

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS

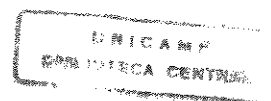
**USO DO DRYPAK® PARA SIMULAR PROCESSOS DE
SECAGEM PNEUMÁTICA**

Autor: JEFFERSON LUIZ GOMES CORRÊA

Orientadora: PROFA. DRA. MARIA APARECIDA SILVA

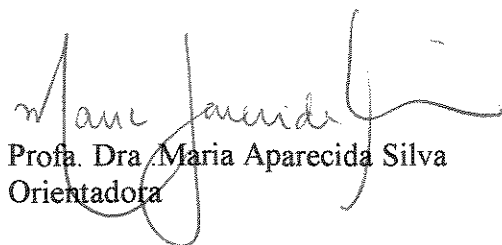
Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Química como
parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Química

Junho de 1998



8558/85

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 19 de junho de 1998 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:



Profa. Dra. Maria Aparecida Silva
Orientadora

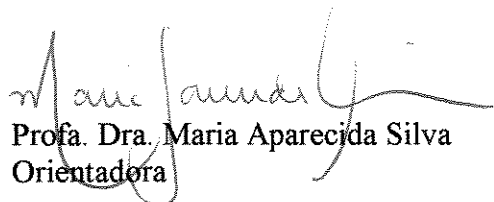


Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha



Profa. Dra. Flôrencia Cecília Menegalli

Esta versão corresponde a redação final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida pelo Engenheiro Químico Jefferson Luiz Gomes Corrêa e aprovada pela Comissão Julgadora em 19/06/1998.



Profa. Dra. Maria Aparecida Silva
Orientadora

A meus pais Milton e Rose
com muito amor e gratidão.
Sem eles, nada seria possível.

A Raquel, com todo o meu amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Grande Criador Universal que me possibilitou, com a realização deste trabalho, crescimento profissional e, sobretudo, pessoal.

À Profa. Dra. Maria Aparecida Silva pela eficiente e concreta orientação, conduzida com amizade e paciência.

À Faculdade de Engenharia Química, através do departamento de Termofluidodinâmica, pela oportunidade e infra-estrutura oferecidas.

Ao Prof. Dr. Zdzislaw Pakowski pela possibilidade de poder trabalhar com o seu software.

Aos Profs. Drs. Sandra Cristina dos Santos Rocha, Meuris Gurgel Carlos da Silva e Theo Guenter Kieckbusch pelas referências emprestadas.

Aos amigos da Faculdade de Engenharia Química Mara, Adriano, Miriam, Cristiane, Danúzia, Lecsi, Juan, Marinho, Noeli, Mário, Elenise, Antonio Carlos, Sandra, Ângela, Márcio, Edna, Everaldo, Celso, Daniela, Luciana, Marleni e César pela amizade recebida, momentos de descontração e companheirismo.

Aos amigos Alexandre (Peres) e Ademir (Fofão). Nosso projeto melhor conduzido sempre foi a nossa amizade.

À Raquel pelo amor e dedicação contínua.

Em especial a meus pais, avós e irmãos pelo incentivo, apoio e compreensão, não só neste, mas em todos os momentos de minha vida.

Aos amigos Leandro, Halim, Lizete, Oswaldina, Milton Barbosa, e Vera de Moraes, que acompanharam este processo “do lado de fora” com apreço.

Ao CNPq pelo apoio financeiro concedido.

A todos que dedicaram alguma contribuição a este trabalho, por menor que esta tenha sido.

*“...Hoje me sinto mais forte, mais feliz,
Quem sabe eu só levo a certeza de que muito
[pouco eu sei
Ou nada sei*

.....
*É preciso amor pra poder pulsar
É preciso paz pra poder sorrir
É preciso chuva para florir...”*

(Almir Sater e Renato Teixeira)

RESUMO

Neste trabalho foi testada a eficiência do software DryPak® para projeto de secadores pneumáticos. Para isto, foram utilizados dados experimentais da literatura relativos a dois materiais, a saber: amido de mandioca e areia, higroscópico e não-higroscópico, respectivamente. Como o software trabalha com coeficientes de transferência de calor e massa constantes, foi desenvolvida uma metodologia em que se determinava o comprimento de pequenas divisões do secador com estes coeficientes constantes, fixando-se o valor final do teor de umidade do sólido em cada uma destas divisões. Assim, o comprimento total do secador era determinado pela soma dos comprimentos das divisões. Foi observado que o teor de umidade perdida no trecho com variação de porosidade e o comprimento deste trecho são funções do teor de umidade inicial do sólido e da razão entre as vazões das correntes sólida e gasosa. Fez-se a comparação de correlações para número de Nusselt e de analogias de transferência de calor e massa. A correlação de Frössling e a analogia de Lewis conduziram aos melhores resultados para os dados simulados com o DryPak®. A correção de Ackermann também foi testada, não conduzindo, para o caso da areia, a resultados muito diferentes daqueles encontrados sem o uso desta correção.

ABSTRACT

The efficiency of the software DryPak[®] was tested in this work using experimental data from the literature. The used data refer to two kinds of products: cassava starch and sand, hygroscopic and non-hygroscopic, respectively. As the software works with constant heat and mass transfer coefficients, an appropriate methodology was developed to simulate the pneumatic drying. It was made by dividing the dryer in sections where the final moisture content was fixed and the section length determined. Total dryer length was the correspondent sum of the sections length. It was observed that the withdrawn moisture content in the variable voidage length and the value of this length were functions of the initial moisture content and the solid/gas mass flow ratio. A comparison among different Nusselt number correlations and heat and mass transfer analogies were made. Frössling correlation and Lewis analogy presented the best results for the DryPak[®] simulated data. The Ackermann correction was also tested and did not produce different results from those obtained without the correction.

SUMÁRIO

	PÁGINA
NOMENCLATURA	i
Lista de tabelas	v
Lista de figuras	vii
Lista de quadros	x
1- INTRODUÇÃO	1
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1- Conceito de secagem	3
2.2- Mecanismo da secagem	4
2.3- Isotermas de sorção	6
2.4- Classificação de secadores	7
2.5- Secadores pneumáticos	8
2.5.1- Materiais utilizados	10
2.5.2- Vantagens e desvantagens do secador pneumático	10
2.5.3- Transferência de calor no transporte pneumático	11
2.5.4- Comprimento de entrada em secadores pneumáticos	15
2.6- Modelagem matemática da secagem	16
2.6.1- Modelagem matemática para secadores pneumáticos verticais	18
2.6.1.1- Modelos matemáticos propostos por ROCHA (1988)	21
3- DRYPAK®	27
3.1- Biblioteca de componentes	29
3.2- Cálculos realizados pelo DryPak®	31
3.2.1- Cálculos psicrométricos	31
3.2.2- Cálculos de secagem	33
3.2.2.1- Balanços	33
3.2.2.2- Cálculos de secadores de fluxo paralelo	34
3.2.2.3- Cálculos de taxa de secagem	40
3.2.2.3.1- Equilíbrio	41
3.2.2.3.2- Curva característica de secagem (CDC)	42
3.2.2.3.3- Difusão de Fick	43
3.2.2.4- Cálculos de secadores de fluxo cruzado e de operações de contato líquido-gás	45
3.2.2.5- Tempo de secagem	46
3.3- Cartas psicrométricas	48
3.3.1- Carta de Grosvernor	49
3.3.2- Carta de Mollier	49

3.3.1-	Carta de Salim	49
3.4-	Equações de isothermas de sorção	50
4 -	SIMULAÇÕES DE SECAGEM USANDO DryPak®	54
4.1-	Dados de entrada	54
4.2-	Dados necessários à simulação no DryPak®	57
4.2.1-	Isothermas de sorção	57
4.3-	Artifício utilizado na simulação	59
4.4-	Resultados e discussão	62
4.4.1-	Simulações com dados de areia	63
4.4.1.1-	Análise dos resultados	64
4.4.1.1.1-	Comparação entre resultados experimentais e simulados	67
4.4.1.1.2-	Comparação entre simulações com diferentes correlações para Nu	70
4.4.1.1.3-	Influência da analogia de transferência de calor e massa e da correção de Ackermann	71
4.4.1.1.4-	Comparação dos modelos	73
4.4.2-	Simulações com dados de amido de mandioca	90
4.4.2.1-	Adaptação na metodologia de simulação	91
4.4.2.2-	Comparação dos resultados simulados com Experimentais	93
5-	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	100
5.1-	Conclusões	100
5.2-	Sugestões para trabalhos futuros	103
6-	BIBLIOGRAFIA	104
APÊNDICE A-	Resultados das simulações utilizando-se o DryPak®	113
APÊNDICE B-	Resultados numéricos obtidos por ROCHA (1988)	158

NOMENCLATURA

Letras

a	Difusividade térmica	m^2/s
A	Área superficial do sólido	m^2
A_c	Correção de Ackermann	-
a_v	Área interfacial de sólidos por unidade de volume	m^2/m^3
a_t	Área externa do secador por unidade de volume	m^2/m^3
B	Razão entre umidade do gás e o teor de umidade do sólido dada pela equação 3.43	-
Bi	Número de Biot	-
C	Calor específico a pressão constante	kJ/kg K
C_D	Coefficiente de arraste	-
c_H	Calor de umidificação do gás	kJ/kgK
D_{AB}	Difusividade mássica	m^2/s
D_{eff}	Difusividade efetiva	m^2/s
d_p	Diâmetro médio das partículas	m
E	Função de distribuição do tempo de residência	-
E_h	Fornecimento de calor de aquecedores internos	kW
E_f	Fornecimento de energia por ventiladores	kW
E_l	Perda de calor	kW
f	Taxa de secagem adimensional	-
F	Integral da função de distribuição do tempo de residência	-
Fo	Número de Fourier	-
f_s	Força de arraste por unidade de volume	N/m^3
f_w	Coefficiente de atrito	N/m^3

g	Aceleração da gravidade	m/s^2
h	Coefficiente de transferência de calor gás-partícula	W/m^2K
H	Entalpia	kJ/kg
H_v	Calor latente de vaporização	kJ/kgA
K	Condutividade térmica	W/mK
k_Y	Coefficiente de transferência de massa	kg/m^2s
l	Comprimento	m
L	Comprimento total do secador	m
Le	Número de Lewis	-
m	Massa	kg
m'	Força Resistiva definida pela equação 2.24	N/m^3
M	Peso molecular	$kg/kgmol$
Nu	Número de Nusselt	-
NUT	Número de unidades de transferência	-
p	Pressão	kpa
P_1 a P_6	Parâmetros das equações de isothermas	-
p_0	Pressão atmosférica	kpa
p_s	Pressão de saturação	kpa
Pr	Número de Prandtl	-
q	Fluxo de calor	kW/m^2
r	Raio	m
R	Constante universal dos gases	$kJ/kmolK$
Re	Número de Reynolds	-
Re_p	Número de Reynolds da partícula	-
Re_m	Número de Reynolds aparente definido pela equação 2.10	-
S	Área de seção transversal	m^2
t	Temperatura	$^{\circ}C$
T	Temperatura	K
u	Velocidade do gás	m/s

U	Coeficiente global de transferência de calor entre o secador e o exterior	W/ m ² K
v	Velocidade do sólido	m/s
V	Volume	m ³
w	Relação entre velocidades e porosidade definida pela equação 2.15	m/s
w _D	Taxa de secagem	kg/ m ² s
w _{DI}	Taxa de secagem no período de taxa constante	kg/ m ² s
W	Vazão mássica	kg/ m ³
X	Umidade absoluta do sólido	kg/kg
X _c	Umidade crítica do sólido	kg/kg
y	Fração molar	-
Y	Umidade absoluta do gás	kg/kg

Letras gregas

α	Coeficiente volumétrico de transferência de calor	W/ m ³ K
β_v	Concentração volumétrica	-
ϕ	Coeficiente de potencial de umidade	-
φ	Umidade relativa	-
ε	Porosidade	-
μ	Viscosidade dinâmica	kg/ms
ρ	Massa Específica	kg/ m ³
Φ	Umidade adimensional do sólido	-
ζ	Razão entre a distância do centro do sólido a um dados ponto e o raio do sólido	-
τ	Tempo	s
ω	Expoente determinado por analogia de transferência de calor e massa (tabela 3.1)	-

Sub e Superescritos

0	Estado padrão
1	Entrada
2	Saída
A	Umidade
as	Saturação adiabática
B	Gás seco
D	Difusional
g	Gás úmido
H	Térmico
L	Líquido
m	Sólido úmido
mw	Interface
S	Sólido seco
Sat	saturação
v	fase vapor
wb	Bulbo úmido
*	equilíbrio
–	Média
∞	Ambiente

LISTA DE TABELAS

Tabela	Título	Página
2.1-	Correlações de Número de Nusselt	14
3.1-	Valores do expoente ω de acordo com as várias analogias	31
3.2-	Principais equações de isotermas de sorção encontradas na literatura	50
4.1-	Características físicas dos materiais utilizados nas simulações	56
4.2-	Condições operacionais de entrada utilizados no DryPak®	56
4.3-	Resultados da simulação da secagem de areia, utilizando-se diferentes variações do teor de umidade perdida, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Frössling	66
4.4-	Resultados experimentais de secagem de areia obtidos por ROCHA (1988)	67
4.5-	Resultados da simulação da secagem de areia, utilizando-se analogia de Chilton-Colburn e diferentes correlações para Nu	71
4.6-	Resultados de simulação de secagem de areia, utilizando-se correlação de Frössling e diferentes analogias entre transferência de calor e massa	72
4.7-	Resultados de simulação de secagem de areia, utilizando-se analogia de Lewis, correlação de Frössling, sem e com correção de Ackermann	73

4.8-	Simulação de secagem de amido de mandioca, utilizando-se diferentes variações de umidade	92
4.9-	Resultados da simulação de secagem de amido de mandioca	94
4.10-	Resultados de secagem de amido de mandioca obtidos por PÉCORA (1985)	96

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
3.1	Fluxograma do software DryPak®	28
4.1	Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Frössling	68
4.2	Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Frössling	68
4.3	Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Frössling	69
4.4	Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Frössling	69
4.5	Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Kramers	75
4.6	Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Kramers	75
4.7	Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Kramers	76
4.8	Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Kramers	76
4.9	Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Ranz e Marshall	77
4.10	Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Ranz e Marshall	77
4.11	Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Ranz e Marshall	78
4.12	Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Ranz e Marshall	78

4.13	Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Debrand	79
4.14	Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Debrand	79
4.15	Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Debrand	80
4.16	Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Debrand	80
4.17	Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk	81
4.18	Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk	81
4.19	Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk	82
4.20	Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk	82
4.21	Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Chukhanov	86
4.22	Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Chukhanov	86
4.23	Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Chukhanov	87
4.24	Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Chukhanov	87
4.25	Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Valentin	88
4.26	Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Valentin	88
4.27	Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Valentin	89

4.28	Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Valentin	89
4.29	Teor de umidade do amido de mandioca ao longo do secador	98
4.30	Temperatura do amido de mandioca ao longo do secador	98
4.31	Umidade absoluta do gás ao longo do secador	99
4.32	Temperatura do gás ao longo do secador	99

LISTA DE QUADROS

Quadro	Título	Págin
2.1	Comparação de modelos matemáticos para secadores pneumáticos	20
3.1	Propriedades requeridas para a inclusão de componentes nas bibliotecas	30

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A secagem é um processo de remoção de umidade presente em vários processos industriais. É utilizada nas indústrias agrícola, química, de alimentos, farmacêutica, de papel, mineral e têxtil. Há uma grande variedade de tipos de secadores e de possibilidades de uso destes. A escolha de um secador e a determinação das condições de operação deste são de grande importância num processo industrial.

Com o avanço da computação, vêm-se criando simuladores como ASPEN®, CHEMCAD®, HYSIM® e PRO/II® que facilitam a avaliação de um processo com grande precisão. Porém, são tipicamente desenvolvidos para fluidos, direcionados para indústrias petroquímicas e de fertilizantes e por não terem sido desenvolvidos para processos com sólidos, não são adequados para secagem. (PAKOWSKI e ZYLLA, 1996).

O maior obstáculo para o desenvolvimento de um programa para secadores é a diversidade de problemas de secagem e a diversidade, que segue, de modelos para a simulação de secadores

O DryPak® é o primeiro simulador comercial para secadores e atende a boa parte destes problemas, apresentando a modelagem matemática utilizada de forma detalhada em seu manual. Realiza cálculos de secagem e

operações gás-líquido, cálculos psicrométricos e de secadores do tipo contato contínuo de gás e sólido em fluxo paralelo ou fluxo cruzado. Possibilita o cálculo de tempo de secagem através do uso de curvas característica de secagem ou modelo difusional de Fick, com e sem encolhimento.

Até o momento, não existem trabalhos que comparem o desempenho deste software com modelos da literatura ou com resultados experimentais. Assim, o presente trabalho tem como objetivo verificar a eficiência deste software através da realização destas comparações para secador concorrente, mais especificamente, secador pneumático vertical, para dois materiais: um higroscópico, o amido de mandioca, e um não-higroscópico, a areia.

Também será feita a comparação de várias correlações de número de Nusselt e analogias de transferência de calor e massa e a análise da influência da correção de Ackermann, que adiciona ao coeficiente de transferência de calor a influência da transferência de massa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- CONCEITO DE SECAGEM

A remoção de umidade de materiais úmidos pode ser feita por processos mecânicos de remoção de água como filtração ou prensagem. No processo de secagem, no entanto, esta remoção geralmente implica a evaporação de umidade devido ao processo de transferência simultânea de massa e calor entre as fases sólida e gasosa (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Esta operação pode estar no meio de um processo industrial ou ser a última ou única etapa a ser desenvolvida. O calor pode ser cedido à fase sólida por uma fonte externa, através dos mecanismos de convecção, condução, radiação ou, ainda, gerado internamente dentro do sólido dieletricamente. Pode também ocorrer como combinação de mais de um dos mecanismos acima.

A presença de umidade costuma ser indesejável principalmente quando pode levar à mudança das propriedades de um produto. Produtos das indústrias de alimentos e agrícolas devem ser armazenados com o mínimo de umidade possível, pois a umidade costuma levar ao desenvolvimento de processos biológicos de deterioração.

De acordo com KEEY (1991), partículas, naturais ou sintéticas, usualmente contêm umidade, que deve ser

freqüentemente removida antes do produto estar apto para o uso. A remoção de umidade diminui a massa, facilita o transporte e diminui o custo no caso de produtos acabados. A secagem representa uma operação de gasto significativo de energia, sendo cerca de 7 a 15 % do gasto de energia de países industrializados. Daí, o crescente interesse pela otimização dos processos de secagem.

CARVALHO e NAKAGAWA (1983) afirmaram que a secagem abaixa a umidade a um nível tal que diminui o efeito, ou o ataque de insetos e microorganismos e reduz a velocidade de deterioração de grãos. O conceito destes autores pode ser estendido a outros materiais biológicos.

2.2- MECANISMO DA SECAGEM

A umidade contida em um sólido exerce uma pressão de vapor e a umidade contida em uma corrente gasosa exerce uma pressão parcial. Quando colocados em contato, o sólido vai perder ou ganhar umidade até que a pressão de vapor se iguale à pressão parcial. No caso de perda de umidade, tem-se a secagem e no caso contrário, umidificação. Este processo é influenciado pelas condições do sistema como temperatura do sólido e da corrente gasosa e da natureza do sólido (TREYBAL, 1980).

LUIKOV e KOLESNIKOV (1932) apud STRUMILLO e KUDRA (1986) concluíram que o material no processo de secagem pode ser dividido em três zonas: seca, de evaporação e úmida. Durante o início da secagem, período

em que ocorre evaporação da umidade superficial do sólido e que tem uma taxa de secagem constante, a zona úmida preenche todo o material. As outras zonas aparecem subsequente após a eliminação da umidade superficial num período em que a taxa de secagem decresce, conhecido como período de taxa decrescente. Na zona seca, a umidade é transferida na forma de vapor, na zona úmida na forma de líquido e na zona de evaporação, ocorrem os dois mecanismos.

De acordo com MENON e MUJUMDAR (1995), quando um sólido úmido é submetido a uma secagem térmica ocorrem dois processos. O primeiro é a transferência de energia, principalmente como calor da vizinhança para a evaporação da umidade superficial. A remoção de água na forma vapor neste processo depende de condições externas como temperatura, pressão, umidade, fluxo do ar e área de superfície exposta. O segundo processo é a transferência de umidade interna para a superfície do sólido e sua subsequente evaporação pelo primeiro processo. O movimento da umidade internamente dentro do sólido é função da natureza física do sólido, da temperatura e de sua quantidade de umidade. Numa operação de secagem, ao menos um destes processos deve ser o fator limitante que governa a taxa de secagem, embora ocorram ambos através do ciclo de secagem.

2.3- ISOTERMAS DE SORÇÃO

A quantidade de umidade retirada de um material num processo de secagem nunca corresponde à umidade total contida inicialmente naquele corpo, porque a partir de uma certa quantidade de umidade, estabelece-se um equilíbrio termodinâmico entre o agente de secagem e o material. Neste ponto, além da igualdade entre pressão parcial do vapor no gás e pressão de vapor da umidade no sólido tem-se igualdade de temperaturas e de potenciais químicos. Assim, a não ser que se altere as condições de umidade e temperatura do agente de secagem, ao se atingir a umidade de equilíbrio, cessa-se o processo de secagem.

As curvas formadas pelo conjunto de dados de umidade de equilíbrio em base seca e umidade relativas a uma dada temperatura são chamadas de isotermas de sorção. O conhecimento destas curvas é de suma importância na determinação das condições de secagem e armazenamento, fornecendo a mínima quantidade de umidade que o produto deve conter em tais condições, ou a quantidade máxima de umidade retirada num processo de secagem. Segundo KEEY (1991), não se pode prever satisfatoriamente o comportamento de secagem sem o recurso de dados de isotermas de sorção. Além disto deve-se atentar para o fato de que não se deve secar um material em condições de umidade relativa inferiores àquela em que o produto vai ser armazenado, pois no armazenamento vão se estabelecer novas condições de equilíbrio e, neste caso, haverá adsorção de umidade.

2.4- CLASSIFICAÇÃO DE SECADORES

Segundo STRUMILLO e KUDRA (1986), a classificação dos tipos de secadores pode ser feita baseada nos métodos de operação, forma física da alimentação, características especiais e escala de operação, mas recomendam a classificação abaixo, aparentemente mais geral e funcional, a qual se baseia na fluidodinâmica do material.

Dentro desta classificação, tem-se 2 grandes grupos de secadores:

Fluidodinamicamente não-ativos

- Secadores com leito estacionário - o material pode ser considerado como uma fase estacionária enquanto o calor é suprido e a água retirada pela fase gasosa em movimento;
- Secadores com leito móvel - o leito das partículas move-se devido à gravidade ou forças mecânicas; e
- Secadores com leito em queda livre - o leito ou partículas individuais caem através da fase gasosa com uma velocidade relativamente alta devido à força gravitacional.

Fluidodinamicamente ativos

- Secadores com leito fluidizado - as interações do material a ser seco e da corrente gasosa criam um leito tipicamente fluidizado (partículas secas são carregadas com a corrente gasosa devido à redução de densidade); e

- Secadores com material disperso - onde o material de secagem está fluindo com a corrente gasosa.

Os secadores com regime fluidodinâmico não-ativo podem ser tratados em oposição a secadores com regime fluidodinâmico ativo. Neste último, o movimento do leito ou das partículas individuais resulta de uma força fluidodinâmica exercida nas partículas por uma corrente de gás fluindo com velocidade apropriada.

2.5-SECADORES PNEUMÁTICOS

Dentre os secadores com regime fluidodinâmico ativo com material disperso, encontram-se os secadores pneumáticos. São equipamentos constituídos de um duto na posição vertical ou horizontal em que materiais sólidos úmidos são transportados e secos por uma corrente gasosa. Neste processo ocorre transferência de momentum pelo transporte do sólido e de calor e massa pela secagem do mesmo.

A grande característica destes equipamentos é a alta transferência de calor e massa devido ao bom contato entre as partículas e o gás. Este contato resulta da grande área interfacial entre as duas fases pois os sólidos se encontram geralmente na forma de partículas.

Em secadores pneumáticos verticais, uma corrente gasosa aquecida, geralmente ar, flui a uma velocidade superior a velocidade terminal das partículas úmidas que são arrastadas por esta corrente. Este tipo de secador difere

do secador de leito fluidizado, no qual os sólidos também são suspensos na corrente gasosa, em relação à densidade da suspensão, que é muito menor. Em condições ideais, a velocidade das partículas é a diferença entre a velocidade da corrente gasosa e a velocidade terminal da partícula. Na prática, o fluxo no secador é tão turbulento que a velocidade efetiva da partícula é próxima a da corrente gasosa, especialmente no caso de material particulado, geralmente utilizado neste secador.

O secador pneumático vertical comum consiste de um trecho vertical de até 1m de diâmetro e até 30m de comprimento. A velocidade do gás utilizada é de até 50m/s e o tempo de residência das partículas no tubo está na faixa de 0,5 a 4 s. Para se aumentar este fator, costuma-se utilizar recirculação dos sólidos. Deve-se ter em mente que, com a recirculação, não se tem garantia da uniformidade de tempos de residência e de teor de umidade final para as partícula que saem do secador.

Como a secagem envolve transferência simultânea de calor e massa, um secador pode ser projetado se os valores apropriados de coeficientes de transferência de calor e de massa forem conhecidos. No caso de secadores pneumáticos, estes coeficientes variam constantemente com o comprimento do secador, acompanhando a variação das propriedades das duas fases envolvidas ao longo do mesmo.

Os conceitos básicos sobre secadores pneumáticos, citados nesta seção, são os descritos em diversos trabalhos como NONHEBEL e MOSS (1971), KEEY (1972), PERRY e CHILTON (1980), MUJUMDAR (1981), STRUMILLO e KUDRA (1986) e KISAKÜREK (1995).

2.5.1- MATERIAIS UTILIZADOS

Segundo KISAKÜREK (1995), os produtos que podem ser secos em secadores pneumáticos são aqueles de pequeno tamanho, geralmente na forma de partículas e que dificilmente se aglomeram. Entre estes, tem-se produtos químicos, alimentícios, polímeros e minerais. Devido ao baixo tempo de residência, este secador é indicado para materiais que contém somente umidade superficial, ou não ligada, e pode ser utilizado para secagem de material termo sensível, independentemente da temperatura da fase gasosa.

2.5.2- VANTAGENS E DESVANTAGENS DO SECADOR PNEUMÁTICO

NONHEBEL e MOSS (1971) apontam em sua obra as vantagens e desvantagens de um secador pneumático.

Entre as vantagens, são citadas:

- Permitir a secagem de materiais sensíveis a temperaturas elevadas e a utilização de baixas vazões e altas temperaturas de entrada de gás, resultando em boa eficiência térmica;
- O próprio secador efetuar o transporte, evitando o uso de equipamento separado para o transporte dos sólidos;
- Requer pouco espaço para instalação;

- Requer pouca manutenção devido à existência de poucas partes móveis;
- Os custos de capital são baixos comparados com outros tipos de secadores.

As principais desvantagens são:

- Necessidade de um eficiente sistema de coleta de pó;
- Dificuldade na alimentação de partículas muito úmidas e com aglomerados difíceis de dispersar;
- Em geral, partículas individuais não recebem o mesmo tratamento em secadores com recirculação;
- Não remove umidade interna das partículas, não sendo indicado para materiais com alto teor de umidade inicial;
- Erosão, principalmente das partes curvas do secador, quando se utiliza material abrasivo.

2.5.3- TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO TRANSPORTE PNEUMÁTICO

Para a modelagem de um secador pneumático, é importante o conhecimento do coeficiente de transferência de calor gás-partícula (h) que permite quantificar o calor trocado entre o gás e as partículas no interior do secador. Ele está incluído no número de Nusselt pela equação 2.1.

$$Nu = \frac{h \times d_p}{K_g} \quad (2.1)$$

Como o tempo de residência das partículas no secador pneumático é pequeno, a transferência de calor ocorre basicamente por convecção entre o gás e as partículas sólidas (ROCHA, 1988). Daí, a importância de se estabelecer o coeficiente de transferência de calor convectivo mais adequado.

Os estudos sobre a transferência de calor por convecção entre gases e partículas sólidas pode ser dividido em duas grandes classes. Uma delas corresponde a partículas estacionárias e a outra a partículas em suspensão. Há opiniões diversas sobre o uso de resultados obtidos no caso de partículas estacionárias em partículas em suspensão e vice-versa. (BANDROWSKI e KACZMARZYK, 1978).

O resultado clássico para uma partícula isolada, esférica e estacionária, em um meio infinito trocando calor por convecção, foi estabelecido, através de solução analítica da equação de energia, pela equação 2.2.

$$Nu=2 \quad (2.2)$$

Esta equação tem sido utilizada para baixos números de Re_p , ou seja, $Re_p < 0,1$.

A partir dela, surgiram correlações verificando a influência dos números de Reynolds e Prandtl e, posteriormente, correlações em função da concentração de partícula.

KRAMERS (1946) propôs uma correlação para Nu em função dos números de Re_p e Pr , estudando a convecção em esferas com vários fluidos.

CHUKHANOV (1968) realizou um estudo das diversas influências como concentração, instabilidade de fluxo, turbulência, tipo, rugosidade e rotação de partículas, concluindo que cada um destes fatores separadamente pode ser considerado desprezível, mas em muitos casos, sua combinação intensifica a transferência de calor entre partículas e gases.

No trabalho de BANDROWSKI e KACZMARZYK (1978) foi feito o estudo da transferência de calor entre gás e partículas esféricas em transporte pneumático, conduzindo a uma correlação para Nu em função de Re_p e β_v .

Segundo MUJUMDAR (1981), para esferas isoladas, a correlação de RANZ e MARSHALL é aplicável.

TORREZAN, SARTORI e SANTANA (1989) procuraram, em seu trabalho, cobrir uma ampla faixa de concentração volumétrica, utilizando esferas de vidro de vários diâmetros. Eles chegaram a uma relação em função de Re_p e β_v .

A tabela 2.1 apresenta várias correlações para o número de Nusselt.

Tabela 2.1- Correlações de Número de Nusselt

Autores	Correlação	Faixa de aplicação	Nº da equação
FROSSLING (1938) Apud PAKOWSKI (1996)	$Nu = 2 + 0,552 Re_p^{1/2} Pr^{1/3}$	$1 < Re_p < 7 \times 10^4$	(2.3)
KRAMERS (1946)	$Nu = 2 + 1,3 Pr^{0,15} + 0,66 Pr^{0,31} Re_p^{0,5}$	$10 < Nu < 40;$ $0,7 < Pr < 400$	(2.4)
CHUKHANOV (1971)	$Nu = 0,006 Re_p^{0,8} \beta_v^{-0,43}$	$\beta_v < 2,3 \times 10^{-3};$ $30 < Re_p < 480$	(2.5)
RANZ e MARSHALL (1972) apud MUJUMDAR (1981)	$Nu = 2 + 0,66 Re^{0,5} Pr^{0,33}$	$2 < RePr < 200$	(2.6)
BRAUER e MEWES (1972)	$Nu = \frac{2 + z_k(Re_p Pr)^{1,7}}{1 + (Re_p Pr)^{1,2}}$ $z_k = \frac{0,66}{1 + Pr} + \frac{0,79 Pr}{Pr^{1,6}(2,4 + Pr)}$	$1 < Re_p < 100$	(2.7)
DEBRAND (1974) apud ROCHA (1988)	$Nu = 0,035 Re_p^{1,15} Pr^{0,33}$	$Re_p < 350$	(2.8)
BANDROWSKI e KACZMARZYK (1978)	$Nu = 0,00114 \beta_v^{-0,5984} Re_p^{0,8159}$	$2,3 \times 10^{-4} < \beta_v$ $< 5 \times 10^{-2}$ $180 < Re_p < 1800$	(2.9)
VALENTIN (1986)	$Nu = 2 + \left[\left(0,4 Re_p^{0,5} \right)^5 + \left(B(\beta_v) Re_p^{0,82} \right)^5 \right]^{1/5}$ $B(\beta_v) = 0,308 - 74,625 \beta_v$	$2,3 \times 10^{-4} < \beta_v$ $< 10^{-2}$ $20 < Re_p < 790$	(2.10)

2.5.4- COMPRIMENTO DE ENTRADA EM SECADORES PNEUMÁTICOS

Ao ingressarem no secador pneumático, as correntes gasosa e sólida apresentam grande diferença de velocidades. O sólido com uma velocidade praticamente nula é acelerado pela corrente gasosa, que por sua vez, devido ao contato com os sólidos, sofre uma desaceleração. Isto ocorre no comprimento de entrada, também conhecido como comprimento de aceleração ou zona de aceleração. Após esta região, é estabelecido o escoamento completamente desenvolvido em que a diferença entre as velocidades torna-se constante. (STRUMILLO E KUDRA, 1986).

Segundo ROCHA (1988), como os coeficientes de transferência de calor e de massa e a força resistiva, que representa o atrito entre o gás e as partículas, são funções desta diferença de velocidades, a região de entrada do secador torna-se de grande importância. Nela, ocorrem boa parte dos fenômenos de transferência, observando-se os maiores gradientes de temperatura e umidade para as duas fases.

Embora de extrema importância para o dimensionamento do secador, são escassos na literatura trabalhos que tratem sobre o comprimento de entrada.

CAPES e NAKAMURA (1973) utilizaram a correlação de ROSE e DUCKWORTH (1969) apud CAPES e NAKAMURA (1973) para determinação do comprimento de aceleração e concluíram que esta levava a uma superestimativa.

SHIMIZU et al. (1978) relacionaram o comprimento de entrada ao número de Reynolds aparente (Re_m), definido pela equação 2.10, e apresentam esta relação na forma gráfica para partículas de cobre de 107 μm . PÉCORA (1985) baseando-se neste trabalho, relacionou o comprimento de entrada com Re_m para partículas de amido de mandioca com 25 μm e com o número de Reynolds (Re) para grumos de 300 μm formados por estas partículas. PÉCORA (1985) observou que com o aumento do diâmetro das partículas, tem-se aumento no comprimento de entrada.

$$Re_m = \left(1 + \frac{W_m}{W_g} \right) Re \quad (2.11)$$

Onde o termo entre parênteses adiciona a influência da presença de sólidos na turbulência do escoamento.

DHODAPKAR et al. (1989) realizando um estudo da zona de aceleração para dutos horizontais, com 30 e 60° de inclinação e dutos verticais concluíram que esta zona diminui com a diminuição do tamanho das partículas, com o aumento da inclinação e com o aumento da velocidade do gás para altas vazões de sólido.

2.6- MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM

A modelagem matemática de processos e equipamentos se apresenta como um dos mais importantes aspectos da

tecnologia de secagem para processos industriais. A partir dela, permite-se a escolha do processo mais apropriado para um dado produto (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

Segundo os autores acima mencionados, há quatro tipos de métodos de modelagem:

- Método baseado em equações de balanço de massa, energia e momentum com condições de contorno baseadas nas condições físicas do secador;
- Método baseado em equações de taxa de secagem onde os coeficientes da cinética de secagem são determinados experimentalmente;
- Método baseado em equações empíricas de transferência de massa e energia e
- Método baseado na análise da trajetória da partícula ao longo do secador.

PAKOWSKI e ZYLLA (1996) classificaram os modelos em modelos de parâmetros agregados e de parâmetros distribuídos. O primeiro tipo descreve o secador como caixa preta em que se desenvolvem balanços e o segundo requer identificação de partes do secador que podem estar em uma das três configurações básicas: cocorrente, contracorrente ou fluxo cruzado com exigência de conhecimento de certas variáveis de entrada ou saída, dependendo da configuração.

No DryPak®, software desenvolvido para cálculos de secagem, os dois tipos de abordagem são usados (PAKOWSKI, 1996).

COURTOIS et al. (1992) tentaram desenvolver um software para cálculos de secagem. Usaram o método clássico de dividir um secador em uma série de leitos

espessos e estes em séries de camadas finas aproximadas por um modelo unidimensional. Concluíram que o principal problema aparece com a passagem de camada fina para camada espessa.

