{5r^2}{2r^2(1+5\xi)} + \frac{15}{14} \cdot \frac{(1+7\xi)}{(1+5\xi)} \right] (T_{sl} - T_{fl}) + T_{sl} - \frac{2r}{z} (T_{sl} - T_{fl}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{\sin zw_n}{g_n} \exp\left(-\frac{\gamma}{r^2} w_n^2 x\right)}{g_n \sin w_n} \quad (26)$$

onde,

$$g_n' = -2\xi - 1 - \xi w_n^2 + \frac{3 + (\xi - 1) w_n^2}{3 + \xi w_n^2} (1 + 2\xi) \quad (27)$$

e w_n são as raízes da equação (21), com $\psi = 1$.

- perfil de temperatura do gás:

$$\frac{T_f - T_{sl}}{T_{fl} - T_{sl}} = 1 + \frac{15 \gamma x}{r^2 (1 + 5\xi)} + 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{r^2} w_n^2 x\right)}{(3 + \xi w_n^2)^2 - 3(3 + \xi w_n^2) + w_n^2 (1 + 2\xi)} \quad (28)$$

A determinação experimental do coeficiente h baseado neste método não é simples, pois existe muita dificuldade na medida da temperatura em diferentes posições no interior da partícula durante o escoamento.

VIOLLAZ e SUAREZ (1980) obtiveram outra solução numérica do problema formulado por LOVELL e KARNOFSKY (1943). Foi dado um tratamento diferente às equações diferenciais que descrevem o fenômeno, o qual evitou a integração numérica das equações diferenciais parciais. Usando a resposta a uma função degrau, na temperatura do gás, a solução do problema foi determinada por meio do teorema de DUHAMEL.

As variações de temperaturas do gás e do sólido foram obtidas através de um algoritmo, levando em consideração a resistência térmica no interior da partícula. Os resultados foram comparados com a solução analítica calculada por MUNRO e AMUNDSON (1950) e com a solução aproximada apresentada por LOVELL e KARNOFSKY (1943). Foi verificado que os dados de temperatura do gás obtidos por VIOLLAZ e SUAREZ (1980) são os que mais se aproximam da solução exata.

Ao longo das décadas, a pesquisa experimental não acompanhou a pesquisa teórica na configuração de escoamentos contracorrente. Os trabalhos existentes estudam o comportamento do gás sobre o sólido em função do leito, onde utilizam material sintético em forma granular, SARTORI(1986).

Para análise do tipo de escoamento, foram utilizados as equações desenvolvidas por FURNAS (1930), onde pode-se determinar a dependência de NUSSELT (Nu) em função de REYNOLDS (Re).

$$Nu = 0,018 Pr^{1/3} Re^{1,23} \quad (29)$$

O número de PRANDTL, $Pr = 0,72$ e o número de REYNOLDS variando de 10 a 50, foi obtido no estudo desenvolvido por SISSOM e JACKSON (1967).

Outra correlação foi desenvolvida por BOWERS e REINTJES (1961), onde foram analisados os dados obtidos de diversos autores, determinando a seguinte relação,

$$Nu = 0,626 Re^{0,59} \quad \text{para } Re \text{ variando no intervalo de } 50 \text{ a } 500.$$

Nos trabalhos desenvolvidos, os autores concluíram que para a utilização de um dos modelos são necessárias experiências em escala semi-industrial, visando a obtenção de parâmetros. Enquanto que os outros modelos, que podem prescindir dos resultados em escala semi-industrial, exigem ainda maior número de experiências para possibilitar o estabelecimento de correlações adequadas entre o coeficiente de troca térmica e as variáveis do sistema.

O leito deslizante na configuração de escoamento contracorrente pode ser tratado como sendo constituído pelos escoamentos de gás e de sólido, com perfis planos de velocidade. A suposição mais importante neste tratamento é a de que a convecção na superfície do sólido é o mecanismo predominante de troca térmica.

Podendo ser adotada também, as seguintes simplificações:

- perfis planos de temperatura nas regiões de entrada de ambas as fases;
- perda de calor através das paredes do sistema desprezível;
- leito com propriedades homogêneas;
- escoamentos unidirecionais de gás e de sólido;
- propriedades físico-químicas constantes ao longo do leito.

Apresentando algumas correlações de coeficiente de transferência de calor, quadros 1 e 2.

QUADRO 1- CORRELAÇÕES PARA O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR - LEITO FIXO.

AUTOR	EQUAÇÃO	CONSIDERAÇÕES	OBSERVAÇÕES
Gamson et alli, 1943	$\frac{h}{C_f G_f} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} = 3,26 \text{Re}^{-0,65}$ $20 < \text{Re} < 1000$	equação desenvolvida a partir de dados experiment. de transf. de calor e massa, camada fina, de catalisadores de celite	a temperatura de bulbo seco variou de 27 a 71°C, bulbo úmido de 15,5 a 52°C velocid. do ar 0,45 a 2,58 m/s
Ranz e Marshall, 1952	$\frac{h D_p}{k_f} = 2 + 0,6 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,33}$	equação desenvolvida para transf. de calor entre uma esfera e um gás em escoamento	equação aplicada na simulação de secadores de trigo em camada fina e em leitos fixo e fluidiz
Boyce, 1965	$h_a = 4286,5 \left[\frac{G_f (T_f + 273)}{P} \right]^{0,6011}$	equação desenvolvida a partir de experiências de aquecimento e resfriamento de grãos secos	T_f dado em °C G_f dado em kg / m ² .min P dado em N / m ² h_a dado em kJ / m ³ .min. K
Bakker-Arkema et alli, 1982	$h = 0,263 G_f^{0,59} \quad G_f \leq 500 \text{kg} / \text{m}^2 \text{s}$ $h = 0,69 G_f^{0,49} \quad G_f > 500 \text{kg} / \text{m}^2 \text{s}$	consideraram um diâmetro equivalente para o grão	G_f dado em lb / ft ² h h dado em BTU / ft ² h °F
Gupta e Srinivason, 1982	$\frac{h D_p}{k_f} = 1,62 \text{Re}^{0,25} \text{Pr}^{0,33} \quad \text{Re} < 120$	equação desenvolvida para transf. de calor gás e partículas esféricas em leito fixo	

FONTE: CALADO, 1993.

QUADRO 2- CORRELAÇÕES PARA O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR -LEITO DESLIZANTE

AUTOR	EQUAÇÕES	CONSIDERAÇÕES
Sisson e Jackson, 1967	$C_f G_f \frac{dT_f}{dx} = hS(T_s - T_f)$ $Nu = 0,018 \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \text{Re}^{1,23} \quad 10 < \text{Re} < 50$ $\text{Pr} \approx 0,72$	equação desenvolvida a partir de dados experimentais
Bowers e Reintjes, 1961	$q = hS(T_s - T_f)$ $Nu = 0,626 \text{Re}^{0,59} \quad 50 < \text{Re} < 500$	equação desenvolvida a partir de dados experimentais

FONTE: SARTORI, 1986.

c. PERFIS DE TEMPERATURA DO GÁS E DO SÓLIDO

No escoamento em contracorrente, levando-se em conta a geometria cilíndrica do leito, conforme as coordenadas indicadas no esquema da Figura 1, e adotando as simplificações descritas anteriormente, as equações diferenciais que descrevem a transferência de calor em regime permanente no interior do sistema, de acordo com FURNAS (1930), temos:

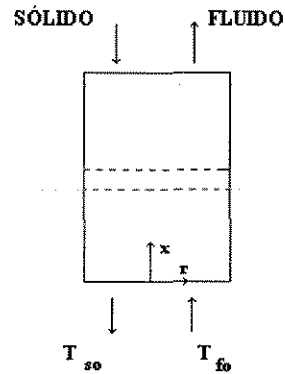


Figura 1- Esquema de um escoamento em contra corrente

- Fase fluida:

$$C_f G_f \frac{dT_f}{dx} + hS(T_f - T_s) = 0 \quad (30)$$

- Fase sólida:

$$C_s G_s \frac{dT_s}{dx} + hS(T_f - T_s) = 0 \quad (31)$$

sujeitas às condições na região de entrada do gás:

$$t_f(0) = T_{fo} \quad (32)$$

$$T_s(0) = T_{so} \quad (33)$$

FURNAS (1930) obteve a solução do sistema de equações (30) e (31) para as condições de contorno $T_f(0)=T_{fo}$ e $T_s(L)=T_{s1}$, conforme as equações (7) e (8).

A solução deste sistema de equações diferenciais com as condições de contorno (32) e (33) é demonstrado como segue:

Obtenção dos perfis de temperatura do gás e do sólido nos escoamentos em contracorrente, considerando as variáveis adimensionais:

$$X = \frac{hSx}{C_f G_f}, \quad (34)$$

$$v = \frac{(T_f - T_{f0})}{T_{s0} - T_{f0}} \quad (35)$$

$$u = \frac{(T_s - T_{f0})}{T_{s0} - T_{f0}} \quad (35a)$$

e o parâmetro adimensional

$$\psi = \frac{C_f G_f}{C_s G_s}, \quad (36)$$

a troca térmica entre os constituintes na configuração de escoamentos

contracorrente é descrita pelas equações:

$$\begin{aligned} \psi \frac{dv}{dX} + v - u &= 0 & (I) \\ \frac{du}{dX} + v - u &= 0 & (II) \end{aligned} \quad (37)$$

sujeitas às condições:

$$v(0) = 0$$

$$u(0) = 1$$

levando em consideração as coordenadas do esquema da Figura 1.

Subtraindo da equação (37) , (I) e (II), tem-se,

$$\psi \frac{dv}{dX} - \frac{du}{dX} = 0 \quad (38)$$

integrando em X de 0 a X , tem-se que

$$u(X) = -1 + v(X) \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \text{logo,} \quad v - u &= (1 - \psi)[v(X) + 1 / (1 - \psi)], \text{ para } \psi \neq 1 \\ v - u &= 1, \text{ para } \psi = 1 \end{aligned} \quad (40)$$

da equação (I), tem-se

$$\frac{d}{dX} \left\{ \exp \left[(1-\psi)X / \psi \right] \cdot [v(X) + 1 / (1-\psi)] \right\} = 0 \quad (41)$$

logo, para $\psi = 1$,

$$\frac{T_f - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}} = \frac{1 - \exp[(1-\psi)X / \psi]}{1 - \psi} \quad (42a)$$

$$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}} = \frac{1 - \psi \exp[-(1-\psi)X / \psi]}{1 - \psi} \quad (42b)$$

E para,

$$\psi = 1$$

$$v = -\frac{X}{\psi} \quad (42c)$$

$$u = 1 - X$$

E, para $\psi \neq 1$, obtém-se:

$$\frac{A + B.T_f(x)}{A + B.T_{fo}} = \exp(\lambda x) \quad (43)$$

$$\frac{A + B.T_s(x)}{A + B.T_{fo}} = \psi \exp(\lambda x) \quad (44)$$

onde,

$$A \equiv \psi T_{fo} - T_{so}$$

$$B \equiv 1 - \psi$$

$$\lambda \equiv -\frac{hS}{C_f G_f} (1 - \psi) \quad (45)$$

Para $\psi = 1$, tem-se que:

$$\frac{T_{f0} - T_f(x)}{T_{f0} - T_{s0}} = \frac{hS}{C_f G_f} x$$

$$\frac{T_{s0} - T_s(x)}{T_{f0} - T_{s0}} = \frac{hS}{C_f G_f} x$$
(46)

d. PROMOTORES ESTACIONÁRIOS

PARK (1979) obteve o aumento na taxa de transferência de calor para o escoamento laminar de fluidos newtonianos e não-newtonianos em um trocador de calor, munido de promotores estacionários anulares de turbulência.

No trabalho de PARK, JARDINE e SUNDFIELD (1983), utilizaram o princípio do trocador de calor com promotores estacionários, que possibilitou a construção de um secador com aletas internas retas para avaliar as possíveis correlações de transferência de calor e massa. Foi obtida uma equação de secagem do tipo:

$$\frac{(Y - Y_{eq})}{(Y_0 - Y_{eq})} = a(L^b)$$
(47)

onde : Y umidade, kg de água/kg de matéria seca

Y_{eq} umidade de equilíbrio, kg de água/kg de matéria seca

Y_0 umidade inicial, kg de água/kg de matéria seca

a e b constantes da equação, adimensional

L comprimento do secador, m

Obtiveram um rápido aquecimento dos grãos num reduzido tempo de residência.

A maior resistência à transferência de calor entre as fronteiras do sólido e os fluidos turbulentos é a subcamada laminar adjacente à parede. A resistência dessa camada laminar é proporcional a sua espessura e, qualquer redução na espessura resulta num aumento da taxa de transferência de calor entre a parede e o fluido.

Um meio de reduzir a espessura da camada laminar é aumentar a intensidade e escala da turbulência do fluido. Isto é feito pela utilização de promotores de turbulência no duto. Estudos feitos por Royds, Siegel, Colburn e King, mostram que os promotores de turbulência aumentam a taxa de transferência de calor. Entretanto, os promotores de turbulência também têm o efeito de aumentar a resistência ao escoamento, o que faz com que o calor transferido por unidade de energia gasta talvez não seja alterado, KNUDSEN e KATZ (1958).

GODOI (1996), utilizando promotores anulares estáticos de mistura em um secador contínuo vertical, realizou um estudo do comportamento hidráulico e da transferência de calor e massa. Um bom índice de correlação foi obtido para o fator de atrito em função do número de Reynolds. As equações empíricas, descrevendo a transferência de calor no secador, foram as correlações do número de NUSSELT em função dos números Reynolds para cada regime de escoamento. Estas equações apresentaram uma grande semelhança com equações para transferência de calor em leitos deslizantes.

2.2) SECAGEM

O estudo da secagem de grãos depende do enfoque que se deseja dar. Nos estudos teóricos, a ênfase é dada nos mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa entre o produto a ser seco e o meio utilizado, em outros casos a secagem de grãos é estudada como sendo o processo unitário que leva a redução de umidade contida nestes para atingir um nível seguro para sua armazenagem. Este nível de umidade reduz a atividade respiratória dos grãos, diminuindo seu metabolismo, dificultando um meio propício para o desenvolvimento de fungos e bactérias, DALPASQUALE (1983).

Secam-se produtos agrícolas desde os primórdios da civilização, o homem se tornou agricultor entre 9.000 e 8.000 a.c.. A prova disto é a existência de várias passagens nos escritos dos povos antigos, que indicam a preocupação que os

mesmos tinham com a preservação dos cereais. Se houvesse um registro de patentes, caberia aos egípcios a invenção dos silos, PIZA e NETO (1980).

A secagem era feita em condições naturais do ambiente, pela incidência da energia solar e o movimento do ar. Mais tarde, controlava-se parcialmente as condições de secagem em fogões especiais ou salas aquecidas.

No período entre a primeira e segunda guerras mundiais, várias unidades experimentais foram construídas, sendo que de maneira comercial, destinavam-se basicamente à desidratação de frutas, vegetais e a secagem de milho. Após a segunda guerra mundial, tornaram-se comuns grandes unidades comerciais de secagem de grãos nas fazendas.

O conhecimento das propriedades físicas dos grãos é de fundamental importância, pois é a partir delas que os artifícios para processar os grãos são criados.

A forma, o tamanho, a densidade real, a densidade aparente, a consistência, a elasticidade, a textura do tegumento, a velocidade terminal, a carga eletrostática induzida, a cor, são algumas dessas propriedades utilizadas, JORGE (1980).

O grão como um ser vivo, respira eliminando gás carbônico, água e calor, tem a capacidade de enfrentar as doenças (microorganismos), os ataques de insetos e aumentar a temperatura através da atividade respiratória mais intensa.

Dentre as principais qualidades desejáveis para um grão ter seu período de conservação aumentada, estão: teor de umidade apropriadamente baixo e uniforme; baixa porcentagem de grãos trincados, quebrados, danificados e de materiais estranhos; baixa susceptibilidade à quebra; alto peso específico; alta viabilidade das sementes; baixa infecção de fungos e bactérias e baixa infestação de pragas.

A secagem mecânica pode ser entendida como a atividade destinada a diminuir artificialmente o teor de umidade dos grãos, até um limite adequado, sem comprometer as suas propriedades.

As três formas de umidade nos grãos que interessam na secagem mecânica, são (figura 2):

- Umidade superficial, aderida externamente;
- Umidade intersticial, sem função biológica, existindo livremente entre as moléculas dos grãos, mantida por forças capilares e pelo diferencial da pressão osmótica;
- Umidade de constituição, existente nas moléculas dos grãos, quimicamente ligadas, possuindo função biológica.

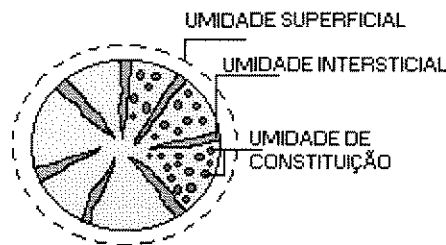


Figura 2 -Apresentação de forma simplificada da umidade existente nos grãos.

Na secagem dos grãos, a umidade retirada diz respeito à umidade superficial e à umidade intersticial, estas umidades representam um percentual de 13% até 27% e a umidade de constituição em até 13%, LASSERAN (1981).

O processo de secagem não altera a umidade de constituição, mesmo quando se atinge teores de umidade em 11%, o que é difícil, pois nesta faixa a umidade se encontra fortemente adsorvida, ligada por forças de Van Der Waals.

Os grãos contêm uma proporção variável de água e matéria seca, conforme pode ser observado no desenho esquemático (figura 3):

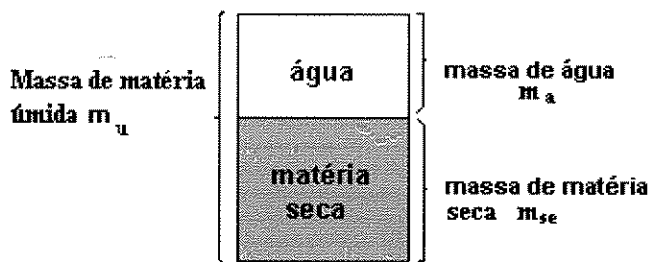


Figura 3 - Desenho esquemático de um grão e sua proporção variável de água e matéria seca.

O teor de água em porcentagem referente a matéria úmida

$$u = \frac{m_a}{m_u} \times 100 = \frac{m_a}{m_a + m_{sc}} \times 100 \quad (48)$$

e a taxa de umidade (x):
$$x = \frac{u}{100 - u} \quad (49)$$

Em trabalhos científicos, utiliza-se a taxa de umidade, grandeza sem dimensão. Com efeito após a definição do teor de água, observa-se que não há uma relação linear entre u e m_a , razão pela qual a variação de um ponto de umidade não representa uma variação constante da massa de água durante a secagem.

Os fisiologistas de cereais determinaram que a água do grão se apresenta sob quatro tipos diferentes, em função da natureza das ligações físico-químicas existentes entre os componentes da matéria e as moléculas de água, correspondentes aos diferentes níveis de hidratação do produto, conforme pode ser visto na figura 4.

A molécula de água se comporta na realidade, como um microímã, com um pólo positivo e um polo negativo $H-OH^+$.

O primeiro tipo de água é constituído por uma monocamada de água ligada a certos agrupamentos moleculares da matéria biológica, fortemente polarizados, como o grupo das hidroxilas $R-OH^+$.

A água do segundo tipo é representada por uma camada polimolecular de água, vindo a fixar-se sobre a camada monomolecular precedente.

Essas diferentes camadas moleculares, ligadas à matéria por meio de ligações eletromagnéticas, chamadas forças de Van Der-Waals, constituem a água pseudo-líquida, não solvente e fortemente adsorvida.

O terceiro tipo de água que se encontra nos grãos é constituída de água líquida sob tensão osmótica. Trata-se de água solvente, que retém diferentes substâncias dissolvidas nas células (açúcares, ácidos, amidos, sais, etc.). Esse tipo de água fracamente adsorvida tem um papel biológico e pode permitir as reações enzimáticas, bem como o desenvolvimento de fungos.

O quarto tipo, é constituído por água de impregnação, denominada de água livre. Na realidade essa água não é realmente livre nem água de embebição, como numa esponja, uma vez que não existem vasos capilares no grão, ela é retida no grão mecanicamente, pelas paredes celulares, LASSERAN (1978).

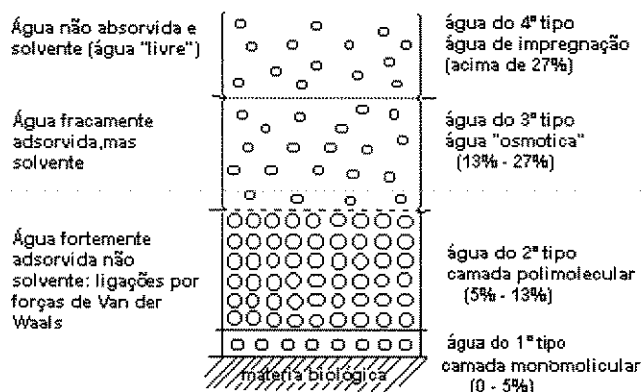


Figura 4 - Representação esquemática da fixação da água no grão (milho a 15°C), Fonte: LASSERAN (1978).

Moléculas de água estão ligadas à matéria com certa energia, denominada energia de ligação, que se torna importante à medida que se trata de água de 3º, 2º e 1º tipo.

Para evaporar essa água, no momento da secagem é necessário fornecer um suplemento de energia térmica. Nessas condições, o calor total de vaporização de água do grão pode ser enunciado, como: $L_g = L_a + L_1$, onde L_g é o calor de vaporização de água do grão e L_1 calor de ligação de água adsorvida e L_a o calor de vaporização da água pura, sendo que L_g , depende não somente do teor de água, mas também da temperatura e estrutura do grão.

O avanço da secagem será maior ou menor dependendo da natureza do grão, cuja massa funciona como um bom ou mau condutor, grãos submetidos as mesmas condições de secagem respondem de forma diferente, devido a diferença de constituição e da natureza biológica.

2.2.1) ISOTERMAS

Na secagem, o sentido do avanço de umidade será de dentro para fora. Entretanto, os grãos podem ter o movimento da água nos dois sentidos. De fora para dentro, quando estiver diante do processo de umedecimento (adsorção), e de dentro para fora quando estiver no processo de secagem (dessorção), o que depende da

pressão do vapor de água no ar e no produto, ocasionando a movimentação das moléculas de água, num ou noutro sentido, WEBER (1995).

Os fenômenos de sorção, são importantes para abordar e tentar entender a problemática da secagem.

Autores têm procurado determinar experimentalmente as curvas de equilíbrio ar - grão, ou curvas de sorção (dessorção e adsorção) para cada espécie, em função da temperatura, RODRIGUES (1956), CHUNG e PFOST(1967), NGODDY e BAKKER-ARKEMA (1972), PARK (1971).

Essas curvas são de grande importância para a conservação de todos os produtos vegetais, animais e dos grãos em particular, sendo também úteis para as técnicas de condicionamento dos grãos: aeração e secagem, conforme mostrado na figura 5.

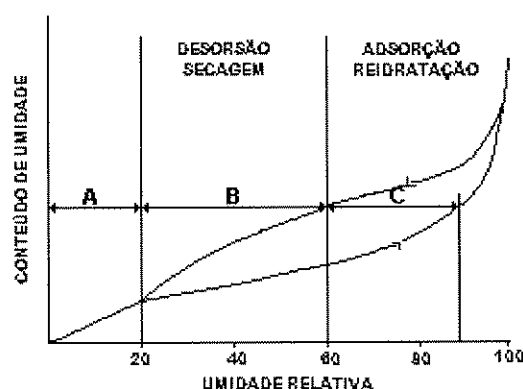


Figura 5 - Representação gráfica de uma isotérma, fonte: BALABAN, 1984.

As isotermas de sorção, chamadas frequentemente de curvas de sorção, traduzem a higroscopicidade do produto definida pelas relações existentes entre a água e outros componentes. E ainda, num plano teórico, conhecendo o teor de água e a temperatura da superfície do produto será possível, graças a estas curvas, conhecer o valor da pressão parcial de vapor de água na superfície e por conseguinte auxiliar no cálculo da taxa de secagem, DAUDIN (1983).

Uma isoterma é a curva que relaciona o conteúdo de umidade de equilíbrio de um produto com a umidade relativa. Costuma-se utilizar a atividade termodinâmica de água, definida como:

$$a_w = \frac{P_v}{P_{v_o}} = \frac{\%UR_e}{100} \quad (49)$$

onde:

- a_w - atividade termodinâmica de água
- P_v - pressão de vapor de água no alimento
- P_{v_o} - pressão de vapor de água saturada
- UR_{eq} - umidade relativa de equilíbrio

Uma das primeiras definições de atividade de água, demonstram a relação entre a pressão do vapor de água no ar e a pressão do vapor de água no ar saturado, medidos na mesma temperatura, SCOTT (1957) e SALWIN e SLAWSON (1959).

As equações matemáticas das isotérmicas de sorção de umidade que descrevem as relações entre a atividade de água e o conteúdo de umidade de equilíbrio para um produto, estão mostrados no quadro 3. As isotermas de sorção de umidade são utilizadas para vários propósitos, em pesquisa de alimentos que incluem: determinação do tempo de secagem, previsões para misturar e embalar alimentos prevendo as mudanças de umidade que ocorrem durante a armazenagem e estabilidade do mesmo, LAMAURO et alii (1985).

QUADRO 3- MODELOS DE ISOTERMAS DE SORÇÃO

AUTOR	EQUAÇÃO	FAIXA OPERACIONAL	OBSERVAÇÕES
Harkins e Jura, 1944	$\ln UR = a - bY_w^2$	milho $UR \leq 30\%$ $4,4^\circ C \leq T_s \leq 60^\circ C$	equação geral aplicada por Gustafson, 1972
Smith, 1947	$Y_w = a - b \ln(1 - UR)$	trigo $50\% \leq UR \leq 90\%$ $25^\circ C \leq T_s \leq 50^\circ C$	equação deduzida p/adsorç. em polímeros, mas aplic. ao trigo Becker et alii, 1956
Henderson, 1952	$1 - UR = \exp(-aT_s Y_w^b)$	para grãos em geral faixa variável	parâmetros a e b são dependentes da temper.e do tipo de grão
Chung e Pfof, 1967	$\ln UR = \frac{-a}{RT_s} \exp(-bY_w)$	milho $20\% \leq UR \leq 90\%$ $10^\circ C \leq T_s \leq 68,3^\circ C$	equação geral aplicada por Gustafson, 1972
Haynes, 1961	$\ln P = a + b \ln P_w + c \ln Y_w +$ $+ d \ln P_w^2 + e \ln(P_w Y_w)$	para grãos em geral faixa variável	-

Bakker-Arkema, 1974	$Y_{se} = f(UR, T_s)$	milho $0 \leq UR \leq 100\%$ $40^\circ C \leq T_s \leq 140^\circ C$	função f polinom.de 3º grau em UR, coef.função da temp do gás e da faixa de U.Relat
Roa e Rossi, 1980	$Y_{se} = (p_1 UR + p_2 UR^2 + p_3 UR^3) \cdot \exp \left[\frac{(q_0 + q_1 UR + q_2 UR^2 + q_3 UR^3 + q_4 UR^4)(T + q_5)}{T_s} \right]$	para grãos em geral faixa variável	os coeficientes dependem do tipo de grão
Aguerre, Suarez e Viollaz, 1982	$T_s = a \exp(-b Y_{se})$	arroz $0,036 \leq a_s \leq 0,823$ $10^\circ C \leq T_s \leq 70^\circ C$	os parâmetros são funções lineares da ativ. de água
Matsumoto e Pei, 1984	$Y_{se} = a \frac{UR P_{sat}}{P - UR P_{sat}} + b$	para vários grãos $40^\circ C \leq T_s \leq 80^\circ C$	
Benedetti e Jorge, 1987	$Y_{se} = a_0 UR + a_1 UR^2 + a_2 UR^3$	amendoim, feijão e soja $10\% \leq UR \leq 90\% - T_s = 20^\circ C$	parâmetros dependem do tipo de grão

FONTE: CALADO, 1993.

Também, define-se o teor de umidade de equilíbrio como sendo a umidade em que o produto atinge quando deixado por tempo suficientemente longo em determinada condição de temperatura e umidade relativa (ROA & ROSSI, 1980).

Para que haja secagem, é necessário que a umidade relativa do ar esteja inferior a atividade da água do produto. Sem esta condição quando se deseja desidratar produtos agrícolas com o ar atmosférico, torna-se necessário utilizar o ar aquecido.

2.2.2) Teoria de Secagem

CORNEJO (1987), apresentou revisão bibliográfica sobre os princípios fundamentais da secagem.

O modelo físico, demonstra que durante a secagem, é necessário fornecer calor para que haja evaporação de umidade no material devendo ao mesmo tempo existir um sorvedor de umidade que atue na remoção de vapor de água, formado a partir da superfície de secagem, conforme mostra a figura 6.

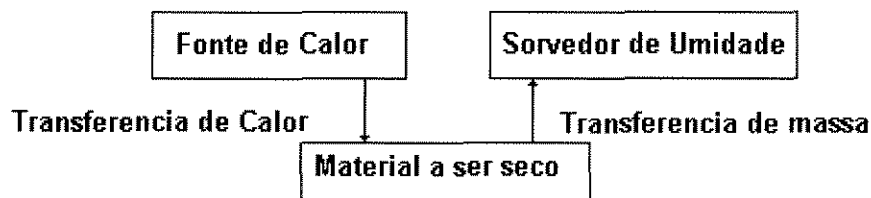


Figura 6 - Representação esquemática do modelo físico.

A aplicação quantitativa das relações de transferência de calor e de massa representa um objetivo da engenharia. A secagem não se restringe em termos da análise das condições externas, mas é altamente desejado estabelecer como a água é transportada do interior do sólido para a superfície de secagem, conforme mostrado na figura 7.

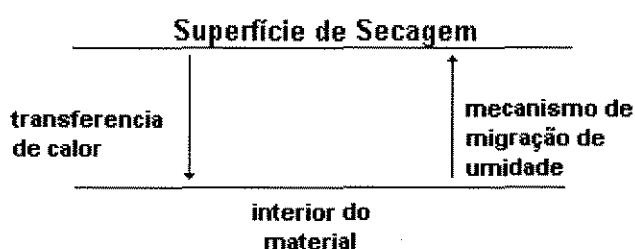


Figura 7 - Transporte da água do interior do sólido para superfície de secagem.

A secagem artificial do grão por aquecimento é obtida por convecção forçada de ar quente através da massa de grãos, sendo o fenômeno da secagem interpretado como o resultado da transferência (ou trocas) simultâneas de calor e de matéria.

A energia térmica necessária para a evaporação da água é trazida pelo ar, pela transferência de calor do fluido para o produto a ser seco.

A água evaporada do grão é em seguida absorvida e removida por esse ar, pela transferência de matéria do produto a ser seco.

O ar desempenha um duplo papel, o de fluido transportador de calor e vapor. O resfriamento sofrido pelo ar no curso da secagem é somente parcial, devendo este desempenhar seu papel de fluido vapor - transportador e permanecer, ainda eficientemente quente para poder conter a maior quantidade possível de água, uma vez que sua capacidade de absorção aumenta em função da temperatura.

Sob a ação de uma corrente de ar quente, o grão úmido cede sua umidade ao ar, pois ocorre uma pressão de vapor de água mais fraca no ar que na superfície do produto.

O mecanismo de migração da umidade no interior do grão por ocasião da secagem tem sido estudado por numerosos pesquisadores. O fluxo da água do interior para o exterior do grão seria ocasionado por um derramamento hidrodinâmico sob a ação da pressão total interna ou por um processo de difusão, resultante de gradientes internos de temperatura e do teor de água ou de um gradiente de pressão osmótica.

A água se evapora na superfície do grão, especialmente no início da secagem. Em seguida, quando a desidratação é mais avançada, a evaporação se processará no interior da matéria.

Uma secagem eficiente depende da transferência de calor para o produto e da transferência de água do produto para o ar de secagem sendo influenciadas por um fator de intensidade, que depende da velocidade do ar no grão e por um fator de potencialidade que depende do gradiente de pressão parcial do vapor de água entre a superfície e o ar de secagem.

Pode-se expressar matematicamente a velocidade de secagem, como:

$$v = \frac{dY}{dt} = s k_1 (T - T_d) = s k_2 (f_d - f) \quad (50)$$

v velocidade de secagem (kg água/kg mat. s)

dY/dt derivada de umidade em relação ao tempo

s superfície específica de evaporação (m^2/kg mat.s)

k_1 fator de intensidade de secagem (kg água/ m^2 s K)

k_2 fator de intensidade de secagem (kg água/ m^2 .Pa.s)

T temperatura do ar quente de secagem (K)

T_d temperatura da superfície do grão (K)

f pressão do vapor de ar quente de secagem (Pa)

f_d pressão do vapor na superfície do grão para temperatura T_d (Pa)

A superfície de evaporação, s está em primeira aproximação, próxima da superfície específica do grão. Os fatores de intensidade da secagem, k_1 e k_2 , são funções da dinâmica de secagem, eles aumentam com a velocidade do ar e decrescem com a espessura da camada de grãos. Dependem portanto, do fluxo específico do ar, expresso em metros cúbicos de ar por metros cúbicos de grãos e por hora ou em kg de ar / kg de matéria seca.

A pressão parcial do vapor de água do ar, f depende das condições higrométricas do ar exterior e do aquecimento (direto ou indireto); para temperaturas de secagem superiores a 80°C, as variações de f são insignificantes em sua incidência sobre a velocidade de secagem.

A pressão parcial do vapor na superfície do grão, f_d varia em função da temperatura do ar quente e em função do nível de dessecação do grão, onde:

$f_d = f_{sa} \cdot a_w$, f_{sa} é a pressão de vapor saturante à temperatura de saturação isentálpica e a_w a atividade de água.

A temperatura na superfície do grão, T_d é superior ou igual a T_{sa} temperatura de saturação isentálpica.

A evolução das transferências simultâneas de calor e massa no curso da operação de secagem divide-se em três períodos; período 0: (onde o produto é geralmente mais frio do que o ar e a pressão parcial de vapor d'água na superfície do produto é débil). O calor chegando em excesso acarretará em uma elevação da temperatura do produto ocorrendo um aumento da velocidade de secagem, este fenômeno continua até que a transferência de calor compense a transferência de massa. Se a temperatura do ar for inferior a do produto esta última diminuirá até atingir o estado de equilíbrio; período 1: (período de secagem a velocidade constante) a água se evapora como água livre, a pressão de vapor d'água pura na superfície é constante e igual a pressão de vapor d'água pura à temperatura do produto, este período continua, enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para compensar a perda por evaporação de água na superfície; período 2: (período de secagem a velocidade decrescente) neste momento a água

começa a ser deficiente na superfície, o valor do teor de água do produto no ponto de transição entre o período 1 e o 2 é chamado de teor de água crítico, onde a troca térmica não é mais compensada, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Durante todo este período o fator limitante é a migração interna de água, esta redução da velocidade de secagem é às vezes interpretada como uma diminuição da superfície molhada no começo do período 2, mas frequentemente pela diminuição da pressão parcial de vapor d'água na superfície. No final deste período o produto está em equilíbrio com o ar e a velocidade de secagem é nula, DAUDIN (1983).

NONHEBEL e MOSS (1971), consideraram que para um gás a temperatura e umidade constante, o processo de secagem ocorre em duas etapas: secagem a velocidade constante e secagem a velocidade decrescente, sendo a primeira expressão às vezes confusa, pois a velocidade só é constante se as condições externas são constantes, recomendando chamar a primeira etapa como "período de secagem de bulbo úmido", porém a primeira expressão é mais usada.

Para sólidos porosos não higroscópicos, KEEY (1975), considera duas etapas no período de secagem a velocidade decrescente identificadas como a umidade em estado funicular (fase contínua) e no estado pendular (fase descontínua) com o aparecimento de um segundo ponto de inflexão.

PARK (1987) recomenda o uso do termo "ponto de inflexão (ou transição)" da velocidade constante para decrescente em vez de ponto crítico, pois o ponto crítico seria o ponto de transição do estado funicular para o estado pendular.

As razões para medir a cinética de secagem podem ser de dois tipos: fundamental, que tem por objetivo prover um suporte experimental para a modelagem dos fenômenos de transferência durante a secagem e prático, que visa prover um ponto inicial para o cálculo dos processos de secagem industrial, especialmente por simulação, BINBENET (1985).

NONHEBEL e MOSS (1971), descrevem a simplificação para o sistema ar - água no período 1 ou período de secagem a taxa constante, onde as temperaturas de

bulbo úmido e de saturação adiabática são praticamente idênticas para umidades e temperaturas moderadas (0 - 100°C). Mesmo com as simplificações no tratamento deste período, os coeficientes de secagem podem ser obtidos a partir dos valores quantitativos (experimentais) das relações das forças impulsoras, assumindo-se que o material é termicamente estável e com encolhimento desprezível. Além de poder se utilizar o coeficiente baseado na força impulsora de umidade, a faixa da utilização é mais ampla sem que seja necessária a correção por fluxo.

DAUDIN (1983), utilizou o seguinte método de cálculo para este período:

$$\text{Fluxo de calor: } Q_q = h (T_f - T_{fh}) \quad (51)$$

$$\text{Fluxo de massa: } Q_m = k_{mp}(P - P_a) = (dQ_m/dt) / S_p \quad (52)$$

S_p - superfície específica do produto por unidade de massa em matéria seca, m²/kg

P - neste período é igual à pressão de vapor de saturação à temperatura de bulbo úmido do ar, Pa

h - coeficiente de transferência de calor, kJ/m² s K

k_{mp} - coeficiente de transferência de massa, kg/Pa m² s

T_f - temperatura do ar, K

T_{fh} - temperatura de bulbo úmido do ar, K

Durante este período as duas transferências se compensam, podendo-se calcular o fluxo de massa Q_m e obter a taxa de secagem pela seguinte equação:

$$Q_m = h \cdot (T_\infty - T_d) / L_g \quad (52a)$$

onde: Q_m fluxo de massa, kg/m² s

h coeficiente de transferência de calor, kJ/m² s K

T_∞ temperatura do meio, K

T_d temperatura da superfície do grão, K

L_g calor latente de vaporização da água, kJ/kg

Para as transferências em convecção forçada, o coeficiente é obtido a partir de uma relação adimensional de semelhança tendo a seguinte forma:

$$Nu = a(Pr)^b(Re)^c \quad (53)$$

Nu - número de Nusselt

Pr - número de Prandtl.

Re - número de Reynolds

As constantes a, b e c adquirem diferentes valores em função da geometria do produto, estas relações devem ser utilizadas com prudência segundo DAUDIN (1983), devido ao coeficiente α avaliado globalmente, uma vez que o escoamento do ar não é homogêneo sobre a superfície do produto e as transferências de calor são influenciadas pela evaporação da água na superfície do produto.

No período de velocidade decrescente ou período 2, é reconhecido como praticamente o único presente na secagem da maioria dos produtos agrícolas e alimentícios. Devido a complexidade dos fenômenos envolvidos durante a secagem, existem trabalhos científicos de várias teorias e múltiplas fórmulas empíricas para predizer a taxa de secagem.

DAUDIN (1983), concorda com a afirmação de NONHEBEL e MOSS (1971), quando estes apresentaram uma equação geral avaliando este período e demonstrando a impossibilidade de resolvê-las sem conhecer as funções específicas para cada processo, afirmando ser conveniente efetuar a integração por etapas ou graficamente baseado na curva de secagem a velocidade decrescente obtidos pelos dados experimentais.

Ainda que o computador tenha facilitado o tratamento dos dados experimentais, as dificuldades na escolha da função matemática apropriada para expressar os dados experimentais, tendo em vista desvendar e fundamentar conceitos fenomenológicos, continua sendo uma interrogação.

Os possíveis mecanismos de transporte de umidade em sólidos, são citados por FORTES e OKOS (1980) :

-Difusão líquida, devido ao gradiente de concentração;

- Difusão de vapor, devido aos gradientes de pressão parcial de vapor (causado por gradientes de temperatura);
- Movimento líquido, devido a forças capilares;
- Fluxo de líquido ou vapor, devido a diferenças na pressão total, causadas por pressão externa, encolhimento, altas temperaturas e capilaridade;
- Fluxo por efusão (Knudsen) ocorre quando o principal caminho livre das moléculas de vapor é da mesma magnitude que o diâmetro dos poros, sendo esta condição importante quando se trabalha com alto vácuo (liofilização);
- Movimento do líquido devido à força gravitacional, usualmente desprezível dado que não tem influência significativa na secagem de alimentos;

E os efeitos colaterais importantes durante a secagem, PARK (1987):

- Migração dos solutos: no caso dos açúcares, estes se depositam na superfície formando uma camada que tem o efeito de diminuir a velocidade de secagem;
- Deformação do produto: a maioria dos produtos biológicos se retraem substancialmente durante a secagem gerando tensões que influenciam a taxa de secagem.

A teoria de migração de umidade por difusão se baseia na lei de Fick, que expressa o fluxo de massa como sendo proporcional ao gradiente de concentração:

$$Q_m = D_{ef} \text{ grad } C_{se} \quad (54)$$

D_{ef} é o coeficiente de difusão e C_{se} representa a concentração de água.

Esta forma simplificada da lei de Fick, despreza a interdifusão, todavia esta hipótese é justificada uma vez que a água migra dentro de uma matriz fixa.

A equação descrita pela lei de Fick,

$$dY/dt = d / dx (k_l dY/dx) dx \quad (55)$$

onde: Y conteúdo de umidade

t tempo

k_l condutividade líquida

x sentido do movimento da umidade.

Os primeiros pesquisadores que fizeram referência a esta lei, na década de 20, trabalhavam na secagem de celulose e argila, interpretando este fenômeno como difusão de água líquida.

O uso desta teoria, teve sempre a preferência para calcular a secagem de produtos agrícolas. O coeficiente de difusão representa a difusividade efetiva, englobando os efeitos de todos os fenômenos, podendo intervir sobre a migração da água. O seu valor é sempre obtido pelo ajuste de curvas experimentais.

CHARM (1971), apresenta soluções desta equação para coeficiente de difusão constante. CRANK (1975), publicou as soluções desta equação para várias condições limite, coeficiente de difusão constante ou variável e condições isoentrópicas.

Esta teoria, teve preferência na interpretação da secagem de produtos agrícolas e alimentares, sendo formalizadas suposições na resolução desta equação, como:

- Coeficiente de difusão constante;
- O material não encolhe durante a secagem;
- A superfície de secagem está em equilíbrio com o ar de secagem;
- O conteúdo de umidade do material tende para a umidade de equilíbrio;
- O movimento de água resulta do gradiente destas umidades, onde o perfil linear de concentração de umidade do material é assumido.

A lei da difusão é aplicada mais por causa de sua forma matemática do que pelas razões teóricas relativas aos fenômenos físicos. Autores como WHITAKER (1969), complicaram ainda mais este modelo introduzindo dois coeficientes de difusão, o primeiro para a difusão de água líquida e o segundo para a difusão de vapor.

Devido a discrepância nos resultados apresentados das difusividades calculadas utilizando a 2ª lei de FICK e considerando o escoamento de água no interior do sólido na forma líquida, VAN ARSDEL (1947) e KING (1968), teceram considerações, surgindo a utilização da equação para escoamento da água na fase vapor.

LEWIS (1921), analisa a secagem com a equação da segunda lei de FICK, assumindo o perfil linear de concentração de umidade no material e expressando a razão da umidade livre removível inicial e umidade removível momentânea em função exponencial do tempo de secagem, onde a umidade livre é a umidade do material menos a umidade de equilíbrio. Sendo que durante a secagem, o estabelecimento do perfil de concentração da superfície ao centro do material, não é instantâneo, existindo um limite de separação da zona úmida (central) e zona seca (superficial). Este limite de separação move-se para o centro do material durante a secagem, consequentemente o perfil é do centro até a interface.

A espessura do material, onde existe perfil estabelecido, controla a secagem através da difusão, esta camada é denominada pelo autor como "efeito pelicular", sendo necessário a utilização de um fator de correção.

SHERWOOD (1929), classifica como sendo quatro os tipos de mecanismos de secagem em termos de resistência interna versus resistência externa:

- resistências em termos de movimento líquido;
- difusão de vapor;
- difusão na camada limite do ar externo;
- difusão no ar externo.

Utilizando a equação de FICK em sua análise, demonstrou que a equação com fator de correção obtida por LEWIS (1921), coincide com a solução da série de FOURIER durante os primeiros períodos até a remoção de sessenta por cento de umidade livre, nas condições de resistência externa desprezível.

Assim, LEWIS (1921) e SHERWOOD (1929), foram os primeiros que iniciaram o tratamento da secagem com a teoria difusional, expressando o fluxo de transferência de massa na secagem como sendo função do gradiente de concentração de água.

BECKER e SALLANS (1955), propuseram o mecanismo difusivo como responsável pela resistência à transferência de massa no interior do grão, considerando a partícula esférica.

No caso da secagem com sistemas de coordenadas esféricas a equação, pode ser escrita, em termos de z , α' e β .

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{1}{z^2} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(z^2 D_{ef} \frac{\partial Y}{\partial z} \right) + \frac{1}{\sin \alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(D_{ef} \sin \alpha \frac{\partial Y}{\partial \alpha} \right) + \frac{D_{ef}}{\sin^2 \alpha} \frac{\partial^2 Y}{\partial \beta^2} \right] \quad (56)$$

Com uma esfera de raio r , difusão unidirecional e possuindo um conteúdo de umidade inicial uniforme Y_0 , e submetido a uma condição constante do ar de secagem, a equação fica reduzida a:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{1}{z^2} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(z^2 D_{ef} \left(\frac{\partial Y}{\partial z} \right) \right) \right] \quad (57)$$

sendo: Y - conteúdo de umidade, base seca

z - variável espacial (direção radial)

t - tempo, s

D_{ef} difusividade efetiva da água líquida no sólido

com as seguintes condições iniciais e de contorno

$$\begin{array}{lll} t=0 & 0 < z < r & Y=Y_0 \\ t>0 & z=0 & \partial Y / \partial z = 0 \\ t>0 & z=r & Y=Y_{eq} \end{array} \quad (58)$$

torna-se a equação em forma de série :

$$R = \frac{\bar{Y} - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[\frac{-n^2 \pi^2 D_{ef} t}{r^2} \right] \quad (59)$$

R - conteúdo de umidade, adimensional

$\bar{Y}$ - conteúdo médio de umidade, kg água/kg de massa seca

Y_{eq} - conteúdo de umidade de equilíbrio, kg água/kg de massa seca

Y_0 - conteúdo de umidade inicial, kg água/kg de massa seca

n - número de termos na série

D_{ef} -difusividade efetiva, m^2/s
 t -tempo, s
 r -raio médio da amostra, m .

JASON (1958); DAUDIN (1983); KARATHANOS et alli (1990) e PARK et alli (1996), utilizaram este modelo, para ajustar dados de secagem de materiais biológicos.

Este modelo foi baseado na suposição de que se possa desprezar a transferência de calor e tratar os dados como uma difusão puramente controlada pelo fenômeno de transferência de massa. Esta suposição foi baseada em estudos experimentais que indicaram a existência de pequenos gradientes de temperaturas dentro dos alimentos durante o processo de secagem.

Alguns pesquisadores utilizaram os modelos, que levam em conta a influência da temperatura e do teor de água sobre a difusividade da água, SUZUKI, KEEY e MAEDA (1977).

As equações de modelos teóricos representam os fenômenos físicos de uma maneira generalizada. Estes modelos são facilmente resolvidos se não for levada em conta a complexidade dos fenômenos. Como isto não ocorre, vários pesquisadores conduziram suas observações no sentido de uma abordagem empírica na qual a lei da secagem é tirada diretamente de experiências de secagem em laboratório.

O tratamento do desenvolvimento teórico na secagem de sólidos, depende do mecanismo predominante que ocorre na transferência de calor por convecção, condução ou radiação.

A convecção é o mecanismo predominante na maioria dos secadores, onde o material é seco pelo contato direto de uma corrente de ar quente que passa através ou sobre este, ao passo que na condução o material é aquecido através do contato nas paredes. Em ambos os casos pode-se observar a transferência de calor por radiação.

Desta forma é conveniente tratar a teoria de secagem em termos de convecção pura ou condução, aplicando-se as correções pertinentes nas formas de transferência de calor.

Em um tratamento teórico rigoroso de secagem é necessário o conhecimento quantitativo dos fatores que afetam o movimento tanto do líquido como do vapor. Estes dados são necessários para a descrição da estrutura interna do sólido de modo que possa ser usado para calcular as velocidades das fases líquida e vapor a partir de suas propriedades físicas, NONHEBEL (1971).

O coeficiente de difusão, D_{ef} assim como a constante de secagem, K são determinados a partir de correlações válidas adotadas nas condições operacionais, mostradas nos quadros 4 e 5.

QUADRO 4- EQUAÇÕES PARA DIFUSIVIDADE EFETIVA.

AUTOR	EQUAÇÃO	FAIXA OPERACIONAL	OBSERVAÇÕES
Becker e Sallans, 1955 Becker, 1959 Becker e Sallans, 1960	$D_{ef} = D_o \exp\left(-\frac{E}{R^* T_f}\right)$	SECAGEM DE TRIGO $14,8\% b.s \leq Y_w \leq 32\% b.s$ $36,3^\circ C \leq T_w \leq 80^\circ C$ $v_f = 6,1 m/s$ $D_o = 4,54 \cdot 10^8 \text{ cm}^2 / s$	D_{ef} dado em cm^2/s E dado em cal/mol T_f dado em Kelvin
Pabis e Henderson, 1961	$D_{ef} = D_o \exp\left(-\frac{E}{R^* T_f}\right)$ $D_o = 5,853 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 / h$	SECAGEM DE MILHO $E/R^* = 6949 \text{ R}^*$	D_{ef} dado em m^2/h T_f dado em Rankine
Misra e Young, 1980	$D_{ef} = D_o \exp\left(-\frac{E}{R^* T_f}\right)$	SECAGEM DE SOJA $D_o = 4,694 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 / h$ $E / R^* = 3437,16 \text{ K}$ $10^\circ C \leq T_f(b.u) \leq 25^\circ C$ $35^\circ C \leq T_f(b.u) \leq 95^\circ C$	D_{ef} dado em m^2/h T_f dado em Kelvin
Aguerre et alli, 1982	$D_{ef} = D_o \exp\left(-\frac{E}{R^* T_f}\right)$	SECAGEM DE ARROZ $E = 9,9 \text{ kcal / mol}$ $40^\circ C \leq T_f \leq 70^\circ C$ $12 \text{ m / s} \leq v_f \leq 18 \text{ m / s}$	D_{ef} dado em cm^2/s T_f dado em Kelvin
Chu e Hustrulid, 1968	$D_g = 1,5134 \exp\left[\left(0,00045 T_f - 0,05488\right) Y_s - \frac{2513}{T_f}\right]$	SECAGEM DE MILHO $12\% \leq UR \leq 70\%$ $25\% b.s \leq Y_w \leq 35\% b.s$ $T_f = 49^\circ C, 60^\circ C \text{ e } 71^\circ C$	D_{ef} dado em m^2/h T_f dado em Kelvin Y_s dado em % b.s.
Husain et alli, 1973	$D_{ef} = 94,88 \exp\left(-\frac{7730,65}{T_f}\right) \cdot \exp\left[\left(8,833 \cdot 10^{-4} T_f - 0,3788\right) Y_s\right]$	SECAGEM DE ARROZ $UR: 20\%$ $Y_w: 26\% b.s. \text{ e } 32\% b.s.$ $T_{fo} = 49^\circ C, 66^\circ C \text{ e } 82,2^\circ C$	D_{ef} dado em cm^2/h T_f dado em Rankine Y_s dado em % b.s.

Parti e Dugmanics, 1990	$\frac{D_{ef}}{R^2} = 2,542 \exp\left(-\frac{4850}{T_f}\right) \cdot \exp(5,5Y_s)$	SECAGEM DE MILHO $0 \leq U/R \leq 80\%$ $21\% b.s \leq Y_{so} \leq 42\% b.s$ $0,10 m/s \leq v_f \leq 0,80 m/s$ $T_f = 32,2^\circ C, 52^\circ C \text{ e } 71^\circ C$	D_{ef} dado em m^2/s T_f dado em Kelvin Y_s dado em decimal R raio do grão em metros Troeger e Hukill, 1971
	$\frac{D_{ef}}{R^2} = 4,886 \exp\left(-\frac{4850}{T_f}\right) \cdot \exp(5,5Y_s)$	SECAGEM DE MILHO mesmas condições	Misra e Brooker, 1980

FONTE: CALADO, 1992

QUADRO 5- CONSTANTE DE SECAGEM PARA O MODELO EXPONENCIAL.

AUTOR	EQUAÇÃO	FAIXA OPERACIONAL	OBSERVAÇÕES
O'Callaghan et alli, 1971	$K = 139,3 \exp\left(-\frac{4426}{T_f + 273}\right)$	CEVADA	o tempo é dado em seg.
	$K = 2000 \exp\left(-\frac{5094}{1,8T_f + 273}\right)$	TRIGO	o tempo é dado em seg. T_f dado em $^\circ C$
Ross e white, 1972	$K = a \exp\left(-\frac{b}{T_f}\right)$	MILHO $25\% b.u \leq Y_{so} \leq 43\% b.u$ $23,5^\circ C \leq T_f \leq 90,2^\circ C$	o tempo é dado em horas
Bruce, 1985	$K = 234 \exp\left(-\frac{3086}{T_f + 273}\right)$	CEVADA COM UMIDADE NATURAL $21,5\% b.s \leq Y_{so} \leq 41\% b.s$	o tempo é dado em minutos T_f dado em $^\circ C$

FONTE: CALADO, 1992.

HUKILL e SCHMIDT (1960); HUSTRULID (1959); BAKKER e PATTERSON (1971); STRUMILLO e KUDRA (1986), desenvolveram teorias matemáticas de secagem de grãos em camadas finas monomoleculares e em camadas espessas onde deduzem modelos de simulações para cálculos de diferentes tipos de secadores.

As teorias buscam equações que permite o cálculo das cinéticas de secagem, que são estabelecidas a partir dos fenômenos físicos internos que governam a secagem no período da velocidade decrescente.

Embora, HUKILL (1954), tenha sido um dos primeiros a estudar a secagem em camada espessa, seu modelo está restrito à secagem a baixas temperaturas do gás.

O equacionamento apresentado foi utilizado para projetos de secadores em leito fixo, utilizando balanços de massa e energia para fases gasosa e sólida,

$$G_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial z} = \rho_s (1 - \varepsilon) L_g \frac{\partial Y_s}{\partial t} \quad (60)$$

assumindo

G_f velocidade massica do gás, kg/m²s

C_f calor específico do gás, kJ/kgK

T temperatura do gás, K

z variável espacial, m

ρ_s massa específica do sólido, kg/m³

ε porosidade, adimensional

L_g calor latente de vaporização da água, kJ/kg

Y_s umidade do sólido em base seca, kg₁/kg₂

t tempo, s

As suposições assumidas são:

- o aumento do calor específico do gás devido ao vapor de água é desprezível;
- todo o calor cedido pelo gás é utilizado para evaporar a água contida no grão;
- o calor sensível para elevar a temperatura do vapor de água removido à temperatura do gás é muito pequeno;
- a massa específica do grão e o calor latente de vaporização da água não variam com a umidade e a temperatura do grão.

a solução da equação, tem a forma, de:

$$\frac{Y_s - Y_{seq}}{Y_{so} - Y_{seq}} = \frac{2^{D'}}{2^{D'} + 2^{r'} - 1} \quad (61)$$

$$\frac{T_f - T_{feq}}{T_{fen} - T_{feq}} = \frac{2^{\tau'}}{2^{\tau'} + 2^{D'} - 1} \quad (62)$$

Y_s - umidade do sólido, base seca em um tempo qualquer t e a uma distância z , a partir da entrada do gás;

Y_{so} - umidade do sólido, base seca, no instante inicial;

Y_{seq} - umidade do sólido, base seca, no equilíbrio (calculado por alguma isoterma de sorção);

T_f - temperatura do gás em um tempo qualquer t e a uma distância z , a partir da região de entrada do gás;

T_{fen} - temperatura do gás na entrada do leito;

T_{feq} - temperatura do gás na saída do leito, quando atingido o equilíbrio térmico com o grão.

