

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA POR ROSEMARY  
GALVANI E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 19 / 12 / 1991.  
Leonardo Goldstein Jr  
ORIENTADOR

TROCA TÉRMICA DE CORPOS IMERSOS EM LEITO  
FLUIDIZADO BORBULHANTE EM ALTA TEMPERATURA

FACULDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA  
DETF - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS

TESE DE : MESTRADO

TÍTULO DA TESE : TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE CORPOS IMERSOS EM  
LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE EM ALTA TEMPERATURA

AUTOR : ROSEMARY GALVANI  
ORIENTADOR : LEONARDO GOLDSTEIN Jr.

APROVADO POR :

*Leonardo Goldstein Jr.*

PROF. DR. LEONARDO GOLDSTEIN JR., Presidente

*[Signature]*  
PROF. DR. KAMAL ABDEL RADI ISMAIL

*Carlos Alberto Gasparetto*  
PROF. DR. CARLOS ALBERTO GASPARETTO

CAMPINAS - SP - BRASIL

1991

FACULDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA  
DETF - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TERMICA E DE FLUIDOS

TESE DE : MESTRADO

TITULO DA TESE : TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE CORPOS IMERSOS EM  
LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE EM ALTA TEMPERATURA

AUTOR : ROSEMARY GALVANI  
ORIENTADOR : LEONARDO GOLDSTEIN Jr.

APROVADO POR :

Leonardo Goldstein Jr  
PROF. DR. LEONARDO GOLDSTEIN JR., Presidente

[Signature]  
PROF. DR. KAMAL ABDEL RADI ISMAIL

[Signature]  
PROF. DR. CARLOS ALBERTO GASPARETTO

CAMPINAS - SP - BRASIL

1991

Ao meu marido José Claudio,  
simplesmente por tudo.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Leonardo Goldstein Jr. pela orientação e auxílio no desenvolvimento do presente trabalho.

Aos Professores Geraldo Lombardi e Josmar Davilson Pagluiso, responsáveis pelo Laboratório de Metrologia do IPAI - USP - São Carlos pela colaboração na montagem do equipamento.

Aos funcionários da Oficina do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, em especial aos senhores Luiz Zanaga e Antônio Maurício Di Pieri pela ajuda durante todo o período dos testes experimentais.

Ao Wilton Furquim pela elaboração das figuras deste trabalho.

À CAPES pela ajuda concedida na forma de uma Bolsa de Estudos.

Ao Fábio Luis Fassani pela ajuda na realização dos testes.

Aos colegas da pós graduação, em especial para Meuris C. Gurgel da Silva e Rubens Stuginsky e, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que a realização deste trabalho se tornasse possível.

## SUMÁRIO

O objetivo deste trabalho foi estudar a transferência de calor entre um leito fluidizado borbulhante em alta temperatura e corpos metálicos de vários tamanhos e formas geométricas, fornecendo parâmetros para a utilização em processos de tratamento térmico.

O leito é constituído por um tubo de aço inoxidável de 306 mm de diâmetro e 800 mm de altura. Os corpos metálicos usados foram duas esferas de diâmetros 25 e 50 mm e dois cilindros de volume igual ao da esfera maior com relações diâmetro/altura de 1:4 e 1:8, todos de aço inoxidável AISI 316. O material do leito foi de areia quartzo com diâmetros médios de 0,3 e 1,6 mm.

Os testes foram realizados a várias velocidades de fluidização do gás, estando a temperatura do leito em 850°C.

## ABSTRACT

The main objective of this work was studying the heat transfer coefficient between a high temperature gas-fluidized bubbling bed and metallic bodies of different sizes and shapes, providing parameters for the heat treatment processes.

The bed consists of a steel tube with diameter of 306 mm and 800 mm high. The metallic bodies used were two spheres, of diameters 25 and 50 mm, and two cylinders with the same volume as the largest sphere, and 1 : 4 and 1 : 8 diameter/height relations, all of them made up of stainless steel AISI 316. The bed material was quartz sand with 0.3 and 1.6 mm average diameters.

The experiment was realized varying the superficial gas velocity, and with a bed temperature of 850°C. The fluidized reactor was heated up by burning propane inside the bed.

## INDICE

	Pag.
CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO.....	01
1.1 - Ligações Metálicas e Tipos de Tratamento..	02
1.2 - Estado da Arte.....	06
1.3 - Objetivo da Dissertação.....	16
CAPITULO 2 - DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO E DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	18
2.1 - Descrição do Dispositivo Experimental.....	18
2.2 - Procedimento Experimental.....	24
CAPITULO 3 - PROCESSAMENTO DOS DADOS OBTIDOS.....	27
3.1 - Esfera.....	28
3.2 - Cilindro Finito.....	30
CAPITULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	36
CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	56
ANEXO 1 - Curvas de Aquecimento dos Corpos Metálicos.....	58
ANEXO 2 - Análise de Erro dos Resultados Experimentais.....	86
REFERÊNCIAS.....	93



## NOMENCLATURA

C	Calor Específico	[ $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ ]
D	Diâmetro do Corpo	[ mm ]
d	Diâmetro da Partícula	[ mm ]
h	Coefficiente de Transferência de Calor	[ $\text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ]
k	Condutividade Térmica do Gás	[ $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ ]
r	Distância Radial	[ m ]
R	Raio da Esfera ou do Cilindro	[ m ]
t	Tempo	[ s ]
T	Temperatura	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
v	Velocidade Superficial do Gás	[ m/s ]

## SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha$	Difusividade Térmica	[ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\delta$	Comprimento do Cilindro	[ m ]
$\rho$	Massa Específica	[ $\text{kg/m}^3$ ]

## SUBSCRITOS

$\infty$	Condição do Leito
o	Condição Inicial
conv	Convecção
cond	Condução
rad	Radiação
s	Superfície

