

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA POR Francisco Fernandes  
Filho \_\_\_\_\_ E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 22.03.91

Carlos J. M.  
ORIENTADOR

COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR  
GÁS-SÓLIDO EM LEITO FIXO DE PARTÍCULAS

66/91

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS

Dissertação Apresentada à  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
Como Requisito Parcial à obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia Mecânica

COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR  
GÁS-SÓLIDO EM LEITO FIXO DE PARTÍCULAS

Autor : Francisco Fernandes Filho  
Orientador : Carlos Alberto Gasparetto

março de 1991

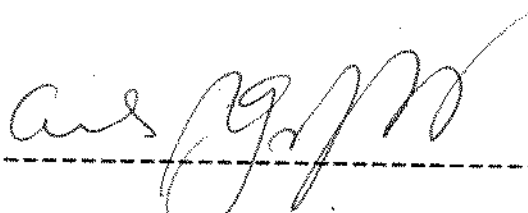
UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS

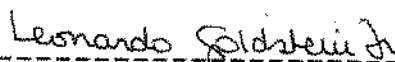
A dissertação " Coeficiente de Transferência de Calor Gás-Sólido em Leito Fixo de Partículas", elaborada por Francisco Fernandes Filho e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito parcial a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 22 de Março de 1991.

Banca Examinadora



Carlos Alberto Gasperetto



Leonardo Goldstein Junior



Jose Teixeira Freire

A Marisa, Rodrigo e Mayra, pelo estímulo  
à realização deste trabalho e pela  
compreensão e paciência dedicadas nos  
momentos em que estive ausente.

## Agradecimentos

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho, e de modo especial :

Ao Professor Doutor Carlos Alberto Gasparetto, orientador deste trabalho, pela orientação, crítica e apoio transmitidos durante a execução do trabalho.

A Petróleo Brasileiro S.A. através da Superintendência da Industrialização do Xisto nas pessoas dos engenheiros Cesar Tadeu da Silva Barlem, Kuniyuki Terabe e Rubens Eduardo Medeiros Novicki pela oportunidade que me deram de realizar este estudo.

## ÍNDICE

	página
Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Índice	iii
Índice de figuras	v
Nomenclatura	vi
Abstract	x
Sumário	xii
CAPÍTULO 1	01
1. INTRODUÇÃO	02
CAPÍTULO 2	05
2. REVISÃO DA LITERATURA	06
2.1 Transferência de calor gás-partícula em leito fixo	06
2.2 Modelos matemáticos e técnicas para a determinação do coeficiente de transferência de calor	10
2.2.1 Regime estacionário	10
2.2.2 Regime transiente	12
2.3 Principais correlações	27
2.4 Hidrodinâmica do leito fixo	29
CAPÍTULO 3	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 Instalação experimental	36
3.2 Caracterização das partículas e dos leitos	44
3.3 Ensaios de queda de pressão	46
3.4 Ensaios de troca térmica	47

	página
3.5 Cálculo do coeficiente de transferência de calor gás-partícula	51
3.6 Avaliação dos erros	54
 CAPÍTULO 4	 56
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	57
4.1 Análise do comportamento da queda de pressão	57
4.1.1 Queda de pressão nos leitos de esferas de cerâmica	58
4.1.2 Queda de pressão nos leitos de partículas de xisto	61
4.2 Análise do comportamento da troca térmica	67
4.2.1 Troca térmica nos leitos de esferas de cerâmica	68
4.2.2 Troca térmica nos leitos de partículas de xisto	69
 CAPÍTULO 5	 77
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	78
5.1 Conclusões	78
5.2 Sugestões	81
 APÊNDICE A - Resolução numérica do modelo matemático formulado por Schumann	 83
APÊNDICE B - Listagem do programa de cálculo dos coeficientes de transferência de calor gás-partícula	90
APÊNDICE C - Tabelas dos resultados dos ensaios de queda de pressão	100
APÊNDICE D - Tabelas dos resultados dos ensaios de troca térmica	112
APÊNDICE E - Bibliografia	122

## ÍNDICE DE FIGURAS

número	descrição	página
3.1	Esquema da unidade experimental de troca térmica gás-sólido	38
3.2	Corte longitudinal típico dos vasos de teste	40
3.3	Localização dos termopares e tomadas de pressão no leito de partículas	42
3.4	Curvas de temperatura - Leito de esferas - teste TCD8	50
3.5	Curvas de temperatura - Leito de xisto - teste TXF9	50
4.1	Ensaio de queda de pressão - Leito de esferas de cerâmica	60
4.2	Correlações de queda de pressão - Leitos de esferas	62
4.3	Ensaio de queda de pressão - Leitos de xisto	64
4.4	Ensaio de queda de pressão - Leitos de xisto	65
4.5	Troca térmica - Leitos de esferas de cerâmica	70
4.6	Troca térmica - leitos de xisto	73
4.7	Troca térmica - Comparação entre correlações	75



## NOMENCLATURA

- a - área superficial das partículas por unidade de volume do leito,  $m^2/m^3$
- A - constante específica dos leitos de partículas, função do formato da partícula e da rugosidade superficial (equação 2.1.1), ou parâmetro da equação de Ergun (equação 2.4.2), adimensional
- B - parâmetro da equação de Ergun (equação 2.4.2), adimensional
- Bi - número de Biot definido por  $Bi = hd_p / 2k_p$ , adimensional
- c - calor específico à pressão constante, J/Kg K
- $d\#$  - diâmetro da partícula expresso pela média aritmética das aberturas das duas peneiras que definem a faixa granulométrica das partículas de formato irregular, mm
- $d_p$  - diâmetro das partículas de formato esférico ou das partículas irregulares corrigido em função da esfericidade, mm
- D - diâmetro do leito de partículas, m
- Es - erro de ajuste entre as curvas de temperatura experimental e calculada para a fase fluida (equação 3.5.1), %

- $f_v$  - fator de fricção que representa a relação entre a queda de pressão e a perda de energia viscosa (equação 2.4.2), adimensional
- $f_k$  - fator de fricção que representa a relação entre a queda de pressão total e a perda de energia cinética (equação 2.4.3), adimensional
- $G$  - vazão mássica,  $\text{Kg/hm}^2$
- $h$  - coeficiente de transferência de calor gás-partícula,  $\text{W/m}^2\text{K}$
- $h_v$  - coeficiente de transferência de calor volumétrico gás-partícula (equação 2.2.12),  $\text{cal/hcm}^3\text{K}$
- $J_k$  - coeficiente de Colburn definido por  $J_k = hPr^{2/3}/Gc_p$ , (equação 2.2.13), adimensional
- $k$  - condutividade térmica,  $\text{W/mk}$
- $L$  - altura do leito de partículas, m
- $M'$  - constante empírica função da porosidade do leito, adimensional
- $Nu$  - número de Nusselt definido por  $Nu = hd_p/k_p$ , adimensional
- $p$  - pressão do fluido,  $\text{Kgf/cm}^2$  abs

- $\Delta P$  - queda de pressão, Kgf/cm<sup>2</sup> ou cm c.a.
- Pr - número de Prandtl definido por  $Pr = \mu c_p / k$ , adimensional
- r - posição radial no leito ou na partícula, mm
- R - raio da partícula, mm
- Re - número de Reynolds de partícula definido por  $Re = d_p U \rho_f / \mu$ , adimensional
- St - número de Stanton definido por  $St = G d_p / \mu$ , adimensional
- t - temperatura, K
- T - temperatura numa posição específica, K
- U - velocidade da fase fluida, m/s
- U<sub>m</sub> - velocidade superficial da fase fluida baseada na seção transversal do leito vazio, m/s
- U<sub>H</sub> - parâmetro resultante da relação entre a capacitância térmica do sólido e a da fase fluida, definido por  $U_H = \rho_s c_s (1 - \epsilon) / \rho_f c_f$ , adimensional
- x - posição axial no leito, m

- Y - parâmetro relativo ao tempo de aquecimento do leite, proposto por Schumann, e definido como  $Y=haL/c_p G$ , adimensional
- Z - parâmetro relativo a altura do leite, proposto por Schumann, e definido como  $Z=ha\theta/c_p \rho_p (1-\epsilon)$ , adimensional
- $\alpha$  - símbolo de proporcionalidade (adimensional) ou difusividade térmica definida por  $\alpha_f=k_p/\epsilon c_p \rho_p$ ,  $cm^2/sec$
- $\epsilon$  - porosidade do leite, adimensional
- $\theta$  - variável tempo, seg
- $\mu$  - viscosidade dinâmica do fluido, cP
- $\rho$  - massa específica,  $kg/m^3$
- $\phi$  - esfericidade, adimensional

subscritos

- ax - axial
- c - convectivo ou calculado
- e - global ou experimental
- ef - efetiva para a fase fluida
- es - efetiva para a fase sólida
- f - fase fluida
- ps - na superfície da partícula

m - modificado

s - fase solida

x

## Abstract

The work presents a study on heat transfer between gas and solid phases for fixed beds in the absence of mass transfer and chemical reactions. Mathematical models presented in the literature were analyzed concerning to the assumptions made on axial dispersion in the fluid phase and intraparticle thermal conductivity. Heat transfer coefficients and their dependency on flow conditions, particles and packed bed characteristics were experimentally determined through the solution of the mathematical model proposed by Schumann (1929). Pressure drop behavior for the packed beds used for the heat transfer study was also included.

## Sumário

O trabalho apresenta um estudo sobre a transferência de calor gás-sólido em leito fixo, em condições onde não ocorrem transferência de massa e reações químicas, com a determinação experimental dos coeficientes de troca térmica e sua dependência com os parâmetros que caracterizam as partículas, o leito e o regime de escoamento. Foram analisados os modelos matemáticos propostos na literatura levando em consideração a influência das duas fases (fluida e sólida) e as hipóteses formuladas quanto ao tipo do escoamento e o efeito da condução de calor intra-partícula, tendo-se optado pelo modelo formulado por Schumann (1929). Adicionalmente ao estudo da troca térmica foram obtidos e analisados os dados relativos à hidrodinâmica dos leitos utilizados.

## **CAPITULO 1**

### **INTRODUÇÃO**



## 1. INTRODUÇÃO

Processos industriais envolvendo operações de transferência de calor e massa entre um fluido e um sólido particulado, com ou sem reações químicas, possuem ampla aplicação nos mais variados ramos da indústria.

Alguns desses processos com características bastante especiais são aqueles encontrados nas áreas de redução de minérios, gaseificação de carvão e biomassa, fátortagem de xisto e regeneração de calor. A sua modelagem matemática pode apresentar um alto grau de complexidade em função do tipo de leito de partículas e das diferentes transformações físicas e químicas que o fluido e as partículas sofrem. É comum ocorrerem diferentes etapas de um mesmo processo dentro de um único reator, como por exemplo secagem, aquecimento, pirólise, fusão, combustão, etc., além da utilização de uma ampla faixa de diâmetro de partículas quase sempre de formato irregular, constituídas por materiais de baixa condutividade térmica.

Dentro deste enfoque a transferência de calor gás-partícula pode depender, além dos parâmetros que caracterizam o leito e o escoamento, de outros mecanismos tais como: transferência de calor e massa intra-partícula, reações químicas intra-partícula, transferência de massa partícula-gás, mudança de fase dos produtos e reagentes, etc.

No caso específico da retortagem de xisto em atmosfera inerte de ar, área para a qual este trabalho está direcionado, a modelagem do processo de retortagem em leito fixo ou móvel pode ser significativamente simplificada, numa primeira abordagem, considerando que a quantidade de calor envolvida nas reações químicas é pequena (menor que 10%) se comparada ao calor total necessário para o aquecimento das partículas. Assim, a transferência de calor gás-partícula é um dos parâmetros de modelagem mais importante a ser estudado.

O objetivo deste trabalho é justamente o estudo da transferência de calor gás-sólido em leito fixo, em condições onde não ocorram transferência de massa e reações químicas, através da determinação experimental dos coeficientes de troca térmica e sua dependência com os parâmetros que caracterizam as partículas, o leito e o regime de escoamento.

Foram analisados os modelos matemáticos apresentados na literatura para a troca de calor no leito fixo, adotando-se a modelagem proposta por Schumann (1929), que se baseia no balanço de energia para as fases fluida e sólida, no regime transiente. As equações (2.2.3) e (2.2.4.) foram resolvidas numericamente pelo método das diferenças finitas visando a determinação do coeficiente de troca térmica a partir dos dados experimentais de temperatura e vazão.

Visando eliminar as principais restrições impostas pelo modelo de Schumann : escoamento do fluido tipo pistão e condutividade térmica infinita para as partículas do leito, foram analisadas correções propostas por diversos autores, dentre elas

Kitaev et alii (1967), Bradshaw et alii (1970) e Jeffeson (1972).

Além dos dados de troca térmica foram levantados e analisados os dados relativos à hidrodinâmica dos leitos utilizados.

Os ensaios foram realizados com partículas uniformes de formato esférico (esferas de cerâmica) e irregular (partículas de xisto pirobetuminoso), respectivamente com diâmetro de peneira ( $d\phi$ ) entre 4,17 e 13,03 mm, e 2,87 e 31,75 mm. Para a determinação do coeficiente de troca térmica os leitos de partículas eram submetidos a variações de temperatura entre 80 e 130 °C.

Os resultados obtidos a partir do trabalho contribuem para :

1. Compreensão do fenômeno de interação térmica gás-partícula em leitos fixos ou deslizando quase fixos;
2. Comparação dos resultados obtidos com esta metodologia, com aqueles apresentados na literatura;
3. Avaliação da técnica experimental utilizada.

**CAPÍTULO 2**

**REVISÃO DA LITERATURA**

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Transferência de calor gás-partícula em leito fixo

Os primeiros trabalhos voltados para o equacionamento da transferência de calor gás-partícula em leitos fixos foram desenvolvidos no início da década de 30 tendo sido direcionados para a troca térmica aplicada à siderurgia, mais especificamente na área de alto-fornos. Desde então, um grande número de estudos foram realizados visando aprofundar o nível de conhecimento sobre o assunto. Apesar de muita pesquisa alguns aspectos do problema ainda requerem um melhor detalhamento, como demonstra a revisão bibliográfica.

Um estudo tido como pioneiro foi desenvolvido por Furnas (1932) que, baseando-se no equacionamento matemático desenvolvido por Schumann (1929) para um leito fixo em regime transiente, realizou uma extensa investigação sobre alguns dos principais parâmetros que influenciam o coeficiente de transferência de calor volumétrico gás-partícula ( $h_a$ ) tais como: velocidade dos gases ( $U$ ), temperatura dos gases ( $T$ ), porosidade do leito ( $\epsilon$ ) e diâmetro de partícula ( $d_p$ ). Os experimentos foram executados utilizando-se leitos de esferas de aço e diversos materiais tais como: minério de ferro, calcário, carvão mineral e coque. A técnica utilizada para a obtenção do coeficiente de transferência de calor consistia na determinação da curva de temperatura dos gases na saída do leito durante a fase de aquecimento ou resfriamento do mesmo, para uma determinada vazão de gases, após se provocar e manter uma súbita variação (tipo função degrau) da

temperatura na entrada do leito. Os coeficientes de troca ( $h_a$ ) foram determinados a partir dos parâmetros dimensionais Z e Y, respectivamente tempo de aquecimento e altura do leito, obtidos através da técnica de sobreposição gráfica visando o ajuste da curva de temperatura obtida experimentalmente com as curvas teóricas calculadas a partir da solução de Schumann para uma ampla faixa de valores de  $h_a$ .

Os ensaios foram executados para temperaturas de até 800 °C procurando englobar além da contribuição da convecção, também o efeito da radiação sobre o coeficiente de transferência determinado. Os resultados encontrados permitiram obter a seguinte expressão :

$$h_a = \frac{A U^{0.7} \gamma^{0.3} 10^{1.205E - 0.002E^2}}{d_p^{0.7}} \quad (2.1.1)$$

onde  $h_a$  - coeficiente de transferência de calor volumétrico

A - constante específica para cada material, função do formato da partícula e da rugosidade superficial

Com base na mesma técnica Lof e Hawley (1948) realizaram um trabalho semelhante, porém com leitos constituídos de seixos (fragmentos de rocha). As curvas de aquecimento dos leitos foram obtidas para temperaturas de até 120 °C e os coeficientes de troca determinados através da mesma técnica de sobreposição gráfica das curvas de temperatura utilizada por Furnas (1932). Os resultados obtidos foram analisados visando explicitar a dependência do coeficiente volumétrico de transferência de

calor ( $h_a$ ) com relação à variação da vazão mássica dos gases ( $G$ ) e à variação do diâmetro de partícula. Uma vez determinada a influência de cada um desses parâmetros, os autores apresentaram uma correlação do tipo :

$$h_a \propto \left( \frac{G}{d_p} \right)^{0,7} \quad (2.1.2)$$

a qual, comparada com a correlação de Furnas, mostra concordância quanto ao expoente do termo de velocidade dos gases e discordância quanto ao expoente relativo à influência do diâmetro da partícula. A diferença observada foi atribuída às maneiras diferentes de se expressar este último parâmetro nos dois trabalhos. Enquanto Lof e Hawley (1948) optaram por expressá-lo com base no diâmetro equivalente ao de esfera de igual volume ao da partícula, portanto já aplicando uma correção para o formato da partícula, no trabalho de Furnas esta correção provavelmente estava incluída na constante  $A$  da equação (2.1.1.).

Embora questionados quanto a diversos aspectos não considerados na análise do problema, estes dois primeiros estudos contribuíram no sentido de apresentar uma abordagem simplificada para o problema da transferência de calor gás-partícula. Certamente a maior crítica se deve à consideração apenas dos mecanismos de transferência de calor externos às partículas, convecção e radiação, desprezando a contribuição dos mecanismos de condução entre e intra-partícula. Isto resultou como consequência do modelo matemático adotado (modelo de Schumann) para a análise dos dados experimentais, o qual supõe uma condutividade térmica infinita para a partícula, tornando sem efeito portanto a contribuição dos mecanismos de condução entre e

Intra-partícula.

Em virtude da constatação da necessidade de utilizar uma abordagem mais completa para o estudo da transferência de calor gás-partícula num leito fixo, três principais linhas de atuação passaram a ser adotadas nos trabalhos seguintes :

Desenvolvimento de técnicas experimentais visando reduzir o número de fatores interferentes na troca térmica nos leitos estudados:

Adoção de um modelo matemático simplificado, porém, aplicando correções posteriores visando minimizar as simplificações efetuadas:

A elaboração de modelos matemáticos mais complexos, buscando explicitar todos os mecanismos de transferência de calor envolvidos.

Wakao et alii [1979] e Freire e Sartori [1986] apresentaram uma ampla compilação dos principais modelos e técnicas utilizados na determinação do coeficiente de troca térmica tanto para o regime estacionário quanto para o regime transiente.

Como este é um trabalho que visa o estudo do coeficiente de transferência de calor gás-partícula, são discutidos a seguir os trabalhos que abordam os modelos das duas fases, isto é fase fluida e fase sólida.



## 2.2 Modelos Matemáticos e Técnicas para a determinação do Coeficiente de transferência de calor

### 2.2.1 Regime Estacionário

A elaboração de um modelo matemático para a determinação do coeficiente de transferência de calor gás-partícula para o regime estacionário pressupõe que tanto a fase sólida (partículas) quanto a fase fluida apresentem temperaturas constantes no tempo e que a temperatura da fase fluida varie ao longo do leito. Para poder simplificar a modelagem é desejável ainda que a temperatura da fase sólida seja uniforme para todo o leito. Estas condições são satisfeitas para os casos onde ocorre transferência de calor e massa apenas na superfície das partículas, seja através de experimentos de secagem de partículas porosas ou então em leitos onde se promove uma reação química de superfície, podendo ser citado como exemplo a reação de decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio sobre esferas metálicas, conforme sugerida por Satterfield e Resnick (1954). A equação do balanço de energia para a fase fluida relativo a um elemento de volume do leito, desprezando o termo da dispersão axial, fica :

$$U \frac{dt_f}{dx} + \frac{h_a}{E c_f P_f} (t_f - T_{ps}) = 0 \quad (2.2.1)$$

onde :  $t_f$  - temperatura do fluido

$x$  - posição axial

$c_f$  - calor específico do fluido

$\rho_s$  - massa específica do fluido

$T_{ps}$  - temperatura da partícula na superfície

Vários trabalhos foram publicados dentro deste enfoque, podendo ser citados McConnachie e Thodos (1963), Pathangey e Kovenkiloglu (1989) dentre outros, onde se determinava o coeficiente de troca (ha) a partir de medições de temperatura da fase fluida na entrada e saída do leito e temperatura da superfície da partícula. As quantidades de calor envolvidas nos processos de secagem e de reação química são determinadas a partir da massa de água removida pela secagem e através da taxa de reação observada durante o ensaio.

Os resultados obtidos foram expressos em termos do coeficiente de Colburn ( $J_h$ ), buscando evidenciar uma analogia entre a transferência de calor e massa. Dentre as várias correlações obtidas, aquela apresentada por De Acetis e Thodos (1960) sob a forma da equação (2.2.2) a seguir, pode ser tomada como a mais abrangente em termos da variação da faixa de porosidade e número de Reynolds. Os coeficientes foram levantados a partir de experimentos de secagem em leitos de esferas de catalisador. Esta correlação inclui além dos dados dos autores, os coeficientes determinados por outros pesquisadores tais como Gamson et alii (1943) e Baumeister e Bennett (1958).

$$J_h = \frac{1.10}{Re^{0.44} - 1.5} \quad (2.2.2)$$

O caso de regime estacionário também foi estudado em arranjos experimentais simulando reações químicas ou secagem, pelo aquecimento das partículas com passagem de corrente

elétrica ou por radiação de microondas. Esses trabalhos foram desenvolvidos respectivamente por Glaser e Thodos [1958] e Balakrishnan e Pei [1974], sendo os coeficientes de troca determinados com base no perfil axial de temperatura da fase fluida, admitindo-se uniforme a temperatura da fase sólida. Esta suposição entretanto foi criticada por Wakao et alii [1978] com base nos dados levantados por Eichhorn e White [1952] e Baumeister e Bennett [1958], os quais observaram diferenças significativas de temperaturas entre as partículas da base e topo do leito, invalidando portanto a hipótese de uniformidade.

Uma particularidade de todos os trabalhos citados acima é a busca e emprego de técnicas que visavam determinar coeficientes de transferência de calor gás-partícula isolando as demais contribuições que não aquelas relativas aos mecanismos de convecção e radiação.

Dificuldades inerentes aos métodos citados e condições muito restritivas para os ensaios, limitaram a utilização do problema em regime estacionário a, relativamente, poucos pesquisadores.

### 2.2.2 Regime Transiente

Pelas maiores possibilidades apresentadas, observa-se uma preferência por técnicas que se fundamentam no estudo do problema no regime transiente. São três os modelos matemáticos formulados para a transferência de calor gás-partícula no leito fixo :

- . modelo de Schumann
- . modelo da fase sólida contínua (C-S)
- . modelo concêntrico dispersivo Modificado (D-C)

Estes modelos resultam do equacionamento do balanço de energia relativo a um elemento de volume do leito para as duas fases (sólida e fluida) submetidas a diferentes condições de contorno e hipóteses de comportamento.

#### Modelo de Schumann

As hipóteses formuladas são :

- a. o escoamento do fluido é do tipo pistão, sem dispersão;
- b. as propriedades físicas das duas fases são constantes;
- c. não há condução axial em nenhuma das fases fluida ou sólida;
- d. não há condução radial de calor (leito adiabático);
- e. a contribuição da radiação é desprezível;
- f. não existe gradiente de temperatura na partícula (condutividade térmica infinita).

As equações do balanço de energia para as duas fases são :

$$\frac{\partial t_f}{\partial \theta} = -U \frac{\partial t_f}{\partial x} - \frac{ha}{\epsilon c_f \rho_f} (t_f - t_s) \quad (2.2.3)$$

$$(1 - \epsilon) \frac{\partial t_s}{\partial \theta} = \frac{ha}{c_s \rho_s} (t_f - t_s) \quad (2.2.4)$$

As condições iniciais e de contorno estão assim definidas :

$$\theta = 0 \quad t_f = t_s = \theta$$

$$x = 0 \quad t_f = T_0$$

- onde :
- $T_0$  - temperatura imposta ao fluido na entrada do leito
  - $t_f$  - temperatura do fluido
  - $t_s$  - temperatura do sólido
  - $\theta$  - variável tempo
  - $x$  - posição axial

#### Modelo da Fase Sólida Contínua (G-S)

As hipóteses formuladas são:

- a. o escoamento do fluido é do tipo pistão, porém com dispersão axial;
- b. as propriedades físicas das duas fases são constantes;
- c. é considerada a condução axial através da fase sólida;
- d. não há condução radial de calor (leito adiabático);
- e. a contribuição da radiação é desprezível;
- f. não existe gradiente de temperatura na partícula (condutividade térmica infinita).

As equações do balanço de energia para as duas fases são :

$$\frac{\partial t_f}{\partial \theta} = \frac{k_{mf}}{\varepsilon c_f \rho_f} \frac{\partial^2 t_f}{\partial x^2} - U \frac{\partial t_f}{\partial x} - \frac{h_a}{\varepsilon c_f \rho_f} (t_f - t_s) \quad (2.2.5)$$

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial t_s}{\partial \theta} = \frac{k_{ms}}{c_s \rho_s} \frac{\partial^2 t_s}{\partial x^2} + \frac{h_a}{c_s \rho_s} (t_f - t_s) \quad (2.2.6)$$

onde :

$k_{mf}$  - condutividade térmica efetiva da fase fluida

$k_{ms}$  - condutividade térmica efetiva da fase sólida

ambas referenciadas à secção transversal do leito.

As condições iniciais e de contorno para este modelo foram apresentadas e discutidas por Kaguel et alii [1977] e Wakao et alii [1977].

#### Modelo Concentrico Dispersivo Modificado (Q-G)

As hipóteses formuladas são:

- o escoamento do fluido é do tipo pistão com dispersão axial, sendo computados no coeficiente de dispersão a contribuição da condução na fase sólida e também a radiação na ausência de escoamento da fase fluida (leito estagnado);
- as propriedades físicas das duas fases são constantes;
- não há condução radial de calor (leito adiabático);
- admite-se um perfil concêntrico de temperatura na partícula (condutividade térmica finita).