Alguns materiais apresentam redução de volume e alterações em suas formas originais durante o processo de secagem. Este fenômeno pode estar previsto na modelagem, com o objetivo de se obter melhor representação física do processo de secagem. KEEY (1991) apresenta dois tipos de encolhimento. Em um deles (tipo A), o encolhimento ocorre desde o começo de remoção de umidade até um determinado ponto em que o valor do volume torna-se constante. No outro (tipo B), durante o processo de secagem, o volume se apresenta constante até que se atinja o valor de umidade de saturação, ponto inicial para o encolhimento.

RAGHAVAN et al. (1994) mostraram uma variação linear entre a taxa de variação de volume (V/V_0) e a taxa de variação de umidade (X/X_0). QUEIROZ (1994) concluiu que a consideração do encolhimento no modelo possibilita maior credibilidade aos valores obtidos de coeficiente de difusão e coeficiente convectivo, resultando na obtenção de menores valores do coeficiente de difusão.

2.6.1- MODELOS MATEMÁTICOS PARA SECADORES PNEUMÁTICOS VERTICAIS

Para uma simulação satisfatória de um secador pneumático, deve-se ter conhecimento do tempo de

residência dos sólidos, do movimento das partículas dentro do secador, do coeficiente de transferência de calor e dos processos de transferência de massa dentro e fora do sólido. Quando não há informações claras, deve-se fazer considerações simplificadoras (KEMP, BAHU e PASLEY, 1994).

Estes autores citam quatro tipos de procedimentos de projetos propostos na literatura:

1. Aqueles que consideram que a velocidade relativa entre o gás e as partículas seja igual à velocidade terminal, negligenciando a zona de aceleração;
2. Modelos unidimensionais;
3. Tratamento tridimensional do fenômeno e
4. Testes de planta piloto com o resultado extrapolado para uma escala industrial usando correlações empíricas.

A análise dos modelos de FARIA (1986), ROCHA (1988), VIOTTO (1991) e KEMP, BAHU e PASLEY (1994) mostrou que há várias semelhanças e algumas diferenças entre eles. Isto pode ser observado no quadro 2.1.

MINDZIUL e KMIEC (1996) consideraram, em seu modelo, a variação de área de seção transversal concluindo que esta variação conduz a um aumento no tempo de residência, o que, por sua vez, permite uma diminuição na altura do secador para um dado teor de umidade final.

Quadro 2.1- Comparação de modelos matemáticos para secadores pneumáticos

	FARIA (1986)	ROCHA (1988)	VIOTTO (1991)	KEMP, BAHU E PASLEY (1994)
Dimensinalidade	Uma	Uma	Uma	Uma
Partículas esféricas	Sim	Sim	Não	Sim
Comportamento higroscópico	Não	Não	*	*
Encolhimento	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Influência da parede	Ausente quando concentração de sólidos for baixa	Interação gás-parede	Interação gás-parede sólido-parede	Interação sólido-parede
Escoamento empistonado	Sim	Sim	Sim	Sim
Vazões constantes ao longo do secador	Sim	Sim	Sim	Sim
Gás mistura ideal vapor e componente inerte	Sim	Sim	Sim	*
Area transf massa igual área transf energia	Sim	Sim	Areas constantes	*
Uso de porosidade	Não	Sim	Sim	*
Uso de esfericidade	Partículas esféricas	Partículas esféricas	Sim	*
Perda de calor para ambiente	Sim, mas observa que é desprezível	Sim	Considera a presença e ausência de perda de calor	Sim
Correl. Nusselt	Kramers	Várias	de Gorbis e de Chukhanov	Ranz e Marshall
Analogia entre transferência de calor e massa	Chilton e Colburn	Chilton e Colburn	*	*
Variação de densidade e viscosidade do gás ao longo do secador	Sim	Sim	Não	Sim
Material estudado	Areia e esferas de vidro	Areia, alumina e resina acrílica	Borra de café	Sílica gel e esferas de vidro
dp (mm)	Areia 0,46 e 0,55 Esferas de vidro 0,24	Areia 0,38 e 0,188 alumina 0,40 resina acrílica 0,346	0,49	Sílica gel 0,350 e 1,500 Esferas de vidro 0,650
Temp entrada gás (oC)	93 a 231,8	100 a 188	180	*
Vazão sólidos $\times 10^3$ (kg/s)	3,19 a 14,53	2,4 a 10,04	3,33 a 11,0	*
Vazão gás $\times 10^{-3}$ (kg/s)	2,08 a 4,54	2,3 a 4,0	3,77 a 4,65	*

*Não mencionados pelo autor

2.6.1.1- MODELOS MATEMÁTICOS PROPOSTOS POR ROCHA (1988)

Neste item, devido à disponibilidade no trabalho de ROCHA (1988), de dados experimentais, perfis de temperatura e umidade da corrente gasosa e dados de simulação, apresentam-se, mais detalhadamente, os modelos utilizados por este autor em seu trabalho com secador pneumático vertical.

ROCHA (1988) utilizou os modelos de ARASTOPOUR e GIDASPOW (1979) (modelo 1) e TELLES (1974) apud ROCHA (1988) (modelo 2) para descrever a dinâmica do escoamento gás-sólido. Suas equações diferenciais são desenvolvidas através das equações fundamentais da transferência de momentum, equações da continuidade e do momentum linear.

As considerações abaixo são adotadas nos dois modelos dinâmicos para o transporte pneumático e nos balanços de energia e massa de água efetuados:

- escoamento unidimensional;
- vazões mássicas de sólido e de ar secos permanecem constantes durante o processo;
- as partículas são esféricas com diâmetro médio constante e igual ao obtido na análise granulométrica por peneiração;
- o material sólido é não-higroscópico e não contrai durante a secagem;
- a distribuição de partículas é uniforme em cada seção transversal;

- a temperatura e a umidade da partícula são uniformes e variam apenas com o comprimento do tubo de secagem;
- o gás de secagem é constituído de uma mistura ideal de um componente inerte e de vapor;
- o escoamento do gás é tipo pistão com temperatura e umidade constante em cada seção transversal; e
- as áreas para transferência de calor e massa gás-partícula são iguais.

A modelagem dinâmica utilizada por ROCHA (1988) é apresentada abaixo:

Modelo 1:

$$\frac{du}{dl} = -\frac{u}{\varepsilon} \left[\frac{g}{w(u-v)} - \frac{f_s}{w\rho_s(u-v)} \right] \quad (2.12)$$

$$\frac{dv}{dl} = \frac{v}{1-\varepsilon} \left[\frac{g}{w(u-v)} - \frac{f_s}{w\rho_s(u-v)} \right] \quad (2.13)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dl} = \frac{g}{w(u-v)} - \frac{f_s}{w\rho_s(u-v)} \quad (2.14)$$

$$\frac{dp}{dl} = -\left(\frac{g}{w(u-v)} - \frac{f_s}{w\rho_s(u-v)} \right) (\rho_s v^2 - \rho_g u^2) - f_w - [\rho_s(1-\varepsilon) + \rho_g \varepsilon] g \quad (2.15)$$

onde

$$w = -\frac{u}{\varepsilon} - \frac{v}{(1-\varepsilon)} \quad (2.16)$$

f_s , relativo ao arraste exercido pelo fluido sobre as partículas é dado pela correlação:

$$f_s = \frac{3C_D \rho_g \varepsilon^{-1.7} (u-v)^2}{4d_p} + \frac{(3-2\varepsilon)}{2\varepsilon} \rho_g v \frac{dv}{dl} \quad (2.17)$$

$$u = \frac{W_g}{\rho_g S \varepsilon} \quad (2.18)$$

e

$$v = \frac{W_m}{\rho_s S (1-\varepsilon)} \quad (2.19)$$

Modelo 2:

$$\frac{du}{dl} = -\frac{u}{\varepsilon} \left[\frac{m' - (1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g}{\rho_s v^2} \right] \quad (2.20)$$

$$\frac{dv}{dl} = \frac{m' - (1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g}{\rho_s (1-\varepsilon)v} \quad (2.21)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dl} = \left[\frac{m' - (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g}{\rho_s v^2} \right] \quad (2.22)$$

$$\frac{dp}{dl} = \rho u^2 \left[\frac{m' - (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g}{\rho_s v^2} \right] - m' - \rho_g g \quad (2.23)$$

onde a força resistiva m é dada pelas correlações desenvolvidas por MASSARANI e SANTANA (1980), apresentadas a seguir:

Para $\varepsilon > 0,75$ e $Re_p < 70$

$$m' = \left[\frac{18\mu(1 - \varepsilon) \left[1 + (1 - \varepsilon)^{1/3} \right] e^{\frac{1 - \varepsilon}{0,6\varepsilon}}}{\varepsilon d_p^2} + 1,5(1 - \varepsilon) \varepsilon^{9/5} \left(\frac{\mu \rho_g^4}{d_p^6} \right)^{1/5} (u - v)^{4/5} \right] (u - v) \quad (2.24)$$

Para $\varepsilon > 0,75$ e $Re_p > 70$

$$m' = \frac{\rho_g 44(1 - \varepsilon)}{d_p e^{4,74\varepsilon}} (u - v)^2 \quad (2.25)$$

A transferência de calor, para qualquer dos dois modelos, é dada pelas equações abaixo:

$$\frac{dt_m}{dl} = \frac{S}{W_m} a_v \left[\frac{h(t_g - t_m) - k_y(Y^* - Y)(H_v + C_v t_m)}{(C_s + C_{AL} X)} \right] - \frac{C_{AL} t_m}{(C_s + C_{AL} X)} \frac{dX}{dl} \quad (2.26)$$

$$\frac{dt_g}{dl} = \frac{S}{W_g} a_v \left[\frac{k_y(Y^* - Y)(H_v + C_v t_m) - h(t_g - t_m)}{C_g} \right] - \frac{C_v t_g + H_v}{C_v} \frac{dY}{dl} - \frac{a_t S U(t_g - t_\infty)}{W_g C_g} \quad (2.27)$$

onde

$$C_g = C_B + C_v Y \quad (2.28)$$

e

$$a_v = \frac{6v(1-\varepsilon)}{u \varepsilon d_p} \quad (2.29)$$

A transferência de massa, para qualquer dos dois modelos, é dada pelas equações abaixo:

$$\frac{dX}{dl} = -\frac{S}{W_m} a_v k_y (Y^* - Y) \quad (2.30)$$

$$\frac{dY}{dl} = \frac{S}{W_g} a_v k_y (Y^* - Y) \quad (2.31)$$

ROCHA (1988) concluiu que, na faixa das variáveis utilizadas, os modelos por ele adotados conduziram a resultados semelhantes de perfis de u e v . Isto levou também a resultados semelhantes para os perfis de umidade e temperatura das duas correntes quando se utiliza a mesma correlação para Nu .

ROCHA (1988) também comparou as correlações de Nu da tabela 2.1, utilizando os dois modelos citados neste item. Concluiu que, destas correlações, a de Valentin foi a que forneceu os melhores resultados, enquanto que a correlação de Ranz e Marshall levou aos resultados mais afastados dos reais. Segundo a avaliação deste autor, isto significa que a concentração das partículas, levada em consideração na equação de Valentin, tem influência mesmo em sistemas bastante diluídos, como em seu trabalho.

CAPÍTULO 3

DRYPAK®

O software DryPak® foi elaborado para cálculos de secagem e operações gás-líquido como resfriamento de líquido e umidificação e resfriamento de gases.

Possibilita a realização de cálculos psicrométricos e cálculos de secadores do tipo contato contínuo de gás e sólido em fluxo paralelo ou fluxo cruzado. Contém bibliotecas de componentes sólidos, gases e líquidos.

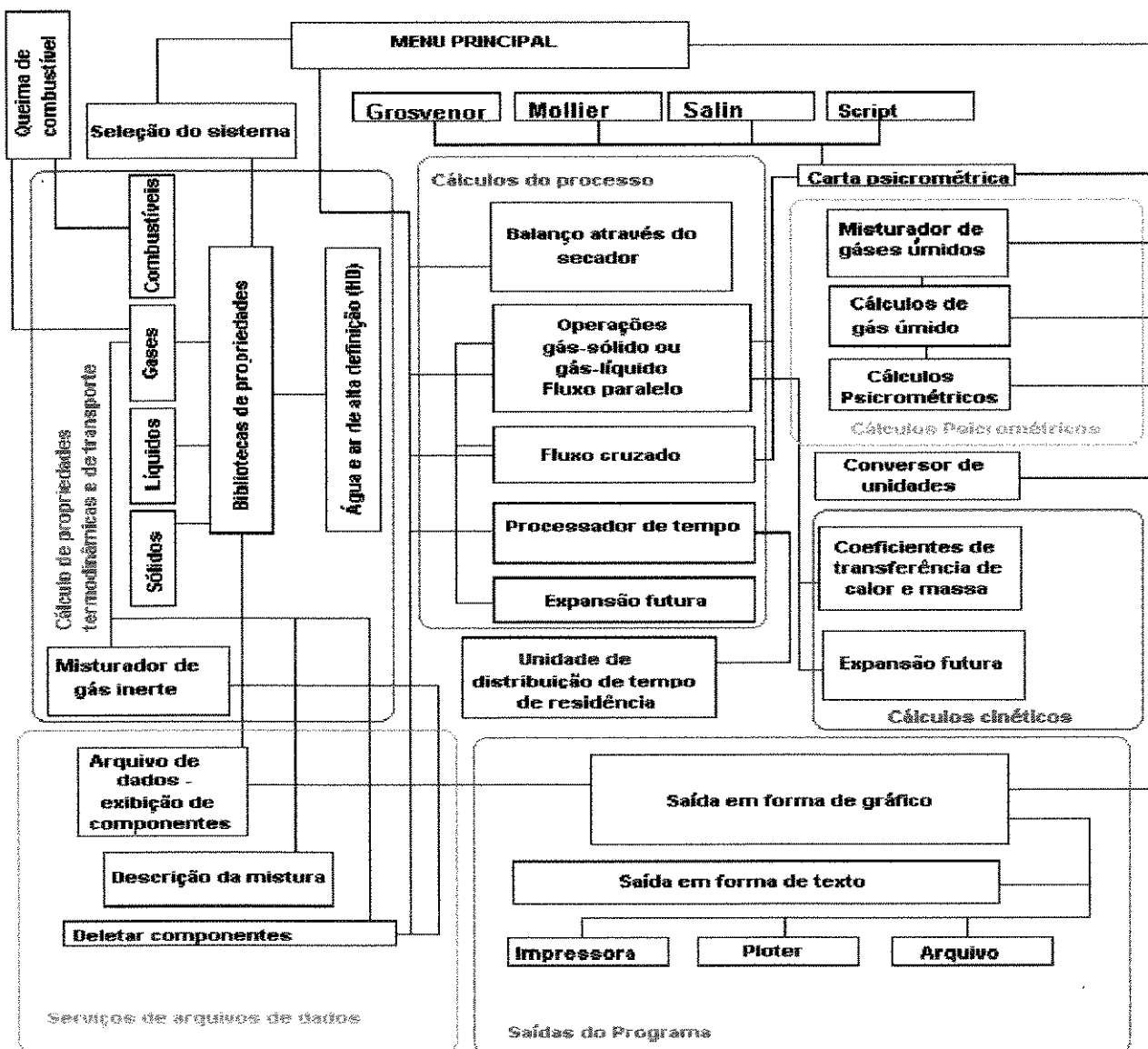
Cálculos do tempo de secagem podem ser feitos por curvas características de secagem (CDC) ou modelo difusional de Fick. A hipótese de encolhimento pode ser considerada. Pode-se ainda computar a influência da distribuição do tempo de residência na cinética de secagem em processos contínuos.

Os cálculos possíveis no DryPak® são referidos em PAKOWSKI e MUJUMDAR (1995).

O programa foi baseado na teoria da secagem, assumindo-se que os processos são descritos por modelos idealizados, podendo, portanto, apresentar desvios em relação a problemas reais.

A figura 3.1 corresponde a um fluxograma dos processos possíveis no DryPak®.

Figura 3.1- Fluxograma do Software DryPak



3.1- BIBLIOTECAS DE COMPONENTES

O DryPak®, como um software para cálculo de processos de secagem e de operações envolvendo gás-líquido, necessita de dados de propriedades termodinâmicas dos componentes do sistema. Assim, o programa contém bibliotecas de sólido, líquido, gases e combustíveis. Através do uso desta última, pode-se utilizar gases de combustão como agente de secagem. Pode ser feita a adição de novos componentes ou a confecção de novos arquivos de dados de componentes. No quadro 3.1 estão listadas as propriedades requeridas para esta adição de componentes nas bibliotecas.

No DryPak®, encontram-se 38 equações de isotermas de sorção e 13 equações de difusividade. É colocado este número de equações para que se possa escolher aquelas que melhor representem o sólido em estudo.

Quadro 3.1- Propriedades requeridas para a inclusão de componentes nas bibliotecas:

Propriedade	Bib. líquidos	Bib. sólidos	Bib. gases
Massa molar	X		X
Temperatura crítica	X		X
Temperatura de ebulição	X		
Pressão de vapor – coeficientes da equação de Antoine	X		
Calor latente de vaporização – coeficientes da equação de Watson	X		
Calor específico - coeficientes do polinômio de terceiro grau	X	X	X
Coeficientes do polinômio de terceiro grau da condutividade térmica de vapor	X		X
Viscosidade dinâmica- coeficientes do polinômio de terceiro grau	X		X
Volume Difusional	X		X
Densidade	X	X	
Inflamabilidade	X		
Composição estequiométrica - No de átomos de C, H, N e O ou S	X		
Isoterma de sorção- parâmetros da equação		X	
Teor de umidade crítica		X	
Coeficientes da Curva Característica de Secagem		X	
Difusividade de umidade - parâmetros da equação		X	
Encolhimento- tipo, umidade inicial e parâmetros da equação		X	

O volume difusional corresponde ao volume de átomos ou radicais, conforme o tipo de molécula. Este termo é utilizado na relação empírica de Fuller para o cálculo do coeficiente de difusão. As três últimas propriedades deste quadro são requeridas somente quando se deseja calcular a taxa de secagem por curva característica de secagem, modelo difusional, e quando se deseja utilizar a hipótese de encolhimento considerando-se variação de diâmetro da partícula, respectivamente.

3.2-CÁLCULOS REALIZADOS PELO DRYPAK®

Os procedimentos de cálculos apresentados a seguir são baseados em PAKOWSKI (1996).

3.2.1- CÁLCULOS PSICROMÉTRICOS

Cálculos psicrométricos são disponíveis no DryPak®, sendo necessário a entrada da temperatura de bulbo seco e de uma das seguintes temperaturas: bulbo úmido, saturação adiabática ou ponto de orvalho para calcular a umidade do gás ou a umidade do gás para o cálculo das temperaturas referidas.

O cálculo da temperatura de bulbo úmido é feito através da equação:

$$\frac{T_g - T_{wb}}{Y - Y_{wb}} = - \left[Le^{-\omega} \left(\frac{M_A / M_B}{M_A / M_B + Y_{wb}} \right) (1 + Y_{wb}) \right] \frac{H_{v,wb}}{c_H} \quad (3.1)$$

Onde ω é definido por analogia de transferência de calor e massa. O DryPak® trabalha com as quatro analogias apresentadas na tabela 3.1, sendo a escolha a critério do usuário.

Tabela 3.1- Valores do expoente ω de acordo com as várias analogias

Analogia	Valor de ω
Lewis	0,000
Bedingfield e Drew	0,560
Henry e Epstein	0,565
Chilton e Colburn	2/3

O número de Lewis, Le , é obtido de

$$Le = \frac{a}{D_{AB}} = \frac{K}{c_H \rho_g D_{AB}} \quad (3.2)$$

e

$$D_{AB} = D_{AB}^0 \left(\frac{T}{T_0} \right) \frac{p_0}{p} \quad (3.3)$$

Observa-se que $D_{AB}^0 = 21,6E-6 \text{ m}^2/\text{s}$ e $Le = 0,8$ a $0,9$ para o sistema ar-água o que resulta em $Le^{-\omega} \sim 1$ e $T_{wb} \sim T_{as}$. Para outros sistemas em que a difusão é mais lenta, $Le > 1$ e assim $T_{wb} > T_{as}$. Nestes casos, a diferença torna-se significativa.

Além disto, o uso da analogia de transferência de calor e massa é importante no cálculo do coeficiente de transferência de massa, k_Y , utilizando-se proporção psicrométrica, definida como a proporção entre o coeficiente de transferência de calor em relação ao coeficiente de transferência de massa e dada por:

$$\frac{h}{k_Y} = \frac{c_H}{Le^{-\omega}} \quad (3.4)$$

onde ω é obtido na tabela 3.1.

Pode-se, ainda, calcular misturas de 2 a 9 correntes gasosas, tendo a composição de cada uma delas e a porcentagem em relação a corrente total definidas pelo usuário.

3.2.2- CÁLCULOS DE SECAGEM

Nesta seção, são abordados os cálculos realizados no software DryPak®. Estes cálculos estão bem desenvolvidos em PAKOWSKI e MUJUMDAR (1995).

3.2.2.1- BALANÇOS

Resolve-se o balanço de massa e energia para um secador contínuo que utilize calor e uma corrente de gás inerte para remoção de umidade de um sólido. Estes balanços se aplicam para todos os tipos de secadores contínuos e em estado estacionário, incluindo secadores de contato, convectivos e por radiação, excluindo-se secadores a vácuo e de vapor superaquecido.

Nestes cálculos o secador é visto como uma caixa preta e só dados de entrada e saída são contabilizados.

As equações do balanço são:

Balanço de Umidade:

$$W_S(X_1 - X_2) = -W_B(Y_1 - Y_2) \quad (3.5)$$

Balanço de Energia:

$$W_S(H_{m1} - H_{m2}) + E_h + E_f = -W_B(H_{g1} - H_{g2}) + E_l \quad (3.6)$$

Estas duas equações juntas contém 13 variáveis independentes. Através do conhecimento de 11 delas, pode-se calcular as duas restantes, contanto que ambas não sejam provenientes da equação 3.6.

Estes cálculos podem ser utilizados para os seguintes casos:

- Sem reciclo de gás e sem aquecedor externo.(Não utiliza cálculo de eficiência térmica ou consumo de calor);
- Sem reciclo de gás e com aquecedor externo;
- Com reciclo de gás e sem aquecedor externo; e
- Com reciclo de gás e com aquecedor externo.

Deve-se avaliar que nos últimos dois casos com o aumento de reciclo, a umidade do ar pode aumentar a ponto de haver condensação.

3.2.2.2- CÁLCULOS DE SECADORES DE FLUXO PARALELO

Os secadores de fluxo paralelo incluem secadores de fluxo cocorrente e contracorrente. O contato entre as fases é diferencial, uma vez que temperaturas e umidade variam ao longo do secador.

A condição principal para que o processo de contato diferencial seja perfeito é a existência de escoamento empistonado. Assim, qualquer dispersão axial, "bypassing" ou zonas mortas podem causar desvio dos perfis ideais.

Assume-se para o secador as seguintes considerações:

- fluxo unidirecional;

- estado estacionário;
- escoamento empistonado;
- partículas de geometria definida (placa plana, esférica, cilíndrica);
- escoamento desenvolvido para ambas as fases com uniformidade nas propriedades destas ao longo da área de seção transversal como umidade, temperatura e velocidade;
- área de seção transversal, coeficientes de transferência de calor e massa constantes; e
- secador termicamente isolado e impermeável.

Assim, para um volume diferencial do secador dV , perpendicular ao comprimento do secador, tem-se os balanços:

Balanço de massa de umidade para ambas as fases

$$W_S dX + W_B dY = 0 \quad (3.7)$$

Balanço de entalpia para ambas as fases

$$W_S dH_m + W_B dH_g = 0 \quad (3.8)$$

Balanço de umidade para a fase sólida

$$W_S dX = -w_D a_V dV \quad (3.9)$$

Balanco de entalpia para a fase sólida

$$W_S dH_m = (q - H_{Av} w_D) a_V dV \quad (3.10)$$

O fluxo de calor usado na equação acima é calculado pela equação:

$$q = h(t_g - t_{mw}) \quad (3.11)$$

Onde t_g é a temperatura do seio do gás, t_{mw} a temperatura da interface do sólido e dV é dado por:

$$dV = a_V S dl \quad (3.12)$$

sendo

$$a_V = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \quad (3.13)$$

Para esferas, o coeficiente de transferência de calor gás partícula é dado pela correlação de número de Nusselt correspondente à equação (2.3). Para cilindro e placa plana, o software dispõe de outras correlações.

No cálculo de Nu , as velocidades das correntes gasosa e sólida utilizadas em Re_p são dadas, respectivamente por:

$$u = \frac{W_B}{\rho_g S \varepsilon} \quad (3.14)$$

e

$$v = \frac{W_m}{\rho_s S(1 - \epsilon)} \quad (3.15)$$

Pode-se ter uma maior precisão no coeficiente de transferência de calor se este for multiplicado pela correção de Ackermann, que inclui a influência do fluxo de vapor de umidade na transferência de calor para a superfície. Este coeficiente é dado por:

$$A_c = (w_D c_H / h) / (\exp(w_D c_H / h) - 1) \quad (3.16)$$

Segundo KEEY (1991), a correção de Ackermann geralmente se aproxima da unidade, sendo negligenciável, tornando-se significativa somente quando a secagem é conduzida em condições muito intensivas.

Rearranjando-se as equações (3.7) a (3.10) calcula-se o secador através das equações (3.17) a (3.20).

$$\frac{dY}{dl} = \frac{w_D a_v S}{W_B} \quad (3.17)$$

$$\frac{dX}{dl} = - \frac{W_B}{W_S} \frac{dY}{dl} \quad (3.18)$$

$$\frac{dH_g}{dl} = - \frac{h a_v S}{W_B} (t_m - t_g) + H_v(t_m) \frac{dY}{dl} \quad (3.19)$$

$$\frac{dH_m}{dl} = -\frac{W_B}{W_S} \frac{dH_g}{dl} \quad (3.20)$$

No item 3.2.2.3 serão discutidos os cálculos de taxa de secagem (w_D).

As equações 3.17 a 3.20 são resolvidas ao longo do secador até que se atinja a umidade ou temperatura final do sólido requerida ou a condição de equilíbrio.

O desenvolvimento dos cálculos é apresentado em uma carta psicrométrica com uma trajetória indicando o seio da corrente gasosa e a outra indicando a corrente gasosa na interface. A primeira trajetória representa a fase gasosa e a segunda a fase sólida. As condições na interface são determinadas pela isoterma de dessorção, considerando-se que, nesta região, tem-se equilíbrio entre as fases.

Ao mesmo tempo, calcula-se números de unidade de transferência de massa NTU_D e de unidade de transferência de calor NTU_H , definidos como:

$$NTU_D = \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{dY}{Y^* - Y} \quad (3.21)$$

$$NTU_H = \int_{t_{g1}}^{t_{g2}} \frac{dt}{t_g - t_m} \quad (3.22)$$

Sendo o comprimento do secador calculado por:

$$L = NTU \times HTU \quad (3.23)$$

Para tanto, é necessário conhecer a altura da unidade de transferência, definidas de duas formas, pelas equações (3.24) e (3.25).

$$HTU_D = \frac{W_B}{k_Y a_V S} \quad (3.24)$$

$$HTU_H = \frac{W_B}{h a_V S} \quad (3.25)$$

Para um cálculo mais preciso, o comprimento do secador pode ser calculado pela integração direta da equação que serve de base para o método de HTU-NTU:

$$dl = \frac{W_B}{a_V S} \frac{dY}{w_D} \quad (3.26)$$

Para isto, o usuário deve ingressar valores de α e S . Observa-se que estes valores são mantidos constantes na integração desenvolvida pelo DryPak®.

Assim, quando se deseja calcular o comprimento de secadores em que as propriedades do escoamento não se mantêm constantes, deve-se dividir o secador em pequenas seções e calcular o comprimento de cada uma, entrando com a área de seção transversal e o coeficiente de transferência de calor volumétrico correspondente àquela seção.

O DryPak®, através da inclusão da diferença entre as velocidades das duas correntes e da dimensão característica do sólido no módulo “Calculator”, conduz a h calculado através da

correlação de Frössling (equação 2.3). Quando se utiliza outra correlação, h deve ser calculado pelo usuário. De posse de h , calcula-se α através da equação 3.27.

$$\alpha = h \times a_v \quad (3.27)$$

Vale a observação de que através do cálculo de a_v , realizado pelo usuário, é introduzida a influência da porosidade.

3.2.2.3- CÁLCULO DE TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem (w_D) pode ser calculada no DryPak® por um dos três métodos selecionados pelo usuário:

- considerando equilíbrio - assume-se que não haja resistência interna à transferência de massa na fase sólida;
- utilizando a curva característica de secagem (CDC) - melhor aplicada à secagem com gás em condições constantes; e
- utilizando o modelo difusional de Fick - resistência interna à transferência de massa é predominante.

Este último método não está disponível na versão comercial do software, no entanto a versão que o inclui foi cedida ao DTF/FEQ/UNICAMP.

3.2.2.3.1- EQUILÍBRIO

Este método é utilizado assumindo-se a ausência de resistência interna à transferência de massa e os cálculos são baseados somente na resistência da fase gasosa.

$$w_D = k_Y \frac{M_A}{M_B} \ln \left(\frac{1 - y_A}{1 - y_A^*} \right) \quad (3.28)$$

que pode ser escrita como:

$$w_D = k_Y \frac{M_A}{M_B} \ln \left(1 + \frac{Y^* - Y}{M_A / M_B + Y} \right) \quad (3.29)$$

e simplificada para:

$$w_D = k_Y \phi \left[Y^*(t_{mw}, X_w) - Y \right] \quad (3.30)$$

onde ϕ é o coeficiente de potencial de umidade, dado pela equação (3.31) sendo próximo a 1 a baixos níveis de umidade.

$$\phi = \frac{M_A / M_B}{Y^* - Y} \ln \left(1 + \frac{Y^* - Y}{\frac{M_A}{M_B} + Y} \right) \quad (3.31)$$

O termo $Y^*(t_{mw}, X_w)$ representa a umidade na interface, onde é assumido o equilíbrio entre as fases. Este valor é proveniente da equação da isoterma de sorção.

3.2.2.3.2- CURVA CARACTERÍSTICA DE SECAGEM (CDC)

O conceito de curva característica de secagem assume que, em condições constantes do gás de secagem, a taxa de secagem adimensional, expressa como a proporção entre a taxa de secagem a qualquer momento e a taxa de secagem no período de taxa constante, é uma função da umidade adimensional do sólido:

$$f=f(\Phi) \quad (3.32)$$

onde

$$f = \frac{w_D}{w_{DI}} \quad (3.33)$$

e

$$\Phi = \frac{X - X^*}{X_c - X^*} \quad (3.34)$$

Pelo conhecimento da taxa de secagem constante, pode-se calcular a taxa de secagem a qualquer momento. Este conjunto de equações é somente utilizada abaixo da umidade crítica.

w_{DI} é calculado a partir da equação (3.30), utilizando-se o dado da isoterma de sorção para condições de taxa constante.

Estes cálculos são recomendáveis para secagem que envolva gás em condições constantes. Isto pode ser encontrado em fluxo cruzado. Sua aplicabilidade para fluxos paralelos é questionável e fica a cargo do usuário.

3.2.2.3.3- DIFUSÃO DE FICK

Este método é baseado na consideração de que a difusão de umidade ocorre em somente uma direção. Segundo as geometrias possíveis para o modelo, esta direção pode ser normal à superfície no caso de placa plana infinita e radial nos casos de esfera ou cilindro infinito.

O modelo é baseado na segunda lei de Fick:

$$\frac{\partial X}{\partial \tau} = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^n D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial r} \right] \quad (3.35)$$

Onde $n=0$ para placa, 1 para cilindro e 2 para esfera. Assume-se que inicialmente a quantidade de umidade é igualmente distribuída.

A equação 3.35 na forma adimensional corresponde à equação 3.36:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Fo} = \frac{1}{\zeta^n} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\zeta^n \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \right] \quad (3.36)$$

onde:

$$\Phi = \frac{X - X^*}{X_c - X^*} \quad (3.37)$$

$$Fo = \frac{D_{\text{eff}} \tau}{R^2} \quad (3.38)$$

$$\zeta = \frac{r}{R} \quad (3.39)$$

A equação (3.39) pode ser integrada de duas formas segundo as condições de contorno, CCI que considera resistência externa à transferência de massa e CCII que pode considerar resistência interna e externa ou resistência interna, conforme Bi_D .

	CCI	CCII	
$\zeta=1$	$\Phi=0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} - Bi_D^* \Phi = 0$	(3.40)

$\zeta=0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} = 0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0$	(3.41)
-----------	--	--	--------

onde

$$Bi_D^* = \frac{Bk_y R}{D_{eff} \rho_m} \quad (3.42)$$

sendo

$$B = \frac{Y^*(X, \tau) - Y}{X_C - X} \quad (3.43)$$

Através da equação 3.35, pode-se obter a variação do teor de umidade do sólido através do mesmo com o tempo. O teor médio de umidade do sólido através do mesmo é dado pela equação 3.44:

$$\bar{X} = \frac{n+1}{R} \int_0^R X(r, \tau) r^n dr \quad (3.44)$$

e a taxa de secagem é obtida da definição:

$$w_D = -\frac{m_m}{A} \frac{d\bar{X}}{d\tau} \approx -\frac{m_m}{A} \frac{\Delta\bar{X}}{\Delta\tau} \quad (3.45)$$

Independentemente do tipo de método adotado, a isoterma de sorção é utilizada, daí, a importância que deve ser dada a esta equação. Um maior detalhamento sobre estas equações é apresentado no item 3.4.

3.2.2.4- CÁLCULOS DE SECADORES DE FLUXO CRUZADO E CÁLCULO DE OPERAÇÕES DE CONTATO LÍQUIDO-GÁS

No módulo paralelo pode-se também calcular operações de contato líquido-gás como resfriamento de líquidos e umidificação e resfriamento de gases. Além de cálculos para secadores de fluxo paralelo, o software faz cálculos para secadores de fluxo cruzado e a combustão de combustíveis orgânicos no ar. Estes cálculos não serão descritos aqui devido à sua não utilização no presente trabalho.

3.2.2.5- TEMPO DE SECAGEM

Trata-se de um dos mais importantes fatores de projeto e, ao mesmo tempo, o mais difícil. A forma de aproximação do problema vai depender do sistema e pode ser uma das seguintes:

- secagem externamente controlada
- secagem controlada interna e externamente
- secagem controlada internamente

O critério que vai definir qual a classificação adotada é o número de Biot difusional Bi_D definido pela equação 3.42.

O processo de secagem de sólidos quando $Bi_D < 1$, ou melhor, 0,1, pode ser classificado como externamente controlado. Quando estiver na faixa de $1 < Bi_D < 100$, o processo é controlado interna e externamente e quando $Bi_D > 100$, tem-se processo controlado internamente.

O processo de secagem pode ser dividido em duas etapas. A primeira corresponde ao período de taxa de secagem constante e termina quando se atinge o teor de umidade crítica, onde se inicia o segundo período ou período de taxa decrescente. Costuma-se considerar que o primeiro período seja controlado externamente e o segundo período, internamente.

Assume-se que na secagem externamente controlada não haja variações de temperatura e umidade dentro do sólido e que o valor destas variáveis através do sólido sejam as mesmas da superfície.

Na secagem internamente controlada, tem-se um processo mais complexo. As dificuldades que podem surgir estão listadas abaixo:

- variação de umidade e temperatura do gás durante o processo;

- a estrutura do sólido pode não ser homogênea apresentando áreas de diferentes permeabilidades para a difusão de umidade;
- o sólido pode ter uma forma própria bem diferente das três formas geralmente consideradas: placa infinita, cilindro e esfera;
- a difusividade da umidade pode depender fortemente da quantidade de umidade;
- o sólido pode encolher durante a secagem e
- a transferência de calor vai ser também internamente controlada, ou seja, Bi_H também é grande.