Os adimensionais D' e η , chamados de fator de profundidade do leito e unidade de tempo, nesta ordem são dados por:

$$D' = \frac{60 G_f C_f (T_f - T_{feq}) t_{1/2}}{L_g \rho_s H (Y_{so} - Y_{seq})} \quad (63)$$

$$\eta = \frac{t}{t_{1/2}} \quad (64)$$

onde: D' fator de profundidade do leito, referente ao modelo de Hukill, adimensional

G_f velocidade massica do fluido, $\text{kg/m}^2 \text{ s}$

C_f calor específico (fluido), $\text{kJ/kg } ^\circ\text{K}$

$t_{1/2}$ tempo de meia resposta (tempo necessário para que a razão de umidade, seja reduzida a metade), s

η fator de umidade de tempo, referente ao modelo de Hukill, adimensional

H altura do leito, m

O modelo de THOMPSON et alii(1968), conforme figura 8, admite que o secador em camada espessa, seja formado por um conjunto de camadas finas (tempo de secagem $t > 0$):

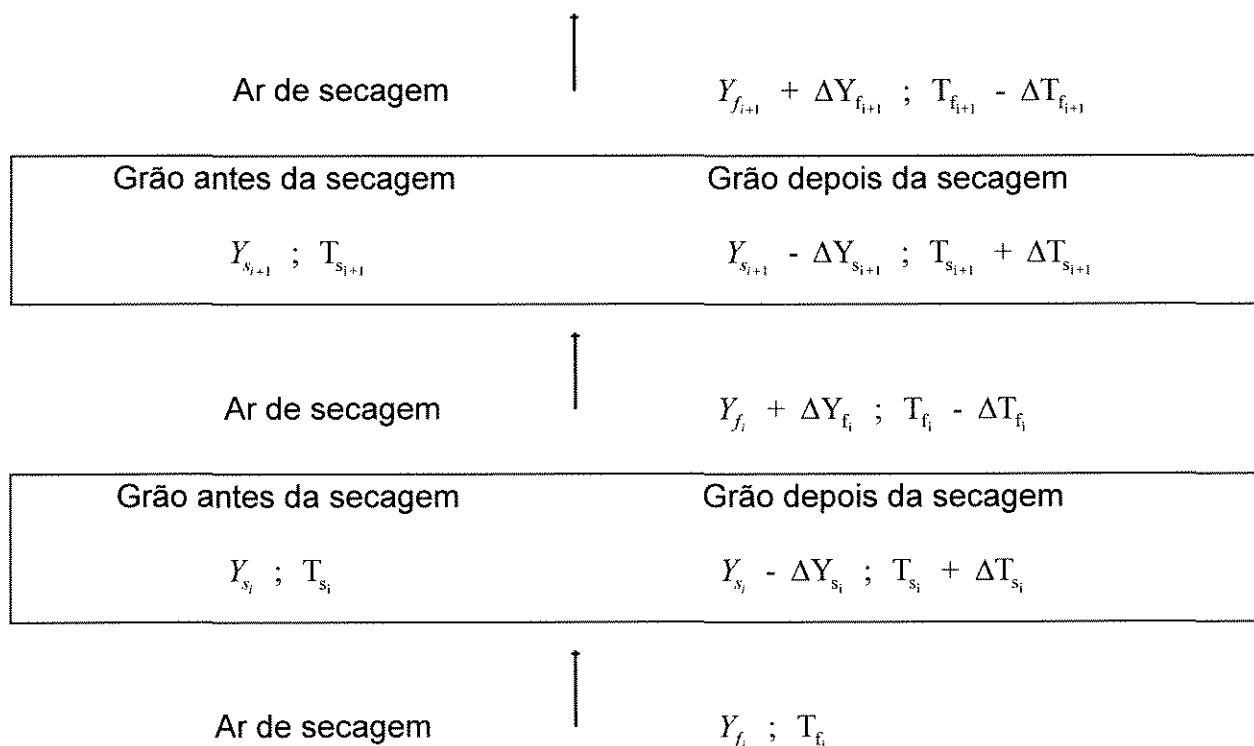


Figura 8 - Representação esquemática do modelo de THOMPSON et alii (1968).

Os balanços macroscópicos de massa e energia são realizados em camada originando um conjunto de equações algébricas lineares. Em secadores em leito deslizante com fluxos contracorrentes, as equações são lineares, requerendo a solução, um processo iterativo.

MASSARANI (1992), descreve o modelo a duas fases, baseado na teoria das misturas, desenvolvida por TRUESDELL (1957), que trata o gás e o sólido úmido como uma mistura multicomponente, onde o processo de transferência de calor e massa se desenvolve entre uma fase gasosa e uma fase sólida, em que apenas um componente se transfere entre elas.

Para o desenvolvimento das equações de conservação de cada fase, a maioria dos pesquisadores, assumiram:

- fase gasosa formada apenas por ar e vapor de água, tendo o comportamento de um gás ideal;
- massas específicas do ar e do sólido seco constantes;
- viscosidade da fase gasosa constante;
- velocidades mássicas do sólido seco e do ar são constantes.

CALADO e MASSARANI (1990), descrevem a forma clássica do balanço de taxa de quantidade de movimento, considerando os termos de pressão, empuxo, campo gravitacional e força resistiva exercida pelo fluido sobre a matriz porosa.

A equação da taxa de secagem foi obtida através do pacote computacional desenvolvido por MEDEIROS e MASSARANI (1982), juntamente com uma modelagem preliminar para o transporte pneumático e através de dados simulados comparados com dados experimentais de secagem de milho, para um leito deslizante com fluxos cruzados e recirculação pneumática. E a umidade de equilíbrio foi obtida a partir de THOMPSON et alli. (1968). O coeficiente de transferência de calor foi obtido por SARTORI (1986).

QUEIROZ (1984), considerou o modelo para simular um secador em leito deslizante e fluxos concorrentes, onde a equação da difusão para a esfera foi utilizada para descrever a taxa de secagem do milho.

Para a secagem em camada fina, o equacionamento torna-se simples, uma vez que os balanços de massa e energia da fase gasosa não são considerados, devido ao curto espaço de tempo de residência do grão no secador, ou seja, a fase gasosa não manifesta alteração em sua umidade e temperatura ao passar pela camada de grãos.

As equações utilizadas são as da camada espessa, reduzidas a:

$$\frac{dY_s}{dt} = -\frac{f}{(1-\varepsilon)\rho_{s_s}} \quad (65)$$

$$(1-\varepsilon)\rho_{s_s}(C_{s_s} + Y_s C_l) \frac{dT_s}{dt} = h a' (T_f - T_s) - f <H> + f C_l (T_s - T_r) \quad (66)$$

considerando a umidade e a temperatura do gás de entrada na camada constantes e supondo ser o estado de referência a água líquida a uma temperatura qualquer e desprezando a variação com a pressão, a entalpia associada ao vapor que atravessa a superfície expressa para camada espessa é:

$$<H> = L_{g_r} + C_v(T - T_r) \quad (67)$$

se, $T=T_s$, a equação, torna-se

$$(1-\varepsilon)\rho_{s_s}(C_{s_s} + Y_s C_l) \frac{dT_s}{dt} = h a' (T_f - T_s) - f [L_{g_r} + C_v(T_f - T_s)] \quad (68)$$

estas equações descrevem a secagem em camada fina. Portanto podemos perceber que: o estudo da secagem de grãos em camadas espessas fundamenta-se nas características da secagem em camada fina, VAN REST e ISAACS (1968).

Utilizando a expressão da taxa de secagem de LEWIS (1921),

$$\frac{dY_s}{dt} = -K(Y_s - Y_{se}) \quad (69)$$

que integrando, fica

$$\frac{Y_s - Y_{se}}{Y_{so} - Y_{se}} = \exp(-Kt) \quad (70)$$

sendo K a constante de secagem. Esta equação é empírica e supõe que há resistência interna à transferência de massa, em que Y_s representa, em base seca, o teor médio volumétrico da umidade existente no grão.

Na abordagem experimental, se não levar em conta a complexidade dos fenômenos envolvidos durante a secagem, as equações de modelos teóricos são de fácil resolução. Caso contrário, a resolução destas exige cálculos complexos, devido

à dependência da difusividade da água com o teor de água, além das outras medidas das constantes físicas indispensáveis para o cálculo.

Em função disto, numerosos pesquisadores tendenciaram para uma abordagem empírica, com os resultados retirados diretamente de experiências de secagem realizadas em laboratório.

Como exemplo das equações empíricas, largamente utilizadas para secagem de grãos, tem-se as variações do modelo exponencial ou logarítmicas propostas na literatura nas formas de:

$$\text{PAGE, 1949} \quad \frac{Y_s - Y_{se}}{Y_{so} - Y_{se}} = \exp(-Kt^n) \quad (71)$$

$$\text{OVERHULTS, 1973} \quad \frac{Y_s - Y_{se}}{Y_{so} - Y_{se}} = \exp(-(Kt)^n) \quad (72)$$

Os quadros 6 e 7, citam algumas correlações para determinação da constante K e do parâmetro n, dos modelos de PAGE e OVERHULTS, como função da umidade relativa e da temperatura do gás de secagem.

QUADRO 6 - PARÂMETROS DO MODELO DE PAGE

AUTOR	EQUAÇÃO	FAIXA OPERACIONAL	OBSERVAÇÕES
Sabbah, 1968	$K = \exp(-a t^b)$ $a = (6,0142 + 0,0001UR^3)^{1/2} - 0,01(1,8T_f + 32)(3,352 + 0,001UR^{1/2})$ $b = -3,5 \cdot 10^{-5}(1,8T_f + 32) + 0,1245 - 0,0022UR$ $n = 0,664$	Milho $3^\circ C \leq T_f \leq 21^\circ C$	tempo dado em horas T_f dado em $^\circ C$ UR dado em %
White et alli, 1973	$K = \exp(-2,794 + 0,0113(1,8T_f + 32) + 0,00397(1,8T(b.u) + 32))$ $n = 0,464 + 0,000778(1,8T_f + 32) - (0,00169 + (1,8T(b.u) + 32))$	Milho $37,8^\circ C \leq T_f \leq 104,4^\circ C$ $2,2^\circ C \leq T(b.u) \leq 18,9^\circ C$ $Y_{so} = 21,7\% b.s.$	T_f dado em $^\circ C$ $T(b.u)$ em $^\circ C$
Misra e Brooker, 1980	$K = \exp(-7,1735 + 0,1378v_f + 1,2793 \ln(1,8 + 32))$ $n = 0,0811 \ln UR + 0,78Y_{so}$	Milho $2,2^\circ C \leq T_f \leq 71,1^\circ C$ $0,025 m/s \leq v_f \leq 2,3 m/s$ $0,18\% b.s. \leq Y_{so} \leq 0,6\% b.s.$ $3\% \leq UR \leq 83\%$	tempo dado em horas T_f dado em $^\circ C$ v_f dado em m/s Y_{so} dado em % b.s. UR em decimal

Hutchinson e Otten, 1982	$K = 0,0466 - 0,0104UR$ $n = 0,4002 + 0,00728T_fUR$ $K = 0,0333 + 0,0003T_f$ $n = 0,3744 + 0,00916T_fUR$	Feijão branco $32^{\circ}C \leq T_f \leq 49^{\circ}C$ Soja $34\% \leq UR \leq 65\%$	tempo dado em minutos T_f dado em $^{\circ}C$ UR em decimal
Sokhansanj et alli, 1984	$K = 0,0888 \quad n = 0,6717$ $K = 0,0771 \quad n = 0,6586$ $K = 0,1833 \quad n = 0,5720$	Trigo Cevada Canola	grãos:umidade natur tempo em minutos $T_f = 70^{\circ}C$
Bruce, 1985	$K = 0,0462 \exp(0,0154T_f)$ $n = 0,492 + 3,84 \cdot 10^{-5}(T_f - 123)^2$	Cevada $50^{\circ}C \leq T_f \leq 150^{\circ}C$ $21,5\% \leq Y_{so} \leq 65\%$	grãos:umidade natur tempo em minutos T_f dado em $^{\circ}C$

FONTE: CALADO, 1992.

QUADRO 7- PARÂMETROS DO MODELO DE OVERHULTS

Overhults et alli, 1973	$K = \exp(a + b / T_f)$ $n = 0,3529 + 0,00136(1,8T_f + 32)$	Soja $20\%b.s \leq Y_{so} \leq 33\%b.s$ $37,7^{\circ}C \leq T_f \leq 104,4^{\circ}C$	tempo dado em horas a e b são constantes T_f dado em $^{\circ}C$
White et alli, 1978	$K = -0,207 + 3,57 \cdot 10^{-3}T_f + 2,16 \cdot 10^{-3}Y_{so} +$ $+ 2,613 \cdot 10^{-3}UR + 3,202 \cdot 10^{-6}Y_{so}T_f^2$ $n = 0,33 + 0,0025UR + 0,003T_f$	Milho $16\%b.s \leq Y_{so} \leq 24\%b.s$ $30^{\circ}C \leq T_f \leq 70^{\circ}C$ $8^{\circ}C \leq T(b.u) \leq 38^{\circ}C$	tempo dado em horas Y_{so} dado em % b.s. UR em % T_f dado em $^{\circ}C$

FONTE: CALADO, 1992.

No estudo da secagem, torna-se fundamental considerar os balanços de taxa de quantidade de movimento, de massa e de energia nas fases envolvidas, as equações constitutivas de transferência de calor e massa e a isoterma de sorção do material a ser seco.

Na literatura, encontram-se ainda vários modelos empíricos da predição da taxa de perda de umidade durante a secagem de produtos agrícolas, conforme são mostrados no quadro 8.

QUADRO 8 - TAXA DA PERDA DE UMIDADE DURANTE A SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

EXPRESSÃO	PRODUTO	PECULIARIDADES	REFERÊNCIA
$R = \exp(-Kt^n)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	semente de girassol	camada fina $K = 5,16 \cdot 10^{-5} (T)^{1,8387}$ $n = 1,009 - 0,0049 T$	Syarief, Morey, Gustafson (1984)
$R = \exp(-Kt^n)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	pecã armazenada	camada fina $K = 3,349 \cdot 10^{-1} + 1,010 \cdot 10^{-2} + 1,803 \cdot 10^{-4} T^2 + 3,45 \cdot 10^{-5} UR^2$ $n = 0,6996$	Chhinnan (1984)
$R = \exp(-Kt^n)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	milho	camada fina $K = 1,091 \cdot 10^{-2} + 2,767 \cdot 10^{-6} T^2 + 7,286 \cdot 10^{-6} T + m_0$ $n = 0,5375 + 1,141 \cdot 10^{-5} m_0^2 + 5,183 \cdot 10^{-5} T^2$	Li, Morey (1984)
$R = \exp(-Kt^n)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	semente de girassol	camada fina $K = 5,66 \cdot 10^{-4} T^{1,271}$ $n = 0,8281 - 0,004 T + 0,000091 T m_0$	Li, Morey, Afinrud (1987)
$R = \exp(-Kt^n)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	soja	camada fina $K = -0,2625 + 0,004916 T + 0,003033 UR$ $n = 0,8267$	Osborn, White, Walton (1991)
$R = \exp(-Kt^n)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	canola	camada fina $K = 0,1153$ $n = 0,733 - 2,13 \cdot 10^{-3} T + 4,9 \cdot 10^{-5} T^2$	Pathak, Agrawal, Singh (1991)
$R = \exp(-Kt^n)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	arroz cru parabolizado	camada fina estacionária, fluidizada e semi-fluidizada $n = 0,812$ $K = -0,013828 + 0,001135 T - 0,000922 h - 0,000233 v + 0,003895 UR$ h = altura da camada v = velocidade do ar	Prasad, Chandra, Bal (1994)
$R = \exp(-Kt)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	alfafa	solar em ambiente protegido $K = [71,2 (SI) + 0,660 (VPD)] / [5750 (DEN) - 3170]$ SI = radiação solar VPD = déficit de P de vapor DEN = densidade	Firestone, Walker, Puri (1988)
$R = \exp(-Kt)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	espiga de trigo	imersa em água por 48 horas $K = 0,641 + 0,044 (m_0 - m_e) - 0,043 m_0$ spray de água por 1 hora $K = 0,086 + 0,00249 (m_0 - m_e)$ spray de água por 5 horas $K = 0,099 + 0,000975 (m_0 - m_e)$	Versavel, Muir (1988a)
$R = \exp(-Kt)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	cerne do arroz	monocamada $K = -0,013261538(IMC) + 0,0417326557 (L2/L3)$ IMC = umidade inicial (%b.s.) L2/L3 = razão entre largura e espessura do cerne	Banaszek, Siebenmorgen (1993)

$R = \exp(-Kt)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	folha e talo da alfafa	$k = 0,133 L^{-0,48}$ L = comprimento do talo (mm)	Patil et alii (1992)
$R = \exp(-Kt)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	cevada	camada fina $k = 0,002541 + 4,0130 \cdot 10^{-6} T^2 - 1,78447 \cdot 10^{-5} UR$	Jayas, Sokhansanj (1989)
$R = \exp(-Kt)$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	espigas de milho reumidificadas	ambiente simulando secagem no campo $K = -1,660 + 0,000833 \text{ rad} + 0,000454 Pd T + 0,0766 \ln(UR) + 488/T$ rad = radiação total Pd = déficit de P de vapor	Versavel, Muir (1988b)
$t = \frac{\ln a - \ln R}{bR + c}$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	arroz	p/ mono camada, baixa temp. $a = 0,07135 + 0,0081998 m + 0,0013924 T - 0,000151 UR - 0,000163 Q$ $b = -0,013244 - 0,000654 m + 0,0017915 T - 0,000263 UR$ $c = 0,001952 + 0,0000386 m - 0,00006043 T - 0,00003546 UR$ p/ monocamada, alta temp. $a = 0,30545 + 0,0254 m - 0,01773 T + 0,00031 UR - 0,000265 m^2 + 0,000144 T^2$ $b = 1,2295 - 0,04293 T + 0,00135 UR + 0,000368 T^2$ $c = 0,01068 - 0,000254 UR - 0,00000992 m^2 + 0,0000038 T^2$	Noomhorm, Verma (1986 ^a)
$t = \frac{\ln a - \ln R}{bR + c}$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	arroz	p/ camada profunda $a = 0,07135 + 0,0081998 m + 0,0013924 T - 0,000151 UR - 0,000163 Q$ $b = -0,013244 - 0,000654 m + 0,0017915 T - 0,000263 UR$ $c = 0,001952 + 0,0000386 m - 0,00006043 T - 0,00003546 UR$	Noomhorm, Verma (1986b)
$R = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6(1+\chi)\chi}{9+9\chi+q_n^2\chi^2} e^{-F_0 q_n^2}$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	milho	secagem com bentonita $\chi = (m_0 - m_e) / m_e$ $\tan q_n = \frac{3q_n}{3 + \chi \cdot q_n^2}$ $F_0 = Dt/a^2$	Graham, Bilanski (1986)
$R = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{(\chi_n L)^2} e^{-(D/L^2)(\chi_n L)^2 t}$ $R = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{(\beta_n R)^2} e^{-(D/R^2)(\beta_n R)^2 t} \quad R = \chi$ $R = (Y - Y_{eq}) / (Y_0 - Y_{eq})$ R- adimensional de umidade	tabaco Burley, respectivamente p/ lâmina e caule	$\chi_n L = (2n+1)\pi/2$ D = coef. Difusão massa $\beta_n R$ = raiz positiva de $J_0(\beta_n R) = 0$ $J_0(\beta_n R) =$ Função de Bessel de ordem 0	Walton et alii (1984)

$R = 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\sin \chi_n R - \chi_n R \cos \chi_n R)^2}{(\chi_n R)^3 (\chi_n R - \sin \chi_n R \cos \chi_n R)}$ $e^{(-D'/R^2)(\chi_n R)^2 t}$ R=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq) R- adimensional de umidade	milho	$\chi_n R \cos \chi_n R = \left(1 - \frac{R / D' \rho_s \beta}{R_{ps} + R_p + R_{bl}}\right) \sin \chi_n R D' =$ coef. difusão Rps = resistência dos poros Rp = resistência do pericarpo Rbl = resistência da camada limite	Walton, White, Ross (1988)
$m_{k2} = -K_L t (m_{k1} - m_{ke}) - K_v t (rh_k - rh_h) + m_{k1}$ $M_{h2} = -H_L t (m_{h1} - m_{he}) - H_v t (rh_h - rh) + m_{h1} - (m_{k2} - m_{k1}) D_k / D_h$	amendoim	camada fina $K_L = 0,035 \text{ h}^{-1}$ $H_L = 0,116 \text{ h}^{-1}$ $K_v = 0,009 \text{ h}^{-1}$ $H_v = 0,291 \text{ h}^{-1}$	Colson, Young (1990)
$R = \frac{8}{l^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_n^2 \beta_m^2}$ $e^{-(\alpha_n^2 \beta_m^2) t}$ R=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq) R- adimensional de umidade	arroz cru	α_n = raízes de $J_0(x)$ $l = L/R$ $\beta_m = [(2m-1)\pi]/2l$	Ece, Cihan (1993)
$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (K \text{ grad } T)$ $\frac{\partial m}{\partial t} = \text{div} (D \text{ grad } m)$	cevada	camada fina $-D \frac{\partial m}{\partial n} = h_m (m - m_e)$ $-K \frac{\partial T}{\partial n} = h_r (T - T_a) - k \rho [h_{ig} + C_v (T_a + T)] h_m (m - m_e)$ $W m^{-2} K^{-1}$ $h_m = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ $k = 1,32$	Miketinac, Sokhansanj, Tutek 1992)

FONTE: GODOI, 1996.

2.3) SISTEMAS DE SECAGEM PARA GRÃOS

2.3.1) SECADORES

Os sistemas comerciais de secagem para grãos são classificados quanto a:

Quanto:

ao tipo de fabricação:

Móveis ou Fixos(silos secadores, de torre)

ao sistema de carga:

Intermitente ou Contínuos

a ventilação:

Insuflação de ar ou Aspiração de ar

ao fluxo de ar:

Concorrente, Contracorrente, Cruzado ou Misto

a torre de secagem:

Calhas paralelas, Calhas cruzadas, de Colunas e com Câmara de descanso

ao sistema de descarga:

Descarga de bandeja mecânica, Descarga pneumática, Descarga de eclusas rotativas

ao combustível:

Líquido, Sólido ou Gasoso

ao ar da fornalha:

Direto e Indireto

ao grau de automatização:

Secagem com controle manual e secagem automatizada

Esta classificação foi descrita por WEBER (1995). Se fizermos uma análise desta classificação, chegaremos à conclusão da existência comercial de apenas três

b - Secador móvel com sistema de carga contínuo

Sua característica de construção sobre rodas e utilizando combustíveis tanto líquido como gasoso o torna extremamente versátil. Este trabalha pelo sistema contínuo ou intermitente, conforme é mostrado na figura 10.

Possui dois ventiladores axiais; um para a insuflação do ar aquecido na massa de grãos e outro para o seu resfriamento. Dependendo de sua utilização também pode ser utilizado para o aquecimento da massa de grãos.

O controle da descarga permite secar os grãos até o grau da umidade desejada, podendo ser operado através de energia elétrica ou da tomada de força do trator.

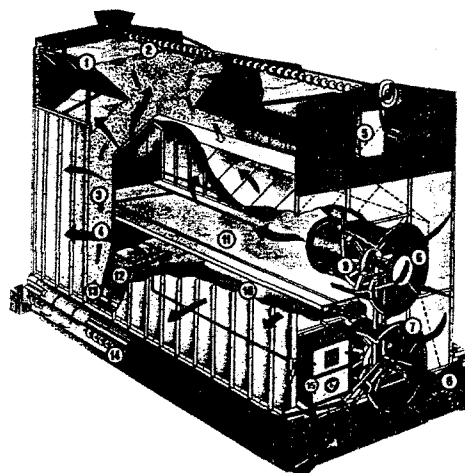


Figura 10 - Secador móvel com sistema de carga contínuo.

c - Secador de torre - Este sem duvida é o mais utilizado comercialmente, tanto pela faixa de capacidade em que opera, quanto pelas suas características técnicas.

São secadores verticais, estáticos, que operam de forma intermitente ou contínua, com os grãos em movimento, conforme mostrado na figura 11.

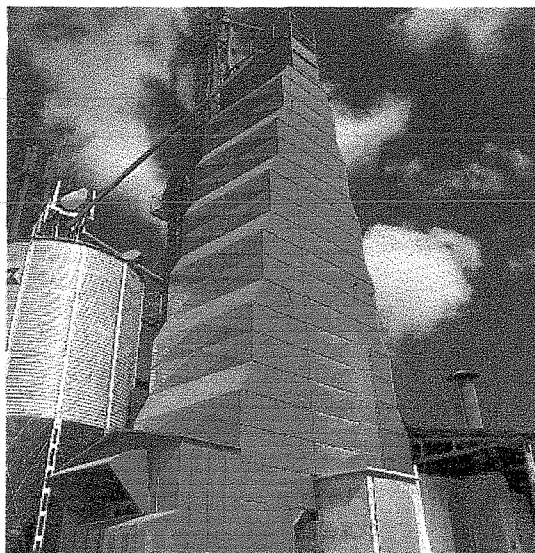


Figura 11 - Secador de torre.

Este secador tem sua concepção nos dispositivos internos da torre, calhas ou dutos de ar montados de forma paralela, onde o ar entra pelo lado da fornalha e sai pelo lado do ventilador, que se encontra no lado oposto, calhas cruzadas, formando ângulo de 90° entre si, fazendo com que o ar quente entre por um lado e saia formando um ângulo reto. Neste caso, a fornalha e o ventilador não se encontram em linha. Este sistema oferece dificuldade na limpeza da torre, comprometendo o desempenho e colocando-o em risco de incêndio, além de não oferecer uma secagem uniforme em toda a seção.

O secador de coluna, não possui calhas, mas colunas de chapa perfurada. Os grãos descem entre chapas perfuradas através das quais o ar atravessa a massa de grãos, de forma cruzada. E os com câmara de descanso, dispositivo instalados em algumas torres que tem como objetivo homogeneizar a massa de grãos em secagem pelo sistema intermitente, são indicados principalmente para o arroz.

Quanto ao sistema de carregamento de grão, pode ser intermitentes, trabalhando por carga. Não possuindo zonas de resfriamento, recebem uma carga de grãos que circula na torre até a completa secagem. Indicado para secagem de arroz, pois evita o choque térmico e o surgimento de trincas. Os contínuos são, por sua vez, constituído por zona de aquecimento e de resfriamento.

O sistema de ventilação pode ser por insuflação de ar. Neste caso o ar quente passa pelo rotor do ventilador e insuflado na massa de grãos. Para este sistema são necessários dois ventiladores, sendo o segundo utilizado para a insuflação do ar de resfriamento. Outra forma é pela aspiração do ar. Neste caso a torre fica entre a fornalha e o ventilador, fazendo com que um único ventilador movimente o ar aquecido e o de resfriamento, sendo este o mais utilizado.

Quanto ao fluxo de ar, são utilizados em fluxo concorrente, contracorrente, cruzado ou misto, conforme é mostrado na figura 12.

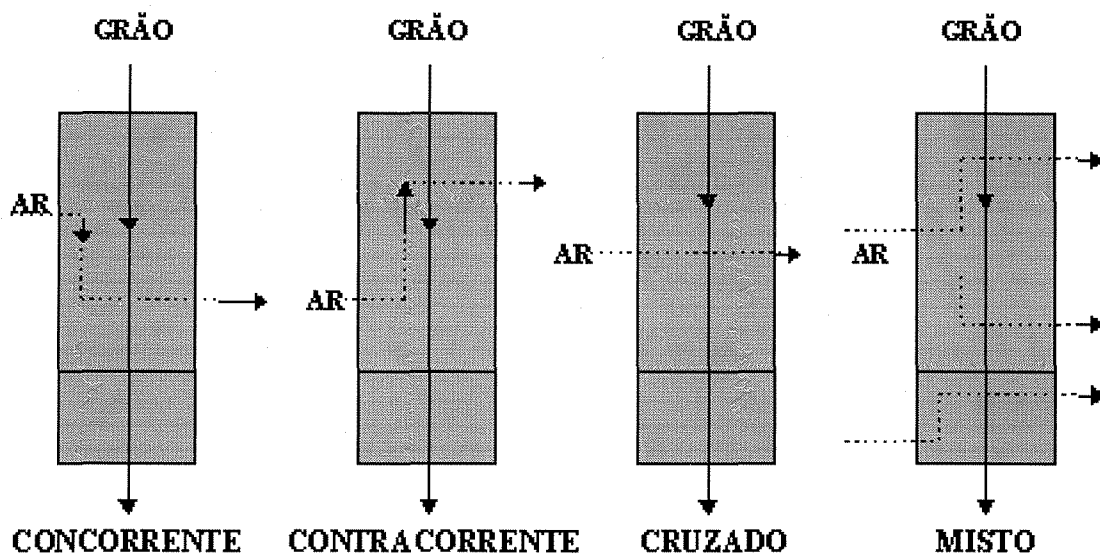


Figura 12 - Caracterização do fluxo.

Nas quatro situações os grãos, entram pela parte superior da torre e descem através do corpo do secador, enquanto o ar entra na torre de secagem, pelas calhas (dutos), como demonstrado na figura com o fluxo concorrente, contracorrente, cruzado ou misto (neste caso existindo dois ou mais fluxos de ventilação).

As primeiras unidades construídas no Brasil, remontam à década de 60 e cuja capacidade estava na ordem de 2 ton/hora. Estes equipamentos operavam em ambientes fechados.

Em poucos anos esta capacidade triplicaria, chegando hoje a capacidades de até 100 ton/hora.

Os secadores de torre hoje construídos utilizam basicamente os mesmos princípios dos da década de 60, operando pelo sistema intermitente ou contínuo. Trabalham por aspiração e secam qualquer tipo de sementes e de grãos, conforme mostrado na figura 13.

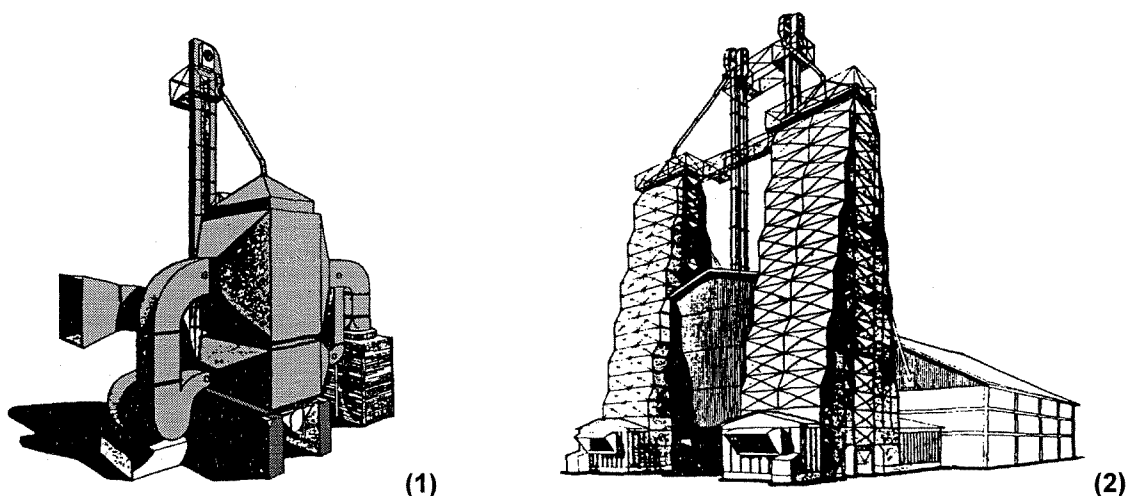


Figura 13 - Secador de torre utilizado para secagem de sementes (1) e secador torre para secagem de grãos (2).

Os principais componentes são: A torre, dividida em duas zonas. Na parte superior, a zona por onde o ar entra aquecido, também chamada de câmara de secagem. A segunda zona, na parte inferior, a de resfriamento da massa de grãos. Torres de secagem com mais que duas zonas já estão sendo testadas.

A torre é formada por quadros laterais. Estas fazem o fechamento e a estrutura lateral da torre de secagem, são aparafusados entre si e sustentam os difusores de entrada e saída do ar. Espelhos e dutos ou calhas são dispositivos montados que permite a entrada do ar, sendo os do lado da fornalha abertos e do lado do ventilador fechados. Este procedimento auxilia no direcionamento do fluxo do ar em contracorrente ou concorrente, possibilitando que o ar atravesse uma camada de

grão da ordem de 210 mm. Neste momento é que se dá a troca de calor do ar com a massa de grãos e a umidade do grão com o ar. Na câmara de resfriamento, os grãos trocam calor com o ar se resfriando.

Os detalhes do secador estão mostrados na figura 14.

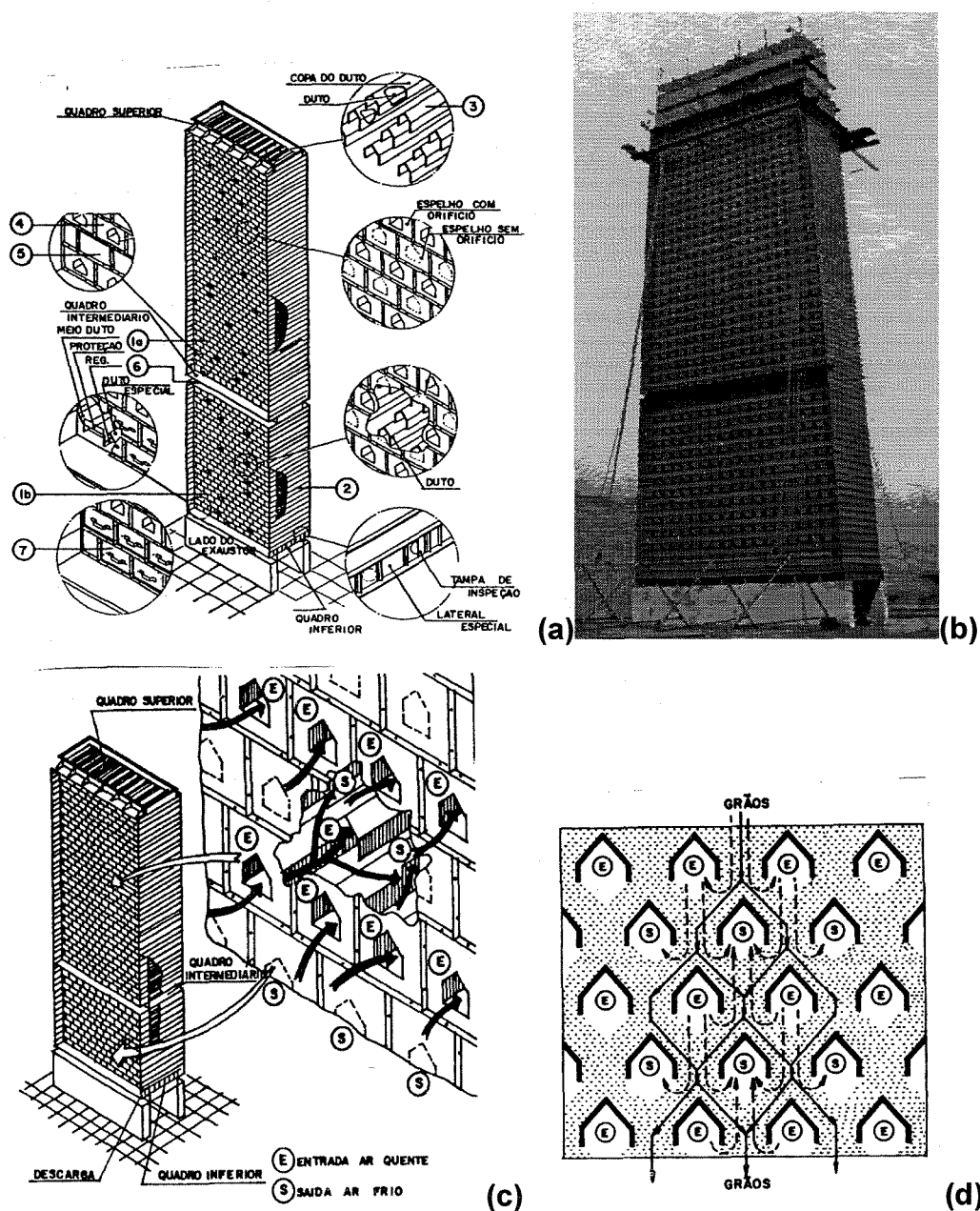


Figura 14 - Detalhe da secador de torre, (a, b, c e d).

Como foi descrito anteriormente, este sistema de secagem permite quatro possibilidades de utilização: a secagem contínua, a secagem intermitente, a secagem do corpo inteiro e a secagem em lotes.

Na secagem contínua, a faixa recomendada de umidade para introdução no secador é da ordem de 22% de umidade.

Para cada tipo de grão, recomenda-se uma determinada temperatura do ar de aquecimento. Utilizou-se faixas de temperatura entre 55°C à 65°C para o arroz, de 80°C à 100°C para o milho e de 100°C à 110°C para soja e trigo. Torna-se importante frisar que esta é a temperatura de entrada do ar aquecido, mas o controle é efetuado pela temperatura da massa de grão, onde no caso do arroz, fica ao redor dos 40°C, no milho em 55°C e na soja e no trigo em 48°C, PUZZI (1977).

Os procedimentos, para utilização da torre, tornam-se de fundamental importância para se obter a maior eficiência na operação, uma vez que se trata de um volume de grãos muito elevado, chegando a 100 ton/hora.

Os fabricantes justificam, como as principais vantagens deste sistema, a umidade de saída praticamente constante. Nas indústrias de óleo, o sistema oferece grãos com melhor qualidade, aumentando o rendimento do solvente na extração.

A secagem é efetuada a um mínimo custo, pois os grãos não secam acima do necessário.

2.3.2) SECA-AERAÇÃO

Em 1962, pesquisas sobre um novo processo de secagem de cereais denominado seca-aeração teve início. Este processo foi desenvolvido pelo Sistema de Pesquisa Agrícola (USDA), em cooperação com a Universidade de Purdue.

A seca-aeração elimina o resfriamento quando na secagem de fluxo contínuo, os grãos ainda aquecidos são transferidos para o interior do silo de seca-aeração, onde serão resfriados. O material colocado no silo permanece em repouso por um período de 8 a 12 horas, sendo resfriados então muito lentamente, com um fluxo de ar de 0,5 m³/min.m³.

Outro aspecto importante a ser considerado neste processo é a redução de rachaduras por tensão e quebra dos grãos.

Colocando-se um produto úmido em contato com o ar à mesma temperatura, o efeito observado geralmente é a secagem do tipo isentálpica, ou seja, produz-se uma troca de umidade e de calor entre o ar e o produto, cujo equilíbrio produz a entalpia constante. O ponto máximo de evolução possível de uma reta isentálpica é a curva de saturação. O ar absorve uma quantidade de vapor de água suplementar e sua temperatura de bulbo seco se reduz até a temperatura de bulbo úmido, atingindo a saturação. Esta temperatura de resfriamento é denominada "temperatura isentálpica de equilíbrio".

3) MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do equipamento teve início na concepção da patente industrial no.8700583, intitulada de "Equipamento para Secagem de Materiais Granulares".

O primeiro protótipo foi construído em escala laboratorial, com a finalidade de se conhecer na prática a sua operacionalidade, uma vez que se trata de um sistema inédito. Os mecanismo mais próximos existentes e parecidos com a patente são os sistemas transportadores de materiais granulares ou os promotores de mistura (static mixer).

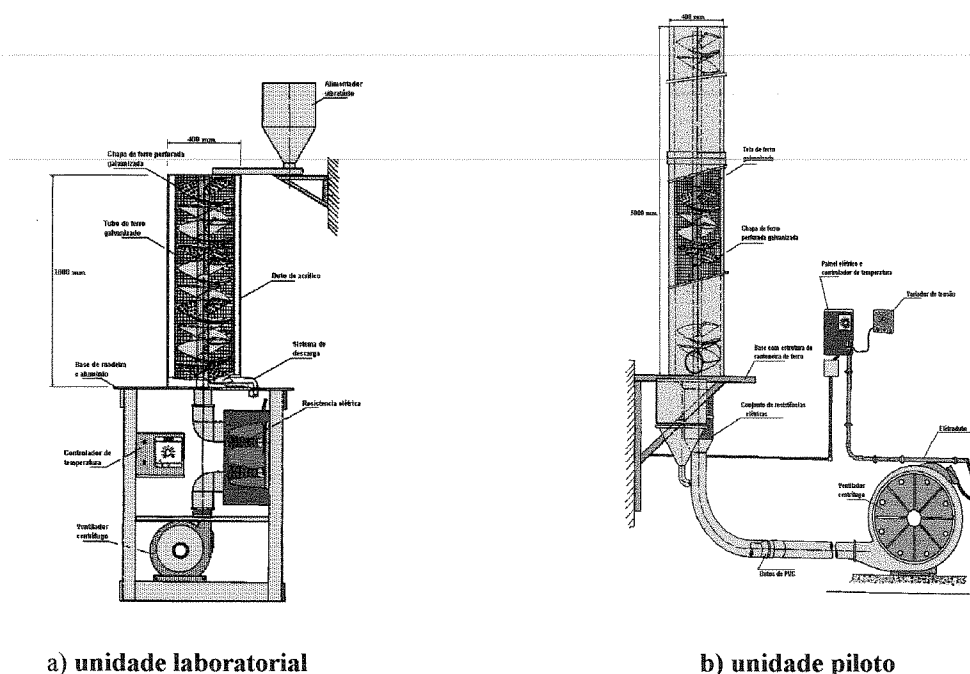
Como foi abordado na introdução e na revisão bibliográfica, os mecanismos atualmente existentes para secagem de grãos/sementes utilizam três tipos clássicos de secadores que utilizam escoamentos em contracorrente, cocorrente e cruzados.

A indústria nacional fabrica dois tipos básicos de secadores: o de torre, também denominado de secador de cascata ou de calhas, tanto utilizado para grãos como para sementes, e o secador estático constituído de um silo e dispositivos colocados em seu interior para insuflamento de ar por entre a massa de grãos.

A indústria tem desenvolvido outros tipos de secadores. Todavia, devido a problemas técnicos e operacionais, estes sistemas não têm motivado a indústria de beneficiamento para sua efetiva implantação.

Os sistemas desenvolvidos e fabricados pela indústria nacional e internacional, são baseados no insuflamento do ar aquecido por entre a massa de grãos.

O equipamento em questão, figura 15, trabalha com o deslocamento do material, onde os grãos escorrem por gravidade em chicanas torcidas e inclinadas em sentidos alternados, permitindo uma maior mistura dos grãos durante o trajeto e maior troca térmica.



a) unidade laboratorial

b) unidade piloto

Figura 15 - Desenho das unidades construídas para os testes experimentais.

3.1) MATÉRIA PRIMA

Foi utilizada a soja *Glycine max. L. Merrill*, variedade IAC 14, com teor de umidade de 17% BU conseguido através da reumidificação.

Os resultados da secagem não são alterados apesar das modificações sofridas nos grãos pela umidificação e desumidificação, CALADO (1992).

É prática comum nas experiências de secagem, a reumidificação dos grãos com teor muito baixo de umidade (8% a 10% BU). Dentre algumas técnicas mais usuais, podemos citar:

- mistura dos grãos com água líquida:
sacos plásticos, durante 2 horas, a 25°C, BARROZO et alli. (1991).
- aspersão periódica (5 dias a 25°C) de água líquida nos grãos acondicionados em sacos plásticos, BARROZO et alli. (1991).
- ambiente fechado em atmosfera de vapor saturado de água, AGUERRE et alli. (1982) e NOVAIS (1990).

- fluxo de ar com umidade relativa de 95% MANTOVANI (1976) .

No presente trabalho, para se obter grãos úmidos, foi utilizada a umidificação lenta; água borrifada diariamente na superfície do grão, acondicionado em saco plástico e colocado em um ambiente com uma temperatura de 25°C.

Os grãos com teor de umidade inicial ao redor de 17% BU eram colocados no sistema de secagem sendo coletados dados da perda de umidade em função do tempo.

3.2) TERMOMETRIA

As medidas de temperaturas foram realizadas em regime permanente, conforme descritos por HEERTJES (1956) e LEVA (1949). Estas técnicas são aplicadas em experiências conduzidas em leito de jorro, fluidizado, transporte pneumático, leito fixo e deslizante. As medidas de temperatura podem ser tomadas diretamente no leito utilizando termopar sem proteção, termopar com proteção na extremidade ou termômetro de resistência elétrica.

Inicialmente realizaram-se os testes de calibração dos termopares e dos medidores de vazão.

3.3) EQUIPAMENTOS DE APOIO

- balança analítica, marca Oertling, modelo LA164, com quatro casas decimais em gramas; precisão de $\pm 0,0001g$
- balança semi-analítica, marca Marte, modelo A10K; precisão de $\pm 0,01g$
- estufa com aeração forçada, marca Fabbe-Primar com controlador de temperatura;
- estufa sem aeração, marca Fabbe-Primar, modelo 119 com termostato;
- anemômetro, marca Lambrecht, modelo 1405; precisão de $\pm 5\%$
- anemômetro térmico, marca Dwyer, modelo 470-1; precisão de $\pm 2\%$
- termohigrógrafo, marca Haenni, modelo 564; precisão de $\pm 3\%$
- maquina fotográfica, marca Pentax;

- cronômetro, marca Seiko;
- termômetro digital com 12 pontos, com duas casas decimais, marca Iope, modelo TDB40C12; precisão de $\pm 2\%$
- variador de tensão, marca Italtel, série B, 1,6 KVA;
- controlador de temperatura, marca Digi-mec, mod. SH1;
- alimentador vibratório, fabricado por Norma Automação;
- ventilador centrífugo, marca Ibram, modelo VC1350M;
- vidrarias (dessecador a vácuo, com bandeja em porcelana, diâmetro 160 mm, marca Pirex; proveta, pesa filtro.).

3.4) CONSTRUÇÃO DE UMA UNIDADE LABORATORIAL DE SECAGEM

Para se chegar à consolidação deste trabalho de pesquisa e aos materiais e métodos necessários para averiguações experimentais, foi construída unidade laboratorial que permitiu viabilizar os métodos para o melhor aproveitamento do processo de secagem no interior do secador.

Como pode ser observado em trabalhos revisados, um fator de muita importância na secagem de grãos, além da temperatura e da velocidade do ar de secagem, é o fluxo de massa que também pode ser denominado como "tempo de residência".

Os dispositivos testados, são constituídos basicamente de placas torcidas e inclinadas em sentidos opostos instaladas no interior de uma torre de secagem, permitindo que a massa de grãos escorra com uma velocidade estabelecida em função da inclinação e da torção.

A construção da unidade laboratorial teve como premissa a averiguação da análise de todos os problemas que poderiam ocorrer na construção de uma unidade piloto, uma vez que se trata de um equipamento ainda não utilizado para secagem.

A primeira peça construída, foi o sistema por onde a matéria prima iria se deslocar por gravidade, caracterizadas como chicanas. Trata-se de uma estrutura construída a partir de material metálico, na forma de chapas torcidas e inclinadas em

sentidos opostos. Confeccionou-se uma maquete com a intenção de se prever as formas de fixação e modelamento destas rampas.

Na oficina mecânica, iniciou-se a construção utilizando chapas de alumínio. Este material foi recortado na forma de discos de acordo com um gabarito e foram montados em um tubo de ferro. Esta estrutura foi fixada em uma base, construída em madeira, revestida com fórmica. Nesta base, além do dispositivo para o escoamento da matéria prima, montou-se também o sistema de aquecimento, constituído de resistências elétricas e painel eletrônico dotado com um controlador de temperatura para as resistências e um ventilador centrífugo.

Até se conseguir definitivamente o melhor conjunto de dispositivos para o início dos levantamentos experimentais, na fase laboratorial, foram construídos três tipos de modelos de dispositivos de escoamento e duas estruturas de suporte, com mecanismos de aquecimento e ventilação.

Não se conseguiu uma boa dinâmica de escoamento, utilizando as chicanas construídas com alumínio, pois embora tenha uma boa maleabilidade encontrou-se dificuldade na fixação devido ao ângulo de inclinação.

O segundo material utilizado foi tela de arame de ferro galvanizado. Esta foi moldada em hastes soldadas ao longo do tubo de ferro. Este material foi escolhido devido a facilidade com que o ar passaria pelas telas e aparentemente parecia simples sua fixação nas hastes. Isto não ocorreu, tendo sido bem trabalhosa sua fixação. Além disso, a tela aumentou o atrito da matéria prima na superfície ocasionando também um péssimo escoamento.

O terceiro material empregado foi a chapa de ferro galvanizado perfurada. Esta apresentou as melhores características (fig.16) . Foi recortada na forma de discos e soldadas conforme inclinação e torção pré-definidas. Nos testes preliminares esta escolha demonstrou ter sido a ideal. Todavia, os mecanismos para obtenção de um ar aquecido, que seria insuflado para dentro deste sistema teve que ser trocado pela grande perda de carga introduzida pela chapa perfurada. Assim, foi montada uma nova estrutura utilizando um novo sistema de aquecimento e ventilação.

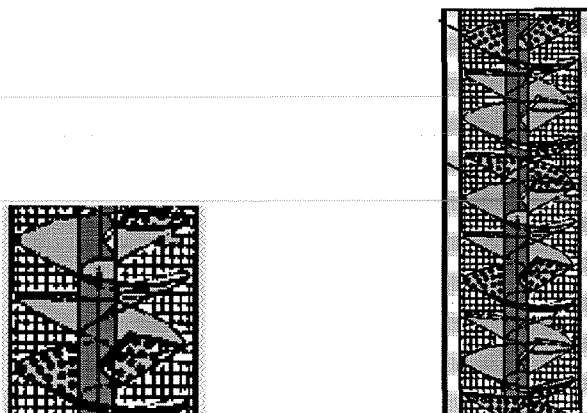


Figura 16- Representação esquemática dos dispositivos instalados no interior da torre.

Utilizou-se um alimentador vibratório (fig.17) no topo da torre para alimentação da matéria prima para o interior do sistema de secagem. O sistema é constituído de um silo, construído em chapa de aço carbono com capacidade para aproximadamente 0,05 m³ de sólidos, caindo numa calha vibratória e desta para a torre de aquecimento, garantindo assim uma alimentação com vazão constante.

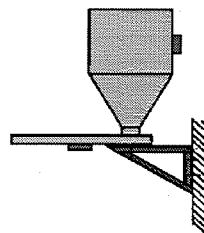


Figura 17 -Alimentador vibratório.

As paredes do secador foram construídas de acrílico para visualização do escoamento.

O alimentador vibratório introduzia a soja para a torre de aquecimento e os dispositivos instalados no interior da torre (as chicanas) permitiam o deslizamento dos grãos, com a reversão nos seus movimentos.

Com os testes preliminares nesta escala laboratorial, construiu-se uma unidade piloto, mantendo-se o sistema de alimentação por intermédio do alimentador vibratório. Na saída da torre foi acoplado um silo, onde era captada a soja aquecida para efetuar seu resfriamento.

O aquecimento do ar ambiente foi feito por meio de um conjunto de resistências totalizando 4000 watts de potência, ligado a um controlador de temperatura montado em um circuito eletrônico com relês e chave contatora.

Descrevendo as unidades que compõem o sistema laboratorial, temos (fig. 18): alimentador vibratório instalado na parte superior do sistema, constituído de silo armazenador (1) e calha (2) dotados de vibrador eletromagnético, dosando a quantidade de grãos que alimentará a torre de aquecimento (3). A torre (3) montada em escala laboratorial tem 1000 mm de altura e 400 mm de diâmetro. No interior da torre (3) foram fixadas a um eixo (4) as chapas torcidas e inclinadas (5) por onde os grãos deslizaram. Esta unidade foi montada em uma base (6). Nesta base (6) foi montado também o sistema de ventilação, utilizando um ventilador centrífugo (7), e um conjunto de resistências elétricas (8), acopladas a dutos (9). O controle de ventilação e o aquecimento foram obtidos por um painel eletro-eletrônico (10) montado na base (6).

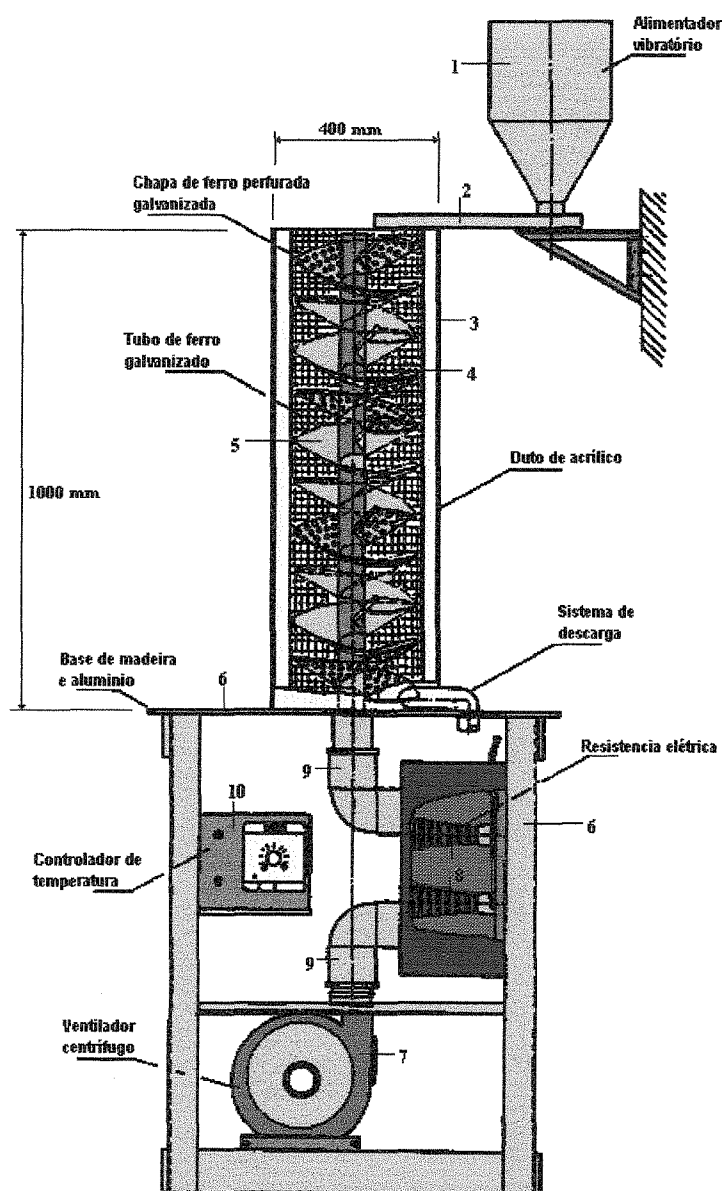


Figura 18 - Detalhamento da Unidade Laboratorial

3.5) UNIDADE EM ESCALA PILOTO

A principal modificação foi o comprimento da torre de aquecimento para cinco metros de altura, modificação do sistema de alimentação do ar e um novo dimensionamento do sistema de aquecimento. (figuras 19 e 20).

A torre piloto foi construída numa escala que permitisse um maior tempo de residência da matéria prima no interior desta, com uma altura de 5000 mm e diâmetro interno de 400 mm.

Os desenhos esquemáticos apresentados, representam a unidade de secagem em escala piloto, construído para o levantamento dos dados experimentais.

A torre (3) foi construída com uma altura de 5000 mm e um diâmetro de 400 mm, esta torre foi confeccionada em acrílico para melhor visualização do escoamento. Em seu interior foi montado um duto de ferro (3b) e neste, soldada uma série de chapas perfuradas de ferro galvanizado (3a) torcidas e inclinadas em sentidos opostos, permitindo que a massa de grãos no momento do escoamento deslize por estas chapas no sentido horário e anti-horário. Este movimento implica em velocidades alternadas durante o escoamento.

Como na unidade laboratorial, o grão foi introduzido na torre por intermédio de um alimentador vibratório, constituído de silo(1) e rampa vibratória(2) que regula a vazão da massa de grãos para o interior da torre. A alimentação do silo(1), foi manual.

O grão percorre a torre, alcançando um duto (4) no final desta que direciona a massa de grãos para um silo (5) onde sofrerá resfriamento.

Este silo (5) recebe uma quantidade de ar, proveniente do ambiente através de um duto (6) deslocado por intermédio de um ventilador centrífugo (7), acionado por um motor elétrico (8). Após cada resfriamento o grão era transportado manualmente para o silo(1), onde se repetia o processo até completar sua secagem.