As equações do balanço de energia para as duas fases são :

$$\frac{\partial t_f}{\partial \theta} = \alpha_{mf} \frac{\partial^2 t_f}{\partial x^2} - U \frac{\partial t_f}{\partial x} - \frac{h a}{\epsilon c_p \rho_f} (t_f - (t_w)_n) \quad (2.2.7)$$

$$\frac{\partial t_w}{\partial \theta} = \alpha_w \left( \frac{\partial^2 t_w}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t_w}{\partial r} \right) \quad (2.2.8)$$

$$k_w \frac{\partial t_w}{\partial r} = h (t_f - t_w) \quad (2.2.9)$$

$$\alpha_{mf} = \frac{k_w^*}{\epsilon c_p \rho_f} + 0.5 U d_p \quad (2.2.10)$$

As condições iniciais e de contorno estão assim definidas :

$$\begin{aligned} \theta &= 0 & t_r = t_s &= 0 \\ x = 0 & U ( t_r - T_\infty ) = q_{sw} \frac{\partial t_r}{\partial x} \\ x = L & \frac{\partial t_r}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (2.2.11)$$

onde :

- $\alpha_{ax}$  - difusividade térmica axial do fluido
- $\alpha_s$  - difusividade térmica da fase sólida
- $(T_\infty)_s$  - temperatura da partícula em  $r=R$
- $k_s$  - condutividade térmica do sólido
- $R$  - raio da partícula
- $r$  - posição radial
- $k_{s^*}$  - condutividade térmica efetiva para o leito estagnado

Desses três modelos, aquele apresentado por Schumann tem sido um dos mais explorados. Os modelos mais complexos, e que poderiam ser mais completos: tem sido evitados devido às dificuldades matemáticas aliadas ao grande tempo computacional necessário para resolver as equações.

Seese e Thomson (1977), buscando a determinação de coeficientes de troca térmica gás-sólido para partículas de baixa condutividade térmica, concluíram que a maior restrição quanto a utilização do modelo proposto por Schumann (1929) reside na suposição da condutividade térmica infinita para a fase sólida. Para validar a aplicação desse modelo nas condições em que ele foi proposto, Seese e Thomson (1977) decidiram realizar medições do gradiente de temperatura no interior das partículas durante os ensaios de determinação dos coeficientes

de troca térmica. Esses autores empregaram uma técnica experimental semelhante àquela utilizada por Furnas (1932) e Lof e Hawley (1948), a qual consistia em provocar um aquecimento instantâneo no leito de partículas, desviando-se uma corrente de gases de combustão gerados externamente ao leito. Nesses experimentos eram medidos além da temperatura do fluido na entrada e saída do leito, as temperaturas do fluido e de algumas das partículas tanto nas suas superfícies quanto nos seus respectivos centros. Nos ensaios foram utilizadas partículas de xisto com diâmetro de peneira ( $d_p$ ) entre 6 e 27,5 mm e temperaturas na faixa de 20 a 170 °C na corrente do gás de aquecimento.

Os coeficientes de transferência de calor volumétrico ( $ha$ ) foram determinados através da solução das equações (2.2.3 e 2.2.4) pelo método das diferenças finitas ou somente através da equação (2.2.4), uma vez que a diferença de temperatura entre as fases fluida e sólida eram medidas experimentalmente durante os ensaios. Os dados de temperatura obtidos para os leitos de partículas não uniformes se mostraram erráticos, tendo este comportamento sido atribuído à aleatoriedade do escoamento e portanto foram descartados da análise.

Os autores concluíram que a inexistência de gradiente de temperatura nas partículas foi satisfeita apenas quando a taxa de aquecimento do leito era inferior a 10°C/min. Esta conclusão, entretanto, é muito específica para o sistema experimental utilizado não podendo ser estendida para outras situações em virtude da análise dos dados não ter sido apresentada em termos



do número de Biot (Bi). Outros aspectos também discutíveis quanto à medição de temperaturas nas partículas restringem muito a aplicação dos resultados obtidos nesse trabalho. A correlação obtida foi expressa em termos do coeficiente de transferência de calor volumétrico (ha):

$$ha = \frac{0,289 G^{0,84}}{d_p} \quad (2.2.12)$$

onde ha - cal/h cm<sup>3</sup> k

G - kg/h m<sup>2</sup>

d<sub>p</sub> - cm

Comparativamente às correlações apresentadas por Furnas (1932) e Lof e Hawley (1948), respectivamente equações (2.1.1 e 2.1.2), observa-se um razoável desvio nos expoentes dos parâmetros velocidade mássica do fluido e diâmetro da partícula.

Handley e Heggs (1968) trabalharam sobre o modelo de Schumann modificado incorporando um termo relativo ao efeito de condução intra-partícula e resolvendo as equações resultantes pelo método das diferenças finitas.

A análise da contribuição do mecanismo de condução de calor intra-partícula sobre a troca térmica gás-sólido foi realizada avaliando sua influência sobre as curvas de temperatura da fase fluida obtidas na saída do leito. Para isto foram utilizados nos experimentos desenvolvidos por esses autores leitos formados por materiais de diferentes condutividades térmicas tais como: chumbo, aço, bronze, vidro e alumina. Os ensaios foram realizados provocando variações bruscas de temperatura, em torno de 10°C para a fase fluida (ar pressurizado), na entrada do

leito, obtidas através de um resistor elétrico.

Inicialmente os autores realizaram a determinação dos coeficientes de transferência utilizando o modelo de Schumann sem considerar o termo de condução intra-partícula. Os resultados assim obtidos para os leitos formados por partículas metálicas apresentaram excelente correlação demonstrando a adequação do modelo adotado. A equação obtida escrita em termos do coeficiente de Colburn ( $J_h$ ) foi:

$$J_h = \frac{0.255 Re^{-0.533}}{\epsilon} \quad (2.2.13)$$

válida para a faixa do número de Reynolds de partícula entre 100 e 4000.

Para materiais não metálicos tais como vidro e alumina, os autores observaram que tanto os coeficientes de troca térmica quanto as curvas de temperatura apresentavam desvios, evidenciando a influência da condução de calor intra-partícula sobre os resultados obtidos. Os resultados experimentais foram então reanalisados empregando-se o modelo de Schumann modificado sugerido por esses mesmos autores, o qual incorpora o termo de condução intra-partícula. Nessa análise os autores consideraram que o termo relativo a convecção fica determinado a partir dos coeficientes de troca obtidos da correlação levantada para os leitos de partículas metálicas. Os diversos casos analisados permitiram aos autores concluir que a inclusão do termo de condução era necessária e suficiente para ajustar adequadamente as curvas de temperatura experimental e teórica determinada através da solução do modelo modificado. Por extensão eles

propuseram a denominação de pseudo-convectivos aos coeficientes de transferência determinados a partir do modelo de Schumann para os casos onde a condução se torna importante.

Fundamentados nestas constatações eles sugeriram o produto de dois parâmetros, um deles baseado no comprimento adimensional do leite e o outro no inverso do número de Biot, para definir a necessidade de se considerar ou não o efeito da condução intra-partícula sobre as curvas de temperatura e portanto sobre os coeficientes de troca obtidos para estes leites. A adoção desse critério entretanto foi questionada posteriormente por Jefreson (1972), o qual concluiu que a validação daqueles parâmetros na análise realizada pelos autores não pode ser aceita devido às coincidências observadas nos valores escolhidos e que, uma análise mais detalhada teria indicado apenas o número de Biot como critério suficiente para a decisão de se considerar ou não a influência da condução.

Ainda dentro da abordagem de adoção de modelos matemáticos menos complexos podem ser citados os trabalhos de Kitaev et alii (1967), Bradshaw et alii (1970) e Jefreson (1972). Esses autores analisaram a influência das principais hipóteses restritivas impostas pelo modelo de Schumann que são aquelas relativas à contribuição do mecanismo de condução intra-partícula e a idealidade do escoamento e propuseram correções a serem aplicadas sobre os coeficientes de transferência de calor determinados através da solução do modelo de Schumann.

Kitaev et alii [1967] propuseram um termo de correção apenas para o efeito da condução de calor intra-partícula, deduzido a partir de uma analogia entre escoamento e transferência de calor através da variação de nível de um fluido em uma série de vasos verticais e o processo de aquecimento de formas geométricas bem definidas tais como barras retangulares, cilindros e esferas. A correção proposta para os coeficientes de transferência determinados utilizando-se o modelo de Schumann para partículas esféricas é :

$$\frac{1}{h_m} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{5} \frac{R}{k_m} \quad (2.2.14)$$

onde  $h_m$  - coeficiente global ou pseudo convectivo de transferência de calor gás-partícula

$h_c$  - coeficiente convectivo de transferência de calor gás-partícula

$k_m$  - condutividade térmica da partícula

Com base nesta proposição os autores realizaram uma análise crítica dos experimentos e resultados publicados até então, optando por trabalharem os dados levantados por Furnas [1932], visando aplicar-lhes a correção do efeito da condução. Eles apresentaram uma expressão semelhante à equação (2.1.1), modificada apenas em termos da inclusão de uma constante empírica ( $M'$ ), a qual é função da porosidade do leito. Esta nova correlação expressa em termos do coeficiente convectivo de transferência de calor gás-partícula ( $h_c$ ), segundo os autores, mostrou-se bastante satisfatória e tem sido amplamente empregada nos estudos de modelagem e otimização de alto-fornos na União

Soviética.

Bradshaw et alii (1970) analisaram o equacionamento apresentado por Amundson (1956) para diversos casos de transferência de calor gás-partícula, inclusive aqueles para os quais se faziam considerações quanto à influência da condutividade térmica axial turbulenta para a fase fluida e a resistência à transferência de calor na fase sólida. Novamente, visando contornar a dificuldade da solução de modelos mais complexos optaram pelo modelo de Schumann, considerando o coeficiente de transferência determinado através desse modelo como um coeficiente efetivo, o qual inclui além da contribuição da convecção, as parcelas relativas à condução e à dispersão axial. Adotando uma técnica de soma de resistências à transferência de calor eles propuseram a seguinte equação para a obtenção do coeficiente convectivo :

$$\frac{1}{h_c} = \frac{1}{h_c} + \frac{R}{5k_{ax}} + \frac{k_{ax} a}{(U G)^2} \quad (2.2.15)$$

onde  $k_{ax}$  - condutividade térmica axial turbulenta

O coeficiente ( $h_c$ ) foi obtido através da solução numérica do par de equações (2.2.3 e 2.2.4) empregando o método das diferenças finitas. De posse dos coeficientes globais de transferência de calor gás-partícula ( $h_c$ ), da condutividade térmica das partículas ( $k_p$ ) e estimando  $k_{ax}$  a partir de uma correlação obtida em experimentos de secagem, os autores procederam à correção dos coeficientes então determinados. Os experimentos foram realizados com leitos de esferas de aço,

pellets de hematita e esferas de alumina, utilizando ar ou nitrogênio como fluido aquecido. As variações de temperatura na fase fluida foram ajustadas para reproduzir uma função do tipo degrau, tendo alguns experimentos sido realizados a temperaturas de até 800 °C. Os resultados obtidos para os coeficientes convectivos de transferência de calor ( $h_c$ ) foram expressos em termos do coeficiente de Colburn e do número de Reynolds de partícula modificado ( $Re_m$ ) :

$$j_h = 0,495 Re_m^{-0,375} \quad (2.2.16)$$

Esta correlação tem validade para a faixa de  $Re_m$  entre 130 e 800, e é muito semelhante à equação (2.2.13) sugerida por Handley e Heggs (1968) obtida a partir de leitos com partículas metálicas. Cabe destacar ainda que esses autores não observaram diferenças significativas entre os coeficientes determinados nos ensaios realizados nas faixas de temperatura entre 200 e 400°C e 400 e 800°C, embora fosse esperada uma influência maior da radiação sobre os resultados obtidos para a faixa de temperatura mais alta.

Jefreson (1972) fez uma revisão crítica dos trabalhos aqui anteriormente citados, com relação à proposta de correção dos efeitos da dispersão axial do fluido e da condução na fase sólida enquadrando o problema em duas categorias com base no parâmetro  $V_m$  que define a relação entre a capacitância térmica do leito e aquela do fluido. Para valores de  $V_m$  maiores que 100, o modelo de Schumann é capaz de descrever adequadamente o comportamento do leito, e os efeitos da dispersão axial do fluido e da condução na fase sólida podem

ser resumidos num único efeito representado através da maior dispersão da curva de temperatura na saída do leite, conforme também citado por Handley e Higgs (1968). Enquanto que para valores de  $V_{m1}$  menores que 2, mais especificamente quando o fluido é um líquido, o modelo da condutividade equivalente sugerido por Babcock et alii (1956) é o mais recomendado. Jefreson (1972) conclui ainda que, embora a contribuição da dispersão axial do fluido seja variável em função do número de Reynolds e interfira também na curva resposta de temperatura do leite, não é possível isolar a parcela devida ao efeito da dispersão axial, a partir do coeficiente efetivo de transferência de calor ( $h_e$ ). É, portanto, inconveniente propor uma correção com esta finalidade. Desta maneira a equação de correção recomendada resulta naquela proposta por Bradshaw et alii (1970), equação (2.2.15) eliminando-se o termo relativo à dispersão axial. Assim a equação de correção proposta por Jefreson (1972) é idêntica àquela proposta por Kitaev et alii (1967) equação (2.2.14). Jefreson (1972) acrescenta, como conclusão da análise, que o número de Biot (BI) é o único critério necessário para estimar a importância relativa da condução intra-partícula. O limite inferior para o número de Biot acima do qual a contribuição da condução de calor deve ser considerada ainda não está plenamente definido, alguns autores tem sugerido valores acima de 0,10, enquanto outros recomendam valores acima de 0,50.

Visando apolar o tipo de análise realizada, Jefreson (1972) levantou dados experimentais em leites constituídos por esferas de vidro em complementação aos resultados obtidos por Handley e

Hegge (1968). Os resultados foram analisados comparativamente à correlação obtida por Denton (1951) para coeficientes de transferência obtidos a partir de experimentos em regime estacionário, através da técnica da transferência de calor e massa conforme discutido anteriormente no item 2.2.1. A correlação final obtida, expressa em termos do número de Stanton resultou :

$$St = 0,76 Re^{-0,34} \quad (2.2.17)$$

com validade para a faixa de número de Reynolds entre 130 e 1700.

Os trabalhos desenvolvidos por Gunn e De Souza (1974) e Wakao et alii (1979) consideram modelos matemáticos mais complexos. Esses autores desenvolveram esforços no sentido de encontrar uma solução analítica para o modelo Dispersivo Concêntrico modificado (D-C), equações (2.2.7 a 2.2.10), buscando elucidar a influência da dispersão axial para números de Reynolds menores que 100 onde, aparentemente, a não inclusão do termo de dispersão axial estava levando a uma anomalia no comportamento do número de Nusselt.

Gunn e De Souza (1974) estudaram o problema empregando uma técnica que utiliza o acompanhamento da atenuação da amplitude das oscilações de temperatura do tipo senoidal na fase fluida que escoam através do leito de partículas. As oscilações de temperatura eram geradas por um resistor elétrico e os leitos estudados eram constituídos por esferas de vidro e metálicas. Os valores dos coeficientes de dispersão axial, condutividade



térmica intra-partícula e coeficiente de transferência de calor foram determinados utilizando a técnica de regressão não linear, buscando minimizar os desvios entre as relações de amplitude teóricas e obtidas a partir dos dados de temperatura levantados durante os experimentos. Estes estudos permitiram avaliar o comportamento do número de Nusselt para a faixa de Reynolds entre 1 e 300, possibilitando concluir que existe um valor limite para o número de Nusselt abaixo de Reynolds igual a 10, e este valor é muito próximo daquele obtido para a partícula isolada ( $Nu = 2,0$ ). A inclusão do efeito da dispersão axial para a fase fluida é fundamental para a correta avaliação dos coeficientes de transferência de calor nessa faixa de Reynolds.

Wakao (1976) analisou o comportamento da temperatura da fase fluida em leitos constituídos por partículas de vidro ou catalisador, após terem sido submetidos a uma variação de temperatura do tipo impulso. A análise da curva de temperatura na saída do leito permitiu determinar o coeficiente de transferência de calor através da minimização do somatório dos desvios entre a curva de temperatura experimental e calculada obtida a partir da solução analítica.

Em um trabalho posterior, Wakao et alii (1979) estenderam as soluções analíticas desenvolvidas para o modelo D-C modificado para casos onde as variações de temperatura na fase fluida na entrada do leito são oscilações do tipo senoidal ou função degrau. Entretanto estas soluções citadas por Wakao et alii (1979) não puderam ser aplicadas no presente trabalho, devido à dificuldade de acesso às publicações que deram

origem aos artigos citados. Wakao et alii (1978) fizeram uma ampla revisão da literatura buscando selecionar e corrigir, com base no modelo D-C modificado, os coeficientes de transferência de calor gás-partícula determinados através do uso de outros modelos que não contemplavam os efeitos da condução e dispersão axial. Os dados obtidos foram trabalhados obtendo-se uma correlação análoga àquela proposta por esses mesmos autores para a transferência de massa, e com validade para a faixa de Reynolds entre 15 e 8500 :

$$Nu = 2 + 1,1 Pr^{1/4} Re^{0,4} \quad (2.2.18)$$

Pela equação pode-se constatar que mesmo para baixos valores de Reynolds o número de Nusselt tende ao valor limite da partícula isolada. Esta constatação confirma as conclusões de Gunn e De Souza (1974), eliminando a discussão existente na literatura sobre uma possível anomalia no comportamento do número de Nusselt para valores de Re menores que 100. Observa-se também que mesmo procedendo a seleção criteriosa e correção dos dados apresentados por diversos autores, a correlação proposta (equação 2.2.18) é capaz de ajustar os dados corrigidos com desvio médio de  $\pm 50\%$ , conforme pode ser visto na figura 10 do trabalho apresentado por Wakao et alii (1978).

### 2.3 Principais Correlações

Adicionalmente às equações apresentadas no item anterior, dois outros trabalhos que fazem uma extensa revisão das principais correlações sobre a transferência de calor gás-partícula foram apresentados por Barker (1965) e Harker e

Kumar [1985].

Barker [1985] agrupou os diversos resultados em categorias de leitos de arranjo aleatório e ordenado, concluindo que, afóra algumas exceções, existe uma tendência de sobreposição das correlações para o intervalo de número de Reynolds de partícula entre 200 e 4000. Para essas correlações o desvio médio entre as equações é da ordem de  $\pm 50\%$ , as quais expressas em termos do coeficiente de Colburn e do número de Reynolds resultam em equações do tipo :

$$J_h = b_1 Re^{b_2} \quad (2.3.1)$$

com faixas de variação entre 0,10 e 0,90 e -0,10 e -0,40, respectivamente para os coeficientes  $b_1$ ,  $b_2$ . Observa-se uma certa predominância de valores próximo de -0,30 para o coeficiente  $b_2$ . A equação proposta por Denton [1951] pode ser tomada como representativa deste grupo :

$$J_h = 0,57 Re^{-0,30} \quad (2.3.2)$$

válida para a faixa de Reynolds entre 200 e 1000.

Harker e Kumar [1985] apresentaram também uma extensa revisão bibliográfica e, incluindo em sua maioria trabalhos desenvolvidos por pesquisadores russos, constataram que existe uma preferência para se expressar as correlações sob a forma de :

$$Nu = c_1 Re^{c_2} \quad (2.3.3)$$

onde  $c_1$  e  $c_2$  apresentam valores respectivamente entre 0,10 e 1,00 e entre 0,60 e 1,00, dependendo das características das partículas e faixa de Reynolds. Uma equação representativa poderia ser aquela proposta por Chechetkin (1963) a partir dos dados obtidos por Furnas (1932) e Kitaev et alii (1967) :

$$Nu = 0,108 Re^{0,75} \quad (2.3.4)$$

com validade para a faixa de Reynolds entre 130 e 6800.

## 2.4 Hidrodinâmica do Leito Fixo

O estudo da hidrodinâmica do leito fixo além do objetivo mais imediato que é a determinação da energia necessária para se promover o escoamento através do leito, fornece elementos de análise quanto à sua homogeneidade como estrutura sólida. Este último aspecto é importante do ponto de vista da troca térmica uma vez que os coeficientes de transferência de calor determinados são globais e portanto influenciados diretamente pelas características médias do leito e pelas condições de escoamento obtidas para a fase fluida.

O principal elemento deste estudo é o comportamento da queda de pressão da fase fluida em escoamento através do leito e sua variação relativa aos parâmetros que caracterizam o leito (diâmetro, altura e porosidade), as partículas (diâmetro, formato e rugosidade) e as propriedades do fluido e o regime de escoamento estabelecido.

O efeito parede, que interfere na distribuição dos vazios no interior do leito, e as características das partículas tais como formato e rugosidade de sua superfície, são os principais agentes perturbadores do escoamento da fase fluida e com influência direta sobre a queda de pressão. Vários trabalhos tem sido publicados tratando do efeito parede, sendo mais relevantes aqueles de Roblee et alii [1958], Zanon e Freire [1984], Zotin et alii [1985] e Zotin e Freire [1985]. Nesses trabalhos foram realizados estudos minuciosos do comportamento da distribuição da porosidade em leitos constituídos por diversos tipos de partículas, apresentando as seguintes conclusões :

- a. é fundamental a adoção de uma técnica de empacotamento do leito de partículas quando se busca homogeneidade e reprodutibilidade no comportamento. Os arranjos assim obtidos geralmente resultam em leitos densos;
- b. tanto os perfis de porosidade radial quanto axial são do tipo oscilatório amortecido com atenuação variável, dependendo do formato das partículas;
- c. leitos constituídos por partículas de formato irregular apresentam perfis de porosidade estabilizados após 1,0 a 1,5 diâmetros de partícula medidos a partir da parede lateral, enquanto que para partículas esféricas a distância requerida para amortizar a oscilação do perfil de porosidade sobe para 3,0 diâmetros de partícula;
- d. o valor da relação (diâmetro do leito)/(diâmetro

da partícula) =  $D/d_p$  que minimiza o efeito parede ficou estabelecido como sendo : 24 para esferas, 18 para cilindros equiláteros e 8 para fragmentos de rocha de formato irregular.

Com relação à última conclusão, observa-se ainda, com base nos dados levantados pelos autores, que a relação  $D/d_p$  sugerida para partículas esféricas pode ser reduzida para valores próximos a 18 sem comprometimento dos resultados.

Ergun [1952] apresentou um dos trabalhos mais importantes visando correlacionar o comportamento da queda de pressão observada para a fase fluida em função das características e propriedades do leito. Com base em trabalhos anteriores e supondo que um leito de partículas pode ser representado por uma série de canais tortuosos e paralelos, o autor propôs, uma equação que contém dois termos, um representando o efeito do atrito viscoso fluido-partícula e outro representando o efeito inercial de arraste sobre as partículas :

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{\mu U_m (1-E)^2}{d_p^2 \epsilon^3} + 1,75 \frac{\rho_f U_m^2 (1-E)}{d_p \epsilon^3} \quad (2.4.1)$$

onde :

$\Delta p$  = queda de pressão;  $L$  = altura do leito;  $\mu$  = viscosidade do fluido;  $\rho_f$  = massa específica do fluido;  $U_m$  = velocidade superficial do fluido baseada na seção da coluna vazia.

A equação (2.4.1) pode ser também apresentada como a relação entre um fator de atrito e o número de Reynolds de partícula :

$$f_v = \frac{\Delta P d_p^2 \epsilon^3}{L \mu U_m (1-\epsilon)^2} = A + B \frac{Re}{(1-\epsilon)} \quad (2.4.2)$$

$$f_k = \frac{\Delta P d_p \epsilon^3}{L \rho U_m^2 (1-\epsilon)} = A \frac{(1-\epsilon)}{Re} + B \quad (2.4.3)$$

onde :

$f_v$  representa a relação entre a queda de pressão e o termo de energia viscosa, e  $f_k$  representa a relação entre a queda de pressão e o termo de energia cinética. A e B segundo a análise desenvolvida por Ergun [1952] seriam constantes de valores 150 e 1,75, respectivamente.

Trabalhos posteriores ao de Ergun [1952], como os de Handley e Heggs [1988], Hicks [1970] e Macdonald et alii [1979], mostraram que os parâmetros A e B não podem ser considerados como constantes, uma vez que dependem da faixa do número de Reynolds de partícula, da geometria e da rugosidade da partícula. A literatura também cita que a equação (2.4.1) apresenta desvios significativos para valores da relação  $Re/(1-\epsilon)$  acima de 500.

Utilizando as formas das equações (2.4.2 e 2.4.3) para análise de ajuste de dados experimentais os autores acima citados propuseram novos valores para os parâmetros A e B. As correlações sugeridas e suas faixas de validade foram resumidas por Heggs[1983] e são :

$$\text{Hicks} \quad f_{\text{L}} = 6,8 \left( \frac{\text{Re}}{(1-\epsilon)} \right)^{0,8} \quad \text{Re}/(1-\epsilon) \quad 300 - 6500 \quad (2.4.4)$$

$$\text{Handley e Heggs} \quad f_{\text{L}} = 368 + 1,24 \frac{\text{Re}}{(1-\epsilon)} \quad 60 - 7000 \quad (2.4.5)$$

$$\text{Macdonald et alii} \quad f_{\text{L}} = 180 + 1,8 \frac{\text{Re}}{(1-\epsilon)} \quad 0,10 - 10000 \quad (2.4.6)$$

para partículas lisas

$$\text{Macdonald et alii} \quad f_{\text{L}} = 180 + 4,0 \frac{\text{Re}}{(1-\epsilon)} \quad 0,10 - 10000 \quad (2.4.7)$$

para partículas rugosas

Heggs [1983] também alerta para o fato de que embora se proceda à devida correção do diâmetro da partícula, incluindo a influência da esfericidade, aparentemente não é possível obter uma correlação única válida para qualquer tipo de leito. Esta constatação fica bastante evidenciada no trabalho de Handley e Heggs [1968], onde foram obtidos diferentes valores para os parâmetros A e B dependendo do formato e diâmetro das partículas, não se conseguindo encontrar uma forma adequada de correção de tais efeitos sobre o comportamento da queda de pressão.

Macdonald et alii [1979] analisando a influência dessas mesmas variáveis propuseram que apenas o parâmetro B fosse considerado dependente da rugosidade da partícula, à semelhança do que ocorre com o escoamento de fluidos em tubos. Assim, por analogia ao diagrama de Moody seria possível esperar uma única curva para baixos valores da relação  $\text{Re}/(1-\epsilon)$  onde a



Influência dos efeitos inerciais é pouco importante, e uma família de curvas em função de um parâmetro adimensional que caracterize a rugosidade da partícula. Este parâmetro seria definido pela relação entre a rugosidade da partícula e o diâmetro equivalente da mesma. Esta família de curvas estaria situada acima e à direita da curva representativa das partículas hidrodinamicamente lisas. As equações (2.4.6 e 2.4.7) apresentadas anteriormente são resultantes deste tipo de análise.

Macdonald et alii (1979) buscaram ainda uma relação entre o parâmetro  $A$  da equação (2.4.2) e o diâmetro da partícula do leito, sendo bem sucedidos apenas em poucos casos analisados. Devido à limitação de dados experimentais uma análise mais detalhada não pode ser realizada, optando os autores por agrupar os dados segundo duas categorias: uma correspondente às partículas lisas e outra às partículas rugosas onde o parâmetro  $B$  é variável entre 1,8 e 4,0.

**CAPÍTULO 3**

**MATERIAIS E MÉTODOS**

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Instalação Experimental

Analisando os diversos aspectos levantados durante a etapa de revisão da literatura quanto às técnicas e modelos matemáticos utilizados na determinação do coeficiente de transferência de calor gás-partícula, optou-se neste trabalho pelo emprego de uma técnica aplicada ao regime transiente. Os coeficientes de transferência são determinados utilizando-se o modelo matemático desenvolvido por Schumann conforme apresentado no item 2.2.2. do capítulo 2, a partir do acompanhamento da temperatura na fase fluida na saída do leito, tendo o fluido à entrada do leito sido submetido a uma variação de temperatura do tipo degrau.

