

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE UM FLUÍDO E UM
LEITO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS VISANDO A ARMA
ZENAGEM E RECUPERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR.

SORAYA LIRA DE ALENCAR

CAMPINA GRANDE-PARAÍBA

OUTUBRO DE 1989



S586t

Alencar, Soraya Lira de

Transferencia de calor entre um fluido e um leito de particulas solidas visando a armazenagem e recuperacao de energia solar / Soraya Lira de Alencar. - Campina Grande, 1989.

82 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Quimica) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

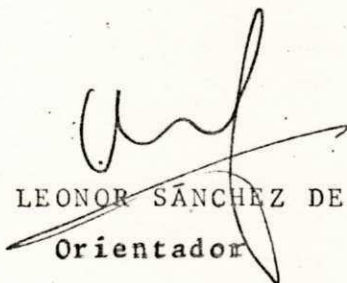
1. Energia Quimica - 2. Energia Solar - 3. Energia Solar
- 4. Particula - 5. Dissertacao I. Alsina, Odelsia Leonor
Sanchez de II. Universidade Federal da Paraiba - Campina
Grande (PB) III. Título

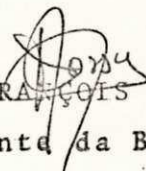
CDU 620.93(043)


TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE UM FLUÍDO E UM
LEITO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS VISANDO A ARMA
ZENAGEM E RECUPERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR.

SORAYA LIRA DE ALENCAR

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20 / 10 / 89


ODELSIA LEONOR SÁNCHEZ DE ALINA
Orientador


MICHEL FRANÇOIS FOSSY
Componente da Banca


KEPLER BORGES FRANÇA
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
OUTUBRO / 1989

DEDICATÓRIA

A meus pais, esposo e filhas, que
juntos propiciam um ambiente re
pleto de paz e amor que é o ais
da minha vida.

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMENTOS . . .	i
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO . . .	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . .	4
2.1 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FIXO . .	4
2.2 - DEFINIÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊN- CIA DE CALOR . . .	6
2.2.1 - Definição do Coeficiente de Trans- ferência de Calor para uma Colu- na de Recheio . . .	7
2.3 - CARACTERIZAÇÃO DO LEITO . . .	9
2.3.1 - Porosidade . . .	9
2.3.1.1 - Cálculo da porosidade . . .	9
2.3.2 - Área Específica . . .	10
2.3.3 - Velocidade Superficial . . .	11
2.4 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO DE DUAS FASES . . .	12
2.4.1 - Modelo de SCHUMANN e FRANKLIN (1929) . . .	12
2.4.2 - Modelo de LITTMAN <i>et alli</i> (1968). . .	13
2.4.3 - Modelo de Wakao . . .	14
2.4.4 - Modelo de Spiga e Spiga . . .	15

	Página
2.5 - UTILIZAÇÃO DE COLUNAS DE RECHEIO NA ARMAZENAGEM DE ENERGIA SOLAR . . .	18
CAPÍTULO III - EQUIPAMENTOS E MATERIAIS . . .	19
3.1 - EQUIPAMENTOS . . .	19
3.1.1 - Colunas de Enchimento . . .	19
3.1.2 - Equipamentos Auxiliares . . .	21
3.1.3 - Instrumentação . . .	21
3.2 - MATERIAIS UTILIZADOS . . .	22
3.2.1 - Constituição do Leito Fixo . . .	22
3.2.2 - Gás de Aquecimento . . .	23
CAPÍTULO IV - MÉTODOS EXPERIMENTAIS . . .	27
4.1 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS . . .	27
4.1.1 - Procedimento Experimental . . .	27
4.1.2 - Medições de Temperaturas . . .	28
4.1.3 - Cálculo da Porosidade . . .	31
4.2 - MÉTODOS MATEMÁTICOS . . .	31
4.2.1 - Método Diferencial . . .	31
CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÃO . . .	33
5.1 - INFLUÊNCIA DA POROSIDADE . . .	33
5.2 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO LEITO . . .	34
5.3 - CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TROCA TÉRMICA ENTRE O SÓLIDO E O GÁS . . .	35

	Página
CAPÍTULO VI - CONCLUSÃO ...	58
CAPÍTULO VII - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS ...	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ...	61
APÊNDICE A ...	65

AGRADECIMENTOS

À professora Odelsia Leonor Sánchez de Alsina, a qual me ajudou a descobrir o mundo da Pesquisa, como também pelo incentivo e correção do texto para conclusão desta dissertação.

A Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química na pessoa do professor Kepler Borges França pelo apoio e auxílio para a realização deste trabalho.

- Ao Departamento de Engenharia Química na pessoa do professor Michel François Fossy pela disponibilidade de materiais usados na parte experimental.

Ao funcionário Luis Gonzaga Sales pela colaboração recebida no Laboratório.

Ao colega Hélio Francisco Bezerra pela ajuda recebida na elaboração da parte computacional.

A meus pais, meu esposo e sogros, que juntos caminharam ao meu lado, incentivando, acreditando no êxito desta etapa do meu trabalho.

Enfim, aos professores, colegas e funcionários que juntos, tornaram possível um ambiente de trabalho muito receptivo, tendo sido alcançado os meus objetivos.

RESUMO

A Transmissão de Calor entre fluido e um leito de partículas tem um grande número de aplicações tecnológicas. A utilização na armazenagem e recuperação de energia solar foi citada em vários trabalhos recentes. No presente estudo são apresentados resultados experimentais e analíticos da resposta dinâmica de um leito fixo esferas cerâmicas percolado por ar, quando submetidos a um sinal degrau na temperatura de entrada do ar. A abordagem utilizada é através do modelo de duas fases.

A partir dos perfis experimentais de temperatura do sólido e fluido foram calculados o tempo característico e o coeficiente local de transmissão de calor, mediante o método diferencial proposto por ALSINA & LYRA em 1986. No intervalo analisado de números de Reynolds de 898 e 4130 foi encontrado uma boa concordância dos valores de h calculados com os obtidos de correlações disponíveis na literatura. Entretanto, não foi verificada boa concordância com as predições do método integral baseado no modelo de SPIGA & SPIGA de 1981. Esta discrepância era esperada devido à utilização de intervalos de tempo maiores que os usados num trabalho prévio por ALSINA em 1985.

ABSTRACT

The heat transfer between a fluid and a bed of particles has a great number of technological applications. The recovery and storage of solar energy by that technique several recent works were reported. This work presents experimental and analytical results on the dynamical response of the fixed bed ceramic spheres percolated by air, when submitted to a step in the inlet gas temperature. The two phases model approach was utilized. From the experimental profiles of the gas and solid temperature were calculated the characteristic time and local coefficient of heat transmission using the differential methods proposed by ALSINA & LIRA in 1985. In the range of 898 to 4130 of Reynolds numbers analysed it was showed a good concordance between the calculated h and those obtained from the correlations available in the literature. However it was not observed a good agreement with the predicted results of the integral method based in the model of SPIGA & SPIGA 1981. The failure was expected those used in the previous work by ALSINA ET ALI 1985.

SIMBOLOGIA

- A = área característica (m^2)
- a_v = área específica (m^{-1})
- c = calor específico (J/Kgm)
- D = diâmetro da coluna (m)
- d = diâmetro do tubo (m)
- G = velocidade mássica superficial (Kg/m^2s)
- h = coeficiente de transmissão de calor (W/m^2K)
- h_{loc} = coeficiente local de transmissão de calor (W/m^2K)
- K = condutividade térmica (W/mk)
- $K^{e_{ax}}$ condutividade térmica efetiva axial do leito recheado (W/mk)
- Nu = número de Nusselt médio logarítmico (adimensional)
- Pr = número de Prandtl
- Q = fluxo de calor (W)
- Re = número de Reynolds (adimensional)
- T = temperatura (K)
- U = velocidade intersticial do fluido
- V = volume total do leito (m^3)
- V_z = volume de vãos do leito (m^3)
- α_F = difusividade térmica do fluido
- α'_{ax} = coeficiente de dispersão térmico efetivo axial
- α_{ax} = coeficiente de dispersão térmico do fluido axial
- ϵ = porosidade
- ρ = densidade (Kg/m^3)

τ = tempo característico

μ = distância característica

ΔT = diferença característica de temperatura (K)

Índices : f = fluido

S = sólido

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A transmissão de calor entre um fluido e um leito de partículas é um fenômeno físico que ocorre em numerosos processos e dispositivos de interesse técnico, tais como percolação de fluidos nos solos que é de importância fundamental para estudos agrônômicos e aos modelos de campos petrolíferos; os intercambiadores de calor regenerativos; reatores químicos heterogêneos e equipamentos de separação.

Nas aplicações recentemente empregadas, temos em particular atenção a armazenagem de energia térmica derivada do sistema de imersão de energia solar, neste caso, o fluido de aquecimento atravessa coletores solares, onde estes podem ser formados por um leito composto de partículas que armazenam a energia solar. A recuperação da energia armazenada é usualmente obtida pela reversão do fluxo através do leito.

O tratamento matemático do processo de transferência de calor e massa num leito de partículas com a passagem de um fluido, pode ser analisada através de dois modelos: o grupo do modelo de uma fase, onde o leito é considerado um meio homogêneo e o grupo do modelo de duas fases, onde ambas as fases transmitem calor.

O modelo de uma fase implica sem dúvida na perda de

informações referente ao de duas fases, porém é mais simples desde o ponto de vista matemático e permite obter, como será mostrado adiante, em alguns casos, soluções exatas de fácil manuseio.

O modelo de duas fases (uma matriz sólida percolada por um fluido), onde consideramos os balanços térmicos separados é mais realístico que o modelo de uma fase quando o tamanho das partículas que compõem o leito é relativamente grande. VORTMEYER *et alli* (1974), estudaram a equivalência dos modelos de uma e duas fases com algumas hipóteses simplificadoras. ALSINA & SCARICABAROZZI (1981) estendem estes resultados (desses autores), considerando a existência de gradientes térmicos dentro da partícula de acordo com um modelo simplificado desenvolvido por DASSEN & SCARICABAROZZI (1980).

WAKAO *et alli* (1979) corrigem os dados publicados de transferência de calor através de um coeficiente de dispersão axial do fluido proposto por eles, e a reavaliação destes dados num modelo modificado, podem ser correlacionados pela forma da analogia de transferência de massa. SPIGA & SPIGA (1981) estudaram a importância desse tipo de transferência, nas quais uma das aplicações mais recentes deste estudo é a armazenagem e recuperação de energia solar. SAEZ & MCCOY (1982) simularam um sistema de armazenagem de energia solar em rochas, propondo um modelo matemático para a simulação da resposta dinâmica da temperatura de uma coluna recheada, este modelo é usado para otimizar a armazena

gem de energia solar dentro das rochas.

O estudo deste tipo de dispositivos requer conhecimentos dos coeficientes de troca entre o sólido e o fluido a a disponibilidade de métodos matemáticos relativamente simples que permitam acompanhar o desempenho energético dos mesmos.

O objetivo deste trabalho é o estudo experimental e analítica da resposta dinâmica dos meios porosos em leito fixo , onde a temperatura deste leito varia em função do tempo. Os dados experimentais foram interpretados mediante um modelo de duas fases.

Neste trabalho o coeficiente de Transferência de Calor é calculado pelo método diferencial proposto por ALSINA & LIRA (1986) e verificado pelo método integral de ALSINA (1985), baseado na solução analítica de SPIGA e SPIGA (1981) , sendo os resultados obtidos, mediante estes métodos, comparados com correlações disponíveis.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FIXO

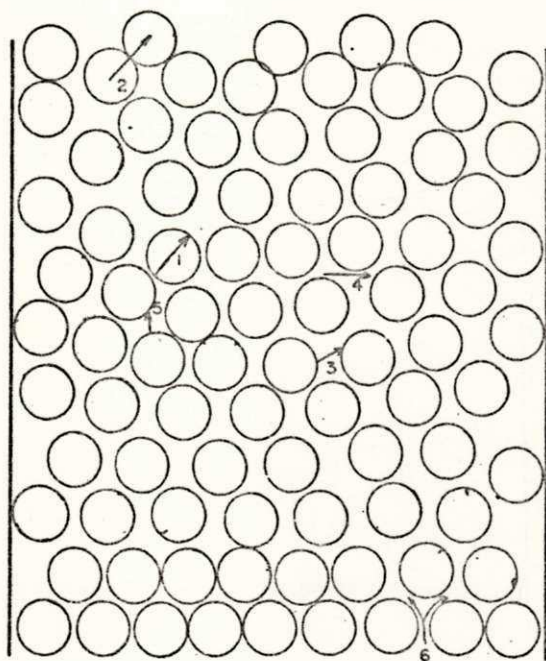
Segundo FREIRE (1979), os estudos sobre transferência de calor em leitos fixos são norteados para responder a seguinte questão: sendo dado a velocidade mássica do fluído, a porosidade média do leito, o diâmetro do tubo, forma e tamanho das partículas, sua condutividade térmica, além das propriedades do fluído como viscosidade, calor específico, condutividade térmica, qual será o valor da temperatura em um dado ponto em um dado tempo, isto é $T(x,y,z,0)$?

Para responder esta questão, foram desenvolvidos dois modelos:

- i) Modelo de uma fase, e
- ii) Modelo de duas fases.

Uma análise da Figura 2.1 permite identificar os seguintes mecanismos de transferência de calor:

- 1 - Transferência de calor através do sólido.
- 2 - Transferência de calor através do contato sólido-sólido.
- 3 - Transferência de calor entre as superfícies do sólido (no caso de gás).



- 1. Transferência de calor através do sólido
- 2. " " " " " contato sólido-sólido.
- 3. " " " entre as superfícies dos sólidos (no caso de gás)
- 4. " " " através da película de fluido existente na superfície de contato
- 5. Transferência de calor por convecção, sólido-fluido-sólido
- 6. Transferência de calor por dispersão lateral do fluido.

FIGURA 2.1 - ESQUEMA GLOBAL DE UM LEITO FIXO .

- 4 - Transferência de calor através da película de fluido existente na superfície de contato.
- 5 - Transferência de calor por convecção, sólido-fluido-sólido.
- 6 - Transferência de calor por dispersão lateral do fluido.

No modelo de uma fase todos os mecanismos (Figura 2.1) são englobados em um único parâmetro: a condutividade térmica efetiva, e o meio é tratado como sendo homogêneo, valendo uma equação constitutiva do tipo da equação de Fourier ($q = -K\Delta T$). Neste modelo em cada ponto do leito, temos a temperatura do fluido igual à do sólido.

O modelo de duas fases é mais realista e as fases podem trocar energia entre si, havendo uma equação de energia para cada fase vinculadas através do coeficiente de troca térmica entre o sólido e o fluido.

A diferença entre eles é que, no modelo de uma fase, não se faz distinção entre a temperatura do constituinte sólido e a do fluido, sendo o meio considerado homogêneo. No de duas fases a distinção é feita, e com isso leva-se em consideração o coeficiente de transferência de calor (sólido-fluido).

2.2 - DEFINIÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Consideremos um sistema de fluxo em que o fluido circula

cula por uma condução ao redor de um objeto sólido. Suponhamos que a superfície do sólido está mais quente que a do fluido, de forma que o calor se transmite do sólido para o fluido. É de se esperar que a velocidade do fluxo de calor através da interfase sólido-fluido dependerá da área da interface e da diferença de temperatura entre o sólido e o fluido. Segundo isto, pode-se escrever:

$$Q = hA\Delta T \quad (2.1)$$

sendo Q o fluxo de calor existente no fluido (Kcal h^{-1}), A uma área característica, ΔT uma diferença característica de temperatura, e o fator de proporcionalidade h se denomina coeficiente de transmissão de calor. É evidente que pode utilizar-se a mesma definição quando o fluido se esfria.

2.2.1 - Definição do Coeficiente de Transferência de Calor para uma Coluna de Recheio.

De acordo com WHITAKER (1977), na direção normal, n, na interfase sólido-fluido o coeficiente local de transferência de calor é definido, como:

$$Q_r = h_{\text{Loc}} \Delta T \quad (2.2)$$

Onde: $T_r = T_i - T^*$

sendo que, T_i , representa a temperatura na interfase e T^* a temperatura característica do fluido.

Para uma coluna de recheio, este coeficiente \bar{h} é da do pela equação:

$$\Delta Q = \int_{\Delta A} q_n d_A = h_{Loc} \Delta A \Delta T^* \quad (2.3)$$

$$\Delta T^* = T_o - T_b$$

O h_{Loc} é definido para uma área da superfície, ΔA contido no volume ΔV . A diferença da temperatura característica ΔT^* , é geralmente obtida através da diferença entre, a temperatura da superfície do material de recheio, T_o , e a temperatura do fluido, T_b .