No DryPak®, pode-se calcular a curva cinética de processos de secagem internamente controlados de duas maneiras. Uma é a equação difusional de Fick, que é rigorosa matematicamente e leva em consideração várias das condições acima. Outra é baseada na curva característica de secagem (CDC), que é basicamente um modelo de caixa preta e trata muitas das considerações acima de forma agregada nos coeficientes da CDC.

Em processos em batelada, o secador é alimentado com uma carga de sólidos e todo o sólido têm o mesmo tempo de residência no secador. Em processos contínuos, as partículas podem ter iguais tempos de residência, mas em muitos casos, o tempo de residência pode variar.

Para se considerar a influência da distribuição do tempo de residência, introduz-se uma função desta distribuição. Esta função pode ser a proporção de partículas que deixam o secador em um dado intervalo de tempo t e $t+dt$, em relação a todas as partículas que deixaram o secador em um determinado tempo t , conhecida como função E , ou a integral desta função do tempo zero a um tempo dado, conhecida com função F .

Para incluir esta consideração, o DryPak® utiliza 4 modelos:

- escoamento empistonado;
- mistura perfeita –usado para batelada;
- n tanques perfeitamente misturados de igual volume em série e
- escoamento empistonado com dispersão axial.

O uso da função E permite predizer a quantidade de umidade de saída de um material em um secador contínuo baseando-se na cinética de secagem em batelada, assumindo-se que as condições de secagem sejam as mesmas em ambos os secadores.

3.3- CARTAS PSICROMÉTRICAS

As cartas psicrométricas apresentam de maneira gráfica as propriedades de um gás úmido. No DryPak®, estão presentes três tipos de cartas: Grosvenor, Mollier e Salin.

O software apresenta nestas cartas, conforme selecionado pelo usuário, área relativa à explosividade que corresponde à concentração de O_2 em que pode ocorrer auto-ignição do material, além da região acima da saturação do ar. Apresenta, também, isosteras que são curvas correspondentes a uma umidade de equilíbrio constante do sólido.

Estas cartas, além de apresentarem as propriedades do gás selecionado, são utilizadas pelo DryPak® para apresentar as trajetórias das duas correntes durante o processo. A corrente gasosa é representada por uma curva com as propriedades do seio

do gás e a corrente sólida pelas propriedades do gás em equilíbrio com esta fase.

3.3.1- CARTA DE GROSVENOR

Trata-se da mais simples e mais antiga delas. Contém linhas de umidade relativa constante, isoentálpicas e temperaturas de saturação adiabática e de bulbo úmido, temperatura e umidade do gás.

3.3.2- CARTA DE MOLLIER

Esta carta foi desenvolvida a partir da modificação das coordenadas da carta de Grosvenor, o que a tornou mais funcional.

3.3.3- CARTA DE SALIM

Através de uma modificação da carta de Mollier, chegou-se a carta de Salim, que permite alta resolução na área de baixa temperatura e umidade. O DryPak® permite que se faça variações nas perspectivas desta carta.

3.4- EQUAÇÕES DE ISOTERMAS DE SORÇÃO

Como pode ser observado no item 3.2.2.3, os três métodos de cálculos de taxa de secagem envolvem o uso de isotermas de sorção.

O DryPak® contém 38 equações de isotermas de sorção. Destas, 19 são dependentes da temperatura, o que leva a uma maior precisão nos cálculos, uma vez que o comportamento de um sólido é geralmente dependente da temperatura.

Este conjunto de equações, apresentado na tabela 3.2, é composto desde as primeiras equações de isotermas como LANGMUIR (1916) às mais recentes.

No desenvolvimento do presente trabalho, foi feita uma busca das referências originais e verificou-se que estas foram desenvolvidas para os mais diversos produtos como carne seca, peixe, hidrocarbonetos, grãos, etc

Tabela 3.2 - Principais equações de isotermas de sorção encontradas na literatura (†)

Equação	Referência.	Nº
$\phi = \frac{X/P_1}{P_2 \left(1 - X/P_1\right)}$	LANGMUIR (1916)	(3.46)
$\ln(\ln(1/\phi)) = \ln(P_1) + X \ln(P_2)$	FOOTE e BRADLEY (1936)	(3.47)
$X/P_1 = \frac{P_2}{(1-\phi)[1+(P_2-1)\phi]}$	BRUNAUER, EMMETT e TELLER (1938)	(3.48)

$\ln(\varphi) = P_1 - \frac{P_2}{X^2}$	HARKINS e JURA (1944 a e b)	(3.49)
$X = P_1 \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{P_2}$	OSWIN (1946) *	(3.50)
$\frac{\varphi}{X} = P_1 + P_2\varphi + P_3\varphi^2$	HAILWOOD e HORROBIN (1946) *	(3.51)
$\log(\log(\varphi 100)) = P_2 \log\left(\frac{X}{P_1}\right)$	HALSEY (1948)	(3.52)
$\frac{X}{P_1} = \frac{P_2\varphi}{1+P_2\varphi} (1+\varphi)$	HUTTIG (1948)	(3.53)
$X = \frac{P_1 P_2 P_3 \varphi}{(1-P_4 P_3 \varphi)[1+(P_2-P_4)P_3 \varphi]}$	ANDERSON e HALL (1948)	(3.54)
$\ln(1-\varphi) = -P_1 T X^{P_2}$	HENDERSON (1952)	(3.55)
$X = \frac{P_1 P_2 \varphi (1-\varphi^{P_3})}{(1-\varphi)[1+(P_2-1)\varphi]}$	ROUNSLEY (1961) *	(3.56)
$X = \frac{P_1}{\ln(\varphi)} + P_2$	KUHN (1964)	(3.57)
$1-\varphi = \exp(-P_1 T^{P_2} X^{P_3} T^{P_4})$	DAY e NELSON (1965)	(3.58)
$1-\varphi = \exp(-P_1 (P_5 T + P_6)^{P_2} (100X)^{P_3} (P_5 T + P_6)^{P_4})$	DAY e NELSON (1965)	(3.59)
$\ln(\varphi) = -\frac{P_1}{RT} \exp(-P_2 X)$	CHUNG e PFOST (1967)	(3.60)
$\ln(\varphi) = P_1 \ln(p_s(T)) \exp(P_2 X) + P_3 \exp(P_4 X)$	STROHMAN e YOERGER (1967)	(3.61)
$\ln(\varphi) = P_1 \ln(P_5 p_s(T)) \exp(P_2 X) + P_3 \exp(P_4 X)$	STROHMAN e YOERGER (1967)	(3.62)

$\ln(X) = \ln(P_1) - P_2 \varphi$	CAURIE (1970)	(3.63)
$\varphi = \frac{P_1 + X}{P_2 + X}$	MIZRAHI e LABUZA (1970)	(3.64)
$X = \frac{1}{P_2} \ln \left[\frac{1}{P_1} (\ln(\varphi) - P_3) \right]$	CHEN (1971)	(3.65)
$\varphi = \exp \left[-P_1 T^{P_2} \exp(-P_3 T^{P_4} X) \right]$	CHEN e CLAYTON (1971)	(3.66)
$\ln \left[X + (X^2 + P_1)^{0,5} \right] = (P_2 \varphi) + P_3$	IGLESIAS e CHIRIFE (1976a) (1976b)	(3.67)
$\varphi = \frac{P_1}{\exp(P_2 X^{-P_3})}$	IGLESIAS e CHIRIFE (1976a) (1976b)	(3.68)
$\ln(\varphi p_s(T)) = (P_1 + P_2 X) \ln(p_s(T)) + (P_3 + P_4 X + P_5 X^2)$	CHIRIFE e IGLESIAS (1978)	(3.69)
$\varphi = P_1 + P_2 X + P_3 X^2 + P_4 X^3 + P_5 X^4$	HAYNES (1978) *	(3.70)
$\ln(\varphi p_s(T)) = P_1 + P_2 X - (P_3 + P_4 X + \frac{P_5}{X} + \frac{P_6}{X^2})/T$	WERLING (1978) *	(3.71)
$X = \frac{P_1 P_2 P_3 \varphi}{(1 - P_3 \varphi)[1 + (P_2 - 1)P_3 \varphi]}$	Van Der BERG (1983) *	(3.72)
$\ln(\varphi) = -\frac{P_1 P_2 X}{\frac{1}{P_3} - \frac{1}{T} - 1}$	AGUERRE et al. (1986)**	(3.73)
$X = P_1 \left(\frac{\varphi}{P_3 - \varphi} \right)^{P_2}$	GINZBURG e SAVINA (1982)**	(3.74)

$\ln(1 - \varphi) = -P_1 T + P_2 X^{P_3}$	<u>—</u> **	(3.75)
$\varphi = P_3 \left(1 - \exp \left(-P_1 T X^{P_2} \right) \right)$	<u>—</u> **	(3.76)
$\varphi = \left(1 - \exp \left(-P_1 (P_2 + T) X^{P_3} \right) \right)$	<u>MADAMBA</u> (1995)**	(3.77)
$\varphi = \exp(-X^{P_3} \exp(P_1 - P_2 T))$	<u>MADAMBA</u> (1995)**	(3.78)
$\varphi = \exp \left(-\frac{P_1}{P_3 + T} \exp(-P_2 X) \right)$	<u>MADAMBA</u> (1995)**	(3.79)
$\ln(1 - \varphi) = -P_1 X^{P_2} T^{P_3}$	<u>—</u> **	(3.80)
$\ln(1 - \varphi) = -P_1 X^{P_2} t^{P_3}$	<u>CAVALCANTI</u> <u>MATA e</u> <u>MENEGALLI</u> (1997)**	(3.81)
$X = P_1 \exp(P_2 \ln \varphi) + P_3 \varphi^{P_4}$	PELEG (1992)**	(3.82)
$\varphi = \exp(-P_1 \exp(P_2 - P_3 T) X^{P_4})$	<u>COSTA et al.</u> (1997)**	(3.83)
$\varphi = \exp(T \exp(-P_1 X - P_2 \sqrt{X} - P_3) - (\exp(-P_4 X - P_5 \sqrt{X} - P_6))$	<u>KARLSSON e</u> <u>SOININNEN</u> (1982)**	(3.84)
$X = \frac{P_1 P_2 \varphi}{(1 - P_3 \varphi)[1 + (P_2 - P_3) \varphi]}$	JAAFAR e MICHALOWSKI (1990)	(3.85)

(†) As equações com referência grifada são dependentes da temperatura. Os termos P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 e P_6 se referem a parâmetros das equações de isoterma de sorção que são obtidos por ajuste a um determinado produto.

(*) Referências citadas por PAKOWSKI (1996)

(**) Referências citadas por PAKOWSKI (1997), tendo algumas autores desconhecidos do autor deste trabalho.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÕES DE SECAGEM USANDO DryPak®

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando-se o software Drypak® para simulação do processo de secagem pneumática de dois materiais: areia (não-higroscópico) e amido de mandioca (higroscópico), cujos dados de entrada foram obtidos experimentalmente por ROCHA (1988) e PÉCORA (1985), respectivamente. Tal escolha deu-se pelo fato destas referências apresentarem todos os dados necessários à simulação, além de, no caso de ROCHA (1988), resultados obtidos com simulação numérica.

Neste capítulo, apresenta-se os dados utilizados nas simulações desenvolvidas utilizando-se o Drypak®, os resultados obtidos nestas simulações e a discussão destes.

4.1- DADOS DE ENTRADA

ROCHA (1988) realizou a secagem de resina acrílica, alumina e de partículas de areia, de dois diferentes tamanhos, em um secador pneumático de 4,0m de trecho vertical e 0,0525m de diâmetro interno. Apenas os dados relativos a areia foram utilizados neste trabalho.

PÉCORA (1985) conduziu seus experimentos em um secador pneumático vertical de 2m de altura e 0,039m de diâmetro interno. Quanto ao diâmetro médio do amido de mandioca, cabem algumas explicações adicionais.

Quando úmidas, as partículas de amido de mandioca tendem a se aglomerar, o que torna difícil a determinação de um diâmetro equivalente, pois o diâmetro dos grumos formados é muito dependente do teor de umidade (PÉCORA, 1985).

Embora WHISTLER (1964) tenha determinado que uma partícula de amido de mandioca possua geometria esférica e diâmetro médio de 25 μ m, PÉCORA (1985) verificou que o diâmetro de um grumo de amido é alterado durante a secagem. Para uma umidade inicial de 35% em base seca, o diâmetro médio do grumo formado é de 590 μ m e, após a secagem, obteve-se um diâmetro médio de Sauter em torno de 200 μ m. Então, PÉCORA (1985) utilizou nos cálculos o valor de 300 μ m para diâmetro médio.

As características físicas dos materiais utilizados no presente trabalho encontram-se na tabela 4.1, os dados de entrada utilizados no DryPak® na tabela 4.2.

Com o objetivo de se facilitar a comparação com as referências, utilizou-se a mesma numeração para os experimentos.

Tabela 4.1- Características físicas dos materiais utilizados nas simulações

Material	Referência	Massa específica (kg/m ³)	Diâmetro médio d _p (mm)	Calor específico (J/kg°C)
Areia	ROCHA (1988)	2622	0,380	799,7
Amido de mandioca	PÉCORA (1985)	1500	0,300	-

Como não foi encontrado na literatura o valor de calor específico para o amido de mandioca, utilizou-se, no presente trabalho, o valor de 1420 J/kg°C, aproximado para carboidratos por SCHWARTZBERG (1981).

Tabela 4.2 – Condições operacionais de entrada utilizados no DryPak®

Experimento	Autor	W _m x10 ³ (kg/s)	W _r x10 ² (kg/s)	W _m /W _r	X (kg/kg)	T _m (°C)	Y (g/kg)	T _g (°C)
16	ROCHA (1988)	4,740	3,947	0,1200	0,0468	39,9	46,9	109,4
04	PÉCORA (1985)	0,151	1,090	0,0139	0,3500	25,0	18,0	112,5

4.2- DADOS NECESSÁRIOS À SIMULAÇÃO NO DryPak®

Para a simulação, além dos dados de entrada, necessita-se de outros dados que são apresentados a seguir.

4.2.1- ISOTERMAS DE SORÇÃO

Para o desenvolvimento do trabalho, fez-se necessário o uso de uma isoterma de dessorção, pois esta fornece dados de equilíbrio utilizados em qualquer um dos três métodos de cálculo de taxa de secagem utilizados pelo DryPak®.

A areia é um mineral não-higroscópico, cujos dados de isotermas ou dados experimentais de equilíbrio não se encontram disponíveis na literatura. Adotou-se, então, a mesma consideração admitida por ROCHA (1988) de que a quantidade de umidade ligada fosse tão pequena que pudesse ser aproximada de zero. Assim, qualquer umidade retirada durante o experimento seria proveniente da quantidade de umidade não-ligada.

A equação de isoterma contida na biblioteca do DryPak® que melhor se ajusta à situação é

$$\phi = P_1 + P_2X + P_3X^2 + P_4X^3 + P_5X^4 \quad (3.70)$$

Considerando nulos os parâmetros P_1 , P_3 , P_4 e P_5 , tem-se uma relação linear entre ϕ e X :

$$\varphi = P_2 X \quad (4.1)$$

Tendo que X corresponde à umidade não-ligada, por menor que este seja, φ torna-se constante e igual a um, ou seja, o ar em contato com a superfície do material se encontra saturado. Desta forma, o sólido apresenta um comportamento semelhante a uma superfície livre em que as condições limites são as de bulbo úmido. Considerando X igual a 10^{-30} kg/kg como uma aproximação numérica para o caso de X igual a zero, tem-se $P_2 = 10^{30}$.

Assim, a equação da isoterma para a areia pode ser aproximada por:

$$\varphi = 10^{30} X \quad (4.2)$$

Para o caso do amido de mandioca, a isoterma foi ajustada através dos dados experimentais de umidade de equilíbrio e umidade relativa de SHOTTON e HARB (1965). Estes dados eram relativos à dessorção de umidade de amido de milho, porém, foram utilizados devido à inexistência de dados experimentais para amido de mandioca. Considerou-se que não deva haver diferenças significativas entre as isotermas dos dois produtos. Esta mesma consideração foi adotada por PÉCORA (1985), que determinou as condições de equilíbrio através do uso do gráfico de isoterma para adsorção de umidade em amido de milho obtido em LEUNG e STEINBEIRG (1979). PÉCORA (1985) ainda considerou que a isoterma de adsorção não seja tão diferente da isoterma de

dessorção, embora se trate de um produto higroscópico que deve apresentar histerese.

Para o ajuste, utilizou-se o módulo de regressão não linear do software Statistica® 5.0, testando-se as equações de isotermas pertencentes à biblioteca do DryPak®, constantes da tabela 3.2.

Várias equações apresentaram um bom ajuste. Dentre estas, a que se mostrou melhor foi a equação 3.58.

$$1 - \phi = \exp \left[-P_1 T^{P_2} \exp(-P_3 T^{P_4} X) \right] \quad (3.58)$$

Os parâmetros ajustados para o amido de milho foram:

$P_1=76,4264$ $P_2= -0,014934$ $P_3=15,06375$ $P_4= -0,332855$

Tendo $\text{Chi}^2=0,025264$ e $R=0,9902$

4.3- ARTIFÍCIO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO

Como o DryPak® trabalha com coeficiente de transferência de calor volumétrico constante e este varia num secador pneumático em função das condições de velocidades das correntes e da porosidade, apresentando assim uma variação com o comprimento do secador, o cálculo do secador pneumático em uma única etapa resulta em um valor muito afastado das condições experimentais (tabela A.1). Uma boa aproximação foi feita dividindo-se o secador em seções e considerando o comprimento total do secador como a soma dos comprimento das seções.

Tendo ainda que o DryPak[®] tem a quantidade de umidade final do sólido como valor a ser atingido e, através desta imposição, calcula as temperaturas finais, a umidade final da corrente gasosa e o comprimento do secador, foi desenvolvido um estudo para se determinar a melhor variação de umidade entre as seções do secador. Para isto, utilizou-se como base os dados do experimento 16 de ROCHA (1988).

Inicialmente, utilizou-se o conceito de que a maior variação das condições das correntes ocorre no comprimento de entrada. Foram realizadas simulações considerando perda de 70 e de 100% do teor total de umidade perdida no trecho em que ocorre variação de porosidade, correspondente ao comprimento de entrada (Tabelas A.2 e A.3). Embora os resultados finais em relação às umidades das correntes e temperatura do sólido se apresentassem próximos aos experimentais, o comprimento do secador mostrou-se bem inferior ao experimental.

Então, foram realizados três outros tipos de simulação a saber:

1. Variação de umidade igual para todas as seções;
2. Dois tipos de variação – Uma pequena e constante no trecho com porosidade variável, correspondente em cada seção a 0,2% do total de umidade perdida e uma maior e constante no trecho de escoamento desenvolvido;
3. Três variações diferentes – Cada uma em um trecho igual de seções, independentemente do tipo de escoamento. Neste caso, foram utilizados perda de 2% do teor total de umidade perdida nas primeiras

10 divisões, 10% deste teor nas 10 divisões intermediárias e 88% nas 10 últimas divisões.

Para a comparação, foi estabelecido o número constante de 30 seções. Os resultados das simulações dos três itens acima se encontram nas tabelas A.4, A.5 e A.6, respectivamente.

O segundo tipo de variação foi o que apresentou o melhor resultado de comprimento de secador, seguido, em ordem decrescente, do terceiro e do primeiro tipo.

Após se estabelecer que é necessário ter variações diferentes nos dois trechos de escoamento diferentes e que a variação no primeiro trecho deve corresponder no máximo a 3% do total do teor de umidade perdida, aumentou-se o número de seções para 40 e o resultado, apresentado na tabela A.7, embora pouco melhor, não se mostrou compensador em relação ao aumento de tempo computacional requerido. Vale observar que quanto menores as variações e maior o número de seções, melhores os resultados, mas esta melhora é pequena frente ao aumento do tempo computacional.

Os valores de porosidade inicial e no trecho de escoamento desenvolvido foram os mesmos adotados por ROCHA (1988) para facilidade de comparação. No trecho em que há variação de porosidade, esta variação foi considerada linear.

Uma forma de se calcular a porosidade de maneira iterativa consiste em se considerar um valor para esta variável com o qual se calcula a equação 4.3.

$$V(1-\epsilon)\rho_m = m_m \quad (4.3)$$

$$6m_m/\rho_m d_p = A \quad (4.4)$$

Através da equação 4.5 calcula-se ϵ que será o valor utilizado nas equações 4.3 a 4.5 até que se obtenha um valor constante.

$$\frac{A}{V} = 6 \frac{(1-\epsilon)}{d_p} \quad (4.5)$$

A variação de umidade no trecho com porosidade variável foi ajustada com base nos dados experimentais de ROCHA (1988), porém, para o projeto de secador em que não se tenha dados experimentais, o DryPak® ainda não é adequado. Para isto, seria necessário um estudo em que se determinasse esta variação em função do teor de umidade inicial e da perda total do teor de umidade desejada para um determinado sólido.

4.4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados das simulações realizadas com os dados das duas referências e as discussões destes resultados.

Como foram adotados os dados de areia, obtidos por ROCHA (1988), para a determinação da metodologia utilizada nas simulações, comparação entre as correlações

de Nu e analogias de transferência de calor e massa e análise da influência da correção de Ackermann, os resultados relativos a este produto são discutidos em primeiro lugar. Em seguida, apresenta-se os resultados para amido de mandioca, com base nos dados experimentais obtidos por Pécora (1985).

4.4.1- SIMULAÇÕES COM DADOS DE AREIA

As simulações iniciais (tabelas A.1 a A.7) foram feitas utilizando-se a correlação de Frössling para o número de Nusselt (equação 2.3), conforme o modelo adotado pelo DryPak® e utilizando-se a analogia de transferência de calor e massa de Chilton-Colburn. Na seqüência, foram realizadas simulações utilizando-se as correlações de Kramers, Chukhanov, Ranz e Marshall, Debrand, Valentin e de Bandrowski e Kaczmarzyk, com a mesma analogia. Os resultados destas correlações encontram-se nesta mesma ordem nas tabelas A.8 a A.13. Então, com a correlação de Frössling, foram feitas simulações com as analogias de transferência de calor e massa de Lewis, Bedingfield-Drew e Henry-Epstein, cujos resultados se encontram nas tabelas A.14 a A.16. Finalmente, realizou-se uma simulação utilizando-se a correção de Ackermann com a analogia de Lewis (tabela A.17).

Escolheu-se a correlação de Frössling para testar a influência da analogia de transferência de calor e massa por esta ter apresentado o comprimento de secador mais próximo

ao do secador utilizado experimentalmente. A escolha da analogia de Lewis para testar a influência da correção de Ackermann deu-se pelo mesmo motivo.

Para a comparação com os resultados experimentais, optou-se por tomar como padrão a simulação 05, constante das tabelas 4.3, 4.5, 4.6 e A.5, pois foi desenvolvida com a correlação de Frössling, e analogia de transferência de calor e massa de Chilton-Colburn, que são utilizados como "Default" no DryPak®.

Entre os valores apresentados nas tabelas do apêndice A, tem-se os dados de entrada no simulador, resultados de cálculos de porosidades, velocidades e comprimento total do secador efetuados pelo usuário, assim como, os resultados calculados pelo DryPak® em cada seção de comprimento do secador: umidade e temperatura de cada corrente e comprimento do secador. Os valores de coeficiente de transferência de calor foram calculados pelo DryPak® quando foi utilizada a correlação de Frössling e pelo usuário quando utilizadas as demais correlações. Os resultados de comprimento total do secador, temperatura e umidade das duas correntes na última seção são apresentados em negrito nas tabelas do apêndice A e, novamente, neste capítulo, nas tabelas 4.3, 4.5 a 4.7.

4.4.1.1-ANÁLISE DOS RESULTADOS

No DryPak®, a consideração de que as maiores variações ocorrem na zona de aceleração não conduziu, para

os dados do experimento 16 de ROCHA (1988), a comprimentos de secador próximos ao experimental, como pode ser observado na tabela 4.3. Isto poderia ser visto, inicialmente, como uma falta de concordância com a teoria. No entanto, como o simulador trabalha somente com escoamento em estado estacionário, cada seção pode ser considerada com um pequeno secador em estado estacionário com as condições de velocidades, coeficiente de transferência de calor volumétrico e porosidade constantes, não havendo, portanto, em momento algum, a existência de variações em uma zona de aceleração, como ocorre experimentalmente.

Mostra-se, de maneira bem evidente, na tabela 4.3 que as condições das simulações 1 a 4 levam a um resultado de comprimento do secador bem afastado do comprimento real e que as condições das simulações 5 a 7 conduzem a um comprimento do secador mais próximo da realidade e semelhantes entre si.

Como era de se esperar, nas simulações, os valores finais de umidade e temperatura das duas correntes estão acoplados entre si e se comportam de maneira independente da variação de umidade adotada e do número de divisões do secador, como pode ser visto na tabela 4.3. Uma vez que estes valores são determinados por balanços de massa e energia que trabalham somente com as condições das extremidades, não se importando na forma como é conduzido o processo.

Nos itens subsequentes, apresentar-se-á a comparação entre resultados experimentais e simulados pelo DryPak[®], bem como a influência do uso de diferentes correlações de

Nu, de diferentes analogias entre transferência de calor e transferência de massa e de correção de Ackermann.

Tabela 4.3- Resultados da simulação da secagem de areia, utilizando-se diferentes variações do teor de umidade perdida, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Frössling

Simulação*	Comentários	$X \times 10^{-2}$ (kg/kg)	t_m (°C)	Y (g/kg)	t_g (°C)	L (m)
1	Simulação desenvolvida em uma só etapa.	0,0610	47,9	52,4149	96,3	0,30
2	Perda de 70% de umidade no trecho com variação de porosidade.	0,0620	47,9	52,4137	96,2	1,51
3	Perda de 100% de umidade no trecho com variação de porosidade.	0,0620	47,9	52,4244	96,2	0,40
4	Variação igual de umidade em todas as divisões do secador.	0,0610	47,9	52,4433	96,2	2,08
5	Variações de umidade constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste.	0,0620	47,9	52,4189	96,2	3,52
6	3 variações de umidade constantes e diferentes entre si ao longo do secador.	0,0609	47,9	52,4160	96,2	3,47
7	Variações de umidade constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste. (40 divisões)	0,0619	47,9	52,4137	96,2	3,57

* O número da simulação se refere ao número da tabela correspondente no apêndice A. As simulações 1 a 6 foram realizadas com 30 divisões.

4.4.1.1.1- COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS

A tabela 4.4 apresenta os dados obtidos experimentalmente por ROCHA (1988). Enquanto as figuras 4.1 a 4.4 apresentam os perfis experimentais e numéricos de umidade e temperatura para as duas correntes, utilizando-se a correlação de Frössling e analogia de Chilton-Colburn, conforme tabela A.5. Pela observação da figura 4.3, nota-se que o perfil de umidade do gás se aproxima bastante do determinado experimentalmente, assim como o valor final de umidade do sólido (figura 4.1). Não se pôde comparar os perfis de umidade e temperatura do sólido, pois ROCHA (1988) somente obteve estes dados nas extremidades do secador. O perfil experimental de temperatura do gás apresenta valores inferiores aos calculados, pois no modelo utilizado pelo DryPak® considera-se o secador termicamente isolado.

Tabela 4.4- Resultados experimentais de secagem de areia obtidos por ROCHA (1988)

	Comprimento (m)				
	0	1,2	1,7	2,2	4,0
$X \times 10^2$ (kg/kg)	4,68	-	-	-	$6,2 \times 10^{-2}$
T_m (°C)	39,9	-	-	-	45,8
$Y \times 10^2$ (kg/kg)	4,69	4,97	5,02	5,12	5,25
T_g (°C)	109,4	86,7	85,6	84,5	-

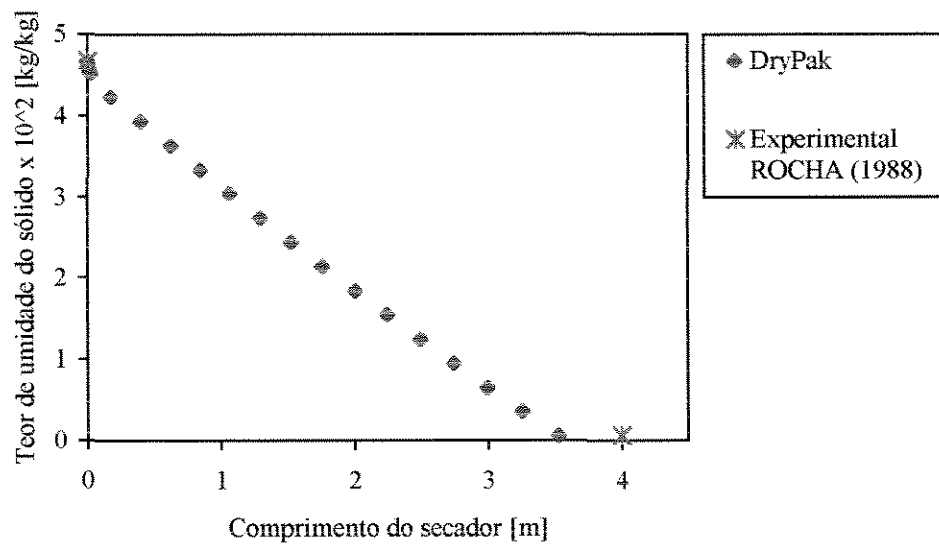


Figura 4.1- Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Frössling

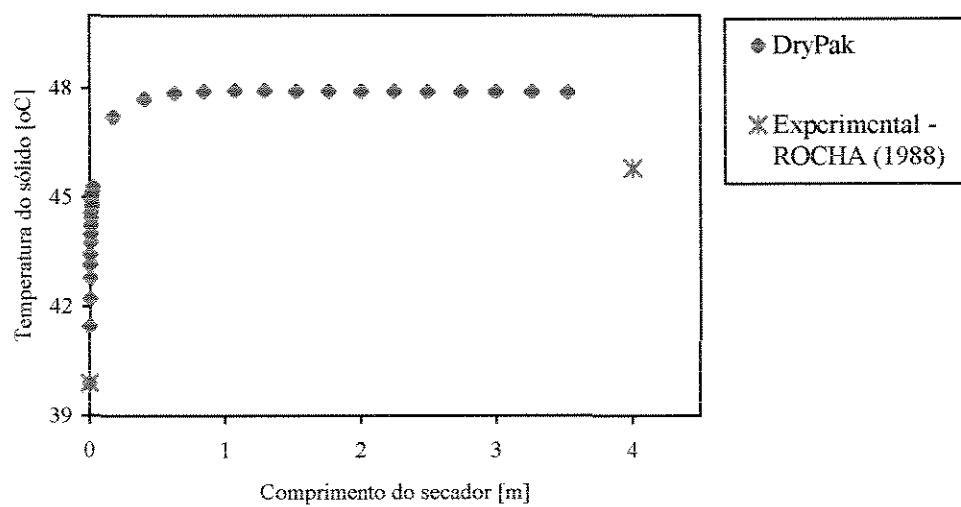


Figura 4.2- Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Frössling

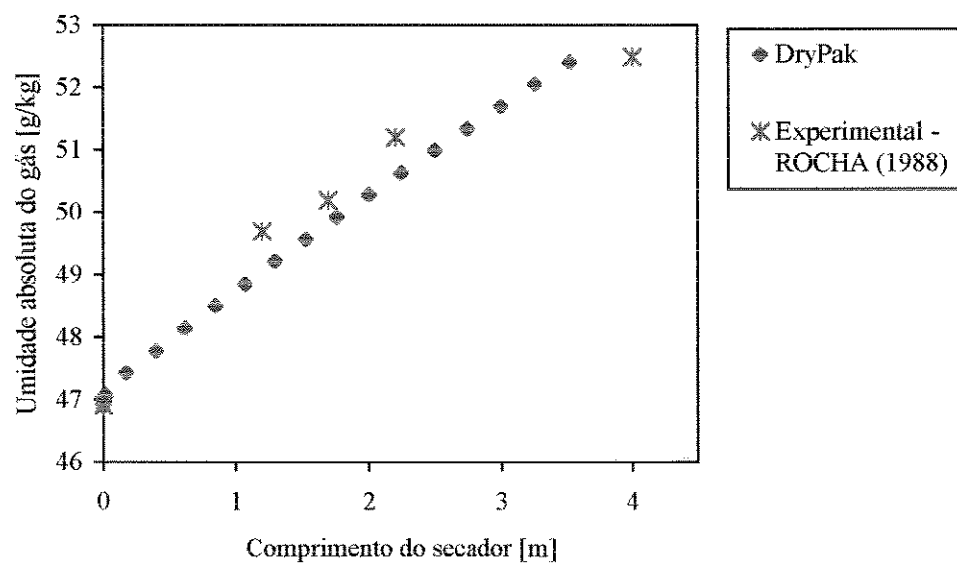


Figura 4.3- Umidade absoluta do gás ao longo do secado, utilizando a correlação de Frössling

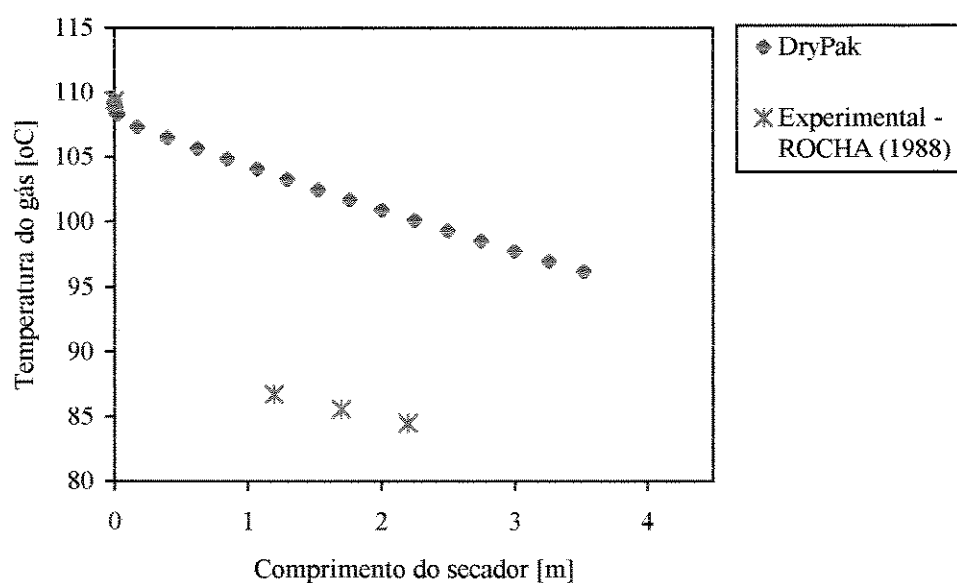


Figura 4.4- Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando a correlação de Frössling

4.4.1.1.2- COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES COM DIFERENTES CORRELAÇÕES PARA NU

A tabela 4.5 apresenta resultados obtidos nas simulações utilizando-se diferentes correlações de Nu. Como já foi observado no item 4.4.1.1, os valores finais de umidade e temperatura para as duas correntes também não se alteram em função da correlação de Nu utilizada.

As correlações para Nu vão apresentar modificações no coeficiente de transferência de calor (h) e este no comprimento do secador, como pode ser observado em detalhe nas tabelas A.5 e A.8 a A.13. A diminuição do coeficiente de transferência de calor resulta na necessidade de maior contato entre as fases, traduzido por um maior comprimento de secador, para se obter as mesmas condições finais.

Para este estudo, as correlações que apresentaram menor coeficiente de transferência de calor ao longo do secador foram as que conduziram a um valor de comprimento de secador mais aproximado do experimental. Sendo a correlação de Frössling a que apresentou melhores resultados.

Observou-se que o modelo matemático utilizado pelo DryPak[®], assim como todo modelo matemático para secadores pneumáticos, é extremamente sensível aos coeficientes de transferência de calor e massa. Tal observação também foi realizada por ROCHA (1988).