Basicamente duas alternativas tem sido apresentadas na literatura para produzir a variação de temperatura da fase fluida na entrada do leito. Furnas (1932), Lof e Hawley (1948) e Seese e Thomson (1977) optaram pelo emprego de gases de combustão gerados externamente e depois direcionados para o leito, enquanto que Handley e Heggs (1968), Bradshaw et alii (1970) e Jefreson (1972) idealizaram um sistema onde o aquecimento do fluido, geralmente ar ou nitrogênio, era obtido através de um resistor elétrico de alta potência capaz de produzir e manter a diferença de temperatura desejada.

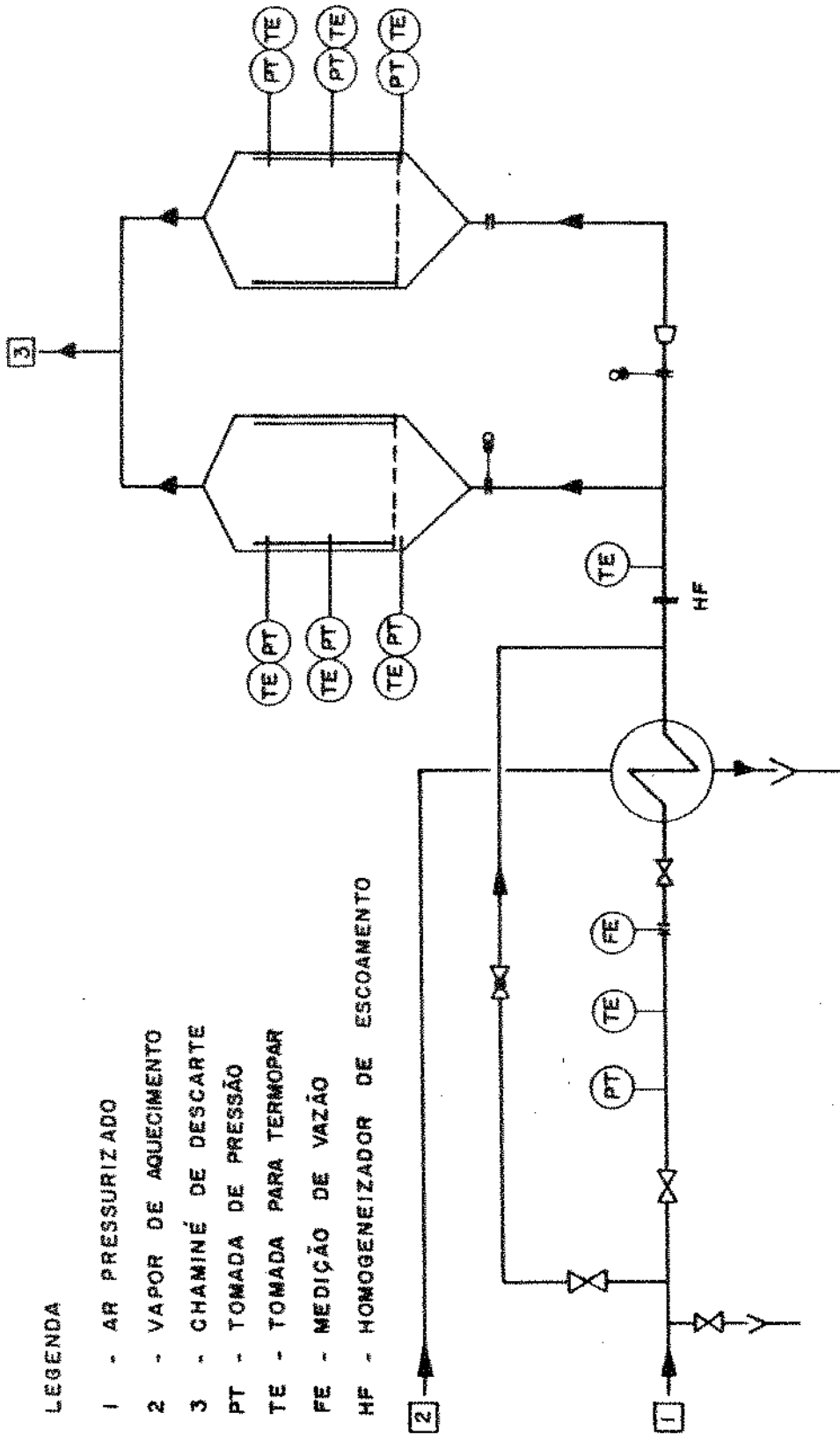
Para a execução deste trabalho adotou-se uma solução diferente daquelas apresentadas acima e que consiste no emprego de uma corrente de ar frio auxiliar utilizada para reduzir a temperatura da corrente de ar principal de aquecimento do leito. Quando se deseja iniciar o teste essa corrente auxiliar é

bloqueada instantaneamente através de uma válvula de fechamento rápido permitindo um súbito aumento da temperatura do ar na entrada do leito. As principais razões que motivaram esta escolha foram o limite superior de temperatura de aquecimento do leito, fixado em 140 °C, reduzindo assim o risco de combustão das partículas, e a disponibilidade de ar pressurizado a 5 kgf/cm<sup>2</sup> e vapor de água à pressão de 27 kgf/cm<sup>2</sup> e temperatura de 230 °C.

Uma vez definido o fluido a ser utilizado e o dispositivo necessário para produzir a variação de temperatura, a instalação experimental ficou então constituída por um trocador de calor a vapor (tipo casco-tubo) para o aquecimento da fase fluida (ar pressurizado), dois vasos dispostos em arranjo paralelo para a acomodação dos leitos de partículas, tubulações e acessórios de interligação e a instrumentação de medição de pressão, vazão e temperatura. A figura 3.1 apresentada a seguir mostra um esquema simplificado da unidade.

A instalação foi projetada e construída com capacidade para até 350 kg/h de ar aquecido a 150 °C, possuindo dois vasos com diâmetro interno de 12,8 e 35,8 cm, altura de 27,0 e 78,0 cm, os quais permitem a acomodação de leitos com diâmetro de 9,8 e 29,8 cm, altura de 10,0 e 30,0 cm, respectivamente. Os vasos possuem isolamento térmico e aquecimento elétrico externo controlado visando minimizar as perdas de calor para o ambiente e tentar assim manter uma condição de parede adiabática para o leito de partículas.

O sistema foi idealizado de tal forma que os leitos são preparados externamente à instalação, em cestos cilíndricos de aço inoxidável, onde a base e o topo se constituem em telas que



LEGENDA

- 1 - AR PRESSURIZADO
- 2 - VAPOR DE AQUECIMENTO
- 3 - CHAMINÉ DE DESCARTE
- PT - TOMADA DE PRESSÃO
- TE - TOMADA PARA TERMOPAR
- FE - MEDIÇÃO DE VAZÃO
- HF - HOMOGENEIZADOR DE ESCOAMENTO

FIGURA 3.1

ESQUEMA DA UNIDADE EXPERIMENTAL DE TROCA  
TÉRMICA GÁS-SÓLIDO

suportam o leito de partículas. Isto permite que as principais características do leito tais como dimensões e porosidade sejam determinadas antes de sua instalação no vaso de teste.

A figura 3.2 apresenta um corte longitudinal de um dos vasos mostrando o esquema de fixação do cesto e as conexões para os termopares e tomadas de pressão.

A decisão pela instalação de dois vasos com diâmetros diferentes foi tomada levando-se em consideração a faixa de diâmetros das partículas que seriam utilizadas nos ensaios, observando as relações diâmetro do leito/diâmetro das partículas ( $D/d_p$ ) recomendados pela literatura. O objetivo foi de minimizar a interferência do efeito parede. Foi considerada como premissa de projeto o levantamento do coeficiente de transferência de calor abrangendo uma faixa do número de Reynolds de partículas entre 100 e 1500, a qual se constitui na região de maior interesse para os processos industriais que utilizam o leito fixo ou móvel.

A definição da faixa de diâmetro das partículas para a realização dos ensaios buscou atender a condição imposta acima e também permitir a investigação do comportamento da troca térmica onde o efeito da condução intra-partícula estivesse presente. Com isto procurou-se reproduzir as condições geralmente encontradas nas aplicações industriais, que são a utilização de partículas com diâmetro relativamente grande e materiais de baixa condutividade térmica. Assim a instalação foi projetada permitindo trabalhar com diâmetro de peneira para partículas esféricas entre 2 e 16 mm e fragmentos de rocha de formato

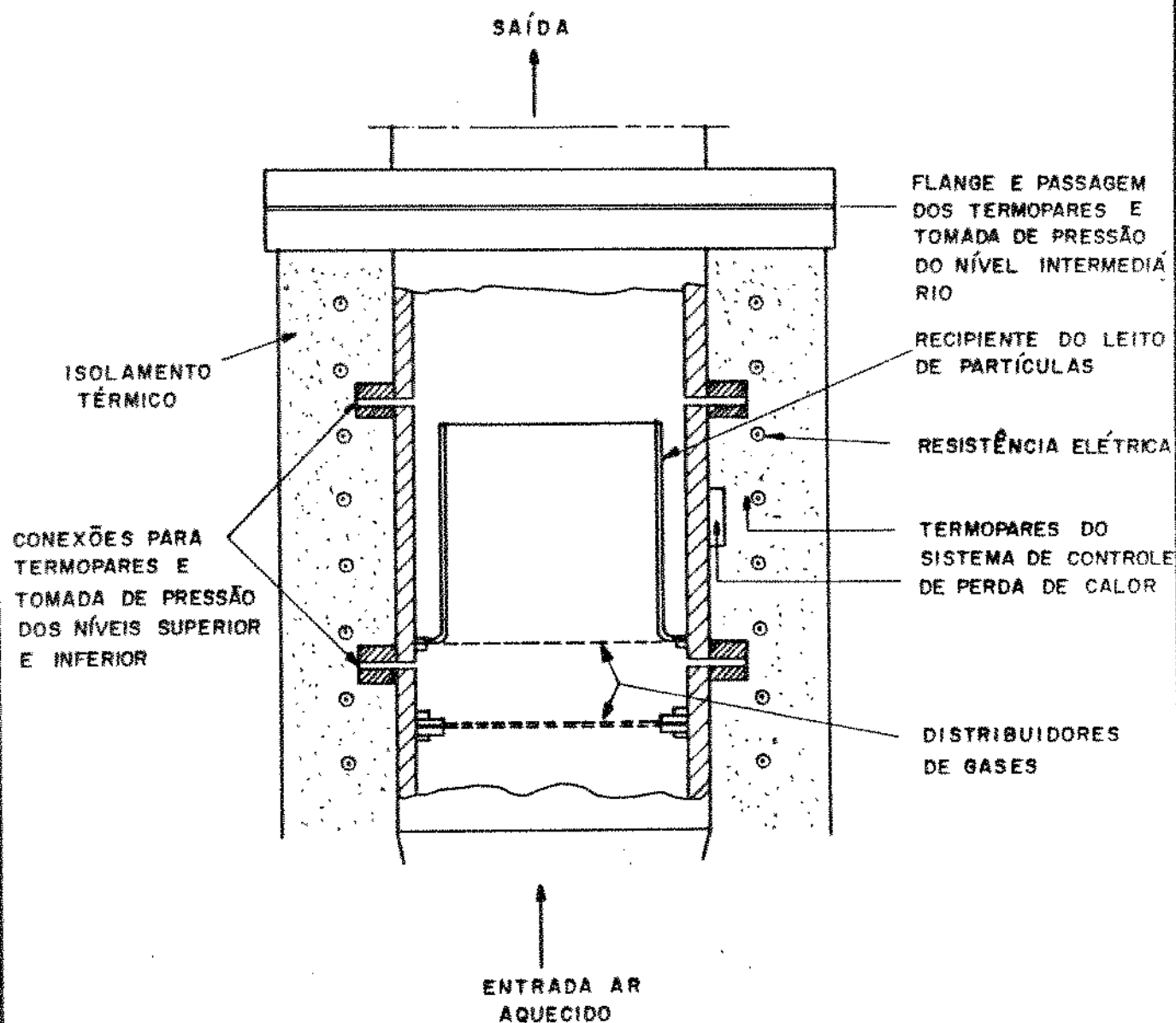


FIGURA 3.2

CORTE LONGITUDINAL TÍPICO  
DOS VASOS DE TESTE

Irregular entre 2 e 37 mm.

Foram previstos três níveis para a medição das variáveis temperatura e pressão em cada um dos vasos. O primeiro nível fica localizado imediatamente abaixo da entrada do leito de partículas, um segundo localizado a meia altura do leito e um terceiro imediatamente acima da saída do leito. Em cada um desses níveis existem quatro termopares e uma tomada de pressão. Os termopares são do tipo ferro-constantan de fabricação da ECIL S.A., com diâmetro de 1,5 mm, isolamento mineral e junta quente isolada e tempo de resposta menor que 1,0 segundo. A localização dos termopares em relação ao leito de partículas está mostrada na figura 3.3. Eles estão assim distribuídos: três situados na periferia distanciados da parede do leito de 25 e 40 mm, para os leitos de 9,8 e 29,8 cm respectivamente, e defasados de 120° entre si. Os termopares do nível intermediário imersos no leito estão protegidos com tela nas extremidades, visando impedir o contato destes com as partículas do leito, possibilitando assim a medição apenas da temperatura da fase fluida. Os termopares do nível intermediário estão fixos ao cesto que contém o leito de partículas, assim a cada substituição do leito eles são desconectados da fiação que os liga a chave seletora e ao milivoltímetro e portanto são removidos juntamente com o cesto. A operação de empacotamento do leito era bastante cuidadosa visando manter os termopares internamente ao leito no mesmo nível e distanciados da parede do cesto conforme mencionado acima. O arranjo escolhido para a distribuição e fixação dos termopares requer ainda que a cada substituição do leito de partículas os termopares do nível superior (saída do leito) sejam afastados e novamente reposicionados após a recolocação do cesto no interior



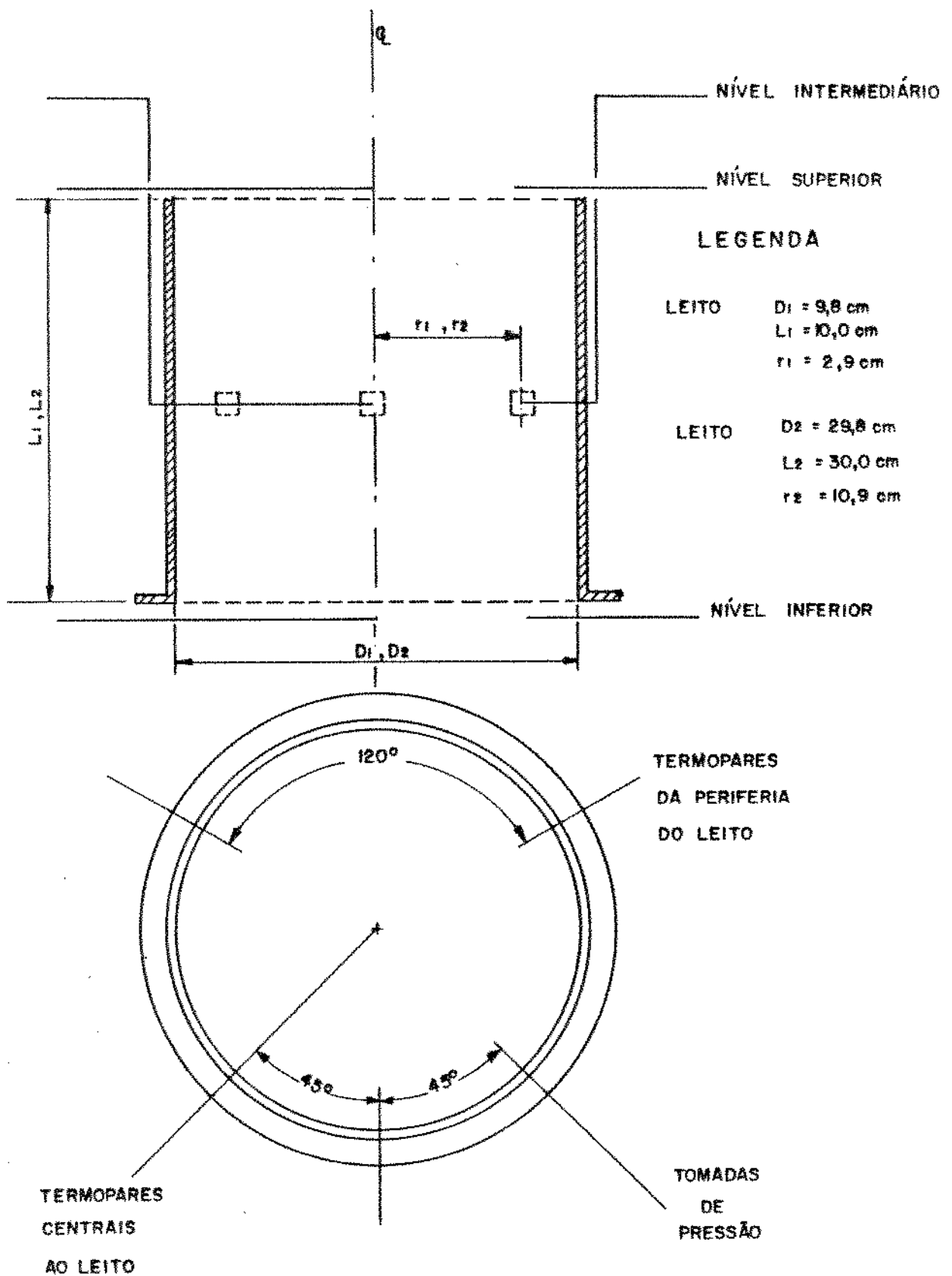


FIGURA 3.3  
 LOCALIZAÇÃO DOS TERMOPARES E TOMADAS DE PRESSÃO  
 NO LEITO DE PARTÍCULAS

do vaso.

As medições de temperatura são feitas através de um milivoltímetro digital de fabricação da Pirotec Instrumentos de Medição Ltda conectado aos diversos pontos de medição e à junta fria, através de chave seletora multiponto de fabricação da Engro Instrumentação e Controle Ltda. As leituras são feitas com resolução de 0,01 milivolts ( 0,2 °C ) sendo então convertidas para valores de temperatura.

A aferição dos termopares para a faixa de temperatura utilizada nos ensaios foi realizada utilizando um banho térmico de óleo mineral, tendo como referência um termômetro de mercúrio. Para a execução da aferição foram escolhidos aleatoriamente 18 termopares já conectados à chave seletora e ao milivoltímetro, colocando-os no banho de óleo mineral aquecido e realizando as leituras correspondentes a quatro valores de temperatura. Os desvios obtidos estão apresentados mais adiante quando abordaremos os erros experimentais envolvidos na determinação do coeficiente de transferência de calor.

Para as medidas de pressões utilizou-se de colunas de água ou mercúrio para valores de queda de pressão entre 0,5 e 100 cm c.a., e 2,0 e 30,0 cm Hg, respectivamente. A vazão de ar é medida com placas de orifício de diferentes diâmetros, conforme as faixas de vazão : de 15 a 120 e de 100 a 400 Kg/h.

Os vasos foram providos de um sistema de aquecimento visando minimizar perdas de calor para o ambiente tornando-os tanto adiabáticos quanto possível. Este sistema é composto de uma

resistência elétrica distribuída ao longo da seção cilíndrica do vaso e comandada através de um controlador de temperatura ligado a dois termopares, um deles localizado imediatamente abaixo da resistência elétrica e outro fixado junto à parede metálica do vaso. O ajuste do diferencial de temperatura a ser controlado era feito com base na perda de calor observada ao longo do leito para cada um dos vasos.

### 3.2. Caracterização das Partículas e dos Leitos.

As partículas utilizadas nos ensaios tanto de queda de pressão quanto de troca térmica foram caracterizadas com relação ao diâmetro médio e formato. Para as esferas de cerâmica, o diâmetro médio foi determinado através da média aritmética das medidas feitas por paquímetro sobre uma amostra de 100 partículas. Os leitos foram compostos buscando uma faixa estreita de diâmetros que não excedeu a 30% do valor médio.

O diâmetro médio das partículas de formato irregular foi determinado com base na média aritmética das aberturas das duas peneiras que definem cada faixa granulométrica ensaiada e neste trabalho denominado de diâmetro de peneira ( $d_p$ ). Não foram estudados leitos constituídos por mistura de diferentes tamanhos das partículas. As faixas granulométricas, expressas em milímetros, utilizados nos ensaios foram: 2,38 a 3,36, 3,36 a 4,76, 4,76 a 6,35, 6,35 a 9,53, 19,05 a 25,40, e 25,40 a 38,10.

O parâmetro utilizado para expressar o formato dos fragmentos de rocha foi a esfericidade. O método utilizado para a sua determinação consistiu na medição das três principais dimensões (altura, largura e comprimento) de um grupo de partículas

representativas do leito. Com base nas medidas e na forma da figura geométrica que mais se assemelha ao tipo da partícula, que para o caso de algumas rochas prevalece a forma prismática, foram então calculadas as dimensões médias e a área superficial da partícula que representava o grupo. De posse destes dados, calculou-se então o volume da partícula e o diâmetro médio equivalente ao da esfera de igual volume, permitindo assim obter também a área superficial da esfera de igual volume. A relação entre a área superficial da esfera de igual volume ao da partícula representativa do leito e a área superficial desta mesma partícula determina a sua esfericidade.

Os leitos foram produzidos utilizando-se uma técnica de empacotamento das partículas que permitia obter o máximo de acomodação possível. Este método foi discutido por Zanon e Freire [1984] e consiste na deposição das partículas por etapa, seguida de vibração obtida através de batidas manuais distribuídas ao redor e ao longo da parede do recipiente que contém o leito.

A determinação da porosidade do leito foi realizada através da técnica de deslocamento dos espaços vazios, utilizando-se água. Visando eliminar fontes de erro durante a medição, devido principalmente à capacidade de absorção da água pelas partículas, antes da formação do leito as partículas eram deixadas imersas em água por um período de duas a seis horas até conseguir sua completa saturação. Após este tempo, elas eram removidas da água e secas superficialmente com um tecido absorvente e em seguida acomodadas no recipiente (cesto) que continha o leito. Após a formação do leito, colocava-se um fundo provisório no cesto e

determinava-se o peso do recipiente mais o leite. Em seguida completava-se o volume com água a uma temperatura conhecida e pesava-se novamente. O volume dos vazios do leite, ocupado pela água era determinado pela diferença de peso e convertido em volume através do valor de densidade da água conforme Perry e Chilton (1973). O volume do recipiente em vazio era também determinado por deslocamento com água e pesagem. A relação entre o volume necessário para completar os vazios entre as partículas do leite e o volume do recipiente em vazio permitia calcular a porosidade do leite.

Após a medição da porosidade o fundo provisório era removido e a água drenada. Fixava-se então uma tela de malha B "mesh" no topo do leite completando-se o empacotamento. O cesto era transportado até um dos vasos de teste, reposicionados os termopares correspondentes ao terceiro nível (saída do leite), completadas as conexões dos termopares e tomadas de pressão correspondentes ao nível intermediário, fechados os flanges e conectada a tubulação de saída do ar. Devido ao fato das partículas estarem totalmente umedecidas, antes de iniciar os ensaios de queda de pressão, procedia-se à secagem do leite pela passagem de ar aquecido. O leite era então deixado esfriar até atingir temperatura ambiente e então se iniciavam os ensaios de queda de pressão.

### 3.3. Ensaios de Queda de Pressão

Estes ensaios tiveram por finalidade explorar o comportamento hidrodinâmico dos leites produzidos e consistiram no levantamento da queda de pressão. As medições de pressão foram realizadas para dois segmentos de leite, utilizando as tomadas de pressão

Instaladas na base, meio e topo do leito, conforme indicadas na figura 3.2. Os ensaios eram realizados com ar à temperatura ambiente variando-se a vazão, buscando uma ampla faixa do número de Reynolds de partícula, dentro da disponibilidade de ar pressurizado da instalação experimental.

#### 3.4. Ensaios de Troca Térmica

A determinação dos coeficientes de transferência de calor gás-partícula foi realizada com base no acompanhamento das curvas de temperatura da fase fluida (ar) na entrada e após um segmento de leito, que para a instalação existente pode ser todo o leito ou apenas sua metade, correspondendo portanto aos termopares instalados na saída do leito ou no nível intermediário. A técnica consiste em, estando o leito submetido a uma vazão de ar e temperatura uniforme e constantes, provocar uma variação de temperatura do tipo degrau no fluxo de ar de entrada do leito e registrar a evolução das temperaturas após um determinado segmento do leito. A função degrau na temperatura de entrada é conseguida através do bloqueio instantâneo de uma corrente de ar frio auxiliar utilizada para condicionar o leito em um nível térmico mais baixo.

A sequência utilizada para execução de um ensaio típico pode ser resumida como segue. Fixa-se uma determinada vazão de ar na entrada do trocador de calor em função do número de Reynolds pretendido para o ensaio e estabiliza-se a temperatura dentro do intervalo de 120 a 140 °C. Regula-se a injeção de um fluxo de ar frio após o trocador de calor, com vazão suficiente para provocar um abaixamento de temperatura no leito de aproximadamente 80 °C.

esperando estabilizar a temperatura do leite que é monitorada pelos termopares do centro e periferia para os três níveis de medição, isto é, base, meio e topo do leite. O teste é então iniciado bloqueando-se, através de válvula de fechamento rápido, o fluxo de ar frio. Inicia-se então as leituras de temperaturas as quais são feitas a cada 5 segundos, acompanhando apenas os dois termopares centrais, um localizado na entrada e o outro na saída do leite, até que a temperatura após o leite se estabilize, quando o ensaio é então encerrado, fazendo-se as leituras complementares de vazão de ar, queda de pressão no leite e das temperaturas correspondentes aos outros termopares distribuídos na periferia do leite visando avaliar sua homogeneidade. Devido ao intervalo de tempo entre cada leitura ser de apenas 5 segundos, os ensaios tem que ser realizados por duas pessoas, uma delas fica encarregada da cronometragem do tempo e seleção do termopar a ser lido, se na entrada ou saída do leite, enquanto a outra pessoa faz a leitura e registro dos valores obtidos no milivoltímetro.

Este esquema de acompanhamento da variação da temperatura com o tempo permite que as leituras sejam obtidas com defasagem de 5 segundos entre si. Por exemplo, na entrada do leite as leituras correspondem aos tempos de 0, 10, 20, etc e na saída do leite à 5, 15, 25, etc segundos. Para se obter a simultaneidade dos valores com relação ao tempo, as leituras na saída do leite são interpoladas obtendo-se os valores correspondentes a 10, 20, etc segundos.

O intervalo de tempo de 5 segundos entre as leituras, bem como a interpolação dos valores na saída do leite, se mostraram

satisfatórios uma vez que o tempo para o acompanhamento e medição das temperaturas durante os ensaios era de 2 a 15 minutos, dependendo do diâmetro dos leitos e da vazão de ar utilizada.