O ventilador centrífugo (7), desloca o ar ambiente através de dutos (6)(13) com derivações, tanto para o silo como para a torre. Na entrada da torre instalou-se um

conjunto de resistências elétricas (10) para aquecimento do ar, um conjunto de termopares (12) emite um sinal para um controlador de temperatura (11a).

Um painel eletrônico (11) comanda a unidade piloto, acionando o sistema de ventilação, aquecimento, controladores de temperatura, vazão e vibração eletromagnética, além dos sistemas de monitoramento.

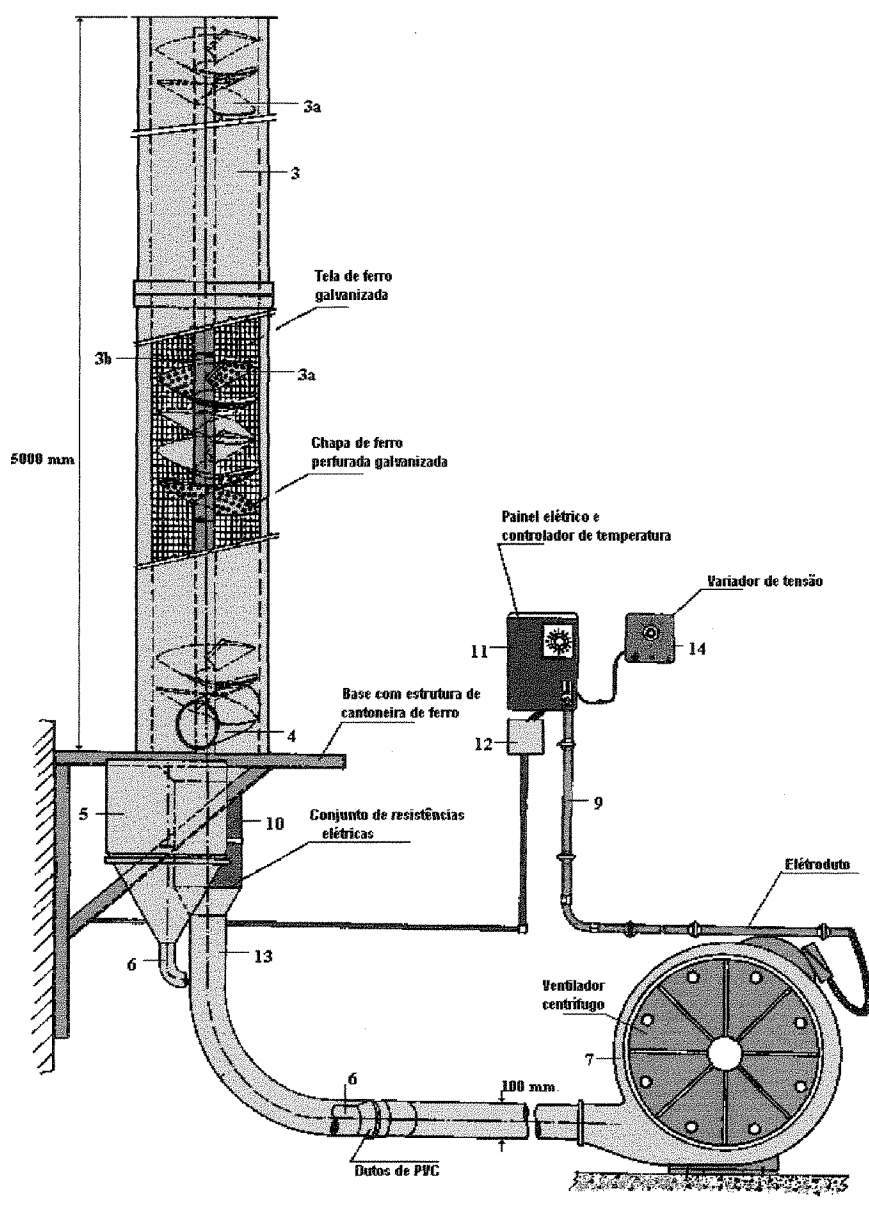


Figura 19 - Detalhamento da unidade piloto (Vista lateral).

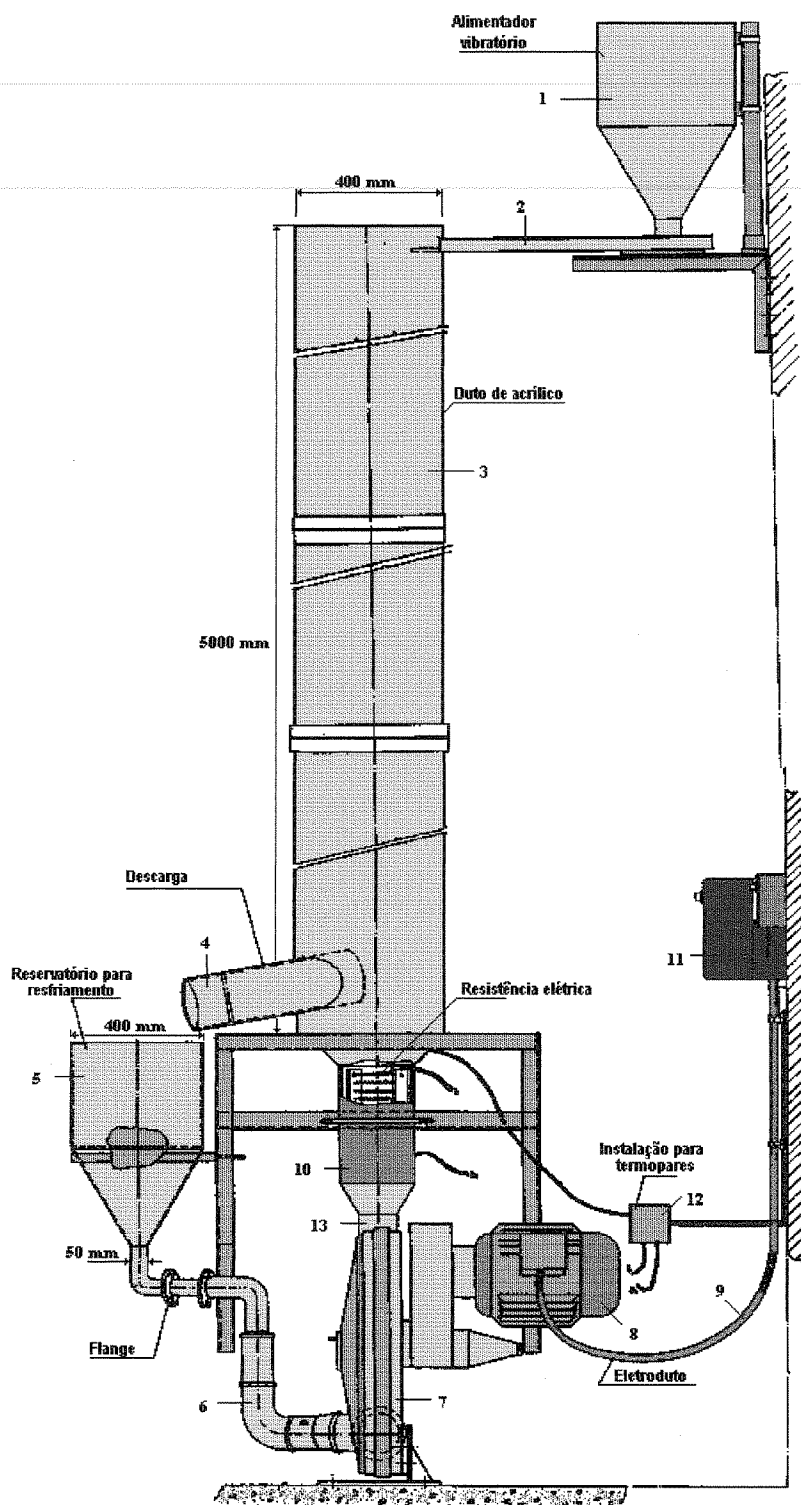


Figura 20 - Detalhamento da unidade piloto (Vista frontal).

3.5.1) CONTROLE OPERACIONAL E EXPERIMENTAL DA UNIDADE PILOTO

Após a construção da unidade piloto, iniciaram-se a construção e montagem dos sistemas de comando, constituídos de painel eletro-eletrônico e os sistemas de monitoramento (controladores de temperatura, vazão e vibração eletro-magnética).

A figura 21 mostra os sistemas que comandam e monitoram a unidade piloto.

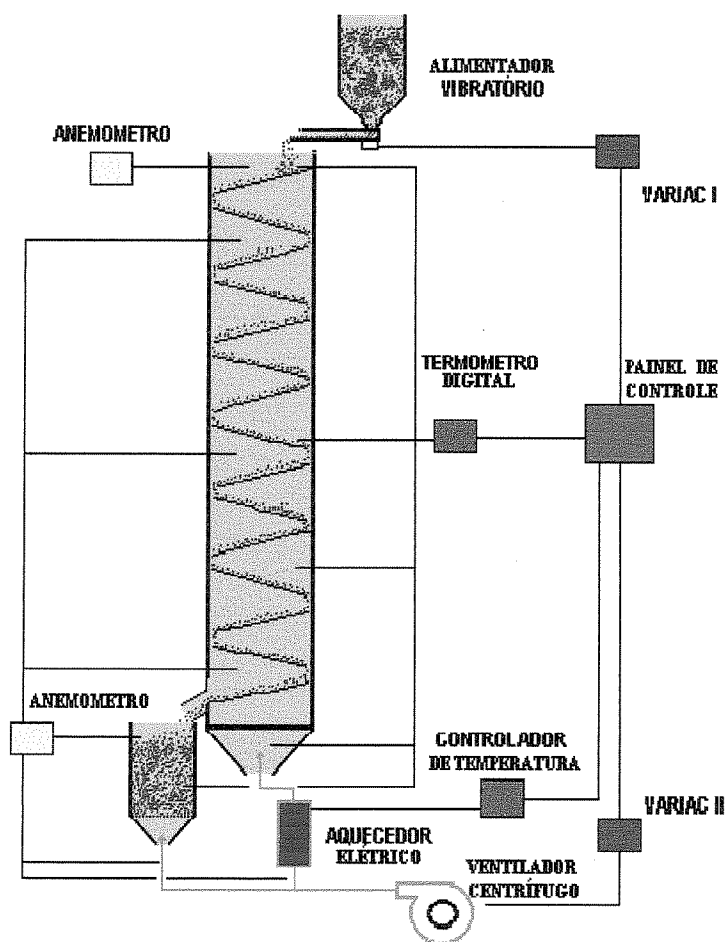


Figura 21 - Esquema do controle operacional e experimental da unidade piloto.

Através do painel elétrico, aciona-se um variador de tensão que controla um vibrador eletromagnético, fixado na base de uma rampa e silo denominado de “alimentador vibratório” que alimenta a torre com os grãos. Neste momento um ventilador centrífugo controlado por um variador de tensão desloca uma massa de ar para o interior da torre. Este ar passa por um aquecedor, constituído de resistências elétricas, controlado por um sistema eletrônico denominado de “controlador de temperatura”, que regula a temperatura de entrada da torre por intermédio de termopares.

O sistema é monitorado por termopares ligados a registrador de temperatura de 12 pontos e anemômetros.

3.6) INSTRUMENTAÇÃO

As variáveis operacionais medidas no decorrer das experiências foram:

- vazão de gás
- velocidade do sólido
- temperaturas do ar e do grão
- umidade do ar e do grão

São as seguintes as metodologias experimentais adotadas para medição destas variáveis.

3.6.1) VAZÃO DE GÁS

A vazão de gás insuflada pelo ventilador centrífugo na torre de aquecimento era medida da seguinte forma:

- através de anemômetro de fio quente, calibrado, inserido em diversos pontos de tomada ao longo dos dutos;
- através de anemômetro de ventoinha com adaptador construído, para tomadas de velocidade do gás na saída da torre.

Estas duas medidas permitiram a verificação dos resultados experimentais.

3.6.2) VELOCIDADE MÉDIA DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS

A velocidade média das partículas sólidas na torre de aquecimento (leito deslizante) onde estão montados os sistemas de deslizamento do sólido, era medida pelo método clássico: cronometrava-se o tempo que uma determinada carga de sólido levava para percorrer uma distância conhecida.

3.6.3) TEMPERATURAS

Foi utilizado um calorímetro adiabático para a determinação das temperatura do grão. As amostras coletadas no final da torre eram colocadas neste aparelho, onde a temperatura era medida por um termômetro calibrado (0^o-100^oC) introduzido na massa de grãos.

As temperaturas do gás foi medida em vários pontos do sistema através de termopares de Fe-Constant, ligados a uma chave comutadora modelo TDB4012, com 12 canais.

3.6.4) UMIDADES

A umidade dos gases de alimentação na torre de aquecimento era medida, utilizando-se um psicrômetro de termômetro de bulbos úmido e seco.

A umidade dos grãos era determinada pelo método de estufa a 105^oC, por 24 horas .

3.7) RESFRIAMENTO

Foi efetuada a aeração com o objetivo essencial de resfriar os grãos aquecidos na torre.

Foram determinados as temperaturas e conteúdos de umidade do grão durante o resfriamento.

3.8) - CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Com a unidade piloto construída e os sistemas de monitoramento instalados iniciou-se os levantamentos experimentais.

O objetivo do presente trabalho é avaliar os coeficientes da transferência de calor e secagem utilizando os promotores estáticos de mistura de sólidos. As sete corridas experimentais com as condições operacionais estão definidas no quadro 9.

QUADRO 9 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA UNIDADE PILOTO

Condições Operacionais	Unidade	Exper.1	Exper.2	Exper.3	Exper.4	Exper.5	Exper.6	Exper.7
Temperatura na entrada da Torre	(K)	353,15	333,15	366,05	366,15	335,95	354,65	329,15
Temperatura na saída da Torre	(K)	333,15	318,15	343,15	343,15	325,15	333,15	313,15
Velocidade do ar na entrada da Torre	(m/s)	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Velocidade do ar na saída da Torre	(m/s)	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
Velocidade do ar de resfriamento	(m/s)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Temperatura do ar de resfriamento	(K)	308,15	307,15	307,15	308,65	309,15	308,15	308,15

Os grãos recirculam pela torre de aquecimento e pelo sistema de resfriamento, de quatro a sete vezes para obtenção de uma umidade ao redor de 12%. Os parâmetros avaliados para cada condição experimental estão mostrados no quadro 10.

QUADRO 10 - VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS

Variáveis	Unidade
Temperatura da matéria prima na entrada	(K)
Umidade da matéria prima (base Seca)	(%)
Tempo de escoamento	(s)
Temperatura da matéria prima na saída da Torre	(K)
Tempo de resfriamento	(s)
Temperatura da matéria prima após o resfriamento	(K)
Temperatura ambiente	(K)
Peso da matéria prima	(kg)
Umidade relativa	(%)

A seguir serão descritas as metodologias utilizadas para análise dos dados experimentais.

3.9) - TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para a determinação do fluxo de calor entre a partícula submetida a secagem e o fluxo gasoso no secador, torna-se necessário, determinar o coeficiente convectivo de transferência de calor gás-partícula.

Este coeficiente de transferência de calor depende das propriedades das partículas e do meio de secagem, sendo calculado a partir das equações de conservação de energia.

As condições de processo que afetam a velocidade da partícula (velocidade relativa gás-partícula) e consequentemente o número de Reynolds, influenciam o coeficiente convectivo.

Os coeficientes convectivos estão relacionados com a geometria e diâmetro do leito de secagem, razão entre as vazões de sólidos e gás, tamanho, forma e densidade das partículas entre outras.

Utilizando a equação: $q = mc\Delta T$, (73)

calculou-se as energias envolvidas, sendo:

a. Cálculo da energia absorvida pelo grão

$$q(\text{grão}) = (\dot{m}_{\text{gr}}) \cdot (C_{\text{gr}}) \cdot (\Delta T)$$

$\dot{m}_{\text{gr}}$ - vazão mássica (média da variação da massa em relação ao tempo de escoamento), kg/s

C_{gr} - calor específico do grão, kJ/kg K

ΔT - variação da temperatura do grão, K

b. Cálculo da energia fornecida pelo ar

$$q(\text{ar}) = (\dot{m}_{\text{ar}}) \cdot (C_{\text{ar}}) \cdot (\Delta T)$$

$\dot{m}_{\text{ar}}$ - vazão mássica, kg ar/s

C_{ar} - calor específico do ar, kJ/kg K

ΔT - variação da temperatura do ar, K

A vazão volumétrica é obtida multiplicando-se a velocidade do fluxo de ar pela área da seção transversal da torre de aquecimento.

A vazão mássica é obtida pela multiplicação da vazão volumétrica pela densidade.

A densidade é obtida através do inverso do volume específico, utilizando a expressão:

$$V_e = \frac{287 \times T}{P_{atm} - P_v} \quad \text{ASAE STANDARDS (1990).} \quad (74)$$

onde: V_e volume específico, m^3/kg
 P_v pressão de vapor saturado, Pa
 P_{atm} pressão atmosférica, Pa
 T temperatura, K

c. Energia perdida para o ambiente.

Calcula-se a energia perdida para o ambiente, utilizando:

$$q_{ar} = q_{gr} + q(\text{perdida}) \Rightarrow q(\text{perdida}) = q_{ar} - q_{gr} \quad (75)$$

3.9.1) DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TROCA TÉRMICA, UTILIZANDO O CONCEITO DE TROCADORES DE CALOR.

Através da energia fornecida para o grão, calculou-se o coeficiente convectivo de transferência de calor utilizando o conceito de Trocadores de Calor.

A unidade piloto foi tratada como um trocador de calor, calculando-se os balanços de energia no gás e no sólido determinando os coeficientes de troca térmica.

O cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor, equação (76) foram determinados para cada passagem do grão pela torre de aquecimento, para a condição experimental correspondente. Os cálculos estão mostrados no anexo 2.

$$U = \frac{q_{gr}}{\frac{A(T_{sd} - T_{en})}{\ln(T_{sd} - T_{en})}} \quad (76)$$

onde T_{sd} é a temperatura da saída do grão na torre T_{grsd} menos temperatura de entrada do ar T_{fen} , e T_{engr} é a temperatura de entrada do grão menos a temperatura de saída do ar T_{fsd} .

Utilizou-se a área da seção transversal do secador A_{sts} , calculada pela equação (77a),

$$A_{sts} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (77a)$$

e a área de um trocador de calor A_{tc} , calculada pela equação (77b).

$$A_{tc} = \frac{2\pi r^o L - 2\pi r^i L}{\ln\left(\frac{2\pi r^o L}{2\pi r^i L}\right)} \quad (77b)$$

3.9.2) UTILIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DE SARTORI (1986), PARA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.

SARTORI (1986), determinou experimentalmente o coeficiente de transmissão de calor entre o sólido e o fluido em leito deslizante nas configurações de escoamentos contracorrente, cocorrente e cruzados em situações de aquecimento e resfriamento do sólido. Este utilizou os conceitos formulados por FURNAS (1930).

Com os conceitos e proposições de SARTORI (1986), utilizou-se as equações desenvolvidas em seu trabalho para a obtenção de valores do coeficiente convectivo de transferência de calor :

Para $\psi \neq 1$

$$\frac{T_f - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}} = \frac{1 - \exp[(1 - \psi)X / \psi]}{1 - \psi} \quad (42a)$$

$$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}} = \frac{1 - \psi \exp[-(1 - \psi)X / \psi]}{1 - \psi} \quad (42b)$$

para $\psi = 1$

$$v = -\frac{X}{\psi} \quad (42c)$$

$$u = 1 - X$$

3.9.3) OBTENÇÃO DOS NÚMEROS ADIMENSIONAIS DE NUSSELT, REYNOLDS E PRANDTL.

O número de Reynolds foi calculado para o fluido e para as partículas, conforme mostrado no anexo 9.

O número de Nusselt, foi determinado para os coeficientes convectivos de transferência de calor obtidos pelas equações (42a) e (42b), conforme descrito no item 3.9.2.

3.10) SECAGEM

3.10.1) DETERMINAÇÃO DA ADIMENSIONAL DE UMIDADE.

As curvas de secagem foram obtidas graficando a adimensional de umidade em função do tempo de secagem. Adimensional de umidade (R) foi calculado pela equação (78).

$$R = \frac{Y - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}} \text{ onde,} \quad (78)$$

R - adimensional de umidade

Y - umidade média (kg H₂O / kg de massa seca)

Y_{eq} - umidade de equilíbrio (kg H₂O / kg de massa seca)

Y₀ - umidade no instante inicial (kg H₂O / kg de massa seca)

A umidade de equilíbrio foi calculada segundo ROSSI e ROA (1980), mostrado no quadro 20 pela equação (79)

$$Y_{eq} = (p_1 RH + p_2 RH^2 + p_3 RH^3) \exp [(q_0 + q_1 RH + q_2 RH^2 + q_3 RH^3 + q_4 RH^4)(T + q_5)] \quad (79)$$

3.10.2) MODELO DE DIFUSÃO LÍQUIDA DE FICK.

O modelo de FICK expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água.

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla Y) \quad (56)$$

Onde:

D_{ef} - é a difusividade efetiva

Y - representa o conteúdo de umidade

No caso da secagem, utilizando sistemas de coordenadas esféricas, assumindo que no interior da esfera de raio r , ocorre difusão somente na direção radial, a equação reduz para:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{1}{z^2} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(z^2 D_{ef} \left(\frac{\partial Y}{\partial z} \right) \right) \right] \quad (57)$$

a umidade Y , deve obedecer as seguintes condições inicial e de contorno:

$$\begin{array}{lll} t = 0 & 0 < z < r & Y = Y_o \\ t > 0 & z = 0 & \frac{\partial Y}{\partial z} = 0 \\ t > 0 & z = r & Y = Y_{eq} \end{array}$$

temos:

$$R = \frac{\bar{Y} - Y_{eq}}{Y_o - Y_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot \text{Exp} \left[\frac{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{r^2} \right]$$

Onde:

- R = adimensional de umidade;
- $\bar{Y}$ = conteúdo médio de umidade (kg H_2O / kg Massa Seca);
- Y_{eq} = conteúdo de umidade de equilíbrio (kg H_2O / kg Massa Seca);
- Y_o = conteúdo de umidade no instante inicial (kg H_2O / kg Massa Seca);
- n = número de termos na série de Fourier;
- D_{ef} = difusividade efetiva (m^2/s);
- t = tempo (s);
- r = raio médio da amostra (m).

A difusividade efetiva foi calculada para cada passagem pela torre de secagem, ajustando as curvas experimentais à curva dada pela equação baseada no modelo de FICK.

Os cálculos foram efetuados utilizando-se o procedimento de regressão não linear do pacote estatístico SAS (1985).

3.10.3) DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO ADIMENSIONAL DE UMIDADE PELO MODELO DE PAGE (1949).

Utilizando o procedimento de regressão não linear do pacote estatístico SAS, foram calculados os termos da equação de PAGE (1949) para obtenção das constantes, k e n. Utilizando a equação estendida, PAGE modificado, foram obtidas as constantes A, k e n, conforme as equações (71).

$$\frac{Y - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}} = \exp(-kt^n) \quad (71)$$

(PAGE)

$$\frac{Y - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}} = A_p \exp(-kt^n)$$

(PAGE modificado)

3.10.4) DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DO GRÃO DURANTE O AQUECIMENTO E O RESFRIAMENTO.

Utilizando os valores de difusividade efetiva obtida por GODOI (1996), durante o aquecimento no secador munido de promotores estacionários obteve-se a equação do tipo Arrhenius relacionando as difusividades efetivas com as temperaturas de secagem, $D = D_0 \exp(-b/RT)$. Utilizou-se o pacote estatístico SAS para o cálculo de D_0 e b. Com os parâmetros estimados, calculou-se as difusividades em função das temperaturas médias do ar de secagem para cada condição experimental do presente trabalho, utilizando uma série de 20 termos. Com as difusividades efetivas obtidas, calculou-se o adimensional do conteúdo de umidade correspondente ao período de aquecimento.

4) RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1) UMIDIFICAÇÃO DOS GRÃOS

Apesar das modificações sofridas nos grãos pelas umidificação e desumidificação sucessivas, este procedimento não altera os resultados da secagem, CALADO (1992).

4.2) TRANSFERÊNCIA DE CALOR

4.2.1) DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE CALOR ENTRE A PARTÍCULA SUBMETIDA A SECAGEM E O FLUXO DO AR NO SECADOR

Utilizando a equação (73), calcula-se as energias envolvidas. O resultado dos valores obtidos para cada corrida experimental utilizando a equação(73), estão mostrados no quadro 11. Os cálculos estão mostrados no anexo 1.

Quadro 11 - Cálculo dos balanços de energia.

Experimento	q(ar) kJ/s	q(grão) kJ/s	q(perdida) kJ/s	% de perda
1	1,51	0,22	1,29	85
2	1,13	0,11	1,02	90
3	1,74	0,34	1,41	81
4	1,73	0,34	1,40	81
5	0,81	0,21	0,60	74
6	1,62	0,30	1,32	81
7	1,20	0,14	1,06	88

Os altos valores de perda de calor para o ambiente é resultado do secador não ser isolado termicamente (o isolamento afetaria a visualização do escoamento).

As propriedades físicas da soja foram determinadas por GODOI (1996) obtendo dados do diâmetro médio das partículas, esfericidade, densidade real e densidade aparente segundo MOHSENIN (1986), conforme quadro 12 e 13.

Quadro 12- Caracterização do grão de soja.

Propriedades Físicas	Soja
Diâmetro da esfera de igual volume que o grão, calculado por picnometria numa população de partículas, d_p	0,0058 m
Esfericidade média dos grãos, calculada por permeamtria, através da fórmula de Kozeny- Cármán, ϕ	0,85
Porosidade média do leito, ε	0,887

Quadro 13- Propriedades do ar.

Gás	μ (kg/m s)	k_f (kW/m K)	ρ_f (kg/m ³)	C_f (kJ/kg K)
ar	$1,85 \cdot 10^{-5}$	$2,67 \cdot 10^{-5}$	1,15	1,007

4.2.2) DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TROCA TÉRMICA, UTILIZANDO O CONCEITO DE TROCADORES DE CALOR.

O cálculo do coeficiente de transmissão de calor, utilizando a equação (76) foram determinados para cada passagem do grão pela torre de aquecimento, para determinada condição experimental. Os cálculos: estão mostrados no anexo 2 e os resultados estão mostrados no quadro 14.

Utilizando A_{sts} (área) como a seção transversal do secador, equação (77a)

$A_{sts} = 0,1256 \text{ m}^2$, temos $U_{(sts)}$ onde (sts) significa seção transversal do secador.

Os erros relativos dos coeficientes em relação às médias estão mostrados no quadro 14b.

Quadro 14a - Coeficientes de transferência de calor, considerando a área da seção transversal do secador.

N.de passag. pela torre	Experimento 1 $U_{(sts)}$ kJ/m ² sK	Experimento 2 $U_{(sts)}$ kJ/m ² s K	Experimento 3 $U_{(sts)}$ kJ/m ² s K	Experimento 4 $U_{(sts)}$ kJ/m ² s K	Experimento 5 $U_{(sts)}$ kJ/m ² s K	Experimento 6 $U_{(sts)}$ kJ/m ² s K	Experimento 7 $U_{(sts)}$ kJ/m ² s K
1	0,2245	0,1935	0,3224	0,2618	0,2561	0,3154	0,1924
2	*	0,1704	0,3397	0,3253	0,2611	0,3100	0,1496
3	0,2554	0,1915	0,3606	0,3242	0,2748	0,2937	0,1518
4	0,2562	0,2105	0,3784	0,3569	0,2921	0,3388	0,1872
5	0,2687	0,1766	0,3627		0,2355	0,3157	0,1843
6	0,2613					0,2842	
Média	0,2532	0,1885	0,3528	0,3171	0,2639	0,3096	0,1731

* Devido a erro experimental não foi considerado os valores obtidos na 2ª passagem pela torre.

QUADRO 14b - Erros relativos dos coeficientes convectivos de transferência de calor, considerando a área da seção transversal do secador (sts).

N.de passag. pela torre	Experimento 1 Erro (%)	Experimento 2 Erro (%)	Experimento 3 Erro (%)	Experimento 4 Erro (%)	Experimento 5 Erro (%)	Experimento 6 Erro (%)	Experimento 7 Erro (%)
1	11,34	2,65	8,61	17,43	2,95	1,87	11,15
2		9,60	3,71	2,58	1,06	0,13	13,57
3	0,86	1,59	2,21	2,23	4,13	5,13	12,30
4	1,18	11,67	7,26	12,55	10,68	9,43	8,15
5	6,11	6,31	2,80		10,76	1,97	6,47
6	3,19					8,20	

Os valores ficaram compreendidos entre 0,13 e 17,34 %. Estes valores mostram uma boa concordância com os resultados experimentais.

Utilizando o cálculo da área como a de um trocador de calor, equação (77b).

$$A = \frac{2\pi r^o L - 2\pi r^1 L}{\ln\left(\frac{2\pi r^o L}{2\pi r^1 L}\right)} \quad (77b)$$

$A = 1,42907559 \text{ m}^2$, temos $U(tc)$ onde (tc) significa trocador de calor.

Os resultados estão mostrados no quadro 15a e os erros relativos dos coeficientes em relação às médias estão mostrados no quadro 15b.

Quadro 15a- Coeficientes de transferência de calor, considerando a área de um trocador de calor.

N.de passag. pela torre	Experimento 1 U(tc) kJ/m ² sK	Experimento 2 U(tc) kJ/m ² s K	Experimento 3 U(tc) kJ/m ² s K	Experimento 4 U(tc) kJ/m ² s K	Experimento 5 U(tc) kJ/m ² s K	Experimento 6 U(tc) kJ/m ² s K	Experimento 7 U(tc) kJ/m ² s K
1	0,0197	0,0170	0,0283	0,0230	0,0225	0,0277	0,0169
2	*	0,0150	0,0299	0,0286	0,0229	0,0272	0,0131
3	0,0224	0,0168	0,0317	0,0285	0,0242	0,0258	0,0133
4	0,0225	0,0185	0,0333	0,0314	0,0257	0,0298	0,0164
5	0,0236	0,0155	0,0319		0,0207	0,0277	0,0162
6	0,0230					0,0250	
Média	0,0222	0,0166	0,0310	0,0279	0,0232	0,0272	0,0152

* Devido a erro experimental não foi considerado os valores obtidos na 2ª passagem pela torre.

QUADRO 15b - Erros relativos dos coeficientes convectivos de transferência de calor, considerando a área de um trocador de calor (tc).

N.de passag. pela torre	Experimento 1 Erro (%)	Experimento 2 Erro (%)	Experimento 3 Erro (%)	Experimento 4 Erro (%)	Experimento 5 Erro (%)	Experimento 6 Erro (%)	Experimento 7 Erro (%)
1	11,42	2,66	8,71	17,56	3,02	1,84	11,18
2		9,42	3,55	2,50	1,29	0	13,82
3	0,72	1,45	2,26	2,15	4,31	5,15	12,50
4	1,17	11,72	7,42	12,54	10,78	9,56	7,89
5	6,12	6,40	2,90		10,78	1,84	6,58
6	3,41					8,08	

Os valores ficaram compreendidos entre 0 e 17,56%. Estes valores mostram uma boa concordância com os resultados experimentais.

Estes cálculos foram determinados para possibilitar a sua utilização no dimensionamento deste secador.

4.2.3) UTILIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DE SARTORI (1986), PARA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.

Utilizando as equações 42a, 42b e 42c estabeleceu-se os adimensionais de temperatura e ψ no aquecimento do grão, os resultados obtidos estão mostrados no quadro 16.

Quadro 16 - Adimensionais de temperatura durante o aquecimento do grão, a cada passagem pela torre.

Passagens p/torre						
Experimento 1	1	2	3	4	5	6
$\frac{T_f - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,3333	0,4386	0,4166	0,4474	0,4464	0,4347
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,5833	0,5921	0,5042	0,5212	0,4799	0,4782
ψ	13,5896	12,7121	6,5666	8,3730	7,7138	7,8388
Experimento 2	1	2	3	4	5	
$\frac{T_f - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,4054	0,5172	0,5454	0,4412	0,5300	
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,5351	0,6379	0,6836	0,5911	0,6148	
ψ	10,5349	9,7180	7,7461	7,9453	6,9791	

Experimento 3	1	2	3	4	5	
$\frac{T_f - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,3423	0,3584	0,3760	0,3760	0,3888	
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,7010	0,6557	0,6190	0,5895	0,6553	
ψ	6,0383	6,2793	5,1975	5,2985	5,4279	
Experimento 4	1	2	3	4		
$\frac{T_f - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,3651	0,3651	0,3965	0,4035		
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,7127	0,6000	0,5690	0,5438		
ψ	6,0427	6,1684	6,3110	5,7994		
Experimento 5	1	2	3	4	5	
$\frac{T_f - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,2584	0,3293	0,3624	0,3354	0,3750	
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,4210	0,6097	0,5403	0,6273	0,6180	
ψ	10,9739	6,5831	5,8101	4,9965	6,1352	
Experimento 6	1	2	3	4	5	6
$\frac{T_f - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,3675	0,4517	0,4725	0,4057	0,4584	0,4831
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,6051	0,6239	0,6352	0,6151	0,6077	0,6450
ψ	6,6817	5,0665	5,1151	5,1786	5,2541	5,3105
Experimento 7	1	2	3	4	5	
$\frac{T_f - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,4324	0,5926	0,6956	0,5424	0,7239	
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,5243	0,5481	0,6869	0,5864	0,7104	
ψ	8,5744	10,9509	6,7334	6,8584	7,0380	

Com estes valores obtidos, utilizou-se o pacote estatístico SAS (1985) para determinação da adimensional $X = hSx/C_f G_f$, conforme mostrado no anexo 4. Com os valores determinados, calculou-se os coeficientes convectivos de transferência de calor (h) durante o aquecimento do grão, conforme mostrado no anexo 4a.

Utilizando as equações 42b e 42c estabeleceu-se os adimensionais de temperatura e ψ no resfriamento do grão. Os resultados obtidos estão mostrados no quadro 17.

Quadro 17 -Adimensionais de temperatura durante o resfriamento do grão, a cada passagem pela torre.

Passagens p/torre						
Experimento 1	1	2	3	4	5	6
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,5138	0,3857	0,3574	0,3385	0,3314	0,3343
ψ	1,8958	3,0481	1,8894	1,7521	2,6903	3,2807
Experimento 2	1	2	3	4	5	
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,4972	0,5393	0,5737	0,5367	0,4904	
ψ	2,2056	2,2606	2,3168	2,3763	2,4352	
Experimento 3	1	2	3	4	5	
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,4192	0,4133	0,4093	0,4944	0,3498	
ψ	3,7593	3,9093	4,0448	4,1234	4,2241	
Experimento 4	1	2	3	4		
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,4476	0,4794	0,4221	0,3735		
ψ	3,6195	3,6948	3,7803	4,0496		
Experimento 5	1	2	3	4	5	
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,4327	0,5934	0,2222	0,4557	0,4624	
ψ	1,5377	1,9767	3,0529	3,1505	2,1492	
Experimento 6	1	2	3	4	5	6
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,4480	0,4216	0,4474	0,4163	0,4377	0,4007
ψ	5,2588	5,3168	3,5785	3,6229	3,6757	2,9722
Experimento 7	1	2	3	4	5	
$\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$	0,3968	0,4736	0,6363	0,6220	0,6470	
ψ	2,9339	2,3059	2,3631	2,4069	2,4699	

Com os valores obtidos, utilizou-se o pacote estatístico SAS (1985), para determinação da adimensional $X = \frac{h \cdot S}{C_s G_s} x$, para o sólido e $\frac{h \cdot S}{C_f G_f} x$, para o fluido, conforme mostrado no anexo 4. Com os valores determinados, calculou-se os coeficientes convectivos de transferência de calor (h) durante o resfriamento do grão, conforme mostrado no anexo 4a.

No **aquecimento**, utilizando a equação (42a) $\frac{T_f - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$ para os valores de $x=5$ m, $\varepsilon=0,887$, $D_p = 0,0058$ m, $\phi = 0,85$, $S= 137,53$, temos os resultados no quadro 18.

Quadro 18 - Coeficientes convectivo de transferência de calor, utilizando a temperatura média do fluido durante o aquecimento.

n° de passag. pela torre	Experimento 1 h_1 (kJ/m ² sK)	Experimento 2 h_1 (kJ/m ² sK)	Experimento 3 h_1 (kJ/m ² sK)	Experimento 4 h_1 (kJ/m ² sK)	Experimento 5 h_1 (kJ/m ² sK)	Experimento 6 h_1 (kJ/m ² sK)	Experimento 7 h_1 (kJ/m ² sK)
1	0,0016	0,0015	0,0011	0,0011	0,0012	0,0012	0,0014
2	0,0017	0,0017	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0019
3	0,0012	0,0016	0,0010	0,0012	0,0011	0,0012	0,0017
4	0,0015	0,0014	0,0011	0,0011	0,0010	0,0011	0,0015
5	0,0014	0,0015	0,0011		0,0011	0,0012	0,0017
6	0,0014					0,0012	

No **aquecimento**, utilizando a equação (42b) $\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$ com os valores de

$x=5$ m, $\varepsilon=0,887$, $D_p = 0,0058$ m, $\phi = 0,85$, $S= 137,53$, temos os resultados no quadro 19.

Quadro 19 -Coeficientes convectivo de transferência de calor, utilizando a temperatura média do sólido durante o aquecimento.

n° de passag.	Experimento 1 h_2 (kJ/m ² sK)	Experimento 2 h_2 (kJ/m ² sK)	Experimento 3 h_2 (kJ/m ² sK)	Experimento 4 h_2 (kJ/m ² sK)	Experimento 5 h_2 (kJ/m ² sK)	Experimento 6 h_2 (kJ/m ² sK)	Experimento 7 h_2 (kJ/m ² sK)
1	0,0020	0,0018	0,0016	0,0016	0,0016	0,0015	0,0016
2	0,0020	0,0018	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0018
3	0,0014	0,0017	0,0014	0,0015	0,0014	0,0014	0,0016
4	0,0016	0,0016	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0015
5	0,0015	0,0016	0,0015		0,0015	0,0014	0,0017
6	0,0015					0,0014	

Os erros relativos obtidos conforme equação (80) obtidos para os coeficientes convectivos avaliados nas equações (42a) e (42b), estão mostrados no quadro 20.

$$\frac{h_2 - h_1}{h_2} \times 100 \quad (80)$$

onde h_1 - coeficiente convectivo menor

h_2 - coeficiente convectivo maior

Quadro 20 - Erros relativos dos coeficientes convectivos obtidos utilizando as temperaturas médias do sólido e do fluido.

Experimento 1 Erro (%)	Experimento 2 Erro (%)	Experimento 3 Erro (%)	Experimento 4 Erro (%)	Experimento 5 Erro (%)	Experimento 6 Erro (%)	Experimento 7 Erro (%)
20,00	16,66	31,25	31,25	25,00	20,00	13,98
15,00	5,56	31,25	26,67	26,67	21,43	5,55
14,29	5,88	28,57	20,00	21,43	14,29	6,25
6,25	12,50	21,42	21,42	28,57	21,43	0
6,67	6,25	26,67		26,67	14,29	0
6,67					14,29	

Os valores ficaram compreendidos entre 0 e 31,25 %. Esta variação é proveniente da perda de calor para o ambiente, conforme mostrado no quadro 11

No **resfriamento**, utilizando a equação (42b) $\frac{T_s - T_{fo}}{T_{so} - T_{fo}}$ com os valores de $x=0,3 \text{ m}$, $\varepsilon=0,841$, $D_p = 0,0058 \text{ m}$, $\phi = 0,85$, $S= 193,51$, temos os resultados no quadro 21.

Quadro 21 - Coeficientes de transferência de calor, utilizando a temperatura média do sólido no resfriamento.

nº de passagens pelo silo de resfriamento	Experimento 1 h_3 (kJ/m ² s°K)	Experimento 2 h_3 (kJ/m ² s°K)	Experimento 3 h_3 (kJ/m ² s°K)	Experimento 4 h_3 (kJ/m ² s°K)	Experimento 5 h_3 (kJ/m ² s°K)	Experimento 6 h_3 (kJ/m ² s°K)	Experimento 7 h_3 (kJ/m ² s°K)
1	0,0018	0,0019	0,0023	0,0023	0,0013	0,0029	0,0019
2	0,0019	0,0020	0,0023	0,0025	0,0020	0,0028	0,0019
3	0,0013	0,0022	0,0024	0,0023	0,0012	0,0023	0,0024
4	0,0012	0,0021	0,0027	0,0022	0,0022	0,0022	0,0025
5	0,0015	0,0029	0,0022		0,0017	0,0023	0,0025
6	0,0018					0,0019	

A regressão não linear do SAS mostrou um bom ajuste da equação de SARTORI (1986), tanto para o aquecimento quanto para o resfriamento, conforme o erro assintótico da regressão.

4.2.4) OBTENÇÃO DOS NÚMEROS ADIMENSIONAIS DE NUSSELT e REYNOLDS e PRANDTL.

O número de Reynolds foi calculado para o fluido e para as partículas, conforme mostrados no anexos 9 e 10.

O motivo da apresentação do número de Reynolds para as partículas deve-se ao fato do número de Reynolds para o fluido ser constante para as condições experimentais, não mostrando assim a sua influência para o presente trabalho.

O número de Nusselt, foi determinado para os coeficientes de transferência de calor, e a sua correlação, em função de Reynolds, obtidas, uma vez que o número de Prandtl é constante nas condições do experimento, (anexo 10).

Os resultados da correlação do número de Nusselt em função do número de Reynolds estão mostrados nas figuras 22 a 24.

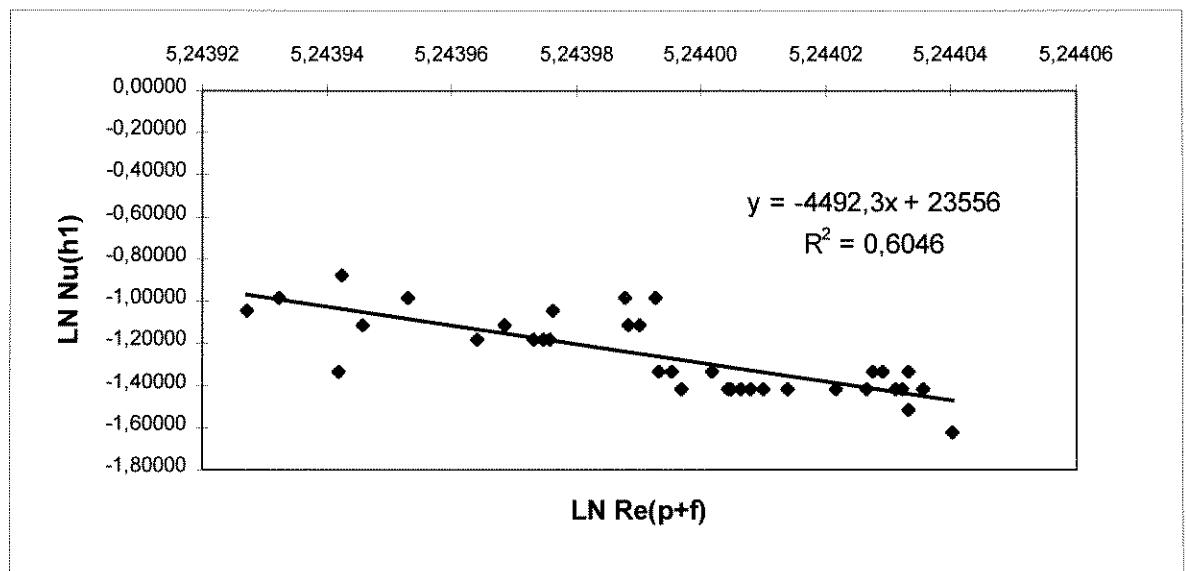


Figura 22 - Ln de Nusselt x Ln de Reynolds para aquecimento utilizando o coeficiente de transferência de calor calculado pela equação 42a.

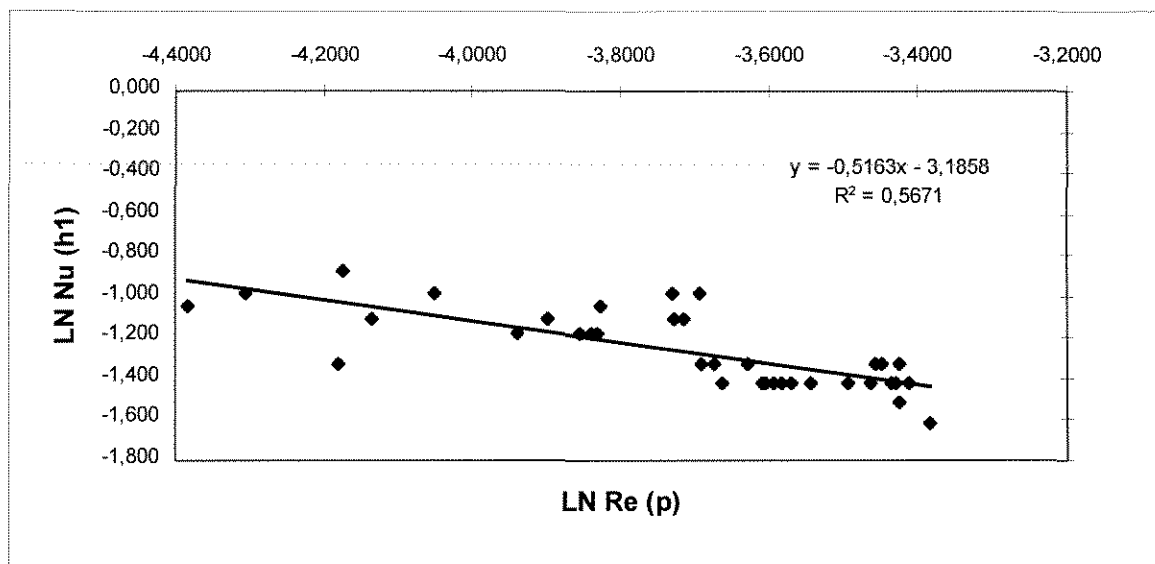


Figura 22a - Ln de Nusselt x Ln de Reynolds para aquecimento utilizando o coeficiente de transferência de calor calculado pela equação 42a, considerando Re(partícula).

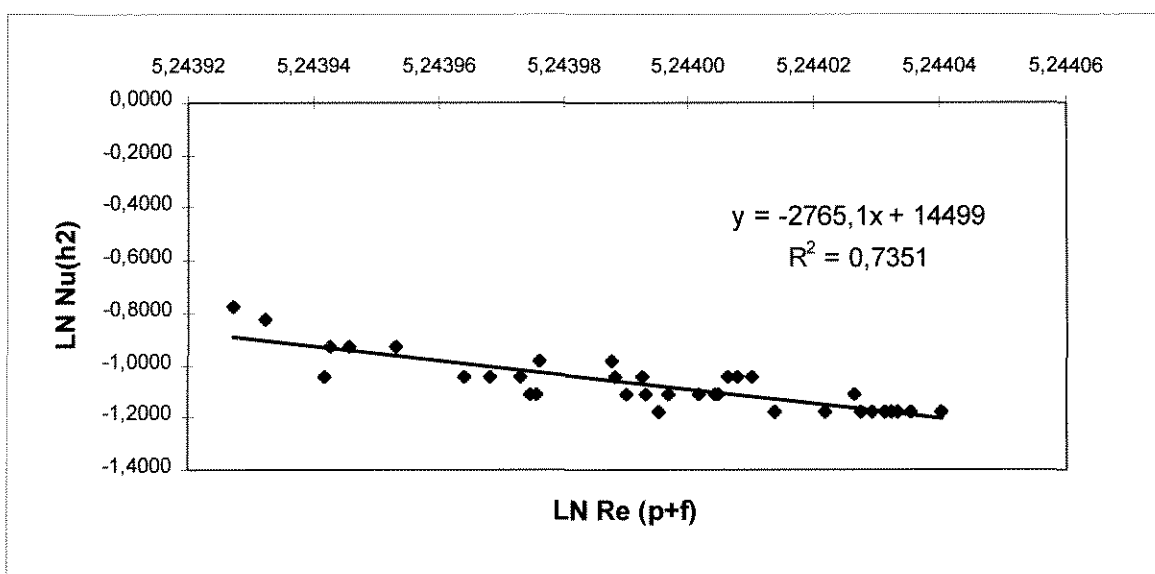


Figura 23 - Ln de Nusselt x Ln de Reynolds para aquecimento utilizando o coeficiente de transferência de calor calculado pela equação 42b.

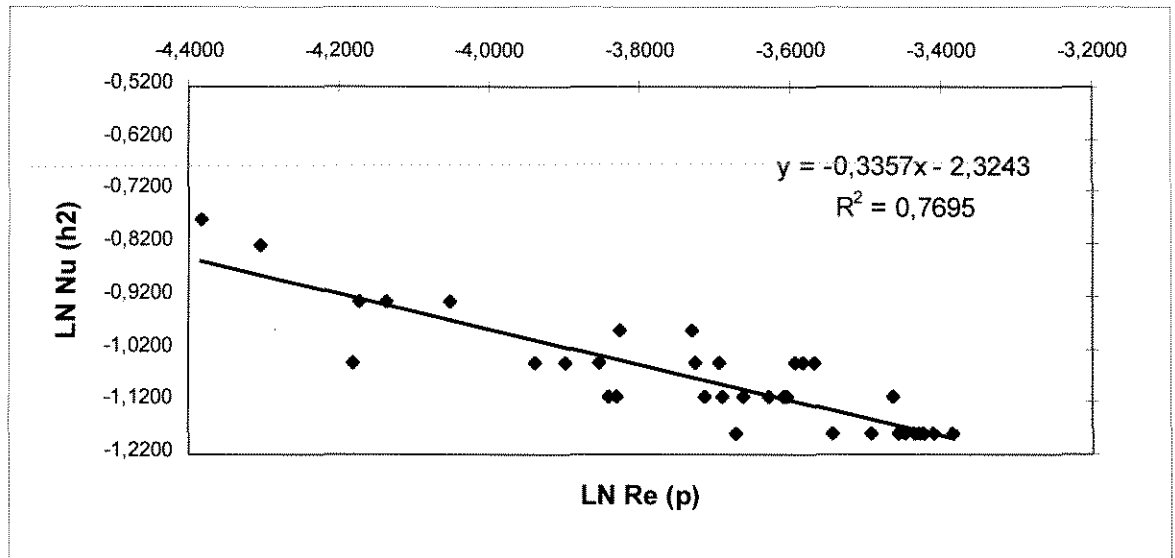


Figura 23a - Ln de Nusselt x Ln de Reynolds para aquecimento utilizando o coeficiente de transferência de calor calculado pela equação 42b, considerando $Re(p)$.

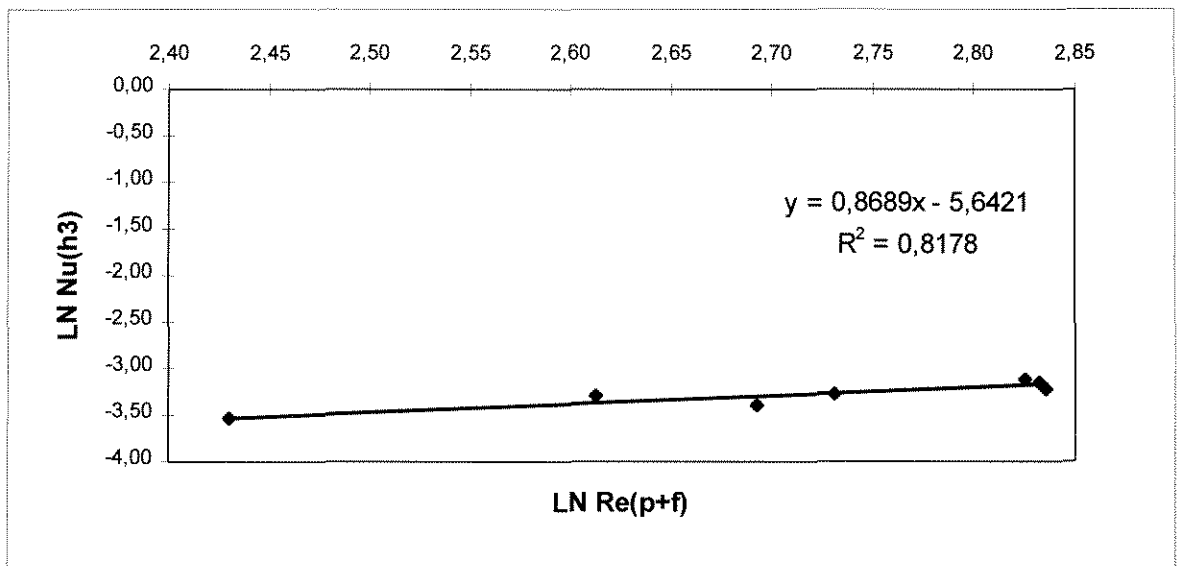


Figura 24 - Ln de Nusselt x Ln de Reynolds para resfriamento utilizando o coeficiente de transferência de calor calculado pela equação 42a.

Os valores dos expoentes do número de Reynolds de -0,5163 utilizando a equação (42a) e -0,3357 utilizando a equação (42b) de SARTORI (1986), estão de

acordo com os valores apresentados na condição adimensionalizada para coluna de recheio, BIRD (1960). O número de Reynolds é calculado baseado na velocidade do sólido.

Os valores médios dos coeficientes convectivos globais, utilizando o conceito de trocadores de calor são 0,0233 utilizando a área de um trocador de calor e 0,2655 utilizando a área da seção transversal estes valores são 10 a 100 vezes superiores com relação aos valores de h calculados pela equação de SARTORI (1986).

Os coeficientes calculados pelos conceitos de trocadores de calor só tem validade para o dimensionamento do presente equipamento, isto é, a transferência de calor deve ser analisada baseado nos valores dos coeficientes convectivos de calor.

4.3) SECAGEM

4.3.1) DETERMINAÇÃO DA ADIMENSIONAL DE UMIDADE.

A umidade de equilíbrio foi calculada segundo ROSSI e ROA (1980), mostrado no quadro 22 pela equação (79), mostrado no anexo 5.

Quadro 22 - Umidades de equilíbrio.

para cada passagem pela torre	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	Experimento 7
1	Yo - 0,2048 Y - 0,2048 Yeq- 0,0250	Yo - 0,2048 Y - 0,2048 Yeq- 0,0438	Yo - 0,1848 Y - 0,1848 Yeq- 0,0250	Yo - 0,2048 Y - 0,2048 Yeq- 0,0116	Yo - 0,2048 Y - 0,2048 Yeq- 0,0430	Yo - 0,2048 Y - 0,2048 Yeq- 0,0206	Yo - 0,1947 Y - 0,1947 Yeq- 0,0549
2	Yo - 0,2048 Y - 0,1723 Yeq- 0,0250	Yo - 0,2048 Y - 0,1737 Yeq- 0,0438	Yo - 0,1848 Y - 0,1325 Yeq- 0,0250	Yo - 0,2048 Y - 0,1710 Yeq- 0,0116	Yo - 0,2048 Y - 0,1628 Yeq- 0,0430	Yo - 0,2048 Y - 0,1792 Yeq- 0,0206	Yo - 0,1947 Y - 0,1628 Yeq- 0,0549
3	Yo - 0,2048 Y - 0,1455 Yeq- 0,0250	Yo - 0,2048 Y - 0,1669 Yeq- 0,0438	Yo - 0,1848 Y - 0,1312 Yeq- 0,0250	Yo - 0,2048 Y - 0,1587 Yeq- 0,0116	Yo - 0,2048 Y - 0,1614 Yeq- 0,0430	Yo - 0,2048 Y - 0,1751 Yeq- 0,0206	Yo - 0,1947 Y - 0,1561 Yeq- 0,0549
4	Yo - 0,2048 Y - 0,1429 Yeq- 0,0250	Yo - 0,2048 Y - 0,1601 Yeq- 0,0438	Yo - 0,1848 Y - 0,1136 Yeq- 0,0250	Yo - 0,2048 Y - 0,1481 Yeq- 0,0116	Yo - 0,2048 Y - 0,1494 Yeq- 0,0430	Yo - 0,2048 Y - 0,1669 Yeq- 0,0206	Yo - 0,1947 Y - 0,1534 Yeq- 0,0549
5	Yo - 0,2048 Y - 0,1325 Yeq- 0,0250	Yo - 0,2048 Y - 0,1494 Yeq- 0,0438	Yo - 0,1848 Y - 0,1111 Yeq- 0,0250	Yo - 0,2048 Y - 0,1377 Yeq- 0,0116	Yo - 0,2048 Y - 0,1377 Yeq- 0,0430	Yo - 0,2048 Y - 0,1534 Yeq- 0,0206	Yo - 0,1947 Y - 0,1416 Yeq- 0,0549
6	Yo - 0,2048 Y - 0,1161 Yeq- 0,0250	Yo - 0,2048 Y - 0,1442 Yeq- 0,0438	Yo - 0,1848 Y - 0,1086 Yeq- 0,0250		Yo - 0,2048 Y - 0,1364 Yeq- 0,0430	Yo - 0,2048 Y - 0,1455 Yeq- 0,0206	Yo - 0,1947 Y - 0,1364 Yeq- 0,0549
7	Yo - 0,2048 Y - 0,1148 Yeq- 0,0250					Yo - 0,2048 Y - 0,1377 Yeq- 0,0206	

Os valores de adimensionais de umidade calculados para a secagem de soja durante o aquecimento e posterior resfriamento estão mostrados no quadro 23.