Tabela 4.5- Resultados da simulação da secagem de areia, utilizando-se analogia de Chilton-Colburn e diferentes correlações para Nu

Simulação *	Correlação	$X \times 10^{-2}$ (kg/kg)	t_m (°C)	Y (g/kg)	t_g (°C)	L(m)
5	Frössling	0,0620	47,9	52,4189	96,2	3,52
8	Kramers	0,0618	47,9	52,4143	96,2	2,72
9	Chukhanov	0,0619	47,9	52,4139	96,2	1,51
10	Ranz e Marshall	0,0613	47,9	52,4142	96,2	3,20
11	Debrand	0,0617	47,9	52,4139	96,3	2,29
12	Brandrowski e Kaczmarzyk	0,0613	47,9	52,4143	96,2	1,66
13	Valentin	0,0620	47,9	52,3745	96,1	1,14

* O número da simulação se refere ao número da tabela correspondente no apêndice A.

4.4.1.1.3- INFLUÊNCIA DA ANALOGIA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA E DA CORREÇÃO DE ACKERMANN

A influência da analogia de transferência de calor e massa é verificada no cálculo de temperatura de bulbo úmido. Nas simulações em que se utilizou os dados do experimento 16 de ROCHA (1988), a temperatura de bulbo úmido corresponde à temperatura do sólido, pois a umidade retirada é somente umidade não ligada, caso semelhante a uma superfície livre de líquido. A diferença notada entre o valor de temperatura do sólido para a analogia de Lewis e as demais ocorre devido à consideração do número de Lewis igual a um. Isto corresponde a uma igualdade entre as difusividades térmica e mássica.

Pode-se observar na tabela 4.6 que, embora a analogia de Lewis apresente resultado um pouco mais próximo do experimental para o comprimento do secador, não há diferenças significativas entre os resultados obtidos para as analogias de transferência de calor e massa.

O uso da correção de Ackemann, conforme observado na tabela 4.7, levou a um resultado um pouco melhor em relação ao comprimento total do secador, não resultando em diferenças na temperatura e umidade final de cada fase. Isto significa que, nas condições do experimento, não houve grande influência do fluxo de vapor na transferência de calor para a superfície, devido ao baixo teor de umidade do sólido e ao fato do sólido praticamente não conter umidade ligada, casos em que esta correção traria diferença significativa aos resultados.

Tabela 4.6- Resultados de simulação de secagem de areia, utilizando-se correlação de Frössling e diferentes analogias entre transferência de calor e massa

Simulação *	Analogia	$X \times 10^{-2}$ (kg/kg)	t_m (°C)	Y (g/kg)	t_g (°C)	L (m)
5	Chilton-Colburn	0,0620	47,9	52,4189	96,2	3,52
14	Lewis	0,0619	48,9	52,4138	96,2	3,57
15	Bedingfield-Drew	0,0619	48,0	52,4187	96,2	3,53
16	Henry-Epstein	0,0619	48,0	52,4137	96,2	3,53

* O número da simulação se refere ao número da tabela correspondente no apêndice A.

Tabela 4.7- Resultados de simulação de secagem de areia, utilizando-se analogia de Lewis, correlação de Frössling, sem e com correção de Ackermann

Simulação*	Correção de Ackermann	$X \times 10^{-2}$ (kg/kg)	t_m (°C)	Y (g/kg)	t_g (°C)	L (m)
14	Sem	0,0619	48,9	52,4138	96,2	3,57
17	Com	0,0619	48,4	52,4141	96,2	3,62

* O número da simulação se refere ao número da tabela correspondente no apêndice A.

4.4.1.1.4- COMPARAÇÃO DOS MODELOS

O DryPak[®], por ter sido desenvolvido para projeto de secadores, fixa o teor final de umidade do sólido a ser obtido e calcula os valores das temperaturas das duas correntes, umidade da fase gasosa e o comprimento do secador. No caso de ROCHA (1988), fixou-se o comprimento do secador, obtendo-se as condições de saída das duas fases. No DryPak[®], embora a variável mantida constante seja o teor final de umidade do sólido, a maneira pela qual é conduzida a integração é a mesma dos modelos matemáticos para secadores pneumáticos de forma geral.

Comparando-se o modelo utilizado pelo DryPak[®] e os modelos utilizados por ROCHA (1988), cujas equações e hipóteses constam, respectivamente dos itens 3.2.2.2 e 2.6.1.1, observa-se que as diferenças entre os dois modelos são:

- ROCHA (1988) trabalha com diferentes correlações para Nu. O DryPak[®] tem como correlação padrão a correlação

de Frössling (equação 2.3), podendo-se, no entanto, ingressar diretamente com o h_v calculado por outra correlação;

- No cálculo de a_v , o DryPak® considera somente a influência da porosidade, enquanto que ROCHA (1988) considera a influência da concentração volumétrica;
- O DryPak® considera o secador como termicamente isolado e ROCHA (1988) considera as perdas relativas às interações do duto com o ambiente; e
- ROCHA (1988) aproxima a 1 o potencial de umidade enquanto o DryPak® utiliza a equação 3.31.

Os resultados de simulação de ROCHA (1988) para as correlações que foram utilizadas também no presente trabalho se encontram no apêndice B.

ROCHA (1988) utilizou 2 modelos que diferem entre si na modelagem dinâmica, o que conduz a diferentes valores de velocidades. Como o Nu é função das velocidades, e o comprimento do secador é função do Nu , tem-se diferentes propriedades das fases envolvidas para o mesmo comprimento de secador. Porém, para as correlações de Kramers, de Ranz e Marshall, Debrand e de Bandrowski e Kaczmarzyk, estas diferenças são desprezíveis, como pode ser observado no apêndice B e nas figuras 4.5 a 4.20.

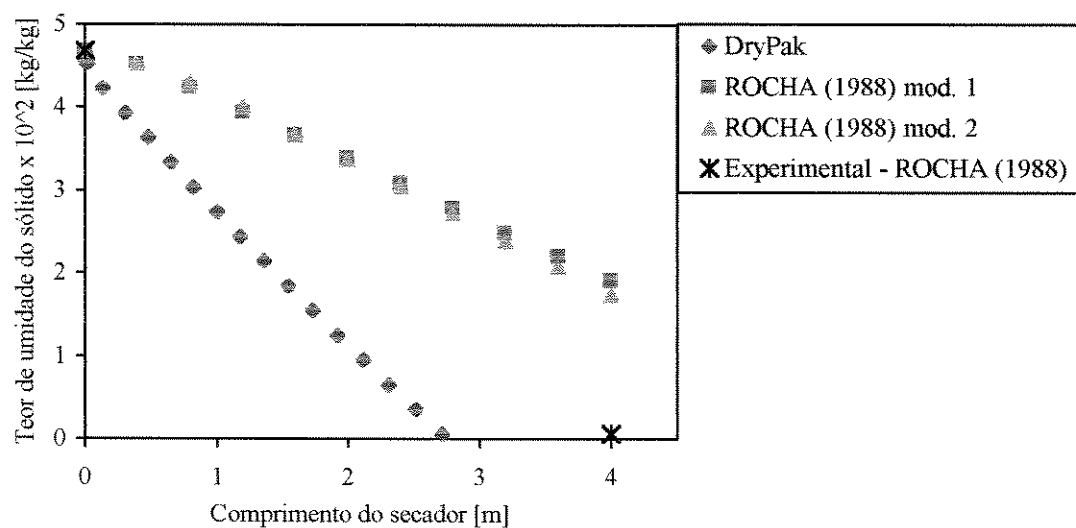


Figura 4.5- Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Kramers

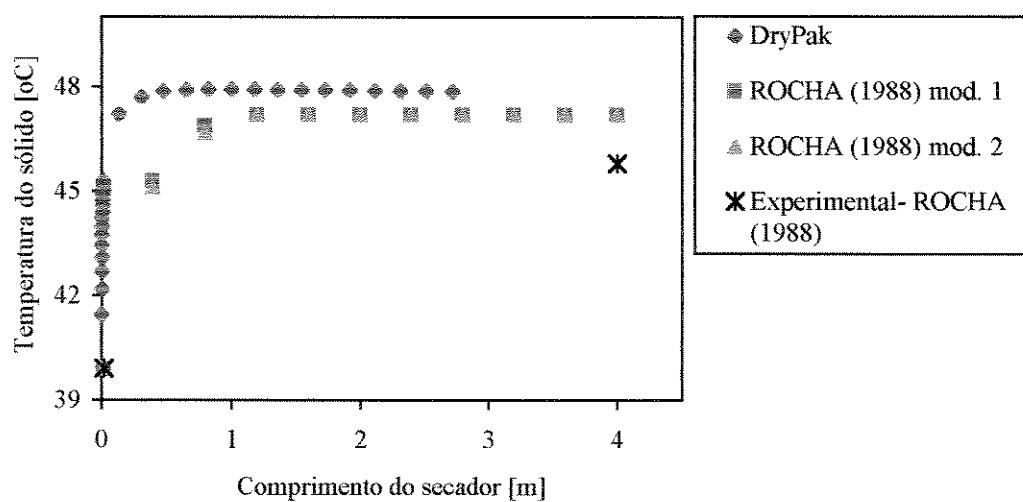


Figura 4.6- Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Kramers

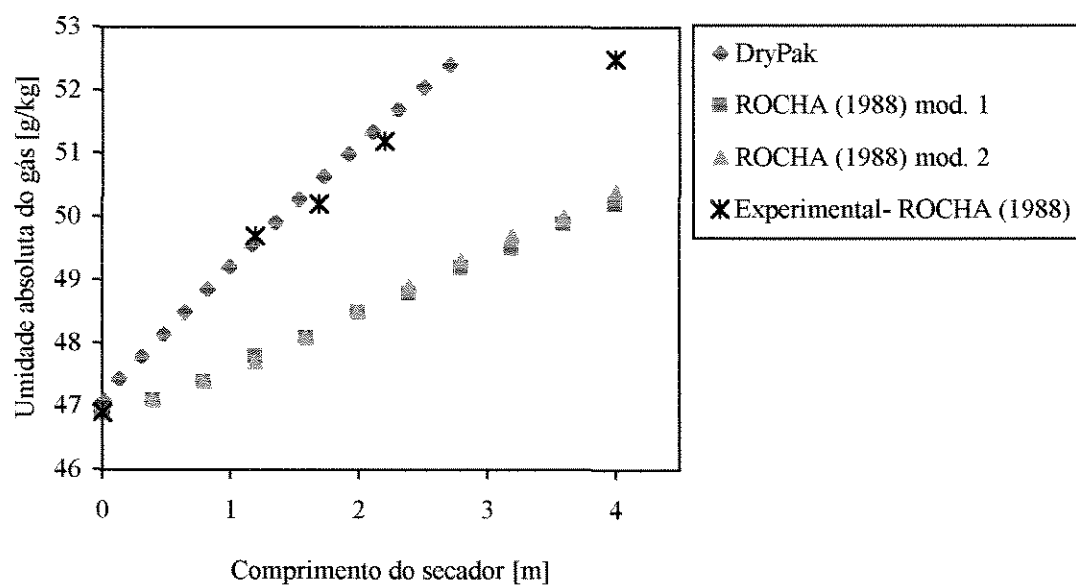


Figura 4.7- Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Kramers

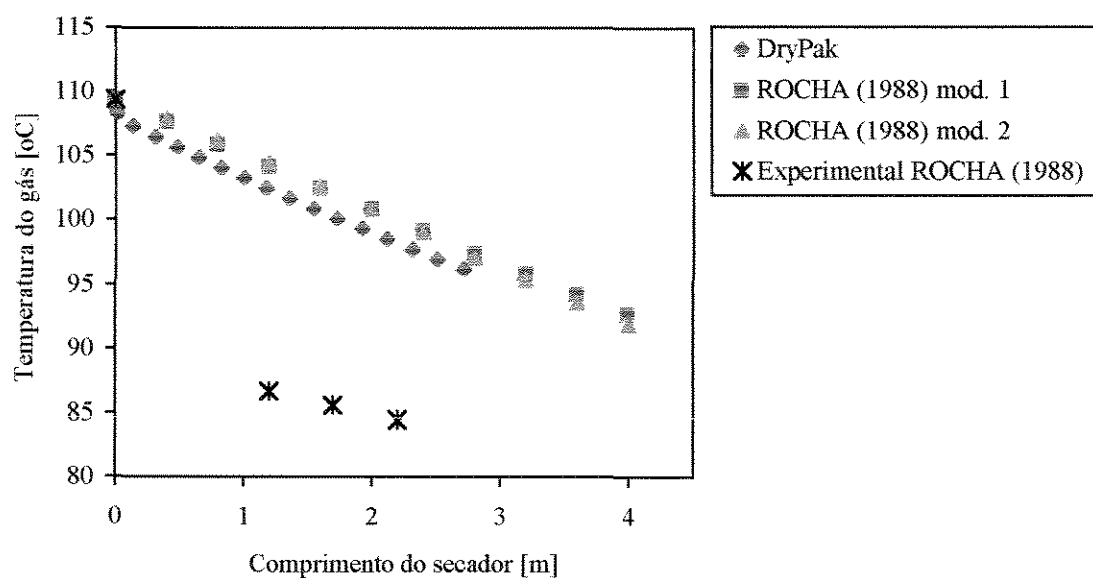


Figura 4.8- Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Kramers

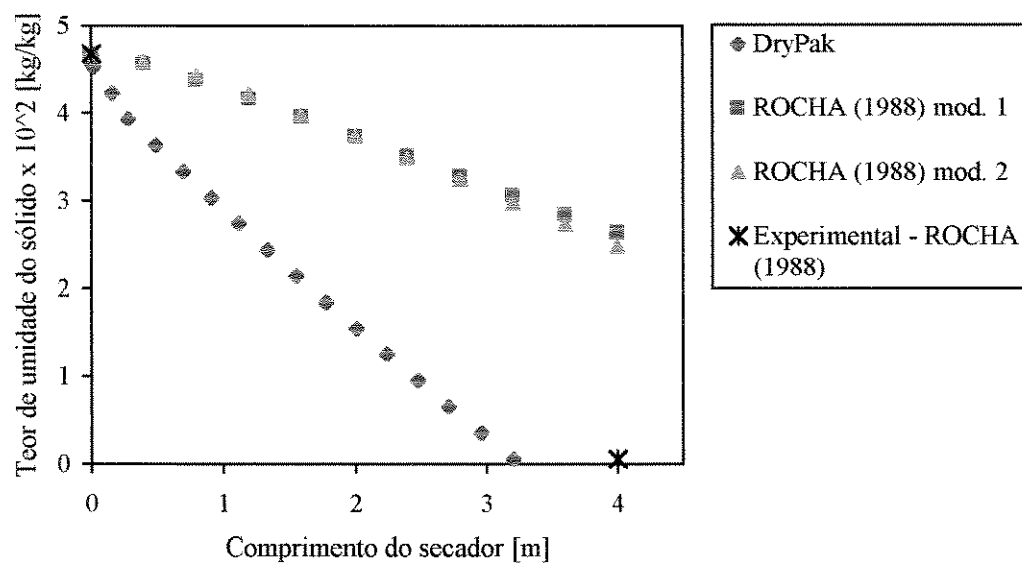


Figura 4.9- Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Ranz e Marshall

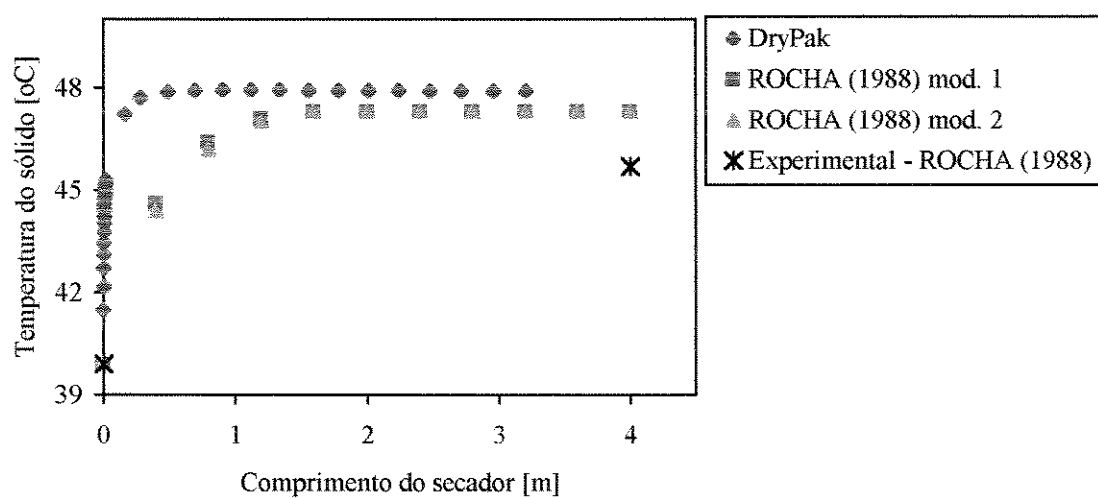


Figura 4.10- Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Ranz e Marshall

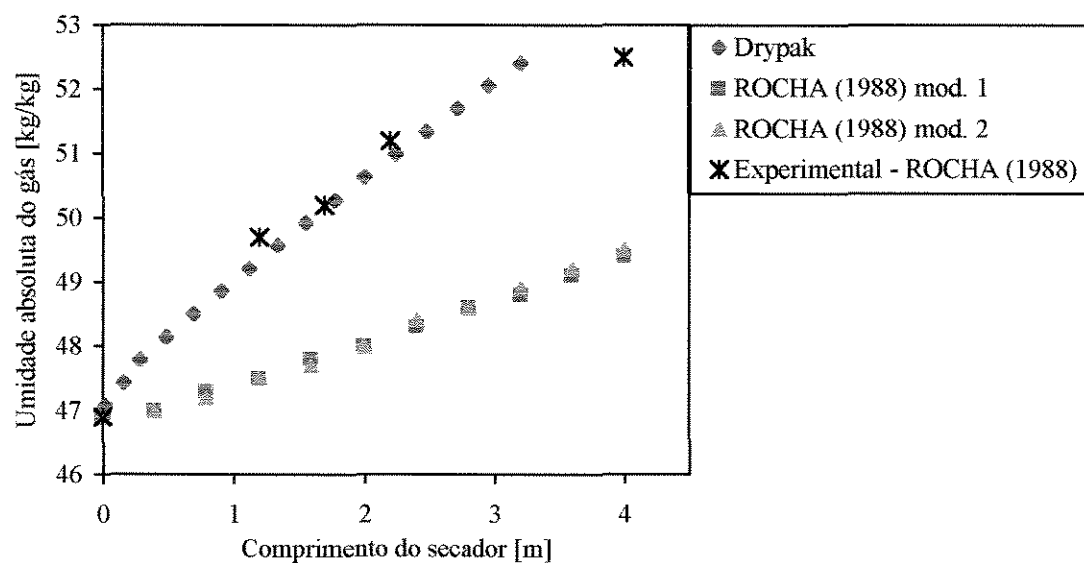


Figura 4.11- Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Ranz e Marshall

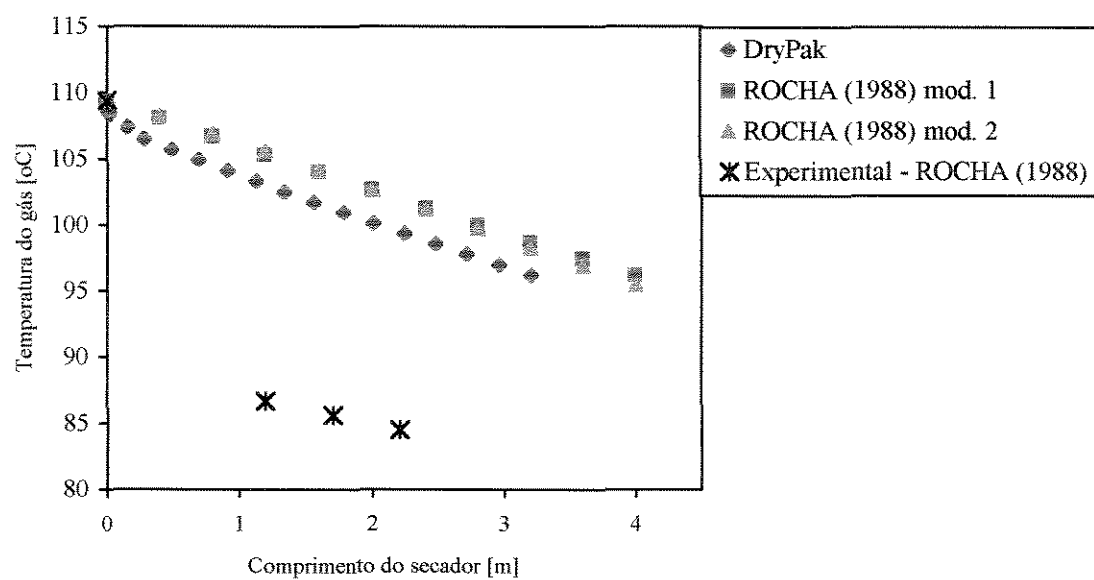


Figura 4.12- Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Ranz e Marshall

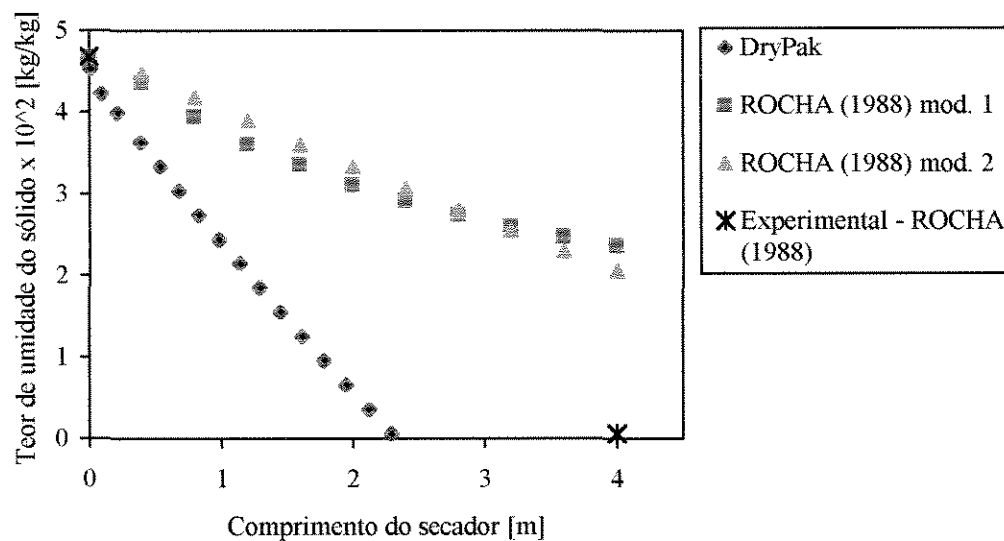


Figura 4.13- Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Debrand

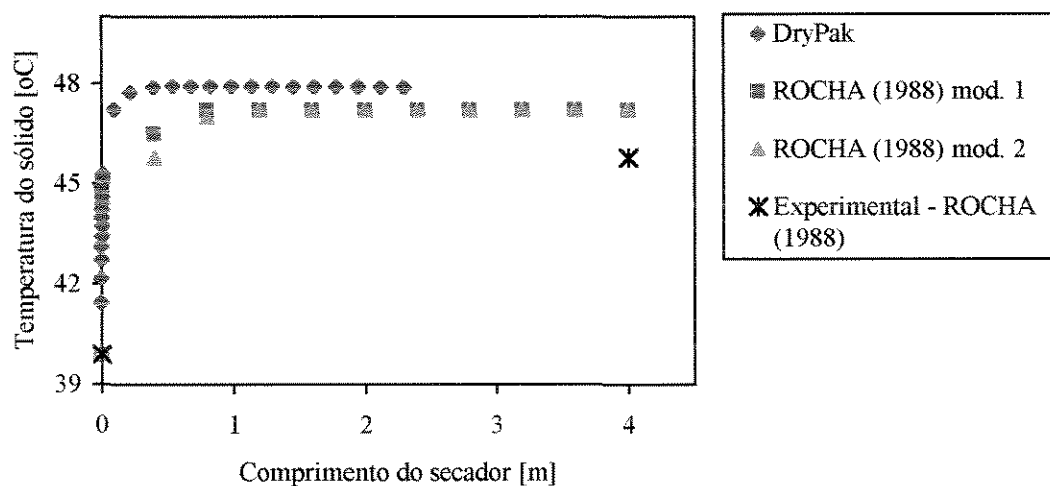


Figura 4.14- Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Debrand

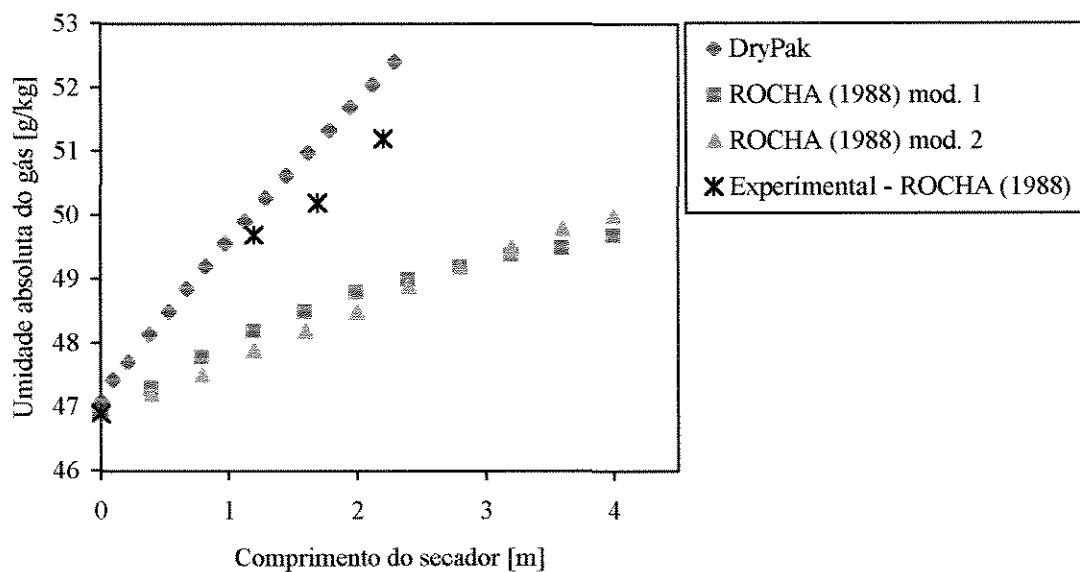


Figura 4.15- Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Debrand

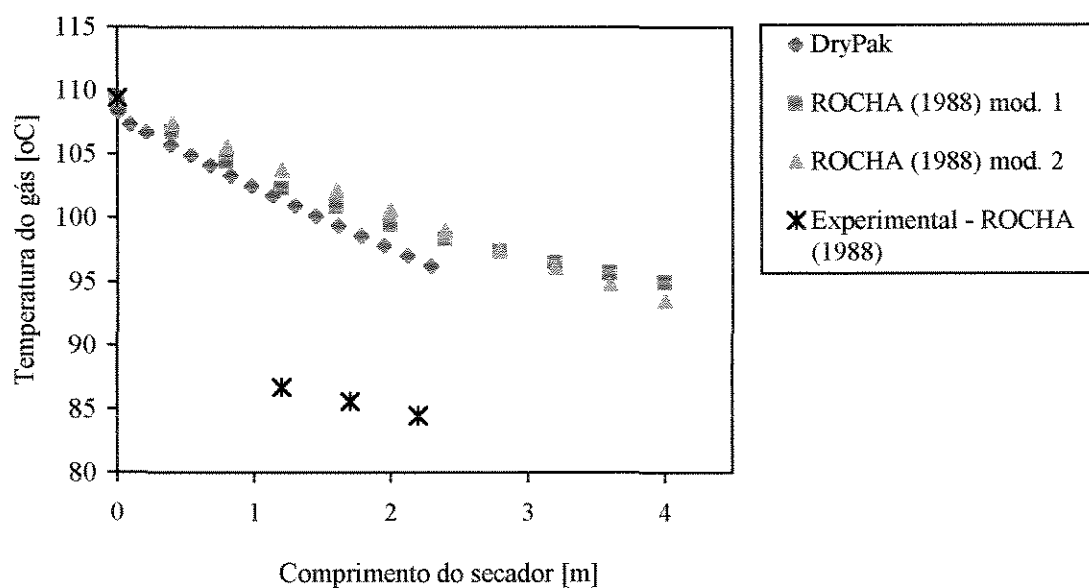


Figura 4.16- Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Debrand

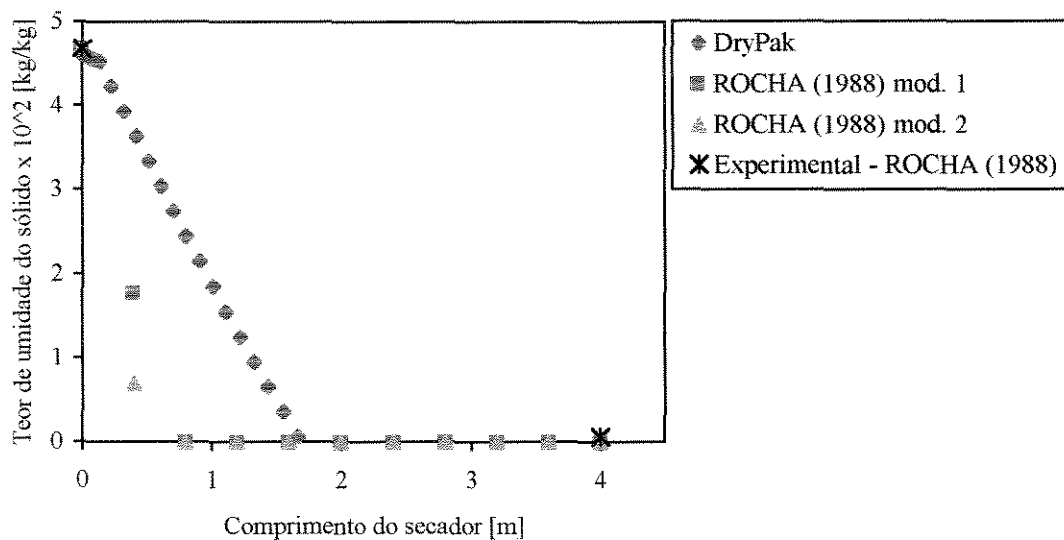


Figura 4.17- Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk

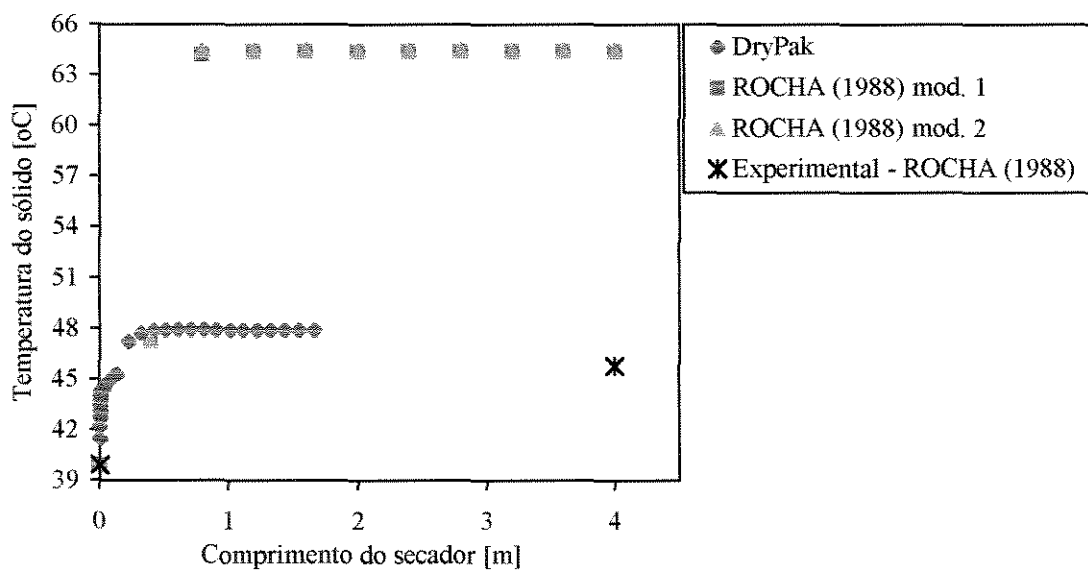


Figura 4.18- Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk

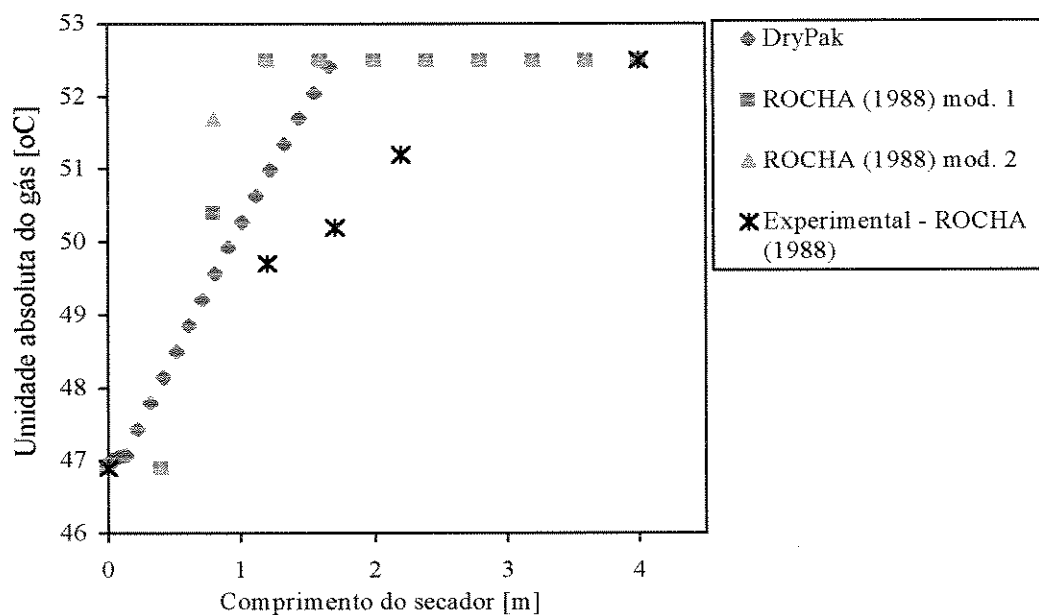


Figura 4.19- Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk

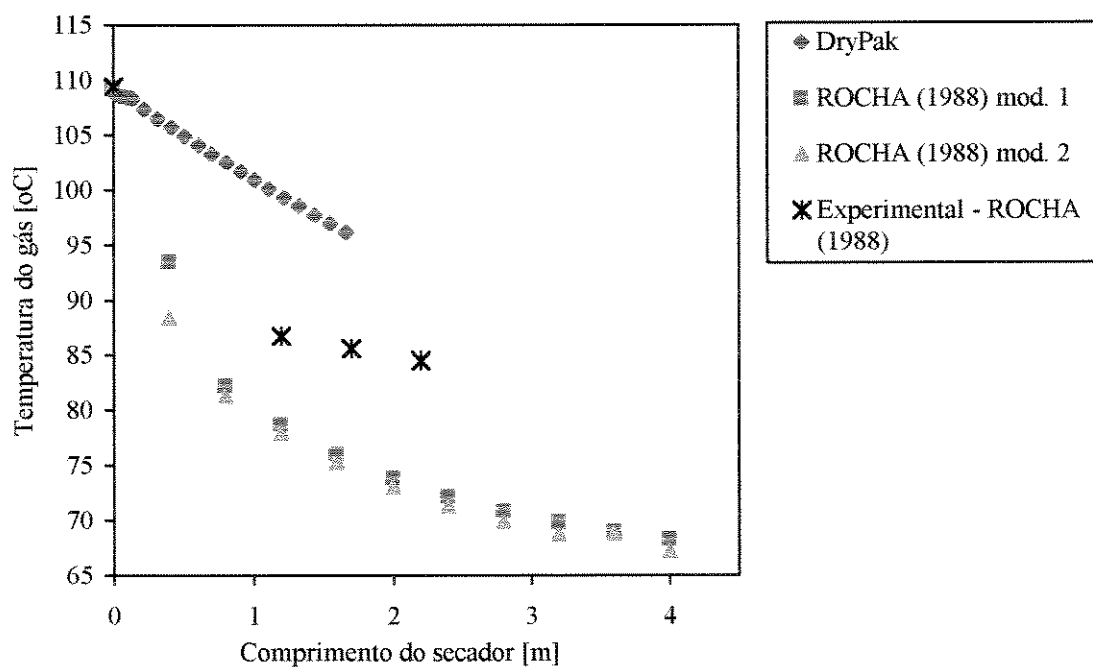


Figura 4.20- Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk

Pode-se observar nas tabelas A.1 a A.17 do apêndice A e nas tabelas do apêndice B que os valores iniciais de velocidade das duas correntes obtidos nas simulações de ROCHA (1988) e nas simulações realizadas neste trabalho apresentam diferenças. Tais diferenças são relativas ao cálculo da densidade da mistura gasosa. ROCHA (1988) utilizou uma equação obtida por MATSUMOTO e PEI (1984) baseada na lei de gases ideais para o ar e para o vapor, enquanto o DryPak® utiliza para o ar uma equação de estado de BAEHR e SCHWIER (1961) apud PAKOWSKI et al. (1991) e, no caso do vapor, uma equação para vapor superaquecido e saturado de SCHMIDT (1969) apud PAKOWSKI et al. (1991). Em seu estudo, PAKOWSKI et al. (1991) mostraram que na faixa de 100 a 350 °C, o erro atribuído ao uso de uma equação de gás ideal para o vapor é de 18,6% contra 0,08% para a equação utilizada no DryPak®.