As figuras 3.4 e 3.5 mostram o comportamento típico das curvas de temperatura medidas na entrada e na saída do leito e calculadas na saída do leito a partir do coeficiente de transferência de calor gás-partícula obtido através da solução numérica adotada. Para a representação gráfica foram escolhidos dois testes, sendo um deles o de número TCDB realizado sobre o leito com diâmetro de 9,8 cm e esferas de cerâmica com diâmetro de partícula de 4,17 mm e número de Reynolds de 219, e o outro o teste TXF9 realizado sobre o leito com diâmetro de 29,8 cm com partículas de xisto de 31,75 mm de diâmetro de peneira e número de Reynolds de 963. Pode-se observar que a curva de temperatura na entrada do leito não reproduz exatamente uma função degrau devido à inércia térmica da instalação experimental. Este tipo de comportamento foi relatado também por quase todos os pesquisadores citados no item 3.1. O desvio não trouxe qualquer inconveniente para o cálculo do coeficiente de transferência de calor através do modelo proposto por Schumann, uma vez que os valores de temperatura à entrada do leito, lidos ponto a ponto, foram utilizados diretamente na solução numérica, evitando-se assim ajustar uma função aos valores observados.

O tempo requerido para o levantamento dos dados relativos a um ensaio, incluindo os períodos de ajuste de vazão e estabilização da temperatura do leito, antes de promover sua variação, esteve entre 30 e 60 minutos. Em geral este tempo era



### CURVAS DE TEMPERATURA

LEITO DE ESFERAS - TESTE TCD6

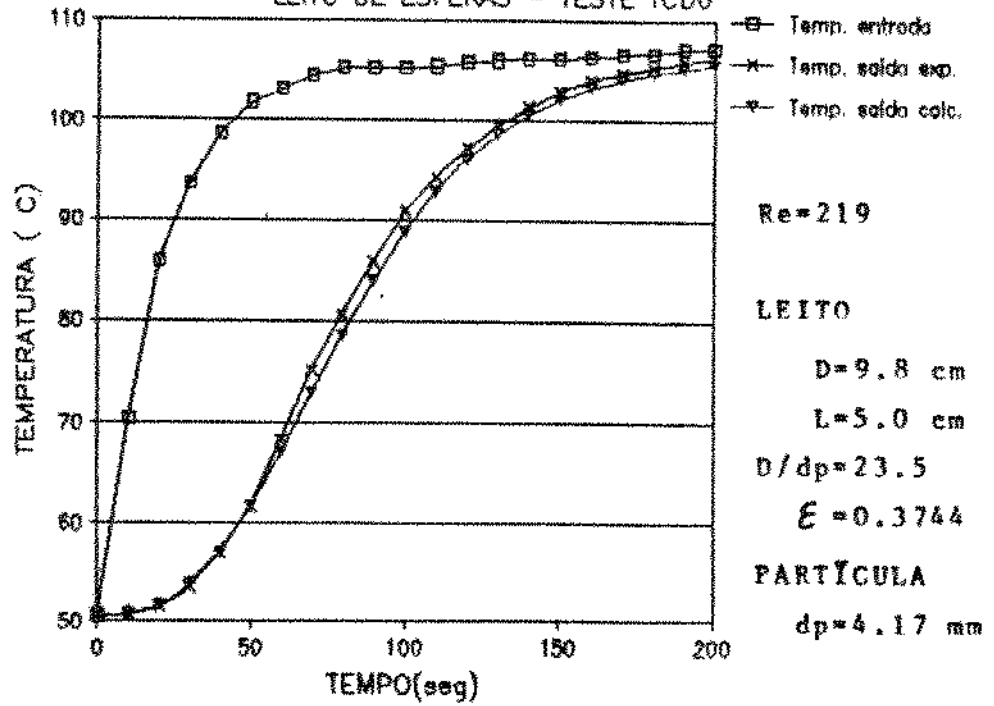


FIGURA 3.4

### CURVAS DE TEMPERATURA

LEITO DE XISTO - TESTE TXF9

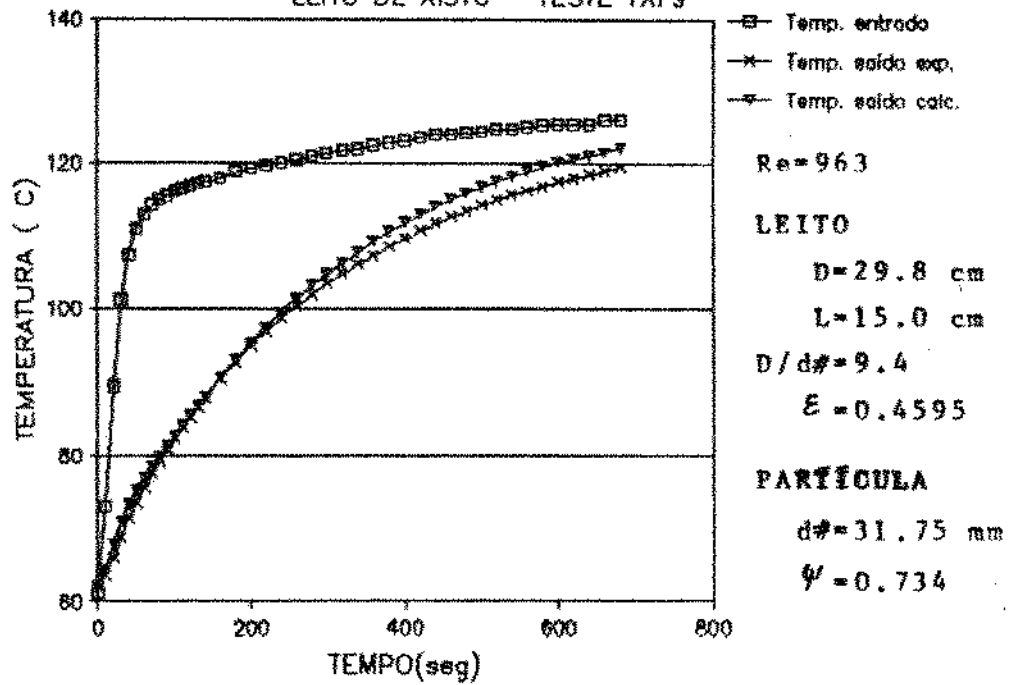


FIGURA 3.5

função da vazão de ar utilizada para o ensaio, requerendo períodos de estabilização menores à medida que se aumentava a vazão de ar, em consequência do aumento da transferência de calor com o aumento do número de Reynolds.

### 3.5 - Cálculo do Coeficiente de Transferência de Calor gás-partícula

O coeficiente global ou pseudo-convectivo de transferência de calor gás-partícula ( $h_g$ ) foi determinado através da solução numérica do par de equações (2.2.3 e 2.2.4) do modelo matemático proposto pelo Schumann utilizando-se a técnica das diferenças finitas e aplicando o método implícito para as temperaturas da fase fluida e sólida.

O apêndice A mostra o estabelecimento das condições iniciais e o desenvolvimento do sistema de equações algébricas. O apêndice B apresenta a listagem do programa em linguagem turbo Pascal para microcomputador do tipo IBM-PC, que permite o cálculo do coeficiente de transferência de calor utilizando como dados de entrada as propriedades das partículas, do leito, vazão e dados de temperatura do ar na entrada e saída do leito para cada teste.

O valor do coeficiente global de transferência de calor é determinado com precisão de 0,10 W/m<sup>2</sup>K, por um processo de aproximações sucessivas, buscando minimizar o somatório dos quadrados dos desvios entre as temperaturas experimentais e calculadas através da solução numérica para a fase fluida na saída do leito. As duas extremidades da curva de temperatura foram desprezadas para efeito do cálculo dos desvios, sendo considerados apenas os valores de temperatura compreendidos entre 0,05 e 0,95 da variação total de temperatura a que o leito foi

submetido. O cálculo do erro de ajuste (Es) entre as curvas de temperatura experimental e calculada foi realizado conforme sugerido por Wakao et alii (1978) através da equação:

$$Es = \left( \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[ \frac{t_e(\theta) - t_c(\theta)}{T_0} \right]^2 d\theta \right)^{1/2} \quad (3.5.1)$$

Onde:  $\theta_1, \theta_2$  são os valores de tempo em segundos, correspondentes às temperaturas  $t_e = 0,05 T_0$  e

$t_e = 0,95 T_0$

$t_e$  - temperatura determinada experimentalmente,

$T_0$  - é a variação de temperatura a que o leito foi submetido.

$t_c$  - temperatura calculada.

Os valores dos incrementos para as variáveis posição axial no leito de partículas e tempo, utilizados na solução numérica, foram estabelecidos procurando conciliar precisão do resultado e tempo computacional gasto na sua obtenção.

A tabela abaixo apresenta os valores dos incrementos avaliados e os resultados obtidos para um teste típico realizado no leito de 9,8 cm de diâmetro.

VALORES DE INCREMENTOS PARA ALTURA DE LEITO E TEMPO  
LEITO DE 9,8 cm DE DIÂMETRO

$\Delta\theta$ (seg)	$\Delta x$ (mm)	$h_m$ (W/m <sup>2</sup> k)	Es (%)	Tempo Computacional (min.)
10	2	292,4	5,60	7
2	2	165,9	5,70	25
1	2	157,9	5,80	47
0,5	2	153,9	5,80	90
0,25	2	151,9	5,80	160
0,5	1	152,3	4,72	120
0,5	0,5	151,5	4,20	280

Com base nestes resultados os valores de incrementos escolhidos para a variável tempo e posição axial foram respectivamente 0,5 segundo e 1,0 mm para todos os ensaios realizados no leito 9,8 cm.

Para o leito de 29,8 cm de diâmetro os valores dos incrementos foram novamente reavaliados mantendo-se o valor de 1,0 mm para a altura do leito e aumentando-se o valor do incremento da variável tempo para 1 segundo. Estes valores foram estabelecidos a partir da análise dos dados obtidos para um teste típico, conforme apresentado a seguir.

VALORES DE INCREMENTO PARA ALTURA DE LEITO E TEMPO  
LEITO DE 29,8 cm DE DIÂMETRO

$\Delta\theta$ (seg)	$\Delta x$ (mm)	$h_w$ (w/m <sup>2</sup> k)	Es (%)	Tempo Computacional (horas)
2	3	128,6	0,79	1,0
1	3	127,0	0,79	2,5
0,5	3	126,2	0,79	5,5
1	1	124,5	0,30	9,5
0,5	1	123,8	0,30	18,0

Para as condições escolhidas acima o tempo computacional gasto para a obtenção do coeficiente de transferência de calor para o leito 9,8 cm esteve entre 1 e 2 horas e para leito de 29,8 cm entre 5 e 10 horas.

O coeficiente global de transferência de calor gás-partícula ( $h_w$ ) foi então corrigido visando a obtenção do coeficiente convectivo de transferência de calor ( $h_c$ ), com base na proposição apresentada por Kitaev et alii (1967) equação (2.2.14) e confirmada por Jefreson (1972). Os valores de condutividade térmica dos materiais utilizados nos experimentos foram obtidos da literatura, apresentando valores de 1,05 e 0,53 W/mk, para

cerâmica e xisto pirobetuminoso, respectivamente.

### 3.6. Avaliação dos Erros

As fontes de erro existentes na obtenção dos coeficientes de transferência de calor são de dois tipos: o erro experimental atribuído à medição das características das partículas, do leito e das variáveis vazão e temperatura da fase fluida; e o erro computacional envolvido na busca do valor do coeficiente que melhor ajusta os dados de temperatura observados experimentalmente.

Devido à sua importância, a medição da variável temperatura recebeu especial atenção, tendo sido feita a aferição dos termopares para os níveis de temperatura de 19, 82, 93 e 120 °C, tendo como referência a temperatura lida através de um termômetro de mercúrio. Os desvios observados estão expressos em milivolts e apresentados a seguir.

#### AFERIÇÃO DOS TERMOPARES

Termopar	Valores de referência em mV			
	0,987	4,293	4,888	6,359
	Desvios observados em mV			
A	-0,037	-0,003	+0,002	-0,019
B	-0,027	-0,013	+0,002	-0,019
C	-0,027	-0,003	-0,008	+0,001
D	-0,027	-0,003	+0,002	-0,009
E	-0,037	+0,027	+0,022	+0,031
F	-0,017	+0,017	+0,022	+0,001
G	-0,037	-0,013	+0,012	-0,009
H	-0,027	-0,003	-0,008	-0,009
I	-0,027	-0,003	+0,002	+0,001
J	-0,027	-0,013	+0,012	+0,001
K	-0,027	-0,013	+0,012	+0,001
L	-0,027	-0,023	-0,038	-0,039
M	-0,037	+0,007	-0,088	-0,089

AFERIÇÃO DOS TERMOPARES (cont.)

Termopar	Valores de referência em mV			
	0,987	4,293	4,888	6,359
	Desvios observados em mV			
N	-0,027	+0,027	-0,038	-0,059
O	-0,037	+0,007	-0,058	-0,069
P	-0,027	+0,017	-0,088	-0,089
Desvio Médio	0,030	0,012	0,026	0,028

O desvio médio obtido para a faixa de temperatura utilizada nos testes foi de 0,024 mV, o que corresponde a aproximadamente 0,5 °C. Este valor de desvio foi considerado satisfatório quando comparado aos erros de ajuste obtidos entre as temperaturas observadas nos ensaios e aquelas calculadas a partir dos coeficientes de transferência de calor. Conforme pode ser visto no Capítulo 4 apresentado a seguir, o erro de ajuste entre as curvas de temperatura experimental e calculada esteve entre 1 e 5% da variação de temperatura a que o leite foi submetido ( $T_0$ ), o que representa valores entre 0,8 e 3,0 °C se considerarmos que o valor da variação de temperatura provocado no leite de partículas durante os ensaios para determinação do coeficiente de transferência de calor foi de aproximadamente 80 °C.

**CAPÍTULO 4**

**APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Análise do Comportamento da Queda de Pressão

O estudo do comportamento da queda de pressão foi realizado sobre cinco leitos formados por esferas de cerâmica e seis leitos formados por partículas de xisto. O diâmetro médio das partículas utilizadas situou-se entre 4,17 e 13,83 mm para as esferas e entre 2,87 e 31,75 mm para as partículas de xisto. Os diâmetros dos leitos eram de 9,8 e 29,8 cm com alturas respectivas de 10 e 30 cm. A relação de diâmetros para os leitos de esferas foi de  $18 < D/d_p < 42,9$  e para os leitos de xisto  $9,4 < D/d_p < 34,1$ , que atendem aos valores limites citados na literatura e discutidos no item 2.4. Os valores de queda de pressão foram determinados para dois segmentos do leito utilizando as tomadas de pressão instaladas na base, meio e topo do leito, conforme indicado na figura 3.2. Em geral os valores obtidos para as duas metades do leito apresentaram-se muito próximos, tendo-se optado por trabalhar apenas os resultados referentes à parte inferior do leito.

Os ensaios foram conduzidos procurando manter a velocidade do fluido ( $U_m$ ) entre 0,3 e 5,0 m/s, obtendo-se de 15 a 20 leituras para cada leito. Nem todos os leitos, especialmente aqueles formados por partículas de xisto, foram pesquisados para uma mesma faixa de variação do número de Reynolds de partícula devido às limitações impostas pela instalação experimental em termos de vazão de ar ou de queda de pressão.



Os resultados obtidos estão agrupados segundo o tipo de partícula utilizada para compor o leito, ou seja, esferas de cerâmica e partículas de xisto. No apêndice C estão apresentados detalhadamente todos os pontos experimentais.

#### 4.1.1 Queda de Pressão nos Leitos de Esferas de Cerâmica

As tabelas C.1.1 a C.1.5 resumem as características dos leitos, diâmetro de partícula e os resultados obtidos. Para a análise dos dados foi utilizada a equação (2.4.2) de Ergun discutida no item 2.4 e apresentada sob a forma de uma relação linear entre o fator de atrito ( $f_v$ ), definido pela razão entre a queda de pressão e o termo de energia viscosa, e o número de Reynolds de partícula.

$$f_v = \frac{\Delta P d_p^2 \epsilon^3}{L \mu U_m (1-\epsilon)^2} = A + B \frac{Re}{(1-\epsilon)} \quad (2.4.2)$$

Os conjuntos de valores obtidos para as variáveis  $Re/(1-\epsilon)$  e  $f_v$  referentes a cada leito foram submetidos a análise de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados obtendo-se os parâmetros A e B da equação de Ergun, os quais estão apresentados a seguir juntamente com os coeficientes de correlação.

LEITO	$d_p$ (mm)	PARÂMETRO A	PARÂMETRO B	COEFICIENTE CORRELAÇÃO $r^2$
TCA	4,17	335,51	1,08	0,991
TCB	6,10	511,14	1,13	0,996
TCD	4,17	364,90	1,10	0,997
TCE	6,94	410,58	1,40	0,995
TCF	13,83	347,36	1,32	0,977
CONJUNTO DE TODOS OS LEITOS		367,30	1,25	0,949

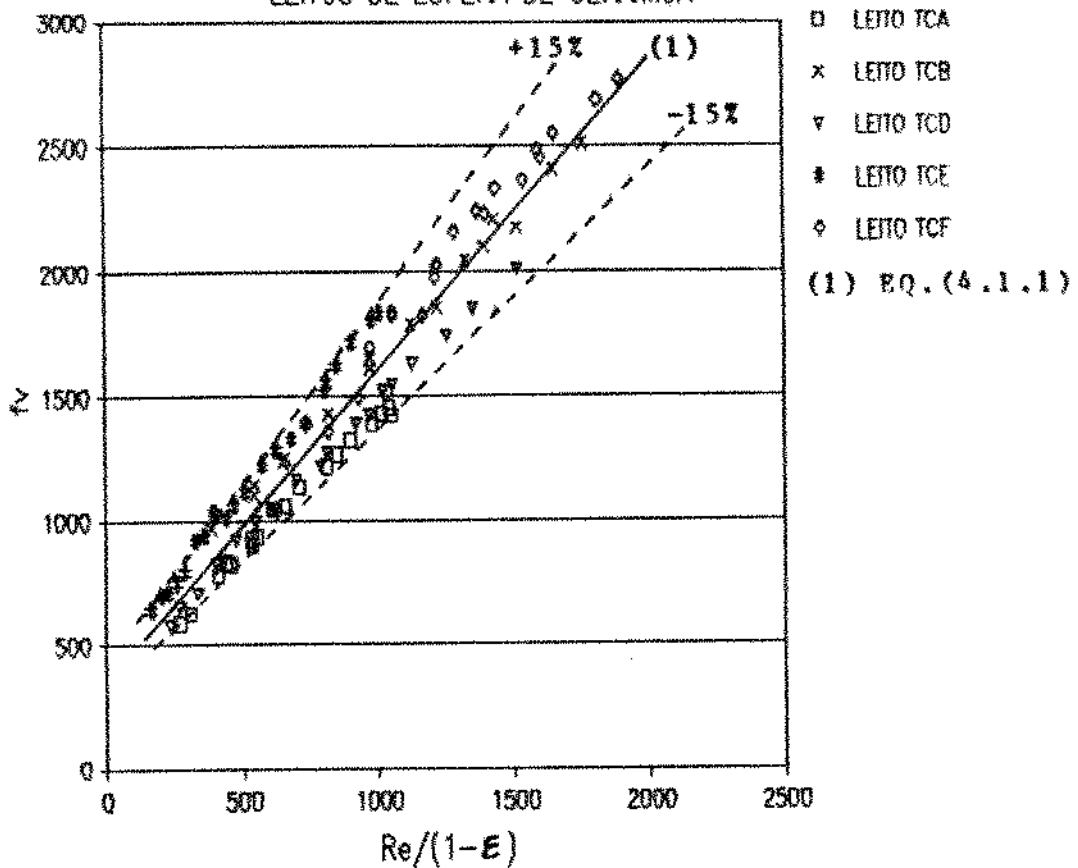
Os resultados obtidos para cada leito analisado individualmente apresentam excelente ajuste conforme pode ser observado na figura 4.1 e através dos coeficientes de correlação. O agrupamento dos cinco leitos estudados mostra algum espalhamento porém ainda é possível representá-lo através de uma única correlação :

$$f_{\omega} = 367,3 + 1,25 \frac{Re}{(1 - \epsilon)} \quad (4.1.1)$$

com validade para a faixa entre 100 e 2000 da relação  $Re/(1 - \epsilon)$ . Esta equação permite enquadrar 95 % dos pontos experimentais, apresentando desvio médio de  $\pm 15\%$ . Esta correlação praticamente reproduz aquela apresentada por Handley e Heggs (1988), que foi obtida trabalhando dados levantados sobre leitos de esferas constituídos por diversos materiais metálicos, vidro e alumina.

A figura 4.2 mostra a equação (4.1.1) comparativamente às equações (2.4.1, 2.4.4, 2.4.5, 2.4.6 e 2.4.7), propostas respectivamente por Ergun (1952), Hicks (1970), Handley e Heggs (1988), e Macdonald et alii (1979). Conforme observado por alguns desses pesquisadores e confirmado pelos dados levantados neste trabalho, os valores obtidos para os parâmetros A e B podem ser muito diferentes das constantes sugeridas por Ergun (1952). A maior proximidade ou afastamento da correlação proposta por aquele autor depende muito do tipo de análise realizada sobre os dados e fundamentalmente da rugosidade superficial das partículas usadas nos experimentos. Um exemplo disto é a comparação das curvas referentes às equações (2.4.1, 2.4.4 e 2.4.6), todas elas são ditas aplicáveis aos leitos constituídos por partículas

# ENSAIOS DE QUEDA DE PRESSÃO LEITOS DE ESFERA DE CERÂMICA



**LEGENDA**

LEITOS	D (cm)	L (cm)	dp (mm)	$\epsilon$	D/dp
TCA	9.8	5.0	4.17	0.3807	23.5
TCB	9.8	5.0	6.10	0.3847	16.0
TCD	9.8	5.0	4.17	0.3744	23.5
TCE	29.8	15.0	6.94	0.3790	42.9
TCF	29.8	17.5	13.83	0.3718	21.5

FIGURA 4.1

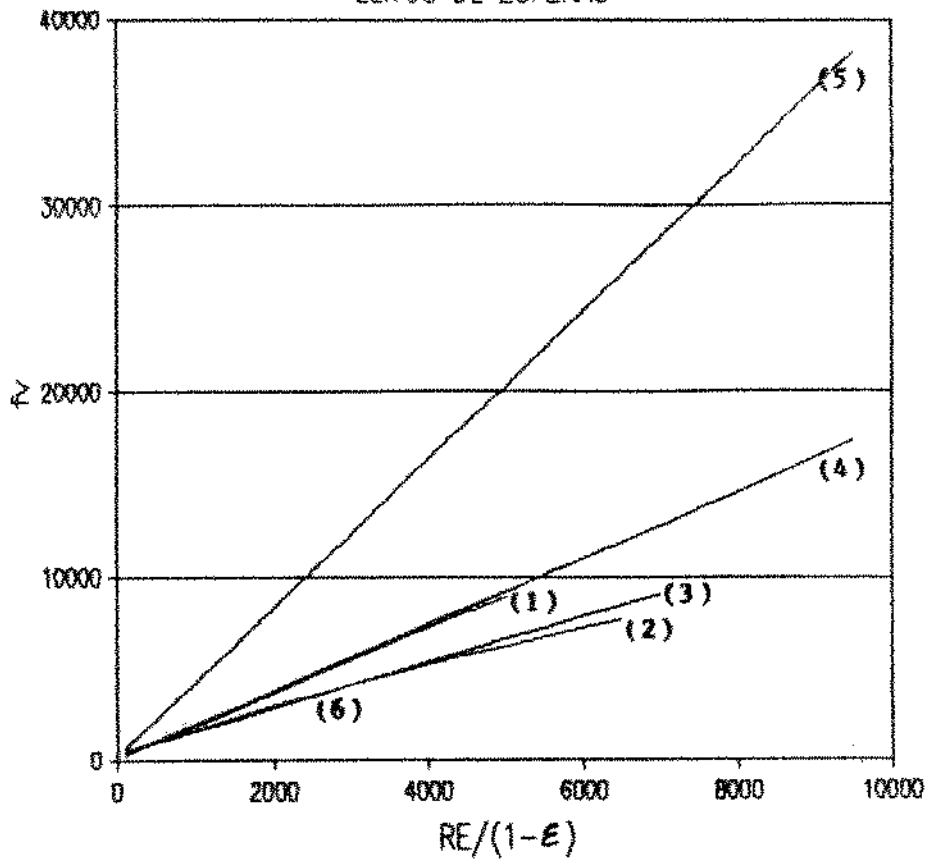
esféricas e supostamente lisas, entretanto apresentam diferentes graus de concordância. Cabe ressaltar também que a denominação "partículas lisas ou rugosas" é um tanto quanto relativa neste tipo de comparação porque pelas características das partículas utilizadas por Handley e Heggs (1968) elas provavelmente possuíam rugosidade semelhante àquelas trabalhadas por Ergun (1952) e Macdonald et alii (1979), no entanto as correlações obtidas são diferentes conforme pode ser visto na figura 4.2. O comportamento observado entre as várias correlações coloca em evidência que elas apresentam limitações e que ainda não dispomos de uma correlação capaz de representar adequadamente os leitos constituídos por partículas esféricas, apesar deles apresentarem um menor grau de complexidade na acomodação das partículas quando comparados aos leitos formados por partículas de formato irregular. A coincidência dos valores encontrados neste trabalho para os parâmetros A e B em relação àquelas propostos por Handley e Heggs (1968) acredita-se que é decorrente da semelhança do tipo de superfície das partículas usadas nos experimentos.

#### 4.1.2 Queda de Pressão nos Leitos de Partículas de Xisto

As características dos leitos e das partículas que compunham os leitos de xisto assim como os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas C.2.1 e C.2.6 do apêndice C.