Na maioria dos estudos experimentais são poucos os esforços feitos para se determinar h_{Loc} , bem como procura-se eliminar o gradiente radial de temperatura na coluna

Portanto um balanço de energia macroscópico é aplicado para todo o leito e o termo envolvendo o fluxo de calor na interfase sólido-fluido é expresso na forma:

$$Q = \int_{Z=0}^{Z=L} \int_{\Delta A} q_n dAdZ = h_{\bar{L}} A \Delta T_{\bar{L}} \quad (2.4)$$

Expressando-se A em termos de V , o volume do leito e dv , a área por unidade de volume, obtém-se:

$$Q = h\ell_n avV \Delta T\ell_n \quad (2.5)$$

Note que Q , é a taxa total de transferência de calor, V , o volume total do leito recheado, e $\Delta T\ell_n$, a diferença da temperatura logarítmica, que pode ser determinada experimentalmente sem muita dificuldade. Na equação (2.5) temos dois termos desconhecidos, o coeficiente de transferência de calor, $h\ell_n$, e a área da superfície por unidade de volume do leito, av . Para a determinação do $h\ell_n$, precisamos conhecer av .

2.3 - CARACTERIZAÇÃO DO LEITO

2.3.1 - Porosidade

A porosidade (ϵ) ou fração de vazios de um leito é definido como sendo o volume de vazios dentro do leito, dividido pelo volume total do leito.

$$\epsilon = \frac{\{\text{volume de vazios do leito}\}}{\{\text{volume total do leito}\}} = \frac{V_{\text{vaz}}}{V} \quad (2.6)$$

O ϵ representa a fração média de vazios de todo o leito.

2.3.1.1 - Cálculo da porosidade

LEVA & GRUMMER (1951) demonstraram que a porosidade de um leito estava diretamente relacionada

com as dimensões da coluna e aumentava com o decréscimo da razão de diâmetros, D/d (da coluna e partícula). Estes autores apresentam uma série de gráficos, onde valores de ϵ podem ser lidos em função de D/d , para leitos constituídos por partículas de vários tipos e formas.

BRUNELLO *et alli* (1981) a partir de dados experimentais e correlações existentes na literatura, propiciam modelos para estimativa de vazios de leito fixo, constituídos por partículas esféricas e não porosas. Entre os modelos propostos por ditos autores, citaremos os seguintes:

a) Modelo Empírico:

$$\epsilon = 0,3700 + 0,6477 (D/d)^{-0,5907} \quad (2.7)$$

b) Modelo Semi-Empírico:

$$\epsilon = 0,3700 + 2[(D/d)^{-1} - (D/d)^{-2}]\{[1 - 0,5133 \cdot \frac{(D/d) - 0,8700}{(D/d) - 0,500}] - 0,3700\} \quad (2.8)$$

2.3.2 - Área Específica

Na transferência de calor em meios porosos, usamos a área específica (a_v) para representar a área da superfície do recheio, por unidade de volume do leito recheado.

O leito de volume V é recheado com N partículas, que possuem o volume V_p e a área da superfície A_p . Se a fração de vazios do leito é ϵ , o volume ocupado pelas partículas é $V(1-\epsilon)$, então:

$$V_p N = V(1-\epsilon) \quad (2.9)$$

O número de partículas por unidade de volume, N/V , é dado por:

$$N/V = (1-\epsilon)/V_p \quad (2.10)$$

e a área da superfície por unidade de volume é:

$$a_v = A_p(N/V) = \left(\frac{A_p}{V_p}\right)(1-\epsilon) \quad (2.11)$$

$$\text{Para partículas esféricas } a_v = \frac{6}{d_p} (1-\epsilon) \quad (2.12)$$

2.3.3 - Velocidade Superficial

A razão do fluxo volumétrico dividido pela área da seção transversal, na qual passa o fluido, denomina-se de velocidade superficial.

$$v = Q/A \quad (2.13)$$

2.4 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO DE DUAS FASES.

2.4.1 - Modelo de SCHUMANN e FRANKLIN (1929)

O Modelo de SCHUMANN e FRANKLIN (1929), assume as seguintes condições:

(i) O fluido é um fluxo de pistão, não há transferência de calor por dispersão lateral do fluido.

(ii) Não existe gradiente de temperatura dentro da partícula.

De acordo com este modelo, as equações (7) do balanço térmico para o fluido e o sólido, são:

$$\epsilon \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + G C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = - h_{av} [T_f - T_s] \quad (2.14)$$

$$(1-\epsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = h_{av} |T_f - T_s| \quad (2.15)$$

onde:

h = coeficiente convectivo local de transferência de calor (W/m^2K).

av = área específica por unidade de volume do leito (m^{-1}).

G = velocidade mássica superficial (kg/m^2s)

T = temperatura (K)

ρ = densidade (kg/m^3)

C = calor específico ($J/kg m$)

O índice S indica o sólido e o índice f, fluido.

2.4.2 - Modelo de LITTMAN *et alli* (1968)

Littman *et alli* (1968), assume no modelo da matriz sólida contínua com dispersão axial no gás e no sólido, as seguintes condições:

(i) o fluido e o sólido sofrem transferência de calor por dispersão axial, no fluxo de pistão.

(ii) o sólido é uma fase axialmente contínua, onde a condução de calor se processa na direção axial.

Neste modelo, as equações do balanço térmico do sólido e do fluido são:

$$\epsilon \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + G C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = - h_{av} [T_f - T_s] + K_{ef} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \quad (2.16)$$

$$(1-\epsilon) \rho_s C_s \frac{\partial \bar{T}_s}{\partial t} = h_{av} T_f - T_s + K_{es} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \quad (2.17)$$

2.4.3 - Modelo de Wakao

WAKAO *et alli* (1977) apresentaram o modelo de dispersão concêntrica e o modelo modificado de dispersão concêntrica; ambos possuem as seguintes condições:

- (i) o fluxo é pistonado e o fluido sofre dispersão axial.
- (ii) existe gradiente de temperatura dentro das partículas, com simetria radial.

As equações do balanço térmico do sólido e do fluido, são:

$$\varepsilon \rho_f (f \frac{\partial T_f}{\partial t} + G C_f \frac{\partial T_f}{\partial x}) = -h a v [T_f - (T_s)_R] + \alpha a x \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{2 \partial T_s}{r \partial r} \right) \quad (2.19)$$

Onde: $T_s(t, R) \neq T_s(t, 0)$

$$r = R \rightarrow K_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial r} \right) = h_p (T_f - T_s) \quad (2.20)$$

sendo:

$$\alpha a x = (0,6 - 0,8) \alpha_F + 0,5 \alpha U \quad (2.21)$$

$$\alpha^* a x = \frac{K e a x}{\varepsilon C_f \rho_f} \quad (2.22)$$

α_F = difusividade térmica do fluído.

α_{a^*x} = coeficiente de dispersão térmico efetivo axial.

α_{ax} = coeficiente de dispersão térmico do fluído axial.

K_{eax} = condutividade térmica efetiva axial do leito re
cheado.

U = velocidade intersticial do fluído.

K_s = condutividade térmica do sólido.

Diferença entre estes dois modelos:

- No modelo de dispersão concêntrica o coeficiente de dispersão do fluído axial α_{ax} é dado pela equação (2.21).

- No modelo modificado, α_{ax} é dado pela equação (2.22), ou seja; neste modelo leva-se em consideração também a condutividade térmica efetiva axial do leito recheado.

2.4.4 - Modelo de Spiga e Spiga.

SPIGA & SPIGA (1981) investigaram analiticamente a resposta dinâmica de um sistema de meio poroso e leitos recheados variando o tempo arbitrariamente em função da temperatura.

O modelo de duas fases é desenvolvido rigorosamente dentro da importância da razão da capacidade de transferência de calor entre o sólido e o fluído.

Primeiramente o problema do valor inicial é resolvido, incluindo inicialmente uma distribuição de temperatura espacial não uniforme.

A análise de um leito recheado unidirecional do modelo de duas fases, pode ser efetuado na base de um simples balanço térmico de energia, para cada fase, a do fluido e a do sólido. O fluido é um fluxo que atravessa o leito, os parâmetros físicos são constantes e a geração do calor interno estão ausentes.

De acordo com um balanço de energia:

$$\epsilon \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + G C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = - \text{hav}[T_f - T_s] \quad (2.23)$$

$$(1-\epsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \text{hav}[T_f - T_s] \quad (2.24)$$

Negligencia-se os efeitos da radiação, o espaço e o tempo são variáveis independentes, ξ e τ . Introduzindo-se as variáveis adimensionais do espaço e tempo, temos:

$$X = x / \xi \quad (2.25)$$

$$\theta = t / \tau \quad (2.26)$$

onde: a distância característica $\xi = \frac{GC_f}{h_a} \quad (2.27)$

o tempo característico $\tau = \frac{(1-\epsilon)\rho_s C_s}{h_a} \quad (2.28)$

Sendo:

$$Z = \frac{\rho_f \cdot C_f}{\rho_s \cdot C_s (1-\epsilon)} \quad (2.29)$$

O parâmetro Z representa a razão da capacidade de calor entre o fluído e o sólido, este parâmetro é usualmente negligenciado por ser muito pequeno, considerando-se um leito composto por rochas e o ar, mas pode ser significativo para diferentes formas de leito recheado, em particular quando o fluído é líquido.

No sistema (2.23) e (2.24) as seguintes hipóteses foram aceitas:

- Termos de condução desprezíveis;
- Transferência unidirecional;
- Não existem gradientes térmicos no interior das partículas.

Spiga & Spiga (1981) apresentam a solução analítica mais geral, já que conserva o termo da acumulação no fluído e utiliza as condições:

$$T_f(x,0) = f_f(x) \quad (2.30)$$

$$T_s(x,0) = f_s(x) \quad (2.31)$$

$$T_f(0,t) = g(t) \quad (2.32)$$

O sistema (a) e (b) adimensionalizado, resulta:

$$Z \frac{\partial T_f^+}{\partial \theta} + \frac{\partial T_f^+}{\partial x} = -(T_f^+ - T_s^+) \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial T_s^+}{\partial \theta} = (T_f^+ - T_s^+) \quad (2.34)$$

Em qualquer ponto de trocador, a relação entre a temperatura do sólido e do fluido, de acordo com Spiga & Spiga (1981) é:

$$T_s^+(X, \theta) = \exp(-\theta) [f_s(X) + \int_0^\theta \exp(S) T_f^+(X, S) dS] \quad (2.35)$$

2.5 - UTILIZAÇÃO DE COLUNAS DE RECHEIO NA ARMAZENAGEM DE ENERGIA SOLAR.

Segundo, SAEZ & McCOY (1982), um leito recheado é um sistema de armazenagem térmica, que consiste de uma coluna recheada com seixos ou outros tipos de materiais sólidos que absorvem calor diretamente do fluxo de ar, havendo troca de energia. Estes sistemas podem ser estudados nos modelos de uma fase e de duas fases.

A importância do presente trabalho reside no fato de que os métodos experimentais e numéricos utilizados podem ser aplicados, entre outros processos, também na armazenagem de energia solar.

CAPÍTULO III

EQUIPAMENTOS E MATERIAIS.

3.1 - EQUIPAMENTOS

Nos experimentos realizados para a obtenção dos dados, foi utilizado um conjunto de equipamentos (figura 3.1) que consiste basicamente de: um compressor radial (A) para impulsionar o ar; um rotâmetro (B) para medir a vazão do gás em trabalho; um aquecedor elétrico com nove resistências (C) para aumentar a temperatura do fluido (ar); colunas de enchimento (D, E) que são analisadas como sendo de leito fixo; uma caixa seletora de chaves (F) que nos fornece as temperaturas lidas num milivoltímetro (G) de acordo com a chave selecionada; um controlador de temperatura (H) para manter constante a temperatura de entrada de ar à coluna, um registrador de temperatura (I) que nos permite acompanhar a evolução da temperatura através de um gráfico.

3.1.1 - Colunas de Enchimento

A coluna com leito fixo (D) (figura 3.1.1a) consiste de uma câmara cilíndrica de 30cm de diâmetro e 80cm de altura com um distribuidor tronco-cônico do ar localizado na parte inferior da mesma.

A coluna, isolada com uma camada de lã de rocha de espessura 2,5cm, possui oito furos, quatro de cada lado, distanciados por vinte centímetros e um furo no distribuidor tronco-cônico. Os termopares são colocados da seguinte maneira: no furo existente no distribuidor, estão dois termopares, o que controla a temperatura de entrada do fluido e aquele no qual nos fornece esta temperatura através de um registrador; os furos da coluna estão distribuídos de maneira que, para cada posição (altura do leito) será fornecida a temperatura no centro do sólido e a do fluido lidas no milivoltímetro que são distinguidas por meio de uma chave seletora.

A coluna com leito fixo (E) (figura 3.1.lb) consiste de uma câmara cilíndrica de 17,8cm de diâmetro e 60cm de altura com um distribuidor tronco-cônico de ar contendo esferas de vidro de tamanho uniforme, empilhadas aleatoriamente sobre uma tela de arame colocada na entrada deste distribuidor.

A coluna isolada com uma camada de amianto de espessura 1,5cm, e sobre esta, uma camada de poliuretano de 1,0cm de espessura, possui seis furos, três de cada lado, distanciados por oito centímetros. Os termopares são colocados da seguinte maneira: na primeira posição, um termopar controla a temperatura do fluido e o outro registra esta temperatura; nas posições seguintes, para cada altura do leito será fornecida a temperatura no centro do sólido e a do fluido lidas no milivoltímetro que são distinguidas

por meio de uma chave seletora.

3.1.2 - Equipamentos Auxiliares

01 - Compressor Radial, tipo exportação fabricado pela lavagem Americana Garantia, dotado do motor assíncrono trifásico, tipo S100 L₂, com 40CV e 2920 RPM, fabricado pela Metalúrgica Abramo Ebuile S/A - Caxias do Sul. Ind. Brasileira.

02 - Aquecedor de Ar, tipo RM 2560.9, com 22,5 KW , fabricado pela Palley - Ind. Brasileira.

03 - Controlador de Temperatura Proporcional, tipo P300, faixa de operação entre 20-200°C, fabricado pela Euro-Control Aut. Ind. Ltda.

04 - Auto-Transformador Variável, tipo 216 B, com JNV 240 e OUT de 0-280, fabricado por The Superior Electric Co. Bristol CONN-USA.

3.1.3 - Instrumentação

01 - Termopares, tipo ferro-constantan.

02 - Cronômetro, marca Gallenkamp - referência TKM 340Y.

03 - Termômetro Químico Arba, faixa (-10 a + 100°C) divisão 1/1°C - enchimento mercúrio, fabricado pela Arba-Termômetro Brasil Ltda.

04 - Rotâmetro, tipo R-2-V.C Haste, capacidade de 400 m³/h, fabricado pela OMEL S/A - Ind. Brasileira.

05 - Manômetro Dox, capacidade de 2,0 kg/cm² fabricado pela IMC - Ind. Brasileira.

06 - Registrador Potenciométrico, tipo H/CG, fabricado pela Instrumentos Científicos - CG Ltda - Ind. Brasileira.

07 - Milivoltímetro, tipo MA-045, fabricado pela Equipamento Científico Brasil - Ind. Brasileira.