Para a maioria das correlações, o perfil de umidade do gás calculados pelo DryPak® mostraram-se mais próximos aos experimentais que os calculados por ROCHA (1988), como observado nas figuras 4.7, 4.11, 4.15, e 4.19. O mesmo foi notado para o teor de umidade final da areia, conforme figuras 4.5, 4.9, 4.13 e 4.17. Isto ocorre devido à utilização do coeficiente de potencial de umidade dado pela equação 3.31, pois segundo KEEY (1991), este potencial é sempre menor que a unidade.

Os resultados da simulação pelo DryPak® para os perfis de temperatura do gás mostraram-se próximos daqueles calculados por ROCHA(1988) e os três apresentaram-se bem diferentes do perfil experimental,

como pode ser observado nas figuras 4.4, 4.8, 4.12, 4.16, 4.20 e 4.24.

Para as correlações de Chukhanov e Valentin, como pode ser observado nas figuras 4.21 a 4.28, a diferença é mais significativa entre os modelos 1 e 2 de ROCHA (1988) e o DryPak[®]. Para estas correlações, observa-se que o teor de umidade e temperatura finais do sólido, além do perfil de umidade do gás, para os modelos de ROCHA (1988) se aproximam mais do experimental que o obtido pelo DryPak[®], conforme figuras 4.21, 4.22 e 4.23, respectivamente. Isto ocorre devido à estas correlações serem função da concentração volumétrica, o que leva a um perfil de coeficiente de transferência de calor crescente ao longo do secador.

Para o DryPak[®], este comportamento resulta em um comprimento de secador menor e a valores de temperatura e umidade, para as duas correntes, mais afastados dos experimental. No caso dos modelos de ROCHA (1988), que se baseiam em um comprimento constante de secador, esta correlação leva a um teor de umidade final do sólido menor que as demais e por sua vez, mais próximo do experimental. Isto leva a conclusão de que, para os modelos de ROCHA (1988), as correlações que são função da concentração volumétrica são mais apropriadas, sendo a de Valentin a mais adequada.

Como pode ser observado no apêndice B e nas figuras 4.17 a 4.20, a tendência de se obter, nas simulações utilizando-se o DryPak[®], valores de comprimento do secador bem menores que os obtidos nas demais correlações e, nas simulações conduzidas por ROCHA (1988), valores finais de

umidade das duas correntes mais próximos dos experimentais ocorre também para a correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk, que como a correlação de Chukhanov, é função da concentração volumétrica.

Nos modelos de ROCHA (1988), o cálculo de a_v leva em consideração a concentração volumétrica, o que não ocorre no DryPak[®]. Como consequência, as correlações que são função de β_v levam aos melhores resultados nos modelos de ROCHA (1988) e, coerentemente, os melhores resultados para o DryPak[®] são obtidos com correlações que não consideram β_v .

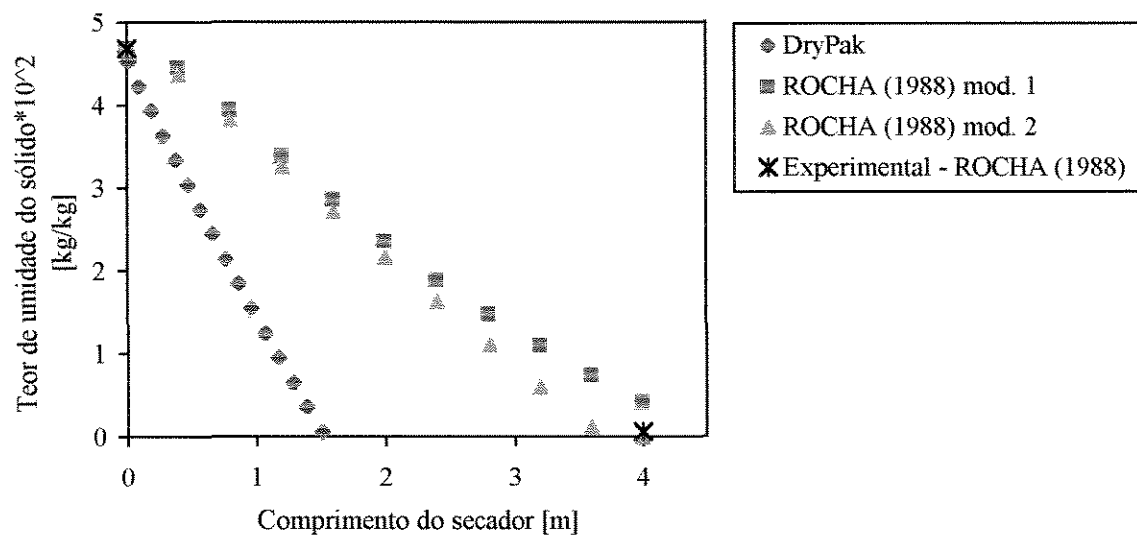


Figura 4.21- Teor de umidade da areia ao longo do secador, utilizando-se correlação de Chukhanov

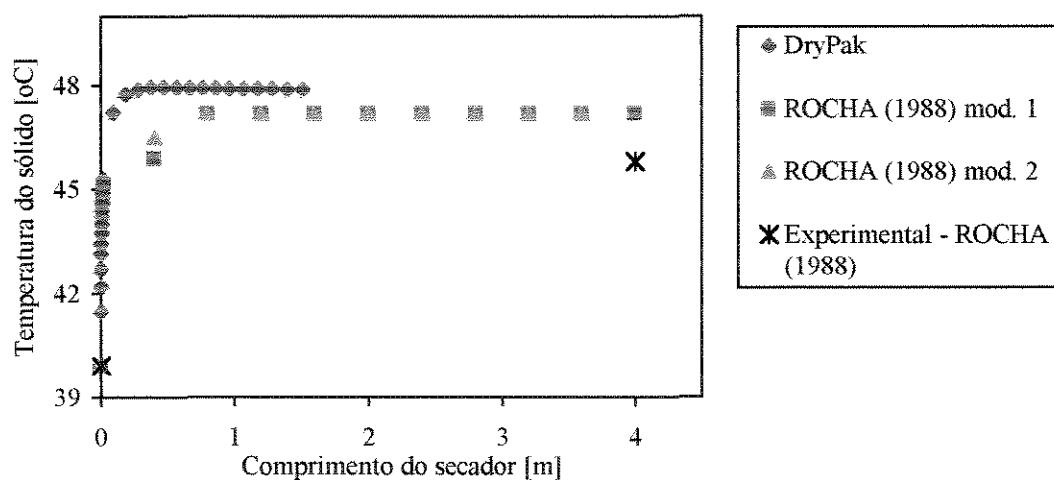


Figura 4.22- Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando a correlação de Chukhanov

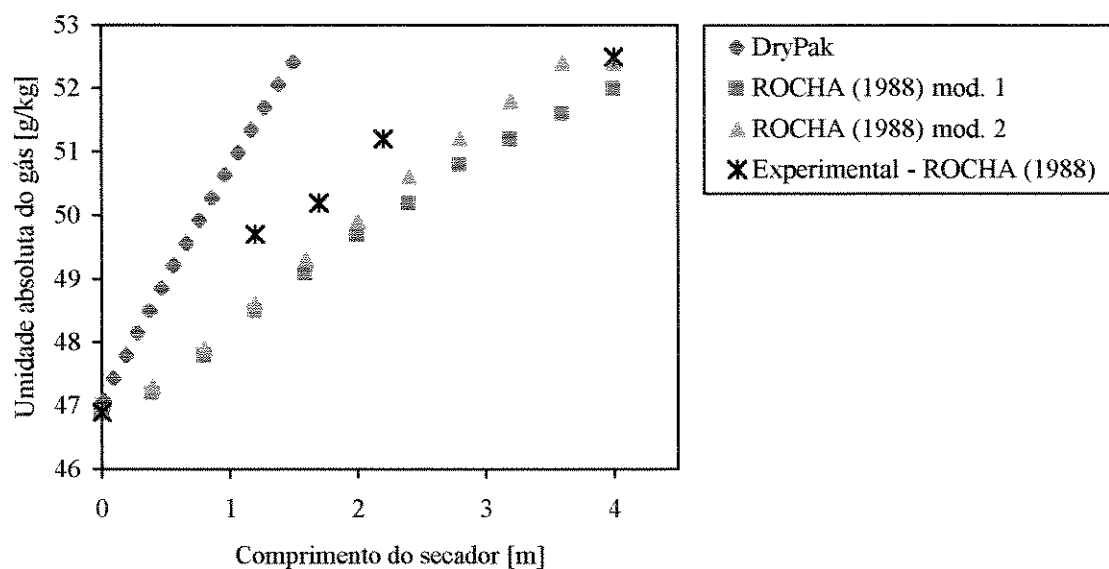


Figura 4.23- Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Chukhanov

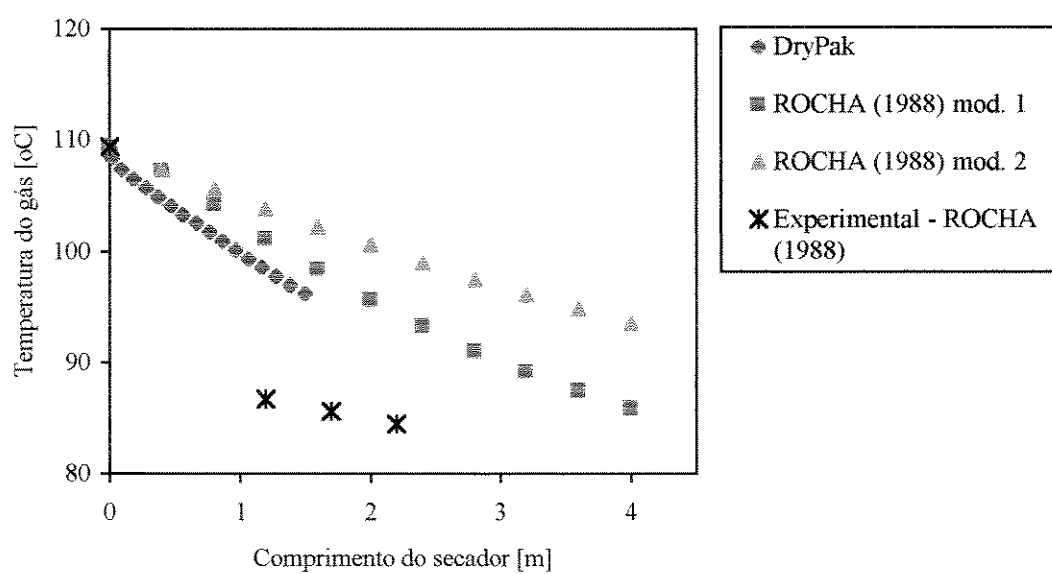


Figura 4.24- Temperatura do gás ao longo do secador utilizando-se a correlação de Chukhanov

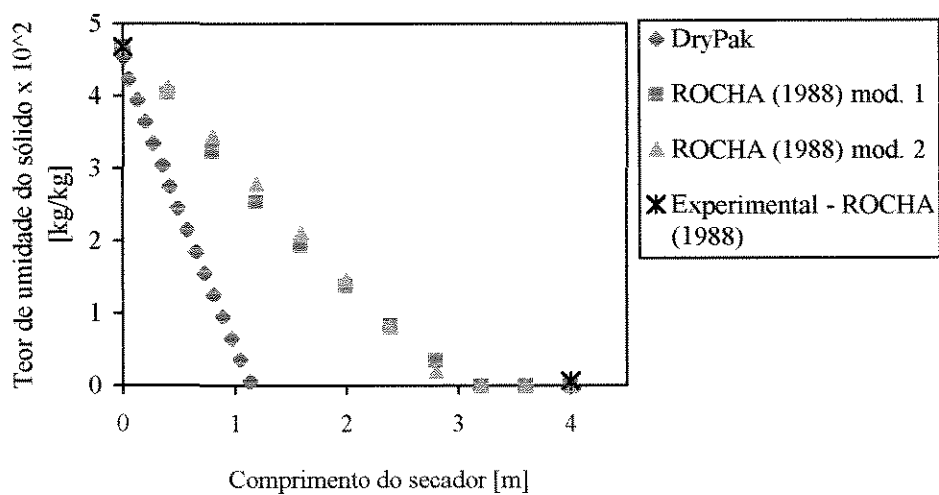


Figura 4.25- Teor de umidade de areia ao longo do secador, utilizando-se correlação de Valentin.

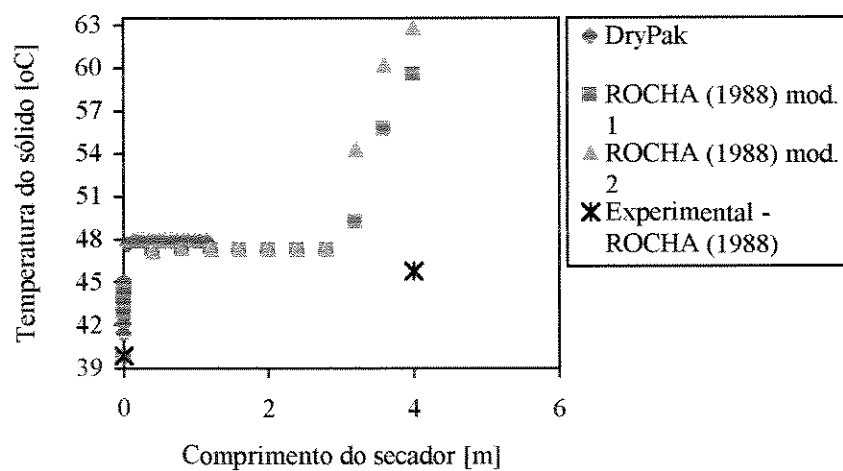


Figura 4.26- Temperatura da areia ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Valentin

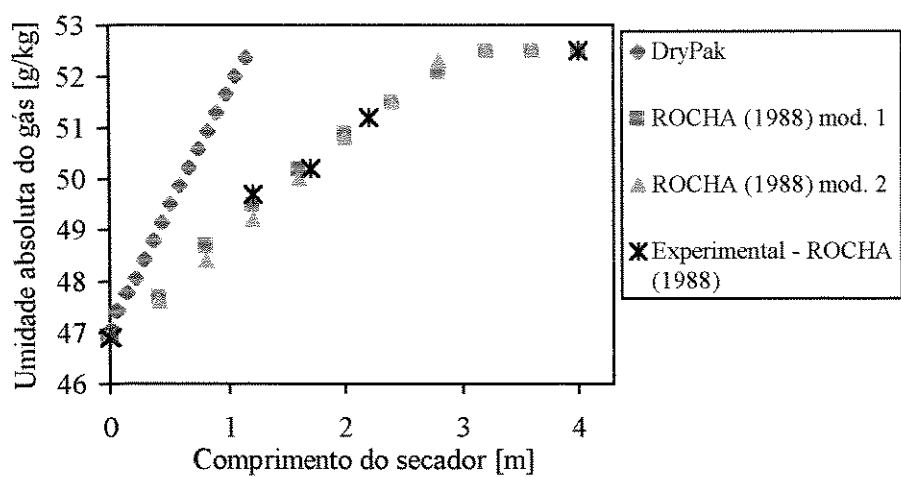


Figura 4.27- Umidade absoluta do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Valentin

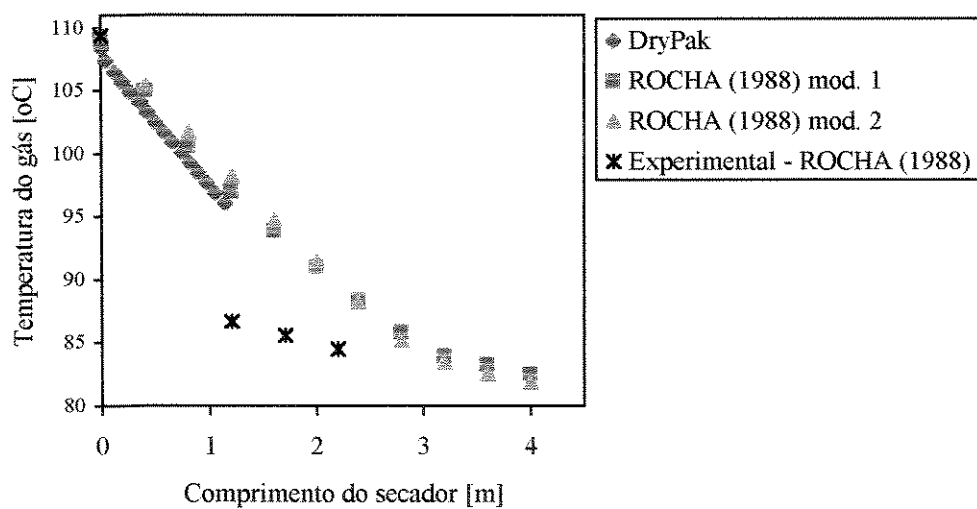


Figura 4.28-Temperatura do gás ao longo do secador, utilizando-se a correlação de Valentin

4.4.2- SIMULAÇÕES COM DADOS DE AMIDO DE MANDIOCA

Para o trabalho com os dados de entrada de amido de mandioca, contidos na tabela 4.2, utilizou-se a mesma metodologia adotada para os dados de areia descrita no item 4.3, porém, com uma adaptação para este caso. Foram utilizadas a correlação de Frössling, analogia de Lewis e correção de Ackermann, que foram estabelecidas como as melhores condições para a areia, conforme observado nos itens 4.4.1.1.2 e 4.4.1.1.3.

Comparando-se o experimento 16 de ROCHA (1988) com o experimento 4 de PÉCORA (1985), pode-se fazer as seguintes observações:

1. No experimento de ROCHA (1988) foi utilizado um material não-higroscópico, a areia, enquanto que PÉCORA (1985) utilizou um material higroscópico, o amido de mandioca.
2. A razão W_g/W_m para o experimento 16 de ROCHA (1988) foi de 8,33 e para o experimento 4 de PÉCORA (1985), 71,94, o que corresponde a aproximadamente 8,6 vezes a razão utilizada por ROCHA (1988)
3. As partículas de areia mantém seu diâmetro constante durante o processo de secagem e as de amido de mandioca formam grumos que tem seu diâmetro como função do teor de umidade do mesmo.

Assim, devido à observação 1, a massa específica dos grumos de amido de mandioca tem uma variação maior que a massa específica das partículas de areia.

Com relação à observação 2, o aumento da razão W_g/W_m leva a uma maior perda de umidade pelo sólido no trecho com variação de porosidade.

A observação 3 conduz a coeficientes de transferência de calor volumétrico bem diferentes dos encontrados para o caso de diâmetro de partícula constante ao longo do processo.

A observação 2 gerou a necessidade de adaptação da metodologia utilizada anteriormente, conforme descrito no item 4.4.2.1 a seguir.

As observações 1 e 3 levaram ao estudo da influência de variação do diâmetro e da massa específica do sólido, apresentado no item 4.4.2.2.

Tendo em mente estas constatações, foram conduzidas as simulações cujos dados são apresentados nas tabelas A.18 a A.21.

4.4.2.1- ADAPTAÇÃO NA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

Utilizou-se, na simulação com o amido, a mesma metodologia adotada nas simulações com a areia, ou seja, dividiu-se o teor total de umidade do sólido perdida em 30, resultando em um secador com 30 divisões. Destas divisões, as 15 primeiras correspondiam ao trecho com variação de porosidade (trecho 1) e as demais ao trecho seguinte com porosidade constante (trecho 2). No primeiro trecho,

inicialmente, foi considerado que a perda de umidade correspondia a 3% do teor total de umidade perdida, como considerado anteriormente para a areia. Porém, como observado no item anterior, a alta relação entre W_g/W_m conduziu a uma maior perda de umidade no trecho com variação de porosidade. Então, realizou-se uma simulação em que o teor de umidade perdido neste trecho correspondesse a 75% do teor total de umidade perdida, mantendo-se as demais considerações da metodologia.

As simulações 18 e 19, correspondentes a este estudo, encontram-se na tabela 4.8.

Tabela 4.8- Simulação de secagem de amido de mandioca, utilizando-se diferentes variações de umidade

Simulação *	Comentários	X (kg/kg)	t_m (°C)	Y (g/kg)	t_g (°C)	L (m)
18	75% do teor total de umidade perdido no trecho 1	0,1198	52,3	21,2705	104,8	2,07
19	3% do teor total de umidade perdido no trecho 1	0,1198	52,3	21,1895	104,2	5,00

* O número da simulação se refere ao número da tabela correspondente no apêndice A.

Pela comparação dos comprimentos de secador das simulações 18 e 19, pode-se concluir que usando-se uma grande porcentagem de perda de umidade no trecho com variação de porosidade, obtém-se um valor para o comprimento total do secador bastante próximo ao experimental. Ou seja, para materiais com alto teor de umidade inicial, como é o caso do amido, não é adequado

usar a mesma variação de umidade no trecho porosidade variável utilizada para a areia. Além disto, PÉCORA (1985) observou em seu estudo que a maior parte do teor de umidade do sólido foi perdido no comprimento de entrada.

Então, utilizou-se nas simulações seguintes 5% do total de umidade perdida em cada seção do trecho com variação de porosidade, correspondendo, neste trecho, a 75% do total de umidade perdida.

PÉCORA (1985), através de uma relação de comprimento de entrada em função de Re , calculou para as condições de seu experimento 4, cujos dados são utilizados neste trabalho, um comprimento de entrada de aproximadamente 0,56m. O comprimento do trecho com porosidade variável obtido nas simulações 18 e 20 é de aproximadamente 0,70 m, valor próximo ao calculado por PÉCORA (1985). As simulações 18 e 20, como pode ser observado no próximo item foram as que apresentaram os melhores resultados.

4.4.2.2- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS COM EXPERIMENTAIS

Procedeu-se ao estudo da influência da variação de diâmetro do grumo e da densidade do material ao longo do secador, comparando-se estes resultados com os obtidos experimentalmente por PÉCORA (1985).

Considerou-se a variação de massa específica do sólido em função do teor de umidade do mesmo, no trecho com porosidade variável, e constante no trecho com porosidade

constante. Esta variação de massa específica é dada pela equação 4.3, também utilizada por PÉCORA (1985).

$$\rho_m = \rho_S(1-X) + \rho_{AL}X \quad (4.6)$$

Além disto, considerou-se a influência do encolhimento do grumo, variando-se o diâmetro deste na mesma proporção da variação do teor de umidade do sólido no trecho com variação de porosidade, mantendo-se um valor constante no trecho com porosidade constante. Esta variação foi de 590 a 200 μm , conforme valores experimentais. Na simulação, o encolhimento foi considerado, arbitrariamente, como uma função linear em relação ao teor de umidade perdido no trecho com porosidade variável e constante no trecho com porosidade constante, ou seja, encolhimento tipo A, segundo classificação feita por KEEY (1991).

Os resultados obtidos nestas simulações são apresentados na tabela 4.9.

Tabela 4.9- Resultados da simulação de secagem de amido de mandioca

Simulação *	Comentários	X (kg/kg)	t _m (°C)	Y (g/kg)	T _g (°C)	L (m)
18	ρ_m variável, d_p variável	0,1198	52,3	21,2705	104,8	2,07
20	$\rho_m = \rho_s =$ constante, d_p variável	0,1198	52,2	21,1905	104,2	1,99
21	ρ_m variável, d_p constante	0,1198	52,2	21,1293	104,2	3,49
22	ρ_m variável, d_p variável (16 divisões)	0,1198	52,4	21,2900	104,9	1,79

* O número da simulação se refere ao número da tabela correspondente no apêndice A. As simulações 18, 20 e 21 foram feitas com 30 divisões.

Comparando-se as simulações 18 e 20, pode-se concluir que a variação de massa específica tem pouquíssima influência sobre o resultado final do comprimento de secador.

A simulação 21 foi realizada mantendo-se o diâmetro médio dos grumos em 300 μm , valor adotado por PÉCORA (1985) como valor médio de diâmetro. Comparando-se o resultado de comprimento do secador desta simulação com o obtido na simulação 18, nota-se que a consideração do encolhimento se faz importante neste caso.

Pela observação da tabela A.18, verifica-se que a grande maioria das variáveis não apresenta mudanças significativas quando se faz 15 divisões no trecho de porosidade constante. Assim, procedeu-se à simulação 22, com apenas uma divisão neste trecho. Comparando-se as duas simulações, nota-se que a diferença entre os comprimentos é de 13,5%, podendo a simulação 22 ser considerada como uma primeira aproximação para o comprimento total do secador. Isto vem a confirmar a observação feita no item 4.3 de que quanto maior o número de divisões adotado, maior a aproximação do valor real, ficando a cargo do usuário avaliar esta melhoria frente ao aumento do tempo computacional.

Os resultados apresentados por PÉCORA (1985) se encontram na tabela 4.10.

Dentre estes dados, os de temperatura do gás foram medidos experimentalmente, os de temperatura do sólido foram considerados iguais a temperatura do bulbo úmido até o ponto em que este estava em sua umidade crítica e as

seguintes foram obtidas por balanço de entalpia. O valor de umidade crítica observado por PÉCORA (1985) foi de aproximadamente 0,18 kg/kg (base seca). Os valores de umidade do gás foram obtidos por cálculos a partir das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido; os valores relativos a umidade do sólido foram calculados por balanço de massa.

Tabela 4.10- Resultados de secagem de amido de mandioca

Comprimento (m)	$X \times 10^2$ (kg/kg)	t_m (°C)	Y (g/kg)	t_g (°C)
0,000	35,00	25,0	18,00	112,5
0,078	32,70	38,6	18,32	109,5
0,156	30,40	38,3	18,64	108,0
0,234	28,24	38,1	18,94	107,0
0,312	25,94	38,0	19,26	106,0
0,390	23,56	37,9	19,59	105,5
0,585	18,45	38,4	20,30	104,7
0,780	15,58	38,7	20,70	104,3
1,170	12,70	40,9	21,10	103,5
1,560	12,27	42,6	21,16	102,6
1,950	11,98	44,4	21,20	102,3

Para o desenvolvimento das simulações, considerou-se que as condições das correntes a 1,950m fossem correspondentes às condições de saída do secador, que ocorrem a 2,000 m.

As figuras 4.25 a 4.28 apresentam os resultados simulados e experimentais para umidade e temperatura de cada corrente.

Para as simulações 18, 20 e 21, os perfis de umidade e temperatura para as duas correntes apresentaram-se bastante próximos entre si e também próximos aos perfis determinados por PÉCORA (1985). Destes, os resultantes das simulações 18 e 20 mostraram-se bastante semelhantes, sobrepondo-se em grande parte do comprimento do secador. Deste fato, pode-se reafirmar a pouca relevância da variação da massa específica do sólido neste experimento. Os perfis de umidade e temperatura obtidos na simulação 21 apresentaram-se um pouco mais afastados dos determinados por PÉCORA (1985) que os provenientes das simulações 18 e 20. Isto confirma a importância da consideração do encolhimento para este experimento.

Nos perfis de temperatura do sólido, o trecho em que ocorre taxa de secagem constante e a temperatura do sólido mantém-se aproximadamente constante e igual à temperatura de bulbo úmido não é observado na figura 4.30 para os dados simulados pelo software. Porém, nas tabelas A.18 a A.22, pode-se observar que este trecho ocorre com temperatura do sólido na faixa de 41 a 43 °C e teor de umidade do sólido na faixa de 0,30 a 0,20 kg/kg (base seca).

Os perfis de umidade e temperatura obtidos na simulação 22 não são apresentados graficamente, pois são praticamente iguais aos obtidos na simulação 18.

Portanto, as condições de simulação que levam aos resultados mais próximos dos experimentais para o caso do amido de mandioca são aquelas que consideram o encolhimento da partículas, sendo desprezível a influência da variação de massa específica.

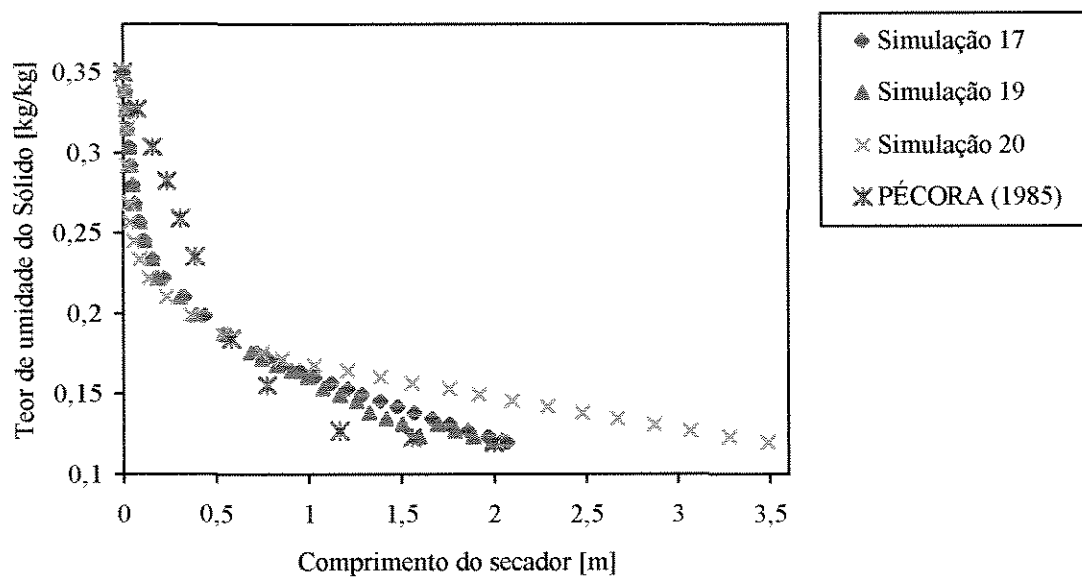


Figura 4.29- Teor de umidade do amido de mandioca ao longo do secador

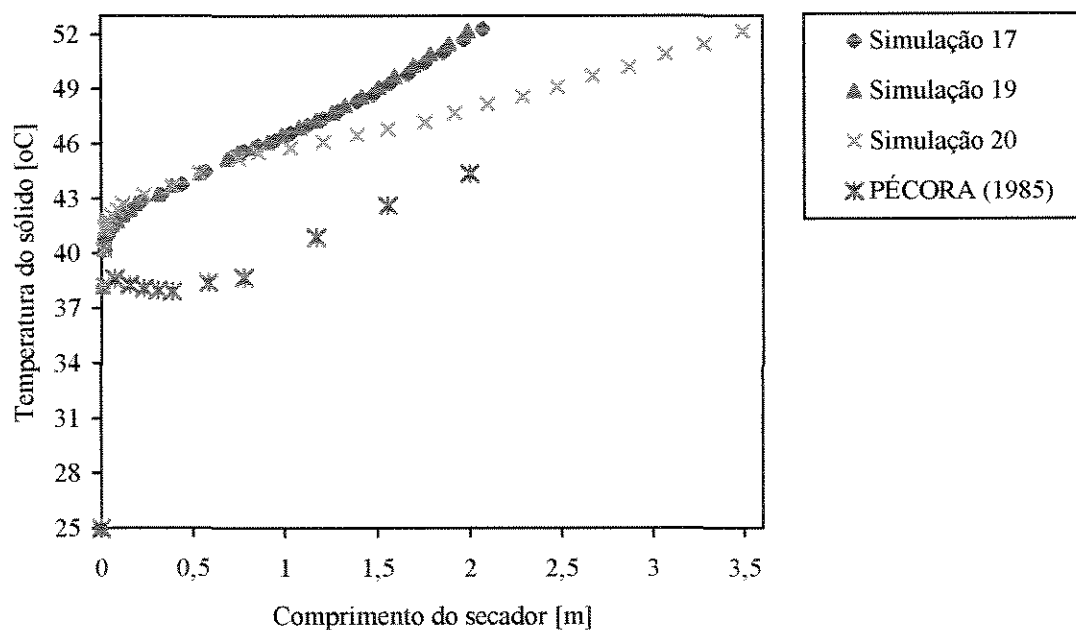


Figura 4.30 – Temperatura do amido ao longo do secador

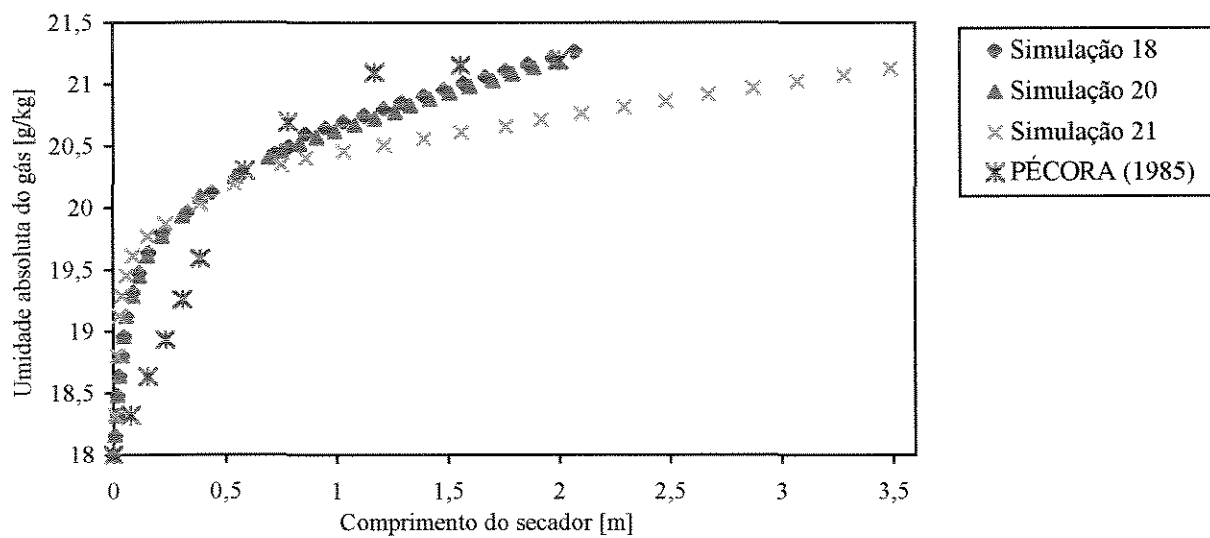


Figura 4.31- Umidade absoluta do gás ao longo do secador

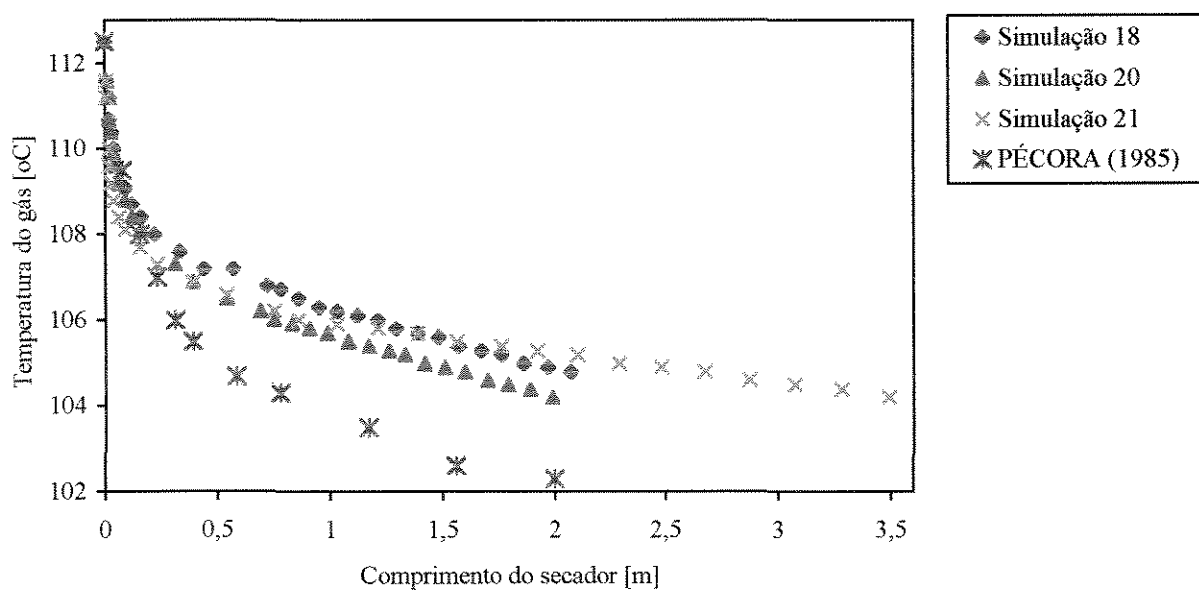


Figura 4.32- Temperatura do gás ao longo do secador

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1- CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados simulados pelo DryPak® e da comparação destes com resultados experimentais e simulados utilizando-se outros modelos, chegou-se às seguintes conclusões:

- O DryPak® integra corretamente os balanços de massa e calor sobre segmentos finitos de um secador pneumático, sem necessidade, portanto, de se gerar um programa específico para realizar tais cálculos.
- A grande deficiência do DryPak® para projeto de secadores pneumáticos é a não inclusão da dependência dos coeficientes de transferência de calor e massa em relação a aerodinâmica do fluido, sendo necessário, portanto, dividir o secador em segmentos com propriedades constantes, o que implica em divisão do teor total de umidade perdida em pequenas etapas, em que se determina pequenos secadores com coeficientes de transferência de calor e massa constantes considerados como seções do secador projetado. Tal adaptação levou a

uma boa aproximação do comprimento total do secador e das condições de umidade final das duas correntes e da temperatura do sólido para os dois materiais estudados.