## GRUPOS ADIMENSIONAIS

Nu	Número de Nusselt
Re	Número de Reynolds

## LISTA DE FIGURAS

Número	Descrição	Página
1.1	Diagrama Ferro-Carbono	3
1.2	Estrutura Resultantes da Decomposição da Austenita	4
1.3	Representação Esquemática das Três Técnicas de medida do Coeficiente de Transferência de calor	7
1.4	Coeficiente de Transferência de Calor $h$ em Função da Velocidade de Fluidização do Gás	9
1.5	Variação do Coeficiente de Transferência de Calor com a Temperatura do Leito	15
1.6	Efeito da Temperatura da Superfície no Coeficiente de Transferência de Calor	15
2.1	Fluxograma do Dispositivo Experimental	19
2.2	Detalhes do Dispositivo Experimental	20
2.3	Detalhe do Injetor	21
2.4	Suporte do Corpo Metálico	23
4.1	Curvas de Aquecimento	38

4.2	Variação do Coeficiente de Transferência de Calor com a Velocidade Superficial do Gás, num Mesmo Corpo Metálico e para Diferentes Granulometrias	41
4.3	Variação do Coeficiente de Transferência de Calor com a Velocidade Superficial do Gás para um Leito Fluidizado com Determinada Areia, variando o corpo nele Imerso	43
4.4	Coeficiente de Transferência de Calor em Função da Velocidade Superficial do Gás para Corpos Metálicos de Mesmo Volume e Formatos Diferentes - Areia Fina	45
4.5	Coeficiente de Transferência de Calor em Função da Velocidade Superficial do Gás para Corpos Metálicos de Mesmo Volume e Formatos Diferentes - Areia Grossa	46
4.6	Representação Adimensional dos Resultados Experimentais para o Coeficiente de Transferência de Calor $h$ em Função da Velocidade Superficial do Gás, para Esferas de Diferentes Diâmetros e Particulado de Diferentes Granulometria	48
4.7	Efeito da Capacidade Térmica Relativa Corpo Metálico/Partícula no Coeficiente de Transferência de Calor	50

4.8	Efeito da Temperatura da Superfície no Coeficiente de Transferência de Calor	52
4.9	Variação do Coeficiente de Transferência de Calor com o Tempo	54
4.10	Variação do Coeficiente de Transferência de Calor com o Tempo no Início do Processo	55

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A utilização maciça de materiais metálicos, principalmente o aço, em diferentes atividades e procurando atender a especificações cada vez mais complexas, levou a um grande desenvolvimento na metalurgia.

Atualmente é praticamente impossível não notar a presença dos metais, que são empregados em campos distintos desde a construção civil até a medicina.

Isto se tornou possível graças ao desenvolvimento paralelo dos processos de aquecimento e tratamento térmico, visto que praticamente cada novo material desenvolvido exigiu um novo processo de tratamento.

Os sistemas de aquecimento necessários para a otimização dos metais passaram por transformações rápidas, procurando atender as novas exigências. Uma gama ampla de fornos foi projetada e construída empregando como fonte de aquecimento os combustíveis fósseis, tais como o carvão e petróleo. Já no século XX começaram a ser empregados os aquecimentos por resistência elétrica e rádio-frequência (indução).

A alta dos preços do petróleo e o encarecimento da energia elétrica propiciou o desenvolvimento de novas técnicas, que têm por princípio básico o aumento do coeficiente de transferência de calor

entre os corpos metálicos e o meio de aquecimento em que estão imersos, permitindo tratamentos mais rápidos e eficientes. Neste contexto se insere o aquecimento dos corpos metálicos em sistemas de leito fluidizado borbulhante, objetivo do presente trabalho

No leito fluidizado há a queima de um combustível líquido ou gasoso numa corrente de ar; os produtos da combustão fluidizam e aquecem as partículas sólidas inertes que constituem o leito. A fluidização destas partículas tem como característica uma maior troca de calor com o corpo metálico a ser tratado termicamente, por imersão no leito.

Segue uma descrição sucinta das propriedades dos metais e dos diferentes tipos de tratamento térmico em que se pode empregar o aquecimento em leito fluidizado.

### 1.1 - LIGAÇÕES METÁLICAS TIPOS DE TRATAMENTO

Os metais são encontrados na natureza formando ligas com dois ou mais tipos de átomos, os quais se arranjam de maneira característica para constituir uma estrutura cristalina própria - as ligações metálicas.

Devido ao interesse deste trabalho no aço descreve-se mais detalhadamente suas propriedades. Ele consiste em uma liga formada por ferro e carbono, contendo de 0,008% a cerca de 2% de carbono. A Figura 1.1 mostra o diagrama ferro-carbono, onde se observa as principais estruturas cristalinas possíveis:

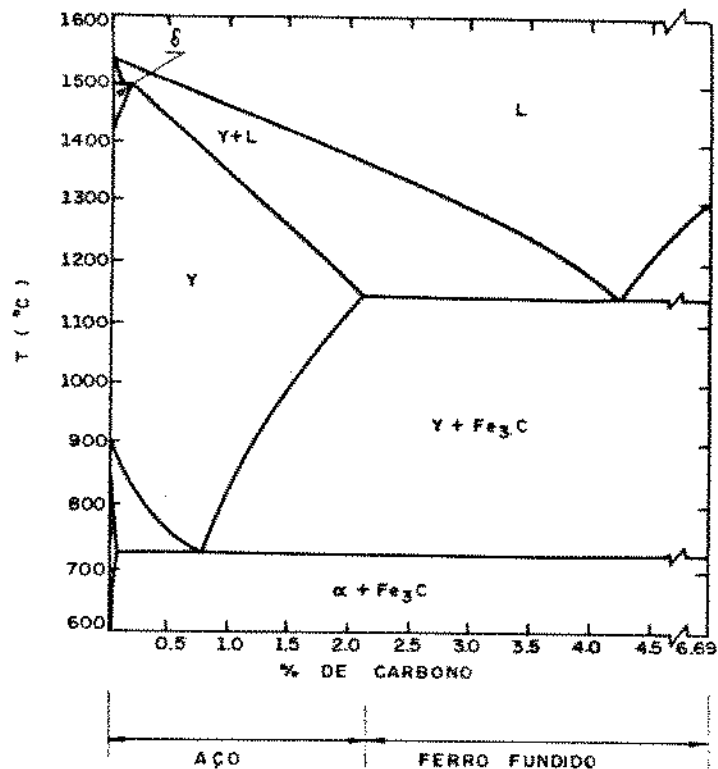


FIG.(1.1) DIAGRAMA FERRO - CARBONO

Ferrita ou Ferro  $\alpha$  : estrutura cristalina do ferro puro a temperatura ambiente, cúbica de corpo centrado;

Austenita ou Ferro  $\gamma$  : estrutura cúbica de faces centradas do ferro puro, existente entre  $910^{\circ}\text{C}$  e  $1400^{\circ}\text{C}$ .