Quadro 23 - Adimensional de umidade durante o aquecimento e resfriamento.

Experimentos R para cada passagem pela torre	Experimento 1 R ₁	Experimento 2 R ₂	Experimento 3 R ₃	Experimento 4 R ₄	Experimento 5 R ₅	Experimento 6 R ₆	Experimento 7 R ₇
1	1	1	1	1	1	1	1
2	0,8167	0,8078	0,6751	0,8242	0,7408	0,8590	0,7716
3	0,6667	0,7643	0,6626	0,7622	0,7285	0,8373	0,7217
4	0,6556	0,7209	0,5564	0,7053	0,6544	0,7940	0,7002
5	0,6001	0,6527	0,5376	0,6536	0,5865	0,7181	0,6217
6	0,5057	0,6217	0,5251		0,5742	0,6747	0,5789
7	0,5001					0,6367	

4.3.2) MODELO DE DIFUSÃO LÍQUIDA DE FICK.

Conforme podem ser observados no anexo 6a. A equação foi ajustada para 3, 5, 10, 14 e 20 termos da série e os resultados estão mostrados no anexo 6b.

O erro assintótico demonstra que o melhor resultado foi obtido para 20 termos.

Os valores de difusividade efetiva assim como a comparação dos valores das adimensionais do conteúdo de umidade experimental e calculado estão mostrados no anexo 6. Os valores de difusividade efetiva calculados para 20 termos da série com os erros relativos estão mostrados no quadro 24.

Os erros relativos de 0,24% a 9,48% mostram um excelente ajuste.

Quadro 24 - Valores de difusividade adimensionais de conteúdo de umidade, experimental e calculado, erro relativo utilizando 20 termos da série.

EXPERIMENTO 1 - FICK PARA 20 TERMOS							
n passag	tempo	Def	Rexp	Rcalc	erro	ERRO %	
0	0	1,91E-11	1,000	0,970	0,0309	3,09	
1	1800	1,91E-11	0,817	0,797	0,0251	2,51	
2	6360	1,91E-11	0,666	0,639	0,0423	4,23	
3	7500	1,91E-11	0,655	0,612	0,0703	7,03	
4	8700	1,91E-11	0,600	0,587	0,0221	2,21	
5	10140	1,91E-11	0,506	0,559	0,0948	9,48	
6	11760	1,91E-11	0,500	0,530	0,0566	5,66	
EXPERIMENTO 2 - FICK PARA 20 TERMOS							
n passag	tempo	Def	Rexp	Rcalc	erro	ERRO %	
0	0	2,36E-11	1,000	0,970	0,0309	3,09	
1	1200	2,36E-11	0,808	0,815	0,0086	0,86	
2	2340	2,36E-11	0,764	0,748	0,0214	2,14	
3	3360	2,36E-11	0,721	0,702	0,0271	2,71	
4	4380	2,36E-11	0,653	0,665	0,0180	1,80	
5	5340	2,36E-11	0,621	0,634	0,0205	2,05	
EXPERIMENTO 3 - FICK PARA 20 TERMOS							
n passag	tempo	Def	Rexp	Rcalc	erro	ERRO %	
1	0	4,85E-11	1,000	0,970	0,0309	3,09	
2	1200	4,85E-11	0,675	0,742	0,0903	9,03	
3	2400	4,85E-11	0,662	0,646	0,0248	2,48	
4	3540	4,85E-11	0,556	0,581	0,0430	4,30	
5	4680	4,85E-11	0,537	0,529	0,0151	1,51	
6	5820	4,85E-11	0,525	0,485	0,0825	8,25	
EXPERIMENTO 4 - FICK PARA 20 TERMOS							
n passag	tempo	Def	Rexp	Rcalc	erro	ERRO %	
1	0	1,62E-11	1,000	0,970	0,0309	3,09	
2	1620	1,62E-11	0,824	0,822	0,0024	0,24	
3	3240	1,62E-11	0,762	0,753	0,0120	1,20	
4	4860	1,62E-11	0,705	0,703	0,0028	0,28	
5	6420	1,62E-11	0,653	0,664	0,0166	1,66	
EXPERIMENTO 5 - FICK PARA 20 TERMOS							
n passag	tempo	Def	Rexp	Rcalc	erro	ERRO %	
1	0	1,60E-11	1,000	0,970	0,0309	3,09	
2	1200	1,60E-11	0,741	0,782	0,0524	5,24	
3	2220	1,60E-11	0,728	0,710	0,0254	2,54	
4	3480	1,60E-11	0,654	0,645	0,0140	1,40	
5	4680	1,60E-11	0,586	0,596	0,0168	1,68	
6	5640	1,60E-11	0,574	0,563	0,0195	1,95	
EXPERIMENTO 6 - FICK PARA 20 TERMOS							
n passag	tempo	Def	Rexp	Rcalc	erro	ERRO %	
1	0	3,37E-11	1	0,97	0,0309	3,09	
2	1440	3,37E-11	0,859	0,839	0,0238	2,38	
3	2520	3,37E-11	0,837	0,782	0,0703	7,03	
4	3300	3,37E-11	0,794	0,753	0,0544	5,44	
5	4080	3,37E-11	0,718	0,728	0,0137	1,37	
6	4860	3,37E-11	0,674	0,705	0,0440	4,40	
7	5520	3,37E-11	0,637	0,688	0,0741	7,41	
EXPERIMENTO 7 - FICK PARA 20 TERMOS							
n passag	tempo	Def	Rexp	Rcalc	erro	ERRO %	
1	0	2,96E-11	1,000	0,970	0,0309	3,09	
2	1260	2,96E-11	0,771	0,790	0,0241	2,41	
3	2460	2,96E-11	0,721	0,713	0,0112	1,12	
4	3420	2,96E-11	0,700	0,668	0,0479	4,79	
5	4380	2,96E-11	0,622	0,629	0,0111	1,11	
6	5340	2,96E-11	0,579	0,596	0,0285	2,85	

4.3.3) DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO ADIMENSIONAL DE UMIDADE PELO MODELO DE PAGE (1949).

Conforme pode ser observado no anexo 7, a equação de PAGE e PAGE modificado apresentam excelente ajuste dos dados experimentais. Os valores próximos de 1 da constante A do modelo de PAGE modificado, sugere a utilização do modelo de PAGE para o presente trabalho.

A comparação dos resultados do ajuste pelos modelos de Fick, PAGE e PAGE modificado estão mostrados nas figuras 25 a 31.

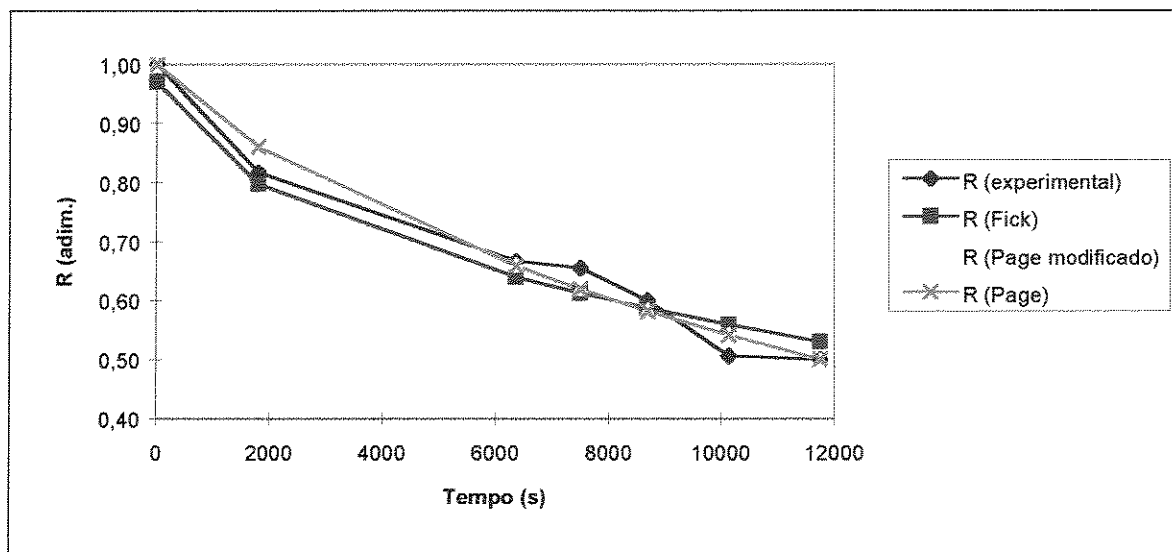


Figura 25 - Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 1.

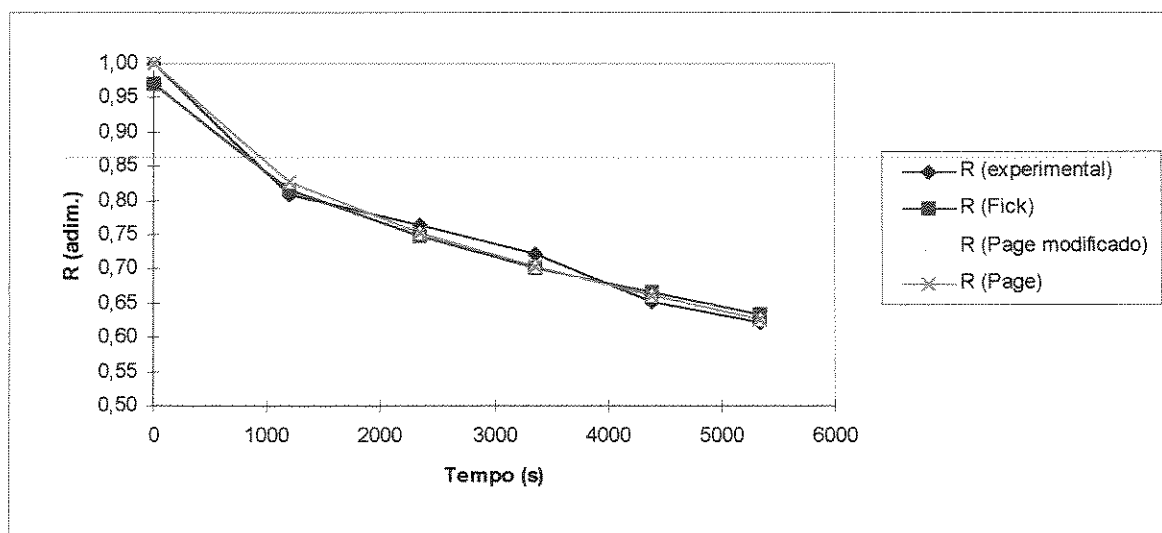


Figura 26 - Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 2.

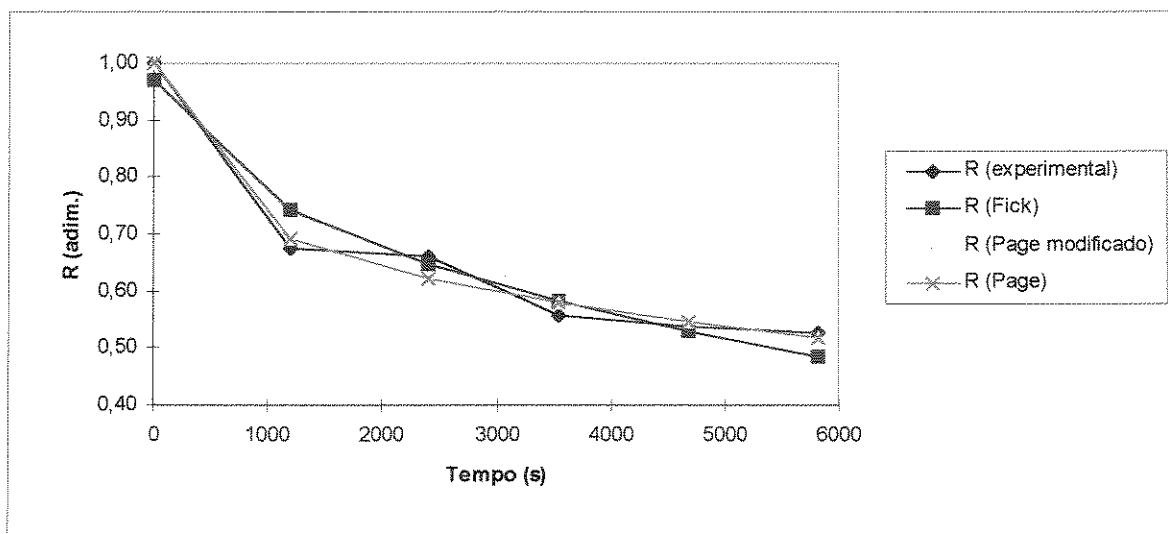


Figura 27 - Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 3.

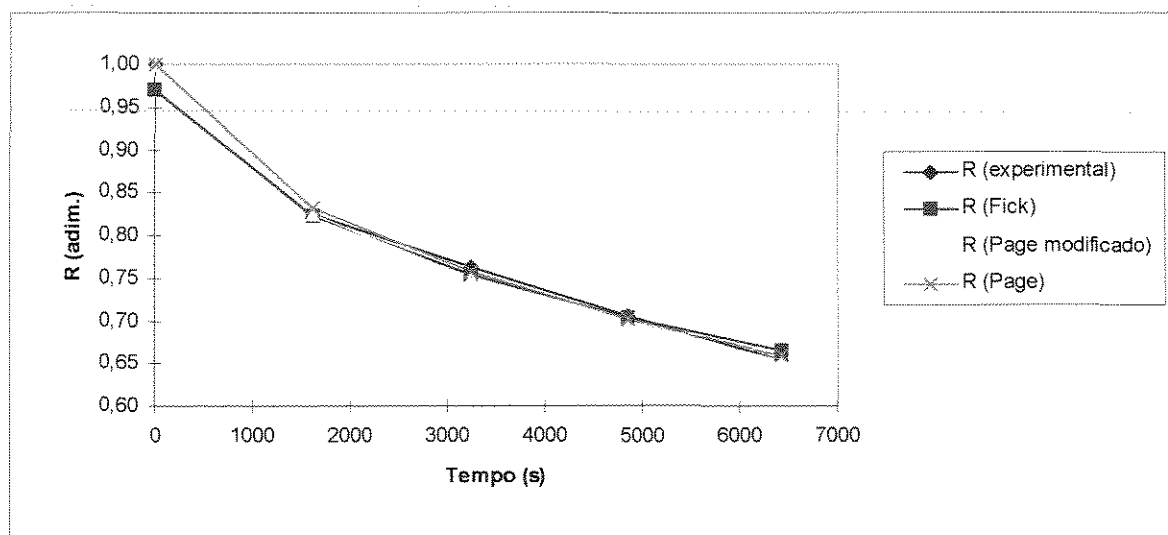


Figura 28 - Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 4.

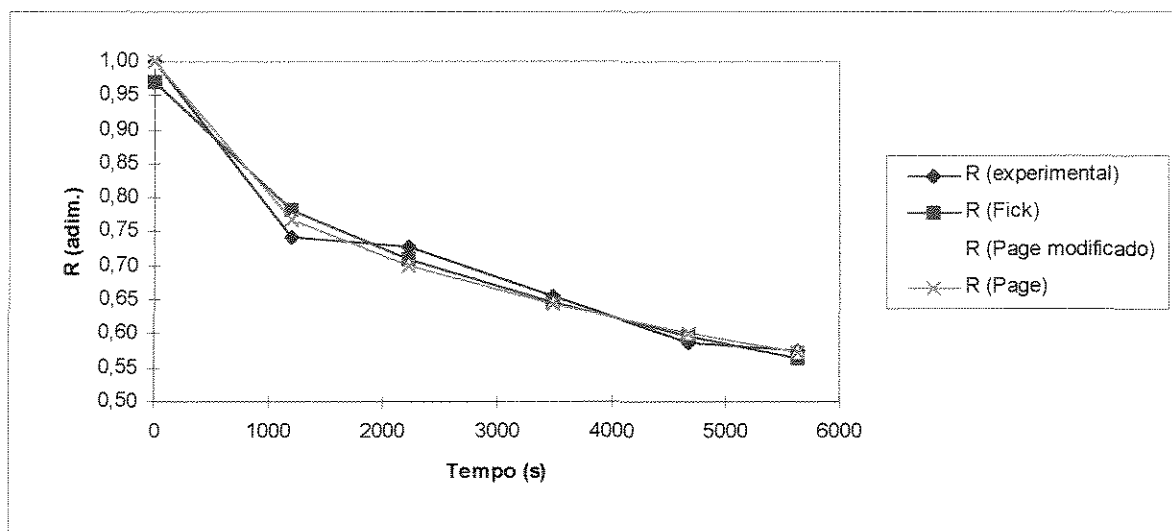


Figura 29 - Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 5.

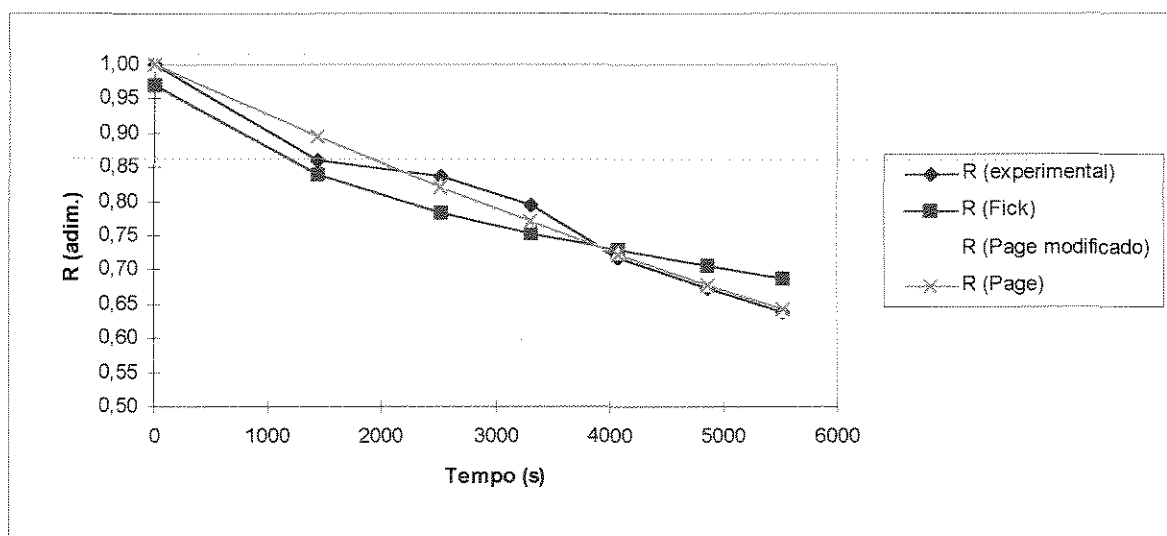


Figura 30 - Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 6.

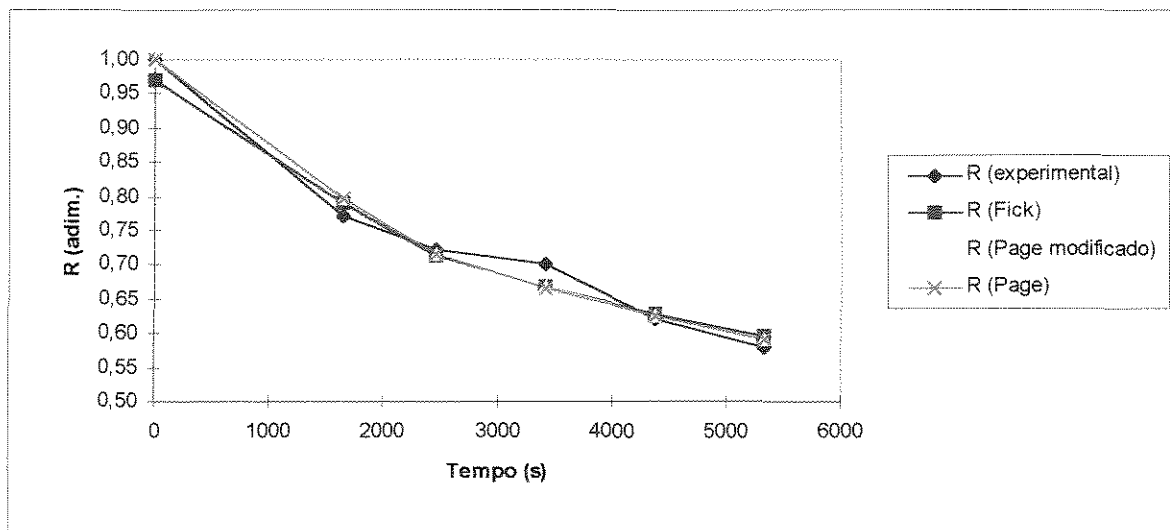


Figura 31 - Curvas de secagem: valores experimentais e calculados para o experimento 7.

4.3.4) DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DO GRÃO DURANTE O AQUECIMENTO E O RESFRIAMENTO.

Os cálculos dos parâmetros da equação do tipo Arrhenius para os valores de difusividade efetivas, assim como do cálculo dos adimensionais do conteúdo de umidade, durante o aquecimento e resfriamento, estão mostrados nos anexos (8a) e (8) respectivamente.

A faixa de temperatura proposta por GODOI (1996), foi utilizada no presente trabalho para a obtenção de suas difusividades para o cálculo da equação do tipo Arrhenius, que relaciona as difusividades efetivas com as temperaturas de secagem.

Com os valores de difusividades correspondentes a seção de aquecimento do equipamento, calculou-se o decréscimo do conteúdo de umidade.

O decréscimo do conteúdo de umidade corresponde ao aquecimento e ao resfriamento, estão mostrados no quadro 25a.

QUADRO 25a - Percentual de decréscimo de umidade no aquecimento e no resfriamento.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	Experimento 7
Aquecimento	68,58	77,64	42,44	59,61	66,16	50,54	73,07
Resfriamento	31,42	22,35	57,55	40,38	33,83	49,46	26,92

O quadro 25a apresenta a perda do conteúdo de umidade em porcentagem, correspondente a seção de aquecimento e resfriamento.

Os correspondentes ao aquecimento e resfriamento estão mostrados no quadro 25b.

QUADRO 25b - Variação do conteúdo de umidade durante o aquecimento e resfriamento.

Condição	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3		Experimento 4	
	Ui	Uf	Ui	Uf	Ui	Uf	Ui	Uf
Aquecimento	0,2048	0,1431	0,2048	0,1634	0,1848	0,1325	0,2048	0,1588
Resfriamento	0,1431	0,1148	0,1634	0,1442	0,1325	0,1086	0,1588	0,1377

Condição	Experimento 5		Experimento 6		Experimento 7	
	Ui	Uf	Ui	Uf	Ui	Uf
Aquecimento	0,2048	0,1579	0,2048	0,1588	0,1947	0,1547
Resfriamento	0,1579	0,1364	0,1588	0,1377	0,1547	0,1364

O estudo comparativo dos gastos energéticos, análogo ao apresentado por GODOI (1996), não foi efetuado pois a alta perda de energia para o ambiente inviabilizou a comparação.

4.3.5) SUGESTÕES

Com os resultados alcançados na unidade piloto, torna-se possível visualizar a construção de uma unidade industrial, conforme pode ser observado no desenho (figuras 32a e 32b). Trata-se da montagem de unidades comercialmente já existentes, associada a montagem da torre de aquecimento dotada dos dispositivos internos (chicanas torcidas e inclinadas).

SECADOR INDUSTRIAL

1º) Descrição detalhada da unidade

O sistema projetado em escala industrial, utilizando os dispositivos relatados através da patente nº 8700583 é constituído de: Fornalha industrial (1) construída com estrutura de ferro fundido. Possuindo em seu interior um trocador de calor tubular aquecido através da queima de resíduo agrícola ou lenha. Um motor elétrico (2) aciona dois ventiladores centrífugos (3a)(3b). O ventilador (3a) aspira o ar aquecido no trocador tubular e insufla este ar através de dutos (4) isolados térmicamente para a torre (5) objeto da patente, instalada no topo do silo (6) com capacidade para 15 toneladas de grãos. O ventilador centrífugo (3b) com a utilização de dutos, insufla ar ambiente para o silo (6) pela extremidade inferior. Um transportador elicoidal (7) acionado por um motor elétrico é instalado na extremidade inferior do silo (6), direcionado para a abertura inferior de um elevador de caçamba (8), permitindo assim recirculação de grãos.

2º) Funcionamento

O silo (6) é alimentado de grãos por intermédio do elevador de caçamba (8). Completada sua carga, inicia-se a secagem dos grãos. A fornalha (1) é previamente aquecida. Sua capacidade calorífica é regulada através da quantidade estipulada de lenha ou resíduo que transmite aquecimento para o trocador de calor tubular. O motor elétrico (2) é acionado transmitindo potência para os ventiladores centrífugos (3a)(3b). O ventilador (3a) aspira o ar aquecido no trocador e insufla este ar para a torre (5) por sua extremidade inferior.

Como descrito na patente de invenção, no interior desta torre é instalado um duto central que possui uma série de chicanas (placas torcidas e inclinadas) com torções em sentidos opostos, fazendo com que os grãos que serão alimentados pela parte superior da torre pelo elevador de caçamba (8) deslizem por estas chicanas. Estes movimentos de grãos, com reversões sucessivas pelas chicanas, permitem uma melhor homogeneidade da massa de grãos, além de permitir uma melhor transferência de calor .

O silo (6) onde estão depositadas as 15 toneladas de grãos, esta recebendo por intermédio do ventilador centrífugo (3b).

Estando estabilizada a temperatura na torre (5), aciona-se o motor do transportador elicoidal (7) e o transportador de caçamba (8), abrindo a seguir o registro instalado na extremidade do silo para a saída dos grãos. A velocidade do elevador de caçamba (8) regula a entrada de grãos para a torre.

Os grãos aquecidos escorrem para o silo, onde serão resfriados pelo sistema de aeração, completando assim o processo de secagem.

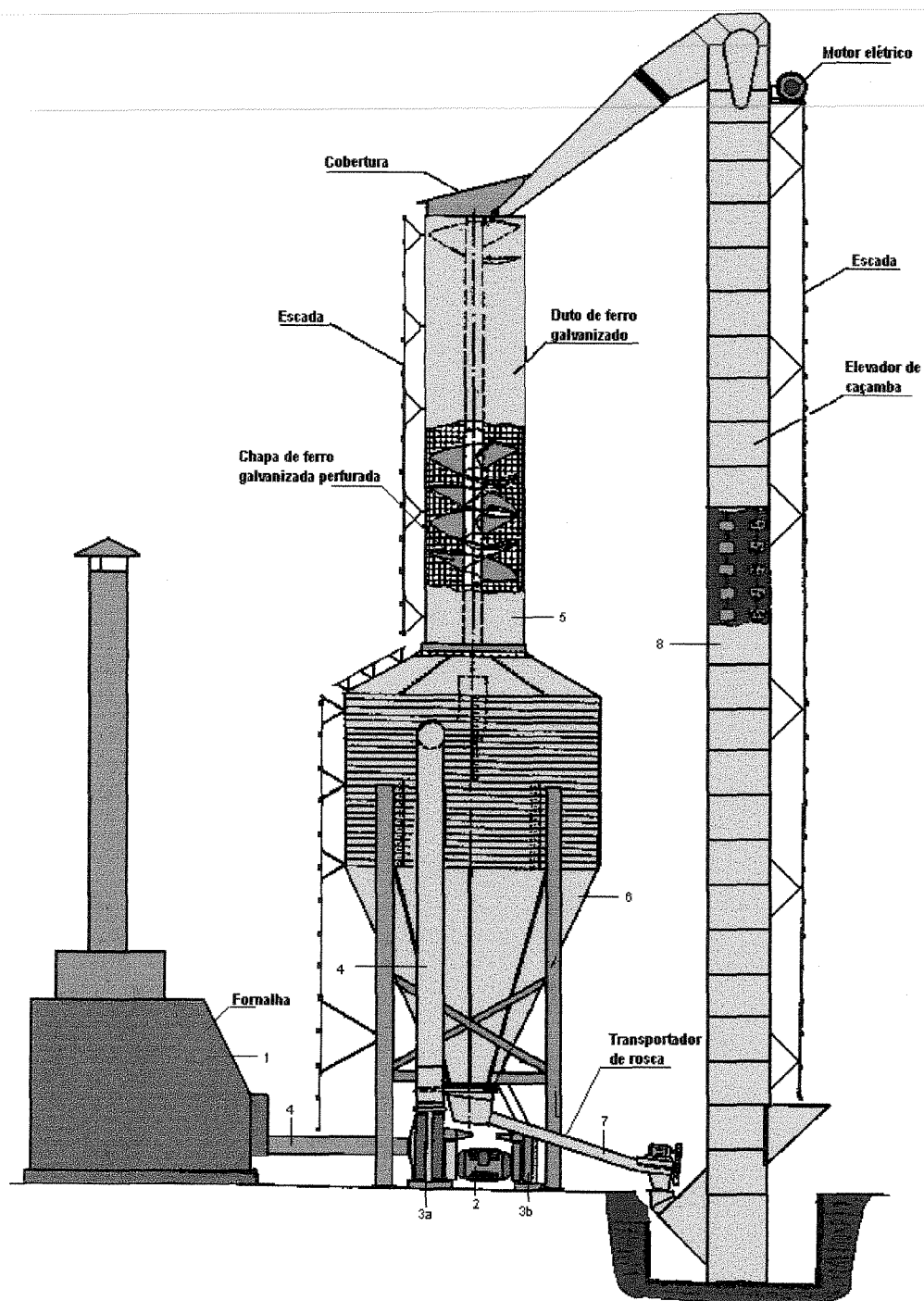


Figura 32a - Representação esquemática de uma unidade industrial (vista lateral).

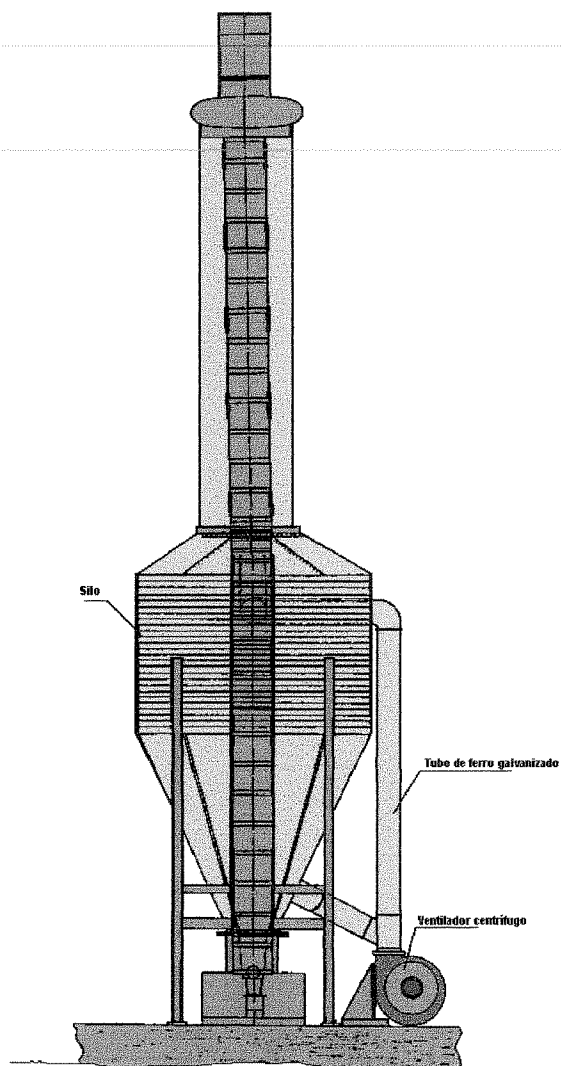


Figura 32b - Representação esquemática de uma unidade industrial (vista frontal).

Dentre as vantagens que este sistema poderá oferecer estão, maior homogeneidade da umidade final e fácil construção, devido a maioria de seus componentes já serem produzidos comercialmente, além da economia de energia que o sistema de promotores estacionários promovem, GODOI (1996).

5) CONCLUSÕES

1 - A patente industrial nº 8700583, pode perfeitamente ser utilizada para secagem de grãos.

2 - Este equipamento por não ter sido isolado térmicamente, apresentou perda de energia para o ambiente na ordem de 74% a 90% do total de energia transferido para o ar de secagem.

3 - Os coeficientes de transferência de calor, baseados nos conceitos de trocadores de calor situaram entre 0,1496 kJ/m²sK a 0,3784 kJ/m²sK, utilizando a área da seção transversal do secador e 0,0131 kJ/m²sK a 0,0333 kJ/m²sK, utilizando a área média logarítmica do trocador de calor. Estes valores superestimam o coeficiente de troca térmica comparados aos valores dos coeficientes convectivos calculados.

4 - A equação de SARTORI (1986) utilizada para avaliar os coeficientes convectivos mostraram um bom ajuste com os dados experimentais. Os erros relativos oscilaram entre 1% e 40%. Esta variação ocorreu devido a perda de calor para o ambiente, apresentado no item 2.

5 - Os coeficientes convectivos avaliados para o aquecimento situaram entre 10×10^{-4} kJ/m²sK a 20×10^{-4} kJ/m²sK. Os coeficientes convectivos avaliados para o resfriamento situaram entre 12×10^{-4} kJ/m²sK a 29×10^{-4} kJ/m²sK.

6 - As equações adimensionais obtidas para a transferência de calor foram do tipo: $Nu = A (Re^b)$, sendo $b = -0,5163$ utilizando a temperatura média do fluido e $b = -0,3357$ utilizando a temperatura média do sólido.

7 - As difusividades mássicas efetivas obtidas, situaram entre $1,60 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ a $4,85 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. Estes valores de difusividade efetiva foram calculados considerando a secagem durante o aquecimento e resfriamento.

8 - As curvas experimentais de secagem apresentaram um exelente ajuste com as equações utilizadas do tipo Page e Page modificado, apresentando valores de k entre 0,0001 e 0,0273 e c entre 0,3663 e 1,0829 e os valores de A entre 0,9803 e 0,9954, k entre 0 e 0,0086 e c entre 0,3669 e 1,0829 respectivamente.

9 - Utilizando a soja (*Glycine max. L. Merrill*), o presente sistema obteve 42,44% a 77,65% na secagem durante o aquecimento e 22,35% a 57,56% na secagem durante o resfriamento. O decréscimo de umidade durante o aquecimento foi de 0,2005 para 0,1527 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ms}}$ e durante o resfriamento de 0,1527 para 0,1308 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{ms}}$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUERRE, R.; SUAREZ, C. ; VIOLLAZ, P.E. Drying kinetics of rough rice grain. *J. Food Technology*, v.17, p.679-686, 1982.
- ASAE. Psychometric data. *STANDARDS OF THE ASAE D 271.2*. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE, p.4-6., p.350. St.Joseph, MI. 1990.
- BANASZEK, M.M. ; SIEBENMORGEN, T.J. Individual rice kernel drying curves. *Trans.of the ASAE*, v.36, n.2, p.521-8, 1993.
- BAKKER-ARKEMA, F.W.; FONTANA, C.; BROOK, R.C.; WESTELAKEN, C.M. *Secagem de arroz através de fluxo concorrente*. Madison : ASAE, 1982. 9p. (ASAE, 82-3068). Tradução. Datilografado.
- BAKKER-ARKEMA, F.W.; PATTERSON, R.J. *Multiple zone drying in stationnary and moving bed dryers*. Amer. Soc. Agr. Eng. Paper 71-302, 1971.
- BAKKER-ARKEMA, F.W.; LEREW, L.E.; DeBOER, S.F.; ROTH, M.G. *Grain drying simulation*. East Lasing: Michigan State University - Agriculture Experiment Station, Res. Rep. 224, 1974.
- BALABAN, M.O. *Mathematical model for air drying applied to fish*. Ann Arbor: University Microfilms International, 1984. 437p. (Dissertação-Ph.D.), University of Washington.
- BARROZO, M.A.S.; CALADO, V.M.A.; CALÇADA, L.A. ; MASSARANI, G. Secagem de soja em leito deslizante e recirculação pneumática : influência da umidificação artificial, IN: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 19., 1991, Campinas. *Anais*, Campinas,1991. v. I, p.327-337.
- BECKER, H.A. ; SALLANS, H.R. A study of internal moisture movement in the wheat kernel. *Cereal Chemistry*, v.32, p.212-226, 1955.
- BECKER, H.A. A study of diffusion in solids of arbitrary shape, with application to the drying of the wheat kernel. *Journal of Applied Polimer Science*, v.1, n.2, p.212-226, 1959.

- BECKER, H.A. ; SALLANS, H.R. Drying wheat in spouted bed . *Chem. Eng. Sci.*, v.13,n.3, p.97-112, 1960.
- BENEDETTI, B.C. ; JORGE, J.T. Curvas de umidade de equilíbrio de vários grãos, *Ciênc. Tecnol. Aliment.* , v.7, n.2, p.172-188, 1987.
- BINBENET, J.J. Air drying kinetics of biological particles. In: TOEY,R ; MUJUNDAR, A. ed. *Drying'85'*. Washington: Hemisphere. 1985. p. 178-85.
- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc. 1960.
- BOYCE, D.S. Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying . *J. Agric. Res.*, v.10, v.4, p.333-341.1965.
- BOWERS, T.G. ; REINTJES, H., A review of fluid-to-particle heat transfer in packed and moving beds. *Chem. Eng. Progr. Symposium Ser.*, v.57,n 32, p.69-74, 1961.
- BRUCE, D.M. Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150°C. *J. Agric. Eng. Res.*, v.32, n.4, p.337-347, 1985.
- CALADO, V.M.A.; MASSARANI, G. Secagem de material sólido granular. In: ENEMP, 18., 1990, Nova Friburgo. Anais. v.1, p. 335-351.
- CALADO, V.M.A. Modelagem e simulação de secadores em leito fixo e deslizante. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1993, Tese de Doutorado.
- CARSLAW, H.S. ; JAEGER, J.C. *Conduction of heat in solids*. London, Oxford University Press, 1959, 510p
- COLSON, K.H. & YOUNG, J.H. Two-component thin-layer drying model for unshelled peanuts. *Trans.of the ASAE*, v.33, n.1, p.241-246, 1990.
- CHARM, S.E. Dehydratation of foods. In: *The fundamentals of food engineering*. 2.ed. The AVI Publishing, 1971. p.294-404.
- CHHINNAN, M.S. Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans. *Trans. of the ASAE*, v.27,p.610-5, 1984.
- CHU, S.T. ; HUSTRULID, A. Numerical solution of diffusion equations. *Trans. of the ASAE*, v.11,n.5, p.705-708, 1968.

- CHUNG, D.S. ; PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. *Trans.of the ASAE* ,v.10, p.552-575, 1967.
- CORNEJO, F.E.P. *Estudo dos parâmetros de secagem e construção de um secador de baixo custo para filés salgados de pescado*. Campinas: UNICAMP-FEA/DEA, 1987. 86 p., Tese de Mestrado.
- CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. 2.ed. Clarendon: Oxford, 1975.
- DALPASQUALE, V.A. *Sistemas de secagem para grãos, que utilizam altas temperaturas*. Viçosa : CENTREINAR, 1983. 21p.
- DAUNDIN, J.D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. *Sciences de Aliments*, Paris, v.3, n.1, p.1-38, 1983.
- ECE, M.C. ; CIHAN, A. A liquid diffusion model for drying rough rice. *Trans.of the ASAE*, v.36, n.3, p.837-40, 1993.
- FIRESTONE, R.L.; WALKER, P.N. ; PURI, V.M. Drying rate of alfafa in a protective structure. *Trans.of the ASAE*, v.31, p.52-57, 1988.
- FORTES, M. ; OKOS, M.R. Drying Theories: their bases and limitations as applied to food and grains. In: MUJUNDAR, A.S., ed. *Advances in drying* , Washington: Hemisphere, 1980, v.1, p.119-50.
- FURNAS, C.C. Heat transfer from a gas stream to a bed of broken solids-II . *Ind. Eng. Chem.* , v.22, n.7, p.721-731, 1930.
- GAMSON, B.W.;THODOS, G. ; HOUGEN, O.A. Heat, mass and momentum transfer in the flow of gases through granular solids. *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, v.39, p.1-35, 1943.
- GODOI, L.F. *Estudo de um secador com promotores estáticos anulares de mistura*. Campinas: UNICAMP-FEA, 1996. Tese de Mestrado.
- GRAHAM, V.A. ; BILANSKI, W.K. Simulation of grain drying in intimate contact with adsorbents. *Trans.of the ASAE*, v.29, n.6, p.1776-83, 1986.
- GUPTA, V. ; SRINIVASON, J. *Heat and Mass Transfer*, New Delhi: Tata Mcgraw Hill.1982.

- HARKINS, W.D. ; JURA, G. A vapor adsorption method for determination of the area of a solid. *J. Am. Chem. Soc.*, v.66, p.1366-1371, 1944.
- HAYNES, B.C. Vapor pressure determination of seed hygroscopicity. citado por BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W. ; HALL, C.W., *Drying cereal grains*, Westport The Avi Publishing, 1961.
- HEERTJES, P.M. ; McKIBBINS, S.W., The partial coefficient of heat transfer in a drying fluidized bed. *Chem. Eng. Sci.*, v.5, p.161-167, 1956.
- HENDERSON, S.M. A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, v.33, p.29-32, 1952.
- HOLMAN, J.P. *Heat transfer*. New York, McGraw-Hill Book, 1972, 462p.
- HUKILL, W.V. *Grain drying: in storage of cereal grains and their products*. St. Paul: Amer. Ass. Cereal Chem, 1954.
- HUKILL, W.V. ; SCHMIDT, J.L. Drying rate of fully exposed grain kernels. *Trans.of the ASAE* v.3, n.1,1960.
- HUSAIN, A.; CHEN, C.S.;CLAYTON, J.T. Simultaneous heat and mass diffusion in biological materials. *J. Agric. Eng. Res.*,v.18, p. 343-354, 1973.
- HUSTRULID, A. Theoretic drying curve for shelled corn. *Trans.of the ASAE* ,n.2, 1959.
- HUSTRULID, A. Comparative drying rates of naturally moist, remoistened,and frozen shelled corn. *Trans. of the ASAE*, p.64-67, 1962.
- JASON, A.C. A study of evaporation and diffusion process in the drying of fish muscle. Fundamentals aspects of dehydration of foodstuffs. New York:The Society of Chemical Industry, 1958, p.103-135.
- JAYAS, D.S. ; SOKHANSANJ, S. Thin-layer drying of barley at low temperatures. *Can. Agric. Eng.*, v.31, p.21-3, 1989.
- JORGE, J.T. *Utilização de uma propriedade física, como método de avaliação dos teores dos componentes químicos de sementes de soja, sem destruição de seu valor biológicos*. Campinas:UNICMP-FEA/FEAGRI, 1980.125p. Tese Doutorado.

- KARATHANOS, V.T., VILLALOBOS, G., SARAVACOS, G.D. Comparision of two methodod of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Sience*, v.55 n1,p. 218-223, 1990.
- KEEY, R.B. *Drying - principles and practice*. Oxford: Pergamon Press 1975.
- KING, C.J. Rates of moisture sorption and desorption in porous, dried foodstuffs. *Food Technol.* v.22 n.4,p.165-171, 1968.
- KNUDSEN, J.G. ; KATZ, D.L. *Fluid dynamics and heat transfer*. New York: McGraw-Hill Book, 1958. 576p.
- KREITH, F. *Princípios de transmissão de calor*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1969. 641p.
- LASSERAN, J.C. Princípios gerais de secagem. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, v.3, n.3, p.17-46, jul. 1978.
- LASSEREAN, J.C. Aeração de grãos. Viçosa: CENTREINAR, 1981.
- LEVA, M., WEINTRAUB, M.; GRUMMER, M. Heat tranfer in fluidized bed. *Chem. Eng. Progr.* , v.3, p.563-572, 1949.
- LEWIS, W.K. The rate drying of solid material. *J. Ind. & Eng. Chem.* v.13, n.5, p.427-432, 1921.
- LI, H. ; MOREY, R.V. Thin-layer drying of yellow dent corn. *Trans. of the ASAE*, v.27, p.581-585, 1984.
- LI, Y., MOREY, R.V. ; AFINRUD, M. Thin-layer drying rates of oilseed sunflower. *Trans.of the ASAE*, n.30, p.1172-5, 1987.
- LOMAURO, C.J. Evaluation of food moisture sorption isotherm equation Part 1: *Fruit, vegetable and meat products*. *International Journal for Food Chemistry, Biochemistry, Microbiology and Engineering*, v. 18, p.111-24, 1985.
- LOVELL, C.L. ; KARNOFISKY, G. Design of solid-fluid heat exchangers. *Ind. Eng. Chem.*, v.35, n.4, p.391-397. 1943.
- McADAMS, W.H. *Heat Transmission*. New York:McGraw-Hill Book, 532p.,1954.
- MASSARANI,G. Secagem de material sólido particulado Apostila UFRJ-Escola de Química, 1992. 32p.

- MATSUMOTO, S. ; PEI, D.C.T. A mathematical analysis of pneumatic drying of grains-II. Falling rate drying. *Int. J. Heat Mass Transfer*, v.27,n.6, p.851-855, 1984.
- MEDEIROS, J.L.; MASSARANI, G. Secagem de bagaço de cana III. In: ENEMP, 10., 1982, São Carlos. Anais. v. 1, p. 222-241, São Carlos SP.
- MEYER, J.A.; VILA, L.G.; ROA, G. ; ROSSI, S.J. Energia para a secagem de produtos agropecuários. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, v.3, n.4, p.4-14, dez. 1978.
- MIKETINAC, M.J.; SOKHANSANJ, S. ; TUTTEK, Z. Determination of Heat and Mass Transfer Coefficients in Thin-Layer Drying of Grain. *Trans.of the ASAE*, v.35, n.6, p.1853-8, 1992.
- MISRA, M.K. ; BROOKER, D.B. Thin-layer drying and rewetting equations for shelled corn. *Trans. of the ASAE*, v.23, n.5, p.1254-1260, 1980.
- MISRA, R.N.; YOUNG, J.H. Numerical solution of simultaneous moisture diffusion and shrinkage during drying. *Trans. of the ASAE*, v.23, n.3, p.1277-1282.
- MOHSENIN, N.N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Science, 1986. 890p.
- MONTAVANI, B.H.M. *Análise e simulação de secagem de grãos de milho em camadas espessas*. Viçosa: UFV-DEA, 1976. Viçosa, MG. Tese de Mestrado.
- MUNRO, W.D. ; AMUNDSON, N.R. Solid-fluid heat exchangers in moving beds. *Ind. Eng. Chem.* , v.42, n.8, p.1481-1489. 1950.
- NGODDY, P.O. ; BAKKER-ARKEMA, F.W. A generalization theory of sorption phenomena in biological products. Part III. *Trans.of the ASAE* v.15, p.1160-1164, 1972.
- NONHEBEL, M.A. ; MOSS, A.A. Drying of solids in the chemical industry. London: Butterworth , 1971, p.33-43.
- NOOMHORM, A. ; VERMA, L.R. Generalized single-layer rice drying models. *Trans.of the ASAE*, v.29, n.2: p.587-91, 1986.

- NOOMHORM, A. ; VERMA, L.R. Deep-bed rice drying simulation using two generalized single-layer models. v.29, n.5, p.1456-61, 1986.
- NOVAIS, A.F. *Análise da aplicação do leito deslizante e escoamentos cruzados na secagem de sementes de soja*. São Carlos:UFSCar-EQ, 1990. 95p. Tese de Mestrado.
- O'CALLAGHAN, J.R.; MENZIES, D.J. ; BAILEY, P.H. Digital simulation of agricultural dryer performace. *J. Agric. Eng. Res.*, v.16, p.223-224, 1971.
- OVERHULTS, D.G.; WHITE, G.M.; HAMILTON, H.E. ; ROSS, I.J. Drying soybeans with heated air. *Trans. of the ASAE*, v.16, p.112-113, 1973.
- OSBORN, G.S.; WHITE, G.M. ; WALTON, L.R. Thin-Layer Moisture Adsorption Equation for Soybeans. *Trans.of the ASAE*, v.34,n.1, p.201-4, 1991.
- PABIS, S; HENDERSON, S.M. Grain drying theory. *J. Agric. Eng. Res.*,v.6, n.4, p.272-277, 1961.
- PAGE, G.E. *Factors Influencing the Maximum of Air Drying Shelled Corn in Thin-Layer*. Indiana:Purdue University, 1949. Tese de M.Sc., U.S.A.
- PARK, K. J. *Obtenção de correlação para transferência de calor e de quantidade de movimento, para fluidos newtonianos e não-newtonianos, em um trocador munido de promotores estacionários anulares de turbulência*. Campinas:UNICAMP/FEM, 1979. 102p. Tese Doutorado.
- PARK, K. J., JARDINE, J. G. and SUNDFIELD, E. Desenvolvimento e avaliação de um secador contínuo de grãos. In: *IV Encontro Nacional de Secagem*, Viçosa, p.55-8, 1983.
- PARK, K.J. *Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem*. Campinas:UNICAMP-FEA/DEA, 1987. 53p. Tese Livre Docência.
- PARK, K. J., ALONSO, L. F. T. and GODOI, L. F. G. Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) characteristic drying curve. In: *Proceedings of the 10th International Drying Symposium*. Krakow, Poland, 1001-8, 1996.

- PARK, S.W.; CHUNG, D.S. ; WATSON, C.A. Absorption kinetics of water vapor by yellow corn. I. Analysis of kinetic data for sound corn. *Cereal Chem.* v.48, p.14-22, 1971.
- PATENTE INDUSTRIAL, PI8700583, IPT/EMBRAPA/UNICAMP. *Equipamentp para secagem de materiais granulares*. Inventores: Kil Jin Park, Felix Emilio Prado Cornejo e Song Won Park. 1987.
- PATHAK, P.K.; AGRAWAL, Y.C. ; SINGH, B.P.N. Thin-layer drying model for rapeseed. *Trans.of the ASAE*, v.34, n.6, p.2505-8, 1991.
- PARTI, M.; DUGMANICS, I. Diffusion coefficient for corn drying. *Trans. of the ASAE*, v.33, n. 5, p. 1652-1656, 1990.
- PATIL, R.T.; SOKHANSANJ, S.; ARINZE, E.A. ; SCHOENAU, G. Thin layer drying of components of fresh alfafa. *Can. Agric. Eng.*, v.34, n.4, p.343-6, 1992.
- PELIANO, A.M.T.M. O mapa da fome: subsídios à formulação de uma política de segurança alimentar. *IPEA, doc. de política*, n.14, março 1993.
- PIZA, J.T. ; NETO, A. Curso: Armazenista II, Assunto: Equipamentos. Viçosa-CENTREINAR, 46p. 1980.
- PRASAD, B.V.S.; CHANDRA, P.K. ; BAL, S. Drying parboiled rough rice in stationary, semi-fluidized, and fluidized conditions. *Trans.of the ASAE*, v.37, n.2. p.589-94, 1994.
- PUZZI, D. Manual de armazenamento de grãos - armazens e silos. São Paulo, Ed.Agronômica Ceres, 403p., 1977.
- QUEIROZ, D.M. *Simulação de secagem de milho (Zea mays L.) em secadores de fluxos concorrentes*. Viçosa:UFV/DEA, 1984. Tese Mestrado.
- RANZ, W.E. ; MARSHALL, W.R. Evaporation from drops: part II. *Chem. Eng. Prog.*, v.48,n.3, p.173-180, 1952.
- RODRIGUES-ARIAS, J.H. *Desorption isotherms and drying rates of shelled corn in the temperature range of 40° to 140°F*. Mich. State Univ. Microfilms: Ann Arbor, Mich. 1956. Ph.D. Thesis.
- ROSS, J.I. ; WHITE, G.M. *Trans. of the ASAE*, v.15, p.175-176,179. 1972.

- ROSSI, S.J. ; ROA, G. *Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural*. Academia de Ciências, Publicação ACIESP, São Paulo, SP. 1980, 295p.
- SALWIN, H. ; SLAWSON, V. Moisture transfer in combinations of dehydrated foods. *Food Technology*, v.13, p.715-718, 1959.
- SARTORI, D.J.M. Transferência de calor em leite deslizante. Rio de Janeiro:UFRJ-COPPE/FEQ, 1986. 219p. Tese Doutorado.
- SCOTT, W.J. Water relations of food spoilage microorganisms. *Advances in Food Research*, v.7, p.83-127, 1957.
- SHERWOOD, T.K. The drying of solids. *Ind. Eng. Chem.* v.21, n.1, p.12-16, 1929.
- SMITH, J.E. The sorption of water vapor by high polymers. *J. of Am. Chem. Soc.*, v.69, p.646-651, 1947.
- SOKHANSANJ, S., SINGH, D. ; WASSERMAN, J.D. *Trans. of the ASAE*, p.903-906, 914, 1984.
- SISSON, L.E. ; JACKSON, T.W., Heat exchange in fluid-dense particle moving beds. *Trans. ASME: Journal of Heat Transfer*, v.89, p.1-6, 1967.
- STATISTICAL ANALYSIS - SAS. *SAS user's guide: Statistics*. 5 ed. Cary, NC, SAS Institute Inc., 956p., 1985.
- STRUMILLO, C. ; KUDRA, T. Drying : principles, applications and design. Poland, ed. R. Hughes, University of Salford, 448 p. 1986.
- SUZUKI, M.; KEEY, R.B. ; MAEDA, S. On the characteristic drying curve. *AIChE Symp. Series*, v.73, n.163, p.47-56, 1977.
- SYARIEF, A.M.; MOREY, R.V. ; GUSTAFSON, R.J. Thin-layer drying rates of sunflower seed. *Trans.of the ASAE*, v.27, p.195-200, 1984.
- THOMPSON, T.L.; PEART,R.M. ; FORSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying - A new model. *Trans. of the ASAE*, v.11, n.4, p.582-586. 1968.
- TRUEDELL, C. Sulle basi della termodinamica (1957) citado por SILVA TELLES, A.C.S. ; MASSARANI, G. (1991), Sistemas particulados a duas fases multicomponentes. *Anais do XIX ENEMP*, v.I, p.91-101, Campinas, SP.

- VAN ARSDEL, W.B. Approximate diffusion calculations for the falling-rate phase of drying. *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, v.43, n.1, p.13-24, 1947.
- VAN REST, D.J. ; ISAACS, G.W. Exposed layer drying rates of grain. *Trans. of the ASAE*, v.11, n.2, p.236-239, 1968.
- VERSAVEL, P.A. & MUIR, W.E. Drying behavior of high-moisture-content wheat-spikes. *Trans. of the ASAE*, v.31, p.1260-3, 1988.
- VERSAVEL, P.A. ; MUIR, W.E. Drying of rewetted wheat spikes. *Can. Agric. Eng.*, v.30: p.57-60, 1988.
- VIOLLAZ, P.E. ; SUAREZ, C., Transferência de calor sólido-gás en lecho móvil: solución mediante el teorema de Duhamel. *Rev. Latinoam. Transf. Cal. Mat.*, v.4, p.47-54, 1980.
- WALTON, L.R.; WHITE, G.M. ; ROSS, I.J. A cellular diffusion-based model for corn. *Trans. of the ASAE*, v.31, n.1, p.279-83, 1988.
- WEBER, E.A. Armazenagem agrícola. Porto Alegre: Kepler Weber Industrial, 400p. 1995.
- WHITE, G.M.; ROSS, I.J. ; WESTERMAN, P.W. Drying rate and quality of white shelled corn as influenced by dew point temperature. *Trans. of the ASAE*, v.16, p.118-120, 1973.
- WHITAKER, T.; BARRE, H.J. ; HAMDY, M.Y. Theoretical and experimental studies of diffusion in spherical bodies with a variable diffusion coefficient. *Trans. of the ASAE*, v.12, n.11, p.668-672, 1969.