A análise dos resultados obtidos seguiu o mesmo procedimento empregado para os leitos de esferas, obtendo-se diferentes parâmetros A e B para a equação de Ergun, conforme o diâmetro de partícula ensaiado. As curvas estão representadas na figura 4.3

## CORRELAÇÕES DE QUEDA DE PRESSÃO LEITOS DE ESFERAS



### LEGENDA

- (1) EQ. (2.4.1) ERGUN (1952)
- (2) EQ. (2.4.4) HICKS (1970)
- (3) EQ. (2.4.5) HANDLEY e HEGGS (1968)
- (4) EQ. (2.4.6) MACDONALD et alii (1979)
- (5) EQ. (2.4.7) MACDONALD et alii (1979)
- (6) EQ. (4.1.1) ESTE TRABALHO

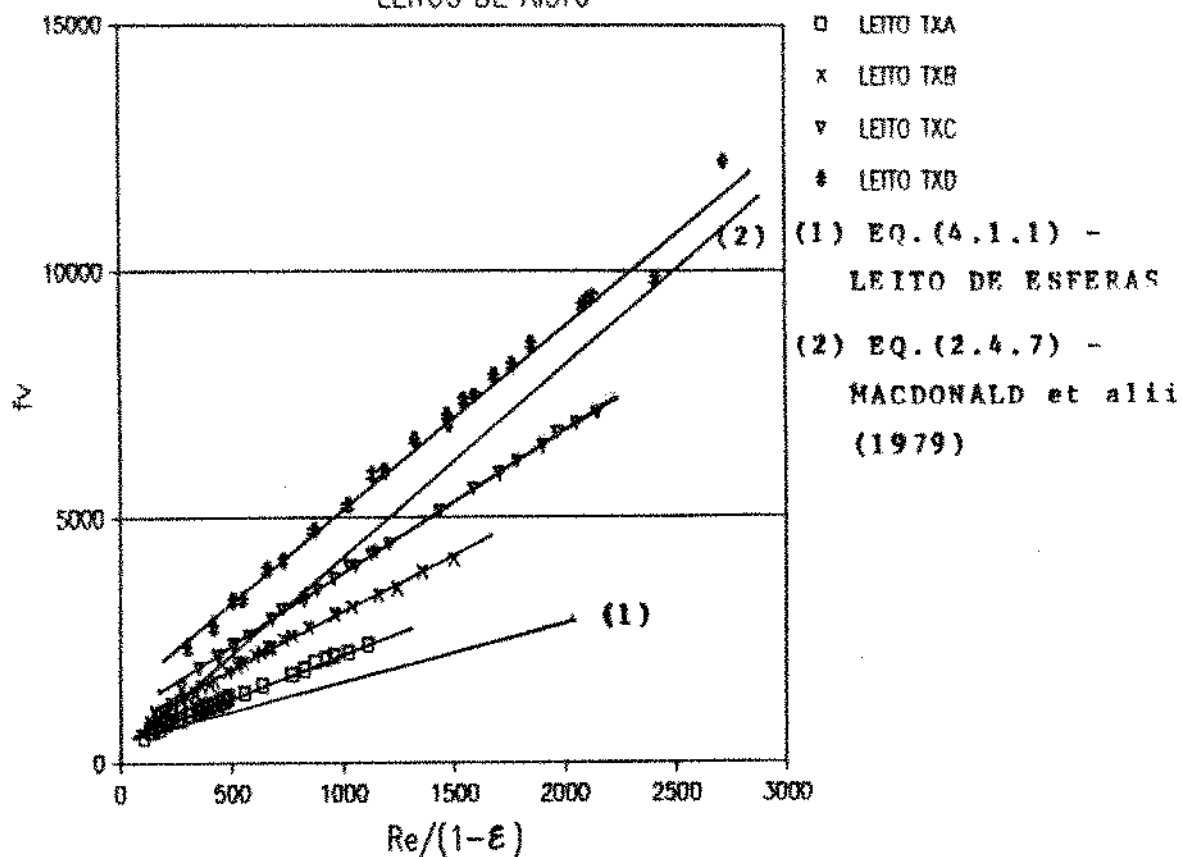
FIGURA 4.2

e 4.4, distribuídas conforme a faixa do número de Reynolds pesquisada. Os valores desses parâmetros por leito ensaiado, assim como os coeficientes de correlação obtidos estão apresentados abaixo :

LEITO	$d_p$ (mm)	$\psi$	PARÂMETRO A	PARÂMETRO B	COEFICIENTE CORRELAÇÃO $r^2$
TXA	2,87	0,704	389,49	1,82	0,997
TXB	4,08	0,678	848,88	2,39	0,994
TXC	5,56	0,679	899,10	2,91	0,999
TXD	7,94	0,702	1279,28	3,88	0,994
TXE	22,23	0,703	1436,34	5,48	0,994
TXF	31,75	0,734	3343,71	3,82	0,984

Uma análise mesmo que superficial dos resultados obtidos para os parâmetros A e B mostra que não é possível eleger valores médios capazes de representar todos os leitos estudados. Comparativamente ao comportamento observado para os leitos de esferas de cerâmica, os resultados acima estão mostrando a influência das duas variáveis adicionais introduzidas no estudo e que são o formato e a maior rugosidade da superfície das partículas. Aparentemente apenas com os resultados obtidos torna-se impossível avaliar qual dessas variáveis adicionais está contribuindo mais decisivamente. Em trabalhos realizados sobre partículas com formato não esférico Handley e Heggs (1968) e Macdonald et alii (1979) também observaram o mesmo tipo de comportamento relatado acima, tendo os primeiros autores optado por apresentar correlações específicas para cada leito estudado. Apenas com a finalidade de comparar a faixa de variação de valores estão apresentadas a seguir os coeficientes obtidos por Handley e Heggs (1968).

## ENSAIOS DE QUEDA DE PRESSÃO LEITOS DE XISTO

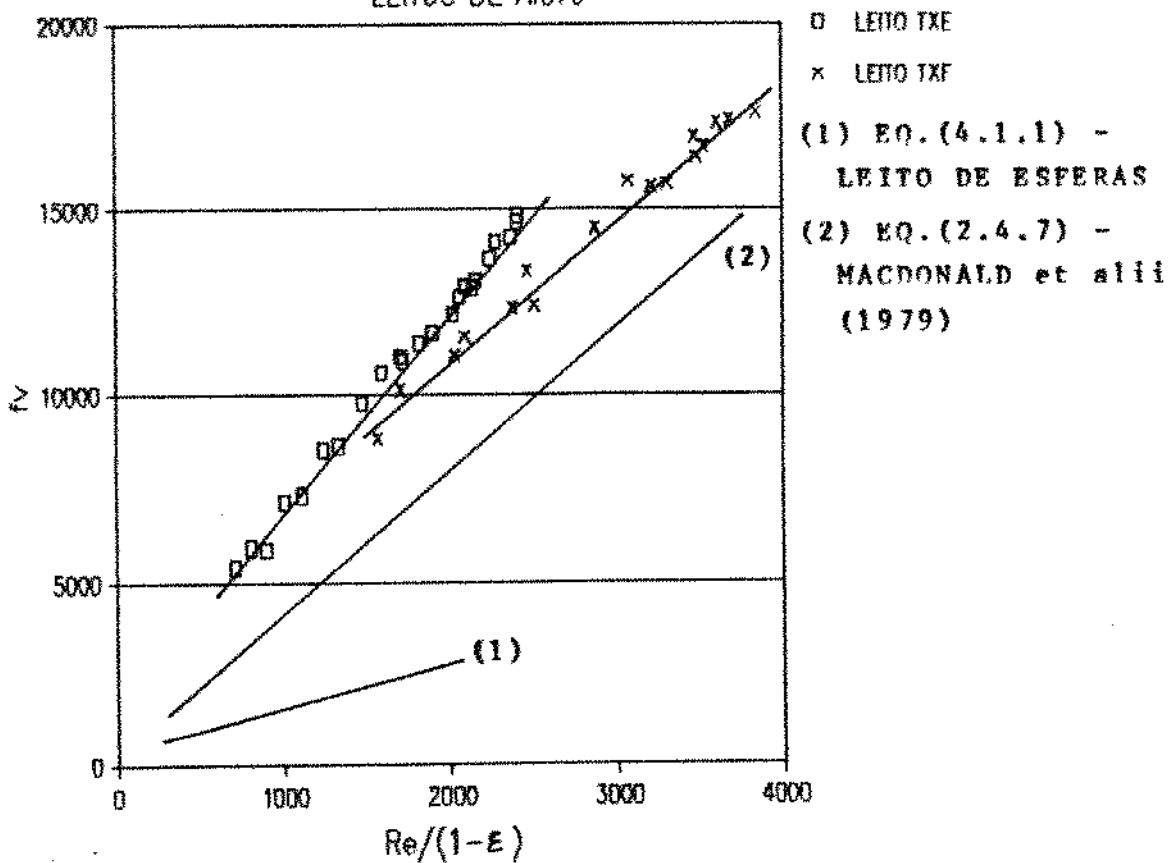


### LEGENDA

LEITOS	D (cm)	L (cm)	d# (mm)	$\epsilon$	$\psi$	D/d#
TXA	9.8	5.0	2.87	0.4506	0.704	34.1
TXB	9.8	5.0	4.06	0.4407	0.678	24.1
TXC	9.8	5.0	5.56	0.4356	0.679	17.6
TXD	9.8	5.0	7.94	0.4273	0.702	12.3

FIGURA 4.3

## ENSAIOS DE QUEDA DE PRESSÃO LEITOS DE XISTO



**LEGENDA**

LEITOS	D (cm)	L (cm)	d# (mm)	$\epsilon$	$\psi$	D/d#
TXE	29.8	15.0	22.23	0.4645	0.703	13.4
TXF	29.8	15.0	31.75	0.4595	0.734	9.4

FIGURA 4.4



PARTÍCULA	FORMATO l/d (mm)	$d_p$	PARÂMETRO A	PARÂMETRO B	Re/(1 - $\epsilon$ )
cilindro	1,0	4,76	598	1,25	200 - 3000
cilindro	1,0	6,35	458	1,28	800 - 3900
cilindro	0,5	12,70	1083	1,54	1500 - 4900
anéis	1,0	6,35	410	3,15	200 - 2500
anéis	1,0	6,35	358	2,37	200 - 2800
anéis	1,0	9,35	452	1,72	300 - 4100

A partir da tabela anterior pode-se observar que os valores do parâmetro B obtidos neste estudo estão tanto dentro da faixa de valores obtidos por Handley e Hegge (1988), quanto no intervalo de valores sugeridos por Macdonald et alii (1979) para partículas rugosas, que é de 1,8 a 4,0.

As figuras 4.3 e 4.4 apresentam também, a título de comparação, as equações (4.1.1 e 2.4.7), respectivamente, obtida neste trabalho para os leitos de esferas de cerâmica e a correlação sugerida por Macdonald et alii (1979) para partículas rugosas. Pode-se observar que para toda a faixa do número de Reynolds pesquisada os coeficientes de atrito obtidos são maiores para os leitos formados por partículas de xisto. Este comportamento foi atribuído à influência de três variáveis: formato das partículas, rugosidade superficial e porosidade dos leitos.

Foi impossível estabelecer uma correlação entre o parâmetro A e o diâmetro das partículas, conforme sugerida por Macdonald et alii (1979), talvez devido à reduzida quantidade de casos ensaiados. Em função disto o estudo do comportamento hidrodinâmico para os leitos formados por partículas de xisto ficou restrito às correlações individuais obtidas para cada leito estudado, as quais estão apresentadas a seguir com os respectivos intervalos de número de Reynolds.

$d_p$ (mm)	PARÂMETRO A	PARÂMETRO B	$Re/(1 - \epsilon)$
2,87	389,5	1,82	100 - 1100
4,06	646,9	2,39	100 - 1500
5,58	899,1	2,91	200 - 2200
7,94	1279,3	3,88	300 - 2700
22,23	1436,3	5,46	700 - 2400
31,75	3343,7	3,82	1500 - 3900

#### 4.2 Análise do Comportamento da Troca Térmica

O estudo da troca térmica gás-sólido foi realizado sobre os leitos utilizados para o comportamento da queda de pressão. Apenas os dados levantados para dois leitos de esferas de cerâmica com diâmetros de partícula de 4,17 e 6,94 mm correspondentes aos leitos TCA e TCE não foram considerados na análise em função de terem apresentado excessiva perda de calor para o ambiente.

Foram realizados em média 20 ensaios para cada um dos leitos, procurando-se cobrir uma faixa de variação do número de Reynolds entre 100 e 1500. Devido à menor perda de calor e também às limitações no tempo computacional requerido no cálculo, os coeficientes de transferência de calor foram determinados utilizando-se os dados de temperatura levantados para o segmento de leito correspondente à primeira metade dos leitos. Esses segmentos de leito correspondem àqueles utilizados no estudo do comportamento da queda de pressão.

As características dos leitos, das partículas e os coeficientes de transferência de calor global calculados para cada ensaio realizado estão apresentados no apêndice D agrupados conforme o tipo de partícula, ou seja, leitos de esferas de

cerâmica e partículas de xisto.

#### 4.2.1 Troca Térmica nos Leitos de Esferas de Cerâmica

Os coeficientes de troca foram determinados utilizando-se partículas com diâmetro médio de 4,17 , 6,10 e 13,83 mm. Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas D.1.1 a D.1.3, expressos em termos dos coeficientes globais ou pseudo-convectivos de transferência de calor ( $h_w$ ). As tabelas apresentam também os valores obtidos para o erro de ajuste das curvas de temperatura experimental e calculada relativas a cada ensaio. Eles estiveram abaixo de 3%, com exceção de alguns testes do leito TCB, os quais situaram-se entre 3 e 5%.

Os coeficientes convectivos de transferência de calor gás-partícula ( $h_g$ ) foram calculados utilizando-se a equação (2.2.14) do capítulo 2, a qual tem por finalidade corrigir os coeficientes ( $h_w$ ) determinados a partir do modelo de Schumann quanto aos efeitos da condução intra-partícula. A influência da correção nos valores finais dos coeficientes de transferência de calor ( $h_g$ ) é tanto mais acentuada quanto maior o diâmetro e a condutividade térmica da partícula para a qual o coeficiente global de transferência ( $h_w$ ) foi determinado. Para os leitos de esfera de cerâmica, conforme pode ser observado pelos valores dos coeficientes ( $h_g$  e  $h_w$ ) apresentados nas tabelas D.1.1 a D.1.3, a correção resultou em incrementos de 5 a 24% sobre coeficientes globais ( $h_w$ ) calculados a partir dos dados experimentais. Esses valores percentuais correspondem ao erro que se cometeria caso não fosse feita a correção devido ao efeito de

condução de calor intra-partícula.

A partir dos coeficientes convectivos de transferência de calor gás-partícula ( $h_c$ ) foram calculados os números de Nusselt visando apresentar os resultados obtidos para a troca térmica dos leitos segundo uma correlação do tipo :

$$Nu = c_1 (Re/\epsilon)^{c_2} \quad (4.2.1)$$

A figura 4.5 apresenta o conjunto de resultados e a curva da correlação obtida pela análise de regressão linear através do método dos mínimos quadrados realizada sobre os logaritmos dos pares de valores de Nu e  $Re/\epsilon$ . A equação resultante apresentou os seguintes valores para as constantes :

$$\begin{aligned} c_1 &= 0,115 \\ c_2 &= 0,83 \\ Nu &= 0,115 (Re/\epsilon)^{0,83} \quad (4.2.2) \end{aligned}$$

com validade para o intervalo de  $Re/\epsilon$  entre 300 e 2500 e coeficiente de correlação  $r^2 = 0,957$ . Estão indicadas também na figura 4.5 as duas curvas correspondentes ao desvio médio de  $\pm 15\%$ . Pode-se verificar que aproximadamente 90% dos resultados se enquadram dentro destes limites.

#### 4.2.2 Troca Térmica nos Leitos de Partículas de Xisto

Foram ensaiados ao todo seis leitos com diâmetro de peneira das partículas entre 2,87 e 31,75 mm. Os resultados estão apresentados nas tabelas D.2.1 a D.2.6 do apêndice D, sendo os coeficientes de transferência de calor calculados de modo

TROCA TÉRMICA  
LEITOS DE ESFERAS DE CERÂMICA

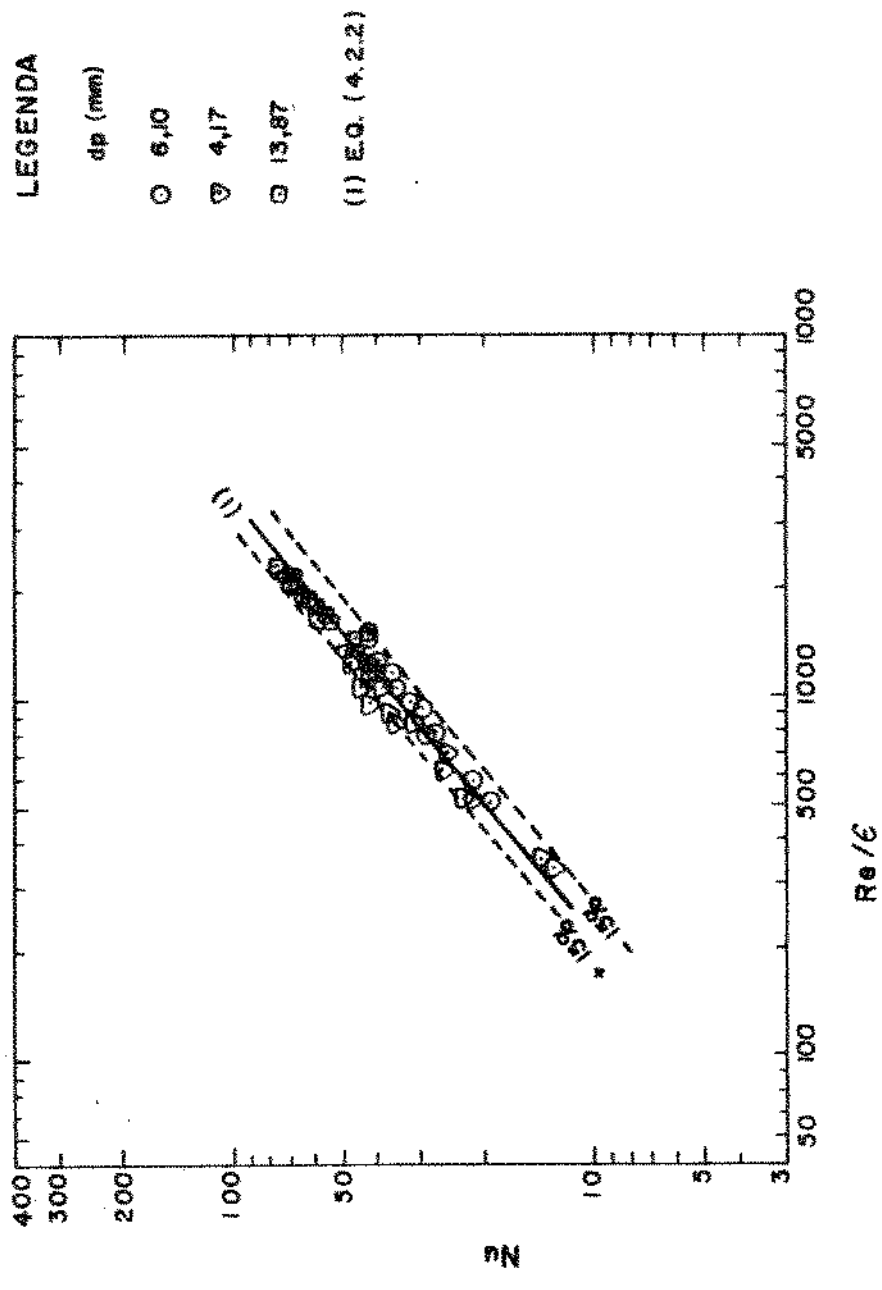


FIGURA 4.3

idêntico àquele empregado para os leitos de esfera. Apenas a variável diâmetro de partícula foi adaptada para os leitos de xisto devido ao formato irregular das partículas. Neste caso utilizou-se a definição de diâmetro equivalente ao da esfera de igual volume, sendo este portanto o produto do diâmetro médio de peneira pela esfericidade da partícula. Procedeu-se a correção dos coeficientes globais de transferência de calor ( $h_g$ ) através da equação (2.2.14), obtendo-se os coeficientes convectivos ( $h_c$ ). Devido a faixa mais ampla de diâmetro de partículas utilizadas nos ensaios e também à menor condutividade térmica do xisto, o efeito da correção da parcela de condução de calor intra-partícula sobre os coeficientes globais de transferência de calor ( $h_g$ ), determinados a partir do modelo de Schumann, foi mais acentuado. Conforme pode-se observar nas tabelas D.2.1 a D.2.8 do apêndice D, os valores dos coeficientes convectivos de transferência de calor ( $h_c$ ) apresentaram incrementos de 3 a 84% se comparados aos coeficientes globais de transferência de calor ( $h_g$ ). Os erros foram um pouco maiores se comparados com os ensaios realizados sobre as esferas de cerâmica, porém ainda dentro da faixa de 1 a 5%, com exceção de uns poucos resultados, especialmente para a faixa mais baixa do número de Reynolds.

Os resultados referentes aos ensaios 15 a 23 do leito TXD apresentaram desvio significativo em relação à tendência dos demais resultados, tendo sido excluídos da análise de regressão, realizada com o intuito de se obter uma correlação válida para todos os leitos de xisto testados. Uma investigação mostrou que ele pode ter resultado da curta duração dos ensaios pois nas

condições de execução dos testes o leite apresentava estabilização de temperatura num intervalo de tempo entre 80 e 90 segundos, enquanto que para a maioria dos demais ensaios o tempo foi superior a dois minutos. Isto pode ter influenciado na obtenção dos coeficientes de transferência, uma vez que em virtude da breve duração dos ensaios os dados de temperatura e tempo lidos experimentalmente se restringiram de 8 a 8 pontos. Por outro lado, o erro de ajuste obtido para estes testes esteve abaixo da média, eliminando uma possível suspeita de ganho ou perda de calor do ambiente. De qualquer forma estes valores representam um percentual pouco significativo frente ao número total de ensaios considerados e por isso foram eliminados. A figura 4.8 apresenta todos os demais resultados obtidos totalizando 110 pontos.

A equação resultante apresentou os seguintes valores para as constantes :

$$\begin{aligned}
 c_1 &= 0,055 \\
 c_2 &= 0,94 \\
 Nu &= 0,055 (Re/\epsilon)^{0,94} \quad (4.2.3)
 \end{aligned}$$

com validade para a faixa de  $Re/\epsilon$  entre 100 e 3500 e coeficiente de correlação  $r^2 = 0,953$ . Observa-se para estes resultados um maior espalhamento, apesar disto as curvas representando um desvio médio de  $\pm 20\%$  são capazes de enquadrar 85 % dos resultados obtidos. Este grau de dispersão dos valores é maior se comparado aos resultados obtidos para os leitos de esferas, entretanto ele ainda é bastante aceitável considerando que os coeficientes foram determinados para leitos constituídos por partículas de formato irregular. Infelizmente a revisão

TROCA TÉRMICA  
LEITOS DE XISTO

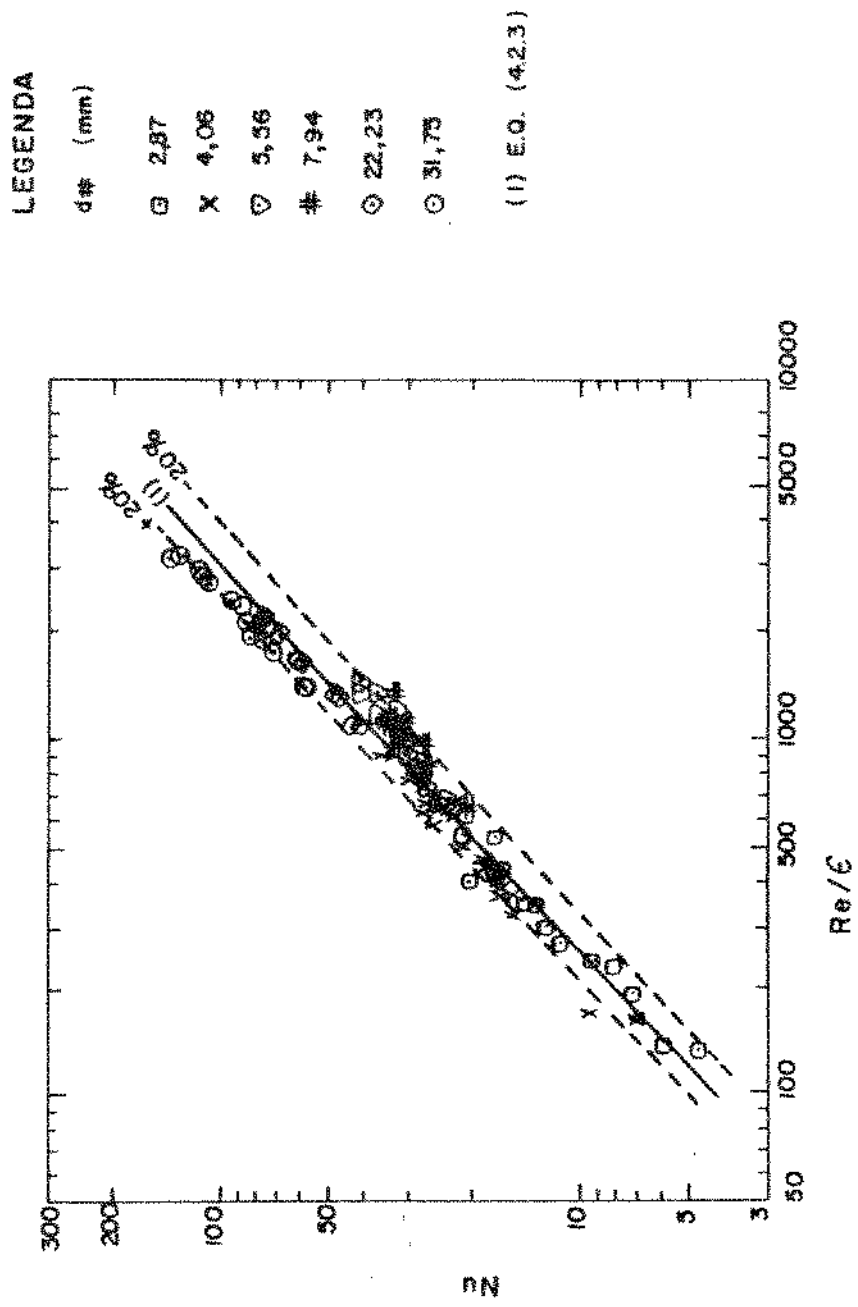


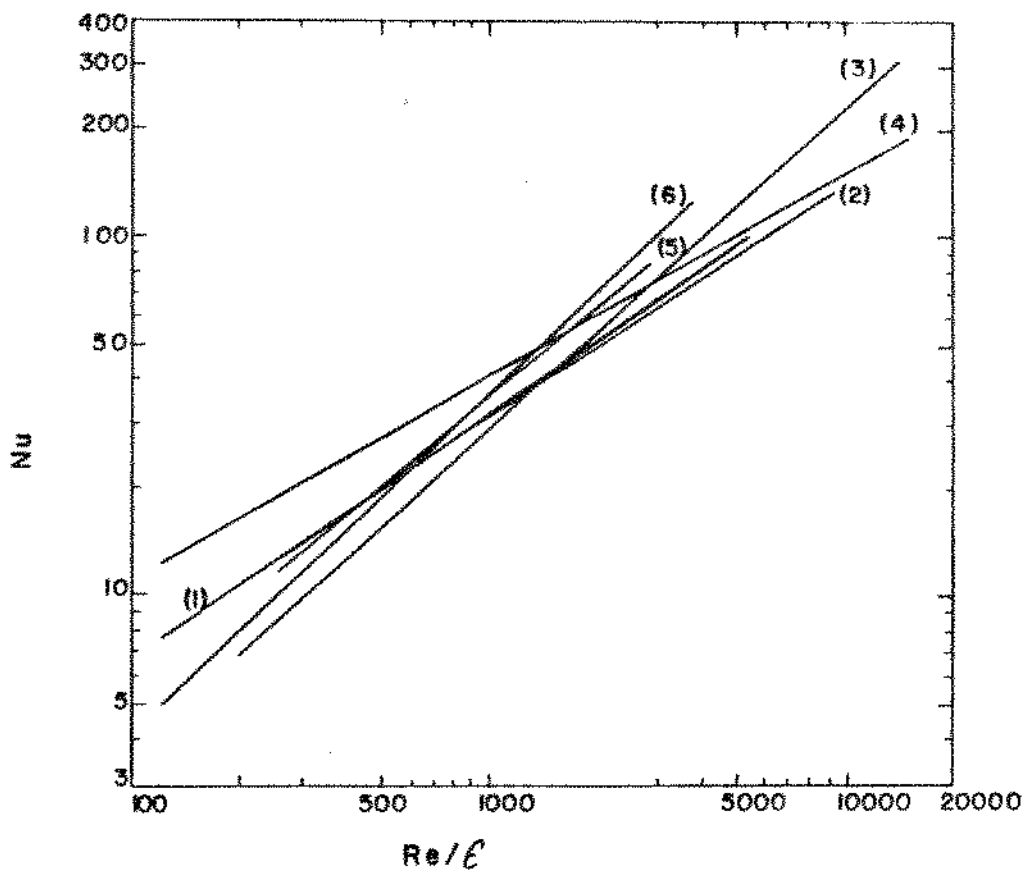
FIGURA 4.6



apresentada por Harker e Kumar (1985) não fornece elementos para se avaliar o desvio médio obtido em correlações levantadas sobre partículas com características semelhantes. A correlação proposta por Wakao et alii (1978), equação (2.2.18), compilada a partir de dados levantados para leitos de esferas por diversos autores, apresenta desvio médio em relação aos dados experimentais da ordem de  $\pm 50\%$ .