Ferrita ou Ferro  $\delta$  : acima de  $1400^{\circ}\text{C}$ , a estrutura volta a ser cúbica de corpo centrado.

Cementita  $\text{Fe}_3\text{C}$  : carbonetos de ferro

A estrutura cristalina dos aços varia de acordo com a temperatura e a porcentagem de carbono. Estas alterações de estrutura provocam mudanças nas propriedades mecânicas; elas são obtidas através de tratamento térmico, constituídos, de maneira geral, de um aquecimento do material

seguido de um resfriamento controlado.

Quando a fase  $\gamma$ , Austenita, é resfriada, podem-se originar diferentes tipos de estruturas, estáveis ou de transição, dependendo do modo como o resfriamento é realizado. A obtenção de estruturas diferentes, com propriedades mecânicas diferenciadas, a partir de um mesmo material inicial, é de grande interesse para a engenharia, já que um mesmo aço pode apresentar, depois de tratado termicamente, propriedades convenientes para cada tipo de aplicação.

Se a Austenita for resfriada lentamente, será formada uma estrutura lamelar conhecida como Perlita. Um resfriamento brusco, no entanto dará origem a uma fase de transição, a Martensita, de alta dureza. Uma estrutura intermediária entre as duas é a Bainita.

A estrutura produzida quando a Austenita transforma-se isotermicamente é dada pelas curvas TTT - Temperatura, Tempo e Transformação. Havendo uma curva diferente para cada tipo de aço. A Figura 1.2 mostra um comportamento típico para um dado aço.

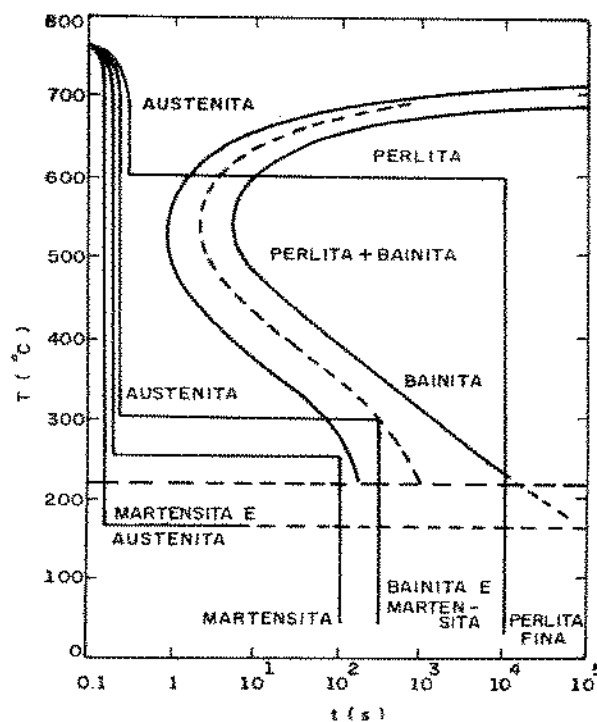


FIG.( 1.2) ESTRUTURAS RESULTANTES DA DECOMPOSIÇÃO DA AUSTENITA



Os principais processos de tratamento térmico utilizados de acordo com as propriedades mecânicas que se pretende obter, são :

**Recozimento :** Visa reduzir a dureza do aço, aumentar sua usinabilidade, facilitar o trabalho a frio. Alguns tipos de recozimento são:

- **Recozimento Pleno** - consiste em austenitizar e, em seguida resfriar lentamente o material.

- **Recozimento Subcrítico e Alívio de Tensões**, é usado para recuperar a ductibilidade do aço trabalhado a frio. Normalmente há um aquecimento na faixa de 600 - 680°C seguido de resfriamento ao ar.

**Normalização :** Consiste na austenitização completa do aço, seguida de resfriamento ao ar. Indicada normalmente para homogeneização da estrutura

**Têmpera :** Consiste em resfriar o aço, após austenitização, a uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainísticas na peça, obtendo-se, desta maneira, estruturas martensíticas.

**Revenimento :** Consiste em aquecer o aço uniformemente até uma temperatura abaixo da austenitização, mantendo-o nesta temperatura por tempo suficiente para equalização da temperatura e obtenção das propriedades desejadas. Permite atingir valores adequados de resistência mecânica e de tenacidade quando executado logo após a têmpera.

**Austêmpera :** É uma transformação isotérmica

para produção de estrutura bainítica. Consiste em austenitizar o aço, seguido de resfriamento rápido em banho de sal, óleo ou chumbo e, subsequente, resfriamento ao ar a temperatura ambiente. O principal objetivo é obter produtos de alta ductibilidade e resistência ao impacto, sem perda expressiva da dureza. Também reduz a perda por trincas e empenos.

O aquecimento através de leito fluidizado pode ser empregado em todos os processos de tratamento térmico descritos, com uma série de vantagens sobre os sistemas convencionais, destacando-se :

- Versatilidade, pela possibilidade de realizar diferentes tratamentos em um único equipamento.
- Redução no tempo de processo, devido ao aumento da taxa de aquecimento do corpo metálico.