ANEXOS

ANEXO 1) Determinação dos balanços de energia.

PLANILHA 1								
Condições pré-fixadas								
Tet-temperatura na entrada da torre (K)		353,0				vs-velocidade do ar na saída da torre (m/s)		0,54
Tst-temperatura na saída da torre (K)		333,0				vr-velocidade do ar de resfriamento (m/s)		0,27
ve-velocidade do ar na entrada (m/s)		8,3				Tr-temperatura do ar de resfriamento (K)		308,0
Número de passagens								
Variáveis		1	2	3	4	5	6	7
temperatura da m.p.antes da entrada(K)		293,0	293,0	307,4	305,0	308,3	308,2	307,0
umidade da m.p.(% BS)		0,2048	0,1723	0,1455	0,1429	0,1325	0,1161	0,1148
tempo de escoamento(s)			1080	960	480	600	540	540
temperatura da m.p. saída da torre(K)			318,0	326,0	328,8	329,7	331,5	331,0
tempo de resfriamento(s)			720	3600	660	600	900	1080
temperatura da m.p. após resfriam.(K)			307,4	308,0	308,3	308,2	308,5	308,3
temperatura ambiente(K)		295,8	296,2	296,7	296,9	297,2	297,1	296,9
peso da m.p.(kg)		3,012	2,897	2,718	2,717	2,611	2,594	2,528
umidade relativa(%)		0,7	0,71	0,7	0,72	0,72	0,72	0,72
q(grão)=(mc)(Cp)(T)	0,22	(kJ/s)		q(ar)=(m)(Cp)(T)			1,51	(kJ/s)
mc=M(18/13)=	0,004	(kg/s)		media da temp.ambiente			296,84	(K)
Cp	2,05	(kJ/kgK)		media da umid.relat.			0,71	(%)
T=M(14-11)	25,0	(K)		area(duto)			0,0079	(m2)
				m=vazão.densidade			0,0749	(kg/s)
				vazão=			0,0652	(m3/s)
				densidade=1/Vesp			1,15	(kg/m3)
				Pv=(Pvs x Ur)/100			1974,61	(Pa)
Tm(ar)	343,0	(K)		Pvs(tab)			2770,00	(Pa)
Tm(gr)saida	327,5	(K)		Vesp=(287 x T)/(Patm - Pv)				
				Vesp=			0,87	(m3/kg)
				Cp=			1,01	(kJ/kgK)
				T=Te-Ts			20	(K)
q(ar)=q(g)+q(perd)				Patm			100000	(Pa)
q(ar)-q(g)=	1,29	(kJ/s)	q(perd)=0,85%	a			287	
PLANILHA 2								
Condições pré-fixadas								
temperatura na entrada da torre (K)		333,0				velocidade do ar na saída da torre (m/s)		0,54
temperatura na saída da torre (K)		318,0				velocidade do ar de resfriamento (m/s)		0,27
velocidade do ar na entrada (m/s)		8,3				temperatura do ar de resfriamento (K)		307,0
Número de passagens								
Variáveis		1	2	3	4	5	6	
temperatura da m.p.antes da entrada(K)		296,0	296,0	304,0	305,5	299,0	304,7	
umidade da m.p.(% BS)		0,2048	0,1737	0,1669	0,1601	0,1494	0,1442	
tempo de escoamento(s)			600	540	420	420	360	
temperatura da m.p. saída da torre(K)			313,2	314,5	314,2	312,9	315,6	
tempo de resfriamento(s)			600	600	600	600	600	
temperatura da m.p. após resfriam.(K)			304,3	305,7	306,1	304,7	305,0	
temperatura ambiente(K)		295,3	295,5	295,4	295,2	295,2	294,8	
peso da m.p.(kg)		2,142	2,089	2,039	1,989	1,938	1,894	
umidade relativa(%)		0,7	0,7	0,7	0,8	0,73	0,75	
q(grão)=(mc)(Cp)(T)	0,11	(kJ/s)		q(ar)=(m)(Cp)(T)			1,13	(kJ/s)
mc=M(18/13)=	0,004	(kg/s)		media da temp.ambiente			295,38	(K)
Cp	2,05	(kJ/kg K)		media da umid.relat.			0,73	(%)
T=M(14-11)	14,0	(K)		area(duto)			0,0079	(m2)
				m=vazão.densidade			0,0749	(kg/s)
				vazão=			0,0652	(m3/s)
				densidade=1/Vesp			1,15	(kg/m3)
				Pv=(Pvs x Ur)/100			1897,27	(Pa)
Tm(ar)	325,5	(K)		Vesp=(287 x T)/(Patm - Pv)				
Tm(gr)saida	314,1	(K)		Pvs(tab)			2599	(Pa)
				Vesp=			0,87	(m3/kg)
				Cp=			1,007	(kJ/kgK)
				T=Te-Ts			15	(K)
q(ar)=q(g)+q(perd)				Patm			100000	(Pa)
q(ar)-q(g)=	1,02	(kJ/s)	q(perd)=0,90%	a			287	

ANEXO 1 - Continuação.

PLANILHA 3						
Condições pré-fixadas						
temperatura na entrada da torre (K)	365,9		velocidade do ar na saída da torre (m/s)	0,54		
temperatura na saída da torre (K)	343,0		velocidade do ar de resfriamento (m/s)	0,27		
velocidade do ar na entrada (m/s)	8,3		temperatura do ar de resfriamento (K)	307,0		
Número de passagens						
Variáveis	1	2	3	4	5	6
temperatura da m.p.antes da entrada(K)	296,0	299,0	302,0	305,0	305,0	307,0
umidade da m.p.(% BS)	0,1848	0,1325	0,1312	0,1136	0,1111	0,1086
tempo de escoamento(s)		300	300	240	240	240
temperatura da m.p. saída da torre(K)		319,0	324,0	328,2	330,0	327,3
tempo de resfriamento(s)		900	900	900	900	900
temperatura da m.p. após resfriam.(K)		303,9	306,4	308,0	311,8	306,3
temperatura ambiente(K)	292,8	293,0	294,0	294,0	294,0	295,0
peso da m.p.(kg)	1,885	1,841	1,742	1,721	1,676	1,64
umidade relativa(%)	75	75	72	70	70	70
$q(\text{grão})=(mc)(Cp)(T)$	0,34				1,74	
$mc=M(18/13)=$	0,007				293,95	
Cp	2,05				0,73	
$T=M(14-11)$	24,3				0,00785	
					0,0756	
					0,0652	
					1,16	
					2022,1	
$Tm(ar)$	354,6					
$Tm(gr)saída$	325,7					
					2770	
					0,844	
					1,007	
					22,9	
$q(ar)=q(g)+q(perd)$					100000	
$q(ar)-q(g)=$	1,41				287	
PLANILHA 4						
Condições pré-fixadas						
temperatura na entrada da torre (K)	366,0		velocidade do ar na saída da torre (m/s)	0,54		
temperatura na saída da torre (K)	343,0		velocidade do ar de resfriamento (m/s)	0,27		
velocidade do ar na entrada (m/s)	8,3		temperatura do ar de resfriamento (K)	308,5		
Número de passagens						
Variáveis	1	2	3	4	5	
temperatura da m.p.antes da entrada(K)	298,0	303,0	303,0	308,0	309,0	
umidade da m.p.(% BS)	0,2048	0,1710	0,1587	0,1481	0,1377	
tempo de escoamento(s)		420	420	420	360	
temperatura da m.p. saída da torre(K)		321,1	328,2	333,0	335,0	
tempo de resfriamento(s)		1200	1200	1200	1200	
temperatura da m.p. após resfriam.(K)		307,4	313,0	313,7	313,7	
temperatura ambiente(K)	295,3	296,3	299,0	299,6	301,0	
peso da m.p.(kg)	2,599	2,551	2,494	2,437	2,166	
umidade relativa(%)	0,66	0,66	0,52	0,5	0,5	
$q(\text{grão})=(mc)(Cp)(T)$	0,34				1,73	
$mc=M(18/13)=$	0,006				298,39	
Cp	2,05				0,57	
$T=M(14-11)$	26,3				0,00785	
					0,0748	
					0,0652	
					1,148	
					1676,6	
$Tm(ar)$	354,5					
$Tm(gr)saída$	329,3					
					2951,8	
					0,856	
					1,007	
					23	
$q(ar)=q(g)+q(perd)$					100000	
$q(ar)-q(g)=$	1,40				287	

ANEXO 1) - Continuação.

PLANILHA 5							
Condições pré-fixadas							
temperatura na entrada da torre (K)		335,8		velocidade do ar na saída da torre (m/s)		0,54	
temperatura na saída da torre (K)		325,0		velocidade do ar de resfriamento (m/s)		0,27	
velocidade do ar na entrada (m/s)		8,3		temperatura do ar de resfriamento (K)		309,0	
Número de passagens							
Variáveis		1	2	3	4	5	6
temperatura da m.p.antes da entrada(K)		294,0	294,0	303,0	306,0	303,6	307,0
umidade da m.p.(% BS)		0,2048	0,1628	0,1614	0,1494	0,1377	0,1364
tempo de escoamento(s)			720	420	360	300	360
temperatura da m.p. saída da torre(K)			318,2	315,8	319,7	315,6	318
tempo de resfriamento(s)			480	600	900	900	600
temperatura da m.p. após resfriam.(K)			306,4	308,4	303,6	307,0	308,0
temperatura ambiente(K)		296,8	297,4	297,6	299,0	299,8	299,4
peso da m.p. (kg)		2,452	2,403	2,318	2,267	2,176	2,166
umidade relativa(%)		0,72	0,65	0,64	0,62	0,62	0,62
q(grão)=(mc)(Cp)(T)		0,21	(kJ/s)	q(ar)=(m)(Cp)(T)		0,81	kJ/s
mc=M(18/13)=		0,006	(kg/s)	media da temp.ambiente		298,3	(K)
Cp		2,05	(kJ/kg K)	media da umid.relat		0,65	(%)
T=M(14-11)		17,3	(K)	area(duto)		0,00785	(m2)
				m=vazão.densidade		0,0746	(kg/s)
				vazão=		0,0652	(m3/s)
				densidade=1/Vesp		1,145	(kg/m3)
				Pv=(Pvs x Ur)/100		1910,7	(Pa)
Tm(ar)		330,4	(°K)	Vesp=(287 x T)/(Patm - Pv)			
Tm(gr)saída		317,5	(°K)	Pvs(tab)		2962,3	(Pa)
				Vesp=		0,857	(m3/kg)
				Cp=		1,007	(kJ/kg°K)
				T=Te-Ts		10,8	(K)
q(ar)=q(g)+q(perd)				Patm		100000	(Pa)
q(ar)-q(g)=		0,60	(kJ/s)	q(perd)=0,74%		a	287

PLANILHA 6								
Condições pré-fixadas								
temperatura na entrada da torre (K)		354,5		velocidade do ar na saída da torre (m/s)		0,54		
temperatura na saída da torre (K)		333,0		velocidade do ar de resfriamento (m/s)		0,27		
velocidade do ar na entrada (m/s)		8,3		temperatura do ar de resfriamento (K)		308,0		
Número de passagens								
Variáveis		1	2	3	4	5	6	7
temperatura da m.p.antes da entrada(K)		296,0	296,0	306,9	309,0	301,5	307,6	310,0
umidade da m.p.(% BS)		0,2048	0,1792	0,1751	0,1669	0,1534	0,1455	0,1377
tempo de escoamento(s)			240	180	180	180	180	180
temperatura da m.p. saída da torre(K)			319,1	324,8	325,6	321,9	326,0	325,8
tempo de resfriamento(s)			1200	900	600	600	600	480
temperatura da m.p. após resfriam.(K)			306,9	309,3	310,9	307,6	310,2	309,2
temperatura ambiente(K)		296,7	297,0	298,0	299,0	297,4	297,9	298,1
peso da m.p. (kg)		1,336	1,326	1,307	1,301	1,275	1,264	1,248
umidade relativa(%)		0,7	0,65	0,6	0,58	0,7	0,72	0,72
q(grão)=(mc)(Cp)(T)		0,30	(kJ/s)	media da temp.ambiente		297,7	(K)	
mc=M(18/13)=		0,007	(kg/s)	media da umid.relat		0,67	(%)	
Cp		2,05	(kJ/kg K)	area(duto)		0,0079	(m2)	
T=M(14-11)		21,0	(K)	q(ar)=(m)(Cp)(T)		1,62	kJ/s	
				m=vazão.densidade		0,0747	(kg/s)	
				vazão=		0,0652	(m3/s)	
				densidade=1/Vesp		1,15	(kg/m3)	
				Pv=(Pvs x Ur)/100		1929,5	(Pa)	
Tm(ar)		343,9	(K)	Vesp=(287 x T)/(Patm - Pv)				
Tm(gr)saída		323,9	(K)	Pvs(tab)		2892,2	(Pa)	
				Vesp=		0,854	(m3/kg)	
				Cp=		1,007	(kJ/kgK)	
				T=Te-Ts		21,5	(K)	
q(ar)=q(g)+q(perd)				Patm		100000	(Pa)	
q(ar)-q(g)=		1,32	(kJ/s)	q(perd)=0,81		a	287	

ANEXO 1)- Continuação.

PLANILHA7						
Condições pré-fixadas						
temperatura na entrada da torre (K)		329,0		velocidade do ar na saída da torre (m/s)		0,54
temperatura na saída da torre (K)		313,0		velocidade do ar de resfriamento (m/s)		0,27
velocidade do ar na entrada (m/s)		8,3		temperatura do ar de resfriamento (K)		308,0
Número de passagens						
Variáveis		1	2	3	4	5
temperatura da m.p. antes da entrada(K)		292,0	292,0	302,0	306,0	299,5
umidade da m.p.(% BS)		0,1947	0,1628	0,1561	0,1534	0,1416
tempo de escoamento(s)			480	600	360	360
temperatura da m.p. saída da torre(K)			309,6	314,2	313,2	311,7
tempo de resfriamento(s)			780	600	600	600
temperatura da m.p. após resfriam.(K)			302	306,2	308,4	306,9
temperatura ambiente(K)		297,0	297,0	299,0	300,0	299,0
peso da m.p. (kg)		2,084	2,054	1,996	1,956	1,924
umidade relativa(%)		0,73	0,7	0,67	0,64	0,71
		7,05				
$q(\text{grão})=(mc)(C_p)(T)$	0,14	(kJ/s)		$q(\text{ar})=(m)(C_p)(T)$	1,20	kJ/s
$mc=M(18/13)=$	0,005	(kg/s)		media da temp. ambiente	298,3	(K)
C_p	2,05	(kJ/kg K)		media da umid. relat.	0,69	(%)
$T=M(14-11)$	14,10	(K)		area(duto)	0,0079	(m ²)
				$m=\text{vazão.densidade}$	0,0745	(kg/s)
				vazão=	0,0652	(m ³ /s)
				densidade=1/Vesp	1,1428	(kg/m ³)
				$P_v=(P_{vs} \times U_r)/100$	2053,9	(Pa)
$T_m(\text{ar})$	321,0 (K)			$V_{sp}=(287 \times T)/(P_{atm} - P_v)$		
$T_m(\text{gr})\text{saída}$	312,4 (K)			$P_{vs}(\text{tab})$	2962,34	(Pa)
				$V_{sp}=$	0,857	(m ³ /kg)
				$C_p=$	1,007	(kJ/kgK)
				$T=T_e-T_s$	16	(K)
$q(\text{ar})=q(\text{g})+q(\text{perd})$				P_{atm}	100000	(Pa)
$q(\text{ar})-q(\text{g})=$	1,06	(kJ/s)	$q(\text{perd})=0,88\%$	a	287	

ANEXO 2) Determinação dos coeficientes de transferência de calor (Usts e Utc).

Planilha 1		Numero de passagens					
Condições experimentais		1	2	3	4	5	6
Tet-temperatura na entrada da torre (K)		353,0					
Tst-temperatura na saída da torre (K)		333,0					
temperatura da m.p. antes da entrada(K)		293,0	293,0	307,4	305,0	308,3	308,2
temperatura da m.p. saída da torre(K)			318,0	326,0	328,8	329,7	331,5
peso da m.p.(kg)		3,012	2,897	2,718	2,717	2,611	2,594
tempo de escoamento(s)			1080	960	480	600	540
C=(kJ/kgK)		2,05					
1ª passagem				2ª passagem			
Ts-Te=		25 (K)		Ts-Te=		18,6 (K)	
q(gr.1)=m.c.(Ts-Te)		0,205 (kJ/s)		q(gr.2)=m.c.(Ts-Te) (kJ/s)		0,153 (kJ/s)	
m= 0,004 (kg/s)				m=(kg/s) 0,004			
U=q(gr1)/A(Ts-Te)/ln(Ts/Te)				U=q(gr2)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		312,6 (K)		Te=Te(gr)-Ts(ar)		320,2 (K)	
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		335,3 (K)		Ts=Ts(gr)-Te(ar)		339,5 (K)	
A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,2245 (kJ/m2sK)	A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,1869 (kJ/m2sK)
A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0197 (kJ/m2sK)	A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0164 (kJ/m2sK)
3ª passagem				4ª passagem			
Ts-Te=		18,5 (K)		Ts-Te=		21,4 (K)	
q(gr.3)=m.c.(Ts-Te)		0,228 (kJ/s)		q(gr.4)=m.c.(Ts-Te)		0,220 (kJ/s)	
m=(kg/s) 0,006				m=(kg/s) 0,005			
U=q(gr3)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)				U=q(gr4)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		318,9 (K)		Te=Te(gr)-Ts(ar)		320,6 (K)	
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		340,9 (K)		Ts=Ts(gr)-Te(ar)		341,4 (K)	
A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,2554 (kJ/m2sK)	A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,2562 (kJ/m2sK)
A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0224 (kJ/m2sK)	A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0225 (kJ/m2sK)
5ª passagem				6ª passagem			
Ts-Te=		23,2 (K)		Ts-Te=		22,8 (K)	
q(gr.5)=m.c.(Ts-Te)		0,238 (kJ/s)		q(gr.6)=m.c.(Ts-Te)		0,234 (kJ/s)	
m=(kg/s) 0,005				m=(kg/s) 0,005			
U=q(gr5)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)				U=q(gr6)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		320,6 (K)		Te=Te(gr)-Ts(ar)		320,0 (K)	
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		342,3 (K)		Ts=Ts(gr)-Te(ar)		342,0 (K)	
A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,2687 (kJ/m2sK)	A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,2613 (kJ/m2sK)
A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0236 (kJ/m2sK)	A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0230 (kJ/m2sK)

ANEXO 2) Continuação.

Planilha 2		Numero de passagens				
Condições experimentais		1	2	3	4	5
temperatura na entrada da torre (K)		333,0				
temperatura na saída da torre (K)		318,0				
temperatura da m.p. antes da entrada(K)		296,0	296,0	301,5	303,0	299,0
temperatura da m.p. saída da torre(K)			313,2	314,5	314,2	312,9
peso da m.p.(kg)		2,142	2,089	2,039	1,989	1,938
tempo de escoamento(s)			600	540	420	420
C=(kJ/kgK)		2,05				
1ª passagem			2ª passagem			
Ts-Te=		17,2 (K)	Ts-Te=		13,0 (K)	
q(gr.1)=m.c.(Ts-Te)		0,141 (kJ/s)	q(gr.2)=m.c.(Ts-Te)		0,107 (kJ/s)	
m=(kg/s)		0,004	m=(kg/s)		0,004	
U=q(gr1)/A(Ts-Te)/ln(Ts/Te)			U=q(gr2)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		307,0 (K)	Te=Te(gr)-Ts(ar)		311,1 (K)	
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		323,1 (K)	Ts=Ts(gr)-Te(ar)		323,8 (K)	
A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,1935 (kJ/m2sK)	A(sts)=	0,1256	U(sts)
A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0170 (kJ/m2sK)	A(tc)	1,4291	U(tc)
3ª passagem			4ª passagem			
Ts-Te=		11,2 (K)	Ts-Te=		13,9 (K)	
q(gr.3)=m.c.(Ts-Te)		0,115 (kJ/s)	q(gr.4)=m.c.(Ts-Te)		0,143 (kJ/s)	
m=(kg/s)		0,005	m=(kg/s)		0,005	
U=q(gr3)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			U=q(gr4)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		311,9 (K)	Te=Te(gr)-Ts(ar)		308,6 (K)	
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		323,7 (K)	Ts=Ts(gr)-Te(ar)		323,0 (K)	
A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,1915 (kJ/m2sK)	A(sts)=	0,1256	U(sts)
A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0168 (kJ/m2sK)	A(tc)	1,4291	U(tc)
5ª passagem						
Ts-Te=		10,9 (K)				
q(gr.5)=m.c.(Ts-Te)		0,112 (kJ/s)				
m=(kg/s)		0,005				
U=q(gr5)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)						
Te=Te(gr)-Ts(ar)		311,5 (K)				
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		324,4 (K)				
A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,1766 (kJ/m2sK)			
A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0155 (kJ/m2sK)			

ANEXO 2) - Continuação.

Planilha 3		Numero de passagens				
Condições experimentais		1	2	3	4	5
temperatura na entrada da torre (K)		365,9				
temperatura na saída da torre (K)		343,0				
temperatura da m.p. antes da entrada (K)		296,0	299,0	302,0	305,0	307,0
temperatura da m.p. saída da torre (K)			319,0	324,0	328,2	330,0
peso da m.p. (kg)		1,885	1,841	1,742	1,721	1,676
tempo de escoamento (s)			300	300	240	240
C=(kJ/kg°K)		2,05				
1ª passagem			2ª passagem			
Ts-Te=		23 (K)	Ts-Te=		25 (K)	
q(gr.1)=m.c.(Ts-Te)		0,283 (kJ/s)	q(gr.2)=m.c.(Ts-Te)		0,308 (kJ/s)	
m=(kg/s) 0,006			m=(kg/s) 0,006			
U=q(gr1)/A(Ts-Te)/ln(Ts/Te)			U=q(gr2)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		320,6 (K)	Te=Te(gr)-Ts(ar)		322,2 (K)	
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		342,1 (K)	Ts=Ts(gr)-Te(ar)		344,7 (K)	
A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,3224 (kJ/m2sK)	A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,3397 (kJ/m2sK)	
A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0283 (kJ/m2sK)	A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0299 (kJ/m2sK)	
3ª passagem			4ª passagem			
Ts-Te=		23,2 (K)	Ts-Te=		25 (K)	
q(gr.3)=m.c.(Ts-Te)		0,333 (kJ/s)	q(gr.4)=m.c.(Ts-Te)		0,359 (kJ/s)	
m=(kg/s) 0,007			m=(kg/s) 0,007			
U=q(gr3)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			U=q(gr4)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		323,8 (K)	Te=Te(gr)-Ts(ar)		323,8 (K)	
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		346,9 (K)	Ts=Ts(gr)-Te(ar)		347,8 (K)	
A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,3606 (kJ/m2sK)	A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,3784 (kJ/m2sK)	
A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0317 (kJ/m2sK)	A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0333 (kJ/m2sK)	
5ª passagem						
Ts-Te=		22,3 (K)				
q(gr.5)=m.c.(Ts-Te)		0,320 (kJ/s)				
m=(kg/s) 0,007						
U=q(gr5)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)						
Te=Te(gr)-Ts(ar)		324,8 (K)				
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		346,4 (K)				
A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,3627 (kJ/m2sK)				
A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0319 (kJ/m2sK)				

ANEXO 2) - Continuação.

Planilha 4				Numero de passagens			
Condições experimentais		1	2	3	4		
temperatura na entrada da torre (K)		366,0					
temperatura na saída da torre (K)		343,0					
temperatura da m.p. antes da entrada(K)		298,0	303,0	303,0	308,0	309,0	
temperatura da m.p. saída da torre(K)			321,1	328,2	333,0	335,0	
peso da m.p. (kg)		2,599	2,551	2,494	2,437	2,166	
tempo de escoamento(s)			420	420	420	360	
C=(kJ/kgK)		2,05					
1ª passagem				2ª passagem			
Ts-Te=		18,1 (K)		Ts-Te=		25,2 (K)	
q(gr.1)=m.c.(Ts-Te)		0,223 (kJ/s)		q(gr.2)=m.c.(Ts-Te)		0,310 (kJ/s)	
m=(kg/s)	0,006			m=(kg/s)	0,006		
U=q(gr1)/A(Ts-Te)/ln(Ts/Te)				U=q(gr2)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		322,7 (K)		Te=Te(gr)-Ts(ar)		322,7 (K)	
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		343,2 (K)		Ts=Ts(gr)-Te(ar)		346,9 (K)	
A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,2618 (kJ/m2sK)	A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,3253 (kJ/m2sK)
A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0230 (kJ/m2sK)	A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0286 (kJ/m2sK)
3ª passagem				4ª passagem			
Ts-Te=		25 (K)		Ts-Te=		24 (K)	
q(gr.3)=m.c.(Ts-Te)		0,308 (kJ/s)		q(gr.4)=m.c.(Ts-Te)		0,344 (kJ/s)	
m=(kg/s)	0,006			m=(kg/s)	0,007		
U=q(gr3)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)				U=q(gr4)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		325,3 (K)		Te=Te(gr)-Ts(ar)		325,9 (K)	
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		349,4 (K)		Ts=Ts(gr)-Te(ar)		350,4 (K)	
A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,3242 (kJ/m2sK)	A(sts)=	0,1256	U(sts)	0,3569 (kJ/m2sK)
A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0285 (kJ/m2sK)	A(tc)	1,4291	U(tc)	0,0314 (kJ/m2sK)

ANEXO 2) - Continuação.

Planilha 5		Numero de passagens				
Condições experimentais		1	2	3	4	5
temperatura na entrada da torre (K)		335,8				
temperatura na saída da torre (K)		325,0				
temperatura da m.p.antes da entrada(K)		294,0	294,0	303,0	306,0	303,6
temperatura da m.p. saída da torre(K)			318,2	315,8	319,7	315,6
peso da m.p.(kg)		2,452	2,403	2,318	2,267	2,176
tempo de escoamento(s)			720	420	360	300
C=(kJ/kgK)		2,05				
1ª passagem			2ª passagem			
Ts-Te=		24,2 (K)	Ts-Te=		12,8 (K)	
q(gr.1)=m.c.(Ts-Te)		0,198 (kJ/s)	q(gr.2)=m.c.(Ts-Te)		0,157 (kJ/s)	
m=(kg/s) 0,004			m=(kg/s) 0,006			
U=q(gr1)/A(Ts-Te)/ln(Ts/Te)			U=q(gr2)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		309,4 (K)	Te=Te(gr)-Ts(ar)		314,0 (K)	
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		327,1 (K)	Ts=Ts(gr)-Te(ar)		325,8 (K)	
A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,2561 (kJ/m2sK)	A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,2611 (kJ/m2sK)	
A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0225 (kJ/m2sK)	A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0229 (kJ/m2sK)	
3ª passagem			4ª passagem			
Ts-Te=		13,7 (K)	Ts-Te=		12,0 (K)	
q(gr.3)=m.c.(Ts-Te)		0,169 (kJ/s)	q(gr.4)=m.c.(Ts-Te)		0,172 (kJ/s)	
m=(kg/s) 0,006			m=(kg/s) 0,007			
U=q(gr3)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			U=q(gr4)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		315,6 (K)	Te=Te(gr)-Ts(ar)		314,3 (K)	
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		327,8 (K)	Ts=Ts(gr)-Te(ar)		325,7 (K)	
A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,2748 (kJ/m2sK)	A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,2921 (kJ/m2sK)	
A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0242 (kJ/m2sK)	A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0257 (kJ/m2sK)	
5ª passagem						
Ts-Te=		11,0 (K)				
q(gr.5)=m.c.(Ts-Te)		0,135 (kJ/s)				
m=(kg/s) 0,006						
U=q(gr5)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)						
Te=Te(gr)-Ts(ar)		316,1 (K)				
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		327,0 (K)				
A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,2355 (kJ/m2sK)				
A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0207 (kJ/m2sK)				

ANEXO 2) - Continuação.

Planilha 6		Numero de passagens					
Condições experimentais		1	2	3	4	5	6
temperatura na entrada da torre (K)		354,5					
temperatura na saída da torre (K)		333,0					
temperatura da m.p. antes da entrada(K)		296,0	296,0	306,9	309,0	301,5	307,6
temperatura da m.p. saída da torre(K)			319,1	324,8	325,6	321,9	326,0
peso da m.p.(kg)		1,336	1,326	1,307	1,301	1,275	1,264
tempo de escoamento(s)			240	180	180	180	180
C=(kJ/kgK)		2,05					
1ª passagem			2ª passagem				
Ts-Te=		23,1 (K)	Ts-Te=				
q(gr.1)=m.c.(Ts-Te)		0,285 (kJ/s)	q(gr.2)=m.c.(Ts-Te)				
m=(kg/s) 0,006			m=(kg/s) 0,007				
U=q(gr1)/A(Ts-Te)/ln(Ts/Te)			U=q(gr2)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)				
Te=Te(gr)-Ts(ar)		314,3 (K)	Te=Te(gr)-Ts(ar)				
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		336,6 (K)	Ts=Ts(gr)-Te(ar)				
A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,3154 (kJ/m2sK)	A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,3100 (kJ/m2sK)		
A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0277 (kJ/m2sK)	A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0272 (kJ/m2sK)		
3ª passagem			4ª passagem				
Ts-Te=		16,6 (K)	Ts-Te=				
q(gr.3)=m.c.(Ts-Te)		0,238 (kJ/s)	q(gr.4)=m.c.(Ts-Te)				
m=(kg/s) 0,007			m=(kg/s) 0,007				
U=q(gr3)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			U=q(gr4)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)				
Te=Te(gr)-Ts(ar)		321,0 (K)	Te=Te(gr)-Ts(ar)				
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		340,0 (K)	Ts=Ts(gr)-Te(ar)				
A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,2937 (kJ/m2sK)	A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,3388 (kJ/m2sK)		
A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0258 (kJ/m2sK)	A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0298 (kJ/m2sK)		
5ª passagem			6ª passagem				
Ts-Te=		18,4 (K)	Ts-Te=				
q(gr.5)=m.c.(Ts-Te)		0,264 (kJ/s)	q(gr.5)=m.c.(Ts-Te)				
m=(kg/s) 0,007			m=(kg/s) 0,007				
U=q(gr5)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			U=q(gr5)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)				
Te=Te(gr)-Ts(ar)		320,3 (K)	Te=Te(gr)-Ts(ar)				
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		340,2 (K)	Ts=Ts(gr)-Te(ar)				
A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,3157 (kJ/m2sK)	A(sts)= 0,1256	U(sts)	0,2842 (kJ/m2sK)		
A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0277 (kJ/m2sK)	A(tc) 1,4291	U(tc)	0,0250 (kJ/m2sK)		

ANEXO 2) - Continuação.

Planilha 7		Numero de passagens				
Condições experimentais		1	2	3	4	5
temperatura na entrada da torre (K)		329,0				
temperatura na saída da torre (K)		313,0				
temperatura da m.p. antes da entrada(K)		292,0	292,0	302,0	306,0	299,5
temperatura da m.p. saída da torre(K)			309,6	314,2	313,2	311,7
peso da m.p.(kg)		2,084	2,054	1,996	1,956	1,924
tempo de escoamento(s)			480	600	360	360
C=		2,05				
1ª passagem			2ª passagem			
Ts-Te=		17,6 (K)	Ts-Te=			
q(gr.1)=m.c.(Ts-Te)		0,144 (kJ/s)	q(gr.2)=m.c.(Ts-Te)			
m=(kg/s) 0,004			m=(kg/s) 0,004			
U=q(gr1)/A(Ts-Te)/ln(Ts/Te)			U=q(gr2)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		302,5 (K)	Te=Te(gr)-Ts(ar)			
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		319,4 (K)	Ts=Ts(gr)-Te(ar)			
A(sts)= 0,1256		U(sts) 0,1924 (kJ/m2sK)	A(sts)= 0,1256		U(sts) 0,1496 (kJ/m2sK)	
A(tc) 1,4291		U(tc) 0,0169 (kJ/m2sK)	A(tc) 1,4291		U(tc) 0,0131 (kJ/m2sK)	
3ª passagem			4ª passagem			
Ts-Te=		11,2 (K)	Ts-Te=			
q(gr.3)=m.c.(Ts-Te)		0,090 (kJ/s)	q(gr.4)=m.c.(Ts-Te)			
m=(kg/s) 0,006			m=(kg/s) 0,005			
U=q(gr3)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			U=q(gr4)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)			
Te=Te(gr)-Ts(ar)		309,6 (K)	Te=Te(gr)-Ts(ar)			
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		321,2 (K)	Ts=Ts(gr)-Te(ar)			
A(sts)= 0,1256		U(sts) 0,1518 (kJ/m2sK)	A(sts)= 0,1256		U(sts) 0,1872 (kJ/m2sK)	
A(tc) 1,4291		U(tc) 0,0133 (kJ/m2sK)	A(tc) 1,4291		U(tc) 0,0164 (kJ/m2sK)	
5ª passagem						
Ts-Te=		10,4 (K)				
q(gr.5)=m.c.(Ts-Te)		0,107 (kJ/s)				
m=(kg/s) 0,005						
U=q(gr5)/A(Tsar-Tegr)/ln(Ts/Te)						
Te=Te(gr)-Ts(ar)		310,1 (K)				
Ts=Ts(gr)-Te(ar)		321,2 (K)				
A(sts)= 0,1256		U(sts) 0,1843 (kJ/m2sK)				
A(tc) 1,4291		U(tc) 0,0162 (kJ/m2sK)				

ANEXO 3) - Base de cálculo para obtenção do coeficiente convectivo de transferência de calor.

PLANILHA 1- AQUECIMENTO								
temperatura na entrada da torre- Tfo (K)		353,0	353,0	353,0	353,0	353,0	353,0	353,0
temperatura na saída da torre- Tf (K)		333,0	333,0	333,0	333,0	333,0	333,0	333,0
temp. da m.p. antes da entrada- Tso(K)		293,0	293,0	307,4	305,0	308,3	308,2	307,0
temp. da m.p. saída da torre- Ts(K)			318,0	326,0	328,8	329,7	331,5	331,0
tempo de escoamento(s)			1080	960	480	600	540	540
Tfo-Tf/Tso-Tfo			0,33	0,44	0,42	0,45	0,45	0,43
Tfo-Ts/Tso-Tfo			0,58	0,59	0,50	0,52	0,48	0,48
peso da m.p. (kg)		3,012	2,897	2,718	2,717	2,611	2,594	2,528
Cf.Gf/Cs.Gs			13,59	12,71	6,58	8,39	7,73	7,85
Cf- varia para cada planilha	1,03		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Cs- constante	2,05		2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Gf- varia para cada planilha			0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
Gs- varia para cada corrida			0,02	0,02	0,05	0,04	0,04	0,04
umidade absoluta-H								
H=0,6219 . Pv/Patm . Pv	0,01							
densidade(kg/m3)	1,15							
Gf=((vazão ar/1+H).densid)/	0,59							
PLANILHA 2- AQUECIMENTO								
temperatura na entrada da torre- Tfo (K)		333,0	333,0	333,0	333,0	333,0	333,0	333,0
temperatura na saída da torre- Tf (K)		318,0	318,0	318,0	318,0	318,0	318,0	318,0
temp. da m.p. antes da entrada- Tso(K)		296,0	296,0	304,0	305,5	299,0	304,7	
temp. da m.p. saída da torre- Ts(K)			313,2	314,5	314,2	312,9	315,6	
tempo de escoamento(s)			600	540	420	420	360	
Tfo-Tf/Tso-Tfo			0,41	0,52	0,55	0,44	0,53	
Tfo-Ts/Tso-Tfo			0,54	0,64	0,68	0,59	0,61	
peso da m.p. (kg)		2,142	2,089	2,039	1,989	1,938	1,894	
Cf.Gf/Cs.Gs			10,53	9,72	7,75	7,95	6,98	
Cf- varia para cada planilha	1,03		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Cs- constante	2,05		2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	
Gf- varia para cada planilha			0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
Gs- varia para cada corrida			0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	
umidade absoluta-H								
H=0,6219 . Pv/Patm . Pv	0,01							
densidade(kg/m3)	1,15							
Gf=((vazão ar/1+H).densid)/	0,59							
PLANILHA 3- AQUECIMENTO								
temperatura na entrada da torre- Tfo (K)		366,0	366,0	366,0	366,0	366,0	366,0	366,0
temperatura na saída da torre- Tf (K)		343,0	343,0	343,0	343,0	343,0	343,0	343,0
temp. da m.p. antes da entrada- Tso(K)		296,0	299,0	302,0	305,0	305,0	307,0	
temp. da m.p. saída da torre- Ts(K)			319,0	324,0	328,2	330,0	327,3	
tempo de escoamento(s)			300	300	240	240	240	
Tfo-Tf/Tso-Tfo			0,34	0,36	0,38	0,38	0,39	
Tfo-Ts/Tso-Tfo			0,70	0,66	0,62	0,59	0,66	
peso da m.p. (kg)		1,885	1,841	1,742	1,721	1,676	1,640	
Cf.Gf/Cs.Gs			6,04	6,28	5,20	5,30	5,43	
Cf- varia para cada planilha	1,03		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Cs- constante	2,05		2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	
Gf- varia para cada planilha			0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
Gs- varia para cada corrida			0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	
umidade absoluta-H	0,01							
H=0,6219 . Pv/Patm . Pv	0,01							
densidade(kg/m3)	1,16							

ANEXO 3) - Continuação.

temperatura na entrada da torre- Tfo (K)		366,0	366,0	366,0	366,0	366,0	
temperatura na saída da torre- Tf (K)		343,0	343,0	343,0	343,0	343,0	
temp. da m.p.antes da entrada- Tso(K)		298,0	303,0	303,0	308,0	309,0	
temp. da m.p. saída da torre- Ts(K)			321,1	328,2	333,0	335,0	
tempo de escoamento(s)			420	420	420	360	
Tfo-Tf/Tso-Tfo			0,37	0,37	0,40	0,40	
Tfo-Ts/Tso-Tfo			0,71	0,60	0,57	0,54	
peso da m.p.(kg)		2,599	2,551	2,494	2,437	2,166	
Cf.Gf/Cs.Gs			6,04	6,17	6,31	5,79	
Cf- varia para cada planilha	1,02		1,02	1,02	1,02	1,02	
Cs- constante	2,05		2,05	2,05	2,05	2,05	
Gf- varia para cada planilha			0,59	0,59	0,59	0,59	
Gs- varia para cada corrida			0,05	0,05	0,05	0,05	
umidade absoluta-H							
H=0,6219 . Pv/Patm - Pv	0,01						
densidade(kg/m3)	1,15						
Gf=(vazão ar/1+H).densid	0,59						
PLANILHA 5- AQUECIMENTO							
temperatura na entrada da torre- Tfo (K)		335,8	335,8	335,8	335,8	335,8	335,8
temperatura na saída da torre- Tf (K)		325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	325,0
temp. da m.p.antes da entrada- Tso(K)		294,0	294,0	303,0	306,0	303,6	307,0
temp. da m.p. saída da torre- Ts(K)			318,2	315,8	319,7	315,6	318
tempo de escoamento(s)			720	420	360	300	360
Tfo-Tf/Tso-Tfo			0,26	0,33	0,36	0,34	0,38
Tfo-Ts/Tso-Tfo			0,42	0,61	0,54	0,63	0,62
peso da m.p.(kg)		2,452	2,403	2,318	2,267	2,176	2,166
Cf.Gf/Cs.Gs			10,97	6,58	5,81	5,00	6,14
Cf- varia para cada planilha	1,03		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Cs- constante	2,05		2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Gf- varia para cada planilha			0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
Gs- varia para cada corrida			0,03	0,04	0,05	0,06	0,05
umidade absoluta-H	0,01						
H=0,6219 . Pv/Patm - Pv	0,01						
densidade(kg/m3)	1,15						
Gf=(vazão ar/1+H).densid	0,59						
PLANILHA 6- AQUECIMENTO							
temperatura na entrada da torre- Tfo (K)		354,5	354,5	354,5	354,5	354,5	354,5
temperatura na saída da torre- Tf (K)		333,0	333,0	333,0	333,0	333,0	333,0
temp. da m.p.antes da entrada- Tso(K)		296,05	296,0	306,9	309	301,5	307,6
temp. da m.p. saída da torre- Ts(K)			319,1	324,8	325,6	321,9	326,0
tempo de escoamento(s)			240	180	180	180	180
Tfo-Tf/Tso-Tfo			0,37	0,45	0,47	0,41	0,46
Tfo-Ts/Tso-Tfo			0,61	0,62	0,64	0,62	0,61
peso da m.p.(kg)		1,336	1,326	1,307	1,301	1,275	1,264
Cf.Gf/Cs.Gs			6,68	5,07	5,12	5,18	5,25
Cf- varia para cada planilha	1,03		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Cs- constante	2,05		2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Gf- varia para cada planilha			0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
Gs- varia para cada corrida			0,04	0,06	0,06	0,06	0,06
umidade absoluta-H							
H=0,6219 . Pv/Patm - Pv	0,01						
densidade(kg/m3)	1,15						
Gf=(vazão ar/1+H).densid	0,59						

ANEXO 3) - Continuação.

PLANILHA 3-RESFRIAMENTO							
temperatura ambiente(°K)	Tfo	292,8	293,0	294,0	294,0	294,0	295,0
temperatura da m.p. saída da torre(°K)-Tso			319,0	324,0	328,2	330,0	327,3
temperatura da m.p. após resfriam.(°K) Ts			303,9	306,4	308,0	311,8	306,3
tempo de resfriamento(s)			900	900	900	900	900
peso da m.p. (kg)		1,885	1,841	1,742	1,721	1,676	1,640
Tfo-Ts/Tso-Tfo			0,42	0,41	0,41	0,49	0,35
Cf.Gf/Cs.Gs			3,76	3,91	4,04	4,12	4,22
H-	0,01						
Cf-	1,03		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf-	0,12		0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Cs-	2,05		2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Gs-			0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
PLANILHA 4-RESFRIAMENTO							
temperatura ambiente(°K)	Tfo	295,3	296,3	299,0	299,6	301,0	
temperatura da m.p. saída da torre(°K)-Tso			321,1	328,2	333,0	335,0	
temperatura da m.p. após resfriam.(°K) Ts			307,4	313	313,7	313,7	
tempo de resfriamento(s)			1200	1200	1200	1200	
peso da m.p. (kg)		2,599	2,551	2,494	2,437	2,166	
Tfo-Ts/Tso-Tfo			0,45	0,48	0,42	0,37	
Cf.Gf/Cs.Gs			0,02	0,02	0,02	0,02	
H-	0,01						
Cf-	1,02		1,02	1,02	1,02	1,02	
Gf-	0,12		0,12	0,12	0,12	0,12	
Cs-	2,05		2,05	2,05	2,05	2,05	
Gs-			3,99	3,99	3,99	3,99	
PLANILHA 5-RESFRIAMENTO							
temperatura ambiente(°K)	Tfo	296,8	297,4	297,6	299,0	299,8	299,4
temperatura da m.p. saída da torre(°K)-Tso			318,2	315,8	319,7	315,6	318,0
temperatura da m.p. após resfriam.(°K) Ts			306,4	308,4	303,6	307,0	308,0
tempo de resfriamento(s)			480	600	900	900	600
peso da m.p. (kg)		2,452	2,403	2,318	2,267	2,176	2,166
Tfo-Ts/Tso-Tfo			0,43	0,59	0,22	0,46	0,46
Cf.Gf/Cs.Gs			1,54	1,98	3,05	3,15	2,15
H-	0,01						
Cf-	1,03		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf-	0,12		0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Cs-	2,05		2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Gs-			0,04	0,03	0,02	0,02	0,03
PLANILHA 6-RESFRIAMENTO							
temperatura ambiente(°K)	Tfo	296,7	297,0	298,0	299,0	297,4	297,9
temperatura da m.p. saída da torre(°K)-Tso			319,1	324,8	325,6	321,9	326,0
temperatura da m.p. após resfriam.(°K) Ts			306,9	309,3	310,9	307,6	310,2
tempo de resfriamento(s)			1200	900	600	600	600
peso da m.p. (kg)		1,336	1,326	1,307	1,301	1,275	1,264
Tfo-Ts/Tso-Tfo			0,45	0,42	0,45	0,42	0,44
Cf.Gf/Cs.Gs			7,01	5,32	3,58	3,62	3,68
H-	0,01						
Cf-	1,03		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf-	0,12		0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Cs-	2,05		2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Gs-			0,01	0,01	0,02	0,02	0,02

ANEXO 3) - Continuação.

PLANILHA 7-RESFRIAMENTO							
temperatura ambiente(°K)	Tfo	297,0	297,0	299,0	300,0	299,0	298,0
temperatura da m.p. saída da torre(°K)-Tso			309,6	314,2	313,2	311,7	313,3
temperatura da m.p. após resfriam.(°K) Ts			302,0	306,2	308,4	306,9	307,9
tempo de resfriamento(s)			780	600	600	600	600
peso da m.p. (kg)		2,084	2,054	1,996	1,956	1,924	1,857
Tfo-Ts/Tso-Tfo			0,40	0,47	0,64	0,62	0,65
Cf.Gf/Cs.Gs			2,93	2,31	2,36	2,41	2,47
H-	0,01						
Cf-	1,03		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf-	0,12		0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Cs-	2,05		2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Gs-			0,02	0,03	0,03	0,03	0,03

Anexo 4) PROGRAMA DE ENTRADA DE DADOS DO SAS

No aquecimento

OBS	P	Y1	Y2	T	X1	X2
1	1	0.3333	0.5833	13.5896	1.77881	2.29000
2	1	0.4386	0.5921	12.7121	1.96923	2.24810
3	1	0.4166	0.5042	6.5666	1.41519	1.57690
4	1	0.4474	0.5212	8.3730	1.65610	1.79145
5	1	0.4464	0.4799	7.7138	1.59193	1.65483
6	1	0.4347	0.4782	7.8388	1.58119	1.66396
7	2	0.4054	0.5351	10.5349	1.74809	1.99832
8	2	0.5172	0.6379	9.7180	1.90210	2.09696
9	2	0.5454	0.6836	7.7461	1.77190	1.98052
10	2	0.4412	0.5911	7.9453	1.60413	1.86503
11	2	0.5300	0.6148	6.9791	1.66643	1.80040
12	3	0.3423	0.7010	6.0383	1.20127	1.81106
13	3	0.3584	0.6557	6.2793	1.26314	1.77879
14	3	0.3760	0.6190	5.1975	1.17275	1.58550
15	3	0.3760	0.5895	5.2985	1.18547	1.55611
16	3	0.3888	0.6553	5.4279	1.22732	1.66884
17	4	0.3651	0.7127	6.0427	1.25126	1.82710
18	4	0.3651	0.6000	6.1684	1.26535	1.68429
19	4	0.3965	0.5690	6.3110	1.34666	1.65382
20	4	0.4035	0.5438	5.7994	1.30169	1.55115
21	5	0.2584	0.4210	10.9739	1.40239	1.81375
22	5	0.3293	0.6097	6.5831	1.23015	1.74805
23	5	0.3624	0.5403	5.8101	1.21891	1.54686
24	5	0.3354	0.6273	4.9965	1.06310	1.56873
25	5	0.3750	0.6180	6.1352	1.28259	1.70700
26	6	0.3675	0.6051	6.6817	1.32598	1.75248
27	6	0.4517	0.6239	5.0665	1.29910	1.57397
28	6	0.4725	0.6352	5.1151	1.34232	1.59700
29	6	0.4057	0.6151	5.1786	1.22877	1.57720
30	6	0.4584	0.6077	5.2541	1.33614	1.57696
31	6	0.4831	0.6450	5.3105	1.38686	1.63830
32	7	0.4324	0.5243	8.5744	1.64463	1.81540
33	7	0.5926	0.5481	10.9509	2.12513	2.05211
34	7	0.6956	0.6869	6.7334	1.88736	1.87556
35	7	0.5424	0.5864	6.8584	1.67378	1.74388
36	7	0.7239	0.7104	7.0380	1.95940	1.94157

No resfriamento

OBS	PF	YR	T	XR
1	1	0.5138	1.8958	0.80127
2	1	0.3857	3.0481	0.86645
3	1	0.3574	1.8894	0.58636
4	1	0.3385	1.7521	0.52837
5	1	0.3314	2.6903	0.70794
6	1	0.3343	3.2807	0.81517
7	2	0.4972	2.2056	0.85920
8	2	0.5393	2.2606	0.93017
9	2	0.5737	2.3168	0.99007
10	2	0.5367	2.3763	0.95500
11	2	0.4904	2.4352	0.90416
12	3	0.4192	3.7593	1.04712
13	3	0.4133	3.9093	1.06094
14	3	0.4093	4.0448	1.07504
15	3	0.4944	4.1234	1.23280
16	3	0.3498	4.2241	0.98928
17	4	0.4476	3.6195	1.07206
18	4	0.4794	3.6948	1.13714
19	4	0.4221	3.7803	1.05561
20	4	0.3735	4.0496	1.00968
21	5	0.4327	1.5377	0.59820
22	5	0.5934	1.9767	0.92522
23	5	0.2222	3.0529	0.55886
24	5	0.4557	3.1505	1.00073
25	5	0.4624	2.1492	0.79702
26	6	0.4480	5.2588	1.31809
27	6	0.4216	5.3168	1.27688
28	6	0.4474	3.5785	1.06467
29	6	0.4163	3.6229	1.01948
30	6	0.4377	3.6757	1.06500
31	6	0.4007	2.9722	0.87765
32	7	0.3968	2.9339	0.86397
33	7	0.4736	2.3059	0.85018
34	7	0.6363	2.3631	1.08267
35	7	0.6220	2.4069	1.07550
36	7	0.6470	2.4699	-1.12305

Anexo 4) - PROGRAMA DE ENTRADA DE DADOS NO SAS,

```

data p1;
p=1;
input y1 y2 T @@;
cards;
          -0.3333 -0.5833 13.5896
          -0.4386 -0.5921 12.7121
          -0.4166 -0.5042 6.5666
          -0.4474 -0.5212 8.373
          -0.4464 -0.4799 7.7138
          -0.4347 -0.4782 7.8388
;
run;
data p2;
p=2;
input y1 y2 T @@;
cards;
          -0.4054 -0.5351 10.5349
          -0.5172 -0.6379 9.718
          -0.5454 -0.6836 7.7461
          -0.4412 -0.5911 7.9453
          -0.53    -0.6148 6.9791
;
run;
data p3;
p=3;
input y1 y2 T @@;
cards;
          -0.3423 -0.701 6.0383
          -0.3584 -0.6557 6.2793
          -0.376  -0.619 5.1975
          -0.376  -0.5895 5.2985
          -0.3888 -0.6553 5.4279
;
run;
data p4;
p=4;
input y1 y2 T @@;
cards;
          -0.3651 -0.7127 6.0427
          -0.3651 -0.6    6.1684
          -0.3965 -0.569 6.311
          -0.4035 -0.5438 5.7994

```

```

;
run;
data p5;
p=5;
input y1 y2 T @@;
cards;
-0.2584 -0.421 10.9739
-0.3293 -0.6097 6.5831
-0.3624 -0.5403 5.8101
-0.3354 -0.6273 4.9965
-0.375 -0.618 6.1352

```

```

;
run;
data p6;
p=6;
input y1 y2 T @@;
cards;
-0.3675 -0.6051 6.6817
-0.4517 -0.6239 5.0665
-0.4725 -0.6352 5.1151
-0.4057 -0.6151 5.1786
-0.4584 -0.6077 5.2541
-0.4831 -0.645 5.3105

```

```

;run;
data p7;
p=7;
input y1 y2 T @@;
cards;
-0.4324 -0.5243 8.5744
-0.5926 -0.5481 10.9509
-0.6956 -0.6869 6.7334
-0.5424 -0.5864 6.8584
-0.7239 -0.7104 7.038

```

```

;run;
data pf1;
pf=1;
input yr T @@;
cards;
-0.5138 1.8958
-0.3857 3.0481
-0.3574 1.8894
-0.3385 1.7521
-0.3314 2.6903
-0.3343 3.2807

```

```

;
run;

data pf2;
pf=2;
input yr T @@;

```

```
cards;
-0.4972 2.2056
-0.5393 2.2606
-0.5737 2.3168
-0.5367 2.3763
-0.4904 2.4352
```

```
;
run;
```

```
data pf3;
pf=3;
input yr T @@;
cards;
-0.4192 3.7593
-0.4133 3.9093
-0.4093 4.0448
-0.4944 4.1234
-0.3498 4.2241
```

```
;
run;
data pf4;
pf=4;
input yr T @@;
cards;
-0.4476 3.6195
-0.4794 3.6948
-0.4221 3.7803
-0.3735 4.0496
```

```
;
run;
data pf5;
pf=5;
input yr T @@;
cards;
-0.4327 1.5377
-0.5934 1.9767
-0.2222 3.0529
-0.4557 3.1505
-0.4624 2.1492
```

```
;
run;
data pf6;
pf=6;
input yr T @@;
cards;
-0.448 5.2588
-0.4216 5.3168
-0.4474 3.5785
-0.4163 3.6229
-0.4377 3.6757
-0.4007 2.9722
```

```
;
run;
```

```
data pf7;  
pf=7;  
input yr T @@;  
cards;  
-0.3968 2.9339  
-0.4736 2.3059  
-0.6363 2.3631  
-0.622 2.4069  
-0.647 2.4699
```

```
;  
run;
```

```
data p; set p1 p2 p3 p4 p5 p6 p7;  
y1=-y1; y2=-y2;
```

```
x1=(T*log(1-y1*(1-T)))/(1-T);  
x2=(T*log(1-y2*(1-T)))/(1-T);
```

```
proc print;  
data pf; set pf1 pf2 pf3 pf4 pf5 pf6 pf7;  
yr=-yr;  
xr=(T*log(1-yr*(1-T)))/(1-T);  
proc print;  
run;  
quit;
```

**ANEXO 4a) - Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor,
segundo SARTORI.**

Planilhas para calculo de h utilizando a equação de SARTORI				p/Tf-Tfo/Tso-Tfo		
assumindo x=L (como comprimento linear do secador)				aquecimento equaç.1		
X=h.S/Cf.Gf (adimensional)		h=(X.(Cf.Gf))/(S.x)				
S=6(1-ε)/φ.Dp			Dp=0,0058 m			
S=6(1-0,887)/(0,85.0,0058)			ε=0,887			
S=	137,5254					
x=(m)	5					
Cf-(kJ/kgK)	varia para cada planilha					
Gf-(kg/m^2s)	varia para cada planilha					
X- calculado pela equação de SARTORI, através do pacote SAS						
Aquecimento						
Planilha 1	1	2	3	4	5	6
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
X	1,7788	1,9692	1,4152	1,6561	1,5919	1,5812
h	0,0016	0,0017	0,0012	0,0015	0,0014	0,0014
Planilha 2	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,7481	1,9021	1,7719	1,6041	1,6664	
h	0,0015	0,0017	0,0016	0,0014	0,0015	
Planilha 3	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,2013	1,2631	1,1728	1,1855	1,2273	
h	0,0011	0,0011	0,0010	0,0011	0,0011	
Planilha 4	1	2	3	4		
Cf	1,02	1,02	1,02	1,02		
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59		
X	1,2513	1,2654	1,3467	1,3017		
h	0,0011	0,0011	0,0012	0,0011		
Planilha 5	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,4024	1,2302	1,2189	1,0631	1,2826	
h	0,0012	0,0011	0,0011	0,0009	0,0011	
Planilha 6	1	2	3	4	5	6
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
X	1,3260	1,2991	1,3423	1,2288	1,3361	1,3869
h	0,0012	0,0011	0,0012	0,0011	0,0012	0,0012
Planilha 7	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,6446	2,1251	1,8874	1,6738	1,9594	
h	0,0014	0,0019	0,0017	0,0015	0,0017	

ANEXO 4a) - Continuação.