- Nas simulações desenvolvidas neste trabalho, a variação do teor de umidade no trecho com porosidade variável foi estabelecida com base nos dados obtidos na literatura. Porém, para o cálculo de projeto de secadores pneumáticos necessita-se do conhecimento prévio desta variação. Isto impossibilita o uso atual do DryPak® para tal fim e leva à necessidade do estudo desta variação.
- O DryPak® tornar-se-ia mais funcional se incluísse o cálculo de porosidade e possibilitasse a escolha, em seus próprios cálculos, de correlações de Nu.
- O teor de umidade a ser considerado perdido no trecho com variação de porosidade está diretamente relacionado ao teor de umidade inicial do sólido e à razão vazão de gás/vazão de sólido úmido (W_g/W_m)
- A não consideração de perda de calor para o ambiente levou ao afastamento dos perfis de temperatura simulado e experimental do gás
- A hipótese do encolhimento leva à uma melhor aproximação nos cálculos do secador.
- A correlação de Frössling para Nu, “default” do DryPak®, foi a que conduziu aos melhores resultados para o a simulação do experimento 16 de ROCHA (1988) utilizando-se o DryPak®.
- Para a maioria das correlações utilizadas, os perfis de temperatura do gás e umidade para as duas correntes

obtidos pelo DryPak® mostraram-se mais próximos dos experimentais que os calculados por ROCHA (1988), com exceção das correlações de Chukhanov e Valentin.

- A escolha da correlação para Nu adequada ao modelo matemático utilizado é de grande importância, pois estas conduzem, para uma mesma condição de saída das correntes, a diferentes comprimentos de secador.
- O uso da correção de Ackermann não conduziu, para o experimento 16 de ROCHA (1988), a uma melhoria considerável dos resultados. Isto deve ter ocorrido devido à quase inexistência de umidade ligada na areia e também ao baixo teor de umidade do sólido.
- A analogia de Lewis foi a que apresentou um resultado de comprimento de secador um pouco mais próximo do experimental, porém, não houve grandes diferenças entre as analogias de transferência de calor e massa neste estudo.

5.2- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a finalidade de se dar continuidade aos estudos de processos de secagem pneumática utilizando-se o DryPak[®], e ao estudo deste software para outros processos de secagem, apresentam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Testar no DryPak[®] dados dos produtos estudados neste trabalho, assim como de outros produtos, em diversas condições de teor de umidade de entrada e razão W_g/W_m , a fim de se obter uma relação do tipo $\Delta X = f(X_1, W_g/W_m)$ para o trecho em que ocorre a variação de porosidade.
- Realizar novos testes de secagem, objetivando conhecer a eficiência do DryPak[®] para outros processos de secagem.
- Testar o mesmo produto em diferentes processos de secagem com a finalidade de se optar pelo melhor processo para secagem deste produto.

BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, R. B.; HALL, W. K. Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller equation II. **Journal of American Chemical Society**, v. 70, p. 1727-1734, 1948.
- ARASTOPOUR, H., GIDASPOW, D. Vertical pneumatic conveying using four hydrodynamic models. **Industrial Engineering Chemical Fundamentals**, v.18, n.2, p.123, 1979.
- BANDROWSKI, J., KACZMARZYK, G. Gas-to-particle heat transfer in vertical conveying of granular materials. **Chemical Engineering Science**, Great Britain, v.33, p.1303-1310, 1978.
- BRAUER, H., MEWES, D. Strömungswiderstand Sowie Stationärer and Instationärer Stoff-und Wärmeübergang an Kugeln. **Chemie Ingenieur Technik**, v.44, n.13, p.865-868, 1972.
- BRUNAUER, S.; EMMETT, P.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of American Chemical Society**, v. 60, p. 309-319, 1938.
- CAPESE, C. E., NAKAMURA, K. Vertical conveying: an experimental study with particles in the intermediate and turbulent flow regimes. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.51, n.1, p.31-38, 1973.

- CARVALHO, N. M., NAKAGAWA, J. N. **Sementes: ciência, tecnologia e produção.** Campinas: Fundação Cargill, 1983. p.313.
- CAURIE, M. A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods. **Journal of Food Technology**, v. 5, p. 301-307, 1970.
- CHEN, C. S. Equilibrium moisture curves for biological materials. **Transactions of the ASAE**, v. 14, p. 924-926, 1971.
- CHEN, C. S., CLAYTON, J. T. The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials. **Transactions of the ASAE**, v. 14, p. 927-929, 1971.
- CHIRIFE, J., IGLESIAS, H. A. Equations for fitting water sorption of foods. Part I. A review. **Journal of Food Technology**, v 13, p. 159-174, 1978.
- CHUKHANOV, Z. F. Heat and mass transfer between gas and granular material. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Great Britain, v.14, p.337-351, 1971
- CHUNG, D. S.; PFOST, H. B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. **Transactions of the ASAE**, vol. 10, p. 549-557, 1967.
- COURTOIS, F. et al. Simulation of industrial dryers: solving numerical and computer problems. In: MUJUMDAR, A. S.ed. **Drying'92**, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1992, p. 1268- 1277.

- DAY, D. L., NELSON, G. L. Desorption isotherms for wheat. **Transactions of the ASAE**, v. 8, p. 293-297, 1965.
- DHODAPKAR, S. et al. Acceleration zone studies in pneumatic conveying systems at various inclinations. **AIChE Symposium Series**, Pittsburgh, v.85, n. 270, p. 1-10, 1989.
- FARIA, L. J. G. **Estudo experimental do secador pneumático vertical**. Campinas:FEC, UNICAMP, 1986. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1986, 190 p.
- FOOTE, H. W., BRADLEY, W. M. A partial solubility isotherm of the system $\text{NH}_3\text{-MoO}_3\text{-H}_2\text{O}$ at 25° . **Journal of American Chemical Society**, v.58,p. 930-931, 1936.
- HALSEY, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. **Journal of Chemical Physics**, v 16, n.10, p.931-937, 1948.
- HARKINS, W., JURA, G. Surfaces of solids. X. Extension of the attractive energy of a solid into an adjacent liquid or film, the decrease of energy with distance, and the thickness of films. **Journal of American Chemical Society**, v. 66, p.919-927 1944a.
- HARKINS, W., JURA, G. Surfaces of solids. XII. A vapor adsorption method for the determination of the area of a solid without the assumption of a molecular area, and areas occupied by nitrogen and other molecules on the surface of a solid. **Journal**

- of **American Chemical Society**, v. 66, p.1366-1373, 1944b.
- HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, v. 33, p. 29-32, 1952.
- HÜTTIG, G. F. Zur auswertung der adsorptionsisothermen. **Monatshefte Chemie**, v. 78, p.177-184, 1948.
- IGLESIAS, H. A, CHIRIFE, J. Equilibrium moisture contents of air dried beef dependence on drying temperature. **Journal of Food Technology**, v. 11, p. 565-573, 1976a.
- IGLESIAS, H. A, CHIRIFE, J. A model for describing the water sorption behavior of foods. **Journal of Food Science**, v. 41, p. 984-991, 1976b.
- JAAFAR. F., MICHALOWSKI, S. Modified B.E.T. equation for sorption/desorption isotherms, **Drying Technology**, v. 8, n.4, p. 811-827, 1990.
- KEEY, R. B. **Drying of loose and particulate material**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1991. 504 p.
- KEEY, R. H., **Drying principles and practice**. Great Britain: Pergamon Press, 1972 p.1-148.
- KEMP, I. C., BAHU, R. E., PASLEY, H. S. Model development and experimental studies of vertical pneumatic conveying dryers. **Drying Technology**, New York, v.12, n.6, p. 1323-1340, 1994.
- KISAKÜREK, B. Flash Drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. New York: Marcel Dekker, Inc, 1995. p.503-524.

- KRAMERS, H. Heat transfer from spheres to flowing media. **Physica**, v.12, n.2-3, p.61-80, Jun. 1946.
- KUHN, I. A new theoretical analysis of adsorption phenomena. Introductory part: The characteristic expression of the main regular types of adsorption isotherms by a single simple equation. **Journal. Colloidal Science**, v. 19, p. 685-698, 1964.
- LANGMUIR, I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids **Journal of American Chemical Society**, v 38, p. 2221-2295, 1916.
- LEUNG, H. K., STEINBERG, M. P. Water binding of food constituents as determined by NMR, freezing, sorption and dehydration **Journal of Food Science**, v.44, p. 1212-1216, 1979.
- MASSARANI, G., SANTANA, C. C. Força resistiva sólido-fluido em sistemas particulados de porosidade elevada. **Revista Brasileira de Tecnologia**, v.11, n.1, p.45-50, 1980.
- MATSUMOTO, S., PEI, D. C. T. A mathematical analysis of pneumatic drying of grains-I. constant drying rate **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.27, n.6, p.843-849, 1984.
- MENON, A. S., MUJUMDAR, A. S. Drying of solids: principles, classification and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. New York: Marcel Dekker, Inc, 1995. p.1-39.
- MINDZIUL, Z., KMIEC, A. Modelling gas-solid flow in a pneumatic-flash dryer. In: STRUMILLO, C.,

- PAKOWSKI, Z. **Drying'96**, Lodz: Lodz Technical University, p.275-282, 1996
- MIZRAHI, S., LABUZA, T. P., KAREL, M. Computed-aided predictions of extent of browning in dehydrated cabbage. **Journal of Food Science**, v. 35, p.799-803, 1970.
- MUJUMDAR, A. S. Drying of granular materials – Lecture notes. Montreal, Departament of Chemical Engineering, Mc Gill University, 1981. p.20, 65-73.
- NONHEBEL, G., MOSS, A. A. H. **Drying of solids on the chemical industry**. London: Butterworths, 1971. p.221-252.
- PAKOWSKI, Z. et al. Evaluation of equations approximating thermodynamic and transport properties of water, steam and air for use in cad of drying processes. **Drying Technology**, New York, v. 9, n.3, p.753-773, 1991.
- PAKOWSKI, Z., MUJUMDAR, A. S. Basic process calculations in drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. New York: Marcel Dekker, Inc, 1995. p.71-111.
- PAKOWSKI, Z. **DryPak v.3. program for psychrometric and drying computations**. Lodz: Society of Polish Consultants, 1996. 131p.
- PAKOWSKI, Z., ZYLLA, R. Construction of integrated software for drying calculations. **Drying Technology**, New York, v. 14, n.2, p.463-372, 1996.

- PAKOWSKI, Z. **Using DryPak® to model drying processes** - Notas de Aula, Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 1997.
- PÉCORA, A. A. B. **Estudo experimental do escoamento gás -sólido em fase diluída com transferência de calor e massa**. Campinas: FEAA, UNICAMP, 1985. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1985. 151 p.
- PERRY, R. H., CHILTON, C. H. **Chemical Engineers' Handbook** 5^a ed. Tóquio: Mc Graw Hill, 1980 p.20.55-20.63.
- QUEIROZ, M. R. **Estudo teórico-experimental da cinética de secagem de bananas**. Campinas: FEM, UNICAMP, 1994. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1994. p. 81.
- RAGHAVAN, G. S. V. et al. Concentration dependent moisture diffusivity in drying of shrinkable commodities. In: RUDOLPH, V., KEEY, R. B. ed. **Drying'94**, Proceedings of the 9th International Drying Symposium (IDS'94), Gold Coast, 1994, p. 277-290.
- ROCHA, S. C. S. **Contribuição ao estudo da secagem pneumática vertical: simulação e influência do coeficiente de transferência de calor gás-partícula**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, USP, 1988. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 1988, 258 p.

- SCHWARTZBERG, H. G., Mathematical analysis of the freezing and thawing of foods. **AICHE Summer Meeting**, Detroit, 1981, p.9.
- SHIMIZU, A., ECHIGO, R., HASEGAWA, S. Experimental study on the pressure drop and the entry lenght of the gas-solid suspension flow in a circular tube. **International Journal of Multiphase Flow**, Great Britain, v.4, p.53-64.
- SHOTTON, E., HARB, N. The effect of humidity and temperature on the equilibrium moisture contents of powders. **Journal of Pharmaco Pharmacologic**, v. 17, p. 504-508, 1965.
- STROHMAN, R. D., YOERGER, R. R. A new equilibrium moisture-content equation. **Transactions of the ASAE**, v. 10, p. 675-677, 1967.
- STRUMILLO, C., KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448 p.
- TORREZAN, L. M. B., SARTORI, D. J. M., SANTANA, C. C. Gas-solid overal convective heat transfer coeficient in pneumatic conveying: the role of the particle concentration. **Latin American Applied Research**, v.19, p.147-154, 1989.
- TREYBAL, R. E. **Mass transfer operations**, Singapore: Mcgraw Hill, 1980. p.655-716.
- VIOTTO, L. A. **Projeto e avaliação econômica de sistemas de secagem de borra de café**. Campinas: FEA, UNICAMP, 1991. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Alimentos,

Universidade Estadual de Campinas, 1991, p.102-124.

WHISTLER, R. L. **Methods in carbohydrate chemistry**, v. 4, Academic Press, USA, 1964. p.20-24.

APÊNDICE A-

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES UTILIZANDO-SE O DryPak®

Tabela A.1- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak[®] relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), considerando uma só etapa, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Frössling

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,47	0,42	882,4660	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
01	0,99990	19,79	8,35	701,9546	2,98E-02	0,30	0,0610	47,9	52,4149	96,3

Tabela A.2- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak[®] relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), considerando 70% de perda de umidade no trecho com variação de porosidade, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Frössling

Divisão	ϵ	u [m/s]	v [m/s]	h [kW/m ² K]	l [m]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _g [°C]
-	0,99800	20,47	0,42	882,4660	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,41	0,44	880,5460	1,32E-02	0,01	4,4740	46,0	47,1450	108,2
2	0,99824	20,38	0,47	879,1049	7,92E-03	0,02	4,2700	47,1	47,3895	107,5
3	0,99836	20,34	0,51	877,8589	7,65E-03	0,03	4,0651	47,6	47,6342	106,9
4	0,99848	20,31	0,55	876,4354	7,92E-03	0,04	3,8609	47,8	47,8780	106,4
5	0,99859	20,28	0,59	874,8309	8,51E-03	0,05	3,6560	47,9	48,1226	105,8
6	0,99871	20,25	0,65	873,2239	9,28E-03	0,06	3,4511	47,9	48,3673	105,3
7	0,99883	20,23	0,71	871,2499	1,02E-02	0,06	3,2464	47,9	48,6116	104,7
8	0,99895	20,20	0,80	869,0882	1,14E-02	0,08	3,0418	47,9	48,8558	104,1
9	0,99907	20,17	0,90	866,5535	1,30E-02	0,09	2,8372	47,9	49,1001	103,6
10	0,99919	20,14	1,03	863,4577	1,49E-02	0,10	2,6324	47,9	49,3447	103,1
11	0,99931	20,11	1,20	859,6082	1,75E-02	0,12	2,4276	47,9	49,5891	102,5

12	0,99942	20,08	1,45	854,2464	2,11E-02	0,14	2,2230	47,9	49,8335	102,0
13	0,99954	20,05	1,83	846,3941	2,64E-02	0,17	2,0182	47,9	50,0780	101,4
14	0,99966	20,02	2,47	833,4691	3,50E-02	0,20	1,8133	47,9	50,3226	100,9
15	0,99978	19,99	3,82	806,4159	5,15E-02	0,26	1,6087	47,9	50,5668	100,3
16	0,99990	19,97	8,35	707,3188	9,66E-02	0,35	1,4038	47,9	50,8115	99,8
17	0,99990	19,95	8,35	706,7688	7,97E-02	0,43	1,3078	47,9	50,9261	99,5
18	0,99990	19,94	8,35	706,4552	8,00E-02	0,51	1,2120	47,9	51,0405	99,3
19	0,99990	19,93	8,35	706,1415	8,05E-02	0,59	1,1609	47,9	51,1550	99,0
20	0,99990	19,92	8,35	705,8277	8,10E-02	0,67	1,0201	47,9	51,2697	98,8
21	0,99990	19,90	8,35	705,2765	8,13E-02	0,75	0,9243	47,9	51,3841	98,5
22	0,99990	19,89	8,35	704,9624	8,19E-02	0,84	0,8283	47,9	51,4987	98,3
23	0,99990	19,88	8,35	704,6482	8,22E-02	0,92	0,7324	47,9	51,6132	98,0
24	0,99990	19,87	8,35	704,3338	8,28E-02	1,00	0,6365	47,9	51,7277	97,8
25	0,99990	19,85	8,35	703,7815	8,32E-02	1,08	0,5406	47,9	51,8422	97,5
26	0,99990	19,84	8,35	703,4669	8,35E-02	1,17	0,4448	47,9	51,9566	97,3
27	0,99990	19,83	8,35	703,1521	8,42E-02	1,25	0,3488	47,9	52,0712	97,0
28	0,99990	19,82	8,35	702,8372	8,45E-02	1,34	0,2529	47,9	52,1857	96,7
29	0,99990	19,80	8,35	702,2839	8,50E-02	1,42	0,1570	47,9	52,3002	96,5
30	0,99990	19,79	8,35	701,9694	8,47E-02	1,51	0,0620	47,9	52,4137	96,2

Tabela A.3- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak® relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), considerando perda de 100% da umidade no trecho com variação de porosidade, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Frössling

Divisão	ϵ	u	v	h	l	l acumulado	$X \times 10^2$	t_m	Y	t_g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,47	0,42	882,4660	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,39	0,44	880,0927	1,71E-02	0,02	4,3717	46,7	47,2681	107,8
2	0,99824	20,37	0,47	879,0759	1,10E-02	0,03	4,0636	47,6	47,6359	106,9
3	0,99836	20,30	0,51	876,7197	1,10E-02	0,04	3,7562	47,8	48,0030	106,1
4	0,99848	20,26	0,55	875,2255	1,18E-02	0,05	3,4481	47,9	48,3709	105,2
5	0,99859	20,22	0,59	873,1757	1,29E-02	0,06	3,1404	47,9	48,7309	104,4
6	0,99871	20,17	0,65	871,3082	1,42E-02	0,08	2,8326	47,9	49,1057	103,6
7	0,99883	20,13	0,71	869,0705	1,59E-02	0,09	2,5243	47,9	49,4738	102,8
8	0,99895	20,10	0,80	866,6830	1,47E-02	0,11	2,2695	47,9	49,7780	102,1
9	0,99907	20,05	0,90	863,6568	2,38E-02	0,13	1,9084	47,9	50,2092	101,1
10	0,99919	20,01	1,03	860,2892	2,35E-02	0,16	1,6011	47,9	50,5761	100,3
11	0,99931	19,96	1,20	855,9745	2,79E-02	0,18	1,2925	47,9	50,9467	99,5

12	0,99942	19,92	1,45	815,3236	3,43E-02	0,22	0,9849	47,9	51,3161	98,7
13	0,99954	19,88	1,83	842,1655	4,34E-02	0,26	0,6775	47,9	51,6852	97,9
14	0,99966	19,84	2,47	828,7072	5,67E-02	0,32	0,3698	47,9	52,0547	97,1
15	0,99978	19,79	3,82	801,2053	8,42E-02	0,40	0,0620	47,9	52,4244	96,2

Tabela A.4- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak® relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando variação igual de umidade em todas as divisões do secador, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Frössling

divisão	ϵ	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,9980	20,47	0,42	882,4660	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,9981	20,42	0,44	880,7727	1,10E-02	0,01	4,5208	45,6	47,0901	108,4
2	0,9982	20,39	0,47	879,5489	6,31E-03	0,02	4,3683	46,7	47,2722	107,8
3	0,9984	20,37	0,51	878,3400	5,90E-03	0,02	4,2175	47,3	47,4523	107,4
4	0,9985	20,34	0,55	876,9522	6,14E-03	0,03	4,0635	47,6	47,6361	106,9
5	0,9986	20,32	0,59	875,5658	6,49E-03	0,04	3,9094	47,7	47,8201	106,5
6	0,9987	20,27	0,65	873,4972	7,07E-03	0,04	3,7583	47,8	48,0059	106,1
7	0,9988	20,27	0,71	872,4259	7,62E-03	0,05	3,6006	47,9	48,1888	105,6
8	0,9990	20,25	0,80	870,3040	8,55E-03	0,06	3,4458	47,9	48,3736	105,2
9	0,9991	20,23	0,90	867,9919	9,52E-03	0,07	3,2929	47,9	48,5601	104,8
10	0,9992	20,20	1,03	865,1231	1,09E-02	0,08	3,1407	47,9	48,7419	104,4
11	0,9993	20,18	1,20	861,3191	1,29E-02	0,09	2,9855	47,9	48,9271	104,0

12	0,9994	20,16	1,45	856,1932	1,53E-02	0,11	2,8325	47,9	49,1098	103,6
13	0,9995	20,12	1,83	848,0939	1,92E-02	0,13	2,6786	47,9	49,2935	103,2
14	0,9997	20,09	2,47	835,2643	2,55E-02	0,15	2,5168	47,9	49,4772	102,8
15	0,9998	20,09	3,82	808,7823	4,23E-02	0,19	2,3709	47,9	49,6852	102,3
16	0,9999	20,07	8,35	710,3099	6,99E-02	0,26	2,2138	47,9	49,8693	101,9
17	0,9999	20,05	8,35	709,7156	1,23E-01	0,39	2,0630	47,9	50,0529	101,5
18	0,9999	20,03	8,35	709,1210	1,24E-01	0,51	1,9091	47,9	50,2367	101,1
19	0,9999	20,01	8,35	708,5259	1,25E-01	0,64	1,7552	47,9	50,4205	100,7
20	0,9999	19,99	8,35	707,9305	1,26E-01	0,76	1,6013	47,9	50,6042	100,3
21	0,9999	19,97	8,35	707,3346	1,27E-01	0,89	1,4474	47,9	50,7880	99,8
22	0,9999	19,95	8,35	706,7381	1,28E-01	1,02	1,2933	47,9	50,9719	99,4
23	0,9999	19,93	8,35	706,1414	1,29E-01	1,14	1,1395	47,9	51,1556	99,0
24	0,9999	19,91	8,35	705,5441	1,30E-01	1,27	0,9856	47,9	51,3394	98,6
25	0,9999	19,89	8,35	704,9463	1,31E-01	1,41	0,8315	47,9	51,5233	98,2
26	0,9999	19,87	8,35	704,3482	1,32E-01	1,54	0,6777	47,9	51,7069	97,8
27	0,9999	19,85	8,35	703,7496	1,34E-01	1,67	0,5237	47,9	51,8908	97,4
28	0,9999	19,83	8,35	703,1498	1,36E-01	1,81	0,3688	47,9	52,0757	97,0
29	0,9999	19,81	8,35	702,5507	1,35E-01	1,94	0,2154	47,9	52,2589	96,6
30	0,9999	19,79	8,35	701,9503	1,37E-01	2,08	0,0610	47,9	52,4433	96,2

abela A.5- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak® relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando duas variações de umidade constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Frössling

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,47	0,42	882,4660	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,46	0,44	881,7003	2,01E-03	0,00	4,6695	41,5	46,9125	109,2
2	0,99824	20,45	0,47	880,9541	1,23E-03	0,00	4,6591	42,2	46,9250	109,1
3	0,99836	20,45	0,51	880,2100	1,16E-03	0,00	4,6476	42,8	46,9387	109,0
4	0,99848	20,44	0,55	879,2919	8,68E-04	0,01	4,6384	43,2	46,9497	108,9
5	0,99859	20,44	0,59	878,3748	8,05E-04	0,01	4,6298	43,4	46,9599	108,9
6	0,99871	20,43	0,65	877,2718	1,11E-03	0,01	4,6180	43,8	46,9740	108,8
7	0,99883	20,42	0,71	875,9914	8,45E-04	0,01	4,6093	44,0	46,9843	108,8
8	0,99895	20,42	0,80	874,3420	1,07E-03	0,01	4,5989	44,2	46,9968	108,7
9	0,99907	20,41	0,90	872,5105	1,09E-03	0,01	4,5890	44,4	47,0087	108,7
10	0,99919	20,41	1,03	869,9424	1,20E-03	0,01	4,5790	44,6	47,0206	108,6
11	0,99931	20,41	1,20	866,6300	1,24E-03	0,01	4,5698	44,8	47,0315	108,6

12	0,99942	20,40	1,45	862,0088	1,56E-03	0,01	4,5598	44,9	47,0434	108,5
13	0,99954	20,40	1,83	854,9324	1,94E-03	0,02	4,5499	45,0	47,0552	108,5
14	0,99966	20,39	2,47	842,6670	2,40E-03	0,02	4,5399	45,2	47,0671	108,4
15	0,99978	20,39	3,82	816,4728	3,40E-03	0,02	4,5300	45,3	47,0789	108,4
16	0,99990	20,33	8,35	718,0348	1,53E-01	0,17	4,2321	47,2	47,4346	107,4
17	0,99990	20,29	8,35	716,8523	2,29E-01	0,40	3,9342	47,7	47,7903	106,5
18	0,99990	20,25	8,35	715,6772	2,22E-01	0,63	3,6363	47,9	48,1460	105,7
19	0,99990	20,21	8,35	714,5033	2,22E-01	0,85	3,3384	47,9	48,5016	104,9
20	0,99990	20,18	8,35	713,5628	2,24E-01	1,07	3,0407	47,9	48,8571	104,1
21	0,99990	20,14	8,35	712,3870	2,28E-01	1,30	2,7428	47,9	49,2182	103,3
22	0,99990	20,10	8,35	711,2090	2,31E-01	1,53	2,4448	47,9	49,5740	102,5
23	0,99990	20,06	8,35	710,0297	2,35E-01	1,77	2,1469	47,9	49,9296	101,7
24	0,99990	20,02	8,35	708,8488	2,39E-01	2,00	1,8491	47,9	50,2852	100,9
25	0,99990	19,98	8,35	707,6659	2,43E-01	2,25	1,5512	47,9	50,6409	100,2
26	0,99990	19,94	8,35	706,4813	2,47E-01	2,49	1,2534	47,9	50,9965	99,4
27	0,99990	19,91	8,35	705,5322	2,51E-01	2,74	0,9556	47,9	51,3521	98,6
28	0,99990	19,87	8,35	704,3444	2,55E-01	3,00	0,6577	47,9	51,7077	97,8
29	0,99990	19,83	8,35	703,1549	2,59E-01	3,26	0,3597	47,9	52,0635	97,0
30	0,99990	19,79	8,35	701,9635	2,64E-01	3,52	0,0620	47,9	52,4189	96,2

12	0,99942	20,38	1,45	861,5545	6,66E-03	0,02	4,4794	45,9	47,1395	108,2
13	0,99954	20,37	1,83	854,2510	7,61E-03	0,03	4,4296	46,3	47,1989	108,0
14	0,99966	20,36	2,47	841,9402	9,47E-03	0,04	4,3798	46,6	47,2584	107,8
15	0,99978	20,35	3,82	815,4894	1,33E-02	0,05	4,3299	46,8	47,3180	107,7
16	0,99990	20,34	8,35	718,3104	2,38E-02	0,08	4,2800	47,0	47,3775	107,5
17	0,99990	20,33	8,35	718,0333	4,06E-02	0,12	4,2990	47,2	47,4374	107,4
18	0,99990	20,33	8,35	717,9898	3,98E-02	0,16	4,1799	47,3	47,4971	107,2
19	0,99990	20,32	8,35	717,7138	3,92E-02	0,20	4,1299	47,4	47,5568	107,1
20	0,99990	20,31	8,35	717,4385	3,87E-02	0,24	4,0799	47,5	47,6165	106,9
21	0,99990	20,26	8,35	715,9425	3,02E-01	0,54	3,6781	47,9	48,0962	105,8
22	0,99990	20,21	8,35	714,4516	3,00E-01	0,84	3,2762	47,9	48,5760	104,7
23	0,99990	20,15	8,35	712,7240	3,05E-01	1,14	2,8732	47,9	49,0572	103,7
24	0,99990	20,10	8,35	711,2294	3,10E-01	1,45	2,4717	47,9	49,5366	102,6
25	0,99990	20,05	8,35	709,7316	3,16E-01	1,77	2,0708	47,9	50,0162	101,5
26	0,99990	20,00	8,35	708,2301	3,25E-01	2,10	1,6682	47,9	50,4969	100,5
27	0,99990	19,95	8,35	706,7271	3,31E-01	2,43	1,2671	47,9	50,9758	99,4
28	0,99990	19,89	8,35	704,9843	3,39E-01	2,77	0,8653	47,9	51,4555	98,3
29	0,99990	19,84	8,35	703,4746	3,47E-01	3,11	0,4630	47,9	51,9359	97,3
30	0,99990	19,79	8,35	701,9623	3,55E-01	3,47	0,0609	47,9	52,4160	96,2

abela A.7- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak® relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Chilton-Colburn e correlação de Frössling – 40 divisões

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,47	0,42	882,4660	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,46	0,44	881,7003	2,01E-03	0,00	4,6695	41,5	46,9125	109,2
2	0,99824	20,45	0,47	880,9541	1,23E-03	0,00	4,6591	42,2	46,9250	109,1
3	0,99836	20,45	0,51	880,2100	1,16E-03	0,00	4,6476	42,8	46,9387	109,0
4	0,99848	20,44	0,55	879,2919	8,68E-04	0,01	4,6384	43,2	46,9497	108,9
5	0,99859	20,44	0,59	878,3748	8,05E-04	0,01	4,6298	43,4	46,9599	108,9
6	0,99871	20,43	0,65	877,2718	1,11E-03	0,01	4,6180	43,8	46,9740	108,8
7	0,99883	20,42	0,71	875,9914	8,45E-04	0,01	4,6093	44,0	46,9843	108,8
8	0,99895	20,42	0,80	874,3420	1,07E-03	0,01	4,5989	44,2	46,9968	108,7
9	0,99907	20,41	0,90	872,5105	1,09E-03	0,01	4,5890	44,4	47,0087	108,7
10	0,99919	20,41	1,03	869,9424	1,20E-03	0,01	4,5790	44,6	47,0206	108,6
11	0,99931	20,41	1,20	866,6300	1,24E-03	0,01	4,5698	44,8	47,0315	108,6

12	0,99942	20,40	1,45	862,0088	1,56E-03	0,01	4,5598	44,9	47,0434	108,5
13	0,99954	20,40	1,83	854,9324	1,94E-03	0,02	4,5499	45,0	47,0552	108,5
14	0,99966	20,39	2,47	842,6670	2,40E-03	0,02	4,5399	45,2	47,0671	108,4
15	0,99978	20,39	3,82	816,4728	3,40E-03	0,02	4,5300	45,3	47,0789	108,4
16	0,99990	20,35	8,35	718,6071	9,66E-02	0,12	4,3513	46,8	47,2923	107,7
17	0,99990	20,33	8,35	717,9829	1,45E-01	0,26	4,1725	47,4	47,5058	107,2
18	0,99990	20,30	8,35	717,1339	1,37E-01	0,40	3,9938	47,7	47,7191	106,7
19	0,99990	20,28	8,35	716,5211	1,34E-01	0,53	3,8150	47,8	47,9326	106,2
20	0,99990	20,25	8,35	715,6763	1,33E-01	0,67	3,6363	47,9	48,1459	105,7
21	0,99990	20,23	8,35	715,0652	1,33E-01	0,80	3,4575	47,9	48,3594	105,2
22	0,99990	20,21	8,35	714,4545	1,34E-01	0,94	3,2789	47,9	48,5726	104,7
23	0,99990	20,18	8,35	713,6108	1,33E-01	1,07	3,1023	47,9	48,7835	104,3
24	0,99990	20,16	8,35	712,9973	1,38E-01	1,21	2,9214	47,9	48,9995	103,8
25	0,99990	20,14	8,35	712,3853	1,37E-01	1,34	2,7428	47,9	49,2127	103,3
26	0,99990	20,11	8,35	711,5378	1,39E-01	1,48	2,5640	47,9	49,4263	102,8
27	0,99990	20,02	8,35	709,2757	1,40E-01	1,62	2,3853	47,9	49,6397	102,4
28	0,99990	20,07	8,35	710,3110	1,41E-01	1,76	2,2065	47,9	49,8531	101,9
29	0,99990	20,04	8,35	709,4613	1,42E-01	1,91	2,0279	47,9	50,0664	101,4
30	0,99990	20,02	8,35	708,8467	1,44E-01	2,05	1,8491	47,9	50,2798	100,9