3.2 - MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 - Constituição do Leito Fixo

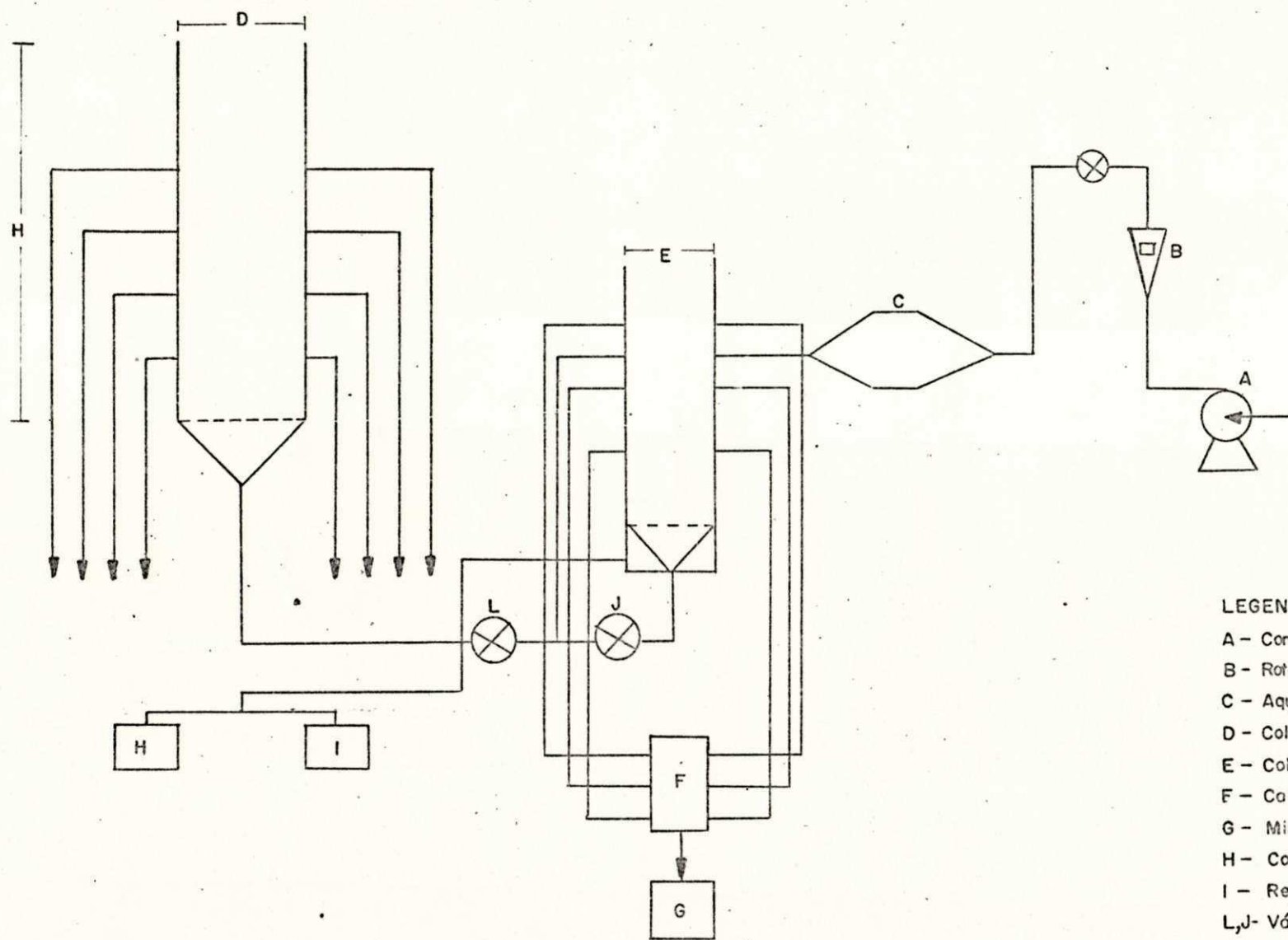
O material de enchimento da coluna de leito fixo para armazenagem de energia está constituído de esferas cerâmicas de 0,0544m e 0,0362m de diâmetro respectivamente, com massa específica de 2240 kg/m³, calor específico 1017 J/K e condutividade térmica 0,57 W/mK, dados estes obtidos no Simpósio de Geração de Potência Elétrica Magneto-Dinâmica, Varsóvia (1968). A maior parte das experiências foram realizadas com as esferas de maior diâmetro na coluna (D) e as de menor diâmetro, na coluna (E) de modo que a razão D/d (D -diâmetro da coluna, d - diâmetro da esfera) é próxima de 5 nestes ensaios (4,85 e 5,35). Duas corridas experimentais foram realizadas com as esferas pequenas na colu

na D e outras duas, as de diâmetro maior na coluna E, para observarmos o efeito de parede.

3.2.2 - Gás de Aquecimento

O fluido utilizado foi o ar, aquecido eletricamente no radiador, cujas propriedades físicas foram tomadas do Perry e Chilton (1980) e avaliadas à temperatura média de entrada e saída do fluido no final da experiência.

As propriedades físicas do ar, se encontram na Tabla I, apêndice A.



LEGENDA

- A - Compressor Radial
- B - Rotômetro
- C - Aquecedor de ar
- D - Coluna
- E - Coluna
- F - Caixa seletora de chaves
- G - Milivoltímetro digital
- H - Controlador de Temperatura
- I - Registrador
- L, J - Válvulas

FIGURA 3.1 - ESQUEMA DE APARELHAGEM

ENDA

Coluna de Aço Galvanizado

Camada de la de rocha

Suporte para o recheio

Distribuidor Tronco-Cônico

Tubulacao Galvanizada de 2"

Chave-seletores

Milivoltímetro Digital

Registrador

Controlador de Temperatura

25

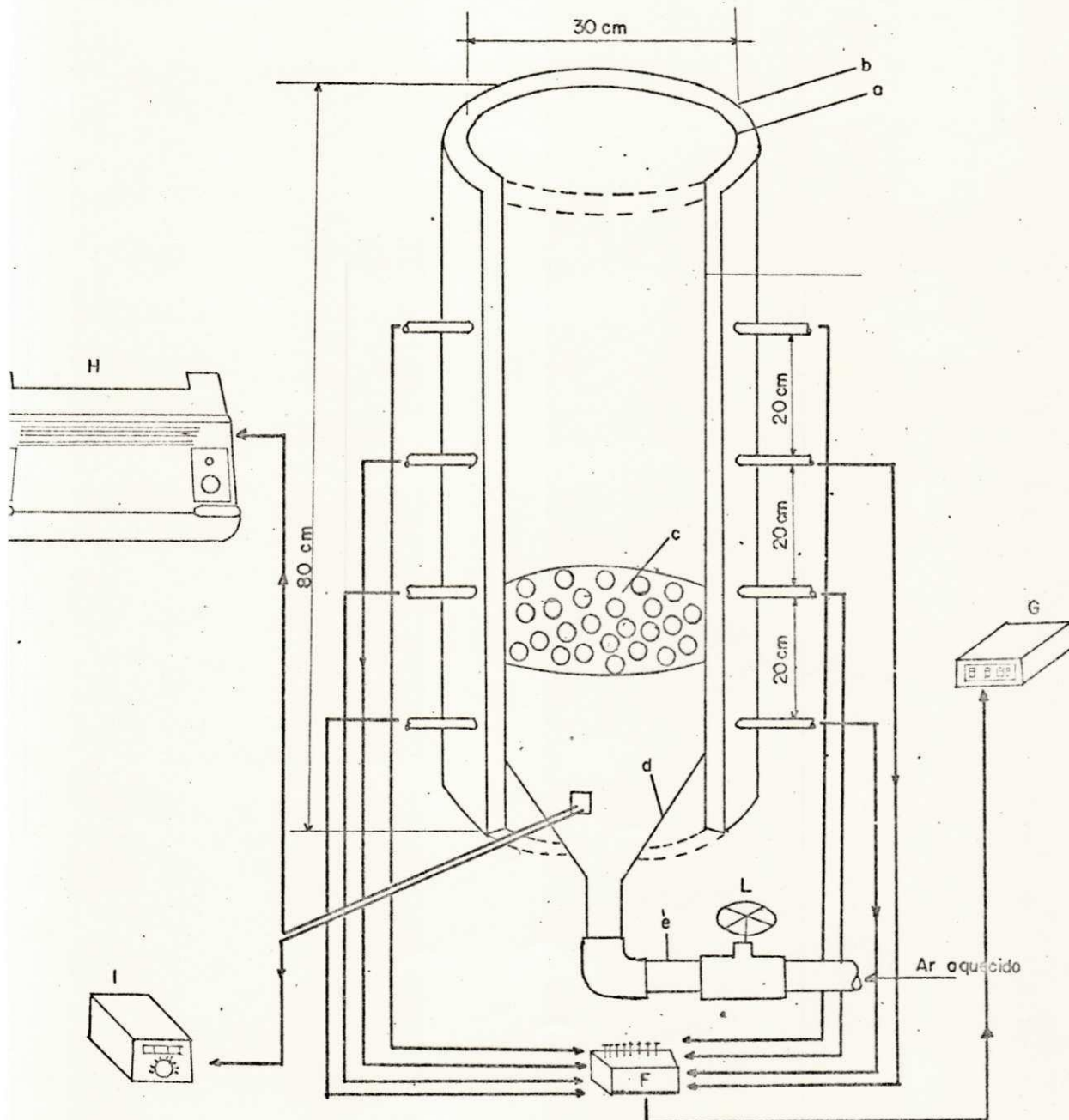


FIGURA 3.1.1a - COLUNA COM LEITO FIXO

LEGENDA

- a - Coluna de Aço Galvanizada
- b - Camada de Amianto (1,5cm) e Espuma - Poliuretano (1,0cm)
- c - Suporte para o recheio
- d - Distribuidor Tronco - Cônico
- e - Tubulação Galvanizada de 2"
- F - Chave Seletora
- G - Milivoltímetro Digital
- H - Registrador
- I - Controlador de temperatura

26

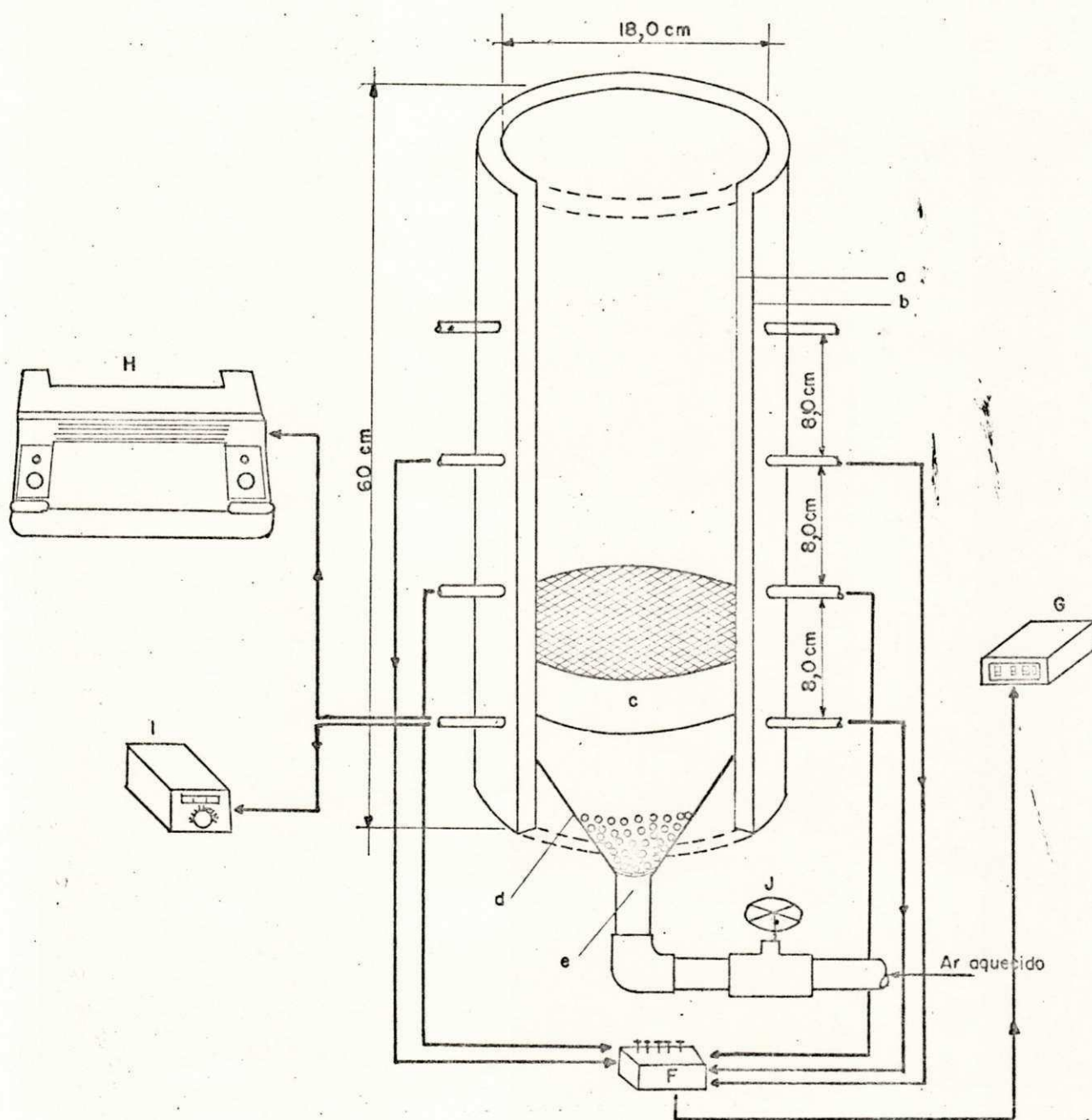


FIGURA 3.II.b - COLUNA COM LEITO FIXO

CAPÍTULO IV

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

4.1 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O método experimental baseia-se na análise da resposta dinâmica do leito de partículas, inicialmente com distribuição uniforme de temperaturas, sendo submetido a um sinal degrau na entrada da coluna, introduzindo uma corrente de ar que percolará o leito a uma temperatura maior que a inicial.

4.1.1 - Procedimento Experimental

Nas experiências foram utilizados os equipamentos descritos no Capítulo III (figura 3.1). O procedimento seguido foi:

- O compressor radial (A) é acionado para impulsionar o ar; o rotâmetro (B) faz a medição da vazão do fluido; o aquecedor elétrico com nove resistências (C) é posto em funcionamento para aumentar a temperatura do fluido, que irá percorrer a coluna (D, E) com material de enchimento.

Enquanto a temperatura de entrada do ar ainda se encontra no transitório, o fluxo é desviado para uma coluna auxiliar sem recheio (a coluna D, se a experiência for con

duzida na coluna E e vice-versa). Uma vez alcançada a estabilidade nas condições de entrada, mediante rápida abertura e fechamento das válvulas L e J da figura 3.1, o fluxo é encaminhado para a coluna de trabalho, já condicionada com o enchimento correspondente.

4.1.2 - Medições de Temperaturas

As temperaturas do ar e do sólido foram medidas com 8 termopares de ferro-constantan colocados radialmente. Os termopares para o ar têm isolamento cerâmico e ponta exposta e os do sólido, com a ponta localizada no centro das esferas, possuem bainha de aço inox de 0,14cm de diâmetro para facilitar a penetração nas partículas esféricas.

Para obtermos medidas de temperaturas confiáveis, especialmente quando é preciso uma boa resolução dos valores do gás e no sólido, vemos algumas dificuldades. Para o caso de convecção natural, BEZERRA *et alli* (1985) apresentam considerações acerca deste problema. FREIRE (1979) sugeriu que, quando se ensaiam partículas de baixa condutividade, a primeira informação térmica que chega à ponta do termopar é vinda por condução através da bainha, distorcendo as medições. Para analisarmos esta hipótese foram realizados ensaios com uma esfera isolada, com ar quente escoando em torno. Foram feitas medições simultâneas de temperatura no centro, realizadas com um termopar de fios isolados e ponta exposta e com um outro termopar com bainha. Estas medi

ções demonstram que as diferenças entre estes termopares não são muito significativas. As curvas obtidas numa destas experiências estão representadas na figura 4.1.1. De acordo com a figura 4.1.1 as temperaturas indicadas pelos termopares são ligeiramente diferentes, mas, os valores medidos com o termopar de ponta exposta são maiores do que os em bainhados o que diverge do resultado esperado.

Se o erro devido à condução fosse determinante, a leitura do termopar com bainha teria de ser maior. Já que a informação térmica do exterior chegaria primeiro. Como a diferença encontrada teve sinal oposto, com uma defasagem de ~ 1 min (ver figura 4.1.1), conclui-se que a justificativa deve ser outra, possivelmente um maior tempo de resposta.

Por outra parte, a diferença observada é suficientemente pequena onde os valores medidos podem ser considerados aceitáveis para o objetivo do trabalho.