A figura 4.7 mostra as correlações obtidas neste trabalho frente àquelas apresentadas no capítulo 2, as quais também foram obtidas levando em consideração o efeito da condução de calor intra-partícula. Em geral as correlações apresentam um razoável grau de concordância para o intervalo de valores da relação  $Re/\xi$  entre 100 e 3000. Exceções a esse comportamento são as correlações proposta por Wakao et alii (1979), equação (2.2.18), que apresenta valores de Nusselt superiores às demais para a faixa de valores de  $Re/\xi$  entre 100 e 1000, e a correlação proposta por Chechetkin (1983), equação (2.3.4), que revela um maior afastamento para valores de  $Re/\xi$  acima de 3000. A diferença de comportamento da correlação proposta por Wakao et alii (1979) em relação às demais pode estar relacionada a uma correção excessiva da influência da dispersão axial para a fase fluida. Os estudos desenvolvidos por Jefresson (1972) e Gunn e De Souza (1979) indicam que o efeito da dispersão axial se torna importante para valores do número de Reynolds abaixo de 300. O distanciamento mais acentuado da equação (2.3.4), proposta por Chechetkin (1983), em relação às demais principalmente para altos valores de  $Re/\xi$  sugerem uma troca térmica mais intensa para os leitos formados por partículas irregulares comparativamente

TROCA TÉRMICA  
COMPARAÇÃO ENTRE CORRELAÇÕES



LEGENDA

- (1) E.Q. (2.2.17) JEFRESON (1972)
- (2) E.Q. (2.2.13) HANDLEY e HEGGS. (1968)
- (3) E.Q. (2.3.4) CHECHETKIN (1963)
- (4) E.Q. (2.2.18) WAKAO ET ALII (1979)
- (5) E.Q. (4.2.2) ESTE TRABALHO-ESFERAS
- (6) E.Q. (4.2.3) ESTE TRABALHO-PARTÍCULAS DE XISTO

FIGURA 4.7

àqueles constituídos por partículas esféricas. De certa forma as correlações obtidas neste trabalho (equações 4.2.2 e 4.2.3) reproduzem as tendências de comportamento observadas acima. Nota-se também que os valores do número de Nusselt referentes aos leitões de xisto estiveram razoavelmente acima dos valores apresentados pela correlação de Chechetkin [1963] equação (2.3.4). Uma comparação mais detalhada entretanto não pode ser feita para a faixa de valores da relação  $Re/\epsilon$  entre 1500 e 3500, uma vez que não se encontra na literatura autores que tenham determinado coeficientes de transferência sobre materiais com características semelhantes àsquelas usadas neste trabalho.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões

- A partir da revisão da literatura existente sobre a transferência de calor gás-partícula em leito fixo fica evidenciada a importância de se adotar modelos matemáticos que considerem os principais mecanismos de transferência de calor entre as fases sólida e fluida. Algumas hipóteses formuladas para a solução destes modelos tem levado a desvios significativos, podendo ser citados a não consideração da dispersão axial para a fase fluida e a condução de calor intra-partícula. Na execução desse trabalho usou-se o modelo proposto por Schumann aplicando-se correções aos resultados obtidos quanto a influência da transferência de calor intra-partícula. A boa concordância dos resultados finais obtidos com os de outros pesquisadores ( Jefreson [1970], Handley e Heggs [1988] e Chechetkin [1963] ) validam a modelagem utilizada.

- Os dados levantados neste trabalho permitiram concluir que as correlações apresentadas na literatura para a queda de pressão em leitos fixos, formados por partículas esféricas, apresentam restrições quanto à sua aplicação para outros tipos de partículas diferentes daquelas para as quais foram levantadas. Aparentemente a principal variável que dificulta a obtenção de uma única correlação válida para qualquer tipo de partícula de formato esférico é a rugosidade superficial das partículas.

- A forma da equação de queda de pressão composta por dois termos, um representando o efeito do atrito viscoso

fluido-partícula e outro representando o efeito inercial de arraste das partículas, conforme sugerida por Ergun (1952), se mostrou adequada para a interpretação dos resultados obtidos experimentalmente. Cabe ressaltar entretanto que os parâmetros A e B da equação dependem das características de formato e rugosidade das partículas que compoem o leito.

- Os resultados obtidos para os valores de queda de pressão nos leitos de esferas de cerâmica analisados segundo a equação de Ergun escrita em função do fator de atrito viscoso permitiram obter a equação (4.1.1), a qual é válida para a faixa de  $Re/(1 - \epsilon)$  entre 100 e 2000.

$$f_v = 367,3 + 1,25 \frac{Re}{(1 - \epsilon)} \quad (4.1.1)$$

- A análise dos dados levantados sobre os leitos constituídos por partículas de xisto, em função basicamente do seu formato irregular e maior rugosidade superficial, apresentou pares de valores específicos para os parâmetros A e B conforme o diâmetro de partícula estudado. Os valores obtidos para cada leito estão apresentados na forma de tabela no item 4.1.2 do capítulo 4.

- Devido ao comportamento observado para a queda de pressão nos leitos constituídos por partículas de xisto, e considerando constatações semelhantes feitas por Handley e Heggs (1968) e Macdonald et alii (1979) quanto aos parâmetros A e B para leitos formados por partículas de diferentes formatos e rugosidade superficial parece difícil conseguir uma correlação válida para

qualquer tipo e formato de partícula.

- Os coeficientes de atrito obtidos para os leitos de xisto foram maiores que aqueles das esferas para toda a faixa de variação do número de Reynolds de partícula. Este comportamento é atribuído a uma associação de efeitos de três variáveis : formato das partículas, rugosidade superficial e porosidade dos leitos.

- Os resultados obtidos a partir dos ensaios de troca térmica permitiram obter duas correlações entre os números de Nusselt e Reynolds, conforme o tipo de partícula usada nos experimentos. As correlações são :

$$Nu = 0,115 (Re/\xi)^{0,83} \quad (4.2.2)$$

$$Nu = 0,055 (Re/\xi)^{0,94} \quad (4.2.3)$$

- A equação (4.2.3) obtida para os leitos de xisto, principalmente para valores de  $Re/\xi$  acima de 1000, mostra valores de Nusselt maiores que aqueles obtidos para correlações determinadas sobre leitos de esferas sugerindo que a troca térmica é mais intensa para os leitos formados por partículas de formato irregular. Esta tendência é aparente também para a equação (2.3.4) proposta por Chechetkin (1963), a qual representa partículas com características semelhantes às deste trabalho.

- A técnica utilizada para a determinação dos coeficientes de transferência de calor gás-partícula assim como a sistemática de correção dos valores obtidos levando em consideração o efeito de condução intra-partícula se mostrou adequada aos tipos de materiais e tamanhos de partículas ensaiadas. O erro global envolvido no método de determinação do coeficiente de transferência de calor esteve entre 3 e 5%.

## 5.2 Sugestões

- O estudo da transferência de calor envolvendo as fases sólida e fluida tem propiciado a formulação de modelos matemáticos cada vez mais completos pela inclusão dos principais mecanismos de calor envolvidos. Quase sempre a solução matemática destes modelos é complexa e requer um grande tempo computacional quando se adota soluções numéricas. Uma rota promissora que deve ser melhor explorada parece ser a busca de técnicas experimentais mais sofisticadas aliadas às soluções analíticas dos modelos matemáticos formulados. Trabalhos nesta linha foram apresentados por Gunn e De Souza [1974] e Wakao et alii [1979].

- As constatações feitas quando analisando o comportamento da queda de pressão a partir dos resultados obtidos nos leitos constituídos por esferas de cerâmica e partículas de xisto indicam a necessidade de pesquisar com maior profundidade a influência das variáveis diâmetro, formato e rugosidade superficial das partículas. Inclusive porque nos leitos utilizados neste trabalho estudou-se apenas aqueles constituídos por partículas uniformes. É de muito interesse estender este trabalho a outros materiais e formatos de partículas visando



aprofundar o nível de conhecimento na área. Um trabalho desse tipo certamente forneceria elementos para validar ou não a proposta de Macdonald et alii [1979] quanto à obtenção de um diagrama de fator de atrito, semelhante àquele existente para o escoamento de fluidos em tubos.

- Com relação à troca térmica as informações disponíveis na literatura para leitos constituídos de partículas irregulares são tanto ou mais restritas que aquelas disponíveis para a queda de pressão. Embora tais sistemas tenham um amplo campo de aplicação, o nível de conhecimento na área de troca térmica tem ficado restrito a poucos casos com aplicações industriais. Acredita-se que devido ao custo crescente das fontes energéticas convencionais esta área passará a requerer maior atenção. Um maior aprofundamento do conhecimento técnico neste campo poderia advir de trabalhos realizados visando : faixa mais ampla de diâmetro de partícula; leitos constituídos por partículas de diferentes tamanhos e partículas com diferentes condutividades térmicas.

APÊNDICE A

RESOLUÇÃO NUMÉRICA DO MODELO MATEMÁTICO FORMULADO  
POR SCHUMANN

APÊNDICE A

RESOLUÇÃO NUMÉRICA DO MODELO MATEMÁTICO FORMULADO

POR SCHUMANN [1929]

O balanço de energia para as fases sólida e fluida, considerando as hipóteses apresentadas no item 2.2.2 do capítulo 2 é representado pelas seguintes equações :

$$\frac{\partial t_r}{\partial \theta} = -U \frac{\partial t_r}{\partial x} - \frac{ha}{c_r \rho_r \epsilon} (t_r - t_s) \quad (2.2.3)$$

$$(1 - \epsilon) \frac{\partial t_s}{\partial \theta} = \frac{ha}{c_s \rho_s} (t_f - t_s) \quad (2.2.4)$$

As condições iniciais e de contorno estão assim definidas :

$$\theta = 0 \quad t_r = t_s = \theta$$

$$x = 0 \quad t_r = T_0$$

onde :  $T_0$  - temperatura imposta ao fluido na entrada do leito

$t_r$  - temperatura do fluido

$t_s$  - temperatura do sólido

$\theta$  - variável tempo

$x$  - posição axial

Denominando duas constantes de:

$$k_1 = \frac{ha}{\rho_r c_r \epsilon} \quad \text{e} \quad k_2 = \frac{ha}{c_s \rho_s (1 - \epsilon)}$$

as equações (2.2.3 e 2.2.4) podem ser reescritas :

$$\frac{\partial t_r}{\partial \theta} = -U \frac{\partial t_r}{\partial x} - k_2 (t_r - t_m) \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_m}{\partial \theta} = k_2 (t_r - t_m) \quad (2)$$

Escrevendo a equação (2) em termos de diferenças finitas na sua forma implícita, adotando  $\Delta x$  e  $\Delta \theta$  respectivamente como incrementos da posição axial no leito e do tempo e utilizando  $i$  e  $j$  como indicadores de posição e tempo temos :

$$\frac{t_m(i, j+1) - t_m(i, j)}{\Delta \theta} = k_2 [ t_r(i, j+1) - t_m(i, j+1) ]$$

isolando  $t_m(i, j+1)$  :

$$t_m(i, j+1) - t_m(i, j) = k_2 \Delta \theta t_r(i, j+1) - k_2 \Delta \theta t_m(i, j+1)$$

$$(1 + k_2 \Delta \theta) t_m(i, j+1) = t_m(i, j) + k_2 \Delta \theta t_r(i, j+1)$$

$$t_m(i, j+1) = \frac{t_m(i, j)}{1 + k_2 \Delta \theta} + \frac{k_2 \Delta \theta}{1 + k_2 \Delta \theta} t_r(i, j+1) \quad (3)$$

Escrevendo a equação (1) em termos da diferença avançada para a variável tempo ( $j$ ) e diferença centrada para todas as posições axiais ( $i$ ), exceto para a  $n$ -ésima posição que será expressa em termos da diferença atrasada, fica :

$$\frac{t_r(i, j+1) - t_r(i, j)}{\Delta \theta} + \frac{U t_r(i+1, j+1) - t_r(i-1, j+1)}{2 \Delta x} + k_2 [t_r(i, j+1) - t_m(i, j+1)] = 0$$

$$t_p(i, j+1) - t_p(i, j) + \frac{U \Delta \theta}{2 \Delta x} [t_p(i+1, j+1) - t_p(i-1, j+1)] +$$

$$+ k_2 \Delta \theta [t_p(i, j+1) - t_m(i, j+1)] = 0 \quad (4)$$

Substituindo a equação (3) na equação (4) e denominando as constantes  $c_1$  e  $c_2$  temos :

$$c_1 = \frac{U \Delta \theta}{2 \Delta x} \quad \text{e} \quad c_2 = k_2 \Delta \theta$$

$$t_p(i, j+1) - t_p(i, j) + c_1 [t_p(i+1, j+1) - t_p(i-1, j+1)] +$$

$$+ k_2 \Delta \theta \left[ t_p(i, j+1) - \frac{t_m(i, j)}{1 + k_2 \Delta \theta} - \frac{k_2 \Delta \theta t_p(i, j+1)}{1 + k_2 \Delta \theta} \right] = 0$$

$$t_p(i, j+1) - t_p(i, j) + c_1 [t_p(i+1, j+1) - c_2 t_p(i-1, j+1)] +$$

$$+ k_2 \Delta \theta t_p(i, j+1) - \frac{k_2 \Delta \theta t_m(i, j)}{1 + k_2 \Delta \theta} - \frac{k_2 \Delta \theta k_2 \Delta \theta t_p(i, j+1)}{1 + k_2 \Delta \theta} = 0$$

fazendo  $c_3 = \frac{k_2 \Delta \theta}{1 + k_2 \Delta \theta}$  e  $c_4 = \frac{k_2 \Delta \theta k_2 \Delta \theta}{1 + k_2 \Delta \theta}$

agrupando os termos semelhantes fica :

$$(1+c_2-c_4) t_p(i, j+1) + c_1 t_p(i+1, j+1) = t_p(i, j) + c_3 t_m(i, j) +$$

$$+ c_2 t_p(i-1, j+1)$$

fazendo  $c_5 = 1 + c_2 - c_4$

$$c_5 t_p(i, j+1) + c_1 t_p(i+1, j+1) = t_p(i, j) + c_3 t_m(i, j) +$$

$$+ c_2 t_p(i-1, j+1) \quad (5)$$

válida para  $i = 2$  até  $n-1$

para a n-ésima posição a equação (1) fica :

$$\frac{t_p(i,j+1) - t_p(i,j)}{\Delta\theta} + \frac{U t_p(i,j+1) - t_p(i-1,j+1)}{\Delta x} + k_2 [t_p(i,j+1) - t_w(i,j+1)] = 0$$

$$t_p(i,j+1) - t_p(i,j) + \frac{U\Delta\theta}{\Delta x} [t_p(i,j+1) - t_p(i-1,j+1)] + k_2\Delta\theta [t_p(i,j+1) - t_w(i,j+1)] = 0 \quad (6)$$

substituindo a equação (3) na equação (6) e fazendo

$$c_6 = \frac{U\Delta\theta}{\Delta x} = 2 c_2 \quad \text{fica:}$$

$$t_p(i,j+1) - t_p(i,j) + c_6 t_p(i,j+1) - c_6 t_p(i-1,j+1) + c_2 t_p(i,j+1) - \frac{k_2\Delta\theta t_w(i,j)}{1 + k_2\Delta\theta} - \frac{k_2\Delta\theta k_2\Delta\theta t_p(i,j+1)}{1 + k_2\Delta\theta} = 0$$

$$t_p(i,j+1) - t_p(i,j) + c_6 t_p(i,j+1) - c_6 t_p(i-1,j+1) + c_2 t_p(i,j+1) - c_6 t_w(i,j) - c_2 t_p(i,j+1) = 0$$

reagrupando os termos semelhantes :

$$- c_6 t_p(i-1,j+1) + (1+c_2-c_6+2c_2) t_p(i,j+1) = t_p(i,j) + c_6 t_w(i,j)$$

fazendo :

$$c_7 = 1+c_2-c_6+2c_2$$

temos :

$$-c_6 t_p(i-1,j+1) + c_7 t_p(i,j+1) = t_p(i,j) + c_6 t_w(i,j) \quad (7)$$

válida para  $i = n$

Desenvolvendo as equações (5) e (7) temos :

$$i=2$$

$$c_0 t_\varphi(2,j+1) + c_1 t_\varphi(3,j+1) = c_1 t_\varphi(1,j+1) + t_\varphi(2,j) + c_0 t_\omega(2,j)$$

$$i=3$$

$$-c_1 t_\varphi(2,j+1) + c_0 t_\varphi(3,j+1) + c_1 t_\varphi(4,j+1) = t_\varphi(3,j) + c_0 t_\omega(3,j)$$

$$i=4$$

$$-c_1 t_\varphi(3,j+1) + c_0 t_\varphi(4,j+1) + c_1 t_\varphi(5,j+1) = t_\varphi(4,j) + c_0 t_\omega(4,j)$$

·  
·  
·

$$i=n$$

$$-c_0 t_\varphi(n-1,j+1) + c_1 t_\varphi(n,j+1) = t_\varphi(n,j) + c_0 t_\omega(n,j)$$

As quais colocadas na forma de matriz geram uma matriz tridiagonal do tipo :

$$\begin{bmatrix} c_0 & c_1 & & & \\ -c_1 & c_0 & c_1 & & \\ & -c_1 & c_0 & c_1 & \\ & \dots & \dots & \dots & \\ & & & & -c_0 & c_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} t_\varphi(2,j+1) \\ t_\varphi(3,j+1) \\ t_\varphi(4,j+1) \\ \cdot \\ \cdot \\ t_\varphi(n,j+1) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix}
 c_1 t_p(1, j+1) + t_p(2, j) + c_2 t_m(2, j) \\
 t_p(3, j) + c_2 t_m(3, j) \\
 t_p(4, j) + c_2 t_m(4, j) \\
 \dots \\
 \dots \\
 t_p(n, j) + c_2 t_m(n, j)
 \end{bmatrix}$$

Esta matriz é resolvida dentro do programa de computador através do método de Gauss, conhecendo-se os valores das constantes  $k_1, k_2, c_1$  a  $c_7$ , uma vez definidos os incrementos de posição axial ( $\Delta x$ ) e o do tempo ( $\Delta t$ ).



APÊNDICE B

LISTAGEM DO PROGRAMA DE CÁLCULO DOS COEFICIENTES  
DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-SÓLIDO

Program ctt:

{ calculo de coeficientes troca termica para  
leito de particulas }

const PO=0.938; { pressao atmosferica }  
Cs=1046.70; { calor esp. do solido (J/KgK) }  
Ros=2200; { densidade do solido (Kg/m3) }  
DO=1.807; { diametro do orificio p/ medicao de vazao (cm) }  
Dv=9.8E-02; { diametro do leito (m) }  
Bb=0.344241; { relacao do/dt do medidor de vazao }  
PI=3.1416;

Label 5,10:

{ variaveis globais }

Type Tta = array[1..3,1..50] of real;

Tte = array[1..3,1..1001] of real;

Ttc = array[1..100,1..2] of real;

Tcl = array[1..1001] of real;

Ttm = array[1..100] of real;

Str8 = String[8];

var

arqteste: text; { arquivo dos testes a processar }

entrada:Str8;

saida:Str8;

Ta:Tta; {valores de tempo e temperatura teste }

Te:Tte; {valores interpolados de tempo e temp. }

Tc:Ttc; { temp. calc. do fluido no leito para dois Dt seguidos }

Ts:Ttc; { temp. calc. do solido no leito para dois Dt seguidos }

Tcc:Tcl; { temp. calc. do fluido na saida do leito }

Tcs:Tcl; { temp. calc. do solido na saida do leito }

Tm:Ttm; { temperaturas medias para cada Dx }

Tmm:Ttm; { temperaturas medias atualizadas apos cada iteracao }

Rof:Ttm; { densidades medias para cada Dx }

U:Ttm; { velocidades medias para cada Dx }

Cf:Ttm; { calor especifico medio para cada Dx }

Dp, { diametro da particula }

Esf, { esfericidade da particula }

Eps, { porosidade do leito }

Lx, { altura do leito }

Dpp1, { perda de carga na seccao inferior do leito }

Dpp2, { perda de carga na seccao superior do leito }

Tl, { temperatura inicial do leito }

Hw, { delta p no medidor de vazao }

Tp, { temperatura no medidor de vazao }

Pp, { pressao no medidor de vazao }

Dt, { incremento da variavel tempo }

Xx, { incremento da variavel espaco }

Ar, { area seccao transversal do leito (m2) }

Ae, { area especifica do solido (m2/m3) }

Pmm, { pressao media no leito (Kg/cm2 abs) }

icont, { contador de interpolacao }

ix, { variavel de interpolacao das temperatura }

war, {vazao de ar}

Txm, {temperatura media do leito}

Roxf, {densidade media do fluido}

Visxm, {viscosidade media do fluido}

```

Kf,      [condutividade media do fluido]
Ux,      [velocidade na secao transversal do leito]
Re,      [numero de Reynolds da particula]
Nu,      [numero de Nusselt]
Ct1,     [coeficiente de troca termica arbitrado]
Ct2,     [coeficiente de troca termica calculado]
K2,      [parametro da equacao de troca]
V1,      [somatorio dos quadrados dos desvios]
V2,      [somatorio dos quadrados dos desvios atualizado]
Ers:     [erro de ajuste curvas temp. exp. e calculada]
real:

```

```

N,      [ numero de intervalos da variavel espaco ]
LI,     [ numero de intervalos da variavel tempo ]
I,      [ indexador da variavel espaco ]
J,      [ indexador da variavel tempo ]
Obs,    [ numero de leituras de temperatura ]
X,      [ contador de interpolacao ]
Kz,     [ variavel de controle ]
Kl,     [ variavel de controle ]
Kk,     [ contador da variavel tempo ]
Fq:     [ variavel de controle de impressao ]
Integer:

```

```

Function Vazao (Hhw, Ppp, Ttp: real): real:
var Ao,   [ area do orificio do medidor de vazao ]
    A,B:  [ valores intermediarios ]
    real:
begin
Ao:=PI*sqr(DD)/4;
A:=2.184365*Ao*(1-(0.41+0.35*(Sqr(Sqr(Bb))))*Hhw/(1400*(Ppp+PD)));
B:=Sqrt(670.133432*Hhw*(Ppp+PD)/(Ttp+273.15));
Vazao:=A*B;
end;

```

```

Function Visc (Ttxm: real): real:
var C,D: [valores intermediarios ]
    real:
begin
C:=0.000402+7.4582E-05*Ttxm-5.7171E-08*Sqr(Ttxm);
D:=2.9928E-11*exp(3*Ln(Ttxm))-8.2524E-15*exp(4*Ln(Ttxm));
Visc:=(C+D)*3.8;
end;

```

[ leitura do arquivo de dados de disco ]

```

procedure Learq(var Ta: Tta:var Dp,Esf,Eps,Lx,Tl,Hw,Tp,Pp,Dpp1,Dpp2: real;
    var Num,N,LI,Fq: Integer);
var
    arq:text;
    Tt:array[1..3,1..50] of string(6);
    T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12: string(6);
    J,Cod: Integer;
begin
assign(arq,entrada);
reset(arq);
readln(arq,saida);
readln(arq,T1);readln(arq,T2);readln(arq,T3);
readln(arq,T4);readln(arq,T5);readln(arq,T6);
readln(arq,T7);readln(arq,T8);readln(arq,T9);

```

```

readln(arq, i10); readln(arq, i11); readln(arq, i12);
J:=0;
while not EOF (arq) do
begin
  J:=J+1;
  readln (arq, TT[1, J], TT[2, J], TT[3, J]);
  write (TT[1, J]:6, ' ');
  write (TT[2, J]:6, ' ');
  writeln (TT[3, J]:6);
end;
Num:=J;
close (arq);
Val(T1, Dp, cod):Val(T2, Esf, cod):Val(T3, Eps, cod):Val(T4, Lx, cod):
Val(T5, Dpp1, cod):Val(T6, Dpp2, cod):Val(T7, Hw, cod):Val(T8, Tp, cod):
Val(T9, Pp, cod):Val(T10, N, cod):Val(T11, Li, cod):Val(T12, Fq, cod):
for J:=1 to Num do
begin
  val(TT[1, J], Ta[1, J], cod):
  val(TT[2, J], Ta[2, J], cod):
  Ta[2, J]:=1.054+18.741*Ta[2, J];
  val(TT[3, J], Ta[3, J], cod):
  Ta[3, J]:=1.054+18.741*Ta[3, J];
end;
  T1:=Ta[3, 1];
end;

[ Interpolacao dos valores de tempo e temperatura do arquivo lido ]
procedure interpola( var Ta:Tta; var Te:Tte; var Lll, Oobs: integer;
                    var Ddt, llx: real);
  var J, lcont, X: integer;
  var Rs: real;
begin
  Ddt:=Ta[1, Oobs]/Lll;
  llx:=10/Ddt;
  Rs:=Frac(llx);
  if Rs<>0
  then begin
    writeln(' Escolha novo valor para o numero de intervalos');
    writeln(' para a variavel tempo, pois com o presente ');
    writeln(' valor nao foi possivel dividir a duracao do');
    writeln(' teste em numero inteiro !!');
    writeln; writeln(' ... recomece o processamento ...');
    repeat until keypressed;
  end
  else begin
    X:=1;
    Te[1, X]:=Ta[1, 1]; Te[2, X]:=Ta[2, 1]; Te[3, X]:=Ta[3, 1];
    for J:=1 to Oobs-1 do
      begin
        lcont:=0;
        while lcont<llx do
          begin
            X:=X+1;
            lcont:=lcont+1;
            Te[1, X]:=Ta[1, J]+((Ddt*lcont)/10)*((Ta[1, (J+1)]-Ta[1, J]));
            Te[2, X]:=Ta[2, J]+((Ddt*lcont)/10)*((Ta[2, (J+1)]-Ta[2, J]));
            Te[3, X]:=Ta[3, J]+((Ddt*lcont)/10)*((Ta[3, (J+1)]-Ta[3, J]));
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

[ calculo das propriedades medias do escoamento ]