31	0,99990	20,00	8,35	708,2316	1,45E-01	2,19	1,6704	47,9	50,4932	100,5
32	0,99990	19,97	8,35	707,3797	1,47E-01	2,34	1,4917	47,9	50,7066	100,0
33	0,99990	19,95	8,35	706,7634	1,48E-01	2,49	1,3130	47,9	50,9199	99,5
34	0,99990	19,93	8,35	706,1468	1,50E-01	2,64	1,1342	47,9	51,1334	99,0
35	0,99990	19,91	8,35	705,5297	1,51E-01	2,79	0,9555	47,9	51,3468	98,6
36	0,99990	19,88	8,35	704,6747	1,53E-01	2,94	0,7768	47,9	51,5601	98,1
37	0,99990	19,84	8,35	703,4379	1,54E-01	3,10	0,5981	47,9	51,7735	97,6
38	0,99990	19,84	8,35	703,4378	1,56E-01	3,25	0,4194	47,9	51,9869	97,2
39	0,99990	19,80	8,35	702,4399	1,57E-01	3,41	0,2407	47,9	52,2002	96,7
40	0,99990	19,79	8,35	701,9607	1,59E-01	3,57	0,0619	47,9	52,4137	96,2

Tabela A.8- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak® relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Kramers

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _e
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,48	0,42	1129,7827	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,46	0,44	1128,8025	1,64E-03	0,00	4,6698	41,5	46,9122	109,2
2	0,99824	20,45	0,47	1127,9960	9,69E-04	0,00	4,6597	42,2	46,9243	109,1
3	0,99836	20,45	0,51	1127,0607	8,16E-04	0,00	4,6497	42,7	46,9362	109,0
4	0,99848	20,44	0,55	1126,0339	7,59E-04	0,00	4,6398	43,1	46,9481	108,9
5	0,99859	20,44	0,59	1124,8860	7,54E-04	0,00	4,6297	43,5	46,9602	108,9
6	0,99871	20,43	0,65	1123,5498	7,40E-04	0,01	4,6198	43,7	46,9721	108,9
7	0,99883	20,42	0,71	1121,9671	7,61E-04	0,01	4,6099	44,0	46,9839	108,8
8	0,99895	20,42	0,80	1120,0551	8,05E-04	0,01	4,5999	44,2	46,9958	108,7
9	0,99907	20,41	0,90	1117,7129	8,57E-04	0,01	4,5900	44,4	47,0077	108,7
10	0,99919	20,41	1,03	1114,6844	9,52E-04	0,01	4,5799	44,6	47,0198	108,6
11	0,99931	20,41	1,20	1110,6799	1,05E-03	0,01	4,5700	44,8	47,0316	108,6

12	0,99942	20,40	1,45	1105,0394	1,22E-03	0,01	4,5600	44,9	47,0436	108,5
13	0,99954	20,40	1,83	1096,4540	1,47E-03	0,01	4,5500	45,1	47,0556	108,5
14	0,99966	20,39	2,47	1081,7096	1,88E-03	0,01	4,5400	45,2	47,0675	108,4
15	0,99978	20,39	3,82	1050,2140	2,67E-03	0,02	4,5300	45,3	47,0795	108,4
16	0,99990	20,33	8,35	931,6706	1,18E-01	0,14	4,2321	47,2	47,4352	107,4
17	0,99990	20,29	8,35	930,0694	1,76E-01	0,31	3,9342	47,7	47,7908	106,5
18	0,99990	20,25	8,35	928,5269	1,71E-01	0,48	3,6364	47,9	48,1464	105,7
19	0,99990	20,21	8,35	927,0103	1,71E-01	0,65	3,3383	47,9	48,5023	104,9
20	0,99990	20,18	8,35	925,5171	1,73E-01	0,83	3,0406	47,9	48,8578	104,1
21	0,99990	20,14	8,35	924,0223	1,76E-01	1,00	2,7428	47,9	49,2133	103,3
22	0,99990	20,10	8,35	922,5262	1,78E-01	1,18	2,4448	47,9	49,5691	102,5
23	0,99990	20,06	8,35	921,0013	1,81E-01	1,36	2,1469	47,9	49,9248	101,7
24	0,99990	20,02	8,35	919,5017	1,84E-01	1,55	1,8491	47,9	50,2804	100,9
25	0,99990	19,98	8,35	917,9771	1,87E-01	1,73	1,5510	47,9	50,6363	100,1
26	0,99990	19,94	8,35	916,4741	1,90E-01	1,92	1,2533	47,9	50,9918	99,4
27	0,99990	19,91	8,35	914,9694	1,93E-01	2,12	0,9556	47,9	51,3472	98,6
28	0,99990	19,87	8,35	913,4632	1,97E-01	2,31	0,6577	47,9	51,7029	97,8
29	0,99990	19,83	8,35	911,9550	2,00E-01	2,51	0,3597	47,9	52,0587	97,0
30	0,99990	19,79	8,35	910,4685	2,03E-01	2,72	0,0618	47,9	52,4143	96,2

Tabela A.9- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak® relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Chukhanov

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,48	0,42	708,2849	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,46	0,44	726,2999	2,51E-03	0,00	4,6696	41,5	46,9124	109,2
2	0,99824	20,45	0,47	745,9832	1,45E-03	0,00	4,6595	42,2	46,9244	109,1
3	0,99836	20,45	0,51	767,5633	1,20E-03	0,01	4,6495	42,7	46,9363	109,0
4	0,99848	20,44	0,55	791,3914	1,16E-03	0,01	4,6389	43,1	46,9490	108,9
5	0,99859	20,44	0,59	817,8557	9,22E-04	0,01	4,6300	43,4	46,9597	108,9
6	0,99871	20,43	0,65	847,5416	1,05E-03	0,01	4,6195	43,7	46,9722	108,8
7	0,99883	20,42	0,71	881,1174	9,99E-04	0,01	4,6094	44,0	46,9843	108,8
8	0,99895	20,42	0,80	919,5717	9,45E-04	0,01	4,6000	44,2	46,9955	108,7
9	0,99907	20,41	0,90	964,2095	1,03E-03	0,01	4,5900	44,4	47,0075	108,7
10	0,99919	20,41	1,03	1016,8604	1,08E-03	0,01	4,5799	44,6	47,0195	108,6
11	0,99931	20,41	1,20	1080,3617	1,12E-03	0,01	4,5699	44,8	47,0314	108,6

12	0,99942	20,40	1,45	1158,9605	1,21E-03	0,01	4,5599	44,9	47,0434	108,5
13	0,99954	20,40	1,83	1259,5985	1,33E-03	0,02	4,5500	45,0	47,0552	108,5
14	0,99966	20,39	2,47	1393,8858	1,56E-03	0,02	4,5400	45,2	47,0672	108,4
15	0,99978	20,39	3,82	1577,9307	1,94E-03	0,02	4,5300	45,3	47,0792	108,4
16	0,99990	20,33	8,35	1707,5252	7,41E-02	0,09	4,2320	47,2	47,4349	107,4
17	0,99990	20,29	8,35	1704,8573	9,61E-02	0,19	3,9343	47,7	47,7904	106,5
18	0,99990	20,25	8,35	1702,2815	9,36E-02	0,28	3,6356	47,9	48,1471	105,7
19	0,99990	20,21	8,35	1699,7529	9,32E-02	0,38	3,3384	47,9	48,5019	104,9
20	0,99990	20,18	8,35	1697,2707	9,44E-02	0,47	3,0405	47,9	48,8575	104,1
21	0,99990	20,14	8,35	1694,7811	9,59E-02	0,57	2,7421	47,9	49,2138	103,3
22	0,99990	20,10	8,35	1692,2745	9,57E-02	0,66	2,4486	47,9	49,5642	102,5
23	0,99990	20,06	8,35	1689,7236	1,00E-01	0,76	2,1464	47,9	49,9250	101,7
24	0,99990	20,02	8,35	1687,2134	1,00E-01	0,86	1,8486	47,9	50,2806	100,9
25	0,99990	19,98	8,35	1684,6949	1,02E-01	0,96	1,5513	47,9	50,6356	100,2
26	0,99990	19,94	8,35	1682,1681	1,04E-01	1,07	1,2531	47,9	50,9916	99,4
27	0,99990	19,91	8,35	1679,6361	1,05E-01	1,17	0,9550	47,9	51,3475	98,6
28	0,99990	19,87	8,35	1677,0965	1,07E-01	1,28	0,6571	47,9	51,7032	97,8
29	0,99990	19,83	8,35	1674,5481	1,09E-01	1,39	0,3596	47,9	52,0584	97,0
30	0,99990	19,79	8,35	1671,9930	1,17E-01	1,51	0,0619	47,9	52,4139	96,2

Tabela A.10- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak[®] relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Chilton-Colburn e correlação de Ranz e Marshall

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,9980	20,48	0,42	945,92	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,9981	20,46	0,44	945,10	1,86E-03	0,00	4,6694	41,5	46,9126	109,2
2	0,9982	20,45	0,47	944,33	1,05E-03	0,00	4,6599	42,2	46,9240	109,1
3	0,9984	20,45	0,51	943,50	9,92E-04	0,00	4,6496	42,7	46,9363	109,0
4	0,9985	20,44	0,55	942,59	9,29E-04	0,00	4,6392	43,1	46,9487	108,9
5	0,9986	20,44	0,59	941,56	8,62E-04	0,01	4,6294	43,5	46,9604	108,9
6	0,9987	20,43	0,65	940,36	9,92E-04	0,01	4,6181	43,8	46,9739	108,8
7	0,9988	20,42	0,71	938,94	9,05E-04	0,01	4,6081	44,0	46,9859	108,7
8	0,9990	20,42	0,80	937,24	8,18E-04	0,01	4,5995	44,2	46,9961	108,7
9	0,9991	20,41	0,90	935,11	1,02E-03	0,01	4,5895	44,4	47,0080	108,7
10	0,9992	20,41	1,03	932,41	1,15E-03	0,01	4,5792	44,6	47,0203	108,6
11	0,9993	20,41	1,20	928,80	1,22E-03	0,01	4,5695	44,8	47,0318	108,6

12	0,9994	20,40	1,45	923,71	1,39E-03	0,01	4,5599	44,9	47,0432	108,5
13	0,9995	20,40	1,83	915,96	1,80E-03	0,01	4,5497	45,1	47,0554	108,5
14	0,9997	20,39	2,47	902,64	2,22E-03	0,02	4,5398	45,2	47,0673	108,4
15	0,9998	20,39	3,82	874,19	3,17E-03	0,02	4,5299	45,3	47,0791	108,4
16	0,9999	20,33	8,35	767,24	1,43E-01	0,16	4,2321	47,2	47,4346	107,4
17	0,9999	20,29	8,35	765,94	1,22E-01	0,29	3,9341	47,7	47,7904	106,5
18	0,9999	20,25	8,35	764,64	2,08E-01	0,49	3,6363	47,9	48,1460	105,7
19	0,9999	20,21	8,35	763,48	2,08E-01	0,70	0,3338	47,9	48,5016	104,9
20	0,9999	20,18	8,35	762,24	2,11E-01	0,91	3,0397	47,9	48,8583	104,1
21	0,9999	20,14	8,35	761,03	2,13E-01	1,12	2,7422	47,9	49,2134	103,3
22	0,9999	20,10	8,35	759,80	2,16E-01	1,34	2,4447	47,9	49,5686	102,5
23	0,9999	20,06	8,35	758,58	2,21E-01	1,56	2,1458	47,9	49,9255	101,7
24	0,9999	20,02	8,35	757,36	2,23E-01	1,78	1,8489	47,9	50,2799	100,9
25	0,9999	19,98	8,35	756,14	2,27E-01	2,01	1,5510	47,9	50,6357	100,2
26	0,9999	19,94	8,35	754,92	2,31E-01	2,24	1,2522	47,9	50,9924	99,4
27	0,9999	19,91	8,35	753,70	2,35E-01	2,48	0,9543	47,9	51,3480	98,6
28	0,9999	19,87	8,35	752,47	2,38E-01	2,72	0,6574	47,9	51,7025	97,8
29	0,9999	19,83	8,35	751,25	2,43E-01	2,96	0,3597	47,9	52,0592	97,0
30	0,9999	19,79	8,35	750,02	2,47E-01	3,20	0,0613	47,9	52,4142	96,2

Tabela A.11- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak® relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Chilton-Colburn e correlação de Debrand

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	$X \times 10^2$	t_m	Y	t_g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m²K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,48	0,42	1949,85	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,46	0,44	1946,72	9,20E-04	0,00	4,6699	41,4	46,9121	109,2
2	0,99824	20,45	0,47	1943,13	5,51E-04	0,00	4,6599	42,2	46,9240	109,1
3	0,99836	20,45	0,51	1939,07	5,17E-04	0,00	4,6489	42,7	46,9371	109,0
4	0,99848	20,44	0,55	1934,39	4,33E-04	0,00	4,6390	43,1	46,9489	108,9
5	0,99859	20,44	0,59	1929,00	4,00E-04	0,00	4,6297	43,4	46,9600	108,9
6	0,99871	20,43	0,65	1922,62	4,49E-04	0,00	4,6194	43,7	46,9723	108,8
7	0,99883	20,42	0,71	1915,00	4,45E-04	0,00	4,6094	44,0	46,9842	108,8
8	0,99895	20,42	0,80	1905,72	4,68E-04	0,00	4,5995	44,2	46,9961	108,7
9	0,99907	20,41	0,90	1894,16	5,05E-04	0,00	4,5895	44,4	47,0080	108,7
10	0,99919	20,41	1,03	1879,27	5,45E-04	0,01	4,5797	44,6	47,0197	108,6
11	0,99931	20,41	1,20	1859,41	6,22E-04	0,01	4,5698	44,8	47,0315	108,6

12	0,99942	20,40	1,45	1831,50	7,21E-04	0,01	4,5599	44,9	47,0433	108,5
13	0,99954	20,40	1,83	1789,29	9,04E-04	0,01	4,5499	45,0	47,0552	108,5
14	0,99966	20,39	2,47	1717,84	1,15E-03	0,01	4,5399	45,2	47,0671	108,4
15	0,99978	20,39	3,82	1570,31	1,71E-03	0,01	4,5300	45,3	47,0790	108,4
16	0,99990	20,33	8,35	1085,37	8,46E-02	0,09	4,2320	47,2	47,4348	107,4
17	0,99990	20,30	8,35	1084,25	1,19E-01	0,21	3,9943	47,7	47,7187	106,7
18	0,99990	20,25	8,35	1082,67	1,75E-01	0,39	3,6364	47,9	48,1460	105,7
19	0,99990	20,22	8,35	1081,35	1,47E-01	0,54	3,3384	47,9	48,5018	104,9
20	0,99990	20,17	8,35	1079,72	1,43E-01	0,68	3,0405	47,9	48,8574	104,1
21	0,99990	20,14	8,35	1078,72	1,50E-01	0,83	2,7427	47,9	49,2130	103,3
22	0,99990	20,10	8,35	1077,40	1,53E-01	0,98	2,4446	47,9	49,5689	102,5
23	0,99990	20,06	8,35	1076,08	1,55E-01	1,14	2,1468	47,9	49,9244	101,8
24	0,99990	20,02	8,35	1074,75	1,57E-01	1,29	1,8492	47,9	50,2798	101,0
25	0,99990	19,98	8,35	1073,42	1,60E-01	1,45	1,5512	47,9	50,6356	100,2
26	0,99990	19,95	8,35	1072,07	1,62E-01	1,62	1,2533	47,9	50,9912	99,4
27	0,99990	19,90	8,35	1069,68	1,65E-01	1,78	0,9554	47,9	51,3469	98,6
28	0,99990	19,87	8,35	1069,37	1,68E-01	1,95	0,6573	47,9	51,7028	97,8
29	0,99990	19,82	8,35	1066,99	1,71E-01	2,12	0,3596	47,9	52,0582	97,0
30	0,99990	19,79	8,35	1066,65	1,74E-01	2,29	0,0617	47,9	52,4139	96,3

Tabela A.12- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak[®] relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Chilton-Colburn e correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,9980	20,48	0,42	419,93	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,9981	20,46	0,44	435,08	4,37E-03	0,00	4,6695	41,5	46,9125	109,2
2	0,9982	20,45	0,47	451,80	2,40E-03	0,01	4,6596	42,2	46,9243	109,1
3	0,9984	20,45	0,51	470,36	1,97E-03	0,01	4,6497	42,7	46,9361	109,0
4	0,9985	20,44	0,55	491,11	1,80E-03	0,01	4,6397	43,1	46,9481	108,9
5	0,9986	20,44	0,59	514,52	1,62E-03	0,01	4,6300	43,4	46,9597	108,9
6	0,9987	20,43	0,65	541,16	1,68E-03	0,01	4,6194	43,7	46,9723	108,8
7	0,9988	20,43	0,71	571,83	1,51E-03	0,02	4,6097	44,0	46,9840	108,8
8	0,9990	20,42	0,80	607,61	1,54E-03	0,02	4,5996	44,2	46,9960	108,7
9	0,9991	20,41	0,90	650,07	1,57E-02	0,03	4,5894	44,4	47,0082	108,7
10	0,9992	20,41	1,03	701,44	1,48E-02	0,05	4,5799	44,6	47,0196	108,6
11	0,9993	20,41	1,20	765,24	1,65E-02	0,06	4,5696	44,8	47,0319	108,6

12	0,9994	20,40	1,45	847,12	1,69E-02	0,08	4,5596	44,9	47,0485	108,5
13	0,9995	20,40	1,83	956,96	1,75E-02	0,10	4,5499	45,1	47,0555	108,5
14	0,9997	20,39	2,47	1113,53	1,99E-02	0,12	4,5399	45,2	47,0673	108,4
15	0,9998	20,39	3,82	1354,40	2,33E-02	0,14	4,5300	45,3	47,0792	108,4
16	0,9999	20,33	8,35	1663,72	8,26E-02	0,22	4,2320	47,2	47,4349	107,4
17	0,9999	20,20	8,35	1656,94	9,88E-02	0,32	3,9339	47,7	47,7909	106,5
18	0,9999	20,25	8,35	1658,63	9,58E-02	0,42	3,6364	47,9	48,1461	105,7
19	0,9999	20,21	8,35	1656,24	9,60E-02	0,51	3,3380	47,9	48,5024	104,9
20	0,9999	20,18	8,35	1653,78	9,70E-02	0,61	3,0399	47,9	48,8583	104,1
21	0,9999	20,14	8,35	1651,36	9,81E-02	0,71	2,7424	47,9	49,2135	103,3
22	0,9999	20,10	8,35	1648,94	9,98E-02	0,81	2,4443	47,9	49,5694	102,5
23	0,9999	20,06	8,35	1646,52	1,01E-01	0,91	2,1466	47,9	49,9248	101,7
24	0,9999	20,02	8,35	1644,03	1,03E-01	1,01	1,8488	47,9	50,2804	100,9
25	0,9999	19,98	8,35	1641,59	1,05E-01	1,12	1,5510	47,9	50,6360	100,2
26	0,9999	19,94	8,35	1639,14	1,06E-01	1,22	1,2533	47,9	50,9914	99,4
27	0,9999	19,91	8,35	1636,68	1,08E-01	1,33	0,9552	47,9	51,3473	98,6
28	0,9999	19,87	8,35	1634,22	1,10E-01	1,44	0,6576	47,9	51,7026	97,8
29	0,9999	19,82	8,35	1630,95	1,12E-01	1,55	0,3594	47,9	52,0584	97,0
30	0,9999	19,79	8,35	1629,27	1,14E-01	1,67	0,0613	47,9	52,4143	96,2

Tabela A.13- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak® relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1938), utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Chilton-Colburn e correlação de Valentin

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,48	0,42	1969,96	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,46	0,44	2044,93	8,86E-04	0,00	4,6700	41,4	46,9120	109,2
2	0,99824	20,45	0,47	2119,73	4,71E-04	0,00	4,6610	42,1	46,9228	109,1
3	0,99836	20,45	0,51	2194,29	4,01E-04	0,00	4,6518	42,6	46,9338	109,0
4	0,99848	20,44	0,55	2268,31	3,87E-04	0,00	4,6420	43,0	46,9456	109,0
5	0,99859	20,44	0,59	2341,71	3,18E-04	0,00	4,6335	43,3	46,9558	108,9
6	0,99871	20,43	0,65	2414,15	3,52E-04	0,00	4,6238	43,6	46,9675	108,8
7	0,99883	20,43	0,71	2485,33	3,31E-04	0,00	4,6146	43,9	46,9785	108,8
8	0,99895	20,42	0,80	2554,87	3,52E-04	0,00	4,6050	44,1	46,9900	108,7
9	0,99907	20,42	0,90	2621,93	3,23E-04	0,00	4,5966	44,3	47,0001	108,7
10	0,99919	20,41	1,03	2685,34	4,01E-04	0,00	4,5868	44,5	47,0119	108,6
11	0,99931	20,41	1,20	2743,35	3,86E-04	0,00	4,5781	44,6	47,0223	108,6

12	0,99942	20,40	1,45	2792,40	4,70E-04	0,01	4,5687	44,8	47,0335	108,5
13	0,99954	20,40	1,83	2825,41	5,25E-04	0,01	4,5598	44,9	47,0442	108,5
14	0,99966	20,39	2,47	2825,24	6,90E-04	0,01	4,5505	45,0	47,0553	108,5
15	0,99978	20,39	3,82	2736,17	6,24E-04	0,01	4,5414	45,1	47,0662	108,4
16	0,99990	20,34	8,35	2219,23	4,73E-02	0,05	4,2428	47,7	47,4248	107,4
17	0,99990	20,29	8,35	2215,67	7,43E-02	0,13	3,9441	47,9	47,7836	106,5
18	0,99990	20,25	8,35	2212,14	7,19E-02	0,20	3,6455	47,9	48,0708	105,7
19	0,99990	20,21	8,35	2208,76	7,20E-02	0,27	3,3469	47,9	48,4294	104,9
20	0,99990	20,17	8,35	2205,39	7,28E-02	0,35	3,0482	47,9	48,7881	104,1
21	0,99990	20,14	8,35	2202,00	7,38E-02	0,42	2,7496	47,9	49,1467	103,3
22	0,99990	20,10	8,35	2198,67	7,50E-02	0,49	2,4510	47,9	49,5053	102,5
23	0,99990	20,06	8,35	2195,26	7,62E-02	0,57	2,1523	47,9	49,8640	101,7
24	0,99990	20,02	8,35	2191,85	7,74E-02	0,65	1,8538	47,9	50,2225	100,9
25	0,99990	19,98	8,35	2188,50	7,87E-02	0,73	1,5550	47,9	50,5814	100,1
26	0,99990	19,94	8,35	2185,07	8,00E-02	0,81	1,2564	47,9	50,9400	99,3
27	0,99990	19,90	8,35	2181,70	8,13E-02	0,89	0,9579	47,9	51,2985	98,5
28	0,99990	19,86	8,35	2178,25	8,27E-02	0,97	0,6591	47,9	52,6573	97,7
29	0,99990	19,83	8,35	2174,86	8,41E-02	1,05	0,3606	47,9	52,0158	96,9
30	0,99990	19,79	8,35	2171,40	8,56E-02	1,14	0,0620	47,9	52,3745	96,1

Tabela A.14- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak[®] relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Lewis e correlação de Frössling

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,48	0,42	882,4660	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,46	0,44	881,6969	2,27E-03	0,00	4,6686	41,7	46,9136	109,2
2	0,99824	20,45	0,47	880,9507	1,23E-03	0,00	4,6585	42,4	46,9257	109,1
3	0,99836	20,45	0,51	880,2079	9,29E-04	0,00	4,6498	42,9	46,9361	109,0
4	0,99848	20,44	0,55	879,2863	1,09E-03	0,01	4,6390	43,4	46,9490	108,9
5	0,99859	20,43	0,59	878,3686	1,01E-03	0,01	4,6287	43,7	46,9613	108,8
6	0,99871	20,43	0,65	877,2655	9,27E-04	0,01	4,6193	44,0	46,9725	108,8
7	0,99883	20,42	0,71	875,9838	1,01E-03	0,01	4,6093	44,3	46,9844	108,7
8	0,99895	20,42	0,80	874,3364	1,07E-03	0,01	4,5993	44,5	46,9964	108,7
9	0,99907	20,41	0,90	872,5017	1,09E-03	0,01	4,5898	44,7	47,0077	108,6
10	0,99919	20,41	1,03	869,9338	1,32E-03	0,01	4,5793	44,9	47,0203	108,6
11	0,99931	20,40	1,20	866,6208	1,34E-03	0,01	4,5697	45,1	47,0317	108,5

12	0,99942	20,40	1,45	861,9996	1,64E-03	0,01	4,5595	45,3	47,0439	108,5
13	0,99954	20,39	1,83	854,7368	1,89E-03	0,02	4,5498	45,4	47,0555	108,4
14	0,99966	20,39	2,47	842,4673	2,45E-03	0,02	4,5400	45,6	47,0672	108,4
15	0,99978	20,38	3,82	816,4627	3,55E-03	0,02	4,5300	45,7	47,0791	108,3
16	0,99990	20,33	8,35	718,0195	1,57E-01	0,18	4,2320	47,8	47,4349	107,3
17	0,99990	20,29	8,35	716,8353	2,33E-01	0,41	3,9342	48,4	47,7904	106,5
18	0,99990	20,25	8,35	715,6597	2,25E-01	0,64	3,6364	48,5	48,1460	105,6
19	0,99990	20,21	8,35	714,4857	2,25E-01	0,86	3,3384	48,6	48,5018	104,8
20	0,99990	20,17	8,35	713,3112	2,27E-01	1,09	3,0406	48,6	48,8574	104,0
21	0,99990	20,13	8,35	712,1353	2,30E-01	1,32	2,7428	48,6	49,2130	103,3
22	0,99990	20,09	8,35	710,9578	2,34E-01	1,55	2,4449	48,6	49,5686	102,5
23	0,99990	20,06	8,35	710,0142	2,37E-01	1,79	2,1470	48,6	49,9244	101,7
24	0,99990	20,02	8,35	708,8335	2,41E-01	2,03	1,8491	48,6	50,2801	100,9
25	0,99990	19,98	8,35	707,6510	2,45E-01	2,28	1,5513	48,6	50,6356	100,1
26	0,99990	19,94	8,35	706,4668	2,49E-01	2,53	1,2534	48,5	50,9913	99,3
27	0,99990	19,90	8,35	705,2808	2,53E-01	2,78	0,9555	48,5	51,3470	98,5
28	0,99990	19,86	8,35	704,0931	2,58E-01	3,04	0,6576	48,5	51,7026	97,7
29	0,99990	19,83	8,35	703,1416	2,62E-01	3,30	0,3597	48,5	52,0583	97,0
30	0,99990	19,79	8,35	701,9506	2,67E-01	3,57	0,0619	48,5	52,4138	96,2

Tabela A.15- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak[®] relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Bedingfield-Drew e correlação de Frössling

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,48	0,42	882,4660	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,46	0,44	881,6985	2,01E-03	0,00	4,6697	41,4	46,9123	109,2
2	0,99824	20,45	0,47	880,9539	1,23E-03	0,00	4,6954	42,2	46,9246	109,1
3	0,99836	20,45	0,51	880,2097	1,16E-03	0,00	4,6480	42,8	46,9381	109,0
4	0,99848	20,44	0,55	879,2919	8,68E-04	0,01	4,6389	43,2	46,9489	108,9
5	0,99859	20,44	0,59	873,3713	1,00E-03	0,01	4,6283	43,5	46,9616	108,9
6	0,99871	20,43	0,65	877,2714	9,24E-04	0,01	4,6186	43,8	46,9732	108,8
7	0,99883	20,42	0,71	875,9908	8,45E-04	0,01	4,6100	44,0	46,9835	108,8
8	0,99895	20,42	0,80	874,3426	1,07E-03	0,01	4,5997	44,3	46,9958	108,7
9	0,99907	20,41	0,90	872,5097	1,09E-03	0,01	4,5899	44,5	47,0076	108,6
10	0,99919	20,41	1,03	869,9399	1,32E-03	0,01	4,5790	44,7	47,0206	108,6
11	0,99931	20,40	1,20	866,6288	1,24E-03	0,01	4,5699	44,8	47,0314	108,6

12	0,99942	20,40	1,45	862,0077	1,56E-03	0,01	4,5600	45,0	47,0433	108,5
13	0,99954	20,40	1,83	854,9309	1,96E-03	0,02	4,5496	45,1	47,0557	108,5
14	0,99966	20,39	2,47	842,6655	2,34E-03	0,02	4,5399	45,2	47,0672	108,4
15	0,99978	20,39	3,82	816,4710	3,44E-03	0,02	4,5299	45,4	47,0791	108,4
16	0,99990	20,33	8,35	718,0323	1,53E-01	0,18	4,2321	47,3	47,4347	107,4
17	0,99990	20,29	8,35	716,8494	2,25E-01	0,40	3,9341	47,8	47,7905	106,5
18	0,99990	20,25	8,35	715,6743	2,25E-01	0,63	3,6363	48,0	48,1461	105,7
19	0,99990	20,21	8,35	714,5004	2,23E-01	0,85	3,3384	48,0	48,5017	104,9
20	0,99990	20,18	8,35	713,5681	2,25E-01	1,07	3,0406	48,0	48,8574	104,1
21	0,99990	20,14	8,35	712,3842	2,28E-01	1,30	2,7427	48,0	49,2130	103,3
22	0,99990	20,10	8,35	711,2068	2,32E-01	1,53	2,4449	48,0	49,5686	102,5
23	0,99990	20,06	8,35	710,0275	2,35E-01	1,77	2,1469	48,0	49,9244	101,7
24	0,99990	20,02	8,35	708,8466	2,39E-01	2,01	1,8491	48,0	50,2799	100,9
25	0,99990	19,98	8,35	707,6638	2,43E-01	2,25	1,5511	48,0	50,6357	100,1
26	0,99990	19,94	8,35	706,4762	2,50E-01	2,50	1,2534	48,0	50,9960	99,3
27	0,99990	19,90	8,35	705,2898	2,51E-01	2,75	0,9556	48,0	51,3516	98,6
28	0,99990	19,87	8,35	704,3393	2,55E-01	3,01	0,6577	48,0	51,7073	97,8
29	0,99990	19,83	8,35	703,1497	2,60E-01	3,27	0,3597	48,0	52,0631	97,0
30	0,99990	19,79	8,35	701,9585	2,64E-01	3,53	0,0619	48,0	52,4187	96,2

Tabela A.16- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak[®] relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Henry-Epstein e correlação de Frössling

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,48	0,42	882,4660	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,46	0,44	881,7001	2,01E-03	0,00	4,6697	41,5	46,9124	109,2
2	0,99824	20,45	0,47	880,9539	1,23E-03	0,00	4,6594	42,2	46,9246	109,1
3	0,99836	20,45	0,51	880,2100	1,16E-03	0,00	4,6480	42,8	46,9382	109,0
4	0,99848	20,44	0,55	879,2919	8,68E-04	0,01	4,6389	43,2	46,9490	108,9
5	0,99859	20,44	0,59	878,3713	1,01E-03	0,01	4,6282	43,5	46,9618	108,9
6	0,99871	20,43	0,65	877,2713	9,27E-04	0,01	4,6184	43,8	46,9735	108,8
7	0,99883	20,42	0,71	875,9906	8,45E-04	0,01	4,6098	44,0	46,9838	108,8
8	0,99895	20,42	0,80	874,3424	1,07E-03	0,01	4,5995	44,3	46,9961	108,7
9	0,99907	20,41	0,90	872,5095	1,09E-03	0,01	4,5897	44,5	47,0079	108,6
10	0,99919	20,41	1,03	869,9410	1,20E-03	0,01	4,5798	44,6	47,0197	108,6
11	0,99931	20,40	1,20	866,6289	1,34E-03	0,01	4,5699	44,8	47,0314	108,6

12	0,99942	20,40	1,45	862,0079	1,56E-03	0,01	4,5600	45,0	47,0433	108,5
13	0,99954	20,40	1,83	854,9311	1,96E-03	0,02	4,5496	45,1	47,0556	108,5
14	0,99966	20,39	2,47	842,6657	2,34E-03	0,02	4,5399	45,2	47,0672	108,4
15	0,99978	20,39	3,82	816,4712	3,44E-03	0,02	4,5299	45,4	47,0791	108,4
16	0,99990	20,33	8,35	718,0325	1,53E-01	0,18	4,2321	47,3	47,4347	107,4
17	0,99990	20,29	8,35	716,8497	2,29E-01	0,40	3,9341	47,8	47,7905	106,5
18	0,99990	20,25	8,35	715,6745	2,22E-01	0,63	3,6362	48,0	48,1461	105,7
19	0,99990	20,21	8,35	714,5005	2,23E-01	0,85	3,3383	48,0	48,5018	104,9
20	0,99990	20,17	8,35	713,3259	2,25E-01	1,07	3,0405	48,0	48,8574	104,1
21	0,99990	20,14	8,35	712,3845	2,28E-01	1,30	2,7427	48,0	49,2129	103,3
22	0,99990	20,10	8,35	711,2070	2,32E-01	1,53	2,4448	48,0	49,5686	102,5
23	0,99990	20,06	8,35	710,0279	2,35E-01	1,77	2,1469	48,0	49,9242	101,7
24	0,99990	20,02	8,35	708,6470	2,39E-01	2,01	1,8492	48,0	50,2797	100,9
25	0,99990	19,98	8,35	707,6642	2,43E-01	2,25	1,5513	48,0	50,6354	100,1
26	0,99990	19,94	8,35	706,4797	2,47E-01	2,50	1,2534	48,0	50,9911	99,4
27	0,99990	19,91	8,35	705,5305	2,51E-01	2,75	0,9555	48,0	51,3468	98,6
28	0,99990	19,87	8,35	704,3429	2,52E-01	3,00	0,6577	48,0	51,7024	97,8
29	0,99990	19,83	8,35	703,1534	2,60E-01	3,26	0,3598	48,0	52,0580	97,0
30	0,99990	19,79	8,35	701,9621	2,64E-01	3,53	0,0619	48,0	52,4137	96,2

Tabela A.17- Dados de entrada e resultados numéricos do DryPak[®] relativos à simulação do experimento 16 de ROCHA (1988), utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Lewis, correlação de Frössling e correção de Ackermann

Divisão	ε	u	v	h	l	l acumulado	X x10 ²	t _m	Y	t _g
		[m/s]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,99800	20,48	0,42	882,4660	-	-	4,6800	39,9	46,9000	109,4
1	0,99812	20,46	0,44	881,6987	2,23E-03	0,00	4,6700	41,6	46,9120	109,2
2	0,99824	20,45	0,47	880,9518	1,31E-03	0,00	4,6599	42,3	46,9240	109,1
3	0,99836	20,45	0,51	880,2096	1,11E-03	0,00	4,6499	42,9	46,9360	109,0
4	0,99848	20,44	0,55	879,2889	1,03E-03	0,01	4,6399	43,3	46,9480	108,9
5	0,99859	20,43	0,59	878,3690	9,96E-04	0,01	4,6300	43,7	46,9599	108,9
6	0,99871	20,43	0,65	877,2681	1,01E-03	0,01	4,6200	44,0	46,9719	108,8
7	0,99883	20,42	0,71	875,9850	1,04E-03	0,01	4,6099	44,3	46,9839	108,7
8	0,99895	20,42	0,80	874,3371	1,07E-03	0,01	4,6000	44,5	46,9957	108,7
9	0,99907	20,41	0,90	872,5037	1,16E-03	0,01	4,5899	44,7	47,0077	108,6
10	0,99919	20,41	1,03	869,9348	1,26E-03	0,01	4,5799	44,9	47,0196	108,6
11	0,99931	20,40	1,20	866,6225	1,40E-03	0,01	4,5700	45,1	47,0315	108,5