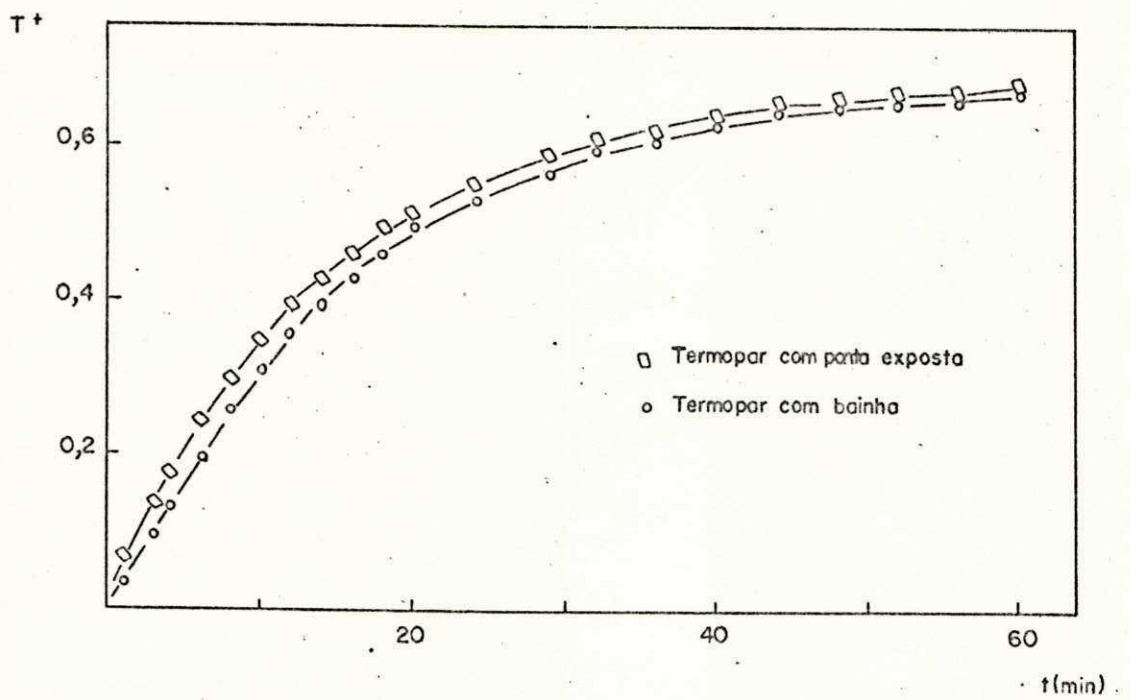


Fig.4.1.1 - Comparação entre a leitura de dois termopares na evolução da temperatura de uma esfera isolada.

4.1.3 - Cálculo da Porosidade

Conforme as razões entre diâmetros da coluna e diâmetro da esfera utilizados nos experimentos foram calculadas as porosidades dos meios porosos através das equações (2.27) e (2.28).

Segundo Brunello *et alli* (1981), a equação (2.8) é a que melhor representa a influência das paredes do leito na fração de vazios, pelas seguintes razões:

- é a única que não tem limites de uso com relação ao intervalo das variáveis.

- é a que apresenta os menores erros percentuais quando são comparados os valores de ϵ medidos experimentalmente e os estimados por ela (erros sempre inferiores a 8%). Portanto no presente trabalho utilizamos as equações recomendadas pelos autores citados.

4.2 - MÉTODOS MATEMÁTICOS

4.2.1 - Método Diferencial

ALSINA & LIRA (1986) propõem para a resolução da equação (2.24) de Spiga e Spiga (1981), o método diferencial.

De acordo com a equação (2.29) o valor de Z para sistemas gás-sólido é pequeno. No presente caso $Z \approx 3 \times 10^{-4}$. Portanto pode ser desprezado o termo de acumula-

ção de energia do gás. A equação (2.24) escrita em diferenças finitas, com a suposição $\bar{T}_s(t) = T_s(t, R)$, resulta:

$$\frac{1}{\Delta T} \left[\frac{\bar{T}_s(i, j+1) - \bar{T}_s(i, j)}{\Delta t} \right] = 1/\tau \quad (4.1)$$

onde: $\bar{\Delta T} = (T_{f(i, j)} - \bar{T}_s(i, j) + T_{f(i, j+1)} - \bar{T}_s(i, j+1))/2$

(4.2)

A equação (4.1) permite calcular o tempo característico a partir da evolução temporal medida. O valor de h se calcula então mediante a equação (2.27).

4.2.2. - Método Integral

ALSINA (1985) propõem para a resolução da equação (2.35) de SPIGA & SPIGA (1981), o método integral.

A integral da equação (2.35) foi resolvida numericamente pelo método do trapézio, a partir da evolução da temperatura do fluido num dado X , substituindo $\Theta = t/\tau$ na equação (2.33), repete-se o cálculo para diferentes τ , escolhendo-se o valor que dê melhor coincidência com o valor experimental da temperatura do sólido no mesmo X . Com o tempo característico o coeficiente h se calcula mediante a equação (2.28).

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ALSINA & LIRA (1986) estudaram o tratamento matemático do processo de transferência de calor num leito de partículas com a passagem de um fluido, através do modelo de duas fases, onde os balanços térmicos separados é mais realístico. O estudo experimental e analítico da resposta dinâmica dos meios porosos num leito fixo, onde a temperatura deste leito varia em função do tempo, foram analisadas mediante este modelo.

Este trabalho restringiu-se a estudar os efeitos do mecanismo de transferência de calor em leito recheado, visando analisar uma das mais recentes aplicações deste estudo que é a armazenagem de Energia Solar.

Com esses objetivos foram realizados um total de 14 experiências, nas condições das Tabelas do Apêndice A, onde as temperaturas foram transformadas de mv para °C.

5.1 - INFLUÊNCIA DA POROSIDADE

Vários pesquisadores observaram a distribuição das partículas no interior do leito e verificaram que existia

uma maior porosidade na região a parede, o que portanto , viria a afetar o parâmetro de permeabilidade (Efeito da Parede).

Na Tabela 5.1, mostramos os resultados do cálculo de porosidade mediante a equação (2.8) para as geometrias utilizadas.

De acordo com a Tabela 5.1, as porosidades aumentam com o decréscimo da razão D/d (Efeito da Parede).

5.2 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO LEITO

As figuras 5.2.1 a 5.2.8 mostram algumas das curvas de resposta obtidas, com distribuição de temperatura inicial uniforme igual a temperatura ambiente e temperatura de entrada constante. Os gráficos representam T^* do sólido e do gás versus t (min), onde:

$$T^* = \frac{T - T_{amb.}}{T_e - T_{amb.}} \quad (5.1)$$

Onde:

T = temperatura num dado instante (°C)

$T_{amb.}$ = temperatura ambiente (°C)

T_e = temperatura de entrada de ar (°C).

As figuras apresentadas mostram o comportamento típico, sendo semelhante no restante dos ensaios. Uma análise da forma das curvas permite observar que: para um dado número de Reynolds e razão D/d, a evolução temporal das

temperaturas do gás e do sólido é mais rápida nas regiões próximas à entrada.

5.3 - CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TROCA TÉRMICA ENTRE O SÓLIDO E O GÁS.

Os resultados das experiências foram utilizados para calcular o tempo característico pelo método diferencial de ALSINA & LIRA (1986), de acordo com a equação (4.1). Nas Tabelas 5.3.1 são apresentados os valores dos tempos característicos e h_{local} calculados pela equação (2.27) para várias experiências; verificamos que os tempos característicos em várias posições do leito não são iguais, consequentemente o h_{Local} não é constante ao longo do leito, nas condições de operação utilizados.

Os dados experimentais foram analisados pelo programa de computador listado no Apêndice B.

O $h_{médio}$ foi calculado a partir dos h_{Local} para comparar com correlações disponíveis para Nu (Num. de Nusselt médio logarítmico).

Na Tabela (5.3.2) apresentamos os resultados de ensaios com Reynolds de partícula, $Re = \frac{G_d p}{\mu}$, entre 890 e 6000. A temperatura de entrada do ar foi em todas as experiências próximas a 90°C. Para $Re < 2000$, os números de Nusselt do presente trabalho apresentam boa concordância com os calculados mediante a correlação de WHITAKER (1972) para o número de Nusselt médio logarítmico.

$$NU_w \left(\frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \right) = \left[0.4 \left(\frac{Re}{1 - \epsilon} \right)^{1/2} + 0.2 \left(\frac{Re}{1 - \epsilon} \right)^{2/3} \right] Pr^{0.4} \quad (5.2)$$

Para Reynolds acima de 2000, verificamos uma tendência para se aproximar da correlação de WAKAO (1979); de acordo com a Figura 5.3.

$$NU_a = 2 + 1.1 Pr^{1/2} Re^{0.6} \quad (5.3)$$

5.4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Tempo característico calculado pelo método diferencial foi utilizado para verificar o ajuste do método integral. Para tais fins foram escolhidas duas experiências: a de número três com Reynolds no valor de 4130,58. e a experiência de número cinco com Reynolds de 897,95, nas Tabelas 5.4.1 e 5.4.2 mostramos resultados experimentais pelo método do Trapézio (método de integração) de acordo com a equação 2.35 de SPIGA & SPIGA (1981).

Em 0,07m e número de Reynolds menor os erros são considerados; para número de Reynolds maior as diferenças entre os vetores das temperaturas do sólido experimental e o calculado pelo método integral diminuem.

Em 0,18m de discrepância entre os valores das temperaturas do sólido experimental e o calculado, para ambos os números de Reynolds é considerado, embora o erro seja menor do que

o de 0,07m.

Os resultados encontrados pelo método integral não apresentam boa concordância com os valores experimentais devido a que, os intervalos de tempos usados no presente trabalho são grande. ALSINA *et alli* (1985) obtiveram resultados satisfatórios utilizando o método integral com intervalos de tempos menores.

Tabela 5.1 - Cálculo da Porosidade.

D/d	ϵ (a)	ϵ (b)
3,31	0,46	0,47
4,97	0,43	0,42
5,51	0,42	0,41
8,29	0,40	0,39

ϵ^a - eq. (2.8)

ϵ^b - eq. (2.7)

Tabela 5.3.1- Comparação do tempo característico para diversos Reynolds.

Experiência nº 1

Re = 3591,81

D/d = 4,97

x(m)	τ (min)	h_x (W/m ² K)
0,07	3,5	68,7
0,18	3,1	76,0
0,32	2,3	89,0

Experiência nº 2

Re = 3232,63

D/d = 4,97

x(m)	τ (min)	h_x (W/m ² K)
0,07	7,4	85,9
0,18	4,7	111,2
0,32	2,1	155,5
0,42	1,9	166,0

Experiência nº 3

Re = 4130,58

D/d = 4,97

x(m)	τ (min)	h_x (W/m ² K)
0,07	5,76	222,0
0,18	3,28	85,9
0,32	2,48	97,9
0,42	1,91	193,0

Experiência nº 4

Re = 1795,90

D/d = 4,97

x(m)	τ (min)	h_x (W/m ² K)
0,07	6,41	45,5
0,18	4,95	53,0
0,32	2,43	79,0

Experiência nº 5

$$D/d = 4,97$$

$$Re = 897,95$$

$x(m)$	$\tau(\text{min})$	$h_x (W/m^2K)$
0,07	11,25	46,0
0,18	5,87	44,0
0,32	2,17	46,0

Experiência nº 6

$$D/d = 8,29$$

$$Re = 1551,66$$

$x(m)$	$\tau(\text{min})$	$h_x (W/m^2K)$
0,025	13,09	61,2
0,205	4,88	47,5
0,41	6,41	36,0

Experiência nº 7

 $D/d = 5,51$ $Re = 2234,62$

$x(m)$	$\tau(\text{min})$	$h_x (W/m^2K)$
0,03	9,67	49,0
0,205	9,63	45,0
0,41	8,57	47,0
0,51	6,27	65,5

Experiência nº 9

 $D/d = 5,51$ $Re = 1748,84$

$x(m)$	$\tau(\text{min})$	$h_x \text{ (W/m}^2\text{K)}$
0,03	8,9	54,4
0,205	9,69	36,0
0,41	10,12	36,0
0,51	6,84	88,00

Experiência nº 10

 $D/d = 5,51$ $Re = 2137,46$

$x(m)$	$\tau(\text{min})$	$h_x \text{ (W/m}^2\text{K)}$
0,03	6,73	66,0
0,205	8,34	58,0
0,41	8,81	50,0
0,51	5,09	72,0

Experiência nº 11

 $D/d = 5,51$ $Re = 2331,78$

$x(m)$	$\tau(\text{min})$	$h_x (W/m^2K)$
0,03	13,43	62,0
0,205	8,5	50,0
0,41	10,0	76,0
0,51	5,4	66,0

Experiência nº 12

 $D/d = 8,29$ $Re = 1293,05$

$x(m)$	$\tau(\text{min})$	$h_x (W/m^2K)$
0,025	13,43	0,56
0,205	4,67	0,50
0,41	7,27	0,39

Tabela 5.3.2 - Comparação do nº de Nusset dos diversos Rey
nolds com outras correlações.

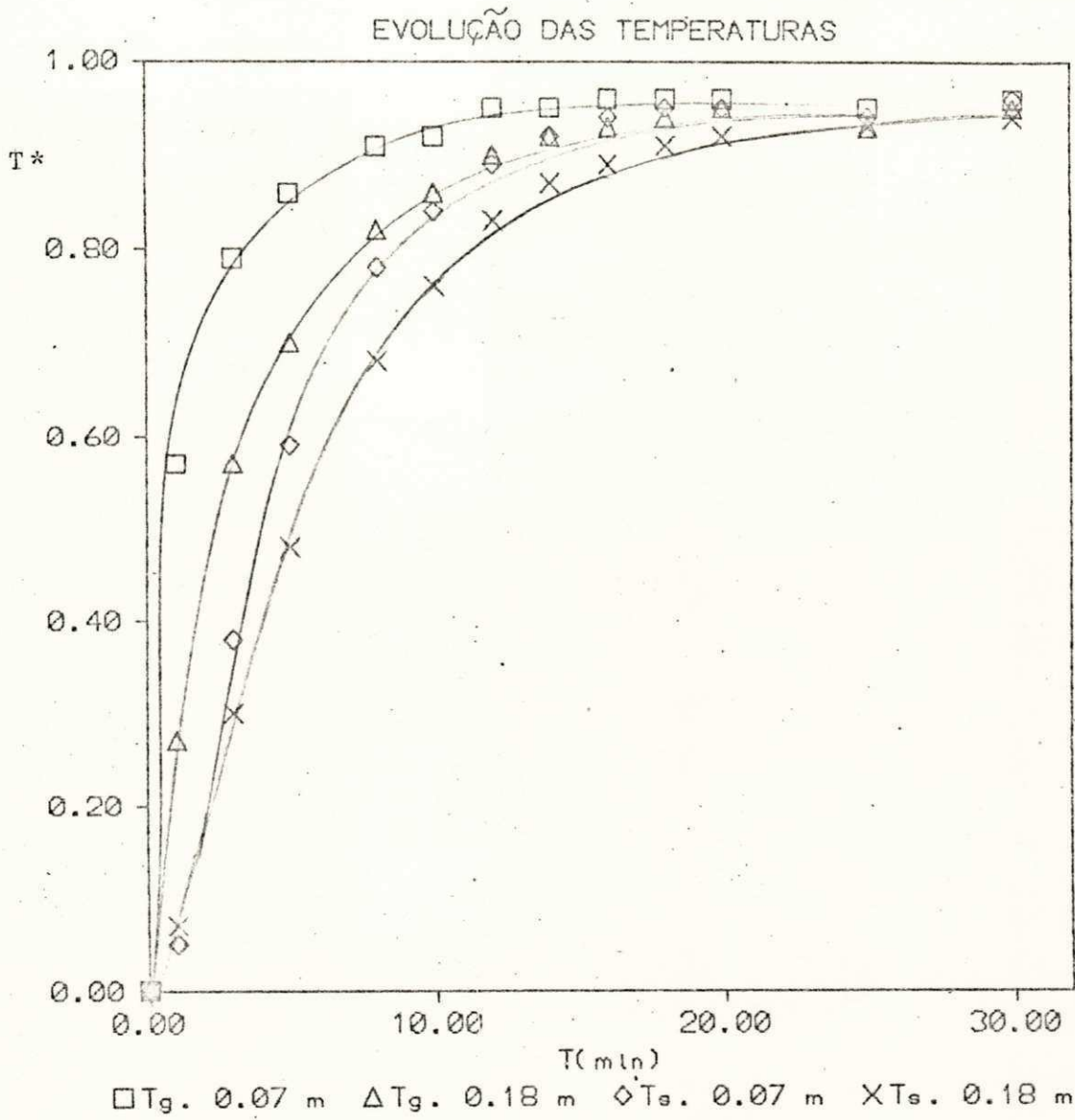
Pr = 0,71

Nº Exp.	Re	Nu	NuW	Nua
5	897,95	52,70	49,52	59,93
12	1293,05	56,60	61,77	74,1
*13	1484,0	360,00	62,20	80,1
6	1551,66	57,00	61,48	80,32
9	1748,84	97,00	75,69	84,44
4	1795,91	95,10	75,43	89,81
8	1943,15	69,40	81,58	94,06
10	2137,47	102,10	86,47	99,48
7	2234,62	108,40	88,84	102,13
11	2331,78	112,40	91,18	104,48
2	3232,63	152,10	108,4	126,94
1	3591,81	93,00	115,25	135,09
3	4130,58	175,00	125,58	146,74
*14	5938,00	396,00	144,00	182,00

* Experiências com menor razão de D/d.

Tabela 5.3.2- Cálculo do coeficiente de transferência.