Planilhas para calculo de h utilizando a equação de SARTORI				p/Ts-Tfo/Tso-Tfo		
assumindo x=L (como comprimento linear do secador)				aquecimento equaç. 2		
X=h.S/Cf.Gf (adimensional)		h=(X.(Cf.Gf))/(S.x)				
S=6(1-ε)/φ.Dp			Dp=0,0058 m			
S=6(1-0,887)/(0,85.0,0058)			ε=0,887			
S=	137,5254					
x=(m)	5					
Cf-(kJ/kgK)	varia para cada planilha					
Gf-(kg/m^2s)	varia para cada planilha					
X- calculado pela equação de SARTORI, através do pacote SAS						
Aquecimento						
Planilha 1	1	2	3	4	5	6
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
X	2,2900	2,2481	1,5769	1,7915	1,6548	1,6640
h	0,0020	0,0020	0,0014	0,0016	0,0015	0,0015
Planilha 2	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,9983	2,0970	1,9805	1,8650	1,8004	
h	0,0018	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	
Planilha 3	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,8111	1,7788	1,5855	1,5561	1,6688	
h	0,0016	0,0016	0,0014	0,0014	0,0015	
Planilha 4	1	2	3	4		
Cf	1,02	1,02	1,02	1,02		
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59		
X	1,8271	1,6843	1,6538	1,5512		
h	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014		
Planilha 5	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,8138	1,7481	1,5469	1,5687	1,7070	
h	0,0016	0,0015	0,0014	0,0014	0,0015	
Planilha 6	1	2	3	4	5	6
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
X	1,7525	1,5740	1,5970	1,5772	1,5770	1,6383
h	0,0015	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014
Planilha 7	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,8154	2,0521	1,8756	1,7439	1,9416	
h	0,0016	0,0018	0,0016	0,0015	0,0017	

ANEXO 4a) - Continuação.

Planilhas para calculo de h utilizando a equação de SARTORI assumindo $x=L$ (como comprimento linear do secador)				p/Ts-Tfo/Tso-Tfo resfriamento equaç. 2		
$X=h.S/Cf.Gf$ (adimensional)		$h=(X.(Cf.Gf))/(S.x)$				
$S=6(1-\varepsilon)/\phi.Dp$			$Dp=0,0058\text{ m}$			
$S=6(1-0,841)/(0,85.0,0058)$			$\varepsilon=0,841$			
$S=$	193,5091					
$x=(m)$	0,3					
$Cf-(kJ/kgK)$	varia para cada planilha					
$Gf-(kg/m^2s)$	varia para cada planilha					
X- calculado pela equação de SARTORI, através do pacote SAS						
Resfriamento						
Planilha 1	1	2	3	4	5	6
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
X	0,8013	0,8665	0,5864	0,5284	0,7079	0,8152
h	0,0018	0,0019	0,0013	0,0012	0,0015	0,0018
Planilha 2	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	
X	0,8592	0,9302	0,9901	0,9550	0,9042	
h	0,0019	0,0020	0,0022	0,0021	0,0020	
Planilha 3	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	
X	1,0471	1,0609	1,0750	1,2328	0,9893	
h	0,0023	0,0023	0,0024	0,0027	0,0022	
Planilha 4	1	2	3	4		
Cf	1,02	1,02	1,02	1,02		
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12		
X	1,0721	1,1371	1,0556	1,0097		
h	0,0023	0,0025	0,0023	0,0022		
Planilha 5	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	
X	0,5982	0,9252	0,5589	1,0007	0,7970	
h	0,0013	0,0020	0,0012	0,0022	0,0017	
Planilha 6	1	2	3	4	5	6
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
X	1,3181	1,2769	1,0647	1,0195	1,0650	0,8777
h	0,0029	0,0028	0,0023	0,0022	0,0023	0,0019
Planilha 7	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	
X	0,8640	0,8502	1,0827	1,0755	1,1231	
h	0,0019	0,0019	0,0024	0,0024	0,0025	

ANEXO.4a) -Continuação

Planilhas para calculo de h utilizando a equação de SARTORI assumindo $x=L(1+(\lambda)^2)^{1/2}$ $\lambda=0,5$, $x=L(1,8621)$, $x=0,3*1,8621$				p/Ts-Tfo/Tso-Tfo resfriamento equaç. 2		
X=h.S/Cf.Gf (adimensional)		h=(X.(Cf.Gf))/(S.x)				
S=6(1-ε)/φ.Dp			Dp=0,0058 m			
S=6(1-0,0,841)/(0,85.0,0058)			ε=0,841			
S=	193,5091					
x=(m)	0,559					
Cf-(kJ/kgK)	varia para cada planilha					
Gf-(kg/m^2s)	varia para cada planilha					
X- calculado pela equação de SARTORI, através do pacote SAS						
Resfriamento						
Planilha 1	1	2	3	4	5	6
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
X	0,8013	0,8665	0,5864	0,5284	0,7079	0,8152
h	0,0009	0,0010	0,0007	0,0006	0,0008	0,0010
Planilha 2	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	
X	0,8592	0,9302	0,9901	0,9550	0,9042	
h	0,0010	0,0011	0,0012	0,0011	0,0011	
Planilha 3	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	
X	1,0471	1,0609	1,0750	1,2328	0,9893	
h	0,0012	0,0012	0,0013	0,0014	0,0012	
Planilha 4	1	2	3	4		
Cf	1,02	1,02	1,02	1,02		
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12		
X	1,0721	1,1371	1,0556	1,0097		
h	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012		
Planilha 5	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	
X	0,5982	0,9252	0,5589	1,0007	0,7970	
h	0,0007	0,0011	0,0007	0,0012	0,0009	
Planilha 6	1	2	3	4	5	6
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
X	1,3181	1,2769	1,0647	1,0195	1,0650	0,8777
h	0,0015	0,0015	0,0013	0,0012	0,0013	0,0010
Planilha 7	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	
X	0,8640	0,8502	1,0827	1,0755	1,1231	
h	0,0010	0,0010	0,0013	0,0013	0,0013	

ANEXO 4a) - Continuação.

Planilhas para calculo de h utilizando a equação de SARTORI assumindo $x=L(1+(\lambda)^2)^{1/2}$ $\lambda=0,5$, $x=L(1,8621)$, $x=5*1,8621$				p/Ts-Tfo/Tso-Tfo aquecimento equaç. 2		
X=h.S/Cf.Gf (adimensional) $h=(X.(Cf.Gf))/(S.x)$						
S=6(1-ε)/φ.Dp			Dp=0,0058 m			
S=6(1-0,887)/(0,85.0,0058)			ε=0,887			
S=	137,5254					
x=(m)	9,3105					
Cf-(kJ/kgK)	varia para cada planilha					
Gf-(kg/m^2s)	varia para cada planilha					
X- calculado pela equação de SARTORI, através do pacote SAS						
Aquecimento						
Planilha 1	1	2	3	4	5	6
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
X	2,2900	2,2481	1,5769	1,7915	1,6548	1,6640
h	0,0011	0,0011	0,0007	0,0008	0,0008	0,0008
Planilha 2	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,9983	2,0970	1,9805	1,8650	1,8004	
h	0,0009	0,0010	0,0009	0,0009	0,0009	
Planilha 3	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,8111	1,7788	1,5855	1,5561	1,6688	
h	0,0009	0,0009	0,0008	0,0007	0,0008	
Planilha 4	1	2	3	4		
Cf	1,02	1,02	1,02	1,02		
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59		
X	1,8271	1,6843	1,6538	1,5512		
h	0,0009	0,0008	0,0008	0,0007		
Planilha 5	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,8138	1,7481	1,5469	1,5687	1,7070	
h	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007	0,0008	
Planilha 6	1	2	3	4	5	6
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
X	1,7525	1,5740	1,5970	1,5772	1,5770	1,6383
h	0,0008	0,0007	0,0008	0,0007	0,0007	0,0008
Planilha 7	1	2	3	4	5	
Cf	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Gf	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
X	1,8154	2,0521	1,8756	1,7439	1,9416	
h	0.0009	0.0010	0.0009	0.0008	0.0009	

ANEXO 4a) - Continuação.

Planilhas para cálculo de h utilizando a equação de SARTORI assumindo $x=L(1+(\lambda)^2)^{1/2}$ $\lambda=0,5$, $x=L(1,8621)$, $x=5*1,8621$				p/Tf-Tfo/Tso-Tfo aquecimento equaç.1		
X=h.S/Cf.Gf (adimensional)		h=(X.(Cf.Gf))/(S.x)				
S=6(1-ε)/φ.Dp		Dp=0,0058 m				
S=6(1-0,887)/(0,85.0,0058)		ε=0,887				
S=	137,5254					
x=(cm)	9,3105					
Cf-(kJ/kgK)	varia para cada planilha					
Gf-(kg/m^2s)	varia para cada planilha					
X- calculado pela equação de SARTORI, através do pacote SAS						
Aquecimento						
Planilha 1	1	2	3	4	5	6
Cf	1,0285	1,0285	1,0285	1,0285	1,0285	1,0285
Gf	0,58997	0,58997	0,58997	0,58997	0,58997	0,58997
X	1,77881	1,96923	1,41519	1,6561	1,59193	1,58119
h	0,00084	0,00093	0,00067	0,00078	0,00075	0,00075
Planilha 2	1	2	3	4	5	
Cf	1,0276	1,0276	1,0276	1,0276	1,0276	
Gf	0,58997	0,58997	0,58997	0,58997	0,58997	
X	1,74809	1,9021	1,7719	1,60413	1,66643	
h	0,00083	0,00090	0,00084	0,00076	0,00079	
Planilha 3	1	2	3	4	5	
Cf	1,0291	1,0291	1,0291	1,0291	1,0291	
Gf	0,5947	0,5947	0,5947	0,5947	0,5947	
X	1,20127	1,26314	1,17275	1,18547	1,22732	
h	0,00057	0,00060	0,00056	0,00057	0,00059	
Planilha 4	1	2	3	4		
Cf	1,0249	1,0249	1,0249	1,0249		
Gf	0,58997	0,58997	0,58997	0,58997		
X	1,25126	1,26535	1,34666	1,30169		
h	0,00059	0,00060	0,00064	0,00061		
Planilha 5	1	2	3	4	5	
Cf	1,0277	1,0277	1,0277	1,0277	1,0277	
Gf	0,58758	0,58758	0,58758	0,58758	0,58758	
X	1,40239	1,23015	1,21891	1,0631	1,28259	
h	0,00066	0,00058	0,00057	0,00050	0,00060	
Planilha 6	1	2	3	4	5	6
Cf	1,0279	1,0279	1,0279	1,0279	1,0279	1,0279
Gf	0,58837	0,58837	0,58837	0,58837	0,58837	0,58837
X	1,32598	1,2991	1,34232	1,22877	1,33614	1,38686
h	0,00063	0,00061	0,00063	0,00058	0,00063	0,00066
Planilha 7	1	2	3	4	5	
Cf	1,0294	1,0294	1,0294	1,0294	1,0294	
Gf	0,58599	0,58599	0,58599	0,58599	0,58599	
X	1,64463	2,12513	1,88736	1,67378	1,9594	
h	0,00077	0,00100	0,00089	0,00079	0,00092	

ANEXO 5) - Base de cálculo para obtenção das adimensionais de umidade, segundo ROSSI e ROA (1980).

PLANILHA 1							
Condições pré-fixadas							
temperatura na entrada da torre	353,0 (K)		velocidade do ar na saída da torre	0,54 (m/s)			
temperatura na saída da torre	333,0 (K)		velocidade do ar de resfriamento	0,27 (m/s)			
velocidade do ar na entrada	8,3 (m/s)		temperatura do ar de resfriamento	308,0 (K)			
p/área de entrada do secador =0,00785			velocidade da saída do ar de resfria. p/área=0,0139,	v=0,27(m/s)			
Variáveis							
Número de passagens							
temperatura da m.p.antes da entrada(K)	293,0	293,0	307,4	305,0	308,3	308,2	307,0
tempo de escoamento(s)		1080	960	480	600	540	540
temperatura da m.p. saída da torre(K)		318,0	326,0	328,8	329,7	331,5	331,0
tempo de resfriamento(s)		720	3600	660	600	900	1080
temperatura da m.p. após resfriam.(K)		307,4	308,0	308,3	308,2	308,5	308,3
temperatura ambiente(K)	295,8	296,2	296,7	296,9	297,2	297,1	296,9
peso da m.p.(kg)	3,012	2,897	2,718	2,717	2,611	2,594	2,528
umidade relativa(%)	70	71	70	72	72	72	72
umidade da m.p.(% BS)	0,2048	0,1723	0,1455	0,1429	0,1325	0,1161	0,1148
Tamb(M)=	296,7	23,5					
UR(M)=	71,29		R1=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	1,000		R2=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,8193
RH=	0,055		Yo=	0,2048		Yo=	0,2048
Tent(ar)=	353,0	79,9	Y=	0,2048		Y=	0,1723
p1=	0,4694		Yeq=	0,0250		Yeq=	0,0250
p2=	-0,2952						
p3=	0,1705		R3=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,6703		R4=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,6558
q0=	0,0022		Yo=	0,2048		Yo=	0,2048
q1=	-0,0069		Y=	0,1455		Y=	0,1429
q2=	-0,2242		Yeq=	0,0250		Yeq=	0,0250
q3=	0,4654						
q4=	-0,2479		R5=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,5980		R6=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,5068
q5=	32,08		Yo=	0,2048		Yo=	0,2048
Yeq=	0,0250		Y=	0,1325		Y=	0,1161
			Yeq=	0,0250		Yeq=	0,0250
				R7=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,4995		
referencia da carta psicrométrica			Yo=	0,2048			
manual técnico do ITAL nº 12			Y=	0,1148			
			Yeq=	0,0250			
PLANILHA 2							
Condições pré-fixadas							
temperatura na entrada da torre	333,0 (K)		velocidade do ar na saída da torre	2,9 (m/s)			
temperatura na saída da torre	318,0 (K)		velocidade do ar de resfriamento	3 (m/s)			
velocidade do ar na entrada	8,3 (m/s)		temperatura do ar de resfriamento	307,0 (K)			
p/área de entrada do secador =0,00785			velocidade da saída do ar de resfria. p/área=0,0139,	v=0,41(m/s)			
Variáveis							
Número de passagens							
temperatura da m.p.antes da entrada(K)	296,0	296,0	304,0	305,5	299	304,7	
tempo de escoamento(s)		600	540	420	420	360	
temperatura da m.p. saída da torre(K)		313,2	314,5	314,2	312,9	315,6	
tempo de resfriamento(s)		600	600	600	600	600	
temperatura da m.p. após resfriam.(K)		304,3	305,7	306,1	304,7	305,0	
temperatura ambiente(K)	295,3	295,5	295,4	295,2	295,2	294,8	
peso da m.p.(kg)	2,142	2,089	2,039	1,989	1,938	1,894	
umidade relativa(%)	70	70	70	80	73	75	
umidade da m.p.(% BS)	0,2048	0,1737	0,1669	0,1601	0,1494	0,1442	
Tamb(M)=	295,2	22,1					
UR(M)=	73,00		R1=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	1,0000		R2=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,8069
RH=	0,10		Yo=	0,2048		Yo=	0,2048
Tent(ar)=	333,0	59,9	Y=	0,2048		Y=	0,1737
p1=	0,4694		Yeq=	0,0438		Yeq=	0,0438
p2=	-0,2952						
p3=	0,1705		R3=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,7647		R4=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,7224
q0=	0,0022		Yo=	0,2048		Yo=	0,2048
q1=	-0,0069		Y=	0,1669		Y=	0,1601
q2=	-0,2242		Yeq=	0,0438		Yeq=	0,0438
q3=	0,4654						
q4=	-0,2479		R5=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,6560		R6=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,6237
q5=	32,08		Yo=	0,2048		Yo=	0,2048
Yeq=	0,0438		Y=	0,1494		Y=	0,1442
			Yeq=	0,0438		Yeq=	0,0438

ANEXO 5) - Continuação.

PLANILHA 3							
Condições pré-fixadas							
temperatura na entrada da torre		365,9	(K)	velocidade do ar na saída da torre		0,54	(m/s)
temperatura na saída da torre		343,0	(K)	velocidade do ar de resfriamento		0,27	(m/s)
velocidade do ar na entrada		8,3	(m/s)	temperatura do ar de resfriamento		307,0	(K)
p/área de entrada do secador =0,00785		velocidade da saída do ar de resfria. p/área=0,0139, v=0,27(m/s)					
Variáveis		Número de passagens					
temperatura da m.p.antes da entrada(K)		296,0	299,0	302,0	305,0	305,0	307,0
tempo de escoamento(s)			300	300	240	240	240
temperatura da m.p. saída da torre(K)			319,0	324,0	328,2	330,0	327,3
tempo de resfriamento(s)			900	900	900	900	900
temperatura da m.p. após resfriam.(K)			303,9	306,4	308,0	311,8	306,3
temperatura ambiente(K)		292,8	293	294,0	294,0	294,0	295,0
peso da m.p.(kg)		1885,8	1841,7	1742,5	1720,4	1676,3	1639,7
umidade relativa(%)		75	75	72	70	70	70
umidade da m.p.(% BS)		0,1848	0,1325	0,1312	0,1136	0,1111	0,1086
Tamb(M)= 293,8 20,7							
UR(M)= 72,00		$R1=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)$		1,0000	$R2=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)$		0,6728
RH= 0,055		Yo=		0,1848	Yo=		0,1848
Tent(ar)= 365,9 92,8		Y=		0,1848	Y=		0,1325
p1= 0,4694		Yeq=		0,0250	Yeq=		0,0250
p2= -0,2952							
p3= 0,1705		$R3=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)$		0,6647	$R4=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)$		0,5545
q0= 0,0022		Yo=		0,1848	Yo=		0,1848
q1= -0,0069		Y=		0,1312	Y=		0,1136
q2= -0,2242		Yeq=		0,0250	Yeq=		0,0250
q3= 0,4654							
q4= -0,2479		$R5=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)$		0,5389	$R6=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)$		0,5233
q5= 32,08		Yo=		0,1848	Yo=		0,1848
Yeq= 0,0250		Y=		0,1111	Y=		0,1086
		Yeq=		0,0250	Yeq=		0,0250
PLANILHA 4							
Condições pré-fixadas							
temperatura na entrada da torre		366,0	(K)	velocidade do ar na saída da torre		2,9	(m/s)
temperatura na saída da torre		343,0	(K)	velocidade do ar de resfriamento		2	(m/s)
velocidade do ar na entrada		8,3	(m/s)	temperatura do ar de resfriamento		308,5	(K)
p/área de entrada do secador =0,00785		velocidade da saída do ar de resfria. p/área=0,0139, v=0,27(m/s)					
Variáveis		Número de passagens					
temperatura da m.p.antes da entrada(K)		298,0	303,0	303,0	308,0	309,0	
tempo de escoamento(s)			420	420	420	360	
temperatura da m.p. saída da torre(K)			321,1	328,2	333,0	335,0	
tempo de resfriamento(s)			1200	1200	1200	1200	
temperatura da m.p. após resfriam.(K)			307,4	313,0	313,7	313,7	
temperatura ambiente(K)		295,3	296,3	299,0	299,6	301	
peso da m.p.(kg)		2,599	2,551	2,494	2,437	2,166	
umidade relativa(%)		66	66	52	50	50	
umidade da m.p.(% BS)		0,2048	0,1710	0,1587	0,1481	0,1377	
Tamb(M)= 298,2 25,1							
UR(M)= 56,80		$R1=(Y-Yeq) /(Yo-Yeq)$		1,0000	$R2=(Y-Yeq) /(Yo-Yeq)$		0,8251
RH= 0,025		Yo=		0,2048	Yo=		0,2048
Tent(ar)= 366,0 92,9		Y=		0,2048	Y=		0,1710
p1= 0,4694		Yeq=		0,0116	Yeq=		0,0116
p2= -0,2952							
p3= 0,1705		$R3=(Y-Yeq) /(Yo-Yeq)$		0,7614	$R4=(Y-Yeq) /(Yo-Yeq)$		0,7066
q0= 0,0022		Yo=		0,2048	Yo=		0,2048
q1= -0,0069		Y=		0,1587	Y=		0,1481
q2= -0,2242		Yeq=		0,0116	Yeq=		0,0116
q3= 0,4654							
q4= -0,2479		$R5=(Y-Yeq) /(Yo-Yeq)$		0,6527			
q5= 32,08		Yo=		0,2048			
Yeq= 0,0116		Y=		0,1377			
		Yeq=		0,0116			

ANEXO 5) - Continuação

PLANILHA 5							
Condições pré-fixadas							
temperatura na entrada da torre	335,8	(K)	velocidade do ar na saída da torre	0,54	(m/s)		
temperatura na saída da torre	325,0	(K)	velocidade do ar de resfriamento	0,27	(m/s)		
velocidade do ar na entrada	8,3	(m/s)	temperatura do ar de resfriamento	309,0	(K)		
p/área de entrada do secador =0,00785			velocidade da saída do ar de resfria. p/área=0,0139,	v=0,41(m/s)			
Variáveis							
Número de passagens							
temperatura da m.p.antes da entrada(K)	294,0	294,0	303,0	306,0	303,6	307,0	
tempo de escoamento(s)		720	420	360	300	360	
temperatura da m.p. saída da torre(K)		318,2	315,8	319,7	315,6	318,0	
tempo de resfriamento(s)		480	600	900	900	600	
temperatura da m.p. após resfriam.(K)		306,4	308,4	303,6	307,0	308,0	
temperatura ambiente(K)	296,8	297,4	297,6	299,0	299,8	299,4	
peso da m.p.(kg)	2,452	2,403	2,318	2,267	2,176	2,166	
umidade relativa(%)	72	65	64	62	62	62	
umidade da m.p.(% BS)	0,2048	0,1628	0,1614	0,1494	0,1377	0,1364	
Tamb(M)=	298,3	25,2					
UR(M)=	64,50	R1=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	1,0000		R2=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,7405	
RH=	0,098	Yo=	0,2048		Yo=	0,2048	
Tent(ar)=	335,8 62,7	Y=	0,2048		Y=	0,1628	
p1=	0,4694	Yeq=	0,0430		Yeq=	0,0430	
p2=	-0,2952						
p3=	0,1705	R3=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,7318		R4=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,6577	
q0=	0,0022	Yo=	0,2048		Yo=	0,2048	
q1=	-0,0069	Y=	0,1614		Y=	0,1494	
q2=	-0,2242	Yeq=	0,04295844		Yeq=	0,0430	
q3=	0,4654						
q4=	-0,2479	R5=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,5854		R6=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,5774	
q5=	32,08	Xo=	0,2048		Yo=	0,2048	
Yeq=	0,0430	Y=	0,1377		Y=	0,1364	
		Yeq=	0,0430		Yeq=	0,0430	
PLANILHA 6							
Condições pré-fixadas							
temperatura na entrada da torre	354,5	(K)	velocidade do ar na saída da torre	2,9	(m/s)		
temperatura na saída da torre	333,0	(K)	velocidade do ar de resfriamento	2	(m/s)		
velocidade do ar na entrada	8,3	(m/s)	temperatura do ar de resfriamento	308,0	(K)		
p/área de entrada do secador =0,00785			velocidade da saída do ar de resfria. p/área=0,0139,	v=0,27(m/s)			
Variáveis							
Número de passagens							
temperatura da m.p.antes da entrada(K)	296,0	296,0	306,9	309,0	301,5	307,6	310,0
temperatura da m.p. saída da torre(K)		319,1	324,8	325,6	321,9	326,0	325,8
tempo de resfriamento(s)		1200	900	600	600	600	480
temperatura da m.p. após resfriam.(K)		306,9	309,3	310,9	307,6	310,2	309,2
temperatura ambiente(K)	296,7	297,0	298,0	299,0	297,4	297,9	298,1
peso da m.p.(kg)	1,336	1,326	1,307	1,301	1,275	1,264	1,248
umidade relativa(%)	70	65	60	58	70	72	72
umidade da m.p.(% BS)	0,2048	0,1792	0,1751	0,1669	0,1534	0,1455	0,1377
Tamb(M)=	297,7	24,6					
UR(M)=	66,71	R1=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	1,0000		R2=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,8610	
RH=	0,045	Yo=	0,2048		Yo=	0,2048	
Tent(ar)=	354,5 81,4	Y=	0,2048		Y=	0,1792	
p1=	0,4694	Yeq=	0,0206		Yeq=	0,0206	
p2=	-0,2952						
p3=	0,1705	R3=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,8388		R4=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,7943	
q0=	0,0022	Yo=	0,2048		Yo=	0,2048	
q1=	-0,0069	Y=	0,1751		Y=	0,1669	
q2=	-0,2242	Yeq=	0,0206		Yeq=	0,0206	
q3=	0,4654						
q4=	-0,2479	R5=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,7210		R6=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,6781	
q5=	32,08	Yo=	0,2048		Yo=	0,2048	
Yeq=	0,0206	Y=	0,1534		Y=	0,1455	
		Yeq=	0,0206		Yeq=	0,0206	
			R7=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)		0,6358		
			Yo=		0,2048		
			Y=		0,1377		
			Yeq=		0,0206		

ANEXO 5) - Continuação.

PLANILHA 7						
Condições pré-fixadas						
temperatura na entrada da torre	329,0 (K)		velocidade do ar na saída da torre	0,54 (m/s)		
temperatura na saída da torre	313,0 (K)		velocidade do ar de resfriamento	0,27 (m/s)		
velocidade do ar na entrada	8,3 (m/s)		temperatura do ar de resfriamento	308,0 (°K)		
p/área de entrada do secador =0,00785			velocidade da saída do ar de resfria. p/área=0,0139,	v=0,41(m/s)		
Variáveis						
Número de passagens						
temperatura da m.p.antes da entrada(K)	292,0	292,0	302,0	306,0	299,5	306,9
tempo de escoamento(s)		480	600	360	360	360
temperatura da m.p. saída da torre(K)		309,6	314,2	313,2	311,7	313,3
tempo de resfriamento(s)		780	600	600	600	600
temperatura da m.p. após resfriam.(K)		302,0	306,2	308,4	306,9	307,9
temperatura ambiente(K)	297,0	297,0	299,0	300,0	299,0	298,0
peso da m.p.(kg)	2,084	2,054	1,996	1,956	1,924	1,857
umidade relativa(%)	73	70	67	64	71	71
umidade da m.p.(% BS)	0,1947	0,1628	0,1561	0,1534	0,1416	0,1364
Tamb(M)=	298,3	25,2				
UR(M)=	69,33		R1=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	1,0000	R2=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,7718
RH=	0,13		Yo=	0,1947	Yo=	0,1947
Tent(ar)=	329,0	55,9	Y=	0,1947	Y=	0,1628
p1=	0,4694		Yeq=	0,0549	Yeq=	0,0549
p2=	-0,2952					
p3=	0,1705		R3=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,7239	R4=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,7046
q0=	0,0022		Yo=	0,1947	Yo=	0,1947
q1=	-0,0069		Y=	0,1561	Y=	0,1534
q2=	-0,2242		Yeq=	0,0549	Yeq=	0,0549
q3=	0,4654					
q4=	-0,2479		R5=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,6202	R6=(Y-Yeq)/(Yo-Yeq)	0,5830
q5=	32,08		Yo=	0,1947	Yo=	0,1947
Yeq=	0,0549		Y=	0,1416	Y=	0,1364
			Yeq=	0,0549	Yeq=	0,0549

ANEXO 6) - TABELA DOS VALORES DETERMINADOS PELO PACOTE ESTATÍSTICO SAS

Parâmetro k e difusividade efetiva calculados com 3, 5, 10, 14 e 20 termos da série.

	3 termos						
Δk	4,63E-07	8,48E-07	1,23E-06	8,04E-07	9,59E-07	7,03E-07	9,22E-07
k	2,19E-06	2,47E-06	5,46E-03	1,62E-06	3,70E-06	1,58E-06	3,22E-06
$\Delta k/k$	0,2115	0,3437	0,0002	0,4973	0,2591	0,4456	0,2863
r	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03
D^*r^2	1,8801E-11	2,1179E-11	4,6848E-08	1,3882E-11	3,1773E-11	1,3538E-11	2,7643E-11
	5 termos						
Δk	3,11E-07	4,88E-07	8,91E-07	4,45E-07	6,14E-07	4,18E-07	5,64E-07
k	2,23E-06	2,71E-06	5,62E-06	1,86E-06	3,89E-06	1,84E-06	3,42E-06
$\Delta k/k$	0,1396	0,1798	0,1586	0,2392	0,1578	0,2272	0,1649
r	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03
D^*r^2	1,9119E-11	2,3299E-11	4,8247E-11	1,5968E-11	3,3395E-11	1,5796E-11	2,936E-11
	10 termos						
Δk	2,24E-07	2,73E-07	6,58E-07	2,29E-07	3,85E-07	2,94E-07	3,41E-07
k	2,32E-06	2,75E-06	5,65E-06	1,89E-06	3,93E-06	1,86E-06	3,45E-06
$\Delta k/k$	0,0966	0,0993	0,1165	0,1212	0,0980	0,1581	0,0988
r	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03
D^*r^2	1,9917E-11	2,3608E-11	4,8505E-11	1,6225E-11	3,3739E-11	1,5968E-11	2,9618E-11
	14 termos						
Δk	2,06E-07	2,17E-07	6,05E-07	1,69E-07	3,26E-07	2,74E-07	2,83E-07
k	2,23E-06	2,75E-06	5,65E-06	1,89E-06	3,93E-06	1,86E-06	3,46E-06
$\Delta k/k$	0,0924	0,0789	0,1071	0,0894	0,0830	0,1473	0,0818
r	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03
D^*r^2	1,9144E-11	2,3608E-11	4,8505E-11	1,6225E-11	3,3739E-11	1,5968E-11	2,9704E-11
	20 termos						
Δk	1,95E-07	1,78E-07	5,74E-07	1,26E-07	2,89E-07	2,62E-07	2,45E-07
k	2,23E-06	2,75E-06	5,65E-06	1,89E-06	3,93E-06	1,86E-06	3,45E-06
$\Delta k/k$	0,0874	0,0647	0,1016	0,0667	0,0735	0,1409	0,0710
r	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03
D^*r^2	1,9144E-11	2,3608E-11	4,8505E-11	1,6225E-11	3,3739E-11	1,5968E-11	2,9618E-11

**ANEXO 6a) - Cálculo da difusividade efetiva, utilizando o
procedimento de regressão não linear do pacote estatístico sas.**

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.347569
1	0.0000015241	0.056426
2	0.0000021439	0.039769
3	0.0000021908	0.039701
4	0.0000021901	0.039701
5	0.0000021901	0.039701

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.3664047291	3.3664047291
Residual	6	0.0397012709	0.0066168785
Uncorrected Total	7	3.4061060000	
(Corrected Total)	6	0.1910294286	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
-----------	----------	--------------------------	---

K 2.1901038E-6 4.63231561E-7 1.05661614E-6 3.32359137E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase

Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.118479
1	0.0000020202	0.034767
2	0.0000024607	0.032781
3	0.0000024675	0.032781
4	0.0000024674	0.032781

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.5356702234	3.5356702234
Residual	5	0.0327807766	0.0065561553
Uncorrected Total	6	3.5684510000	
(Corrected Total)	5	0.0922028333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	2.4673728E-6	8.4819192E-7	2.87057636E-7 4.64768792E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.329748
1	0.0000034299	0.057895
2	0.0000051892	0.034838
3	0.0000054493	0.034507
4	0.0000054572	0.034507
5	0.0000054573	0.034507

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	2.7324924680	2.7324924680
Residual	5	0.0345065320	0.0069013064
Uncorrected Total	6	2.7669990000	
(Corrected Total)	5	0.1599948333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	5.4572984E-6	1.23265125E-6	2.28871339E-6 8.62588335E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase

Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.079427
1	0.0000013777	0.033131
2	0.0000016165	0.032363
3	0.0000016174	0.032363
4	0.0000016174	0.032363

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.1506913833	3.1506913833
Residual	4	0.0323626167	0.0080906542
Uncorrected Total	5	3.1830540000	
(Corrected Total)	4	0.0720268000	
Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	1.6174087E-6	8.04273064E-7	-6.1558109E-7 3.8503985E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.199635
1	0.0000026845	0.038966
2	0.0000036340	0.030968
3	0.0000037010	0.030938
4	0.0000037011	0.030938

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.1487153854	3.1487153854
Residual	5	0.0309376146	0.0061875229
Uncorrected Total	6	3.1796530000	
(Corrected Total)	5	0.1223048333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval	
			Lower	Upper

K	3.7010807E-6	9.58818456E-7	1.23639515E-6	6.16576632E-6
---	--------------	---------------	---------------	---------------

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.103696
1	0.0000014097	0.048334
2	0.0000015820	0.047845
3	0.0000015778	0.047845
4	0.0000015780	0.047845

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	4.3966098096	4.3966098096
Residual	6	0.0478451904	0.0079741984
Uncorrected Total	7	4.4444550000	
(Corrected Total)	6	0.0931177143	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
-----------	----------	--------------------------	---

K	1.5779524E-6	7.02706356E-7	-1.4150936E-7 3.29741415E-6
---	--------------	---------------	-----------------------------

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.164367
1	0.0000024830	0.036510
2	0.0000031958	0.031884
3	0.0000032251	0.031878
4	0.0000032248	0.031878
5	0.0000032248	0.031878

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.2945291041	3.2945291041
Residual	5	0.0318778959	0.0063755792
Uncorrected Total	6	3.3264070000	
(Corrected Total)	5	0.1099988333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
-----------	----------	--------------------------	---

K	3.2247605E-6	9.21975665E-7	8.54781002E-7 5.59474009E-6
---	--------------	---------------	-----------------------------

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

**ANEXO 6a) - Cálculo da difusividade efetiva, utilizando o procedimento
de regressão não linear do pacote estatístico SAS.**

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	0.0000000100	0.497282
1	0.0000011566	0.075235
2	0.0000020374	0.020568
3	0.0000022242	0.019282
4	0.0000022280	0.019281
5	0.0000022279	0.019281

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.3868245536	3.3868245536
Residual	6	0.0192814464	0.0032135744
Uncorrected Total	7	3.4061060000	
(Corrected Total)	6	0.1910294286	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	2.2279444E-6	3.11298917E-7	1.46622283E-6 2.98966595E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase

Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	0.0000000100	0.189379
1	0.0000017440	0.026177
2	0.0000026162	0.013274
3	0.0000027139	0.013165
4	0.0000027143	0.013165
5	0.0000027143	0.013165

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
--------	----	----------------	-------------

Regression	1	3.5552858158	3.5552858158
------------	---	--------------	--------------

Residual	5	0.0131651842	0.0026330368
----------	---	--------------	--------------

Uncorrected Total	6	3.5684510000	
-------------------	---	--------------	--

(Corrected Total)	5	0.0922028333	
-------------------	---	--------------	--

Parameter	Estimate	Asymptotic	Asymptotic 95 %
-----------	----------	------------	-----------------

	Std. Error	Confidence Interval	
--	------------	---------------------	--

	Lower	Upper
--	-------	-------

K	2.7143082E-6	4.87977951E-7	1.45993916E-6	3.96867731E-6
---	--------------	---------------	---------------	---------------

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
------	---

K	1
---	---

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase

Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	0.0000000100	0.475607
1	0.0000025566	0.088190
2	0.0000048981	0.021595
3	0.0000055849	0.018876
4	0.0000056267	0.018867
5	0.0000056274	0.018867
6	0.0000056274	0.018867

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source DF Sum of Squares Mean Square

Regression 1 2.7481315410 2.7481315410

Residual 5 0.0188674590 0.0037734918

Uncorrected Total 6 2.7669990000

(Corrected Total) 5 0.1599948333

Parameter Estimate Asymptotic Asymptotic 95 %

Std. Error Confidence Interval

Lower Upper

K 5.6273674E-6 8.91130729E-7 3.33667618E-6 7.91805871E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr K

K 1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	0.0000000100	0.121245
1	0.0000012638	0.019281
2	0.0000018103	0.012588
3	0.0000018583	0.012551
4	0.0000018583	0.012551

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable
 Source DF Sum of Squares Mean Square

Regression	1	3.1705029086	3.1705029086
Residual	4	0.0125510914	0.0031377729
Uncorrected Total	5	3.1830540000	
(Corrected Total)	4	0.0720268000	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
-----------	----------	--------------------------	--

K	1.8582926E-6	4.45375522E-7	6.21748681E-7 3.09483659E-6
---	--------------	---------------	--------------------------------

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	0.0000000100	0.305293
1	0.0000021168	0.046632
2	0.0000035961	0.014780
3	0.0000038872	0.014080
4	0.0000038959	0.014080
5	0.0000038960	0.014080

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.1655731432	3.1655731432
Residual	5	0.0140798568	0.0028159714
Uncorrected Total	6	3.1796530000	
(Corrected Total)	5	0.1223048333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	3.8960031E-6	6.14454909E-7	2.31651938E-6 5.47548685E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	0.0000000100	0.162832
1	0.0000013529	0.028893
2	0.0000018258	0.022728
3	0.0000018453	0.022720
4	0.0000018448	0.022720
5	0.0000018448	0.022720

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
--------	----	----------------	-------------

Regression	1	4.4217351830	4.4217351830
------------	---	--------------	--------------

Residual	6	0.0227198170	0.0037866362
----------	---	--------------	--------------

Uncorrected Total	7	4.4444550000	
-------------------	---	--------------	--

(Corrected Total)	6	0.0931177143	
-------------------	---	--------------	--

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
-----------	----------	--------------------------	---

K	1.8448169E-6	4.18552202E-7	8.20655814E-7 2.86897798E-6
---	--------------	---------------	-----------------------------

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
------	---

K	1
---	---

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	0.0000000100	0.256606
1	0.0000020216	0.036235
2	0.0000032363	0.014102
3	0.0000034237	0.013778
4	0.0000034267	0.013778
5	0.0000034267	0.013778

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable
 Source DF Sum of Squares Mean Square

Regression	1	3.3126293614	3.3126293614
Residual	5	0.0137776386	0.0027555277
Uncorrected Total	6	3.3264070000	
(Corrected Total)	5	0.1099988333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	3.426741E-6	5.64964965E-7	1.97447342E-6 4.87900867E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

ANEXO 6a) - Cálculo da difusividade efetiva, utilizando o procedimento de regressão não linear do pacote estatístico SAS.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase

Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.678478
1	0.0000006717	0.167889
2	0.0000017149	0.020834
3	0.0000021914	0.010202
4	0.0000022324	0.010144
5	0.0000022324	0.010144

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics

Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
--------	----	----------------	-------------

Regression	1	3.3959616918	3.3959616918
------------	---	--------------	--------------

Residual	6	0.0101443082	0.0016907180
----------	---	--------------	--------------

Uncorrected Total	7	3.4061060000	
-------------------	---	--------------	--

(Corrected Total)	6	0.1910294286	
-------------------	---	--------------	--

Parameter	Estimate	Asymptotic	Asymptotic 95 %
-----------	----------	------------	-----------------

	Std. Error	Confidence Interval	
--	------------	---------------------	--

	Lower	Upper	
--	-------	-------	--

K	2.2324112E-6	2.24327684E-7	1.68350071E-6 2.78132165E-6
---	--------------	---------------	-----------------------------

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase

Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.288198
1	0.0000010898	0.056146
2	0.0000023351	0.006519
3	0.0000027308	0.004318
4	0.0000027506	0.004313
5	0.0000027507	0.004313

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.5641377715	3.5641377715
Residual	5	0.0043132285	0.0008626457
Uncorrected Total	6	3.5684510000	
(Corrected Total)	5	0.0922028333	
Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	2.7506599E-6	2.72922316E-7	2.04910093E-6 3.45221889E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.639642
1	0.0000014781	0.181610
2	0.0000040752	0.024906
3	0.0000054754	0.010496
4	0.0000056491	0.010344
5	0.0000056523	0.010344
6	0.0000056523	0.010344

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
--------	----	----------------	-------------

Regression	1	2.7566548166	2.7566548166
------------	---	--------------	--------------

Residual	5	0.0103441834	0.0020688367
----------	---	--------------	--------------

Uncorrected Total	6	2.7669990000	
-------------------	---	--------------	--

(Corrected Total)	5	0.1599948333	
-------------------	---	--------------	--

Parameter	Estimate	Asymptotic	Asymptotic 95 %
-----------	----------	------------	-----------------

	Std. Error	Confidence Interval	
--	------------	---------------------	--

	Lower	Upper
--	-------	-------

K	5.6523382E-6	6.58137124E-7	3.96056743E-6	7.34410906E-6
---	--------------	---------------	---------------	---------------

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.189141
1	0.0000008106	0.034412
2	0.0000016498	0.004642
3	0.0000018852	0.003541
4	0.0000018948	0.003540
5	0.0000018948	0.003540

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.1795143339	3.1795143339
Residual	4	0.0035396661	0.0008849165
Uncorrected Total	5	3.1830540000	
(Corrected Total)	4	0.0720268000	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	1.8948049E-6	2.28668739E-7	1.25992724E-6 2.52968246E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.434398
1	0.0000012635	0.103997
2	0.0000030903	0.011831
3	0.0000038657	0.005669
4	0.0000039297	0.005637
5	0.0000039302	0.005637
6	0.0000039302	0.005637

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.1740160836	3.1740160836
Residual	5	0.0056369164	0.0011273833
Uncorrected Total	6	3.1796530000	
(Corrected Total)	5	0.1223048333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	3.9301757E-6	3.85416379E-7	2.93944573E-6 4.92090569E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.257939
1	0.0000008854	0.046360
2	0.0000016800	0.013246
3	0.0000018616	0.012366
4	0.0000018659	0.012365
5	0.0000018659	0.012365

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	4.4320897538	4.4320897538
Residual	6	0.0123652462	0.0020608744
Uncorrected Total	7	4.4444550000	
(Corrected Total)	6	0.0931177143	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval
			Lower Upper
K	1.8659032E-6	2.94118839E-7	1.14621978E-6 2.58558657E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.373944
1	0.0000012276	0.081158
2	0.0000028223	0.009159
3	0.0000034172	0.005147
4	0.0000034561	0.005134
5	0.0000034562	0.005134
6	0.0000034562	0.005134

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
--------	----	----------------	-------------

Regression	1	3.3212731808	3.3212731808
Residual	5	0.0051338192	0.0010267638
Uncorrected Total	6	3.3264070000	
(Corrected Total)	5	0.1099988333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
-----------	----------	--------------------------	--

K	3.4562116E-6	3.40499055E-7	2.58094365E-6 4.33147965E-6
---	--------------	---------------	--------------------------------

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

ANEXO 6a)- Cálculo da difusividade efetiva, utilizando o procedimento de regressão não linear do pacote estatístico SAS.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.738366
1	0.0000005026	0.227582
2	0.0000015401	0.028952
3	0.0000021546	0.008760
4	0.0000022319	0.008551
5	0.0000022324	0.008551
6	0.0000022324	0.008551

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.3975549252	3.3975549252
Residual	6	0.0085510748	0.0014251791
Uncorrected Total	7	3.4061060000	
(Corrected Total)	6	0.1910294286	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval
			Lower Upper
K	2.2324054E-6	2.05922029E-7	1.72853198E-6 2.73627882E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase

Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.324101
1	0.0000008277	0.081546
2	0.0000021338	0.007861
3	0.0000027053	0.002749
4	0.0000027511	0.002725
5	0.0000027512	0.002725
6	0.0000027512	0.002725

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.5657264248	3.5657264248
Residual	5	0.0027245752	0.0005449150
Uncorrected Total	6	3.5684510000	
(Corrected Total)	5	0.0922028333	
Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	2.7512397E-6	2.16788501E-7	2.19397522E-6 3.30850423E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.694944
1	0.0000011021	0.238357
2	0.0000036381	0.034187
3	0.0000053586	0.009178
4	0.0000056449	0.008754
5	0.0000056523	0.008754
6	0.0000056524	0.008754

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	2.7582454133	2.7582454133
Residual	5	0.0087535867	0.0017507173
Uncorrected Total	6	2.7669990000	
(Corrected Total)	5	0.1599948333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	5.6523849E-6	6.05422374E-7	4.09611969E-6 7.20865009E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.214639
1	0.0000006196	0.050451
2	0.0000015160	0.004727
3	0.0000018708	0.001958
4	0.0000018952	0.001948
5	0.0000018953	0.001948
6	0.0000018953	0.001948

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.1811062953	3.1811062953
Residual	4	0.0019477047	0.0004869262
Uncorrected Total	5	3.1830540000	
(Corrected Total)	4	0.0720268000	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	1.8952993E-6	1.69437346E-7	1.42487221E-6 2.36572646E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.479300
1	0.0000009494	0.143115
2	0.0000027889	0.016209
3	0.0000038084	0.004163
4	0.0000039290	0.004048
5	0.0000039305	0.004048
6	0.0000039305	0.004048

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.1756049093	3.1756049093
Residual	5	0.0040480907	0.0008096181
Uncorrected Total	6	3.1796530000	
(Corrected Total)	5	0.1223048333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	3.9304654E-6	3.26585935E-7	3.09096174E-6 4.76996915E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.293745
1	0.0000006793	0.067101
2	0.0000015513	0.013391
3	0.0000018504	0.010758
4	0.0000018657	0.010752
5	0.0000018656	0.010752

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	4.4337025076	4.4337025076
Residual	6	0.0107524924	0.0017920821
Uncorrected Total	7	4.4444550000	
(Corrected Total)	6	0.0931177143	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	1.8656253E-6	2.73845663E-7	1.19554863E-6 2.53570199E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.415365
1	0.0000009261	0.114476
2	0.0000025610	0.012048
3	0.0000033757	0.003603
4	0.0000034559	0.003544
5	0.0000034565	0.003544
6	0.0000034565	0.003544

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.3228625523	3.3228625523
Residual	5	0.0035444477	0.0007088895
Uncorrected Total	6	3.3264070000	
(Corrected Total)	5	0.1099988333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	3.4564741E-6	2.82878336E-7	2.72932277E-6 4.18362552E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 14 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

**ANEXO 6a) - Cálculo da difusividade efetiva, utilizando o procedimento
de regressão não linear do pacote estatístico SAS.**

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.786170
1	0.0000003657	0.294809
2	0.0000013577	0.042683
3	0.0000021017	0.008274
4	0.0000022304	0.007674
5	0.0000022324	0.007674
6	0.0000022324	0.007674

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.3984323802	3.3984323802
Residual	6	0.0076736198	0.0012789366
Uncorrected Total	7	3.4061060000	
(Corrected Total)	6	0.1910294286	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	2.2324048E-6	1.95070416E-7	1.75508436E-6 2.70972527E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=1 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.353599
1	0.0000006071	0.112545
2	0.0000019082	0.012037
3	0.0000026616	0.001942
4	0.0000027505	0.001847
5	0.0000027513	0.001847
6	0.0000027513	0.001847

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.5666038231	3.5666038231
Residual	5	0.0018471769	0.0003694354
Uncorrected Total	6	3.5684510000	
(Corrected Total)	5	0.0922028333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	2.7512514E-6	1.78498078E-7	2.29241412E-6 3.21008865E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=2 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.739275
1	0.0000007983	0.301265
2	0.0000031882	0.048935
3	0.0000051996	0.008904
4	0.0000056363	0.007877
5	0.0000056522	0.007876
6	0.0000056524	0.007876

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
7	0.0000056524	0.007876

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	2.7591228495	2.7591228495
Residual	5	0.0078761505	0.0015752301
Uncorrected Total	6	2.7669990000	
(Corrected Total)	5	0.1599948333	

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=3 -----

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	5.6523854E-6	5.7427839E-7	4.1761772E-6 7.12859361E-6

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.235810
1	0.0000004567	0.070832
2	0.0000013624	0.006890
3	0.0000018447	0.001114
4	0.0000018949	0.001070
5	0.0000018953	0.001070
6	0.0000018953	0.001070

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.1819837527	3.1819837527
Residual	4	0.0010702473	0.0002675618
Uncorrected Total	5	3.1830540000	
(Corrected Total)	4	0.0720268000	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	1.8953086E-6	1.25594723E-7	1.54660648E-6 2.24401075E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=4 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.515676
1	0.0000006914	0.188139
2	0.0000024670	0.024587
3	0.0000037224	0.003510
4	0.0000039265	0.003171
5	0.0000039305	0.003171
6	0.0000039305	0.003171

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.1764823378	3.1764823378
Residual	5	0.0031706622	0.0006341324
Uncorrected Total	6	3.1796530000	
(Corrected Total)	5	0.1223048333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	3.9304672E-6	2.89032766E-7	3.18749557E-6 4.67343879E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=5 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
 Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.323489
1	0.0000005018	0.094220
2	0.0000014014	0.015961
3	0.0000018295	0.009906
4	0.0000018656	0.009874
5	0.0000018656	0.009874

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	4.4345805413	4.4345805413
Residual	6	0.0098744587	0.0016457431
Uncorrected Total	7	4.4444550000	
(Corrected Total)	6	0.0931177143	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	1.8656021E-6	2.62406369E-7	1.22351635E-6 2.50768778E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=6 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	K	Sum of Squares
0	1E-9	0.449084
1	0.0000006762	0.153793
2	0.0000022763	0.018446
3	0.0000033100	0.002863
4	0.0000034546	0.002667
5	0.0000034565	0.002667
6	0.0000034565	0.002667

NOTE: Convergence criterion met.

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	3.3237399803	3.3237399803
Residual	5	0.0026670197	0.0005334039
Uncorrected Total	6	3.3264070000	
(Corrected Total)	5	0.1099988333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
K	3.4564762E-6	2.45379216E-7	2.82571799E-6 4.08723442E-6

CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS

----- PLANILHA=7 -----

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	K
K	1

ANEXO 6b) - Programa de entrada de dados no SAS.

Programa para 3 termos

```

OPTIONS LS=80;

PROC NLIN;
    by Planilha;
PARMS K=0.01;

MODEL r = (6*(1/(9*exp(9*k*3.1416**2*t)) + 1/(4*exp(4*k*3.1416**2*t)) +
    exp(-(k*3.1416**2*t)))/3.1416**2;

DER.K=(-6*(1+exp(5*k*3.1416**2*t)+ exp(8*k*3.1416**2*t))*t)/exp(9*k*3.1416**2*t);

DER.K.K=(6*(9+4*exp(5*k*3.1416**2*t)+
    exp(8*k*3.1416**2*t))*3.1416**2*t**2)/exp(9*k*3.1416**2*t);

TITLE ' CÁLCULO DO PARÂMETRO K 3 TERMOS';

RUN;

```

Programa para 5 termos

```

OPTIONS LS=80;

PROC NLIN;
    by Planilha;
PARMS K=0.01;

Model r = (6*(1/(25*exp(25*k*3.1416**2*T))+
    1/(16*exp(16*k*3.1416**2*T))+
    1/(9*exp(9*k*3.1416**2*T))+
    1/(4*exp(4*k*3.1416**2*T))+
    exp(-(k*3.1416**2*T)))/3.1416**2;

DER.K = (-6*(1+exp(9*k*3.1416**2*T)+
    exp(16*k*3.1416**2*T)+
    exp(21*k*3.1416**2*T)+
    exp(24*k*3.1416**2*T))*T)/exp(25*k*3.1416**2*T);

DER.K.K = (6*(25+16*exp(9*k*3.1416**2*T)+
    9*exp(16*k*3.1416**2*T)+
    4*exp(21*k*3.1416**2*T)+

```

$$\exp(24*k*3.1416**2*T))*3.1416**2*T**2)/\exp(25*k*3.1416**2*T);$$

TITLE 'CÁLCULO DO PARÂMETRO K 5 TERMOS';

RUN;

Programa para 10 termos

OPTIONS LS=80;

PROC NLIN;

by Planilha;

PARMS K=0.000000001;

MODEL r= (6*(1/(100*exp(100*k*3.1416**2*t)) + 1/(81*exp(81*k*3.1416**2*t)) +
 1/(64*exp(64*k*3.1416**2*t)) + 1/(49*exp(49*k*3.1416**2*t)) +
 1/(36*exp(36*k*3.1416**2*t)) + 1/(25*exp(25*k*3.1416**2*t)) +
 1/(16*exp(16*k*3.1416**2*t)) + 1/(9*exp(9*k*3.1416**2*t)) +
 1/(4*exp(4*k*3.1416**2*t)) + exp(-(k*3.1416**2*t)))/3.1416**2;

DER.K = (-6*(1 + exp(19*k*3.1416**2*t) + exp(36*k*3.1416**2*t) + exp(51*k*3.1416**2*t) +
 exp(64*k*3.1416**2*t) + exp(75*k*3.1416**2*t) + exp(84*k*3.1416**2*t) +
 exp(91*k*3.1416**2*t) + exp(96*k*3.1416**2*t) + exp(99*k*3.1416**2*t))*t)/
 exp(100*k*3.1416**2*t);

DER.K.K = (6*(100 + 81*exp(19*k*3.1416**2*t) + 64*exp(36*k*3.1416**2*t)
 +49*exp(51*k*3.1416**2*t) + 36*exp(64*k*3.1416**2*t) + 25*exp(75*k*3.1416**2*t) +
 16*exp(84*k*3.1416**2*t) + 9*exp(91*k*3.1416**2*t) + 4*exp(96*k*3.1416**2*t) +
 exp(99*k*3.1416**2*t))*3.1416**2*t**2)/exp(100*k*3.1416**2*t);

TITLE ' CÁLCULO DO PARÂMETRO K 10 TERMOS';

RUN;

Programa para 20 termos

OPTIONS LS=80;

PROC NLIN;

by Teste;

PARMS K=0.01;

MODEL r = (6*(1/(400*exp(400*k*3.1416**2*T)) + 1/(361*exp(361*k*3.1416**2*T)) +
 1/(324*exp(324*k*3.1416**2*T)) + 1/(289*exp(289*k*3.1416**2*T)) +
 1/(256*exp(256*k*3.1416**2*T)) + 1/(225*exp(225*k*3.1416**2*T)) +
 1/(196*exp(196*k*3.1416**2*T)) + 1/(169*exp(169*k*3.1416**2*T)) +
 1/(144*exp(144*k*3.1416**2*T)) + 1/(121*exp(121*k*3.1416**2*T)) +
 1/(100*exp(100*k*3.1416**2*T)) + 1/(81*exp(81*k*3.1416**2*T)) +
 1/(64*exp(64*k*3.1416**2*T)) + 1/(49*exp(49*k*3.1416**2*T)) +
 1/(36*exp(36*k*3.1416**2*T)) + 1/(25*exp(25*k*3.1416**2*T)) +
 1/(16*exp(16*k*3.1416**2*T)) + 1/(9*exp(9*k*3.1416**2*T)) +
 1/(4*exp(4*k*3.1416**2*T)) + exp(-(k*3.1416**2*T)))/3.1416**2;

DER.K = (-6*(1 + exp(39*k*3.1416**2*T) + exp(76*k*3.1416**2*T) + exp(111*k*3.1416**2*T) +
 exp(144*k*3.1416**2*T) + exp(175*k*3.1416**2*T) + exp(204*k*3.1416**2*T) +
 exp(231*k*3.1416**2*T) + exp(256*k*3.1416**2*T) + exp(279*k*3.1416**2*T) +
 exp(300*k*3.1416**2*T) + exp(319*k*3.1416**2*T) + exp(336*k*3.1416**2*T) +
 exp(351*k*3.1416**2*T) + exp(364*k*3.1416**2*T) + exp(375*k*3.1416**2*T) +
 exp(384*k*3.1416**2*T) + exp(391*k*3.1416**2*T) + exp(396*k*3.1416**2*T) +
 exp(399*k*3.1416**2*T))*T)/exp(400*k*3.1416**2*T);

DER.K.K = (6*(400 + 361*exp(39*k*3.1416**2*T) + 324*exp(76*k*3.1416**2*T) +
 289*exp(111*k*3.1416**2*T) + 256*exp(144*k*3.1416**2*T) + 225*exp(175*k*3.1416**2*T)
 +
 196*exp(204*k*3.1416**2*T) + 169*exp(231*k*3.1416**2*T) + 144*exp(256*k*3.1416**2*T)
 +
 121*exp(279*k*3.1416**2*T) + 100*exp(300*k*3.1416**2*T) + 81*exp(319*k*3.1416**2*T)
 +
 64*exp(336*k*3.1416**2*T) + 49*exp(351*k*3.1416**2*T) + 36*exp(364*k*3.1416**2*T) +
 25*exp(375*k*3.1416**2*T) + 16*exp(384*k*3.1416**2*T) + 9*exp(391*k*3.1416**2*T) +
 4*exp(396*k*3.1416**2*T) + exp(399*k*3.1416**2*T))*3.1416**2*T**2)/exp(400*k*3.1416**2*T);

TITLE ' CÁLCULO DO PARÂMETRO K 20 TERMOS'; RUN;

ANEXO 7) Determinação do conteúdo adimensional de umidade pelo modelo de PAGE (1949).