12	0,99942	20,40	1,45	862,0011	1,64E-03	0,02	4,5600	45,0	47,0435	108,5
13	0,99954	20,39	1,83	854,7376	1,97E-03	0,02	4,5500	45,4	47,0554	108,4
14	0,99966	20,39	2,47	842,6585	2,51E-03	0,02	4,5400	45,5	47,0674	108,4
15	0,99978	20,38	3,82	816,4637	3,58E-03	0,02	4,5300	45,6	47,0793	108,3
16	0,99990	20,33	8,35	718,0221	1,59E-01	0,18	4,2321	47,7	47,4350	107,3
17	0,99990	20,29	8,35	716,8386	2,37E-01	0,42	3,9341	48,2	47,7908	106,5
18	0,99990	20,25	8,35	715,6732	2,19E-01	0,64	3,6362	48,6	48,1465	105,7
19	0,99990	20,21	8,35	714,5028	2,26E-01	0,86	3,3384	48,5	48,5020	104,9
20	0,99990	20,18	8,35	713,5637	2,30E-01	1,09	3,0406	48,5	48,8575	104,1
21	0,99990	20,14	8,35	712,3884	2,34E-01	1,33	2,7427	48,5	49,2132	103,3
22	0,99990	20,10	8,35	711,2113	2,38E-01	1,57	2,4448	48,5	49,5688	102,5
23	0,99990	20,06	8,35	710,0324	2,42E-01	1,81	2,1470	48,4	49,9244	101,7
24	0,99990	20,02	8,35	708,8517	2,46E-01	2,05	1,8492	48,4	50,2800	101,0
25	0,99990	19,98	8,35	707,6692	2,50E-01	2,30	1,5513	48,4	50,6357	100,2
26	0,99990	19,94	8,35	706,4847	2,54E-01	2,56	1,2534	48,4	50,9914	99,4
27	0,99990	19,91	8,35	705,5360	2,58E-01	2,82	0,9556	48,4	51,3470	98,6
28	0,99990	19,87	8,35	704,3484	2,62E-01	3,08	0,6577	48,4	51,7027	97,8
29	0,99990	19,83	8,35	703,1591	2,67E-01	3,35	0,3598	48,4	52,0584	97,0
30	0,99990	19,79	8,35	701,9680	2,71E-01	3,62	0,0619	48,4	52,4141	96,2

Tabela A.18- Dados numéricos do DryPak® relativos a simulação do experimento 04 PÉCORA (1985) utilizando massa específica do sólido constante, duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste, analogia de Lewis, correlação de Frössling e correção de Ackermann

Divisão	d_p	ϵ	u	ρ_m	v	h	l	l acumulado	$X \times 10^2$	t_m	Y	t_g
	[m]		[m/s]	[kg/m ³]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,00059	0,998089	10,09	1325,00	0,05	524,9969	-	-	0,3500	25,0	18,0000	112,4
1	0,00057	0,998327	10,07	1330,81	0,06	525,7668	1,07E-02	0,01	0,3384	38,2	18,1611	111,6
2	0,00054	0,998564	10,06	1336,63	0,07	542,7245	6,31E-03	0,02	0,3267	40,2	18,3223	111,2
3	0,00052	0,998802	10,04	1342,44	0,08	554,7731	6,26E-03	0,02	0,3151	40,8	18,4832	110,7
4	0,00049	0,999039	10,03	1348,25	0,10	574,4426	6,87E-03	0,03	0,3035	41,2	18,6442	110,4
5	0,00047	0,999277	10,02	1354,06	0,13	588,0114	8,10E-03	0,04	0,2918	41,3	18,8058	110,0
6	0,00044	0,999514	10,01	1359,88	0,19	610,5174	1,04E-02	0,05	0,2802	41,5	18,9668	109,6
7	0,00042	0,999752	10,00	1365,69	0,37	623,4879	1,58E-02	0,06	0,2686	41,6	19,1275	109,2
8	0,0004	0,999804	10,00	1371,50	0,47	640,0236	2,39E-02	0,09	0,2570	41,9	19,3184	109,1
9	0,00037	0,999857	9,99	1377,31	0,64	666,9305	2,87E-02	0,12	0,2454	42,1	19,4794	108,7
10	0,00035	0,999909	9,98	1383,13	1,00	679,8616	3,81E-02	0,16	0,2337	42,4	19,6408	108,4
11	0,00032	0,999962	9,97	1388,94	2,36	677,3961	6,46E-02	0,22	0,2221	42,8	19,8016	108,0

12	0,0003	0,999967	9,96	1394,75	2,74	693,2884	1,08E-01	0,33	0,2105	43,2	19,9626	107,6
13	0,00027	0,999972	9,95	1400,56	3,26	734,0391	1,14E-01	0,44	0,1989	43,8	20,1236	107,2
14	0,00025	0,999978	9,95	1406,38	4,03	730,1214	1,26E-01	0,57	0,1872	44,5	20,2848	107,2
15	0,00022	0,999983	9,94	1412,19	5,30	736,6390	1,50E-01	0,72	0,1756	45,3	20,4459	106,8
16	0,0002	0,999989	9,94	1414,05	7,77	634,6594	6,43E-02	0,78	0,1719	45,6	20,4974	106,7
17	0,0002	0,999989	9,93	1414,05	7,77	633,7410	8,25E-02	0,86	0,1682	45,9	20,6004	106,5
18	0,0002	0,999989	9,93	1414,05	7,77	633,6598	8,35E-02	0,95	0,1645	46,2	20,6519	106,3
19	0,0002	0,999989	9,93	1414,05	7,77	632,8195	8,48E-02	1,03	0,1607	46,6	20,7034	106,2
20	0,0002	0,999989	9,92	1414,05	7,77	632,7373	8,60E-02	1,12	0,1570	47,0	20,7549	106,1
21	0,0002	0,999989	9,92	1414,05	7,77	632,6543	8,73E-02	1,21	0,1533	47,4	20,8065	106,0
22	0,0002	0,999989	9,92	1414,05	7,77	631,8110	8,88E-02	1,29	0,1496	47,8	20,8581	105,8
23	0,0002	0,999989	9,91	1414,05	7,77	631,7261	9,16E-02	1,39	0,1458	48,3	20,9104	105,7
24	0,0002	0,999989	9,91	1414,05	7,77	631,6426	9,15E-02	1,48	0,1421	48,7	20,9618	105,6
25	0,0002	0,999989	9,91	1414,05	7,77	631,5573	9,37E-02	1,57	0,1384	49,3	21,0135	105,4
26	0,0002	0,999989	9,91	1414,05	7,77	630,7094	9,58E-02	1,67	0,1346	49,8	21,0653	105,3
27	0,0002	0,999989	9,90	1414,05	7,77	630,6251	9,58E-02	1,76	0,1309	50,4	21,1161	105,2
28	0,0002	0,999989	9,90	1414,05	7,77	630,5381	1,00E-01	1,86	0,1272	51,0	21,1680	105,0
29	0,0002	0,999989	9,90	1414,05	7,77	630,3611	1,02E-01	1,97	0,1234	51,7	21,2199	104,9
30	0,0002	0,999989	9,89	1414,05	7,77	629,6001	1,02E-01	2,07	0,1198	52,3	21,2705	104,8

Tabela A.19- Dados numéricos do DryPak[®] relativos a simulação do experimento 04 PÉCORA (1985) utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade correspondente a 3% do total do teor de umidade perdida e outra fora deste , analogia de Lewis, correlação de Frössling e correção de Ackermann

Divisão	d_p	ϵ	u	ρ_m	v	h	l	l acumulado	$X \times 10^2$	t_m	Y	t_r
	[m]		[m/s]	[kg/m ³]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,00059	0,998089	10,09	1325,00	0,05	524,9969	-	-	0,3500	25,0	18,0000	112,4
1	0,00057	0,998327	10,09	1325,23	0,06	526,3059	1,54E-03	0,00	0,3495	28,1	18,0064	112,4
2	0,00054	0,998564	10,08	1325,46	0,07	543,5704	9,34E-04	0,00	0,3491	29,7	18,0128	112,3
3	0,00052	0,998802	10,08	1325,69	0,08	555,7116	8,18E-04	0,00	0,3486	30,8	18,0192	112,2
4	0,00049	0,999039	10,08	1325,92	0,10	575,7221	7,82E-04	0,00	0,3482	31,6	18,0256	112,2
5	0,00047	0,999277	10,07	1326,15	0,13	589,6402	8,30E-04	0,00	0,3477	32,3	18,0319	112,1
6	0,00044	0,999514	10,07	1326,38	0,20	612,3118	9,73E-04	0,01	0,3472	32,9	18,0383	112,1
7	0,00042	0,999752	10,07	1326,61	0,38	625,4469	1,37E-03	0,01	0,3468	33,4	18,0446	112,1
8	0,0004	0,999804	10,07	1326,84	0,49	642,0900	1,96E-03	0,01	0,3463	33,9	18,0510	112,0
9	0,00037	0,999857	10,06	1327,07	0,66	669,2406	2,22E-03	0,01	0,3459	34,3	18,0574	112,0
10	0,00035	0,999909	10,06	1327,30	1,05	682,4181	2,79E-03	0,01	0,3454	34,7	18,0632	112,0
11	0,00032	0,999962	10,06	1327,53	2,47	678,5033	4,51E-03	0,02	0,3449	35,0	18,0702	111,9

12	0,0003	0,999967	10,06	1327,76	2,88	693,6107	7,17E-03	0,03	0,3445	35,3	18,0766	111,9
13	0,00027	0,999972	10,06	1327,99	3,44	722,5007	7,31E-03	0,03	0,3440	35,6	18,0830	111,9
14	0,00025	0,999978	10,06	1328,22	4,27	727,0343	7,68E-03	0,04	0,3436	35,8	18,0894	111,9
15	0,00022	0,999983	10,06	1328,45	5,63	728,5222	8,64E-03	0,05	0,3431	36,1	18,0958	111,8
16	0,0002	0,999989	10,04	1335,90	8,23	609,9937	2,91E-01	0,34	0,3282	40,0	18,3021	111,2
17	0,0002	0,999989	10,03	1335,90	8,23	607,9990	3,13E-01	0,65	0,3133	40,9	18,5084	110,7
18	0,0002	0,999989	10,02	1335,90	8,23	606,8438	3,02E-01	0,96	0,2984	41,2	18,7146	110,2
19	0,0002	0,999989	10,01	1335,90	8,23	605,6929	3,01E-01	1,26	0,2835	41,4	18,9215	110,0
20	0,0002	0,999989	10,00	1335,90	8,23	604,5386	3,01E-01	1,56	0,2686	41,6	19,1272	109,2
21	0,0002	0,999989	9,98	1335,90	8,23	603,3858	3,04E-01	1,86	0,2537	41,9	19,3340	108,7
22	0,0002	0,999989	9,97	1335,90	8,23	601,3873	3,06E-01	2,17	0,2389	42,2	19,5394	108,2
23	0,0002	0,999989	9,96	1335,90	8,23	600,2261	3,13E-01	2,48	0,2239	42,7	19,7468	107,7
24	0,0002	0,999989	9,95	1335,90	8,23	599,0628	3,17E-01	2,80	0,2090	43,2	19,9528	107,3
25	0,0002	0,999989	9,94	1335,90	8,23	597,8955	3,24E-01	3,12	0,1942	44,0	20,1585	106,8
26	0,0002	0,999989	9,93	1335,90	8,23	596,7211	3,36E-01	3,46	0,1793	44,9	20,3649	106,3
27	0,0002	0,999989	9,91	1335,90	8,23	595,5412	3,50E-01	3,81	0,1644	46,2	20,5707	105,8
28	0,0002	0,999989	9,90	1335,90	8,23	593,4917	3,71E-01	4,18	0,1495	47,7	20,7777	105,3
29	0,0002	0,999989	9,89	1335,90	8,23	592,2892	3,95E-01	4,57	0,1346	49,7	20,9836	104,8
30	0,0002	0,999989	9,88	1335,90	8,23	591,0750	4,29E-01	5,00	0,1198	52,3	21,1895	104,2

Tabela A.20- Dados numéricos do DryPak® relativos a simulação do experimento 04 PÉCORA (1985) utilizando massa específica do sólido constante, duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Lewis, correlação de Frössling e correção de Ackermann

Divisão	d_p	ε	u	ρ_m	v	h	l	l acumulado	$X \times 10^2$	t_m	Y	t_g
	[m]		[m/s]	[kg/m ³]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,00059	0,998089	10,09	1500	0,04	524,9969	-	-	0,3500	25	18,0000	112,4
1	0,00057	0,998327	10,07	1500	0,05	525,9750	1,07E-02	0,01	0,3384	38,2	18,1611	111,6
2	0,00054	0,998564	10,06	1500	0,06	542,3986	6,30E-03	0,02	0,3267	40,2	18,3222	111,2
3	0,00052	0,998802	10,04	1500	0,07	542,2188	6,33E-03	0,02	0,3151	40,8	18,4832	110,7
4	0,00049	0,999039	10,03	1500	0,09	574,6673	6,99E-03	0,03	0,3034	41,2	18,6452	110,4
5	0,00047	0,999277	10,02	1500	0,12	588,2424	8,04E-03	0,04	0,2918	41,3	18,8058	109,9
6	0,00044	0,999514	10,01	1500	0,17	610,9961	1,04E-02	0,05	0,2802	41,5	18,9669	109,6
7	0,00042	0,999752	10,00	1500	0,34	624,2298	1,57E-02	0,06	0,2686	41,6	19,1276	109,2
8	0,0004	0,999804	9,99	1500	0,43	640,7198	2,39E-02	0,09	0,2570	41,8	19,2886	108,8
9	0,00037	0,999857	9,98	1500	0,59	667,9255	2,87E-02	0,12	0,2454	42,1	19,4496	108,4
10	0,00035	0,999909	9,97	1500	0,93	681,7439	3,81E-02	0,16	0,2337	42,4	19,6105	108,1
11	0,00032	0,999962	9,96	1500	2,19	682,7005	3,50E-02	0,19	0,2220	42,7	19,7723	107,7

12	0,0003	0,999967	9,95	1500	2,55	699,5735	1,07E-01	0,30	0,2105	43,2	19,9326	107,3
13	0,00027	0,999972	9,94	1500	3,04	730,6533	1,14E-01	0,41	0,1989	43,7	20,0936	106,9
14	0,00025	0,999978	9,93	1500	3,78	739,1536	1,27E-01	0,54	0,1872	44,4	20,2548	106,5
15	0,00022	0,999983	9,92	1500	4,99	750,3556	1,48E-01	0,69	0,1756	45,2	20,4156	106,2
16	0,0002	0,999989	9,92	1500	7,33	664,5985	6,31E-02	0,75	0,1719	45,5	20,4671	106
17	0,0002	0,999989	9,92	1500	7,33	664,5164	8,12E-02	0,83	0,1682	45,8	20,5199	105,9
18	0,0002	0,999989	9,92	1500	7,33	664,4357	8,02E-02	0,91	0,1645	46,1	20,5714	105,8
19	0,0002	0,999989	9,91	1500	7,33	663,6609	8,25E-02	0,99	0,1607	46,5	20,6236	105,7
20	0,0002	0,999989	9,91	1500	7,33	663,5795	8,24E-02	1,08	0,1570	46,9	20,6750	105,5
21	0,0002	0,999989	9,91	1500	7,33	663,4966	8,47E-02	1,16	0,1532	47,3	20,7271	105,4
22	0,0002	0,999989	9,90	1500	7,33	663,4144	8,47E-02	1,25	0,1495	47,7	20,7783	105,3
23	0,0002	0,999989	9,90	1500	7,33	662,6370	8,69E-02	1,33	0,1458	48,1	20,8300	105,2
24	0,0002	0,999989	9,90	1500	7,33	662,5549	8,69E-02	1,42	0,1421	48,6	20,8808	105
25	0,0002	0,999989	9,89	1500	7,33	662,4693	9,14E-02	1,51	0,1383	49,1	20,9333	104,9
26	0,0002	0,999989	9,89	1500	7,33	661,6894	9,14E-02	1,60	0,1346	49,7	20,9848	104,8
27	0,0002	0,999989	9,89	1500	7,33	661,6041	9,36E-02	1,70	0,1309	50,3	21,0364	104,6
28	0,0002	0,999989	9,88	1500	7,33	661,5180	9,59E-02	1,79	0,1272	50,9	21,0882	104,5
29	0,0002	0,999989	9,88	1500	7,33	660,7363	9,58E-02	1,89	0,1235	51,5	21,1388	104,4
30	0,0002	0,999989	9,88	1500	7,33	660,6490	1,00E-01	1,99	0,1198	52,2	21,1905	104,2

Tabela A.21- Dados numéricos do DryPak® relativos a simulação do experimento 04 PÉCORA (1985) utilizando diâmetro dos grumos constante, duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Lewis, correlação de Frössling e correção de Ackermann

Divisão	d_p	ε	u	ρ_m	v	h	l	l acumulado	$X \times 10^2$	t_m	Y	t_g
	[m]		[m/s]	[kg/m ³]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,00030	0,998089	10,09	1325,00	0,05	782,6446	-	-	0,3500	25,0	18,0000	112,5
1	0,00030	0,998327	10,07	1330,81	0,06	781,4763	3,72E-03	0,00	0,3382	38,3	18,1630	111,6
2	0,00030	0,998564	10,06	1336,63	0,07	780,7327	2,31E-03	0,01	0,3267	40,2	18,3226	111,2
3	0,00030	0,998802	10,04	1342,44	0,08	780,0070	2,49E-03	0,01	0,3151	40,8	18,4834	110,7
4	0,00030	0,999039	10,03	1348,25	0,10	778,9968	2,95E-03	0,01	0,3035	41,2	18,6444	110,4
5	0,00030	0,999277	10,02	1354,06	0,13	777,4100	3,75E-03	0,02	0,2919	41,3	18,8055	110
6	0,00030	0,999514	10,01	1359,88	0,19	775,2411	5,22E-03	0,02	0,2802	41,5	18,9665	109,6
7	0,00030	0,999752	10,00	1365,69	0,37	769,5620	8,65E-03	0,03	0,2686	41,6	19,1274	109,2
8	0,00030	0,999804	9,99	1371,50	0,47	766,1878	1,45E-02	0,04	0,2570	41,8	19,2885	108,8
9	0,00030	0,999857	9,98	1377,31	0,64	760,7190	1,91E-02	0,06	0,2454	42,1	19,4494	108,4
10	0,00030	0,999909	9,97	1383,13	1,00	749,4612	2,84E-02	0,09	0,2337	42,4	19,6114	108,1
11	0,00030	0,999962	9,96	1388,94	2,36	706,0237	5,27E-02	0,14	0,2221	42,7	19,7716	107,7

12	0,00030	0,999967	9,95	1394,75	2,74	692,8555	1,02E-01	0,25	0,2105	43,2	19,8727	107,3
13	0,00030	0,999972	9,94	1400,56	3,26	674,4245	1,25E-01	0,37	0,1989	43,7	20,0338	106,9
14	0,00030	0,999978	9,93	1406,38	4,03	645,9906	1,61E-01	0,53	0,1872	44,4	20,1950	105,6
15	0,00030	0,999983	9,92	1412,19	5,30	595,4308	2,24E-01	0,76	0,1756	45,2	20,3559	106,2
16	0,00030	0,999989	9,92	1414,05	7,77	470,7541	1,16E-01	0,87	0,1719	45,5	20,4073	106
17	0,00030	0,999989	9,92	1414,05	7,77	470,0803	1,69E-01	1,04	0,1682	45,8	20,4592	105,9
18	0,00030	0,999989	9,91	1414,05	7,77	470,0269	1,70E-01	1,21	0,1645	46,1	20,5105	105,8
19	0,00030	0,999989	9,91	1414,05	7,77	469,9732	1,73E-01	1,38	0,1607	46,5	20,5622	105,7
20	0,00030	0,999989	9,91	1414,05	7,77	469,9192	1,75E-01	1,56	0,1570	46,8	20,6138	105,5
21	0,00030	0,999989	9,91	1414,05	7,77	469,2429	1,77E-01	1,74	0,1533	47,2	20,6651	105,4
22	0,00030	0,999989	9,90	1414,05	7,77	469,1883	1,81E-01	1,92	0,1496	47,7	20,7169	105,3
23	0,00030	0,999989	9,90	1414,05	7,77	469,1336	1,83E-01	2,10	0,1458	48,2	20,7684	105,2
24	0,00030	0,999989	9,90	1414,05	7,77	468,4547	1,86E-01	2,29	0,1421	48,6	20,8199	105
25	0,00030	0,999989	9,89	1414,05	7,77	468,3991	1,91E-01	2,48	0,1384	49,1	20,8715	104,9
26	0,00030	0,999989	9,89	1414,05	7,77	468,3434	1,94E-01	2,67	0,1347	49,7	20,9230	104,8
27	0,00030	0,999989	9,89	1414,05	7,77	467,6619	1,98E-01	2,87	0,1310	50,2	20,9746	104,6
28	0,00030	0,999989	9,88	1414,05	7,77	467,6054	2,02E-01	3,07	0,1272	50,9	21,0260	104,5
29	0,00030	0,999989	9,88	1414,05	7,77	467,5482	2,06E-01	3,28	0,1235	51,5	21,0776	104,4
30	0,00030	0,999989	9,88	1414,05	7,77	466,8640	2,13E-01	3,49	0,1198	52,2	21,1293	104,2

Tabela A.22- Dados numéricos do DryPak[®] relativos a simulação do experimento 04 PÉCORA (1985) utilizando duas variações constantes e diferentes, uma no trecho com variação de porosidade e outra fora deste , analogia de Lewis, correlação de Frössling e correção de Ackermann (16 divisões)

Divisão	d_p	ε	u	ρ_m	v	h	l	l acumulado	$X \times 10^2$	t_m	Y	t_g
	[m]		[m/s]	[kg/m ³]	[m/s]	[kW/m ² K]	[m]	[m]	[kg/kg]	[°C]	[g/kg]	[°C]
-	0,00059	0,998089	10,09	1325,00	0,05	524,9969	-	-	0,3500	25,0	18,0000	112,4
1	0,00057	0,998327	10,07	1330,81	0,06	525,7668	1,07E-02	0,01	0,3384	38,2	18,1611	111,6
2	0,00054	0,998564	10,06	1336,63	0,07	542,7245	6,31E-03	0,02	0,3267	40,2	18,3223	111,2
3	0,00052	0,998802	10,04	1342,44	0,08	554,7731	6,26E-03	0,02	0,3151	40,8	18,4832	110,7
4	0,00049	0,999039	10,03	1348,25	0,10	574,4426	6,87E-03	0,03	0,3035	41,2	18,6442	110,4
5	0,00047	0,999277	10,02	1354,06	0,13	588,0114	8,10E-03	0,04	0,2918	41,3	18,8058	110,0
6	0,00044	0,999514	10,01	1359,88	0,19	610,5174	1,04E-02	0,05	0,2802	41,5	18,9668	109,6
7	0,00042	0,999752	10,00	1365,69	0,37	623,4879	1,58E-02	0,06	0,2686	41,6	19,1275	109,2
8	0,0004	0,999804	10,00	1371,50	0,47	640,0236	2,39E-02	0,09	0,2570	41,9	19,3184	109,1
9	0,00037	0,999857	9,99	1377,31	0,64	666,9305	2,87E-02	0,12	0,2454	42,1	19,4794	108,7
10	0,00035	0,999909	9,98	1383,13	1,00	679,8616	3,81E-02	0,16	0,2337	42,4	19,6408	108,4
11	0,00032	0,999962	9,97	1388,94	2,36	677,3961	6,46E-02	0,22	0,2221	42,8	19,8016	108,0

12	0,0003	0,999967	9,96	1394,75	2,74	693,2884	1,08E-01	0,33	0,2105	43,2	19,9626	107,6
13	0,00027	0,999972	9,95	1400,56	3,26	734,0391	1,14E-01	0,44	0,1989	43,8	20,1236	107,2
14	0,00025	0,999978	9,95	1406,38	4,03	730,1214	1,26E-01	0,57	0,1872	44,5	20,2848	107,2
15	0,00022	0,999983	9,94	1412,19	5,30	736,6390	1,50E-01	0,72	0,1756	45,3	20,4459	106,8
16	0,0002	0,999989	9,89	1414,05	7,77	629,6626	1,07E+00	1,79	0,1198	52,4	21,2190	104,9

APÊNDICE B-

RESULTADOS NUMÉRICOS OBTIDOS POR ROCHA (1988)

Tabela B.1- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 1, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Krames

Divisão	ϵ	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _g [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,68	39,9	46,9	109,4
1	0,9998	22,49	4,19	0,4	4,52	45,3	47,1	107,7
2	0,9999	22,49	7,51	0,8	4,24	46,9	47,4	105,9
3	0,9999	22,49	10,37	1,2	3,95	47,2	47,8	104,2
4	0,9999	22,49	12,76	1,6	3,67	47,2	48,1	102,5
5	0,9999	22,49	14,72	2,0	3,39	47,2	48,5	100,9
6	0,9999	22,49	16,26	2,4	3,09	47,2	48,8	99,2
7	0,9999	22,49	17,41	2,8	2,79	47,2	49,2	97,5
8	0,9999	22,49	18,20	3,2	2,50	47,2	49,5	95,9
9	0,9999	22,49	18,71	3,6	2,21	47,2	49,9	94,3
10	0,9999	22,49	19,00	4,0	1,92	47,2	50,2	92,8

Tabela B.2- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 2, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Kramers

Divisão	ϵ	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _g [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,68	39,9	46,9	109,4
1	0,9999	22,49	4,19	0,4	4,54	45,1	47,1	107,9
2	0,9999	22,49	7,51	0,8	4,30	46,7	47,4	106,2
3	0,9999	22,49	10,37	1,2	4,01	47,2	47,7	104,5
4	0,9999	22,49	12,76	1,6	3,69	47,2	48,1	102,6
5	0,9999	22,49	14,72	2,0	3,37	47,2	48,5	100,8
6	0,9999	22,49	16,26	2,4	3,05	47,2	48,9	99,0
7	0,9999	22,49	17,41	2,8	2,72	47,2	49,3	97,1
8	0,9999	22,49	18,20	3,2	2,39	47,2	49,7	95,4
9	0,9999	22,49	18,71	3,6	2,07	47,2	50,0	93,6
10	0,9999	22,49	19,00	4,0	1,74	47,2	50,4	91,9

Tabela B.3- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 1, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Chukhanov

Divisão	ε	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _z [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,680	39,9	46,9	109,4
1	0,9998	22,49	4,19	0,4	4,460	45,9	47,2	107,4
2	0,9999	22,49	7,51	0,8	3,940	47,2	47,8	104,3
3	0,9999	22,49	10,37	1,2	3,390	47,2	48,5	101,2
4	0,9999	22,49	12,77	1,6	2,860	47,2	49,1	98,4
5	0,9999	22,49	14,74	2,0	2,360	47,2	49,7	95,7
6	0,9999	22,49	16,28	2,4	1,900	47,2	50,2	93,3
7	0,9999	22,49	17,43	2,8	1,480	47,2	50,8	91,1
8	0,9999	22,49	18,22	3,2	1,100	47,2	51,2	89,2
9	0,9999	22,49	18,72	3,6	0,751	47,2	51,6	87,5
10	0,9999	22,49	19,01	4,0	0,429	47,2	52,0	85,9

Tabela B.4- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 2, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Chukhanov

Divisão	ε	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _z [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,680	39,9	46,9	109,4
1	0,9999	22,49	8,40	0,4	4,360	46,5	47,3	107,4
2	0,9999	22,49	10,51	0,8	3,820	47,2	47,9	105,6
3	0,9999	22,49	11,79	1,2	3,260	47,2	48,6	103,8
4	0,9999	22,49	12,69	1,6	2,710	47,2	49,3	102,2
5	0,9999	22,49	13,36	2,0	2,160	47,2	49,9	100,6
6	0,9999	22,49	13,89	2,4	1,630	47,2	50,6	99,0
7	0,9999	22,49	14,32	2,8	1,110	47,2	51,2	97,5
8	0,9999	22,49	14,67	3,2	0,602	47,2	51,8	96,1
9	0,9999	22,49	14,67	3,6	0,112	47,2	52,4	94,8
10	0,9999	22,49	15,22	4,0	0,000	53,6	52,4	93,5

Tabela B.5- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 1, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Ranz e Marshall

Divisão	ε	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _z [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,68	39,9	46,9	109,4
1	0,9998	22,49	4,19	0,4	4,58	44,6	47,0	108,1
2	0,9999	22,49	7,51	0,8	4,38	46,4	47,3	106,7
3	0,9999	22,49	10,36	1,2	4,17	47,1	47,5	105,3
4	0,9999	22,49	12,76	1,6	3,96	47,3	47,8	104,0
5	0,9999	22,49	14,72	2,0	3,74	47,3	48,0	102,7
6	0,9999	22,49	16,26	2,4	3,52	47,3	48,3	101,3
7	0,9999	22,49	17,40	2,8	3,29	47,3	48,6	100,0
8	0,9999	22,49	18,19	3,2	3,07	47,3	48,8	98,7
9	0,9999	22,49	18,70	3,6	2,85	47,3	49,1	97,5
10	0,9999	22,49	19,00	4,0	2,64	47,3	49,4	96,2

Tabela B.6- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 2, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Ranz e Marshall

Divisão	ε	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _z [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,68	39,9	46,9	109,4
1	0,9999	22,49	8,39	0,4	4,59	44,4	47,0	108,2
2	0,9999	22,49	10,50	0,8	4,43	46,2	47,2	106,9
3	0,9999	22,49	11,77	1,2	4,22	47,0	47,5	105,6
4	0,9999	22,49	12,65	1,6	3,98	47,3	47,7	104,1
5	0,9999	22,49	13,32	2,0	3,74	47,3	48,0	102,6
6	0,9999	22,49	13,84	2,4	3,49	47,3	48,4	101,2
7	0,9999	22,49	14,26	2,8	3,24	47,3	48,6	99,7
8	0,9999	22,49	14,61	3,2	2,98	47,3	48,9	98,3
9	0,9999	22,49	14,90	3,6	2,73	47,3	49,2	96,9
10	0,9999	22,49	15,14	4,0	2,48	47,3	49,5	95,5

Tabela B.7- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 1, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Debrand

Divisão	ε	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _g [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,68	39,9	46,9	109,4
1	0,9998	22,49	4,19	0,4	4,37	46,5	47,3	106,8
2	0,9999	22,49	7,52	0,8	3,95	47,2	47,8	104,4
3	0,9999	22,49	10,37	1,2	3,62	47,2	48,2	102,4
4	0,9999	22,49	12,77	1,6	3,36	47,2	48,5	100,9
5	0,9999	22,49	14,73	2,0	3,12	47,2	48,8	99,5
6	0,9999	22,49	16,27	2,4	2,92	47,2	49,0	98,4
7	0,9999	22,49	17,41	2,8	2,75	47,2	49,2	97,4
8	0,9999	22,49	18,20	3,2	2,61	47,2	49,4	96,5
9	0,9999	22,49	18,71	3,6	2,48	47,2	49,5	95,7
10	0,9999	22,49	19,00	4,0	2,37	47,2	49,7	95,0

Tabela B.8- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 2, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Debrand

Divisão	ε	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _g [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,68	39,9	46,9	109,4
1	0,9999	22,49	8,40	0,4	4,47	45,8	47,2	107,4
2	0,9999	22,49	10,50	0,8	4,18	47,0	47,5	105,6
3	0,9999	22,49	11,78	1,2	3,89	47,2	47,9	103,8
4	0,9999	22,49	12,66	1,6	3,60	47,2	48,2	102,2
5	0,9999	22,49	13,33	2,0	3,33	47,2	48,5	100,6
6	0,9999	22,49	13,85	2,4	3,06	47,2	48,9	99,0
7	0,9999	22,49	14,28	2,8	2,80	47,2	49,2	97,5
8	0,9999	22,49	14,62	3,2	2,55	47,2	49,5	96,1
9	0,9999	22,49	14,91	3,6	2,30	47,2	49,8	94,8
10	0,9999	22,49	15,16	4,0	2,06	47,2	50,0	93,5

Tabela B.9- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 1, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk

Divisão	ε	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _g [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,68	39,9	46,9	109,4
1	0,9998	22,49	4,21	0,4	1,77	47,3	50,4	93,5
2	0,9999	22,49	7,58	0,8	0,00	64,2	52,5	82,3
3	0,9999	22,49	10,48	1,2	0,00	64,4	52,5	78,8
4	0,9999	22,49	12,91	1,6	0,00	64,4	52,5	76,1
5	0,9999	22,49	14,88	2,0	0,00	64,4	52,5	73,9
6	0,9999	22,49	16,41	2,4	0,00	64,4	52,5	72,2
7	0,9999	22,49	17,53	2,8	0,00	64,4	52,5	70,9
8	0,9999	22,49	18,30	3,2	0,00	64,4	52,5	69,9
9	0,9999	22,49	18,78	3,6	0,00	64,4	52,5	69,1
10	0,9999	22,49	19,05	4,0	0,00	64,4	52,5	68,4

Tabela B.10- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 2, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Bandrowski e Kaczmarzyk

Divisão	ε	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _g [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,68	39,9	46,9	109,4
1	0,9999	22,49	8,39	0,4	0,69	47,3	51,7	88,4
2	0,9999	22,49	10,50	0,8	0,00	64,5	52,5	81,3
3	0,9999	22,49	11,77	1,2	0,00	64,5	52,5	78,0
4	0,9999	22,49	12,65	1,6	0,00	64,5	52,5	75,3
5	0,9999	22,49	13,32	2,0	0,00	64,5	52,5	73,1
6	0,9999	22,49	13,84	2,4	0,00	64,5	52,5	71,3
7	0,9999	22,49	14,26	2,8	0,00	64,5	52,5	69,9
8	0,9999	22,49	14,61	3,2	0,00	64,5	52,5	68,8
9	0,9999	22,49	14,90	3,6	0,00	64,5	52,5	68,9
10	0,9999	22,49	15,14	4,0	0,00	64,5	52,5	67,2

Tabela B.11- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 1, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Valentin

Divisão	ε	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _z [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,68	39,9	46,9	109,4
1	0,9998	22,49	4,19	0,4	4,04	47,2	47,7	105,0
2	0,9999	22,49	7,53	0,8	3,23	47,3	48,7	100,6
3	0,9999	22,49	10,39	1,2	2,54	47,3	49,5	97,0
4	0,9999	22,49	12,80	1,6	1,94	47,3	50,2	93,9
5	0,9999	22,49	14,76	2,0	1,38	47,3	50,9	91,0
6	0,9999	22,49	16,30	2,4	0,85	47,3	51,5	88,4
7	0,9999	22,49	17,45	2,8	0,35	47,3	52,1	85,9
8	0,9999	22,49	18,23	3,2	0,00	49,3	52,5	84,0
9	0,9999	22,49	18,73	3,6	0,00	55,8	52,5	83,3
10	0,9999	22,49	19,02	4,0	0,00	59,6	52,5	82,6

Tabela B.12- Resultados da simulação do experimento 16 obtidos por ROCHA (1988), utilizando o modelo 2, analogia de Chilton-Colburn e correlação de Valentin

Divisão	ε	u [m/s]	v [m/s]	l acumulado [m]	X x10 ² [kg/kg]	t _m [°C]	Y [g/kg]	t _z [°C]
-	0,9980	22,53	0,42	-	4,68	39,9	46,9	109,4
1	0,9999	22,49	8,41	0,4	4,12	47,1	47,6	105,4
2	0,9999	22,49	10,52	0,8	3,44	47,3	48,4	101,7
3	0,9999	22,49	11,81	1,2	2,78	47,3	49,2	98,2
4	0,9999	22,49	12,70	1,6	2,11	47,3	50,0	94,7
5	0,9999	22,49	13,38	2,0	1,46	47,3	50,8	91,4
6	0,9999	22,49	13,91	2,4	0,82	47,3	51,5	88,2
7	0,9999	22,49	14,34	2,8	0,20	47,3	52,3	85,2
8	0,9999	22,49	14,70	3,2	0,00	54,3	52,5	83,5
9	0,9999	22,49	15,00	3,6	0,00	60,2	52,5	82,6
10	0,9999	22,49	15,25	4,0	0,00	62,8	52,5	81,9