Re	d (m)	D(m)	ϵ	$h(W/m^2K)$	Nu
897,95	0,0362	0,18	0,43	45,00	52,70
1293,05	0,0362	0,30	0,40	48,30	56,60
1551,86	0,0362	0,30	0,40	48,50	57,06
1748,84	0,0544	0,30	0,42	54,00	97,00
1795,91	0,0362	0,18	0,43	59,00	95,10
1943,15	0,0544	0,30	0,42	58,00	69,40
2137,47	0,0544	0,30	0,42	61,50	102,10
2234,62	0,0544	0,30	0,42	52,00	108,40
2331,78	0,0544	0,30	0,42	63,50	112,40
3232,63	0,0362	0,18	0,43	129,80	152,10
3591,81	0,0362	0,18	0,43	77,90	93,00
4130,58	0,0362	0,18	0,43	149,60	175,00

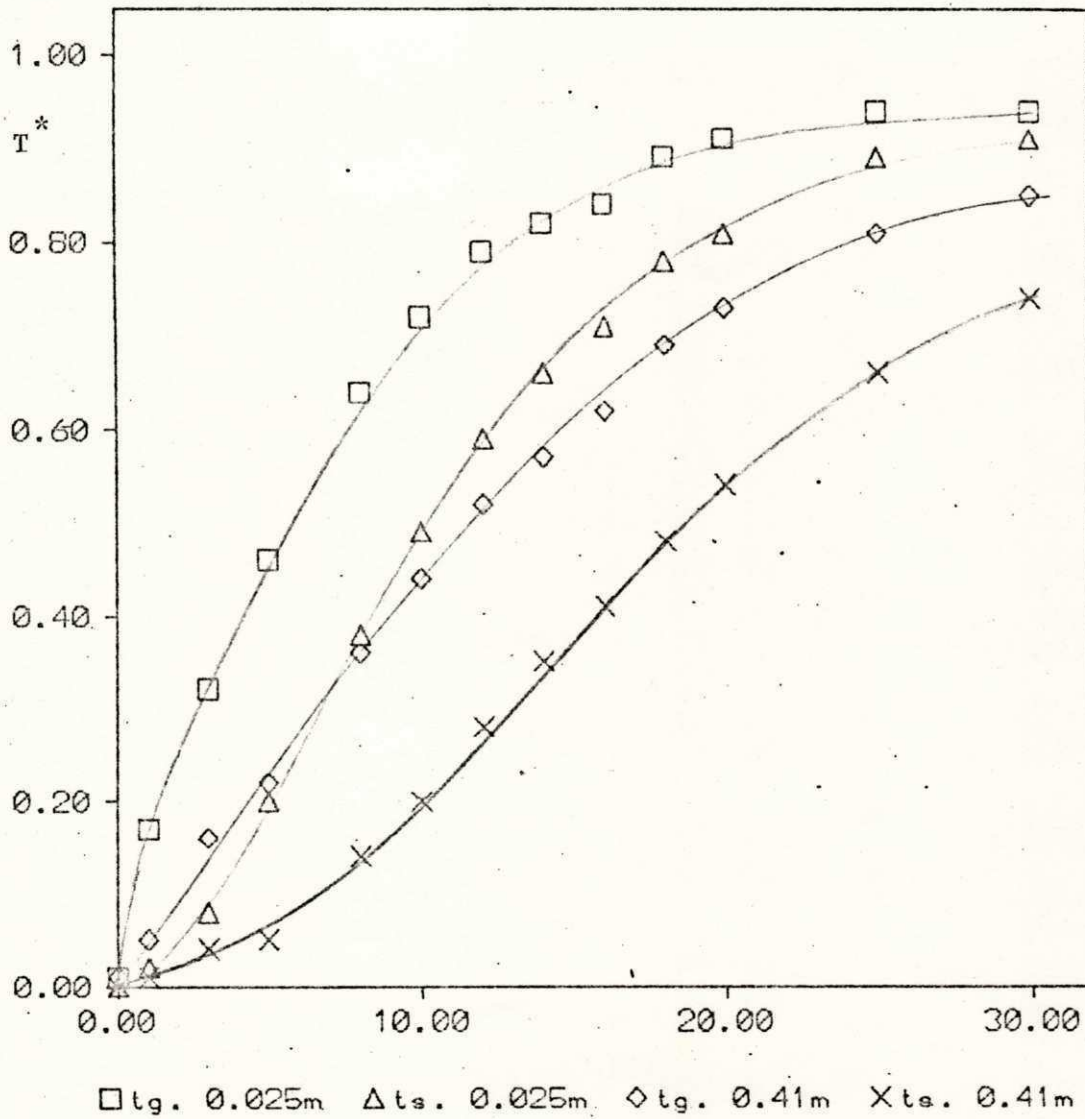


Experiência nº 1

- $Re = 3591,81$

Figura 5.2.1

EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS.

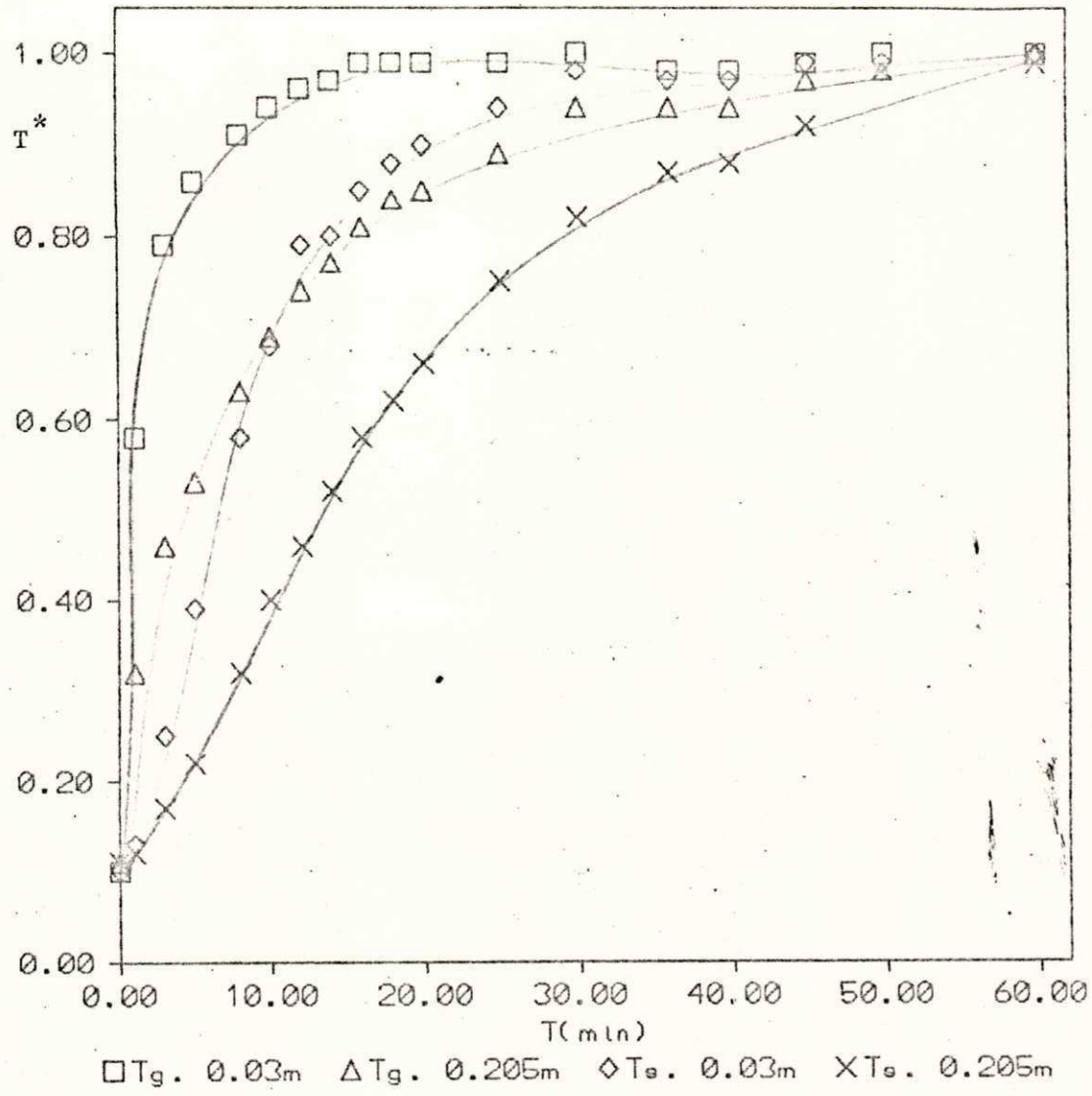


Experiência nº 6

- Re = 1551,65

Figura 5.2. 2

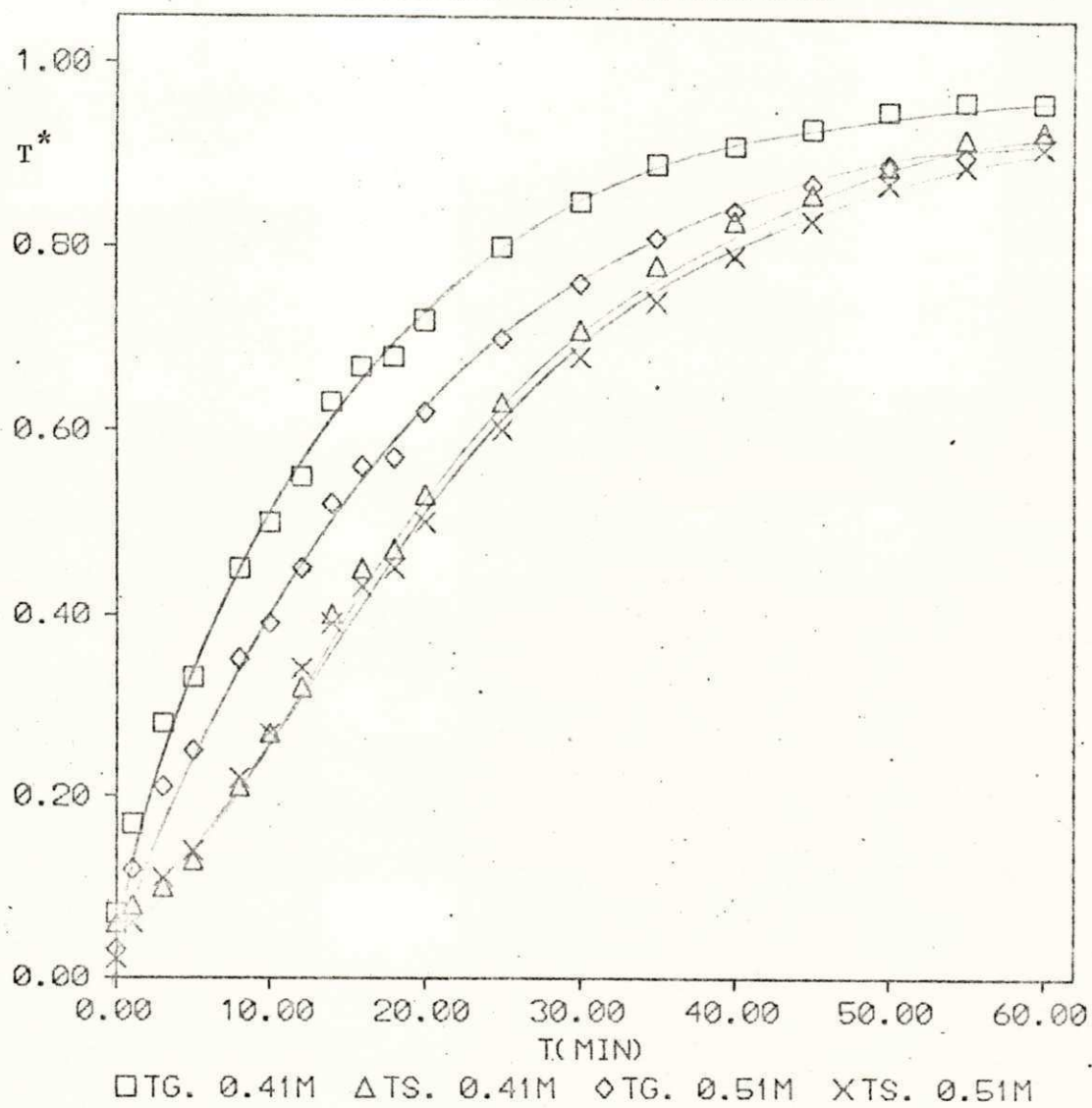
EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS



Experiência nº 9 - Re = 1748,84

Figura 5.2.3

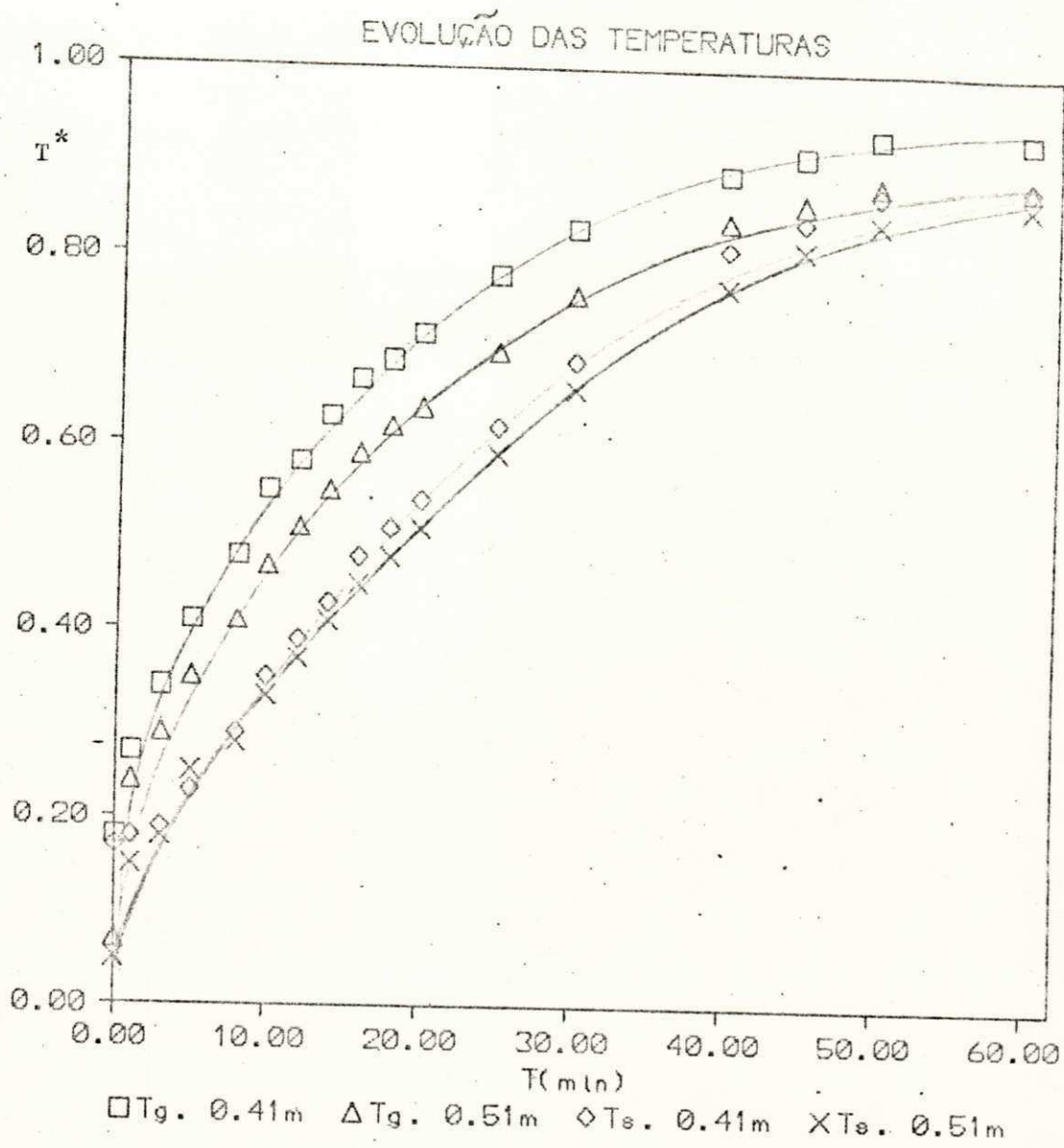
EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS



Experiência nº 10.