## 1.2 - ESTADO DA ARTE

Há um número muito restrito de trabalhos publicados sobre a medida do coeficiente de transferência de calor entre um leito fluidizado borbulhante e uma superfície imersa em alta temperatura. As técnicas usadas são divididas em 3 categorias e são ilustradas nas Figuras 1.3(a) a 1.3(c). A Figura 1.3(a) mostra a técnica do fluxômetro, onde uma descarga de água é usada para remover o calor e manter uma diferença de temperatura através do sensor. A Figura 1.3(b) mostra um tubo refrigerado com água para medir o calor incidente, o que permite, através de um balanço de energia e da determinação da diferença de temperatura entre a superfície do tubo e o leito, calcular o valor de  $h$ . O

método de interesse neste trabalho é o da Figura 1.3(c); ele parte da variação com o tempo da temperatura do corpo metálico imerso no leito para obter o coeficiente de transferência de calor  $h$ . As duas primeiras técnicas, as partículas adjacentes à superfície do corpo estão a uma temperatura menor do que a do leito e esta temperatura permanece constante com o tempo. Já a técnica da Figura 1.3(c), as partículas adjacentes a superfície do corpo estão inicialmente a temperatura do leito e sua temperatura decresce com o tempo como resultado, o valor do coeficiente de transferência de calor é maior.

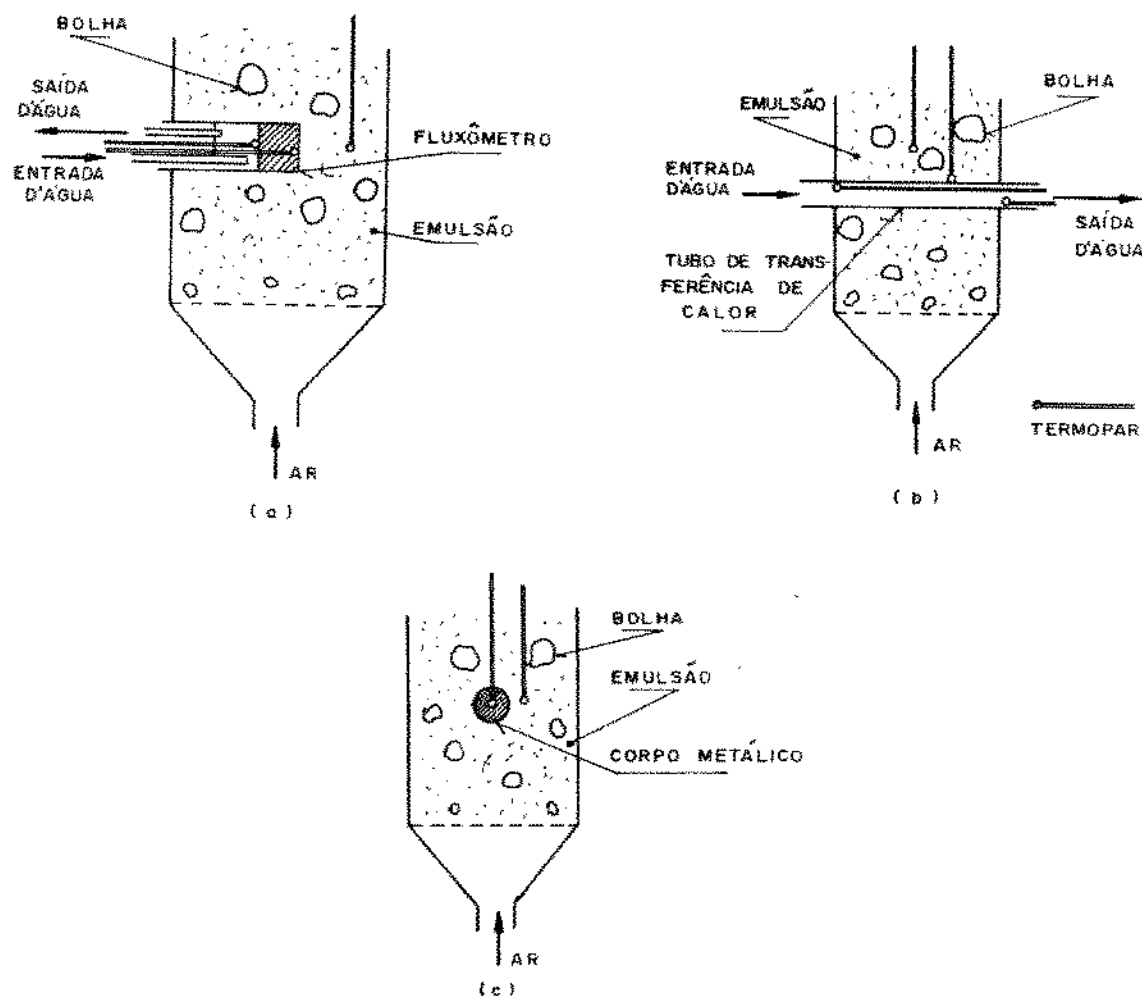


FIG. (1.3) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS 3 TÉCNICAS DE MEDIDA DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O primeiro trabalho sobre a transferência de calor de um objeto imerso num leito fluidizado foi apresentado por Jolley, em 1949. Ele estudou a transferência de calor em leitos de partículas de carvão de coque fluidizadas com ar. O leito usado era um cilindro vertical de 17,8 cm de diâmetro, com partículas de carvão de diâmetro menores que 1,6mm fluidizadas com uma vazão de ar de 2,8 a 4,2 m<sup>3</sup>/h. A temperatura do leito era mantida na faixa de 800 a 1000°C. Os corpos imersos usados foram cilindros de cobre de 12,7 cm de comprimento e 5,08 cm de diâmetro (  $L/D = 2,5$  ) e de alumínio, de 19 cm de comprimento e 5,08 cm de diâmetro (  $L/D = 3,7$  ). O período de imersão dos corpos variou de 20 a 30 s. Ele observou que a taxa de transferência de calor era muitas vezes maior do que em sistemas convencionais.

Kharchenko e Makhorin [1961] trabalharam com esferas de cobre de 60 mm de diâmetro e com temperaturas do leito acima de 1050°C, usando um reator de 220 mm de diâmetro e 800 mm de altura. As partículas usadas foram de argila refratária com diâmetros que variavam de 0,34 a 1,66 mm e partículas de areia de quartzo de 0,34 mm de diâmetro. A velocidade do gás variou de 0,1 a 2,3 m/s.