```
procedure Propmed(var Rof:Ttm; var U:Ttm; var Tm:Ttm; var Cf:Ttm;
                 var Nn,JJ:Integer; var Wwar,Ddpp1,Ddpp2,Aar,Eeps: real)
var
  P:Ttm;
  Pm:Ttm;
  E,F: real;
  I: Integer;
begin
  for I:=1 to Nn do
  begin
    P[I]:=(1-(I-1)/(Nn-1))*Ddpp1+Ddpp2;
  end;
  for I:=2 to Nn do
  begin
    Pm[I]:=(P[I-1]+P[I])/2000+P0;
    Rof[I]:=Pm[I]*28.988/(0.08478*(Tm[I]+273.15));
    U[I]:=Wwar/(Rof[I]*Aar*3600*Eeps);
    E:=0.231754+1.821556E-05*(Tm[I]+273.15)+3.959816E-08*Sqr((Tm[I]+273.15));
    F:=-1.82121E-11*Exp(3*Ln((Tm[I]+273.15)));
    Cf[I]:=(E+F)*4186.8;
  end;
end;
```

[ montagem e solucao do sistema de equacoes ]

```
procedure solucao(var Rof:Ttm; var Cf:Ttm; var U:Ttm; var Te:Tte; var Tc:Ttc;
                 var Ts:Ttc; var Tcc:Tcl; var Tss:Tcl; var Nn,L11,Kkz,JJ:
                 Integer; var Cct1,Cct2,Kk2,Aae,Eeps,Ddt,Xxx:real);
var
  K1: Ttm; [ parametros das equacoes ]
  Aa: Ttm; [ const. de formacao do Jacobiano ]
  Bb: Ttm; [ idem ]
  Cc: Ttm; [ idem ]
  Dd: Ttm; [ idem ]
  Ee: Ttm; [ idem ]
  Ff: Ttm; [ idem ]
  Gg: Ttm; [ idem ]
  Beta: Ttm; [ param. de resolucao da matr. tridiagonal ]
  Gama: Ttm; [ idem ]
  Phi: Ttm; [ idem ]
  A: Ttm; [ elem. da matriz tridiagonal ]
  B: Ttm; [ idem ]
  C: Ttm; [ idem ]
  Tmm: Ttm; [ atualizacao das temp. medias para Dx a cada Dt ]
  K, I, Last: Integer;
```

```
begin
  if Kkz <> 1
  then begin
    for I:=2 to Nn do
    begin
      K1[I]:=Cct2*Aae/(Rof[I]*Cf[I]*Eeps);
    end;
    Kk2:=Cct2*Aae/((1-Eeps)*Ros*Cs);
  end
  else begin
    for I:=2 to Nn do
    begin
      K1[I]:=Cct1*Aae/(Rof[I]*Cf[I]*Eeps);
    end;
    Kk2:=Cct1*Aae/((1-Eeps)*Ros*Cs);
  end;
end;
```

```

begin
  Aa[1]:=U[1]*Ddt*100/(2*Xxx);
  Bb[1]:=K1[1]*Ddt;
  Cc[1]:=K1[1]*Ddt/(1+Kk2*Ddt);
  Dd[1]:=K1[1]*Kk2*egr(Ddt)/(1+Kk2*Ddt);
  Ee[1]:=1+Bb[1]-Dd[1];
  Ff[1]:=1+Bb[1]-Dd[1]+2*Aa[1];
  Gg[1]:=2*Aa[1];
end;

[ colocacao do vetor Phi[1] ]
Phi[2]:=Aa[2]*Te[2,J]+1)+Tc[2,1]+Cc[2]*Ts[2,1];
for I:=3 to Nn do
  begin
    Phi[I]:=Tc[I,1]+Cc[I]*Ts[I,1];
  end;

[ colocacao dos elementos da matriz tridiagonal ]
B[2]:=Ee[2];C[2]:=Aa[2];
for I:=3 to Nn-1 do
  begin
    A[I]:=-Aa[I];
    B[I]:=-Ee[I];
    C[I]:=Aa[I];
  end;
A[Nn]:=-Gg[Nn];
B[Nn]:=Ff[Nn];

[ resolucao do sistema - metodo de Gauss ]
Beta[2]:=B[2];
Gama[2]:=Phi[2]/Beta[2];
for I:=3 to Nn do
  begin
    Beta[I]:=B[I]-A[I]*C[I-1]/Beta[I-1];
    Gama[I]:=(Phi[I]-A[I]*Gama[I-1])/Beta[I];
  end;

[ calculo do vetor solucao temp. da fase fluida ]
Tc[Nn,2]:=Gama[Nn];
Last:=Nn-2;
for K:=1 to Last do
  begin
    I:=Nn-K;
    Tc[I,2]:=Gama[I]-C[I]*Tc[I+1,2]/Beta[I];
  end;
end;

[ rotina de atualizacao das temp. medias a cada iteracao ]
procedure atualiza( var Te:Tte; var Tc:Ttc; var Tmm:Ttm; var Nn,J:Integer);
begin
  Tmm[2]:=(Te[2,J]+1)+Tc[2,2])/2;
  for I:=3 to Nn do
    begin
      Tmm[I]:=(Tc[I-1,2]+Tc[I,2])/2;
    end;
end;

[ calculo das temp. da fase solida e guarda de valores ]
procedure arquiva( var Tc:Ttc; var Ts:Ttc; var Tcc:Tcl; var Tss:Tcl;
var Nn,J: Integer; var Kk2,Ddt: real);
begin
  for I:=2 to Nn do
    begin
      Te[I,2]:=Ts[I,1]/(1+Kk2*Ddt)+Kk2*Ddt*Tc[I,2]/(1+Kk2*Ddt);
    end;
end;

```

```

Tcc(JJ+1):=Tc(Nn,2);
Tss(JJ+1):=Ts(Nn,2);
for I:=2 to Nn do
  begin
    Tc(I,1):=Tc(I,2);
    Ts(I,1):=Ts(I,2);
  end;
end;

[ calculo do erro do ajuste das curvas exp. e calc. ]
procedure erro( var Te:Tte; var Tcc:Tcl; var Lll,Kkk,Kki: Integer;
  var V2,T1, Ddt, Eers: real);
  var
    Jx,Jy,Jz: Integer;
    T0,T1,T2,Xin: real;
begin
  V2:=0;T0:=Te(3,Lll+1)-T1;
  T1:=0.05*T0+T1;T2:=0.95*T0+T1;
  Jx:=1;
  while Te(3,Jx)<T1 do
    begin
      Jx:=Jx+1;
    end;
  Jy:=Jx-1;
  while Te(3,Jx)<T2 do
    begin
      Jx:=Jx+1;
    end;
  Jz:=Jx;
  for Jx:=Jy to Jz do
    begin
      V2:=V2+sqr(Te(3,Jx)-Tcc(Jx));
    end;
  Xin:=0;
  for Jx:=Jy+1 to Jz-1 do
    begin
      Xin:=Xin+2*sqr((Te(3,Jx)-Tcc(Jx))/T0);
    end;
  Eers:=sqrt(Ddt*(sqr((Te(3,Jy)-Tcc(Jy))/T0)+Xin+sqr((Te(3,Jz)-Tcc(Jz))/T0))
    /(2*Ddt*(Jz-Jy)));
  writeln('KK=',Kkk,' KI=',Kki,' V2=',V2:10:2,' ERRO=',Eers:6:4);
end;

[ rotina para arquivamento em disco dos resultados finais ]
procedure Imprima( var Te:Tte; var Tcc:Tcl; var Tss:Tcl; var Lll,Ffq: Integer;
  var Ddp,Eesf,Eeps,Lix,Wwar,XXX,Ddt,Ttxm,Uux,Vvlsxm,Rre,Nnu,
  Cct1,Eers: real);
  var
    arq:text;
    Jt: Integer;
begin
  Ttxm:=Ttxm-273.15;Vvlsxm:=Vvlsxm/3.6;
  assign(arq,saida);
  rewrite(arq);
  writeln(arq,'          Numero do teste          =          ',entrada);

```

```

writein(arq, '      Diametro da partícula (mm)           = ', Ddp:8:2);
writein(arq, '      Esfericidade da partícula             = ', Eesf:8:3);
writein(arq, '      Porosidade do leite                          = ', Eeps:8:4);
writein(arq, '      Altura do leite (cm)                        = ', Llx:8:2);
writein(arq, '      Vazao de ar (Kg/h)                          = ', Wwar:8:2);
writein(arq, '      Intervalo da var. espaco (cm)              = ', Xxx:8:2);
writein(arq, '      Incremento da var. tempo (seg)             = ', Ddt:8:2);
writein(arq, '      Temp. media do leite (°C)                  = ', Ttxm:8:1);
writein(arq, '      Velocidade na secao transv. (m/s)         = ', Uux:8:2);
writein(arq, '      Viscosidade media do fluido (Cp)          = ', Vvisxm:8:4);
writein(arq, '      Numero de Reynolds                          = ', Rre:8:0);
writein(arq, '      Numero de Nusselt                          = ', Nnu:8:2);
writein(arq, '      Coef. troca Termica (W/m2K)               = ', Cct1:8:2);
writein(arq, '      Erro de ajuste das curvas                  = ', Eers:8:4);
writein(arq, ' ');
writein(arq, '      Tempo versus temp. exp. e calculadas');
writein(arq, ' ');
writein(arq, '      Tempo (seg)', '      Temp. exp. (°C)', '      Temp. gas ',
      '      calc. (°C)', '      Temp. solido calc. (°C)');
writein(arq, ' ');
Jt:=1;
while Jt <= Lll+1 do
  begin
    writein(arq, '      ', Te(1,Jt):8:1, Te(3,Jt):20:1, Tcc(Jt):20:1, Tss(Jt):20:1);
    Jt:=Jt+Ffq;
  end;
close(arq);
end;

      [ programa principal ]
begin
assign(arqteste, 'testes');
reset(arqteste);
While not EOF(arqteste) do
  begin
    readin(arqteste, entrada);
    ClrScr;
    gotoxy(5,5):writein ('Programa de calculo de coeficiente');
    gotoxy(5,8):writein (' troca termica gas-solido');
    Learq(Ta, Dp, Esf, Eps, Lx, Tl, Hw, Tp, Pp, Dpp1, Dpp2, Obs, N, Ll, Fq);

    Interpola (Ta, Te, Ll, Obs, Dt, lx);

      [ calculos iniciais de variaveis ]
    Xx:=Lx/N;
    Ar:=Pi*Sqr(Dv)/4;
    Ae:=8*(1-Eps)*1000/(Dp*Esf);
    Pmm:=P0+(Dpp1+2*Dpp2)/2000;
    Tp:=1.054+18.7410*Tp;
    War:=Vazao(Hw, Pp, Tp);
    Txm:=(Ta[2,Obs]+Tl)/2+273.15;
    Roxf:=Pmm*28.986/(0.08478*Txm);
    Vvisxm:=Visc(Txm);
    Kf:=8.1635E-03+4.9386E-05*Txm;
    Ux:=War/(Roxf*Ar*3600);
    Re:=War*Dp*Esf/(Ar*Vvisxm*1000);
    Nu:=0.123*exp(0.83*Ln(Re/Eps));
    Ct2:=Trunc(Nu*Kf*860/(Dp*Esf)-15);
    writein(' ');
  end;
end;

```



```

writein(' ... processando dados de entrada, aguarde ... ');
write(' Numero do teste = ');writein(entrada);
write(' Numero de Reynolds = ');writein(Re:8:0);
writein(' Ct2= ',Ct2:8:2);

Kz:=0;Kk:=0;Kl:=1;

5:Kk:=Kk+1;
writein('kk=',Kk,' Ct=',Ct2:8:2,' Kl=',Kl);

[ inicializacao das temperaturas do fluido e do solido ]
for i:=2 to N do
begin
Tc[i,1]:= T1;
Ts[i,1]:= T1;
end;
J:=0;
Tcc[J+1]:= T1;Tss[J+1]:= T1;
[writein('J=',J+1,' Tcc[J+1]=',Tcc[J+1]:8:2,' Tss[J+1]=',Tss[J+1]:8:2);]

[ Calculo das temp. fase fluida para o coef. arbitrado ]
for J:=1 to L1 do
begin
Tm[2]:=(Tc[2,J+1]+Tc[2,1])/2;
[writein('Tc[2,J+1]=',Tc[2,J+1],'Tc[2,1]=',Tc[2,1],'Tm[2]=',Tm[2]);]
for i:=3 to N do
begin
Tm[i]:=(Tc[i-1,1]+Tc[i,1])/2;
[writein('Tc[i-1,1]=',Tc[i-1,1],'Tc[i,1]=',Tc[i,1],'Tm[i]=',Tm[i]);]
end;
10:Propmed (Rof,U,Tm,Cf,N,J,War,Dpp1,Dpp2,Ar,Eps);
Solucao (Rof,Cf,U,Te,Tc,Ts,Tcc,Tss,N,L1,Kz,J,Ct1,Ct2,K2,Ae,Eps,Dt,XX);
Atualiza (Te,Tc,Tmm,N,J);
for i:=2 to N do
begin
[writein('Tmm=',Tmm[i]:8:1,' Tm=',Tm[i]:8:1);]
if (Tmm[i]-Tm[i])>0.1
then begin
[cont:=cont+1;writein('cont=',cont);]
for i:=2 to N do
begin
Tm[i]:=Tmm[i];
end;
goto 10;
end;
end;
Arquiva (Te,Ts,Tcc,Tss,N,J,K2,Dt);
end;
Erro (Te,Tcc,L1,Kk,Kl,V2,T1,Dt,Ers);
if Kk=1
then begin
Ct1:=Ct2;V1:=V2;
Ct2:=Ct1+Trunc(sqrt(0.4*V2));
goto 5;
end
else begin
if (V1-V2)>0.005
then begin
Ct1:=Ct2;
V1:=V2;

```