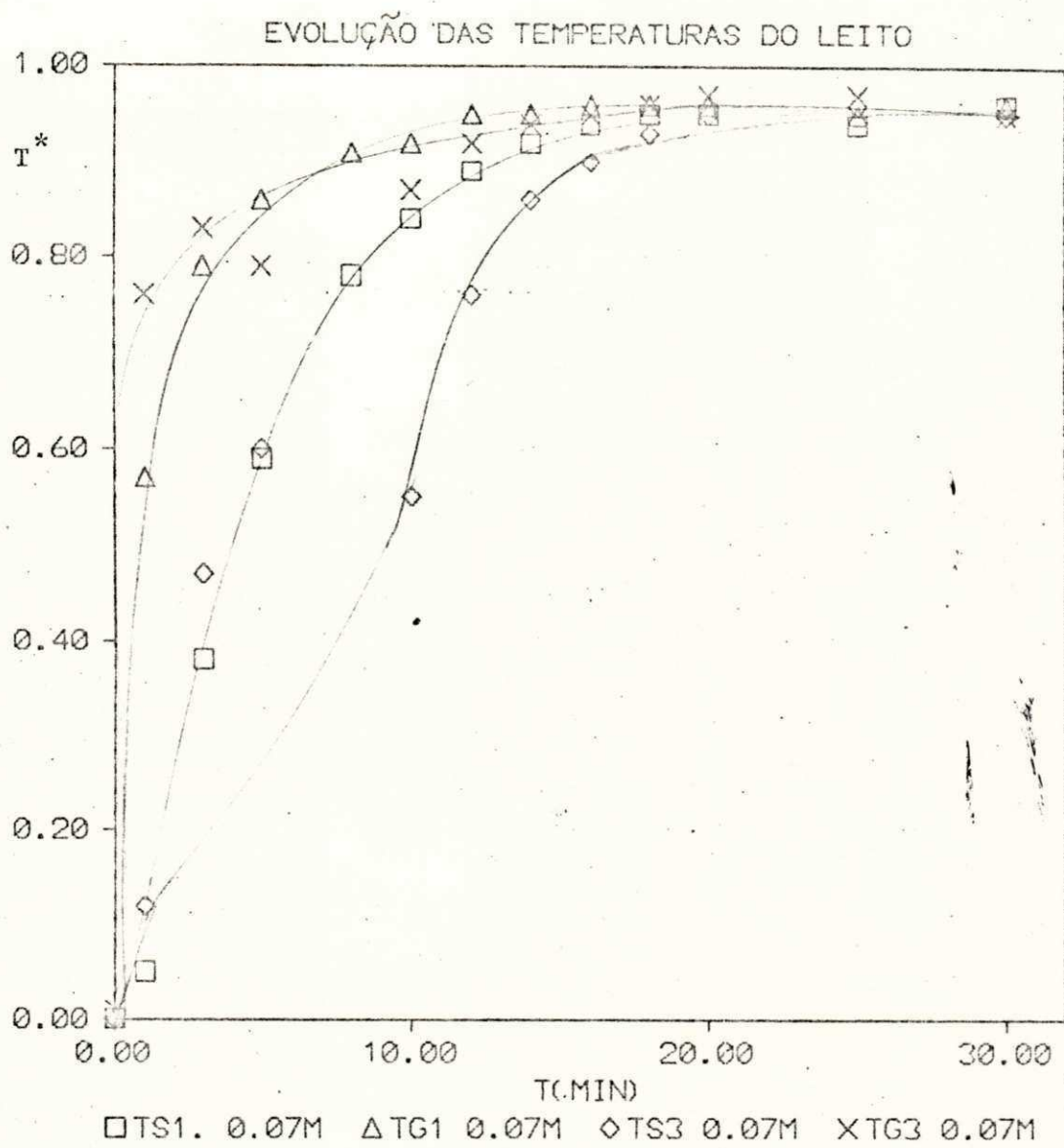
Re = 2137,46

Figura 5.2.4



Experiência nº 11 - Re = 2331,78

Figura 5.2.5

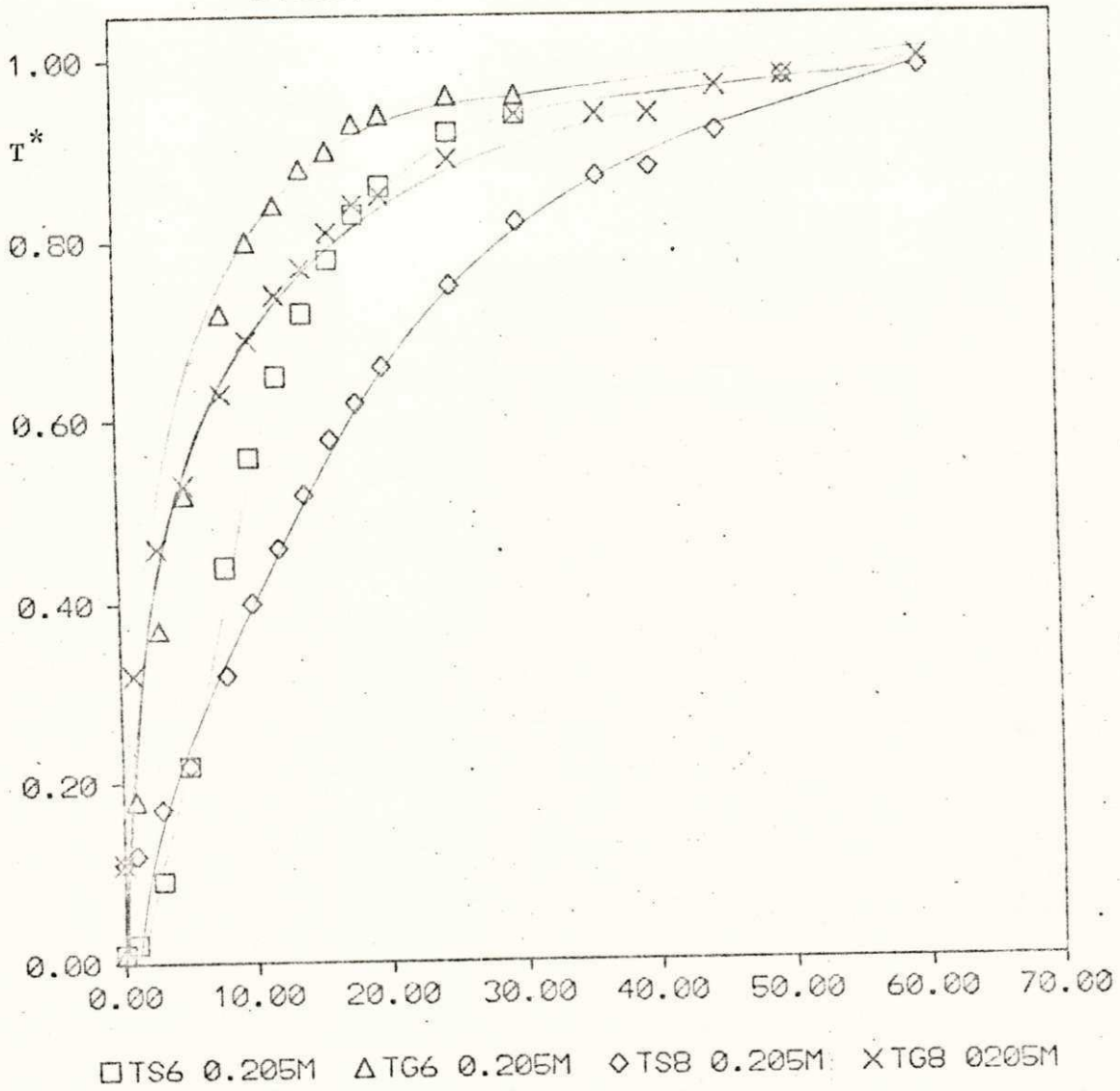


Experiência nº 1 - Re = 3591,81

Experiência nº 3 - Re = 4130,58

Figura 5.2.6

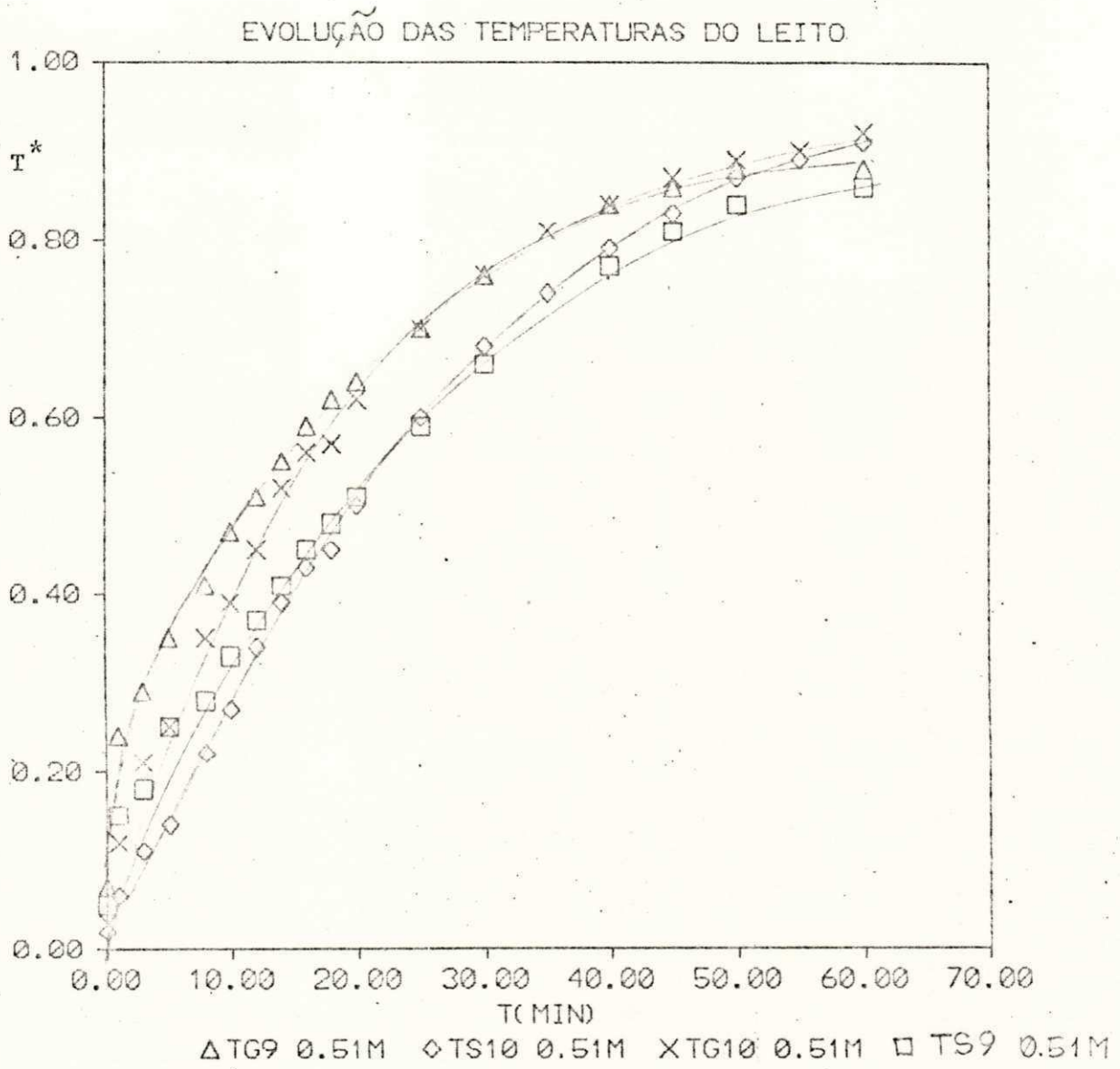
EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS DO LEITO



Experiência nº 6 - Re = 1551,66

Experiência nº 8 - Re = 1943,15

Figura 5.2.7



Experiência nº 9 - Re = 1948,84

Experiência nº 10 - Re = 2137,46

Figura 5.2.8



Figura 5.3.

Tabela 5.4.1 - Verificação com o método integral

Experiência nº 03 $Re = 4130,58$

t.(min)	$x_1 = 0,07m$ ←			→ $x_2 = 0,18m$		
	θ	TS^+_{exp}	$TS^+_{calc.}$	θ	$TS^+_{exp.}$	$TS^+_{calc.}$
0	0	0,003		0	0,131	
1	0,174	0,083	0,047	0,305	0,094	0,049
3	0,521	0,396	0,153	0,915	0,333	0,248
5	0,868	0,557	0,349	0,524	0,483	0,228
10	1,736	0,599	0,687	3,049	0,593	0,768
12	2,083	0,788	0,767	3,659	0,739	0,550
14	2,431	0,869	0,825	4,268	0,827	0,722
16	2,778	0,912	0,867	4,878	0,877	0,830
18	3,125	0,943	0,900	5,488	0,919	0,910
20	3,472	0,959	0,925	6,098	0,944	0,944
25	4,340	0,974	0,992	7,622	0,970	1,00
30	5,208	0,980	1,000	9,146	0,990	1,01

Tabela 5.4.2 - Verificação com o método integral

Experiência nº 05 $Re = 897,95$ $x_1 = 0,07m$ $x_2 = 0,18m$

t(min)	θ	TS ⁺ exp.	TS ⁺ calc.	θ	TS ⁺ exp.	TS ⁺ calc.
0	0	0,156			0,169	
1	0,089	0,181	0,018	0	0,172	0,020
2	0,267	0,244	0,077	0,170	0,197	0,093
5	0,445	0,375	0,160	0,511	0,269	0,172
8	0,711	0,559	0,297	0,851	0,381	0,182
10	0,889	0,653	0,386	1,363	0,459	0,303
12	1,067	0,738	0,469	1,704	0,522	0,435
14	1,244	0,803	0,542	2,044	0,594	0,503
16	1,422	0,847	0,604	2,726	0,644	0,581
18	1,600	0,888	0,657	3,066	0,697	0,646
20	1,778	0,894	0,702	3,407	0,731	0,700
25	2,222	0,909	0,791	4,258	0,791	0,816
30	2,667	0,913	0,850	5,111	0,825	0,873
35	3,111	0,919	0,890	5,963	0,853	0,908
40	3,556	0,925	0,918	6,814	0,866	1,00

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

A partir dos ensaios realizados em diferentes condições de vazão do ar de entrada, alturas do leito, diâmetros das partículas do leito, diâmetro das colunas, podemos concluir:

- A medição do perfil axial de temperaturas ao longo do tempo mostram que a evolução temporal das temperaturas do sólido e do gás é mais rápida nas regiões próximas à entrada do gás.

- O método diferencial utilizado para o cálculo do tempo característico a partir das curvas resposta mostrou que : o coeficiente local (h_{Loc}) não é constante ao longo da coluna.

- Os valores de tempo característico calculados pelo método diferencial de ALSINA & LIRA (1986), foram usados na verificação do método integral de ALSINA *et alii* (1985).

- Para dois valores de número de Reynolds diferentes e duas posições na coluna, foram observados discrepâncias entre os valores calculados e os experimentais, sendo mais acentuados para tempos pequenos e perto da entrada de ar.

- O melhor ajuste foi obtido para um número de Reynolds maior.

- Os coeficientes médios h e os números de Nusselt médios, calculados a partir dos valores locais aumentam com o número de Reynolds.

A correlação de WHITAKER (1972) prediz para $Re < 2000$, com erro menor que 8%, os valores obtidos no presente trabalho. Para $Re > 2000$ a correlação de WAKAO (1979) resultou também com erro em torno de 8%.

Para valores $(D/d) 3,31$ o efeito da parede produz uma anomalia na tendência de Nu aumentar com o número de Reynolds, resultando em números de Nusselt bem maiores que os preditos pelas correlações de WHITAKER (1972) e WAKAO (1979) e bem maiores que os encontrados no presente trabalho para razões D/d maiores.

CAPÍTULO VII

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Ensaiar com líquidos especialmente a água, importante para a recuperação de energia,
- Investigar a relação D/d , sobre o efeito da parede,
- Estudar as faixas de Reynolds abaixo e acima das usadas,
- Estudar o efeito do gradiente de temperaturas internas dentro da partícula, pelo método de ALSINA & SCARFCA BAROZZI (1981), comparando com os modelos de WAKAO (1979).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSINA, O.L.S. & SCARICABAROZZI, R. "Comparação dos modelos de uma fase e de duas fases na transmissão de calor entre um fluido e um leito de condutividade térmica finita". Anais do IX ENEMP, 2:89-106, 1981.

ALSINA, O.L.S. & LIRA, S. "Transmissão de calor num leito de esferas". Anais do II Congresso Latinoamericano de transferência de calor e massa, 2:629-639, 1986.

ARGO, W.B. & SMITH, J.M. "Heat Transfer in Packed Beds". Chemical Engineering Progress, 49:443-451, 1953.

BEZERRA, H.F. *et alli*. "Transferência de calor num leito de esferas: Interpretação de dados experimentais mediante um modelo de duas fases". Anais do XIII ENEMP, São Paulo, 1985.

BRUNELLO, G. *et alli*. "Estimativa da fração de vazios em leitos fixos uniformes". Anais do IX Encontro sobre escoamento em meios porosos, 1:74-79, 1981.