A Figura 1.4, mostra o efeito da velocidade superficial de fluidização no coeficiente de transferência de calor, observando-se, que quando a velocidade do gás aumenta, há um aumento do coeficiente de transferência de calor até um valor máximo, seguido de uma diminuição. Para partículas ásperas e temperaturas elevadas do leito, verificou-se que o coeficiente de transferência de calor permaneceu praticamente inalterado dentro de uma faixa de velocidades do gás.

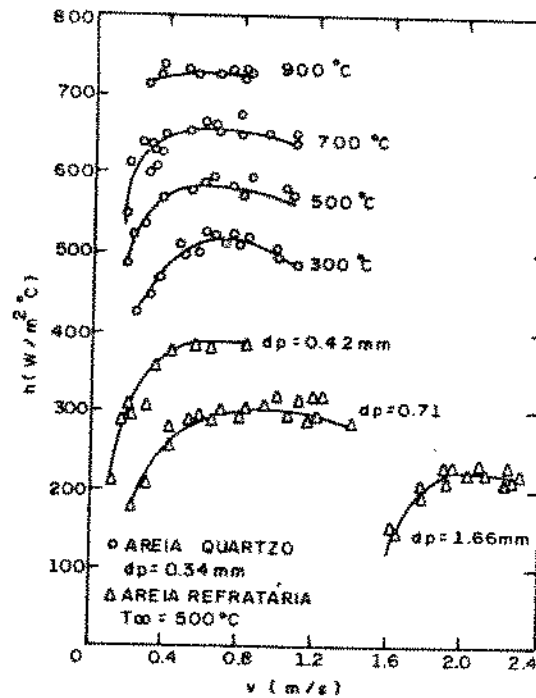


FIG.(1.4) COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR  $h$  EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO DO GÁS

Eles estudaram ainda o efeito da temperatura do leito no coeficiente de transferência de calor máximo. Para partículas de areia-quartzo de 0,34 mm de diâmetro, o coeficiente aumentou de 510 para 780  $W/m^2$  quando a temperatura do leito variou de 300 a 1050 °C, mostrando uma relação linear entre o coeficiente de transferência de calor e a temperatura do leito, dentro da faixa de temperatura estudada, causado, segundo os autores, pela variação das propriedades físicas do fluido no leito fluidizado.

O efeito do diâmetro das partículas no coeficiente de transferência de calor também foi estudado por Kharchenko e Makhorin. Observou-se que diminuindo o diâmetro das partículas, aumentava o coeficiente de transferência de calor, o que seria devido à redução da película de gás entre o objeto e as partículas agregadas.

A relação entre o coeficiente de transferência de calor, e a posição da sonda no leito fluidizado foi estabelecida experimentalmente. Quando a sonda se movimentou ao longo do leito de maneira axial e radial em alturas variando de 30 a 350 mm acima do distribuidor, o coeficiente de transferência de calor foi maior na zona principal do leito, tendo valores inferiores logo acima do distribuidor e no topo do leito. A diferença entre o valor máximo e o mínimo do coeficiente de transferência de calor não foi maior do que 10 %.

Baskakov, Berg, Vitt, Filippovsky, Kirakosyan, Goldobin e Maskaev, em 1973 estudaram objetos cilíndricos imersos em leitos de corundum, com diâmetros de partículas de 0,12 ; 0,32 e 0,50 mm, e de escória, com diâmetros de 0,65 mm. O diâmetro dos leitos foram de 98 e 92 mm e os gases usados foram o dióxido de carbono e o hélio.

Considera-se usualmente, a nível de modelagem do fenômeno, que o coeficiente de transferência de calor  $h$  é dado por:

$$h = h_{\text{cond}} + h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}} \quad (1.1)$$

onde:

$h_{\text{cond}}$  : termo condutivo, se refere a transferência de calor por condução entre a parede do corpo com o gás estagnante e com as partículas próximas a superfície.

$h_{\text{conv}}$  : termo convectivo de transferência de calor devido a movimentação do gás nos espaços intersticiais, entre as partículas.

$h_{rad}$  : o termo radiante de transferência de calor em leite fluidizado é significativo em temperaturas altas e partículas grandes.

Baskakov et al. afirmaram, com base nos testes realizados, que a contribuição do componente convectivo aumentava com o tamanho das partículas. O componente condutivo, por outro lado diminui devido ao aumento do tempo de contato entre a partícula e a superfície do corpo imerso.

Eles estudaram ainda a troca térmica de placas imersas no leite, na posição vertical e inclinada. A circulação das partículas próximas do objeto seria influenciada pelo seu formato e, conseqüentemente, alteraria o comportamento da transferência de calor superfície-leite. Dependendo da inclinação da placa, a formação de bolhas e a renovação das partículas em cada lado da superfície pode ser diferente, cabendo o maior coeficiente de transferência de calor ao lado em que a circulação de partículas é maior.

O efeito da transferência de calor por radiação, especialmente para aquecimento rápido de metais que trabalham com altas temperaturas, é um parâmetro importante na equação (1.1). Os trabalhos publicados quanto a este efeito ainda não estão muito claros. Baskakov et al. mediram o coeficiente de transferência de calor por radiação alterando as temperaturas de 2 esferas de baixo número de Biot, imersas num leite de partículas de chamote de diâmetros 0,35 mm ; 0,63 mm e 1,25 mm. Não foram dados os diâmetros das esferas. Uma das esferas tinha a superfície oxidada, de emissividade igual a 0,8, e a outra uma superfície prateada, de emissividade 0,1. O componente radioativo no coeficiente de transferência de calor total

aumentou com a temperatura da superfície da esfera, da ordem de 20-30% quando a temperatura da superfície foi de 725°C. Quanto maior o diâmetro das partículas, maior a fração de calor transferida por radiação, embora tenha sido observado que, dentro de uma certa faixa, a quantidade de calor absoluto transferido por radiação era independente do diâmetro das partículas e da velocidade de fluidização.