Tempo	R exp	Rcal exp(-kt(c))	(Rexp-Rcalc)/ Rcalc	erro%	k	c
0	1	1,0000			0,0003	0,8179
1800	0,8167	0,8614	0,0515	5,1501	0,0003	0,8179
6360	0,6667	0,6577	0,0127	1,2653	0,0003	0,8179
7500	0,6556	0,6191	0,0580	5,8036	0,0003	0,8179
8700	0,6001	0,5819	0,0311	3,1075	0,0003	0,8179
10140	0,5056	0,5414	0,0653	6,5302	0,0003	0,8179
11760	0,5001	0,5002	0,0004	0,0368	0,0003	0,8179
0	1	1,0000			0,0027	0,6021
1200	0,8078	0,8269	0,0229	2,2892	0,0027	0,6021
2340	0,7643	0,7527	0,0150	1,5024	0,0027	0,6021
3360	0,7209	0,7024	0,0265	2,6475	0,0027	0,6021
4380	0,6527	0,6607	0,0117	1,1724	0,0027	0,6021
5340	0,6217	0,6269	0,0095	0,9476	0,0027	0,6021
0	1	1,0000			0,0274	0,3663
1200	0,6751	0,6917	0,0242	2,4211	0,0274	0,3663
2400	0,6626	0,6218	0,0646	6,4574	0,0274	0,3663
3540	0,5564	0,5782	0,0385	3,8473	0,0274	0,3663
4680	0,5376	0,5451	0,0149	1,4908	0,0274	0,3663
5820	0,5251	0,5183	0,0129	1,2903	0,0274	0,3663
0	1	1,0000			0,0023	0,5918
1620	0,8242	0,8309	0,0083	0,8275	0,0023	0,5918
3240	0,7622	0,7564	0,0075	0,7454	0,0023	0,5918
4860	0,7053	0,7012	0,0054	0,5420	0,0023	0,5918
6420	0,6536	0,6580	0,0076	0,7614	0,0023	0,5918
0	1	1,0000			0,0089	0,4781
1200	0,741	0,7670	0,0339	3,3871	0,0089	0,4781
2220	0,7285	0,7005	0,0393	3,9323	0,0089	0,4781
3480	0,6544	0,6431	0,0169	1,6887	0,0089	0,4781
4680	0,5865	0,6014	0,0255	2,5537	0,0089	0,4781
5640	0,5742	0,5735	0,0009	0,0898	0,0089	0,4781
0	1	1,0000			0,0001	1,0339
1440	0,8590	0,8953	0,0405	4,0494	0,0001	1,0339
2520	0,8373	0,8209	0,0196	1,9604	0,0001	1,0339
3300	0,7940	0,7704	0,0306	3,0589	0,0001	1,0339
4080	0,7181	0,7227	0,0065	0,6490	0,0001	1,0339
4860	0,6747	0,6776	0,0053	0,5346	0,0001	1,0339
5520	0,6367	0,6415	0,0070	0,7034	0,0001	1,0339
0	1	1,0000			0,0037	0,5785
1260	0,7716	0,7967	0,0322	3,2230	0,0037	0,5785
2460	0,7217	0,7155	0,0076	0,7647	0,0037	0,5785
3420	0,7002	0,6670	0,0495	4,9533	0,0037	0,5785
4380	0,6217	0,6267	0,0074	0,7445	0,0037	0,5785
5340	0,5789	0,5921	0,0221	2,2093	0,0037	0,5785

ANEXO 7) Determinação do conteúdo adimensional de umidade pelo modelo de PAGE modificado.

Tempo	R exp	R calc A exp(-kt ⁿ c)	(Rexp-Rcalc)/ Rcalc	erro%	A	k	c
0	1	1,0000	0,0000		0,9803	0,0002	0,8727
1800	0,8167	0,8595	0,0494	4,9429	0,9803	0,0002	0,8727
6360	0,6667	0,6600	0,0091	0,9103	0,9803	0,0002	0,8727
7500	0,6556	0,6208	0,0551	5,5086	0,9803	0,0002	0,8727
8700	0,6001	0,5828	0,0295	2,9511	0,9803	0,0002	0,8727
10140	0,5056	0,5410	0,0648	6,4759	0,9803	0,0002	0,8727
11760	0,5001	0,4984	0,0032	0,3191	0,9803	0,0002	0,8727
0	1	1,0000	0,0000		0,9966	0,0025	0,6091
1200	0,8078	0,8268	0,0228	2,2778	0,9966	0,0025	0,6091
2340	0,7643	0,7528	0,0148	1,4836	0,9966	0,0025	0,6091
3360	0,7209	0,7025	0,0263	2,6306	0,9966	0,0025	0,6091
4380	0,6527	0,6608	0,0117	1,1738	0,9966	0,0025	0,6091
5340	0,6217	0,6268	0,0093	0,9278	0,9966	0,0025	0,6091
0	1	1,0000	0,0000		0,9993	0,0273	0,3669
1200	0,6751	0,6917	0,0242	2,4199	0,9993	0,0273	0,3669
2400	0,6626	0,6219	0,0646	6,4557	0,9993	0,0273	0,3669
3540	0,5564	0,5783	0,0385	3,8487	0,9993	0,0273	0,3669
4680	0,5376	0,5451	0,0149	1,4910	0,9993	0,0273	0,3669
5820	0,5251	0,5183	0,0129	1,2919	0,9993	0,0273	0,3669
0	1	1,0000	0,0000		0,9901	0,0023	0,5939
1620	0,8242	0,8235	0,0007	0,0662	0,9901	0,0023	0,5939
3240	0,7622	0,7497	0,0165	1,6453	0,9901	0,0023	0,5939
4860	0,7053	0,6950	0,0144	1,4423	0,9901	0,0023	0,5939
6420	0,6536	0,6521	0,0013	0,1337	0,9901	0,0023	0,5939
0	1	1,0000	0,0000		0,9973	0,0086	0,4816
1200	0,7408	0,7669	0,0338	3,3818	0,9973	0,0086	0,4816
2220	0,7285	0,7005	0,0392	3,9219	0,9973	0,0086	0,4816
3480	0,6544	0,6432	0,0168	1,6794	0,9973	0,0086	0,4816
4680	0,5865	0,6014	0,0255	2,5535	0,9973	0,0086	0,4816
5640	0,5742	0,5734	0,0010	0,1007	0,9973	0,0086	0,4816
0	1	1,0000	0,0000		0,9896	0,0000	1,0829
1440	0,8590	0,8941	0,0392	3,9226	0,9896	0,0000	1,0829
2520	0,8373	0,8216	0,0188	1,8752	0,9896	0,0000	1,0829
3300	0,7940	0,7714	0,0293	2,9343	0,9896	0,0000	1,0829
4080	0,7181	0,7233	0,0073	0,7324	0,9896	0,0000	1,0829
4860	0,6747	0,6775	0,0052	0,5199	0,9896	0,0000	1,0829
5520	0,6367	0,6406	0,0056	0,5647	0,9896	0,0000	1,0829
0	1	1,0000	0,0000		0,9954	0,0034	0,5866
1260	0,7716	0,7966	0,0322	3,2156	0,9954	0,0034	0,5866
2460	0,7217	0,7157	0,0074	0,7389	0,9954	0,0034	0,5866
3420	0,7002	0,6671	0,0493	4,9326	0,9954	0,0034	0,5866
4380	0,6217	0,6267	0,0074	0,7445	0,9954	0,0034	0,5866
5340	0,5789	0,5919	0,0218	2,1816	0,9954	0,0034	0,5866

ANEXO 7a) - Programa de entrada de dados

```
options ps=600;
data a;
input planilha t r @@;
r=-r;
if t=0 then t=0.000000000001;
cards;
1 0 0
1 1800 0.202
1 6360 0.405
1 7500 0.422
1 8700 0.511
1 10140 0.682
1 11760 0.693
2 0 0
2 1200 0.214
2 2340 0.269
2 3360 0.327
2 4380 0.427
2 5340 0.475
3 0 0
3 1200 0.393
3 2400 0.412
3 3540 0.586
3 4680 0.621
3 5820 0.644
4 0 0
4 1620 0.193
4 3240 0.272
4 4860 0.349
4 6420 0.425
5 0 0
5 1200 0.300
5 2220 0.317
5 3480 0.424
5 4680 0.534
5 5640 0.555
6 0 0
6 1440 0.152
6 2520 0.178
6 3300 0.231
6 4080 0.331
6 4860 0.394
6 5520 0.451
7 0 0
7 1260 0.259
7 2460 0.326
7 3420 0.356
7 4380 0.475
7 5340 0.547
```

```
;
proc print;
title 'Análise para Planilhas de 1 a 7';
run;
proc sort; by planilha;
proc nlin; by planilha;
parms a=1 s=1 c=1;
tc=t**c;
model r=a-s*tc;
der.a=1;
der.s=-tc;
der.c=-s*tc*log(t);
output out=saida p=rhat r=rresid;
run;
proc plot data=saida; by planilha;
plot r*t='A' rhat*t='P' /overlay vpos=25;
plot rresid*t / vref=0 vpos=25;
run;
quit;
```

ANEXO 7a) - Programa de entrada de dados no SAS

Análise para Planilhas de 1 a 7

OBS	PLANILHA	T	R
1	1	0.00	0.000
2	1	1800.00	-0.202
3	1	6360.00	-0.405
4	1	7500.00	-0.422
5	1	8700.00	-0.511
6	1	10140.00	-0.682
7	1	11760.00	-0.693
8	2	0.00	0.000
9	2	1200.00	-0.214
10	2	2340.00	-0.269
11	2	3360.00	-0.327
12	2	4380.00	-0.427
13	2	5340.00	-0.475
14	3	0.00	0.000
15	3	1200.00	-0.393
16	3	2400.00	-0.412
17	3	3540.00	-0.586
18	3	4680.00	-0.621
19	3	5820.00	-0.644
20	4	0.00	0.000
21	4	1620.00	-0.193
22	4	3240.00	-0.272
23	4	4860.00	-0.349
24	4	6420.00	-0.425
25	5	0.00	0.000
26	5	1200.00	-0.300
27	5	2220.00	-0.317
28	5	3480.00	-0.424
29	5	4680.00	-0.534
30	5	5640.00	-0.555
31	6	0.00	0.000
32	6	1440.00	-0.152
33	6	2520.00	-0.178
34	6	3300.00	-0.231
35	6	4080.00	-0.331
36	6	4860.00	-0.394
37	6	5520.00	-0.451
38	7	0.00	0.000
39	7	1260.00	-0.259
40	7	2460.00	-0.326
41	7	3420.00	-0.356
42	7	4380.00	-0.475
43	7	5340.00	-0.547

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	A	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	1.000000	416603064
1	-0.024939	0.000112	0.999994	1.192173
2	-0.024939	0.000112	0.948007	0.060963
3	-0.022821	0.000145	0.898770	0.012347
4	-0.020916	0.000176	0.878275	0.012065
5	-0.020153	0.000187	0.873919	0.011501
6	-0.019993	0.000189	0.872966	0.011498
7	-0.019958	0.000190	0.872739	0.011498
8	-0.019949	0.000190	0.872684	0.011498
9	-0.019947	0.000190	0.872671	0.011498

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	1.5779092965	0.5259697655
Residual	4	0.0114977035	0.0028744259
Uncorrected Total	7	1.5894070000	

(Corrected Total) 6 0.3755177143

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval	
			Lower	Upper
A	-0.0199473027	0.05134719222	-.16250803420	0.1226134289
k	0.0001897579	0.00036892768	-.00083453572	0.0012140515
n	0.8726711721	0.20623324264	0.30008364260	1.4452587017

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	A	k	n
A	1	0.6418292156	-0.61110682
k	0.6418292156	1	-0.998954943
n	-0.61110682	-0.998954943	1

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase				
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton				
Iter	A	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	1.000000	65859187
1	-0.010366	0.000405	0.999963	6.356743
2	-0.010365	0.000405	0.908045	0.583076
3	-0.008080	0.000710	0.758278	0.003284
4	-0.007729	0.000818	0.740197	0.003069
5	-0.007389	0.000928	0.724221	0.002947
6	-0.007062	0.001040	0.710158	0.002850
7	-0.006751	0.001150	0.697809	0.002752
8	-0.006459	0.001259	0.686984	0.002645
9	-0.006186	0.001363	0.677504	0.002534
10	-0.005678	0.001562	0.660903	0.002478
11	-0.005246	0.001738	0.648362	0.002326
12	-0.004525	0.002039	0.629466	0.002197
13	-0.003591	0.002429	0.610022	0.001856
14	-0.003382	0.002486	0.609187	0.001705
15	-0.003374	0.002487	0.609137	0.001705
16	-0.003373	0.002487	0.609133	0.001705

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	0.63133531243	0.21044510414
Residual	3	0.00170468757	0.00056822919
Uncorrected Total	6	0.63304000000	

(Corrected Total) 5 0.14454933333

Parameter	Estimate	Asymptotic	Asymptotic 95 %	
	Std. Error	Confidence Interval		
		Lower	Upper	
A	-.0033730214	0.02373078457	-.07889624330	0.07215020047
k	0.0024871277	0.00194760092	-.00371111221	0.00868536765
n	0.6091330338	0.09054159911	0.32098439464	0.89728167298

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	A	k	n
A	1	0.5785251488	-0.519856268
k	0.5785251488	1	-0.996751133
n	-0.519856268	-0.996751133	1

Analise para Planilhas de 1 a 7

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	A	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	1.000000	75450754
1	-0.014929	0.000963	0.999901	52.248254
2	-0.014923	0.000964	0.897341	5.731590
3	-0.009895	0.001948	0.696020	0.053664
4	-0.008371	0.003209	0.615524	0.027321
5	-0.008004	0.003697	0.597804	0.026525
6	-0.007646	0.004223	0.581325	0.025742
7	-0.007298	0.004784	0.566024	0.024929
8	-0.006962	0.005375	0.551835	0.024067
9	-0.006639	0.005994	0.538688	0.023156
10	-0.006328	0.006635	0.526515	0.022204
11	-0.005733	0.007954	0.503980	0.022048
12	-0.005192	0.009330	0.484637	0.021232
13	-0.004702	0.010729	0.468098	0.019927
14	-0.003820	0.013505	0.439873	0.019837
15	-0.003121	0.016122	0.419610	0.017248
16	-0.002027	0.020726	0.390778	0.014310
17	-0.000816	0.026776	0.365190	0.007914
18	-0.000726	0.027291	0.366900	0.006415
19	-0.000731	0.027287	0.366874	0.006415
20	-0.000731	0.027287	0.366873	0.006415

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	1.4615509509	0.4871836503
Residual	3	0.0064150491	0.0021383497
Uncorrected Total	6	1.4679660000	

(Corrected Total) 5 0.2922433333

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic Confidence Interval	Asymptotic 95 %
			Lower	Upper
A	-.0007312005	0.04621008015	-.14779478057	0.14633237961
k	0.0272873358	0.02083040157	-.03900541718	0.09358008881
n	0.3668731098	0.08822974923	0.08608193291	0.64766428676

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	A	k	n
A	1	0.4770471736	-0.38580588
k	0.4770471736	1	-0.993560218
n	-0.38580588	-0.993560218	1

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase				
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton				
Iter	A	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	1.000000	77914491
1	-0.004356	0.000337	0.999969	5.509691
2	-0.004356	0.000337	0.907639	0.526301
3	-0.003106	0.000601	0.753252	0.001756
4	-0.002765	0.000801	0.713676	0.001359
5	-0.002608	0.000909	0.698194	0.001290
6	-0.002460	0.001018	0.684708	0.001208
7	-0.002322	0.001124	0.672984	0.001110
8	-0.002195	0.001227	0.662803	0.001002
9	-0.001960	0.001423	0.645130	0.000946
10	-0.001766	0.001595	0.632029	0.000787
11	-0.001448	0.001887	0.612668	0.000632
12	-0.001058	0.002253	0.593797	0.000293
13	-0.000993	0.002287	0.593930	0.000188
14	-0.000993	0.002287	0.593932	0.000188
15	-0.000993	0.002287	0.593932	0.000188

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	0.41347061670	0.13782353890
Residual	2	0.00018838330	0.00009419165
Uncorrected Total	5	0.41365900000	

(Corrected Total) 4 0.10663480000

Parameter	Estimate	Asymptotic	Asymptotic 95 %	
		Std. Error	Confidence Interval	
			Lower	Upper
A	-.0009933173	0.00967954168	-.04264148129	0.04065484670
k	0.0022873048	0.00086024242	-.00141406031	0.00598866981
n	0.5939319089	0.04279421220	0.40980125208	0.77806256572

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	A	k	n
A	1	0.5314242095	-0.472914699
k	0.5314242095	1	-0.996867158
n	-0.472914699	-0.996867158	1

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase				
Dependent Variable R		Method: Gauss-Newton		
Iter	A	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	1.000000	72140034
1	-0.014850	0.000629	0.999938	19.476596
2	-0.014847	0.000629	0.901665	1.999106
3	-0.011144	0.001200	0.722234	0.013528
4	-0.009938	0.001775	0.663744	0.010862
5	-0.009642	0.001960	0.651714	0.010475
6	-0.009351	0.002151	0.640499	0.010086
7	-0.008783	0.002543	0.619596	0.010050
8	-0.008244	0.002952	0.601419	0.009799
9	-0.007739	0.003367	0.585672	0.009353
10	-0.007269	0.003781	0.572059	0.008777
11	-0.006399	0.004592	0.548543	0.008587
12	-0.005671	0.005341	0.531227	0.007615
13	-0.004472	0.006653	0.505863	0.006619
14	-0.002980	0.008406	0.481469	0.004378
15	-0.002717	0.008637	0.481622	0.003670
16	-0.002719	0.008636	0.481627	0.003670
17	-0.002719	0.008636	0.481627	0.003670

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	0.95977567735	0.31992522578
Residual	3	0.00367032265	0.00122344088
Uncorrected Total	6	0.96344600000	
(Corrected Total)	5	0.20729600000	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic Confidence Interval Lower Upper	Asymptotic 95 %
A	-.0027190117	0.03490971521	-.11381918041	0.10838115692
k	0.0086363692	0.00686485266	-.01321102438	0.03048376280
n	0.4816273928	0.09141149688	0.19071030402	0.77254448168

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	A	k	n
A	1	0.5439793645	-0.469942171
k	0.5439793645	1	-0.995233972
n	-0.469942171	-0.995233972	1

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	A	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	1.000000	89992602
1	-0.009303	0.0000327057	1.000005	0.184209
2	-0.009304	0.0000327064	1.081805	0.017308
3	-0.010479	0.0000386131	1.082915	0.002978
4	-0.010496	0.0000385565	1.082910	0.002977
5	-0.010496	0.0000385568	1.082909	0.002977

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	0.57337022639	0.19112340880
Residual	4	0.00297677361	0.00074419340
Uncorrected Total	7	0.57634700000	

(Corrected Total) 6 0.14532285714

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic Confidence Interval Lower Upper	Asymptotic 95 %
A	-0.010495654	0.02653750394	-0.08417458043	0.0631832716
k	0.000038557	0.00006027486	-0.00012879075	0.0002059044
n	1.082909093	0.17968124773	0.58404072221	1.5817774637

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	A	k	n
A	1	0.6848200743	-0.655572989
k	0.6848200743	1	-0.998929781
n	-0.655572989	-0.998929781	1

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	A	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	1.000000	66987196
1	-0.014926	0.000460	0.999958	8.401830
2	-0.014924	0.000460	0.907688	0.776931
3	-0.011792	0.000820	0.753806	0.006516
4	-0.011280	0.000958	0.733938	0.006363
5	-0.010778	0.001102	0.716311	0.006290
6	-0.010292	0.001250	0.700741	0.006203
7	-0.009827	0.001400	0.687032	0.006072

8	-0.009387	0.001548	0.674986	0.005901
9	-0.008973	0.001693	0.664414	0.005704
10	-0.008200	0.001972	0.645868	0.005638
11	-0.007537	0.002226	0.631779	0.005343
12	-0.006422	0.002668	0.610450	0.005098
13	-0.004952	0.003267	0.588139	0.004398
14	-0.004600	0.003377	0.586768	0.004046
15	-0.004579	0.003381	0.586655	0.004046
16	-0.004578	0.003382	0.586644	0.004046

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	0.82088119615	0.27362706538
Residual	3	0.00404580385	0.00134860128
Uncorrected Total	6	0.82492700000	
(Corrected Total)	5	0.18269883333	

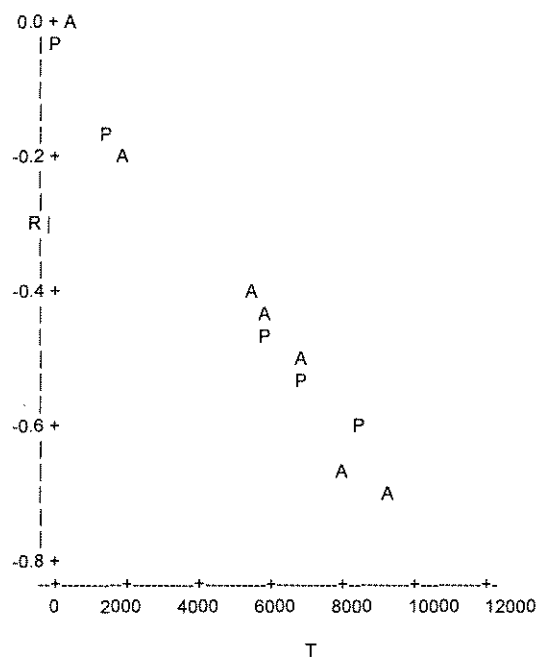
Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic Confidence Interval Lower Upper	Asymptotic 95 %
A	-.0045775711	0.03659621806	-.12104503507	0.11188989285
k	0.0033815207	0.00358609719	-.00803123365	0.01479427496
C	0.5866438554	0.12285996139	0.19564202825	0.97764568248

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	A	k	n
A	1	0.5566896714	-0.495611105
k	0.5566896714	1	-0.99663834
n	-0.495611105	-0.99663834	1

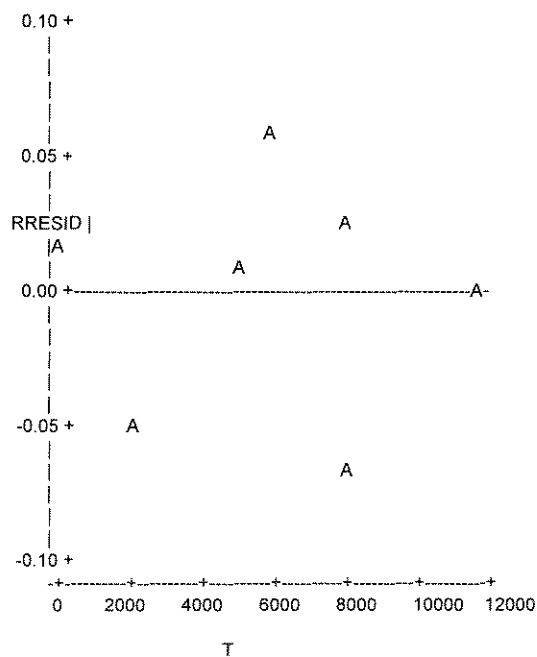
----- PLANILHA=1 -----

Plot of $R \cdot T$. Symbol used is 'A'.
 Plot of $RHAT \cdot T$. Symbol used is 'P'.



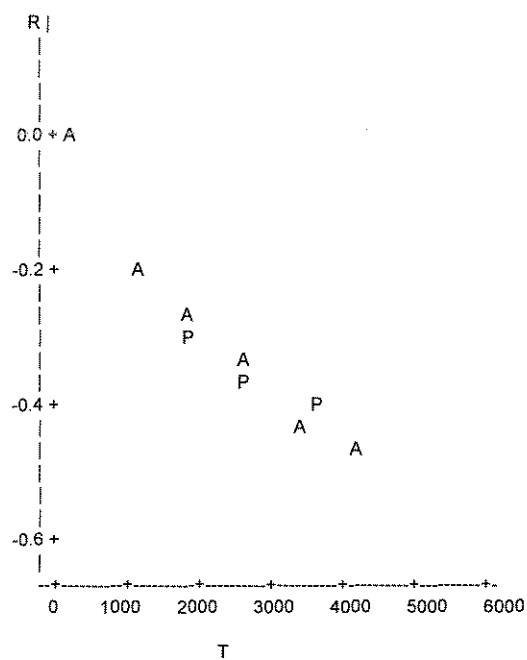
NOTE: 2 obs hidden.

----- PLANILHA=1 -----

Plot of $RRESID \cdot T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

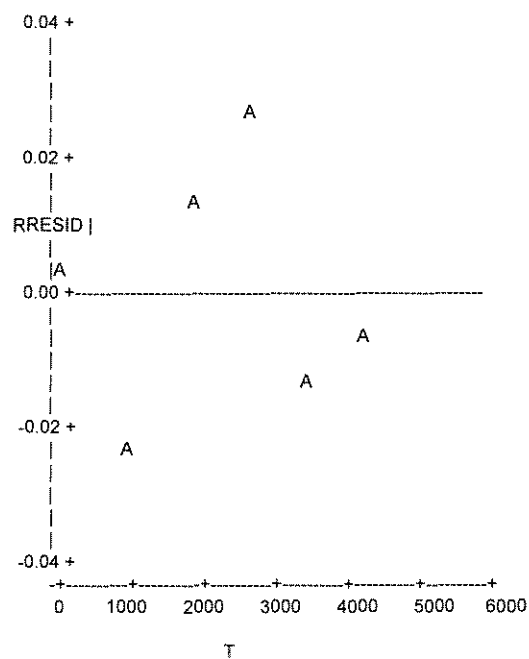
PLANILHA=2

Plot of R^*T . Symbol used is 'A'.
Plot of $RHAT^*T$. Symbol used is 'P'.



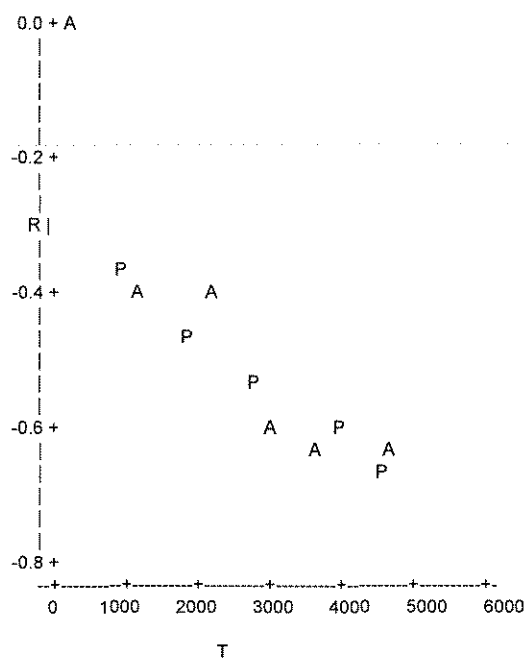
NOTE: 3 obs hidden.

PLANILHA=2

Plot of $RRESID^*T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

PLANILHA=3

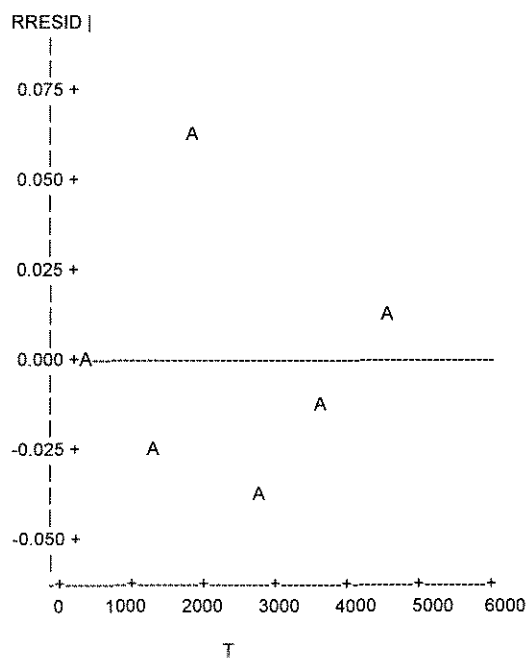
Plot of $R \cdot T$. Symbol used is 'A'.
 Plot of $RHAT \cdot T$. Symbol used is 'P'.

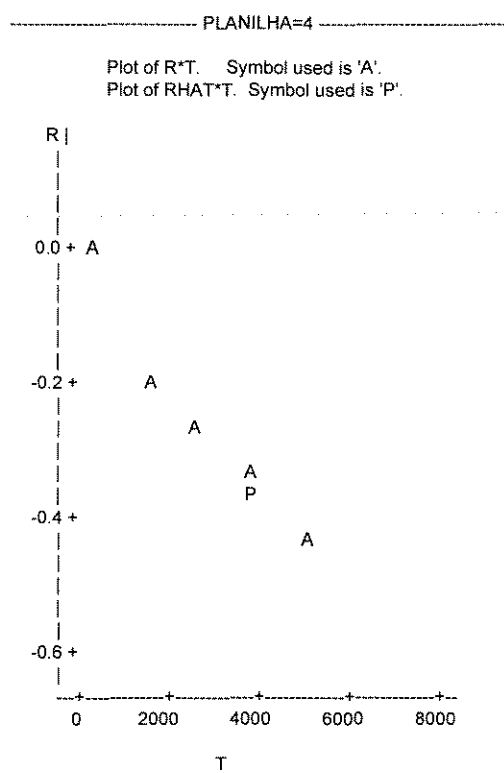


NOTE: 1 obs hidden.

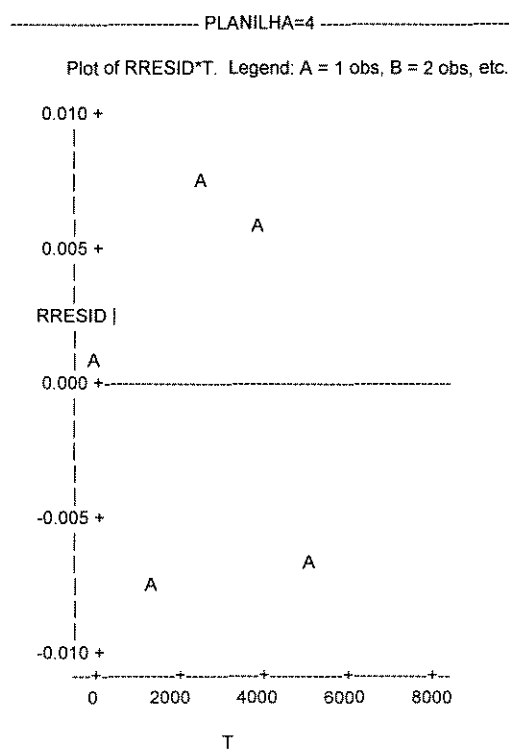
----- PLANILHA=3 -----

Plot of $RRESID \cdot T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.



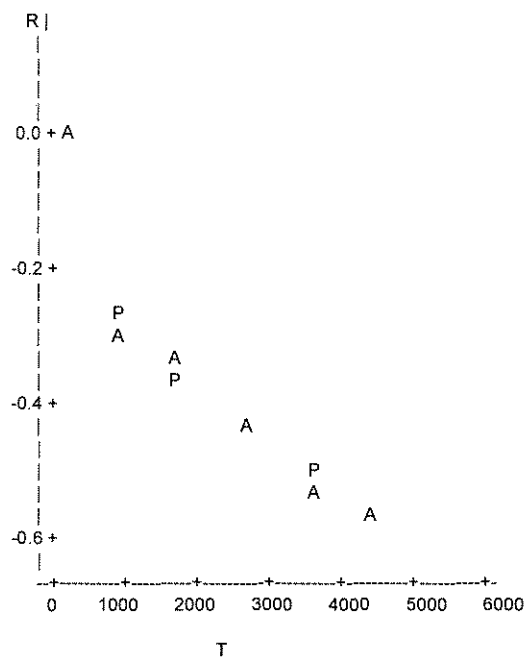


NOTE: 4 obs hidden.



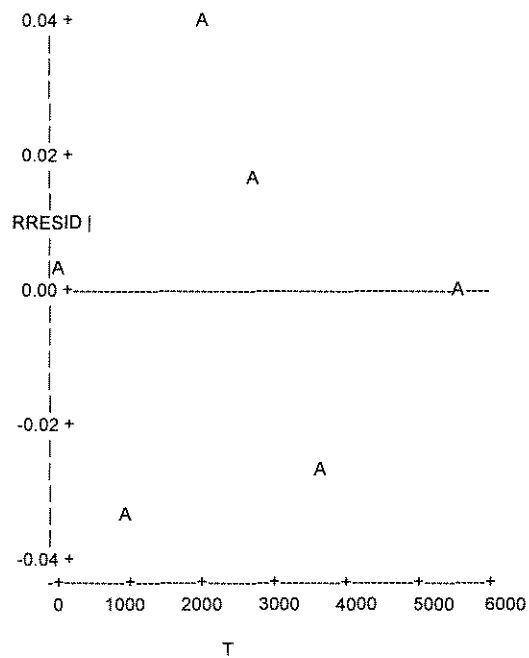
PLANILHA=5

Plot of $R \cdot T$. Symbol used is 'A'.
 Plot of $RHAT \cdot T$. Symbol used is 'P'.



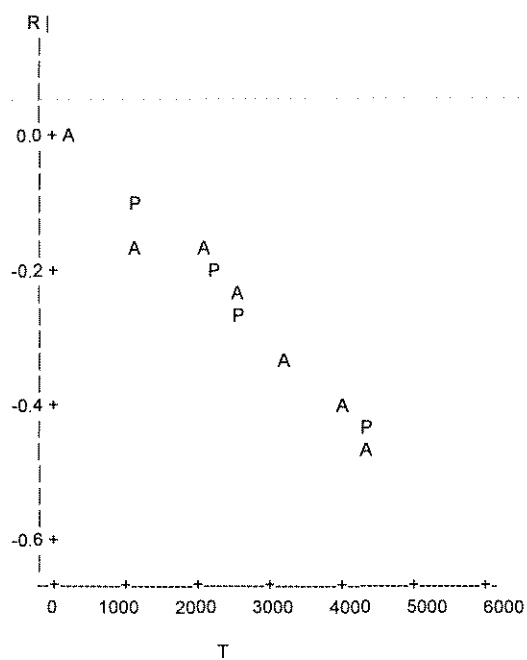
NOTE: 3 obs hidden.

PLANILHA=5

Plot of $RRESID \cdot T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

----- PLANILHA=6 -----

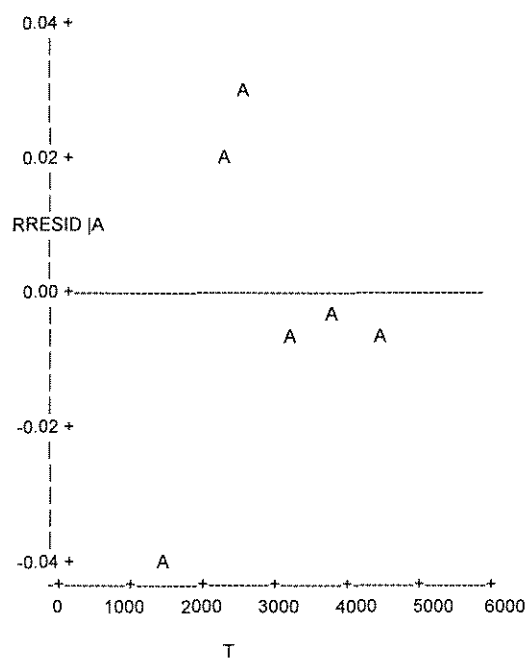
Plot of R^*T . Symbol used is 'A'.
Plot of $RHAT^*T$. Symbol used is 'P'.



NOTE: 3 obs hidden.

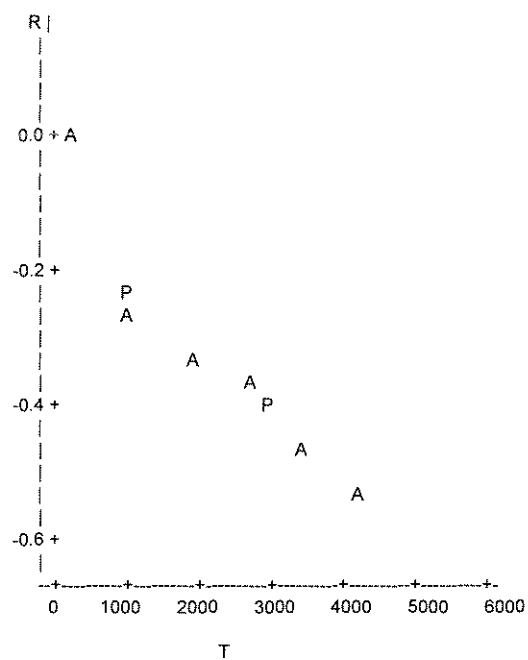
----- PLANILHA=6 -----

Plot of $RRESID^*T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.



PLANILHA=7

Plot of $R \cdot T$. Symbol used is 'A'.
Plot of $RHAT \cdot T$. Symbol used is 'P'.



ANEXO 7a) - Programa de entrada de dados no SAS

Análise para Planilhas de 1 a 7 sem o parâmetro A

OBS	PLANILHA	T	R
1	1	0.00	0.000
2	1	1800.00	-0.202
3	1	6360.00	-0.405
4	1	7500.00	-0.422
5	1	8700.00	-0.511
6	1	10140.00	-0.682
7	1	11760.00	-0.693
8	2	0.00	0.000
9	2	1200.00	-0.214
10	2	2340.00	-0.269
11	2	3360.00	-0.327
12	2	4380.00	-0.427
13	2	5340.00	-0.475
14	3	0.00	0.000
15	3	1200.00	-0.393
16	3	2400.00	-0.412
17	3	3540.00	-0.586
18	3	4680.00	-0.621
19	3	5820.00	-0.644
20	4	0.00	0.000
21	4	1620.00	-0.193
22	4	3240.00	-0.272
23	4	4860.00	-0.349
24	4	6420.00	-0.425
25	5	0.00	0.000
26	5	1200.00	-0.300
27	5	2220.00	-0.317
28	5	3480.00	-0.424
29	5	4680.00	-0.534
30	5	5640.00	-0.555
31	6	0.00	0.000
32	6	1440.00	-0.152
33	6	2520.00	-0.178
34	6	3300.00	-0.231
35	6	4080.00	-0.331
36	6	4860.00	-0.394
37	6	5520.00	-0.451
38	7	0.00	0.000
39	7	1260.00	-0.259
40	7	2460.00	-0.326
41	7	3420.00	-0.356
42	7	4380.00	-0.475
43	7	5340.00	-0.547

Análise para Planilhas de 1 a 7 sem o parâmetro A

----- PLANILHA=1 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase

Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	416695571
1	0.000153	0.999990	3.486495
2	0.000153	0.934648	0.225129
3	0.000216	0.859737	0.012960
4	0.000236	0.850544	0.012731
5	0.000269	0.836273	0.012534
6	0.000314	0.820314	0.012115
7	0.000323	0.818247	0.011884
8	0.000324	0.817957	0.011883
9	0.000325	0.817912	0.011883
10	0.000325	0.817906	0.011883

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	2	1.5775236345	0.7887618173
Residual	5	0.0118833655	0.0023766731
Uncorrected Total	7	1.5894070000	

(Corrected Total) 6 0.3755177143

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval
			Lower Upper
k	0.0003246286	0.00040658794	-0.00072052383 0.0013697810
n	0.8179055198	0.13725762534	0.46507867523 1.1707323644

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	k	n
k	1	-0.999519678
n	-0.999519678	1

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

----- PLANILHA=2 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	65892417
1	0.000437	0.999959	7.630055
2	0.000437	0.906692	0.715405
3	0.000765	0.754826	0.003876
4	0.000996	0.717863	0.003257
5	0.001118	0.703393	0.003126
6	0.001239	0.690734	0.002994
7	0.001358	0.679676	0.002853
8	0.001585	0.660371	0.002821
9	0.001790	0.645882	0.002627
10	0.002141	0.624232	0.002476
11	0.002600	0.602500	0.001951
12	0.002659	0.602139	0.001716
13	0.002659	0.602126	0.001716
14	0.002659	0.602125	0.001716

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent
Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	2	0.63132408495	0.31566204247
Residual	4	0.00171591505	0.00042897876
Uncorrected Total	6	0.63304000000	
(Corrected Total)	5	0.14454933333	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
k	0.0026593837	0.00145608382	-0.00138329843 0.00670206578
n	0.6021252106	0.06631873857	0.41799736493 0.78625305632

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	k	n
k	1	-0.998866063
n	-0.998866063	1

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

----- PLANILHA=3 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	75486023
1	0.001007	0.999896	57.461129
2	0.001008	0.897037	6.330192
3	0.002014	0.697532	0.069740
4	0.003267	0.618985	0.025281
5	0.003746	0.601606	0.023934
6	0.004261	0.585378	0.022806
7	0.004809	0.570249	0.021807
8	0.005388	0.556160	0.020882
9	0.005993	0.543055	0.019999
10	0.007250	0.518691	0.019916
11	0.008584	0.497588	0.019485
12	0.009962	0.479413	0.018630
13	0.011351	0.463812	0.017458
14	0.014090	0.437075	0.017220
15	0.016646	0.417729	0.015110
16	0.021118	0.389970	0.012799
17	0.026958	0.364866	0.007692
18	0.027449	0.366350	0.006416
19	0.027446	0.366328	0.006416
20	0.027447	0.366328	0.006416

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent
Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	2	1.4615504169	0.7307752084
Residual	4	0.0064155831	0.0016038958
Uncorrected Total	6	1.4679660000	

(Corrected Total) 5 0.2922433333

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic Confidence Interval Lower	Asymptotic 95 % Upper
k	0.0274465583	0.01592137806	-0.01675767578	0.07165079237
n	0.3663276018	0.07038160555	0.17091958158	0.56173562202

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	k	n
k	1	-0.998368071
n	-0.998368071	1

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

----- PLANILHA=4 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	77946763
1	0.000348	0.999968	5.951544
2	0.000348	0.907134	0.573253
3	0.000619	0.752483	0.002214
4	0.000822	0.712836	0.001232
5	0.000933	0.697267	0.001132
6	0.001043	0.683679	0.001046
7	0.001151	0.671847	0.000958
8	0.001256	0.661558	0.000868
9	0.001456	0.643674	0.000831
10	0.001632	0.630392	0.000706
11	0.001930	0.610739	0.000594
12	0.002303	0.591590	0.000294
13	0.002336	0.591810	0.000189
14	0.002336	0.591811	0.000189
15	0.002336	0.591811	0.000189

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent
Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	2	0.41346963181	0.20673481591
Residual	3	0.00018936819	0.00006312273
Uncorrected Total	5	0.41365900000	

(Corrected Total) 4 0.10663480000

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval Lower Upper
k	0.0023355503	0.00060656008	0.00040517288 0.00426592778
n	0.5918114834	0.03073961097	0.49398267148 0.68964029533

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	k	n
k	1	-0.998867629
n	-0.998867629	1

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

----- PLANILHA=5 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase			
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton			
Iter	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	72174464
1	0.000674	0.999933	22.729128
2	0.000674	0.900891	2.359911
3	0.001275	0.721600	0.019077
4	0.001869	0.663553	0.009900
5	0.002249	0.639507	0.009564
6	0.002655	0.618418	0.009364
7	0.003078	0.600030	0.009088
8	0.003508	0.584062	0.008689
9	0.003937	0.570228	0.008193
10	0.004777	0.546287	0.008103
11	0.005554	0.528607	0.007286
12	0.006914	0.502672	0.006492
13	0.008725	0.477768	0.004394
14	0.008943	0.478141	0.003678
15	0.008942	0.478147	0.003678
16	0.008942	0.478148	0.003678

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	2	0.95976835515	0.47988417757
Residual	4	0.00367764485	0.00091941121
Uncorrected Total	6	0.96344600000	
(Corrected Total)	5	0.20729600000	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval
			Lower Upper
k	0.0089418754	0.00512771233	-0.00529474373 0.02317849461
n	0.4781476960	0.06938482967	0.28550713184 0.67078826011

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	k	n
k	1	-0.998542395
n	-0.998542395	1

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

----- PLANILHA=6 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase

Dependent Variable R Method: Gauss-Newton

Iter	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	90036031
1	0.0000593278	1.000002	0.040810
2	0.0000593280	1.041152	0.004511
3	0.0000596432	1.034856	0.003085
4	0.0000600086	1.033988	0.003084
5	0.0000600494	1.033909	0.003084
6	0.0000600529	1.033902	0.003084

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	2	0.57326254478	0.28663127239
Residual	5	0.00308445522	0.00061689104
Uncorrected Total	7	0.57634700000	
(Corrected Total)	6	0.14532285714	

Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval
			Lower Upper
k	0.000060053	0.00005883679	-0.00009118965 0.0002112955
n	1.033902127	0.11679604426	0.73367268893 1.3341315655

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	k	n
k	1	-0.999439317
n	-0.999439317	1

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

----- PLANILHA=7 -----

Non-Linear Least Squares Iterative Phase			
Dependent Variable R Method: Gauss-Newton			
Iter	k	n	Sum of Squares
0	1.000000	1.000000	67020906
1	0.000505	0.999953	10.515308
2	0.000506	0.906070	0.997507
3	0.000899	0.749678	0.007223
4	0.001199	0.709022	0.006839
5	0.001364	0.692901	0.006699
6	0.001531	0.678767	0.006513
7	0.001696	0.666400	0.006284
8	0.001856	0.655590	0.006031
9	0.002166	0.636701	0.005900
10	0.002444	0.622478	0.005530
11	0.002924	0.601131	0.005186
12	0.003559	0.579345	0.004385
13	0.003654	0.578543	0.004066
14	0.003656	0.578497	0.004066
15	0.003657	0.578494	0.004066

NOTE: Convergence criterion met.

Non-Linear Least Squares Summary Statistics Dependent Variable R

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	2	0.82086067754	0.41043033877
Residual	4	0.00406632246	0.00101658062
Uncorrected Total	6	0.82492700000	

(Corrected Total) 5 0.18269883333

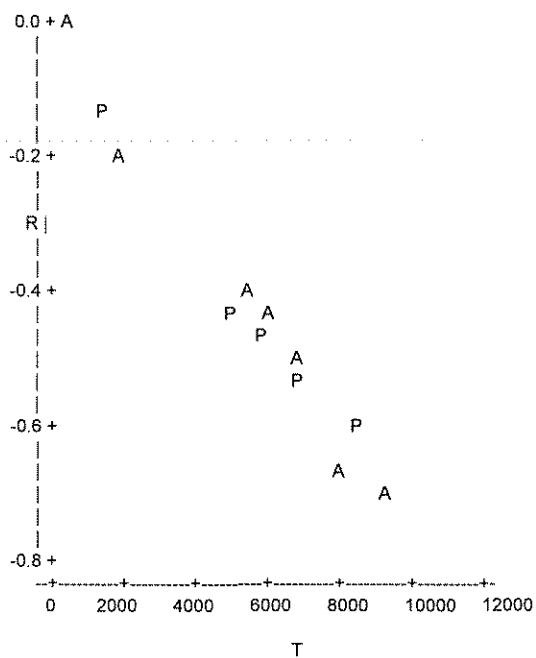
Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval
			Lower Upper
k	0.0036565015	0.00275292817	-0.00398674902 0.01129975202
n	0.5784936892	0.09121983110	0.32523026252 0.83175711598

Asymptotic Correlation Matrix

Corr	k	n
k	1	-0.998906997
n	-0.998906997	1

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

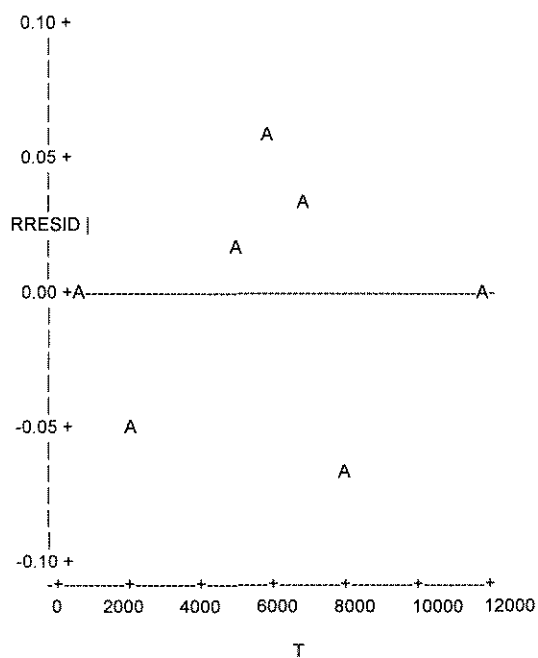
----- PLANILHA=1 -----
 Plot of $R \cdot T$. Symbol used is 'A'.
 Plot of $RHAT \cdot T$. Symbol used is 'P'.



NOTE: 2 obs hidden.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

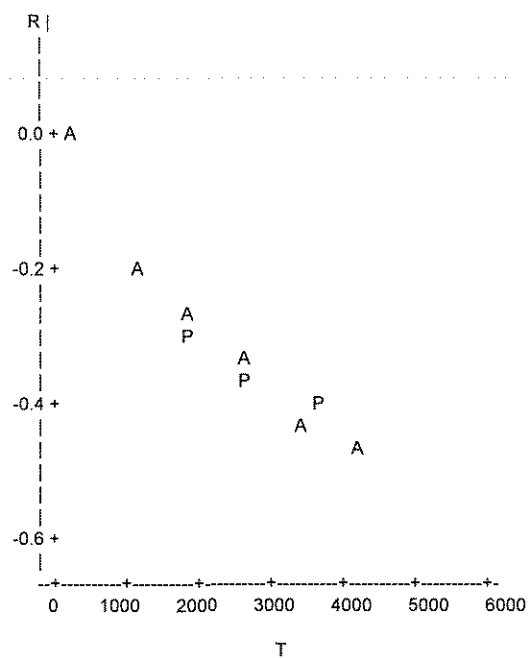
----- PLANILHA=1 -----
 Plot of $RRESID \cdot T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.



Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

PLANILHA=2

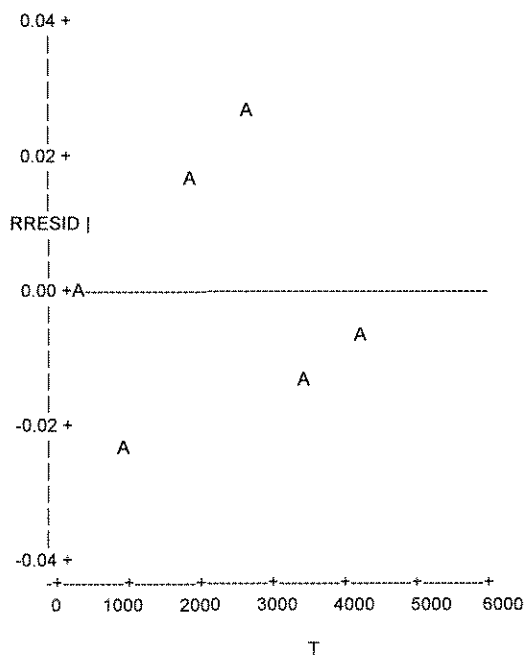
Plot of $R \cdot T$. Symbol used is 'A'.
 Plot of $RHAT \cdot T$. Symbol used is 'P'.



NOTE: 3 obs hidden.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

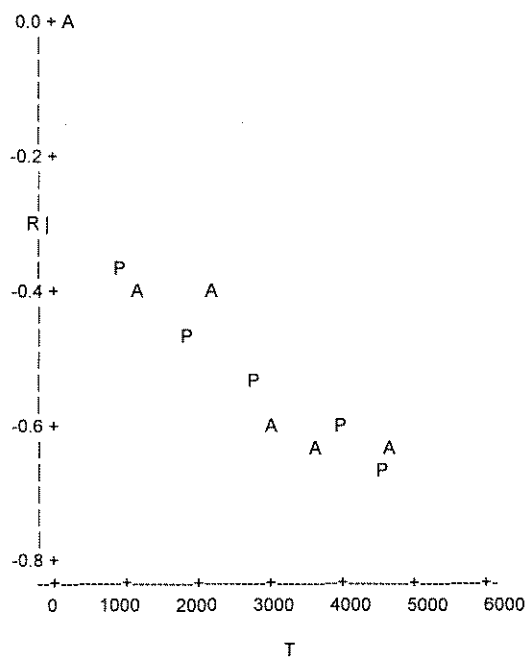
PLANILHA=2

Plot of $RRESID \cdot T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

PLANILHA=3

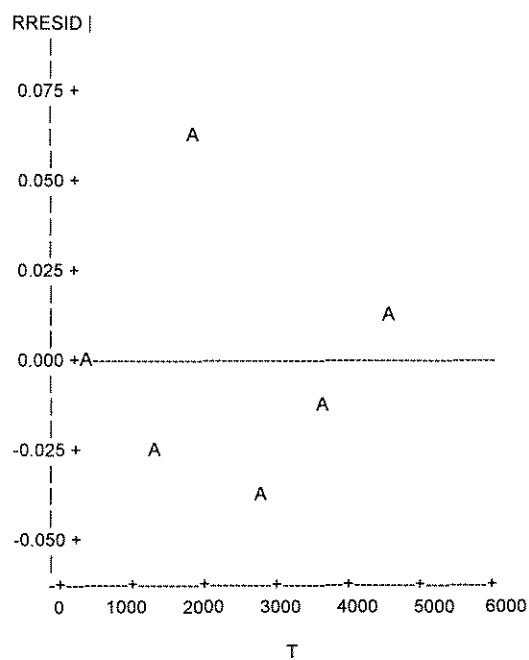
Plot of R^*T . Symbol used is 'A'.
 Plot of $RHAT^*T$. Symbol used is 'P'.



NOTE: 1 obs hidden.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

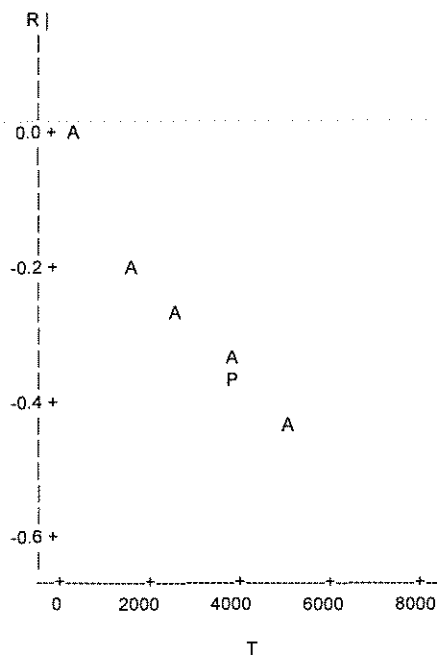
PLANILHA=3

Plot of $RRESID^*T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

PLANILHA=4

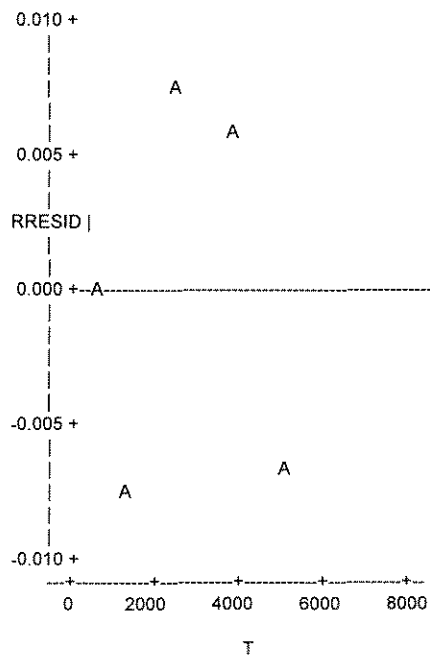
Plot of $R \cdot T$. Symbol used is 'A'.
 Plot of $RHAT \cdot T$. Symbol used is 'P'.