CYBULSKI, A. *et alli*. "Effective thermal conductivity of packed beds of silicon-copper particles". Chemical Engineering Science, 30:1011-1013, 1975.

DASSEN, G. & SCARICABAROZZI, R. "Troca de calor entre um fluido e um leito sólido de condutividade térmica finita". Suplemento de Ciência e Cultura, SBPC, 7:232-234, 1980.

DUARTE, S.I.P. *et alli*. "Theoretical Prediction of Heterogeneous One-Dimensional Heat Transfer Coefficients for Fixed-Bed Reactores". Aiche Journal, 31:868-870, 1985.

DURY, T. "Heat Transfer Survey 1975". Literature Review 1974-75. 62-67, 1975.

FREIRE, J.T. "Transferência de calor em meios porosos". Tese de Doutorado. COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 1979.

FREIRE, J.T. & MASSARANI, G. "Condução de calor em meios porosos VII: Determinação do tensor condutividade térmica para pequenos números de Reynolds". Anais do VI Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, Rio Claro, 117-1-117-25, 1978.

HAVSEN, H. in AFGAN, E.V. Schlunder. "Heat Exchanger Design and Theory Source Book". McGraw Hill, 1974.

HOFFMANN, C. *et alli*. "Distribuciones de dispersion del calor em intercambiadores regenerativos, para el caso de transferencia de calor controlada por resistênci

- en la interfase". Instituto de Física, 49:1-18, 1972.
- JAKOB, M. "Heat Transfer". Ed Wiley NY, vol. II, p.1938-1939, 1965.
- LEVA, N. & GRUMMER, N. "Pressure Drops Through Packed Tubes - Part. III, Prediction of Voids in Packed Tubes", Chem. Eng. Prog. 43, 1947, 713-718.
- MACLAINE-CROSS, I.J. & BANKS, P.J. "Coupled Heat and Mass Transfer in Regenerations-Prediction Using an Analogy With Heat Transfer". Int. J. Heat Mass Transfer, 15:1225-1242, 1972.
- McBRIDE, R.N. *et alli*. "Predictions of a convective heating system". Fourth Symposium on Flames and Industry, Paper 10:115-123, 1972.
- MICHELSSEN, M.L. "Estimation of Heat Transfer Parameters in Packed Beds from Radial Temperature". The Chemical Engineering Journal. 18:67-72, 1978.
- NUSSELT, W. "De Theorie des Winderhitzu". Zudi, vol. . 71, 1927.
- PERRY & CHILTON. "Manual de Engenharia Química". Quinta Edição, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.
- SAEZ, A.E. & McCOY, B.J. "Dynamic Response of a Packed

Bed Thermal Storage System - A Model for Solar Air Heating". *Solar Energy*, 29:201-206, 1982.

SPIGA, G. & SPIGA, M. "A Rigorous Solution to Heat Transfer two Phase Model in Porous Media and Packed Beds". *Int. J. Heat Mass Transfer*, 24:355-364, 1981.

VAFAI, K. & TIEN, C.L. "Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media". *Int. J. Heat mass transfer*, 24:195-203, 1981.

VORTMEYER, D. *et alli*. "Comparison of one - and two - phase model predictions for adiabatic packed bed chemical reactors". *Chemical Reaction Engineering II* (1974) 44:583-599.

WAKAO, N. *et alli*. "Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds". *Chemical Engineering Science*, 34:325-336, 1979.

WHITAKER, S. "Forced convection heat transfer correlation for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles. *AICHE Jr.* 18, 361, 1972:

APÉNDICE A

Tabela I do Apêndice A

Propriedades Físicas do ar (avaliadas a 363 K)

$$C_p = 1,0396 \text{ KJ/kg K}$$

$$K_f = 3,09 \times 10^{-5} \text{ KJ/mK}$$

$$\mu = 2,1297 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$$

$$C_s = 1,017 \text{ KJ/kg K}$$

$$\rho_s = 2240 \text{ kg/m}^3$$

$$K_s = 0,57 \text{ W/mK}$$

$$\rho_f = 0,9679 \text{ kg/m}^3$$

Tabela -1

Experiência 1

Vazão = 220 m³/h

Temperatura Ambiente = 25,5°C (Inicial) 26,0°C (Final)

TS ₁ (°C)	TS ₂ (°C)	TS ₃ (°C)	TG ₁ (°C)	TG ₂ (°C)	TG ₃ (°C)	Tempo (min)
25.5	25.5	25.5	24.5	24.5	25.5	0
28.7	29.9	26.8	59.1	41.2	37.3	1
50.7	45.4	36.6	76.9	63.0	50.7	3
63.8	56.6	45.7	80.6	70.8	58.6	5
75.5	69.1	58.8	83.9	78.0	68.1	8
80.1	74.8	65.8	85.0	81.0	73.0	10
82.7	78.4	71.0	86.0	82.9	76.3	12
84.1	80.9	74.6	86.3	84.1	78.4	14
85.4	82.5	77.8	86.7	85.0	80.3	16
86.0	83.9	80.1	86.8	85.6	81.6	18
86.5	84.6	81.8	86.9	86.2	82.7	20
86.7	85.9	83.9	87.0	86.3	83.9	25
87.2	86.0	85.0	87.1	86.5	85.6	30

D = 0,18m

d = 0,0362m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,07	TS ₁	TG ₁
0,18	TS ₂	TG ₂
0,32	TS ₃	TG ₃

Tabela -2

Experiência 2

Vazão = 180 m³/h

Temperatura Ambiente = 28,8°C (Inicial) 28,8°C (Final)

TS ₁ (°C)	TS ₂ (°C)	TS ₃ (°C)	TS ₄ (°C)	TG ₁ (°C)	TG ₂ (°C)	TG ₃ (°C)	TG ₄ (°C)	Tempo (min)
32.2	32.4	32.0	31.6	32.6	32.6	32.6	31.7	0
33.4	34.3	34.3	32.9	54.3	50.2	39.6	36.6	1
46.8	44.9	42.3	40.9	69.8	58.4	48.9	43.4	3
59.9	55.6	46.6	45.7	76.2	67.5	57.1	50.4	5
71.3	65.0	57.6	54.8	79.7	74.7	65.6	59.2	8
74.9	69.6	63.0	59.4	80.4	76.8	69.0	62.2	10
77.4	74.2	67.3	64.5	81.4	74.2	71.9	66.8	12
79.3	76.6	70.9	67.9	81.7	79.8	74.2	69.8	14
79.7	77.4	73.0	69.6	81.6	79.8	75.1	71.3	16
80.8	79.3	75.5	72.3	82.5	81.4	77.0	73.4	18
81.2	80.0	77.0	74.0	82.7	81.7	77.9	75.0	20
81.4	80.4	77.9	74.7	82.9	81.6	78.9	76.7	22
81.9	81.0	79.1	76.2	83.0	82.1	79.3	77.0	25
82.3	81.6	80.2	77.9	83.1	82.5	80.3	78.1	30
82.5	81.9	81.2	78.9	83.2	82.7	81.6	79.1	35
82.9	82.3	81.6	79.5	83.3	82.9	81.9	79.7	40

D = 0,18m

d = 0,0362m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,07	TS ₁	TG ₁
0,18	TS ₂	TG ₂
0,32	TS ₃	TG ₃
0,42	TS ₄	TG ₄

Tabela -3

Experiência 3

Vazão = 230 m³/h

Temperatura Ambiente = 24,8°C (Inicial) 25,5°C (Final)

TS ₁ (°C)	TS ₂ (°C)	TS ₃ (°C)	TS ₄ (°C)	TG ₁ (°C)	TG ₂ (°C)	TG ₃ (°C)	TG ₄ (°C)	Tempo (min)
25.0	25.6	25.4	24.6	25.2	25.8	25.6	24.8	0
29.9	30.5	27.5	29.5	57.8	43.6	38.8	34.1	1
49.1	45.1	37.7	35.0	67.5	58.8	49.8	43.8	3
59.0	54.2	46.6	44.3	69.6	62.0	54.8	49.5	5
61.6	60.9	56.3	55.2	82.5	74.1	63.9	57.1	10
73.2	69.8	63.3	62.7	83.6	78.1	70.2	64.1	12
78.9	75.3	69.0	66.6	84.0	80.6	74.5	68.6	14
81.5	78.3	73.0	69.6	84.6	82.1	76.8	71.9	16
83.4	80.8	76.1	73.0	85.3	83.6	79.3	75.1	18
84.4	82.3	79.1	75.0	85.5	84.4	80.8	77.0	20
85.3	83.9	82.0	76.8	85.8	85.1	82.6	79.8	25
85.7	85.1	83.0	77.6	86.2	85.7	83.8	81.7	30

D = 0,18m

d = 0,0362m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,07	TS ₁	TG ₁
0,18	TS ₂	TG ₂
0,32	TS ₃	TG ₃
0,42	TS ₄	TG ₄

Tabela -4

Experiência 4

Vazão = 100 m³/h

Temperatura Ambiente = 27,8°C (Inicial) 28,0°C (Final)

TS ₁ (°C)	TS ₂ (°C)	TS ₃ (°C)	TG ₁ (°C)	TG ₂ (°C)	TG ₃ (°C)	Tempo (min)
32.2	32.5	32.5	32.4	32.6	32.6	0
34.3	34.3	32.9	51.9	40.3	36.3	1
46.4	41.3	35.8	70.9	53.8	42.4	3
58.4	50.0	40.7	78.8	63.3	48.7	5
70.1	59.9	48.3	82.1	71.1	56.3	8
75.1	65.4	53.4	82.8	74.7	60.4	10
78.5	70.3	58.9	84.0	77.5	64.6	12
80.6	73.2	62.5	84.7	79.2	66.3	14
81.9	75.1	64.8	85.5	80.8	69.2	15
84.0	78.3	69.6	86.3	82.6	72.8	18
84.9	80.0	72.0	86.8	83.8	74.5	20
86.6	83.2	77.1	87.8	85.7	78.5	25
87.2	84.9	80.4	87.9	86.4	80.8	30
87.4	85.5	82.0	88.2	86.6	82.1	35
87.6	85.9	82.4	88.3	86.8	82.8	40

D = 0,18m

d = 0,0362m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{S01.}	T _{Gás}
0,07	TS ₁	TG ₁
0,18	TS ₂	TG ₂
0,32	TS ₃	TG ₃

Tabela -5

Experiência 5

Vazão = 50 m³/h

Temperatura Ambiente = 28,8°C (Inicial) 28,0°C (Final)

T _{S1} (°C)	T _{S2} (°C)	T _{S3} (°C)	T _{G1} (°C)	T _{G2} (°C)	T _{G3} (°C)	Tempo (min)
33.0	33.4	33.0	33.2	33.6	33.4	0
33.8	33.5	33.2	36.0	33.9	33.5	1
35.8	34.3	33.4	43.8	37.5	34.1	3
40.0	36.6	34.1	49.1	41.1	35.4	5
45.9	40.2	35.8	53.8	45.7	37.7	8
48.9	42.7	37.1	55.9	48.2	39.4	10
51.6	44.7	38.5	57.1	50.2	40.8	12
53.7	47.0	40.2	57.3	51.8	42.3	14
55.1	48.6	41.8	57.5	53.0	43.7	16
56.4	50.3	43.8	57.7	54.1	45.4	18
56.6	51.4	44.6	57.9	54.5	46.1	20
57.1	53.3	47.7	58.0	55.6	48.6	25
57.2	54.4	50.0	58.2	55.7	50.2	30
57.4	55.3	51.5	58.4	56.5	52.5	35
57.6	55.7	52.7	58.6	56.7	52.8	40

D = 0,18m

d = 0,0362m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,07	T _{S1}	T _{G1}
0,18	T _{S2}	T _{G2}
0,32	T _{S3}	T _{G3}

Tabela -6

Experiência 6

Vazão = 240 m³/h

Temperatura Ambiente = 25,5°C (Inicial) 26,0°C (Final)

T _{S1} (°C)	T _{S2} (°C)	T _{S3} (°C)	T _{G1} (°C)	T _{G2} (°C)	T _{G3} (°C)	Tempo (min)
25.8	25.8	25.8	26.0	26.0	26.0	0
26.6	24.4	24.0	54.3	34.6	28.0	1
50.2	30.4	26.1	72.7	46.4	34.2	3
66.3	37.8	28.9	78.6	55.1	39.9	5
77.4	49.9	35.9	80.3	65.5	49.3	8
80.1	56.5	40.4	81.9	70.0	54.4	10
81.4	62.4	45.4	82.3	73.6	59.4	12
82.0	67.2	50.1	82.9	76.3	63.4	14
82.2	70.8	54.5	83.2	78.0	66.8	16
82.4	73.8	58.4	83.4	79.5	69.8	18
82.6	75.7	61.9	83.5	80.3	71.7	20
82.7	79.3	68.7	83.7	81.6	75.9	25
82.8	81.0	73.6	83.8	82.2	78.6	30

D = 0,30 m

d = 0,0362m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,025	T _{S1}	T _{G1}
0,205	T _{S2}	T _{G2}
0,41	T _{S3}	T _{G3}

Tabela -7

Experiência 7

Vazão = 230 m³/h

Temperatura Ambiental = 25,8°C (Inicial) 25,8°C (Final)

TS ₁ (°C)	TS ₂ (°C)	TS ₃ (°C)	TS ₄ (°C)	TG ₁ (°C)	TG ₂ (°C)	TG ₃ (°C)	TG ₄ (°C)	Tempo (min)
26.4	28.1	27.0	26.4	26.8	28.5	27.5	26.6	0
26.7	29.9	27.7	27.5	56.3	43.8	35.1	33.6	1
37.4	31.3	30.2	31.5	83.3	57.1	45.5	41.7	3
50.3	36.8	33.6	34.9	90.7	64.7	51.4	46.9	5
67.5	47.0	41.0	41.7	95.4	73.8	60.1	54.8	8
75.9	53.5	45.7	45.9	97.7	78.4	64.9	59.2	10
83.3	60.5	51.2	50.8	99.4	82.9	70.0	64.3	12
87.3	65.1	55.4	54.5	100.6	85.9	73.6	67.7	14
91.1	69.8	59.2	58.2	101.5	88.6	77.0	70.8	16
93.9	74.0	63.2	61.8	102.3	91.1	80.1	74.0	18
95.8	77.0	66.2	64.5	102.6	92.6	82.2	76.3	20
100.2	85.6	75.1	73.0	104.0	97.0	88.4	83.1	25
102.6	91.8	82.3	80.0	104.7	100.0	93.2	88.0	30
103.8	95.8	87.7	85.2	104.9	101.5	96.0	91.6	35
104.4	98.7	91.6	89.2	105.1	102.6	98.3	94.3	40

D = 0,30m

d = 0,0544 m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,03	TS ₁	TG ₁
0,205	TS ₂	TG ₂
0,41	TS ₃	TG ₃
0,51	TS ₄	TG ₄

Tabela -8

Experiência 8

Vazão = 200 m³/h

Temperatura Ambiente = 27,5°C (Inicial) 27,5°C (Final)

TS ₁ (°C)	TS ₂ (°C)	TS ₃ (°C)	TS ₄ (°C)	TG ₁ (°C)	TG ₂ (°C)	TG ₃ (°C)	TG ₄ (°C)	Tempo (min)
34.0	35.0	35.0	33.0	34.3	35.1	35.1	33.4	0
36.2	35.7	35.7	36.0	67.4	49.3	42.9	41.0	1
45.1	39.1	37.8	39.5	82.3	59.2	49.5	46.1	3
54.6	42.7	39.8	40.8	87.8	65.1	53.9	49.3	5
68.1	50.3	45.0	46.3	91.8	71.7	59.9	54.4	8
75.1	55.4	48.8	49.9	93.9	76.1	66.8	58.8	10
82.9	60.1	52.4	53.3	95.2	79.5	70.2	62.2	12
84.0	64.0	55.2	55.8	96.0	81.8	70.4	64.9	14
87.5	68.1	59.0	59.0	97.3	84.6	73.6	67.9	16
90.5	71.9	62.4	62.2	98.1	87.1	76.6	71.0	18
92.4	75.1	65.3	64.9	98.8	89.0	79.1	73.4	20
95.4	81.4	71.9	70.8	99.2	92.0	83.9	78.5	25
98.1	87.1	78.2	76.5	99.8	95.6	88.0	83.3	30
99.6	91.8	84.2	82.3	100.1	97.3	92.0	88.0	36
99.7	93.2	86.1	84.2	100.3	97.5	93.0	89.4	40
100.7	96.0	89.9	88.2	100.7	99.2	95.4	92.4	45
101.1	100.1	92.4	90.7	101.5	100.5	96.8	94.3	50
101.7	101.1	95.6	94.3	101.7	101.5	98.7	96.8	60