Em 1979, Panov, Baskakov, Goldobin, Filippovskii e Mazur separaram a troca de calor total nos componentes radioativos e condutivo-convectivo usando dois calorímetros diferentes na emissividade. Cada calorímetro era um bloco de dimensões 80x80x40 mm, revestidos de nicromo, com uma espessura de 5mm, e com enchimento de caulina.

O reator usado possuía uma secção transversal de 460x250 mm, com altura do leito não expandido de 300 mm e o calorímetro localizado no centro de simetria, a 150 mm da grade distribuidora. Partículas de corundum de diâmetro 0,5 mm, óxido de magnésio de diâmetros 0,8 - 1,2 mm e 2,5 - 3,0 mm e esferas de alundum de diâmetro de 5 - 7 mm foram usadas como material do leito.

Eles observaram que o coeficiente de transferência de calor total aumentava com o aumento da temperatura do leito e da superfície do corpo imerso, e com a aproximação da superfície a um corpo negro, e confirmaram também a diminuição com o aumento do diâmetro das partículas.

Em leito fluidizado a alta temperatura, a contribuição do componente radioativo na troca de calor tornou-se significativa e até predominante no leito de partículas com superfície áspera, devido a redução no componente condutivo-convectivo, enquanto que  $h_{rad}$



permanecia quase o mesmo, tanto em leito de esferas de alundum quanto em leito de partículas finas de corundum, mostrando que o diâmetro das partículas não influenciou  $h_{rad}$ . Também, notaram que em um leito de partículas de óxido de magnésio,  $h_{rad}$  foi menor do que em um leito de corundum, devido à superfície das partículas de corundum se aproximar mais da de um corpo negro.

Embora existam boas conclusões neste trabalho, a geometria da sonda e o procedimento experimental não foram descritos com detalhes suficientes.

Um dos mais recentes trabalhos de transferência de calor entre um leito fluidizado a gás e uma superfície imersa foi apresentado por Botterill, Teoman e Yüregir, [1984]. Eles trabalharam com sonda calorimétrica esférica de diversos tamanhos e estimaram a grandeza do componente radiativo de transferência de calor comparando os resultados de uma superfície de cobre oxidada de alta emissividade (  $\epsilon = 0,8$  ) a uma outra de ouro polido, de baixa emissividade (  $\epsilon = 0,1$  ).

O leito ficava contido em um cilindro de aço inoxidável de 188 mm de diâmetro. As temperaturas elevadas ( algumas acima de  $980^{\circ}\text{C}$  ) são obtidas queimando propano diretamente dentro do leito. As placas distribuidoras de 0,5 ; 1,0 ou 1,5 mm de diâmetro são escolhidas de acordo com a quantidade de gás requerida. A altura do leito compactado usado em todos os experimentos era de 200 mm. Os materiais para fluidização eram alumina ( $d_p = 0,37$  ; 0,98 e 1,15 mm) e areia ( $d_p = 0,38$  ; 0,66 ; 0,89 e 3,0 mm). As sondas calorimétricas esféricas de baixo número de Biot eram de cobre eletrolítico ( 6,4 e 8,7 mm de diâmetro ), bronze fosforoso ( 8,9 e 9,5 mm de diâmetro ), ouro ( 11,1 mm de

diâmetro ) e a maior usava 10% de bronze fosforoso ( 31,6 mm de diâmetro ), localizadas axialmente a 100 mm acima do distribuidor. A sonda inicialmente à temperatura ambiente era mergulhada no leite quente. Admitindo-se a temperatura do leite não afetada por esta imersão. Um termopar chromel/alumel localizado no centro da esfera foi usado para dar o histórico da temperatura, que foi tomada em intervalos de 6 e 15 s.

Trabalhando com diversos tamanhos de sonda calorimétrica e de diâmetro de partículas, eles verificaram que o coeficiente de transferência de calor aumentava quando o tamanho da sonda diminuía. O teste usando areia de diâmetro igual a 3 mm é mostrado na Figura 1.5, como exemplo dos resultados obtidos. Observa-se também nesta figura que a temperatura do leite afeta o coeficiente de transferência de calor, tal que quanto maior a temperatura do leite, maior o coeficiente de transferência.

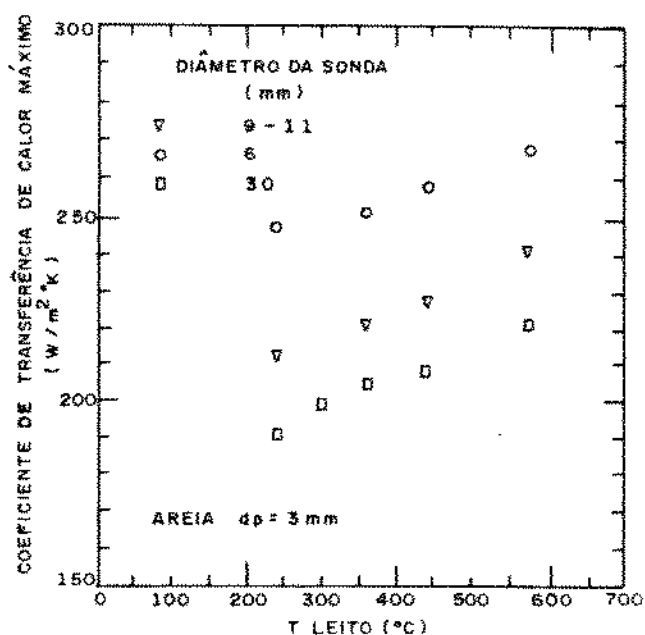


FIG.( 1.5) VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM A TEMPERATURA DO LEITO

Resultados do efeito da temperatura da superfície no coeficiente de transferência de calor com leito de alumina de 0,37 e 1,15mm são mostrados na Figura 1.6. Nota-se que o efeito da temperatura da superfície é menor em leito de partículas maiores.