```

Case KI of
  1: begin
    Ct2:=Ct1+10;
    KI:=1;
    goto 5;
  end;
  2: begin
    Ct2:=Ct1-2;
    KI:=2;
    goto 5;
  end;
  3: begin
    Ct2:=Ct1+0.5;
    KI:=3;
    goto 5;
  end;
  4: begin
    Ct2:=Ct1-0.1;
    KI:=4;
    goto 5;
  end;
end;
end
else begin
Ct1:=Ct2;
V1:=V2;
Case KI of
  1: begin
    Ct2:=Ct1-2;
    KI:=2;
    goto 5;
  end;
  2: begin
    Ct2:=Ct1+0.5;
    KI:=3;
    goto 5;
  end;
  3: begin
    Ct2:=Ct1-0.1;
    KI:=4;
    goto 5;
  end;
  4: begin
    if Kz<>1
      then begin
        Kz:=1;
        goto 5;
      end
      else begin
        Nu:=Ct1*Op*Esf/(880*Kf);
        Imprima (Te,Tcc,Tss,Ll,Fq,Op,Esf,Eps,Lx,
        War, Xx,Dt,Txm,Ux,Vlaxm,Re,Nu,Ct1,Ers);
      end;
    end;
  end;
end;
end;
end;
close(arqteste);
end.

```

APÊNDICE C

TABELAS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE QUEDA  
DE PRESSÃO

C.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE QUEDA DE PRESSÃO  
EM LEITOS DE ESFERAS DE CERÂMICA

TABELA C.1.1

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TCA    D = 9,8 cm  
L = 5 cm  
 $\epsilon = 0,9807$   
D/dp = 23,5

PARTÍCULA    dp = 4,17 mm

W (Kg/h)	Um (cm/s)	Re	$\Delta P$ (cm c.a.)	Re/(1- $\epsilon$ )	fv
22,49	74,43	193	1,70	312	627,71
22,66	98,03	255	2,80	412	785,03
38,78	127,90	334	4,20	539	902,53
43,96	144,70	378	5,50	611	1044,63
50,92	167,28	438	6,90	707	1133,68
61,06	199,87	525	9,20	848	1265,08
70,53	230,20	606	11,60	979	1384,22
75,40	245,53	648	13,00	1047	1454,38
19,59	64,96	168	1,40	272	591,66
31,74	104,98	273	3,20	440	836,87
33,00	109,13	284	3,30	458	830,21
38,56	127,32	331	4,30	535	927,20
40,01	132,04	344	4,50	555	935,64
47,28	155,73	406	6,00	656	1057,79
58,47	191,82	502	8,50	811	1216,54
65,03	213,20	558	10,30	901	1323,85
73,28	239,60	628	12,50	1015	1429,56
76,21	248,59	654	12,90	1056	1423,14

TABELA C.1.2

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TCB

D = 8,8 cm  
L = 5 cm  
= 0,3847  
D/dp = 16,0

PARTÍCULA

dp = 6,10 mm

W (Kg/h)	Um (cm/s)	Re	$\Delta P$ (cm c.a.)	Re/(1- $\epsilon$ )	f <sub>v</sub>
21,28	71,80	264	1,20	429	1017,38
26,88	90,45	334	1,70	543	1141,01
32,13	108,03	399	2,20	649	1236,28
40,56	136,20	504	3,20	819	1426,28
48,21	161,63	599	4,40	973	1652,59
55,79	186,72	693	5,50	1127	1788,13
60,67	202,83	754	6,20	1225	1855,62
65,94	220,12	819	7,40	1332	2040,64
69,39	231,61	861	8,00	1400	2095,12
75,33	251,01	935	9,00	1520	2174,89
81,89	272,32	1017	10,80	1652	2405,64
87,36	289,94	1085	12,00	1763	2510,48
19,05	63,55	239	1,00	388	962,73
26,78	89,23	335	1,60	545	1097,01
32,28	107,48	404	2,20	657	1252,28
47,95	159,20	600	4,20	976	1613,98
70,52	232,73	889	8,40	1435	2208,16

TABELA C.1.3

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TCD  $D = 9,8$  cm  
 $L = 5$  cm  
 $\epsilon = 0,3744$   
 $D/dp = 23,5$

PARTÍCULA  $dp = 4,17$  mm

W (Kg/h)	Um (cm/s)	Re	$\Delta p$ (cm c. a.)	Re/(1- $\epsilon$ )	f <sub>v</sub>
17,28	57,61	148	1,30	236	575,09
19,80	65,98	169	1,70	271	656,71
24,66	82,09	211	2,30	337	714,08
29,68	98,71	254	3,20	406	826,25
34,97	116,20	299	4,20	478	920,69
40,20	133,36	344	5,20	549	993,27
44,98	149,02	385	6,10	615	1042,70
51,16	169,09	438	7,70	699	1159,99
57,65	190,22	493	9,10	788	1217,94
59,58	196,44	509	9,80	814	1270,13
67,55	221,92	577	12,10	923	1388,14
71,18	233,49	608	13,10	973	1428,42
77,59	254,23	662	15,40	1058	1539,74
75,00	245,96	640	14,70	1023	1519,13
82,99	271,06	708	17,40	1132	1631,67
92,29	300,04	788	20,60	1259	1745,15
99,79	323,71	850	23,60	1359	1849,65
111,62	359,90	951	28,50	1520	2009,09

TABELA C.1.4

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TCE  $D = 29,8$  cm  
 $L = 15$  cm  
 $\varepsilon = 0,3790$   
 $D/d_p = 42,9$

PARTÍCULA  $d_p = 6,94$  mm

W (Kg/h)	U <sub>m</sub> (cm/s)	Re	$\Delta p$ (cm c.á.)	Re/(1- $\varepsilon$ )	f <sub>v</sub>
65,55	23,27	102	0,60	165	847,07
80,88	28,70	126	0,80	203	899,58
89,42	31,73	140	0,90	225	711,95
103,12	36,58	161	1,10	259	754,78
115,08	40,81	180	1,30	289	799,54
131,24	46,50	205	1,70	330	917,45
144,05	51,03	225	1,90	362	934,53
157,84	55,88	246	2,30	397	1033,06
176,24	62,37	275	2,50	443	1006,05
191,85	69,66	293	3,00	471	1057,70
206,52	75,02	315	3,40	508	1113,17
233,55	84,72	357	4,20	574	1217,58
253,55	91,89	387	4,80	624	1282,97
276,70	100,18	423	5,40	680	1323,89
298,30	107,88	456	6,10	734	1388,83
327,26	118,12	500	7,30	805	1517,86
326,24	115,57	506	7,20	814	1552,90
392,43	138,38	608	10,00	979	1801,32
405,55	142,88	629	10,50	1012	1831,87
362,11	127,85	562	8,80	904	1716,62
339,19	119,96	526	7,78	847	1621,63

TABELA C.1.5

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TCF

D = 29,8 cm

L = 15 cm

 $\epsilon = 0,3718$ 

D/dp = 21,5

PARTÍCULA

dp = 13,83 mm

W (Kg/h)	Um (cm/s)	Re	$\Delta P$ (cm c.a.)	Re/(1- $\epsilon$ )	f <sub>v</sub>
133,12	50,57	393	0,70	625	1034,69
157,07	59,63	463	1,10	737	1378,91
174,58	66,26	515	1,20	820	1353,68
198,60	75,34	586	1,50	932	1488,27
225,56	85,48	665	2,10	1059	1836,25
249,32	94,45	735	2,30	1171	1820,13
260,10	98,50	767	2,60	1221	1973,11
274,88	140,02	811	3,00	1290	2155,75
292,45	110,38	864	3,30	1375	2238,75
306,88	115,76	907	3,60	1443	2328,66
328,05	123,67	969	3,90	1543	2361,28
341,44	128,49	1010	4,20	1607	2450,07
352,05	132,43	1041	4,50	1657	2547,06
207,93	79,13	612	1,80	973	1695,55
225,96	85,96	665	2,10	1058	1821,09
261,84	99,43	770	2,70	1225	2024,08
289,88	113,83	882	3,40	1404	2226,48
341,10	129,28	1003	4,30	1597	2479,22
385,76	145,11	1140	5,20	1814	2683,33
403,44	151,66	1192	5,60	1897	2764,91



C.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE QUEDA DE PRESSÃO  
EM LEITOS DE PARTÍCULAS DE XISTO

TABELA C.2.1

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXA       $D = 9,8 \text{ cm}$   
 $L = 5 \text{ cm}$   
 $\epsilon = 0,4506$   
 $D/d_p = 34,1$

PARTÍCULA       $d_p = 2,87 \text{ mm}$   
 $\rho = 0,704$

W (Kg/h)	Um (cm/s)	Re	$\Delta p$ (cm c.a.)	Re/(1- $\epsilon$ )	fv
14,14	47,31	58	1,80	106	512,82
17,53	58,57	72	2,80	132	644,34
19,90	66,36	82	3,20	150	650,44
22,93	76,37	95	3,90	173	688,86
27,06	89,92	112	5,10	204	765,20
31,20	103,48	129	6,40	235	834,44
35,75	118,33	148	7,60	269	866,60
40,36	133,13	167	9,50	304	962,78
45,66	150,12	189	11,50	344	1033,58
49,04	160,81	203	13,00	369	1090,72
50,49	165,37	209	13,80	380	1125,95
53,54	175,33	221	14,80	403	1137,68
58,31	190,30	241	16,80	439	1189,85
62,63	203,88	259	18,90	471	1248,77
64,49	209,39	266	20,20	485	1299,51
53,22	174,35	220	15,20	400	1174,37
60,86	198,25	251	18,50	457	1257,01
73,87	238,19	305	24,80	555	1401,80
85,13	271,61	351	31,60	640	1566,40
103,06	323,05	425	42,60	774	1774,43
109,95	341,94	454	47,70	826	1877,14
116,69	359,26	481	54,40	876	2037,56
122,58	375,63	506	58,50	920	2095,08
127,80	388,67	527	62,50	959	2163,24
148,14	439,65	611	78,00	1112	2386,70
136,75	411,44	563	68,00	1025	2221,01

TABELA C.2.2

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXB

D = 9,8 cm  
 L = 5 cm  
 E = 0,4407  
 D/d<sub>p</sub> = 24,1

PARTÍCULA

d<sub>p</sub> = 4,06 mm  
 ψ = 0,678

W (Kg/h)	Um (cm/s)	Re	ΔP (cm c.a.)	Re/(1-E)	f <sub>v</sub>
14,06	50,12	75	1,80	135	814,94
15,86	58,47	85	2,60	152	989,70
19,16	68,16	103	3,10	184	977,74
23,61	83,73	127	4,70	226	1207,27
28,49	100,87	153	5,80	273	1236,67
31,07	109,85	167	6,70	298	1311,85
34,86	123,77	186	8,00	333	1383,31
38,13	135,01	203	9,70	364	1537,60
41,98	148,36	224	11,00	400	1586,78
44,48	158,36	236	12,30	421	1650,15
50,86	180,19	289	15,50	482	1827,47
55,44	195,71	294	17,80	525	1932,27
58,41	206,82	306	19,70	551	2014,30
64,13	225,92	338	23,00	604	2152,93
67,13	235,91	354	24,70	633	2214,19
72,16	253,04	380	28,00	678	2334,93
56,36	200,31	296	19,10	530	2012,05
70,67	248,04	372	27,30	665	2322,44
77,95	271,24	411	32,00	734	2492,48
81,64	283,05	430	34,40	769	2567,64
89,67	307,91	472	39,80	844	2730,85
101,87	344,37	538	48,70	962	2994,94
110,24	369,20	582	54,80	1041	3143,48
122,74	404,27	648	65,00	1159	3405,07
131,03	424,31	696	70,00	1245	3517,71
142,68	453,86	758	82,20	1356	3861,90
157,65	492,85	838	94,70	1498	4097,19

TABELA C.2.3

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXC

D = 9,8 cm  
L = 5 cm  
 $\epsilon = 0,4356$   
D/dp = 17,6

PARTÍCULA

d $\phi$  = 5,58 mm  
= 0,879

W (Kg/h)	Um (cm/s)	Re	$\Delta p$ (cm c.a.)	Re/(1- $\epsilon$ )	f <sub>v</sub>
20,59	71,79	154	2,80	273	1520,10
26,82	93,30	200	4,60	355	1921,75
33,00	114,51	247	6,30	437	2144,36
38,53	133,56	287	8,20	509	2389,28
43,65	150,99	326	10,00	577	2577,56
51,80	178,40	386	13,30	685	2901,28
55,47	191,67	412	15,30	730	3092,43
62,95	216,70	467	18,30	828	3271,61
67,19	230,35	499	20,80	884	3498,12
73,19	250,47	542	24,10	961	3720,08
80,13	272,64	594	28,00	1052	3970,63
87,41	296,19	647	32,80	1146	4275,08
78,36	267,36	580	27,70	1027	3998,64
86,08	291,99	636	31,90	1127	4212,28
92,45	312,47	683	36,00	1211	4442,10
109,42	364,01	809	48,10	1433	5094,82
121,17	398,38	895	57,30	1587	5545,56
131,02	429,14	963	65,20	1707	5827,37
136,92	445,35	1007	70,80	1783	6097,54
151,24	483,25	1112	83,80	1970	6651,09
165,53	521,87	1214	96,40	2151	7069,18
158,19	501,90	1164	89,80	2057	6850,59
146,33	471,70	1073	78,90	1900	6396,49

TABELA C.2.4

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXD

D = 9,8 cm  
L = 5 cm  
 $\epsilon = 0,4273$   
D/d $\phi$  = 12,3

PARTÍCULA

d $\phi$  = 7,94 mm  
 $\psi = 0,702$

W (Kg/h)	Um (cm/s)	Re	$\Delta p$ (cm c.a.)	Re/(1- $\epsilon$ )	f $v$
15,84	56,39	172	1,70	301	2314,21
22,15	78,79	241	2,80	421	2727,89
26,51	93,89	289	4,00	505	3278,48
28,98	102,58	316	4,40	551	3301,31
34,54	122,07	376	6,20	657	3908,55
38,28	134,28	419	7,10	732	4089,47
45,43	158,98	498	9,70	869	4718,86
53,44	186,49	585	12,60	1022	5225,57
59,21	206,26	648	15,60	1131	5843,69
62,10	216,15	679	16,50	1186	5897,85
69,22	240,03	757	20,30	1322	6534,23
77,16	267,26	843	24,40	1471	7039,83
83,78	289,14	915	27,90	1597	7440,44
92,45	317,45	1009	33,20	1762	8060,09
77,59	268,83	847	23,90	1479	6851,68
81,03	280,18	884	26,70	1544	7344,29
88,78	307,50	984	31,50	1683	7853,57
97,62	336,32	1080	37,30	1851	8502,77
109,94	375,56	1194	45,50	2084	9288,38
112,91	386,66	1221	47,90	2132	9460,01
127,66	433,71	1380	55,80	2410	9824,78
112,29	385,70	1210	47,70	2113	9411,64
144,98	486,80	1556	78,50	2717	12229,90

TABELA C.2.5

## CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXE

$D = 29,8 \text{ cm}$   
 $L = 15 \text{ cm}$   
 $\epsilon = 0,4645$   
 $D/d\phi = 13,4$

## PARTÍCULA

$d\phi = 22,23 \text{ mm}$   
 $\psi = 0,703$

W (Kg/h)	Um (cm/s)	Re	$\Delta p$ (cm c.a.)	Re/(1- $\epsilon$ )	f <sub>v</sub>
115,15	44,05	382	0,80	713	5398,60
131,16	50,16	435	1,00	812	5926,08
145,93	55,80	484	1,10	903	6859,54
163,58	62,51	542	1,50	1013	7132,22
180,95	69,13	600	1,70	1120	7309,61
201,02	76,74	666	2,20	1244	8520,69
216,47	82,62	718	2,40	1340	8633,78
239,15	91,21	793	3,00	1480	9775,79
276,02	105,15	915	3,90	1709	11024,61
257,88	98,29	855	3,50	1596	10584,16
278,99	106,35	924	3,90	1726	10894,68
294,75	112,28	977	4,30	1824	11376,88
307,81	117,20	1020	4,60	1905	11660,10
345,91	131,51	1146	5,70	2140	12876,41
333,38	126,88	1104	5,40	2062	12636,91
327,04	124,51	1089	5,10	2023	12162,93
338,26	128,71	1120	5,60	2092	12918,63
363,78	138,73	1202	6,40	2244	13664,30
350,14	133,60	1157	5,90	2160	13079,81
369,22	140,75	1220	6,70	2278	14099,15
383,89	146,04	1270	7,00	2371	14215,09
389,75	148,17	1289	7,40	2407	14810,56
389,31	146,03	1288	7,30	2405	14624,86

TABELA C.2.6

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXF      D = 29,8 cm  
 L = 15 cm  
 $\epsilon = 0,4595$   
 D/d $\phi$  = 9,4

PARTÍCULA      d $\phi$  = 31,75 mm  
 $\psi = 0,734$

W (Kg/h)	Um (cm/s)	Re	$\Delta P$ (cm c.a.)	Re/(1- $\epsilon$ )	f $\nu$
184,55	59,58	849	0,80	1570	8789,24
213,10	77,10	1099	1,30	2034	11050,22
249,64	90,26	1288	1,70	2382	12342,98
262,99	95,08	1357	1,80	2510	12407,40
322,28	116,43	1861	2,80	3073	15747,82
336,95	121,71	1737	2,90	3213	15802,60
347,00	125,33	1789	3,00	3309	15675,27
369,77	133,47	1906	3,40	3526	16681,98
402,86	145,31	2077	3,90	3843	17575,31
386,20	139,31	1991	3,70	3683	17392,13
377,80	136,32	1947	3,60	3603	17293,64
363,88	131,34	1876	3,40	3470	16951,97
365,14	131,83	1882	3,30	3482	16392,61
301,32	108,83	1554	2,40	2876	14452,56
258,53	83,45	1334	1,90	2467	13324,89
219,52	79,41	1132	1,40	2095	11553,77
179,06	64,82	924	1,00	1709	10111,24

APÊNDICE D

TABELAS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TROCA  
TÉRMICA

D.1 DADOS DOS ENSAIOS DE TROCA TÉRMICA GÁS-PARTÍCULA  
PARA OS LEITOS DE ESFERAS DE CERÂMICA

TABELA D.1.1

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TCB D = 9,8 cm  
L = 5 cm  
 $\epsilon = 0,3847$   
D/dp = 16,0

PARTÍCULA dp = 8,10 mm

número teste	G (Kg/hm <sup>2</sup> )	Re	h <sub>e</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Es (%)	h <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Re/ $\epsilon$	Nu
TCB1	2395	197	87,70	5,24	92,40	512	19,15
TCB5	2898	223	97,90	4,51	103,80	580	21,58
TCB6	3737	303	127,90	4,51	138,20	788	28,29
TCB2	3774	306	125,50	4,26	135,40	795	27,64
TCB7	4474	361	136,00	4,69	147,70	938	30,09
TCB16	4593	376	144,60	3,57	157,90	977	32,54
TCB17	4960	408	154,90	4,54	170,20	1061	35,29
TCB8	5628	452	162,80	3,38	179,80	1175	38,38
TCB19	5602	452	178,10	2,69	198,70	1175	40,34
TCB20	6064	487	178,20	3,75	198,80	1266	40,21
TCB21	6064	487	187,10	2,97	210,00	1266	42,44
TCB23	7002	557	187,80	3,48	210,90	1448	42,25
TCB22	7267	577	187,90	3,48	211,00	1500	42,26



TABELA D.1.2

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TCD

D = 9,8 cm

L = 5 cm

 $\epsilon = 0,3744$ 

D/dp = 23,5

PARTÍCULA

dp = 4,17 mm

número teste	G (Kg/hm <sup>2</sup> )	Re	hc (W/m <sup>2</sup> K)	Es (%)	hc (W/m <sup>2</sup> K)	Re/ $\epsilon$	Nu
TCD1	2168	123	88,50	7,48	91,70	328	13,09
TCD2	2278	130	100,10	6,71	104,20	347	14,98
TCD3	3414	192	145,10	4,77	154,00	513	21,82
TCD4	3379	190	149,30	3,61	158,70	507	22,45
TCD5	4164	233	175,50	0,88	188,60	622	26,54
TCD6	3932	219	170,50	2,38	182,90	585	25,68
TCD7	4511	250	185,90	5,03	200,80	668	28,03
TCD9	5137	282	211,60	2,38	231,10	753	32,05
TCD10	5028	276	230,30	0,97	253,60	737	35,11
TCD12	6134	332	246,40	0,88	273,20	887	37,29
TCD14	6799	358	263,40	2,46	319,50	956	42,48
TCD15	7628	398	296,40	0,64	336,10	1063	44,30
TCD16	7527	391	266,90	1,70	298,60	1044	39,24
TCD17	8683	447	295,40	1,51	334,80	1194	43,59
TCD18	9152	467	323,90	2,99	371,90	1247	48,09

TABELA D.1.3

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TCF

D = 29,8 cm  
 L = 17,5 cm  
 $\epsilon = 0,3718$   
 D/dp = 21,5

PARTÍCULA

dp = 13,83 mm

número teste	G (Kg/hm <sup>2</sup> )	Re	he (W/m <sup>2</sup> K)	Es (%)	hc (W/m <sup>2</sup> K)	Re/ε	Nu
TCF1	2866	496	94,40	1,19	107,80	1334	47,29
TCF2	2678	497	87,90	2,07	99,40	1336	46,50
TCF4	2994	540	90,30	2,71	102,50	1452	46,77
TCF6	4194	713	124,50	0,30	148,90	1918	64,26
TCF7	4118	697	124,40	0,62	148,80	1875	63,86
TCF8	4572	767	136,70	0,69	166,80	2063	70,87
TCF9	4530	760	137,90	1,03	168,60	2044	71,59
TCF11	3339	605	101,00	1,30	116,60	1627	53,39
TCF12	3804	638	106,90	1,06	124,50	1716	55,75
TCF13	3613	631	111,50	0,48	130,80	1697	57,82
TCF14	3849	666	114,70	0,58	135,20	1791	59,13
TCF15	3831	660	118,50	0,26	140,50	1775	61,23
TCF16	4185	702	127,00	0,63	152,60	1888	64,83
TCF17	4303	725	125,60	0,66	150,60	1950	64,25
TCF18	4522	762	131,90	0,73	159,70	2049	68,17
TCF19	5013	841	143,40	1,42	176,80	2262	75,22
TCF20	4997	842	145,90	1,03	180,70	2265	77,09

D.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TROCA TÉRMICA  
GÁS-PARTÍCULA PARA OS LEITOS DE XISTO

TABELA D.2.1

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXA

D = 9,8 cm  
L = 5 cm  
 $\epsilon = 0,4506$   
D/d $\phi$  = 34,1

PARTÍCULA

d $\phi$  = 2,87 mm  
 $\psi = 0,704$

número teste	G (Kg/hm <sup>2</sup> )	Re	h <sub>e</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Es (%)	h <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Re/ε	Nu
TXA1	2279	63	80,80	6,78	83,40	140	5,79
TXA2	2195	61	64,40	9,30	66,00	135	4,61
TXA5	3193	87	99,40	6,85	103,30	193	7,08
TXA6	4059	109	129,00	3,56	135,70	242	9,19
TXA7	3910	105	113,20	5,85	118,30	233	8,01
TXA8	4549	121	158,40	5,44	168,60	269	11,30
TXA10	5109	134	177,40	4,49	190,30	297	12,80
TXA11	5186	136	171,40	4,24	183,40	302	12,15
TXA12	6158	160	204,40	2,42	221,70	355	14,54
TXA13	6081	158	187,90	4,00	202,40	351	13,28
TXA14	7097	182	281,90	1,77	315,80	404	20,64
TXA15	7076	183	262,40	2,58	316,50	408	20,71
TXA16	7859	199	226,40	4,16	247,80	442	16,26
TXA18	9525	243	242,90	3,81	267,70	539	17,27
TXA19	9521	244	289,40	2,97	325,30	542	21,05
TXA21	11211	286	287,40	2,53	322,80	635	20,78

TABELA D.2.2

## CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXB

$D = 9,8 \text{ cm}$   
 $L = 5 \text{ cm}$   
 $\epsilon = 0,4407$   
 $D/d^* = 24,1$

## PARTÍCULA

$d^* = 4,06 \text{ mm}$   
 $\psi = 0,678$

número teste	G (Kg/hm <sup>2</sup> )	Re	h <sub>e</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Es (%)	h <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Re/ε	Nu
TXB1	1988	76	94,20	0,94	99,00	172	9,48
TXB2	1900	73	69,50	5,01	72,10	166	6,94
TXB3	3398	128	124,90	0,87	133,60	290	12,66
TXB4	3398	127	129,70	0,71	139,10	288	13,13
TXB5	3933	146	148,50	0,62	160,90	331	15,03
TXB6	4115	152	143,80	0,73	155,40	345	14,48
TXB7	4483	164	163,80	0,85	179,00	372	16,54
TXB8	4483	164	157,90	1,36	172,00	372	15,86
TXB9	5188	188	182,20	0,80	201,20	427	18,36
TXB10	5102	184	178,80	0,74	197,10	418	17,92
TXB11	6130	218	206,90	0,79	231,80	495	20,81
TXB12	6186	219	208,40	1,50	233,70	487	20,93
TXB13	7152	252	248,40	2,66	285,20	572	25,35
TXB15	7748	273	259,90	2,75	300,50	619	26,78
TXB16	7712	273	234,40	2,72	266,90	619	23,85
TXB17	8220	291	249,90	1,03	287,20	660	25,72
TXB19	9738	340	287,90	1,85	338,50	771	29,87
TXB20	9075	314	262,90	2,92	304,50	713	26,67
TXB21	11445	396	334,40	3,69	404,70	899	35,39
TXB22	11509	400	322,90	3,78	388,00	908	34,11
TXB23	12631	441	300,90	4,97	356,60	1001	31,47
TXB24	12201	426	287,40	1,85	337,80	967	29,81
TXB25	14220	492	334,90	3,33	405,40	1116	35,54
TXB26	14220	492	304,40	3,60	361,60	1116	31,84
TXB27	14578	509	313,40	2,72	374,30	1155	33,00

TABELA D.2.3

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXC

D = 9,8 cm  
 L = 5 cm  
 E = 0,4356  
 D/d $\dagger$  = 17,6

PARTÍCULA

d $\dagger$  = 5,56 mm  
 $\psi$  = 0,678

número teste	G (Kg/hm <sup>2</sup> )	Re	h <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Es (%)	h <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Re/ε	Nu
TXC3	3338	175	118,90	2,62	129,90	402	17,05
TXC4	3412	178	113,80	3,18	123,80	409	16,23
TXC5	4452	230	144,50	4,02	161,10	528	20,88
TXC6	4496	230	142,70	4,81	158,80	528	20,47
TXC7	5812	293	173,90	5,25	198,50	673	25,17
TXC8	5899	296	162,80	5,77	184,10	680	23,24
TXC9	5802	287	176,50	1,82	201,90	659	25,20
TXC10	6368	315	184,40	5,71	212,30	723	26,45
TXC11	7224	354	199,40	4,84	232,40	813	28,77
TXC12	7048	347	198,40	6,09	231,00	797	28,72
TXC13	8153	394	220,90	6,37	262,10	904	31,98
TXC14	7842	379	199,90	5,10	233,10	870	28,45
TXC15	8980	430	215,90	5,87	255,10	987	30,85
TXC16	8958	427	225,40	6,40	268,50	980	32,43
TXC17	9148	434	223,90	5,03	266,40	996	31,92
TXC18	9378	443	224,90	6,58	267,80	1017	32,06
TXC19	9509	466	223,90	4,53	266,40	1070	32,90
TXC20	9660	469	246,90	4,74	299,60	1077	36,80
TXC21	11068	530	231,90	5,13	277,60	1217	33,67
TXC22	10560	508	248,40	5,45	301,80	1166	36,67
TXC23	12306	592	254,40	5,33	310,70	1359	37,72
TXC24	12116	591	267,40	6,00	330,30	1357	40,68
TXC25	12957	632	268,90	4,41	332,60	1451	40,94

TABELA D.2.4

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXD

D = 9,8 cm  
 L = 5 cm  
 E = 0,4273  
 D/d $\phi$  = 12,3

PARTÍCULA

d $\phi$  = 7,94 mm  
 $\psi$  = 0,702

número teste	G (Kg/hm <sup>2</sup> )	Re	hc (W/m <sup>2</sup> K)	Es (%)	hc (W/m <sup>2</sup> K)	Re/E	Nu
TXD1	2222	172	75,90	1,53	82,50	403	16,01
TXD2	2428	188	80,80	1,30	88,30	440	17,18
TXD3	3588	275	97,70	0,68	108,90	644	20,99
TXD4	3527	268	97,50	1,07	108,60	630	20,86
TXD5	4717	358	119,00	1,59	136,00	838	25,90
TXD6	4643	348	126,70	1,26	146,20	817	27,64
TXD7	5508	410	123,30	0,47	141,70	860	26,51
TXD8	5520	407	122,00	0,61	140,00	852	26,04
TXD9	6483	478	139,90	1,51	164,00	1119	30,53
TXD10	6361	469	135,30	0,86	157,70	1099	29,27
TXD11	6956	508	145,50	1,29	171,80	1189	31,59
TXD12	6865	499	145,00	0,51	171,10	1168	31,34
TXD13	7878	570	155,30	0,72	185,60	1334	33,86
TXD14	7786	566	156,30	1,42	187,00	1325	34,25
TXD15	8900	635	160,30	0,63	182,80	1486	34,81
TXD16	8479	605	153,70	0,64	183,30	1416	33,02
TXD17	9944	703	169,90	0,94	206,90	1645	37,02
TXD18	10391	738	190,30	2,29	237,80	1727	42,66
TXD19	9368	681	154,30	0,83	184,20	1594	33,80
TXD20	9639	704	170,50	0,74	207,80	1648	38,21
TXD21	11030	787	177,50	0,66	218,20	1842	39,35
TXD22	11408	814	177,20	0,85	217,80	1905	39,32
TXD23	12320	871	185,80	0,72	230,90	2038	41,26

TABELA D.2.5

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXE

D = 29,8 cm  
 L = 15 cm  
 E = 0,4645  
 D/d $\phi$  = 13,4

PARTÍCULA

d $\phi$  = 22,23 mm  
 $\psi$  = 0,703

número teste	G (Kg/hm <sup>2</sup> )	Re	h <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Es (%)	h <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Re/E	Nu
TXE1	1738	368	46,30	0,89	53,60	792	28,58
TXE2	1790	381	49,40	0,90	57,80	820	30,93
TXE3	2054	437	53,40	0,92	63,40	941	33,91
TXE4	1996	405	48,50	1,35	56,60	872	28,95
TXE5	2510	514	62,50	1,04	76,60	1107	39,59
TXE6	2532	526	63,60	1,14	78,30	1132	40,92
TXE7	2993	596	75,40	3,39	96,90	1283	48,85
TXE8	3108	619	73,80	1,54	94,30	1333	47,44
TXE9	3943	778	89,30	2,07	121,20	1675	60,50
TXE10	3900	773	87,80	1,79	118,50	1664	59,29
TXE11	4566	897	99,30	2,53	140,40	1931	69,90
TXE12	4581	904	98,60	2,11	139,00	1846	69,50
TXE13	5132	999	103,80	2,32	149,60	2151	73,55
TXE14	5157	995	108,00	2,61	158,50	2142	77,39
TXE15	5289	1016	109,10	3,02	160,80	2187	78,28

TABELA D.2.6

CARACTERÍSTICAS DO LEITO TXF

D = 29,8 cm  
 L = 15 cm  
 $\epsilon = 0,4595$   
 $D/d\phi = 9,4$

PARTÍCULA

$d\phi = 31,75$  mm  
 $\phi = 0,734$

número teste	G (Kg/hm <sup>2</sup> )	Re	he (W/m <sup>2</sup> K)	Es (%)	hc (W/m <sup>2</sup> K)	Re/ $\epsilon$	Nu
TXF1	2112	648	56,70	5,76	75,50	1410	58,47
TXF2	2135	649	56,80	6,06	75,70	1412	58,08
TXF3	2451	752	57,50	3,00	77,00	1637	59,55
TXF4	2533	800	60,50	1,89	82,40	1741	65,43
TXF5	2883	872	70,70	3,82	102,60	1898	78,41
TXF6	2678	810	66,30	3,80	93,60	1763	71,46
TXF7	2860	861	74,60	5,48	111,00	1874	84,25
TXF7	3088	943	76,30	4,20	114,80	2052	88,43
TXF9	3198	963	73,20	3,06	107,90	2096	82,26
TXF10	3510	1052	77,90	3,72	118,50	2289	89,65
TXF11	3634	1084	81,90	2,94	128,00	2359	96,32
TXF12	4244	1290	92,60	2,64	156,20	2807	119,86
TXF13	4208	1244	94,50	4,34	161,70	2707	120,78
TXF14	4554	1340	93,80	3,14	159,60	2916	118,65
TXF15	4517	1329	95,40	3,03	164,30	2892	122,09
TXF16	4964	1454	103,80	3,50	190,90	3164	141,35
TXF17	4984	1460	100,60	3,29	180,40	3177	133,85



APÉNDICE E

BIBLIOGRAFIA

APÉNDICE E

BIBLIOGRAFIA

AMUNDSON, N. R., Solid-Fluid Interactions in Fixed and Moving Beds, Ind. and Eng. Chemistry, 1, vol. 48, 26-42, [1956]

BABCOCK, R. E., GREEN, D. W., and PERRY, R. H., Longitudinal Dispersion Mechanisms in Packed Beds, AIChE Journal, 5, vol. 12, 992-926, [1966]

BALAKRISHNAN, A. R. and PEI, D. C. T., Heat Transfer in Fixed Beds, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 4, vol. 13, 441-446, [1974]

BARKER, J. J., Heat Transfer in Packed Beds, Ind. and Eng. Chemistry, 4, vol. 57, 43-51, [1965]

BAUMEISTER, E. B. and BENNETT, C. O., Fluid-Particle Heat Transfer in Packed Beds, AIChE Journal, 1, vol. 4, 69-74, [1958]

BRADSHAW, A.V., JOHNSON, A. G. C. T., McLACHLAN, N. H., and CHIU, Y. T., Heat Transfer Between Air and Nitrogen and Packed Beds of Non-Reacting Solids, Trans. Instn. Chemical Engrs., 48, 77-84, [1970]

CHECHETKIN, A. F., High Temperature Heat Carriers. Pergamon Press, Oxford [1963]

De ACETIS, J. and THODOS, G., Mass and Heat Transfer in Flow of Gases Through Spherical Packings, Ind. and Eng. Chemistry, 12, vol. 52, 1003-1006, [1969]

DENTON, W. H., Proceedings of the General Discussion on Heat Transfer, Inst. of Mech. Engrs., London [1951]

EICHHORN, J. and WHITE, R. R., Chem. Eng. Progr. Symp. Series, 4, vol. 48, [1952]

ERGUN, S., Fluid Flow Through Packed Columns, Chem. Eng. Progress, 2, vol. 48, 89-94, [1952]

FURNAS, C. G., Heat Transfer from a Gas Stream to a Bed of Broken Solids., Bulletin U.S. Bureau of Mines, 361, [1932]

FREIRE, J. T. e SARTORI, D. I. M., Transferência de Calor em sistemas Particulados., Departamento de Eng. Química da UFSCar., vol. 2, [1986]

GAMSOM, B. W., THODOS, G. and HOUGEN, O. A., Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 1, vol. 39, [1943]

GLASER, M. B. and THODOS, G., Heat and Momentum Transfer in the Flow of Gases Through Packed Beds, AIChE Journal, 1, vol. 4, 63-68, [1958]

GUNN, D.J. and De SOUZA, J. F. C., Heat Transfer and Axial Dispersion in Packed Beds, Chem. Eng. Science, vol. 28, 1363-1371, [1974]

HANDLEY, D. and HEGGS, P. J., Momentum and Heat Transfer Mechanisms in Regular Shaped Packings, Trans. Instn. Chem. Engrs., vol. 46, [1968]

HARKER, J. H. and KUMAR, V. G., Energy Transfer Between Gases and Particulate Solids, Journal of the Institute of Energy, 86-93, [1985]

HEGGS, P. J., Heat Exchanger Design Handbook, Section 2.2.5. Fixed Beds, Hemisphere Publishing Corporation, [1983]

HICKS, R. E., Pressure Drop in Packed Beds of Spheres, Ind. Eng. Chem. Fundam., 3, vol. 9, 500-502, [1970]

JEFRESON, C. P., Prediction of Breakthrough Curves in Packed Beds, AIChE Journal, 2, vol. 18, 409-420, [1972]

KAGUEI, S., SHIOZAWA, B. and WAKAO, N., Dispersion-Concentric Model for Packed Bed Heat Transfer, Chem. Eng. Science, vol. 32, 507-513, [1977]

KITAEV, B. I., YARASHENKO, Y. and SUCHKOV, V. D., Heat Exchange in Shaft Furnaces, Pergamon Press, First Edition, [1967]

LOF, G. O. G. and HAWLEY, R. W., Unsteady-State Heat Transfer Between Air and Loose Solids, Ind. and Eng. Chemistry, 6, vol. 40, 1061-1070, [1948]

McCONNACHIE, J. T. L. and THODOS, G., Transfer Processes in the Flow of Gases Through Packed and Distended Beds of Spheres, AIChE Journal, 1, vol. 9, 60-64, [1963]

MACDONALD, I. F., EL-SAYED, K. M. and DULLEN, F. A. L., Flow Through Porous Media - The Ergun Equation Revisited, Ind. Eng. Chem. Fundam., 3, vol. 18, [1979]

PERRY, R. H. and CHILTON, C. H., Chemical Engineers' Handbook, Fifth Edition McGraw Hill Kogakusha Ltd, [1973]

PATHANGEY, B. and KOVENKLIUGLU, S., Experimental Study of Particle to Gas Heat Transfer in Fixed-Bed Reactor, AIChE Journal, 1, vol. 35, 104-108, [1989]

ROBLEE, L. H. S., BAIRD, R. M. and TIERNEY, J. W., Radial Porosity Variations in Packed Beds, AIChE Journal, 4, vol. 4, 460-464, [1958]

SATTERFIELD, C. N. and RESNICK, N., Simultaneous Heat and Mass Transfer in Diffusion-Controlled Chemical Reaction, Chem. Eng. Progress, 4, vol. 50, [1954]

SCHUMANN, T. E. W., Heat Transfer : a Liquid Flowing Through a Porous Prism, Journal Franklin Instn., 208, 405-416, [1929]

SEESSEE, T. A. and THOMSON, N. J., Gas-Solid Heat Transfer Coefficients in Beds of Crushed Oil Shale, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 2, vol. 16, 243-248, [1977]

ZANON, F. M. e FREIRE, J. T., Efeito de Parede no Escoamento Monofásico. II Perfil Longitudinal de Porosidade, Anais do XII ENEMP, vol. II, 151-162, [1984]

ZOTIN, F. M. Z., SOUZA, R. e FREIRE, J. T., Efeito de Parede no Escoamento Monofásico. III Perfil de Porosidade Radial, Anais do XIII ENEMP, vol. II, 442-458, [1985]

ZOTIN, F. M. Z. e FREIRE, J. T., Efeito de Parede no Escoamento Monofásico. IV Estudo Hidrodinâmico, Anais do XIII ENEMP, vol. II, 459-482, [1985]

WAKAO, N., Particle-to-Fluid Transfer Coefficients and Fluid Diffusivities at Low Flow Rate in Packed Beds, Chem. Eng. Science, vol. 13, 1115-1122, [1976]

WAKAO, N., KAGUEI, S. and NAGAI, H., Critique on Determination of Packed Bed Particle-to-Fluid Heat Transfer Coefficients from Steady Radial Heat Transfer Measurements, Chem. Eng. Science, vol. 32, 1261-1265, [1977]

WAKAO, N., KAGUEI, S. and FUNAZKRI, T. Effect of Fluid Dispersion Coefficients on Particle-to-Fluid Heat Transfer Coefficients in Packed Beds, Chem. Eng. Science, vol. 34, 325-337, [1979].