NOTE: 4 obs hidden.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

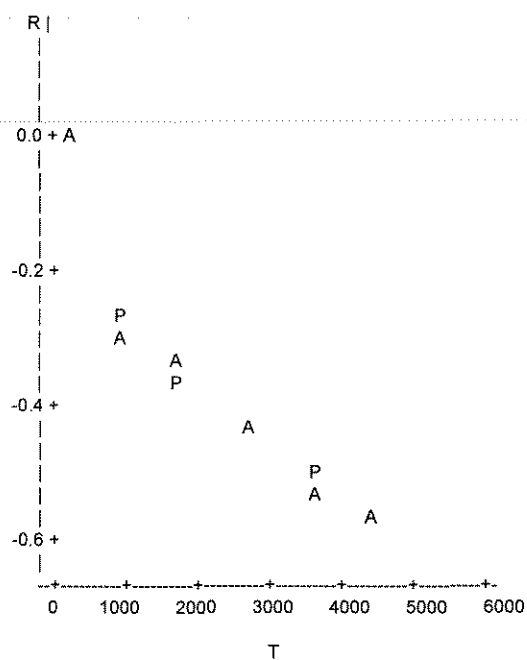
PLANILHA=4

Plot of $RRESID \cdot T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

PLANILHA=5

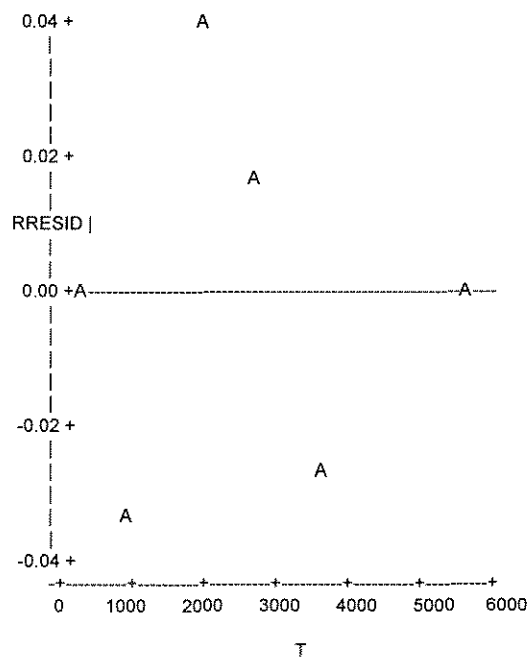
Plot of $R \cdot T$. Symbol used is 'A'.
 Plot of $RHAT \cdot T$. Symbol used is 'P'.



NOTE: 3 obs hidden.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

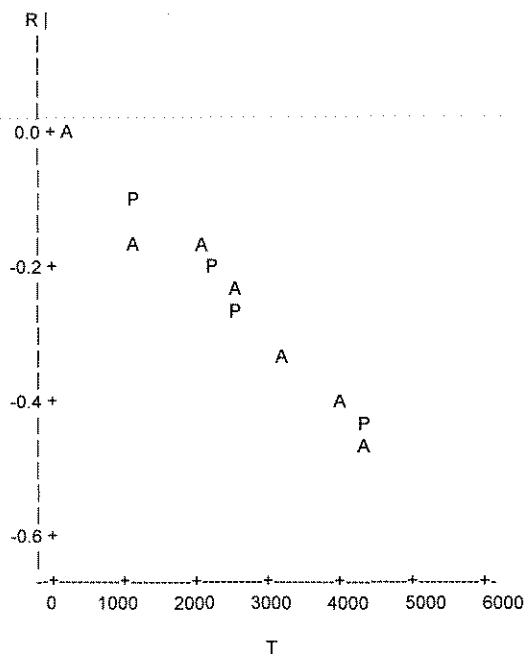
PLANILHA=5

Plot of $RRESID \cdot T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

PLANILHA=6

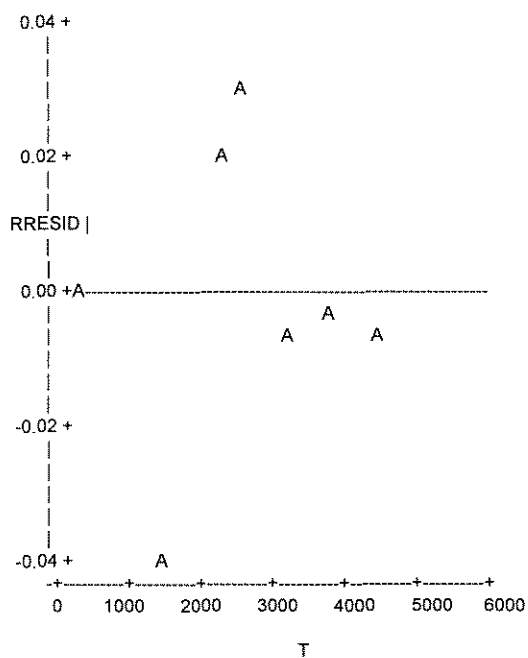
Plot of $R \cdot T$. Symbol used is 'A'.
 Plot of $RHAT \cdot T$. Symbol used is 'P'.



NOTE: 3 obs hidden.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

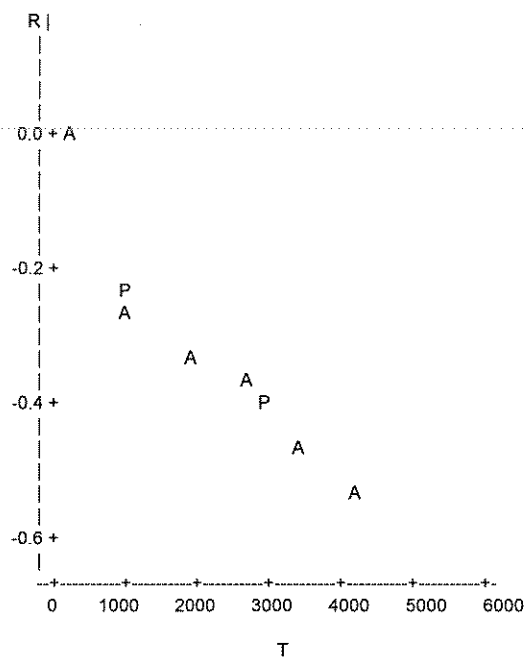
PLANILHA=6

Plot of $RRESID \cdot T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

PLANILHA=7

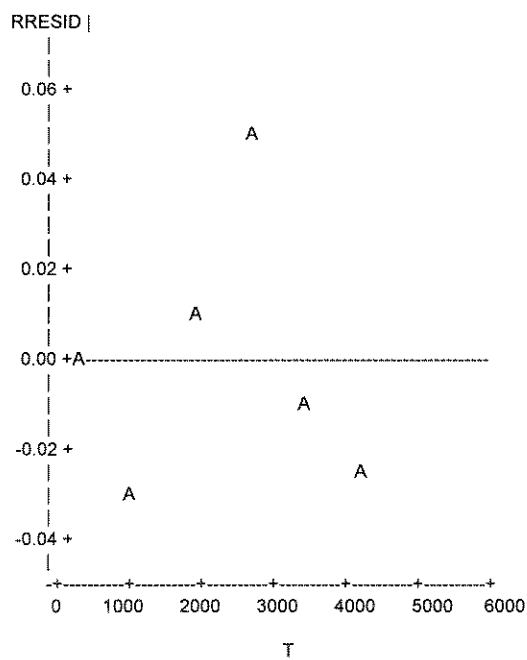
Plot of $R \cdot T$. Symbol used is 'A'.
 Plot of $RHAT \cdot T$. Symbol used is 'P'.



NOTE: 4 obs hidden.

Analise para Planilhas de 1 a 7 sem o parametro A

PLANILHA=7

Plot of $RRESID \cdot T$. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

227

Anexo 8a) Programa de entrada de dados

1- ACHAR A EQUAÇÃO $D = D_o \exp b \frac{1}{RT}$

D_o - const.

b - const.

R - 8,314

T_{m1} -343,15

D_1

T_{m2} -325,65

D_2

T_{m3} -354,60

D_3

T_{m4} -354,65

D_4

T_{m5} -330,55

D_5

T_{m6} -343,90

D_6

T_{m7} -321,15

D_7

r = raio médio $2,93 \cdot 10^{-3}$

$$R = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=20} \frac{1}{n^2} \exp \left[\frac{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{r^2} \right]$$

PLANILHAS	TEMPO (s)
1	1080 960 480 600 540 540
2	600 540 420 420 360
3	300 300 240 240 240
4	420 420 420 360
5	720 420 360 300 360
6	240 180 180 180 180 180
7	480 600 360 360 360

2- ACHAR AS EQUAÇÕES

$$1- D = D_o \exp \left(b \left(\frac{1}{8,314.343,15} \right) \right)$$

$$2- D = D_o \exp \left(b \left(\frac{1}{8,314.325,65} \right) \right)$$

$$3- D = D_o \exp \left(b \left(\frac{1}{8,314.354,60} \right) \right)$$

$$4- D = D_o \exp \left(b \left(\frac{1}{8,314.354,65} \right) \right)$$

$$5- D = D_o \exp \left(b \left(\frac{1}{8,314.330,55} \right) \right)$$

$$6- D = D_o \exp \left(b \left(\frac{1}{8,314.343,90} \right) \right)$$

$$7- D = D_o \exp \left(b \left(\frac{1}{8,314.321,15} \right) \right)$$

3- Com o D calculado para cada equação entrar na série de fourier para 20 termos para calcular R

$$R = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=20} \frac{1}{n^2} \exp\left[\frac{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{r^2}\right]$$

D	RT	1/RT
2,28 E-11	2686,6691	0,00037221
3,57 E-11	2769,8091	0,00036104
2,89 E-11	2852,9491	0,00035051
2,48 E-11	2686,6691	0,00037221
3,31 E-11	2769,8091	0,00036104
2,96 E-11	2852,9491	0,00035051

```
options ps=600;
data a;
input tm @@;
d0=2.3538e-10;
b=-6302.22209529215;
r=8.314;
d=d0*exp(b*(1/(r*tm)));
cards;
343.15
325.65
354.60
354.65
330.55
343.90
321.15
;
proc print;
run;
quit;
```

Análise 1a. equacao

OBS	D	T	PI	R	N	MR
1	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	1	0.96842
2	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	2	0.21988
3	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	3	0.08324
4	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	4	0.03740
5	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	5	0.01793
6	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	6	0.00875
7	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	7	0.00424
8	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	8	0.00200
9	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	9	0.00092
10	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	10	0.00040
11	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	11	0.00017
12	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	12	0.00007
13	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	13	0.00003
14	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	14	0.00001
15	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	15	0.00000
16	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	16	0.00000
17	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	17	0.00000
18	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	18	0.00000
19	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	19	0.00000
20	2.5847E-11	1080	3.14159	.00293	20	0.00000
21	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	1	0.97188
22	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	2	0.22304
23	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	3	0.08595
24	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	4	0.03960
25	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	5	0.01960
26	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	6	0.00995
27	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	7	0.00504
28	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	8	0.00252
29	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	9	0.00122
30	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	10	0.00058
31	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	11	0.00026
32	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	12	0.00011
33	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	13	0.00005
34	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	14	0.00002
35	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	15	0.00001
36	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	16	0.00000
37	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	17	0.00000
38	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	18	0.00000
39	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	19	0.00000
40	2.5847E-11	960	3.14159	.00293	20	0.00000
41	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	1	0.98584
42	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	2	0.23614
43	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	3	0.09773
44	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	4	0.04975
45	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	5	0.02800
46	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	6	0.01662
47	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	7	0.01015
48	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	8	0.00627
49	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	9	0.00389
50	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	10	0.00240
51	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	11	0.00147
52	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	12	0.00089
53	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	13	0.00053
54	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	14	0.00031
55	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	15	0.00018
56	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	16	0.00010
57	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	17	0.00006
58	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	18	0.00003
59	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	19	0.00002
60	2.5847E-11	480	3.14159	.00293	20	0.00001
61	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	1	0.98233
62	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	2	0.23279
63	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	3	0.09464

64	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	4	0.04699
65	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	5	0.02561
66	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	6	0.01462
67	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	7	0.00852
68	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	8	0.00499
69	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	9	0.00291
70	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	10	0.00168
71	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	11	0.00096
72	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	12	0.00053
73	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	13	0.00029
74	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	14	0.00015
75	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	15	0.00008
76	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	16	0.00004
77	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	17	0.00002
78	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	18	0.00001
79	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	19	0.00000
80	2.5847E-11	600	3.14159	.00293	20	0.00000
81	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	1	0.98408
82	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	2	0.23446
83	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	3	0.09617
84	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	4	0.04835
85	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	5	0.02678
86	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	6	0.01559
87	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	7	0.00930
88	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	8	0.00560
89	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	9	0.00337
90	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	10	0.00201
91	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	11	0.00119
92	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	12	0.00069
93	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	13	0.00039
94	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	14	0.00022
95	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	15	0.00012
96	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	16	0.00006
97	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	17	0.00003
98	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	18	0.00002
99	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	19	0.00001
100	2.5847E-11	540	3.14159	.00293	20	0.00000
101	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	1	0.98429
102	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	2	0.23466
103	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	3	0.09635
104	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	4	0.04851
105	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	5	0.02692
106	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	6	0.01571
107	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	7	0.00939
108	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	8	0.00567
109	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	9	0.00342
110	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	10	0.00205
111	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	11	0.00122
112	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	12	0.00071
113	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	13	0.00041
114	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	14	0.00023
115	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	15	0.00013
116	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	16	0.00007
117	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	17	0.00004
118	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	18	0.00002
119	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	19	0.00001
120	2.2954E-11	600	3.14159	.00293	20	0.00000
121	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	1	0.98585
122	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	2	0.23615
123	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	3	0.09774
124	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	4	0.04976
125	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	5	0.02801
126	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	6	0.01663
127	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	7	0.01015
128	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	8	0.00628
129	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	9	0.00389
130	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	10	0.00241

131	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	11	0.00147
132	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	12	0.00089
133	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	13	0.00053
134	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	14	0.00031
135	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	15	0.00018
136	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	16	0.00010
137	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	17	0.00006
138	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	18	0.00003
139	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	19	0.00002
140	2.2954E-11	540	3.14159	.00293	20	0.00001
141	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	1	0.98898
142	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	2	0.23916
143	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	3	0.10056
144	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	4	0.05234
145	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	5	0.03032
146	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	6	0.01864
147	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	7	0.01186
148	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	8	0.00769
149	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	9	0.00503
150	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	10	0.00330
151	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	11	0.00216
152	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	12	0.00141
153	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	13	0.00091
154	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	14	0.00058
155	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	15	0.00037
156	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	16	0.00023
157	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	17	0.00014
158	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	18	0.00009
159	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	19	0.00005
160	2.2954E-11	420	3.14159	.00293	20	0.00003
161	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	1	0.99054
162	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	2	0.24068
163	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	3	0.10201
164	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	4	0.05369
165	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	5	0.03154
166	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	6	0.01973
167	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	7	0.01281
168	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	8	0.00851
169	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	9	0.00572
170	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	10	0.00387
171	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	11	0.00262
172	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	12	0.00177
173	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	13	0.00119
174	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	14	0.00079
175	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	15	0.00052
176	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	16	0.00034
177	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	17	0.00022
178	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	18	0.00014
179	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	19	0.00009
180	2.2954E-11	360	3.14159	.00293	20	0.00006
181	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	1	0.99047
182	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	2	0.24061
183	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	3	0.10194
184	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	4	0.05362
185	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	5	0.03149
186	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	6	0.01968
187	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	7	0.01277
188	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	8	0.00847
189	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	9	0.00569
190	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	10	0.00384
191	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	11	0.00259
192	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	12	0.00175
193	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	13	0.00117
194	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	14	0.00078
195	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	15	0.00052
196	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	16	0.00034
197	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	17	0.00022

198	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	18	0.00014
199	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	19	0.00009
200	2.7758E-11	300	3.14159	.00293	20	0.00005
201	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	1	0.99237
202	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	2	0.24246
203	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	3	0.10371
204	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	4	0.05529
205	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	5	0.03303
206	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	6	0.02108
207	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	7	0.01402
208	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	8	0.00957
209	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	9	0.00664
210	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	10	0.00465
211	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	11	0.00327
212	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	12	0.00230
213	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	13	0.00162
214	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	14	0.00114
215	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	15	0.00079
216	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	16	0.00055
217	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	17	0.00038
218	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	18	0.00026
219	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	19	0.00017
220	2.7758E-11	240	3.14159	.00293	20	0.00012
221	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	1	0.98668
222	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	2	0.23695
223	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	3	0.09848
224	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	4	0.05043
225	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	5	0.02861
226	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	6	0.01714
227	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	7	0.01058
228	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	8	0.00662
229	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	9	0.00417
230	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	10	0.00262
231	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	11	0.00163
232	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	12	0.00101
233	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	13	0.00061
234	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	14	0.00037
235	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	15	0.00022
236	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	16	0.00013
237	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	17	0.00007
238	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	18	0.00004
239	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	19	0.00002
240	2.7766E-11	420	3.14159	.00293	20	0.00001
241	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	1	0.98857
242	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	2	0.23877
243	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	3	0.10019
244	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	4	0.05200
245	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	5	0.03001
246	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	6	0.01837
247	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	7	0.01162
248	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	8	0.00749
249	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	9	0.00487
250	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	10	0.00317
251	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	11	0.00206
252	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	12	0.00133
253	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	13	0.00085
254	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	14	0.00054
255	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	15	0.00033
256	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	16	0.00021
257	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	17	0.00012
258	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	18	0.00007
259	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	19	0.00004
260	2.7766E-11	360	3.14159	.00293	20	0.00003
261	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	1	0.98053
262	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	2	0.23109
263	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	3	0.09309
264	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	4	0.04563

265	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	5	0.02446
266	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	6	0.01368
267	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	7	0.00779
268	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	8	0.00444
269	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	9	0.00251
270	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	10	0.00140
271	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	11	0.00077
272	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	12	0.00041
273	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	13	0.00021
274	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	14	0.00011
275	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	15	0.00005
276	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	16	0.00003
277	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	17	0.00001
278	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	18	0.00001
279	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	19	0.00000
280	2.3759E-11	720	3.14159	.00293	20	0.00000
281	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	1	0.98859
282	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	2	0.23879
283	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	3	0.10021
284	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	4	0.05202
285	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	5	0.03003
286	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	6	0.01838
287	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	7	0.01163
288	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	8	0.00750
289	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	9	0.00487
290	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	10	0.00318
291	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	11	0.00206
292	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	12	0.00133
293	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	13	0.00085
294	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	14	0.00054
295	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	15	0.00034
296	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	16	0.00021
297	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	17	0.00013
298	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	18	0.00008
299	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	19	0.00004
300	2.3759E-11	420	3.14159	.00293	20	0.00003
301	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	1	0.99021
302	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	2	0.24036
303	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	3	0.10170
304	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	4	0.05340
305	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	5	0.03128
306	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	6	0.01950
307	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	7	0.01261
308	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	8	0.00833
309	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	9	0.00557
310	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	10	0.00374
311	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	11	0.00251
312	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	12	0.00169
313	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	13	0.00112
314	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	14	0.00074
315	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	15	0.00049
316	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	16	0.00032
317	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	17	0.00020
318	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	18	0.00013
319	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	19	0.00008
320	2.3759E-11	360	3.14159	.00293	20	0.00005
321	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	1	0.99184
322	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	2	0.24194
323	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	3	0.10321
324	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	4	0.05482
325	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	5	0.03259
326	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	6	0.02068
327	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	7	0.01366
328	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	8	0.00925
329	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	9	0.00636
330	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	10	0.00441
331	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	11	0.00307

332	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	12	0.00213
333	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	13	0.00148
334	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	14	0.00102
335	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	15	0.00070
336	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	16	0.00048
337	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	17	0.00032
338	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	18	0.00022
339	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	19	0.00014
340	2.3759E-11	300	3.14159	.00293	20	0.00009
341	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	1	0.99286
342	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	2	0.24294
343	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	3	0.10417
344	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	4	0.05573
345	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	5	0.03344
346	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	6	0.02146
347	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	7	0.01437
348	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	8	0.00988
349	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	9	0.00691
350	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	10	0.00488
351	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	11	0.00347
352	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	12	0.00247
353	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	13	0.00176
354	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	14	0.00125
355	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	15	0.00089
356	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	16	0.00062
357	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	17	0.00044
358	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	18	0.00030
359	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	19	0.00021
360	2.5971E-11	240	3.14159	.00293	20	0.00014
361	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	1	0.99464
362	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	2	0.24468
363	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	3	0.10586
364	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	4	0.05735
365	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	5	0.03497
366	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	6	0.02289
367	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	7	0.01568
368	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	8	0.01108
369	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	9	0.00799
370	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	10	0.00584
371	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	11	0.00431
372	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	12	0.00320
373	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	13	0.00239
374	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	14	0.00178
375	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	15	0.00133
376	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	16	0.00099
377	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	17	0.00073
378	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	18	0.00054
379	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	19	0.00040
380	2.5971E-11	180	3.14159	.00293	20	0.00029
381	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	1	0.98781
382	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	2	0.23804
383	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	3	0.09950
384	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	4	0.05137
385	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	5	0.02944
386	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	6	0.01787
387	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	7	0.01119
388	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	8	0.00713
389	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	9	0.00457
390	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	10	0.00293
391	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	11	0.00187
392	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	12	0.00119
393	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	13	0.00075
394	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	14	0.00046
395	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	15	0.00028
396	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	16	0.00017
397	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	17	0.00010
398	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	18	0.00006

399	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	19	0.00003
400	2.2217E-11	480	3.14159	.00293	20	0.00002
401	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	1	0.98479
402	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	2	0.23514
403	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	3	0.09680
404	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	4	0.04891
405	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	5	0.02727
406	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	6	0.01600
407	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	7	0.00963
408	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	8	0.00586
409	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	9	0.00357
410	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	10	0.00216
411	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	11	0.00129
412	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	12	0.00076
413	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	13	0.00044
414	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	14	0.00025
415	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	15	0.00014
416	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	16	0.00008
417	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	17	0.00004
418	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	18	0.00002
419	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	19	0.00001
420	2.2217E-11	600	3.14159	.00293	20	0.00001
421	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	1	0.99085
422	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	2	0.24097
423	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	3	0.10229
424	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	4	0.05395
425	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	5	0.03179
426	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	6	0.01995
427	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	7	0.01301
428	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	8	0.00867
429	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	9	0.00586
430	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	10	0.00399
431	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	11	0.00272
432	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	12	0.00185
433	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	13	0.00125
434	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	14	0.00084
435	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	15	0.00056
436	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	16	0.00037
437	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	17	0.00024
438	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	18	0.00016
439	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	19	0.00010
440	2.2217E-11	360	3.14159	.00293	20	0.00006

OBS	D	T	TYPE	FREQ	RSUM	PI	RR	
1	2.2217E-11	360	0	20	1.47947	3.14159	0.89941	
2	2.2217E-11	480	0	20	1.45479	3.14159	0.88440	D7
3	2.2217E-11	600	0	20	1.43317	3.14159	0.87126	
4	2.2954E-11	360	0	20	1.47684	3.14159	0.89781	
5	2.2954E-11	420	0	20	1.46384	3.14159	0.88991	
6	2.2954E-11	540	0	20	1.44047	3.14159	0.87570	D2
7	2.2954E-11	600	0	20	1.42982	3.14159	0.86922	
8	2.3759E-11	300	0	20	1.48842	3.14159	0.90485	
9	2.3759E-11	360	0	20	1.47402	3.14159	0.89610	
10	2.3759E-11	420	0	20	1.46079	3.14159	0.88806	D5
11	2.3759E-11	720	0	20	1.40620	3.14159	0.85487	
12	2.5847E-11	480	0	20	1.44038	3.14159	0.87564	
13	2.5847E-11	540	0	20	1.42843	3.14159	0.86838	
14	2.5847E-11	600	0	20	1.41718	3.14159	0.86154	D1
15	2.5847E-11	960	0	20	1.35983	3.14159	0.82668	
16	2.5847E-11	1080	0	20	1.34346	3.14159	0.81672	
17	2.5971E-11	180	0	20	1.51695	3.14159	0.92219	
18	2.5971E-11	240	0	20	1.49820	3.14159	0.91079	D6
19	2.7758E-11	240	0	20	1.49343	3.14159	0.90790	
20	2.7758E-11	300	0	20	1.47621	3.14159	0.89743	D3
21	2.7766E-11	360	0	20	1.46064	3.14159	0.88796	
22	2.7766E-11	420	0	20	1.44640	3.14159	0.87930	D4

```

options ps=600;
data a;
input d t @@;
pi=3.1415926535;
r=0.00293;
cards;
2.5847e-11 1080
2.5847e-11 960
2.5847e-11 480    D1
2.5847e-11 600
2.5847e-11 540
2.2954e-11 600
2.2954e-11 540
2.2954e-11 420    D2
2.2954e-11 360
2.7758e-11 300
2.7758e-11 240    D3
2.7766e-11 420
2.7766e-11 360    D4
2.3759e-11 720
2.3759e-11 420
2.3759e-11 360    D5
2.3759e-11 300
2.5971e-11 240
2.5971e-11 180    D6
2.2217e-11 480
2.2217e-11 600
2.2217e-11 360    D7

```

```

;
data b; set a;

do n=1 to 20;
  mr=(1/(n**2))*exp(((n**2)*(pi**2)*d*t)/(r**2));
  output;
end;
proc print;
run;
proc sort; by d t;
proc means noprint; by d t; var mr;
output out=fim sum=rsum;
data final; set fim;
pi=3.1415926535;
rr=(6/(pi**2))*rsum;
proc print;
quit;

options ps=600;
data a;
input d rrt @@;
cards;
2.28e-11 0.00037221
2.48e-11 0.00037221
1.25e-11 0.00037221
4.17e-11 0.00037221
3.57e-11 0.00036104
3.31e-11 0.00036104
3.10e-11 0.00036104
2.89e-11 0.00036104
2.89e-11 0.00035051
2.96e-11 0.00035051
4.09e-11 0.00035051
3.70e-11 0.00035051
;
proc print;
title 'Analise 2a. equacao';
run;
proc nlin outest=uuu; parms d0=0.0000000001 b=-1000 ;
model d=d0*exp(b*rrt);
der.d0=exp(b*rrt);
der.b=d0*rrt*exp(b*rrt);
output out=saida p=rhat r=rresid;
proc print data=uuu; format d0 20.15 b 20.15;
run;
proc plot data=saida;
plot d*rrt='A' rhat*rrt='P' /overlay vpos=25;
plot rresid*rrt / vref=0 vpos=25;
run;
quit;

```

ANEXO 9) - Base de cálculo para determinação do número de Reynolds.

Cálculo de Reynolds							
Adimensionais para escoamento em queda livre (Re p/fluido e Re p/partícula)							
						densidade da part.(kg/m3)	1204
						densidade do fluido(kg/m3)	1,15
						viscosidade do fluido(kg/ms)	1,85E-05
						diâmetro da partícula(m)	5,86E-03
						velocidade do fluido(m/s)	0,52
	Cálculo da velocidade da partícula para cada passagem pela torre						
1º passo	peso / tempo = vazão massica						
2º passo	vazão massica / densidade da part =vazão volumétrica						
3º passo	vazão volumétrica / área = velocidade do sólido						
4º passo	velocidade do sólido * fator de correção = Vp						
Experimento 1							
peso da m.p.	(kg)	3,012	2,897	2,718	2,717	2,611	2,594
tempo de escoamento	(s)		1080	960	480	600	540
	1º passagem	2º passagem	3º passagem	4º passagem	5º passagem	6º passagem	
1º passo	2,79E-03	3,02E-03	5,66E-03	4,53E-03	4,84E-03	4,80E-03	
2º passo	2,32E-06	2,51E-06	4,70E-06	3,76E-06	4,02E-06	3,99E-06	
3º passo	1,84E-05	2,00E-05	3,74E-05	2,99E-05	3,20E-05	3,18E-05	
4º passo	3,43E-05	3,72E-05	6,97E-05	5,58E-05	5,95E-05	5,92E-05	
Re (part)=	0,0125	0,0135	0,0254	0,0203	0,0217	0,0215	
Re (fluido)=	189,42						
Experimento 2							
peso da m.p.	(kg)	2,142	2,089	2,039	1,989	1,938	1,894
tempo de escoamento	(s)		600	540	420	420	360
	1º passagem	2º passagem	3º passagem	4º passagem	5º passagem		
1º passo	3,57E-03	3,87E-03	4,85E-03	4,74E-03	5,38E-03		
2º passo	2,97E-06	3,21E-06	4,03E-06	3,93E-06	4,47E-06		
3º passo	2,36E-05	2,56E-05	3,21E-05	3,13E-05	3,56E-05		
4º passo	4,40E-05	4,76E-05	5,98E-05	5,83E-05	6,63E-05		
Re (part)=	0,0160	0,0174	0,0218	0,0212	0,0241		
Re (fluido)=	189,42						
Experimento 3							
peso da m.p.	(kg)	1,885	1,841	1,742	1,721	1,676	1,640
tempo de escoamento	(s)		300	300	240	240	240
	1º passagem	2º passagem	3º passagem	4º passagem	5º passagem		
1º passo	6,28E-03	6,14E-03	7,26E-03	7,17E-03	6,98E-03		
2º passo	5,22E-06	5,10E-06	6,03E-06	5,96E-06	5,80E-06		
3º passo	4,16E-05	4,06E-05	4,80E-05	4,74E-05	4,62E-05		
4º passo	7,74E-05	7,56E-05	8,94E-05	8,83E-05	8,60E-05		
Re (part)=	0,0282	0,0275	0,0326	0,0322	0,0313		
Re (fluido)=	189,42						

ANEXO 9) - Continuação

Experimento 4								
peso da m.p.	(kg)	2,599	2,551	2,494	2,437	2,166		
tempo de escoamento	(s)		420	420	420	360		
	1º passagem	2º passagem	3º passagem	4º passagem				
1º passo	6,19E-03	6,07E-03	5,94E-03	6,77E-03				
2º passo	5,14E-06	5,04E-06	4,93E-06	5,62E-06				
3º passo	4,09E-05	4,02E-05	3,93E-05	4,48E-05				
4º passo	7,62E-05	7,48E-05	7,31E-05	8,34E-05				
Re (part)=	0,0278	0,0272	0,0266	0,0304				
Re (fluido)=	189,42							
Experimento 5								
peso da m.p.	(kg)	2,452	2,403	2,318	2,267	2,176	2,166	
tempo de escoamento	(s)		720	420	360	300	360	
	1º passagem	2º passagem	3º passagem	4º passagem	5º passagem			
1º passo	3,41E-03	5,72E-03	6,44E-03	7,56E-03	6,04E-03			
2º passo	2,83E-06	4,75E-06	5,35E-06	6,28E-06	5,02E-06			
3º passo	2,25E-05	3,78E-05	4,26E-05	5,00E-05	4,00E-05			
4º passo	4,19E-05	7,05E-05	7,93E-05	9,31E-05	7,44E-05			
Re (part)=	0,0153	0,0257	0,0289	0,0339	0,0271			
Re (fluido)=	189,42							
Experimento 6								
peso da m.p.	(kg)	1,336	1,326	1,307	1,301	1,275	1,264	1,248
tempo de escoamento	(s)		240	180	180	180	180	180
	1º passagem	2º passagem	3º passagem	4º passagem	5º passagem	6º passagem		
1º passo	5,57E-03	7,37E-03	7,26E-03	7,23E-03	7,08E-03	7,02E-03		
2º passo	4,62E-06	6,12E-06	6,03E-06	6,00E-06	5,88E-06	5,83E-06		
3º passo	3,68E-05	4,87E-05	4,80E-05	4,78E-05	4,68E-05	4,64E-05		
4º passo	6,85E-05	9,07E-05	8,94E-05	8,90E-05	8,72E-05	8,65E-05		
Re (part)=	0,0250	0,0330	0,0326	0,0324	0,0318	0,0315		
Re (fluido)=	189,42							
Experimento 7								
peso da m.p.	(kg)	2,084	2,054	1,996	1,956	1,924	1,857	
tempo de escoamento	(s)		480	600	360	360	360	
	1º passagem	2º passagem	3º passagem	4º passagem	5º passagem			
1º passo	4,34E-03	3,42E-03	5,54E-03	5,43E-03	5,34E-03			
2º passo	3,61E-06	2,84E-06	4,61E-06	4,51E-06	4,44E-06			
3º passo	2,87E-05	2,26E-05	3,67E-05	3,59E-05	3,53E-05			
4º passo	5,35E-05	4,22E-05	6,83E-05	6,69E-05	6,58E-05			
Re (part)=	0,0195	0,0154	0,0249	0,0244	0,0240			
Re (fluido)=	189,42							

ANEXO 10) - Base de cálculo para determinação do número de Nusselt e Prandtl.

Adimensionais para escoamento em queda livre(Re p/fluido e Re p/fluido+partic.)											
$Re = \frac{V_{\infty} \rho \ D_p}{\mu_f}$			$Nu = \frac{h \ D_p}{k_f}$			$Pr = \frac{\mu \ C_p}{k_f}$					
Re			Nu								
Va - velocidade do ar			m/s	0,52	h - coef. de transm. de calor (SARTORI)						
ro - densidade			kg/m3	1,15	U(tc)- coef. global transm.calor (troc.calor)						
Dp- diâmetro da partícula			m	5,86E-03	U(as)- coef. global transm.calor (secador)						
mi- viscosidade			kg/m.s	1,85E-05	U(s)- coef. global transm.calor (raio/3)						
Cp-calor espec.ar			kJ/kg°K	1,007	Do- diâmetro da seq.transv.secador					m	0,4
Vp- velocidade da partícula			m/s		k- condutividade térmica do ar					kJ/m.s.°K	2,67E-05
Vazão-			m3/s								
Area-			m2		h(1)-aquecimento equação 1						
fator de corr. (static mixer)			1,86210		h(2)-aquecimento equação 2						
					h(3)-resfriamento equação 2						
	Re(part)	Re(fluido)	R(p)+R(f)	LN(Re)	(h1)	Nu (h1)	LN Nu (h1)	(h2)	Nu(h2)	LN Nu(h2)	Pr
1	0,0125	189,40	189,41	5,24393	0,0016	0,3512	-1,04651	0,0021	0,4609	-0,7746	0,69773
2	0,0135	189,40	189,41	5,24393	0,0017	0,3731	-0,98589	0,0020	0,4390	-0,8234	0,69773
3	0,0254	189,40	189,43	5,24400	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0014	0,3073	-1,1800	0,69773
4	0,0203	189,40	189,42	5,24397	0,0015	0,3292	-1,11105	0,0016	0,3512	-1,0465	0,69773
5	0,0217	189,40	189,42	5,24398	0,0014	0,3073	-1,18004	0,0015	0,3292	-1,1110	0,69773
6	0,0215	189,40	189,42	5,24397	0,0014	0,3073	-1,18004	0,0015	0,3292	-1,1110	0,69773
1	0,0160	189,40	189,42	5,24395	0,0015	0,3292	-1,11105	0,0018	0,3951	-0,9287	0,69773
2	0,0174	189,40	189,42	5,24395	0,0017	0,3731	-0,98589	0,0018	0,3951	-0,9287	0,69773
3	0,0218	189,40	189,42	5,24398	0,0016	0,3512	-1,04651	0,0017	0,3731	-0,9859	0,69773
4	0,0212	189,40	189,42	5,24397	0,0014	0,3073	-1,18004	0,0016	0,3512	-1,0465	0,69773
5	0,0241	189,40	189,42	5,24399	0,0015	0,3292	-1,11105	0,0016	0,3512	-1,0465	0,69773
1	0,0282	189,40	189,43	5,24401	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0016	0,3512	-1,0465	0,69773
2	0,0275	189,40	189,43	5,24401	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0016	0,3512	-1,0465	0,69773
3	0,0326	189,40	189,43	5,24403	0,0010	0,2195	-1,51651	0,0014	0,3073	-1,1800	0,69773
4	0,0322	189,40	189,43	5,24403	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0014	0,3073	-1,1800	0,69773
5	0,0313	189,40	189,43	5,24403	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0015	0,3292	-1,1110	0,69773
1	0,0278	189,40	189,43	5,24401	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0016	0,3512	-1,0465	0,69773
2	0,0272	189,40	189,43	5,24400	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0015	0,3292	-1,1110	0,69773
3	0,0266	189,40	189,43	5,24400	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0015	0,3292	-1,1110	0,69773
4	0,0304	189,40	189,43	5,24402	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0014	0,3073	-1,1800	0,69773
1	0,0153	189,40	189,42	5,24394	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0016	0,3512	-1,0465	0,69773
2	0,0257	189,40	189,43	5,24400	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0015	0,3292	-1,1110	0,69773
3	0,0289	189,40	189,43	5,24401	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0014	0,3073	-1,1800	0,69773
4	0,0339	189,40	189,43	5,24404	0,0009	0,1975	-1,62187	0,0014	0,3073	-1,1800	0,69773
5	0,0271	189,40	189,43	5,24400	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0015	0,3292	-1,1110	0,69773
1	0,0250	189,40	189,43	5,24399	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0015	0,3292	-1,1110	0,69773
2	0,0330	189,40	189,43	5,24404	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0014	0,3073	-1,1800	0,69773
3	0,0326	189,40	189,43	5,24403	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0014	0,3073	-1,1800	0,69773
4	0,0324	189,40	189,43	5,24403	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0014	0,3073	-1,1800	0,69773
5	0,0318	189,40	189,43	5,24403	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0014	0,3073	-1,1800	0,69773
6	0,0315	189,40	189,43	5,24403	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0014	0,3073	-1,1800	0,69773
1	0,0195	189,40	189,42	5,24396	0,0014	0,3073	-1,18004	0,0016	0,3512	-1,0465	0,69773
2	0,0154	189,40	189,42	5,24394	0,0019	0,4170	-0,87466	0,0018	0,3951	-0,9287	0,69773
3	0,0249	189,40	189,42	5,24399	0,0017	0,3731	-0,98589	0,0016	0,3512	-1,0465	0,69773
4	0,0244	189,40	189,42	5,24399	0,0015	0,3292	-1,11105	0,0015	0,3292	-1,1110	0,69773
5	0,0240	189,40	189,42	5,24399	0,0017	0,3731	-0,98589	0,0017	0,3731	-0,9859	0,69773

ANEXO 10) - Continuação

Adimensionais para escoamento em queda livre considerando o Reynolds da partícula								
	Re(part)	LN Re(part)	(h1)	Nu (h1)	LN Nu (h1)	(h2)	Nu(h2)	LN Nu(h2)
1	0,0125	-4,3820	0,0016	0,3512	-1,04651	0,0021	0,4609	-0,7746
2	0,0135	-4,3051	0,0017	0,3731	-0,98589	0,0020	0,4390	-0,8234
3	0,0254	-3,6730	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0014	0,3073	-1,1800
4	0,0203	-3,8971	0,0015	0,3292	-1,11105	0,0016	0,3512	-1,0465
5	0,0217	-3,8304	0,0014	0,3073	-1,18004	0,0015	0,3292	-1,1110
6	0,0215	-3,8397	0,0014	0,3073	-1,18004	0,0015	0,3292	-1,1110
1	0,0160	-4,1352	0,0015	0,3292	-1,11105	0,0018	0,3951	-0,9287
2	0,0174	-4,0513	0,0017	0,3731	-0,98589	0,0018	0,3951	-0,9287
3	0,0218	-3,8258	0,0016	0,3512	-1,04651	0,0017	0,3731	-0,9859
4	0,0212	-3,8538	0,0014	0,3073	-1,18004	0,0016	0,3512	-1,0465
5	0,0241	-3,7255	0,0015	0,3292	-1,11105	0,0016	0,3512	-1,0465
1	0,0282	-3,5684	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0016	0,3512	-1,0465
2	0,0275	-3,5936	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0016	0,3512	-1,0465
3	0,0326	-3,4234	0,0010	0,2195	-1,51651	0,0014	0,3073	-1,1800
4	0,0322	-3,4358	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0014	0,3073	-1,1800
5	0,0313	-3,4641	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0015	0,3292	-1,1110
1	0,0278	-3,5827	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0016	0,3512	-1,0465
2	0,0272	-3,6045	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0015	0,3292	-1,1110
3	0,0266	-3,6268	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0015	0,3292	-1,1110
4	0,0304	-3,4933	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0014	0,3073	-1,1800
1	0,0153	-4,1799	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0016	0,3512	-1,0465
2	0,0257	-3,6613	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0015	0,3292	-1,1110
3	0,0289	-3,5439	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0014	0,3073	-1,1800
4	0,0339	-3,3843	0,0009	0,1975	-1,62187	0,0014	0,3073	-1,1800
5	0,0271	-3,6082	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0015	0,3292	-1,1110
1	0,0250	-3,6889	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0015	0,3292	-1,1110
2	0,0330	-3,4112	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0014	0,3073	-1,1800
3	0,0326	-3,4234	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0014	0,3073	-1,1800
4	0,0324	-3,4296	0,0011	0,2414	-1,42120	0,0014	0,3073	-1,1800
5	0,0318	-3,4483	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0014	0,3073	-1,1800
6	0,0315	-3,4578	0,0012	0,2634	-1,33419	0,0014	0,3073	-1,1800
1	0,0195	-3,9373	0,0014	0,3073	-1,18004	0,0016	0,3512	-1,0465
2	0,0154	-4,1734	0,0019	0,4170	-0,87466	0,0018	0,3951	-0,9287
3	0,0249	-3,6929	0,0017	0,3731	-0,98589	0,0016	0,3512	-1,0465
4	0,0244	-3,7132	0,0015	0,3292	-1,11105	0,0015	0,3292	-1,1110
5	0,0240	-3,7297	0,0017	0,3731	-0,98589	0,0017	0,3731	-0,9859

ANEXO 11) Patente Industrial nº8700583

8700583

Relatório Descritivo da Patente de Invenção: "EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES".

Refere-se a presente invenção a um conjunto de dispositivos destinados a secagem de grãos ou de outros materiais granulares que, utilizando promotores de mistura de sólidos, aumenta o contato do material a ser seco com ar de secagem, durante o seu percurso no interior do secador.

10 A secagem de grãos, especificamente, é uma etapa do pré-processamento mais importante, sob o ponto de vista de um armazenamento que não acarrete prejuízos na qualidade do produto, pois dependendo dos altos níveis de umidade nos grãos e das condições ambientais ad
15 versas, acarretará a deterioração dos grãos.

Existem, também, tipos de grãos, como os oleaginosos, que devem sofrer uma secagem antes de entrarem no processo industrial de extração de óleos.

Para os grãos que serão secos, tanto
20 para o armazenamento quanto para o processamento industrial, o problema maior dos secadores é o seu consumo energético. É sabido que na tentativa de melhorar a eficiência de secagem e, consequentemente, a redução no consumo energético, têm surgido várias formas de otimizar este processo de secagem, como a introdução de modificação
25 dos equipamentos para obter diferentes maneiras de contacto com o ar como fluxo paralelo, fluxo cruzado e fluxo intermitente. Também recorre-se a diferentes princípios de secagem, tais como leito de jorro, leito agitado,
30 leito agito-fluidizado, leito fluidizado, leito vibrado,

ANEXO 11) Continuação

- 2 -

38700503

leito vibro-fluidizado e outros. No entanto, tais tentativas têm sido conduzidas a nível de laboratório e não apresentam ainda grandes vantagens a nível industrial, ou pela dificuldade de construção para grandes portes (escalas), ou pela dificuldade de escalagem.

Assim, o secador de grãos atualmente empregado é o secador convencional que recebe o grão na parte superior, sofrendo este grão uma queda livre pela ação da gravidade. O ar de secagem é admitido pela parte inferior destes secadores, operando assim a secagem em contra-corrente.

Este processo de secagem industrial, além de requerer uma vazão do ar excessivamente alta, não apresenta flexibilidade operacional para poder ser utilizado com diferentes tipos de material.

A necessidade de superdimensionamento deste tipo de secador convencional, está aliada principalmente à impossibilidade de variação na taxa de alimentação do sólido, necessitando, portanto, trabalhar com o tempo de residência maior que o necessário para garantir a segurança operacional na secagem, obtendo-se assim o efeito de sobre secagem.

Uma das tentativas de otimizar o fluxo de sólido e ar de secagem nestes secadores resultou na inclusão de calotas internas que causam danos mecânicos durante a queda do grão.

Não são para sanar estes inconvenientes, mas principalmente para obter um secador energeticamente econômico, com flexibilidade operacional que permita seu uso para diferentes materiais e diferentes níveis de umidades, foi desenvolvido o equipamento para secagem de materiais granulares em geral, objeto da presente invenção, que emprega promotores de mistura dos sólidos no interior do secador.

Estes promotores são placas torcidas perfuradas, que devem ser colocadas com os sentidos de tor

ANEXO 11) Continuação

- 3 -

2870593

ção alternados para permitir uma maior mistura de sólidos durante o escoamento pela ação da gravidade. Assim, aumenta-se a eficiência de secagem pela homogeneidade no contato sólido-ar. Uma construção mais simples, indistintamente, seria utilizando placas retas, no entanto, não são tão eficientes como as torcidas.

A perfuração nas placas torcidas é para permitir uma melhor distribuição do ar de secagem no interior do secador.

10 A inclinação necessária para estas placas deve obedecer às limitações de cada material granular a ser seco, isto é, a inclinação referencial do ângulo de talude. O ângulo de talude é o ângulo formado pelos materiais granulares em repouso em relação à superfície horizontal, onde a partir deste ângulo, o material começa a escoar.

O dimensionamento da capacidade do secador é determinado pelo nível de umidade inicial e final, e pela quantidade de material a ser seco, assim como pelos outros parâmetros importantes para o dimensionamento de qualquer secador. No entanto, para se ter uma idéia clara, podemos recorrer à alguns valores numéricos. O ângulo de talude correspondente à ervilha é de 25° e para "pelets" de difícil escoamento é de 45°. Isto é, para maioria dos materiais de interesse, a inclinação normalmente se situará entre 25° a 40°. É evidente que a variação teórica ocorre de 0° (repouso em secadores estáticos) até 90° (queda livre em secadores convencionais). Por outro lado, a variação teórica na velocidade de escoamento se situa entre 0 m/s até a velocidade terminal, sendo que é praticamente impossível de se construir um secador com dimensões que desenvolvam estas velocidades, pois pela própria definição, a velocidade terminal é a velocidade máxima constante atingida pelo grão em queda livre.

35 Como ilustração, temos para materiais leves como alfafa uma velocidade terminal de 5,3 m/s, e

ANEXO 11) Continuação

- 4 -

38700583

para um material como soja, velocidade terminal de 13,3 m/s. Para materiais biológicos, por exemplo, temos o pêssego que apresenta uma velocidade terminal de 41 m/s.

Portanto, ressalta-se que estes dois
5 parâmetros, ângulo de talude e velocidade terminal, são os parâmetros importantes para a concepção adotada na presente invenção, no tocante à variação do escoamento do material a ser seco. Isto é, através da variação da inclinação das placas colocadas no interior do secador, temos
10 a variação no escoamento conjugado à velocidade terminal do material, obtendo-se assim, o ajuste desejado na vazão do sólido, além do efeito da mistura durante o seu percurso. Inclui-se ainda, para permitir maior flexibilidade operacional, uma regulação do escoamento do sólido na
15 saída do secador.

Todos estes efeitos no escoamento do sólido apresentam vantagens operacionais sem causar danos mecânicos no material.

Outro efeito importante, resultante des
20 tes já mencionados, é o efeito combinado de velocidade do ar de secagem e a velocidade do escoamento do material, que através do seu contato íntimo e homogêneo, diminui a necessidade de altas vazões do ar. Em outras palavras, resulta numa economia em potência do ventilador empregado, um tempo de secagem reduzido e uma redução da energia para aquecer o ar de secagem.
25

Para uma melhor compreensão do funcionamento e composição do equipamento para secagem de materiais granulares, objeto da presente invenção, é descrito pormenorizadamente o único desenho em anexo, que representa um esquema do equipamento, mostrando seus componentes principais.
30

De acordo com a figura 1, verifica-se que o equipamento desenvolvido é constituído de um ventilador (1) para insuflar o ar ambiente, sendo este ar distribuído de acordo com as vazões exigidas para a secagem
35

ANEXO 11) Continuação

- 5 -

38700583

e transporte pneumático do material, através da regulação de dispositivos como válvulas.

Uma parte do ar utilizado para a secagem é aquecida através de resistências elétricas (3) ou outra fonte que forneça o mesmo efeito com temperatura variável de acordo com as exigências do processo.

Outra parte do ar, regulada pela válvula (2), sem aquecimento é utilizada para o transporte pneumático do material até o topo (4) do secador, através de tubulação de transporte (5), que além de efetuar o transporte, promove um resfriamento do material e separação de impurezas pesadas que irão se depositar no fundo da tubulação de transporte, sendo descarregadas através de uma abertura (6) ali instalada.

Os materiais úmidos transportados serão realimentados no topo (4) do secador, onde a umidade desejada no material será obtida pela variação da velocidade do ar na seção (7), que é obtida pela abertura ou fechamento de uma válvula (8) instalada para esta função.

O material que atingir a umidade desejada, será arrastado pelo ar, por diferença de peso, através da tubulação de descarga (9) e é recolhido na abertura (10), sendo que o material que ainda não apresenta a umidade desejada (material mais pesado), circula novamente pelo interior do secador através do tubo (11) alimentador, saindo pelo tubo (14) de fundo, após passar por um conjunto de placas torcidas e perfuradas (15) instaladas no interior do secador.

Numa operação descontínua, o material seco ao sair do tubo (14) poderá ser retirado pela abertura (6) ou insuflado através da tubulação (5) para sair pela abertura (10).

O ar de descarga sai pela abertura (13), arrastando impurezas leves, completando assim a limpeza durante o processo. Caso apresente vantagens, poderá este ar de descarga ser reaproveitado através de junção da

ANEXO 11) Continuação

- 6 -

38700583

seção (13) com o ventilador (1).

A alimentação inicial, assim como a alimentação necessária durante a secagem para manter a operação contínua, é feita através do silo alimentador com 5 dispositivo de alimentação (12) localizado na parte inferior do silo (17), onde a taxa de alimentação é regulada pela velocidade criada neste alimentador.

Observa-se ainda na citada figura que o escoamento do material para baixo, assim como o escoamento do ar ascendente, é realizado no espaço formado entre as placas torcidas e perfuradas (15) e que apresentam torções alternadas. Dependendo principalmente da quantidade e do tipo de material a ser seco, o secador admitirá uma quantidade variável de placas (15) no seu inte- 15 rior, para não prejudicar a flexibilidade operacional, permitindo inclusive a facilidade de ampliação de uma instalação deste tipo de secador já existente. Nos secadores industriais de grande porte, o ar de secagem será admitido inclusive no interior do duto (16) que neste caso se- 20 rá perfurado para conjugar os fluxos de ar de secagem em várias direções no interior do secador.

As placas torcidas e perfuradas (15) são instaladas de forma envolvente no tubo (16) que pode ser perfurado ou não. Ditas placas (15) têm suas incli- 25 nações reguláveis, através de um direcionador (18) para permitir variações na velocidade descendente do material.

É de conhecimento geral de que os materiais biológicos, como grãos, apresentam a vantagem da aplicação da relação aquecimento e resfriamento durante a 30 secagem. No entanto, para os materiais ou processos que não apresentam uma economia significativa de conjugar estes efeitos, o transporte pneumático pode ser substituído por outros tipos de transporte.

Nos experimentos realizados com o e- 35 quipamento da invenção, utilizando a soja como material a ser seco, obteve-se secagem partindo de 25% de umidade

ANEXO 11) Continuação

- 7 -

78700583

na base seca até 16% de umidade na base seca, utilizando-se somente 20% da vazão do ar de secagem atualmente empregado nos secadores industriais.

ANEXO 11) Continuação

38700583

- 1 -

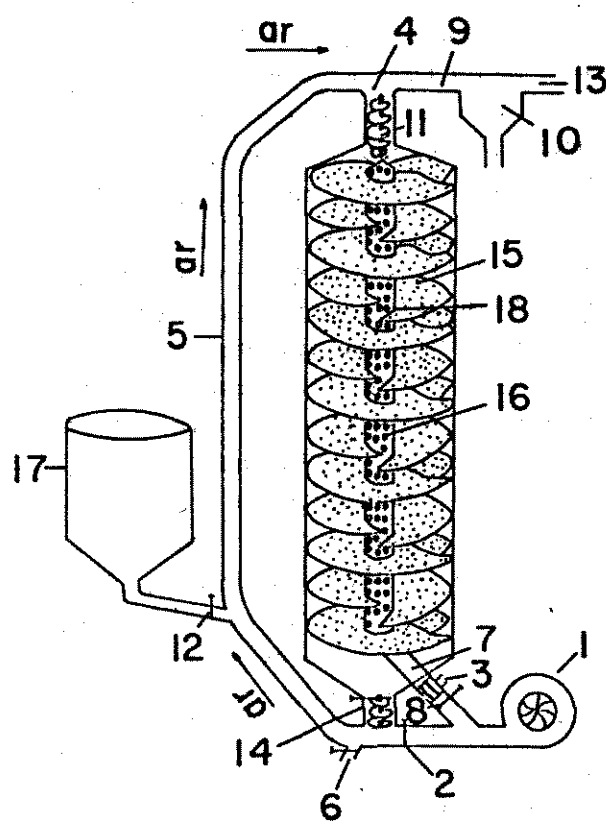


Fig. 1

ANEXO 11) Continuação

- 1 -

38700583

REIVINDICAÇÕES

1 - EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES, caracterizado por consistir de um ventilador (1) para insuflar o ar ambiente, sendo que uma parte deste ar é aquecida ao entrar no secador, através de resistências elétricas (3) e sua velocidade controlada na seção (7), pela abertura ou fechamento de uma válvula (8) e a outra parte do ar, sem aquecimento e com velocidade controlada pela válvula (2), transporta o material a ser seco, proveniente do silo alimentador (17) para o topo (4) do secador, através de uma tubulação (5), e daí, para a tubulação de descarga (9) e recolhimento na abertura (10), para o material que já atingir a umidade desejada, ou, novamente para o interior do secador, através do tubo alimentador (11), saindo pelo tubo (14) de fundo, dito secador provido de um conjunto de placas (15) torcidas, perfuradas e com inclinações reguláveis através de um direcionador (18), sendo este conjunto instalado de forma envolvente no duto (16).

2 - EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por ser o duto (16) perfurado ou não, dependendo do volume de material a ser seco.

3 - EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por serem as placas (15) torcidas e perfuradas, colocadas no duto (16) com os sentidos de torção alternados e espaçadas entre si, para permitir uma maior mistura de sólidos durante o escoamento pela ação da gravidade.

ANEXO 11) Continuação

- 2 -

38700583

4 - EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES, de acordo com a reivindicação 3, caracterizado por ser a inclinação do conjunto de placas (15) torcidas e perfuradas, determinada pelo ângulo de talude 5 do material granular a ser seco.

5 - EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por ser o silo alimentador (17) provido de um dispositivo de alimentação (12), na sua parte inferior, 10 para controlar a velocidade de admissão do material na tubulação (5).

6 - EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por ser a tubulação (5) dotada de uma abertura 15 (6), na parte inferior, para retirada de impurezas pesadas, durante a operação de transporte.

7 - EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por retirar o ar de descarga, juntamente com im 20 purezas leves, através da abertura (13).

8 - EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por ser o material seco recolhido ao sair do tubo (14) pela abertura (6), numa operação descontínua ou 25 pela abertura (10) após ser insuflado através da tubulação (5).

9 - EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por se fazer, opcionalmente, uma conexão entre 30 a abertura (13) e o ventilador (1), para reaproveitamento do ar de descarga no sistema.

ANEXO 11) Continuação

78700583

RESUMO

Patente de Invenção: "EQUIPAMENTO PARA SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES".

A presente invenção refere-se a um equipamento destinado a secagem de grãos ou de outros materiais granulares que, utilizando promotores de mistura de sólidos, aumenta o contato do material a ser seco com o ar de secagem, no interior do secador.

O equipamento consiste basicamente de um ventilador (1) para insuflar o ar ambiente, sendo que uma parte deste ar é aquecida ao entrar no secador, através de resistências elétricas (3) e sua velocidade controlada na seção (7), pela abertura ou fechamento de uma válvula (8) e a outra parte do ar, sem aquecimento e com velocidade controlada pela válvula (2), transporta o material a ser seco, proveniente do silo alimentador (17) para o topo (4) do secador, através de uma tubulação (5), e daí, para a tubulação de descarga (9) e recolhimento na abertura (10), para o material que já atingiu a umidade desejada, ou, novamente para o interior do secador, através do tubo alimentador (11), saindo pelo tubo (14) do fundo, dito secador provido de um conjunto de placas (15) torcidas, perfuradas e com inclinações reguláveis através de um direcionador (18), sendo este conjunto instalado de forma envolvente no duto (16).