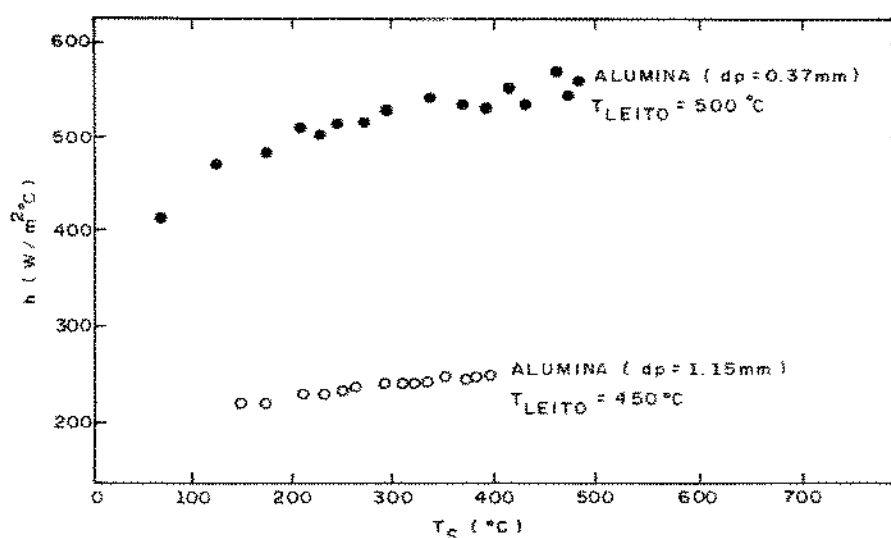


FIG.( 1.6) EFEITO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE NO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Foi observado também que o coeficiente de transferência de calor leito-superfície era influenciado pela relação entre as capacidades térmicas das partículas do leito e da sonda. O valor do coeficiente de transferência de calor se elevou sempre que a sonda apresentou uma capacidade térmica inferior a dez vezes a capacidade da partícula. Os resultados do efeito da velocidade superficial do gás em relação ao coeficiente de transferência para areia de 0.53 mm de diâmetro e temperatura do leito de 350°C, mostrou o mesmo comportamento que o observado por Kharchenco e Makhorin.

### 1.3 - OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Neste trabalho obteve-se experimentalmente o coeficiente de transferência de calor entre um leito fluidizado e corpos metálicos de vários tamanhos e formas geométricas, imersas num leito fluidizado borbulhante a 850°C. O aquecimento do leito foi obtido pela queima de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) no seu interior ; as partículas sólidas fluidizadas eram de areia de quartzo, de distribuição granulométrica estreita, com diâmetros médios de 0,3 e 1,6 mm.

Foram analisados os efeitos dos seguintes itens no coeficiente de transferência de calor entre o corpo imerso e o leito fluidizado:

- Formato do Corpo;
- Tamanho do Corpo;
- Granulometria do Leito;
- Velocidade de Fluidização;
- Capacidade Térmica Relativa Corpo-Partícula;

- Temperatura da Superfície, e
- Tempo de Imersão no Leito.

Procurou-se analisar a variação do coeficiente de transferência de calor com o tempo de imersão do corpo metálico no leito, tendo em vista que os trabalhos anteriores não fazem referência a esta questão, o que dificulta a comparação com os dados já existentes.

Este estudo teve como objetivo a obtenção de parâmetros para utilização no aquecimento de corpos metálicos, em leito fluidizado, parte integrante dos processos de tratamento térmico.

## CAPÍTULO 2

### DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO E DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A montagem experimental foi executada visando estudar o desempenho de um reator fluidizado borbulhante no aquecimento de corpos metálicos.

#### 2.1 - Descrição do Dispositivo Experimental

Os testes para medida do coeficiente de transferência de calor de objetos imersos em leito fluidizado foram realizados no dispositivo experimental, cujo fluxograma é apresentado na Figura 2.1.

Detalhes do dispositivo experimental são mostrados na Figura 2.2. O leito do reator é constituído por um tubo de aço inoxidável de 306 mm de diâmetro e 800 mm de altura, com revestimento de cimento refratário de 133 mm de espessura.

Na parte inferior do reator existe uma câmara plena onde o ar é admitido e distribuído por uma placa distribuidora composta de 19 injetores. Cada injetor possui 6 orifícios, cujo diâmetro é função da areia usada: para a areia grossa o diâmetro foi de 4 mm e para areia fina de 1 mm.

O gás de fluidização foi o produto da combustão de GLP (gás liquefeito de petróleo) com ar atmosférico, mantido a 850°C.