D = 0,30m

d = 0,0544 m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,03	TS ₁	TG ₁
0,205	TS ₂	TG ₂
0,41	TS ₃	TG ₃
0,51	TS ₄	TG ₄

Tabela -9

Experiência 9

Vazão = 180 m³/h

Temperatura Ambiente = 27,5°C (Inicial) 27,5°C (Final)

TS ₁ (°C)	TS ₂ (°C)	TS ₃ (°C)	TS ₄ (°C)	TG ₁ (°C)	TG ₂ (°C)	TG ₃ (°C)	TG ₄ (°C)	Tempo (min)
37.0	38.7	37.0	30.1	37.6	38.8	37.4	31.1	0
39.8	38.9	37.6	36.0	62.8	48.0	43.1	41.2	1
45.5	40.6	38.9	38.1	72.9	55.0	47.2	44.6	3
53.0	43.4	40.6	41.5	75.7	59.2	50.7	47.2	5
61.5	48.2	43.8	43.2	78.0	63.4	54.6	50.6	8
66.6	52.2	46.7	45.9	79.7	66.4	57.7	53.5	10
69.8	55.0	48.8	47.8	80.4	68.7	59.6	55.6	12
72.7	57.9	51.0	50.1	81.4	70.6	62.0	57.9	14
75.5	61.1	53.9	52.6	82.5	73.0	64.7	60.3	16
77.2	63.4	56.0	54.4	83.1	74.4	66.4	62.0	18
78.9	65.8	58.0	56.7	83.5	75.7	68.3	63.7	20
81.4	70.6	63.0	61.3	84.0	78.3	71.9	67.5	25
82.9	74.4	67.2	65.1	84.6	80.2	74.7	70.8	30
83.3	80.0	74.2	72.1	85.0	83.1	79.3	76.1	40
85.2	81.2	76.1	74.2	85.3	83.7	80.4	77.2	45
85.3	82.5	78.0	76.5	85.5	83.9	81.6	78.7	50
85.5	83.5	79.7	78.2	85.7	84.0	82.5	79.7	60

D = 0,30 m

d = 0,0544 m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,03	TS ₁	TG ₁
0,205	TS ₂	TG ₂
0,41	TS ₃	TG ₃
0,51	TS ₄	TG ₄

Tabela -10

Experiência 10

Vazão = 220 m³/h

Temperatura Ambiente = 24,5°C (Inicial) 26,0°C (Final)

TS ₁ (°C)	TS ₂ (°C)	TS ₃ (°C)	TS ₄ (°C)	TG ₁ (°C)	TG ₂ (°C)	TG ₃ (°C)	TG ₄ (°C)	Tempo (min)
27.2	29.0	29.0	26.0	27.6	29.2	29.3	26.4	0
27.7	29.6	29.4	28.3	52.6	38.9	34.9	32.3	1
38.8	33.3	32.0	32.6	79.3	55.2	45.1	39.8	3
49.3	37.5	34.5	35.2	85.0	61.6	50.0	43.6	5
64.1	46.1	40.4	40.7	88.6	69.0	57.3	50.0	8
70.7	51.4	44.2	44.2	90.5	73.0	61.0	53.4	10
76.4	56.3	48.1	49.3	90.6	76.2	64.8	57.1	12
80.8	61.0	52.3	51.4	91.0	78.5	68.1	60.5	14
83.4	64.7	55.6	54.2	91.9	80.4	70.7	63.0	16
85.5	68.2	58.8	57.3	93.5	83.1	73.4	65.8	18
88.1	72.4	62.9	61.2	95.3	85.4	76.7	69.3	20
92.8	79.6	70.6	68.5	96.6	90.1	82.5	75.5	25
94.9	85.0	76.5	74.4	96.9	92.6	86.3	79.9	30
96.2	88.8	81.4	78.9	97.1	94.1	89.2	83.5	35
97.0	91.5	85.0	82.5	97.3	95.3	91.3	86.3	40
97.3	93.5	88.2	86.0	97.5	96.2	93.2	88.8	45
97.5	95.3	90.7	88.8	97.6	96.5	94.5	90.7	50
97.6	95.8	92.2	90.1	97.7	96.9	95.1	91.3	55
97.8	96.4	92.8	91.5	97.9	97.0	95.4	92.2	60

D = 0,30m

d = 0,0544 m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,03	TS ₁	TG ₁
0,205	TS ₂	TG ₂
0,41	TS ₃	TG ₃
0,51	TS ₄	TG ₄

Tabela -11

Experiência 11

Vazão = 240 m³/h

Temperatura Ambiente = 26,0°C (Inicial) 27,0°C (Final)

TS ₁ (°C)	TS ₂ (°C)	TS ₃ (°C)	TS ₄ (°C)	TG ₁ (°C)	TG ₂ (°C)	TG ₃ (°C)	TG ₄ (°C)	Tempo (min)
27.3	27.3	27.3	27.3	27.6	27.6	27.6	27.6	0
29.6	29.4	29.8	27.9	53.9	38.1	32.6	31.5	1
36.4	29.6	30.6	31.5	86.9	59.2	46.5	41.7	3
50.7	36.1	32.5	36.1	100.6	70.2	54.7	48.8	5
71.9	48.6	41.2	44.4	116.5	85.2	67.2	60.2	8
82.9	55.8	46.5	49.3	122.6	93.0	74.0	66.0	10
93.9	64.3	52.8	55.2	124.0	100.0	81.2	72.9	12
103.4	72.3	59.2	61.1	124.0	106.8	87.5	79.1	14
119.2	88.7	73.1	73.7	125.6	115.4	99.1	90.6	18
123.4	94.9	79.6	79.0	126.6	117.1	102.5	94.6	20
125.3	98.9	91.7	90.0	126.7	118.8	108.4	102.1	25
125.7	112.8	100.2	97.2	126.9	120.9	112.9	107.8	30
125.8	117.5	107.1	108.2	127.3	122.6	116.2	112.6	35
125.9	119.8	111.3	108.6	127.6	122.7	117.9	114.7	40

D = 0,30 m

d = 0,0544 m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,03	TS ₁	TG ₁
0,205	TS ₂	TG ₂
0,41	TS ₃	TG ₃
0,51	TS ₄	TG ₄

Tabela -12

Experiência 12

Vazão = 200 m³/h

Temperatura Ambiente = 25,5°C (Inicial) 25,8°C (Final)

T _{S1} (°C)	T _{S2} (°C)	T _{S3} (°C)	T _{G1} (°C)	T _{G2} (°C)	T _{G3} (°C)	Tempo (min)
25.5	25.5	25.5	26.0	26.0	26.0	0
27.0	25.5	25.0	49.9	33.1	27.8	1
48.5	30.1	25.5	68.8	43.1	34.5	3
64.4	36.7	28.3	76.9	51.9	37.8	5
76.0	46.8	33.1	81.1	61.4	45.4	8
78.8	53.2	37.1	82.0	66.5	50.4	10
80.1	59.1	41.6	82.4	70.5	55.1	12
80.7	63.6	45.6	82.8	73.1	58.7	14
81.3	67.2	49.6	83.1	75.4	62.3	16
81.5	70.8	53.4	83.3	77.1	65.3	18
81.7	72.7	56.8	83.5	78.3	67.8	20
81.9	77.3	64.4	83.7	80.3	72.7	25
82.1	79.5	69.8	83.9	81.2	75.9	30

D = 0,30 m

d = 0,0362 m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás.}
0,025	T _{S1}	T _{G1}
0,205	T _{S2}	T _{G2}
0,41	T _{S3}	T _{G3}

Tabela -13

Experiência 13

Vazão = 55 m³/h

Temperatura Ambiente = 26,5°C (Inicial) 27,0°C (Final)

TS ₁ (°C)	TS ₂ (°C)	TS ₃ (°C)	TG ₁ (°C)	TG ₂ (°C)	TG ₃ (°C)	Tempo (min)
26.5	26.5	26.5	26.6	26.6	26.9	0
27.4	27.8	26.9	27.6	28.2	27.1	1
27.6	29.2	28.2	34.5	31.8	28.8	3
30.3	29.3	28.8	40.2	34.8	29.2	5
35.4	29.7	29.2	46.0	38.3	30.7	8
38.8	31.8	30.5	48.1	40.4	32.0	10
41.7	33.7	31.6	50.2	41.9	33.1	12
44.1	35.4	33.0	51.4	43.2	34.1	14
46.4	37.3	34.5	52.7	44.7	35.2	16
48.1	39.0	35.6	53.3	45.5	36.0	18
49.3	40.4	36.7	53.4	46.4	39.6	20
51.4	43.6	38.8	54.2	47.9	39.8	25
52.7	46.0	41.7	55.0	49.6	42.5	30
53.7	47.9	42.2	55.5	50.9	43.5	35
54.5	49.6	43.3	56.0	51.8	45.2	40
55.1	51.1	44.6	56.2	52.8	46.9	45
55.3	51.9	45.2	56.4	53.2	47.2	50
55.5	52.8	46.4	56.9	53.6	48.6	60

D = 0,18 m

d = 0,0544 m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,07	TS ₁	TG ₁
0,30	TS ₂	TG ₂
0,42	TS ₃	TG ₃

Tabela -14

Experiência 14

Vazão = 220 m³/h

Temperatura Ambiente = 27,5°C (Inicial) 28,0°C (Final)

TS ₁ (°C)	TS ₂ (°C)	TS ₃ (°C)	TG ₁ (°C)	TG ₂ (°C)	TG ₃ (°C)	Tempo (min)
34.1	34.0	33.6	34.3	34.6	33.8	0
34.5	34.6	39.0	54.6	52.7	42.0	1
40.7	39.2	46.2	68.2	61.6	50.8	3
51.0	46.8	52.3	72.0	65.6	53.2	5
61.4	55.7	58.1	75.1	70.3	58.6	8
66.1	60.3	60.5	76.8	72.4	61.2	10
69.9	64.4	63.1	78.3	74.7	63.9	12
72.6	67.7	64.6	79.2	76.0	65.4	14
75.1	70.7	66.3	80.6	77.5	67.3	16
76.4	72.4	70.4	80.8	78.3	70.6	18
77.9	74.7	71.1	81.5	79.4	71.3	20
79.8	77.7	72.0	82.1	80.2	72.1	25
80.6	79.4	73.1	82.5	80.9	73.2	30
81.1	80.6	73.6	82.6	81.1	73.9	35
81.3	80.9	74.2	82.7	81.3	74.3	40

D = 0,18 m

d = 0,0544 m

POSIÇÃO DOS TERMOPARES

Altura do Leito (m)	T _{Sól.}	T _{Gás}
0,07	TS ₁	TG ₁
0,30	TS ₂	TG ₂
0,42	TS ₃	TG ₃

```

C  DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS, S1,S2,S3 E S4 SAO AS TEMPE-
C  RATURAS DO SOLIDO EM POSIÇÕES DIFERENTES E G1,G2, G3,
C  G4 AS DO FLUIDO, CAPACIDADE CALORIFICA DO FLUIDO (CP),
C  TEMPO(T), VISCOSIDADE(U), RE(NUM. DE REYNOLDS) COEF.
C  DE TROCA DE CALOR LOCAL (HX), VAZÃO VOLUMETRICA     E
C  MASSICA (Q,G), DENSIDADE DO FLUIDO(P), DIAMETRO     DA
C  COLUNA E DA ESFERA (DCOL,DESF),POROSIDADE(E), NUM. DE
C  PRANDTL(PR), TEMPO CARACTERÍSTICO (TAL),NUM.     DE
C  NUSSET LOCAL(NUX),N. DE NUSSET CORR. DE WITAKER(NUW),
C  N. DE NUSSET CORR. DE WAKAO(NUA), DENSIDADE DO SOLIDO
C  (PS), AREA ESP(AE) CAPACIDADE CALORIFICA DO     SOLIDO
C  (CS), DISTÂNCIA(X), DISTANCIA ADMENS.(XX), TEMPERATU-
C  RA DO GAS E DO SOLIDO(TG,TS), TEMPERATURA     AMBIENTE
C  (TA), TEMPERATURAS ADMENSIONAIS DO GAS E DO     SOLIDO
C  (TGA,TSA).
1      DOUBLE PRECISION NUM , NUA,NUW,RE
2      1 DOUBLE PRECISION Q,HM,AE,DT,TD,NUS,PR,RHO,DCOL ,
      DESF,CP,MI,K
3      1 DOUBLE PRECISION HX(4,25),XX(4,25),NUX(4,25),X(4),
      T(25)
4      1 DOUBLE PRECISION TS(4,25),TG(4,25),TAL(4,25), TE
      (25),TA(25)
5      DOUBLE PRECISION TSA(4,25),TGA(4,25),AT(25)
6      DOUBLE PRECISION E,PS,CS
7      CHARACTER*10 VARG(4), VARS(4), VG, VS
8      OPEN(1,FILE='W.DAT',STATUS='OLD')
9      OPEN(2,FILE='A.DAT',STATUS='OLD')
10     OPEN(3,FILE='M.DAT',STATUS='OLD')
11     OPEN(5,FILE='SORAYA.DAT',STATUS='OLD')
12     OPEN(6,FILE='SORAYA.SAI',STATUS='OLD')
13     READ(5,*) NEXP
14     DO 1 LK = 1, NEXP
15     READ(5,*) N, M
16     READ(5,*) CP,Q,DCOL,DESF,E,U,K,MI,RHO,PS,CS
17     READ(5,4) (VARG(I), I = 1, M)
18     READ(5,4) (VARS(I), I = 1, M)
19     4  FORMAT (4A10)
20     PI = 3.14159
21     A =(PI*(DCOL)**2)/4.DO
22     G = Q / 3600.DO
23     RE =(G*DESF*RHO)/(MI*A)
24     PR = (CP*MI)/K
25     READ(5,*) (X(I), I = 1, M)
26     DO 5 J=1,N
27     1  READ(5,*)(TS(I,J), I = 1, M), (TG(I,J), I = 1, M),
      T(J), TE(J), TA(J)
28     1  WRITE(6,8) (TS(I,J), I = 1, M), (TG(I,J), I =1,M),
      T(J), TE(J), TA(J)
29         AT(J) = T(J)
30         T(J) = T(J) * 60.DO

```

```

31     5  CONTINUE
32     AE = (6.DO*(1.DO-E))/DESF
33     S = 0
34     NUS=0
35     DO 15 I =1,M
36     DO 20 J =2,N
37     DT = T(J) - T(J-1)
38     1  TD = (TG(I,J-1) - TS(I,J-1) + TG(I,J) - TS(I,J))/
        2.DO
39     TAL(I,J) = (DT*TD)/(TS(I,J) - TS(I,J-1))
40     HX(I,J) = ((1.DO-E)*PS*CS)/(TAL(I,J)*AE)
41     XX(I,J) = (X(I)*HX(I,J)*AE)/G* Cf
42     NUX(I,J) = (HX(I,J)*DESF)/K
43     1  WRITE(6,30)X(I), XX(I,J), TAL(I,J), HX(I,J)  NUX
        (I,J)
44     S = NUX(I,J) + S
45     NUS = NUS + 1
46     20 CONTINUE
47     15 CONTINUE
48     NUMS = S/NUS
49     1  NUW=(0.4DO*(RE/(1.DO-E)**.5DO+2.DO*(RE/(1.DO-E))
        **0.6666)*PR**0.4*(1.DO-E)/E
50     NUA = 2.DO +1.1DO*PR**0.33333*RE**0.6
51     WRITE(6,*)RE
52     WRITE(6,*)PR
53     WRITE(6,30) NUW, NUA, NUMS.
54     WRITE(1,30) RE, NUW
55     WRITE(2,30) RE, NUA
56     WRITE(3,30) RE, NUMS
57     DO 6 I = 1, M
58     VG = VARG(I)
59     VS = VARS(I)
60     OPEN(7,FILE=VG,STATUS='NEW')
61     OPEN(8,FILE=VS,STATUS='NEW')
62     DO 2 L = 1, N
63     TGA(I,L) = (TG(I,L)-TA(L))/(TE(L)-TA(L))
64     TSA(I,L) = (TS(I,L)-TA(L))/(TE(L)-TA(L))
65     WRITE(7,8) AT(L), TGA(I,L)
66     WRITE(8,8) AT(L), TSA(I,L)
67     2  CONTINUE
68     CLOSE(7,STATUS='KEEP')
69     CLOSE(8,STATUS='KEEP')
70     6  CONTINUE
71     1  CONTINUE
72     STOP
73     8  FORMAT(11F7.2)
74     9  FORMAT(2F11.4)
75     11 FORMAT(' ')
76     30 FORMAT(5F16.7)
77     END

```