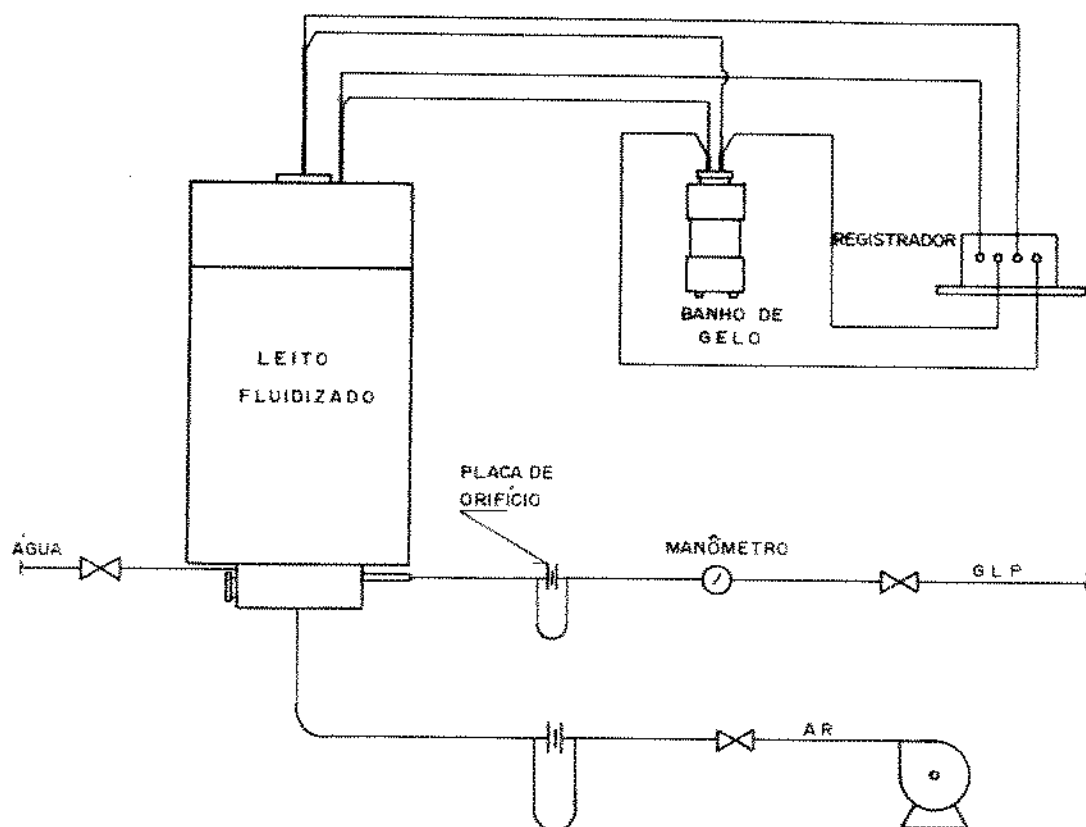


FIG. ( 2.1 ) FLUXOGRAMA DO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

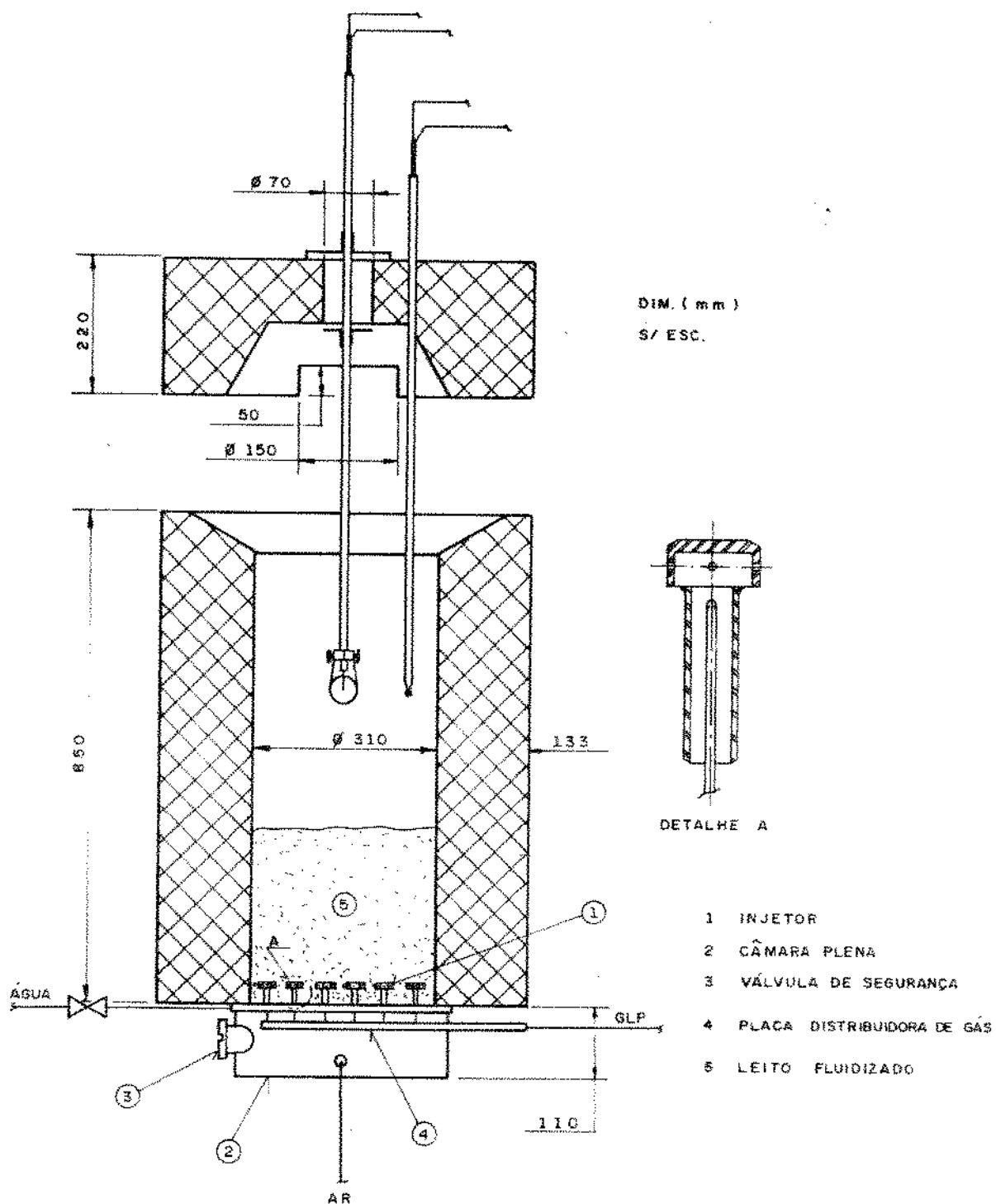


FIG.( 2.2 ) DETALHES DO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL



O injetor é mostrado na Figura 2.3. O GLP era admitido independentemente pelo tubinho central, entrando o ar pelo canal entre os tubos, ocorrendo a combustão praticamente no interior do próprio leito. A placa distribuidora possui ainda um sistema de recirculação de água para evitar que esta se aqueça e danifique os injetores. O ar para fluidização foi insuflado por dois sopradores centrífugos de marca Marelli: um de HP 4,7, vazão  $10 \text{ m}^3/\text{min}$ , RPM de 3500 e 788 m/mca e outro de vazão  $5,94 \text{ m}^3/\text{min}$ , RPM de 3500 e 1500 m/mca ligados em série para operar adequadamente com areia de maior diâmetro, com a qual as perdas de pressão são maiores. A vazão de ar era controlada por uma válvula localizada logo após os sopradores, sendo medida por uma placa de orifício ligada a um manômetro.

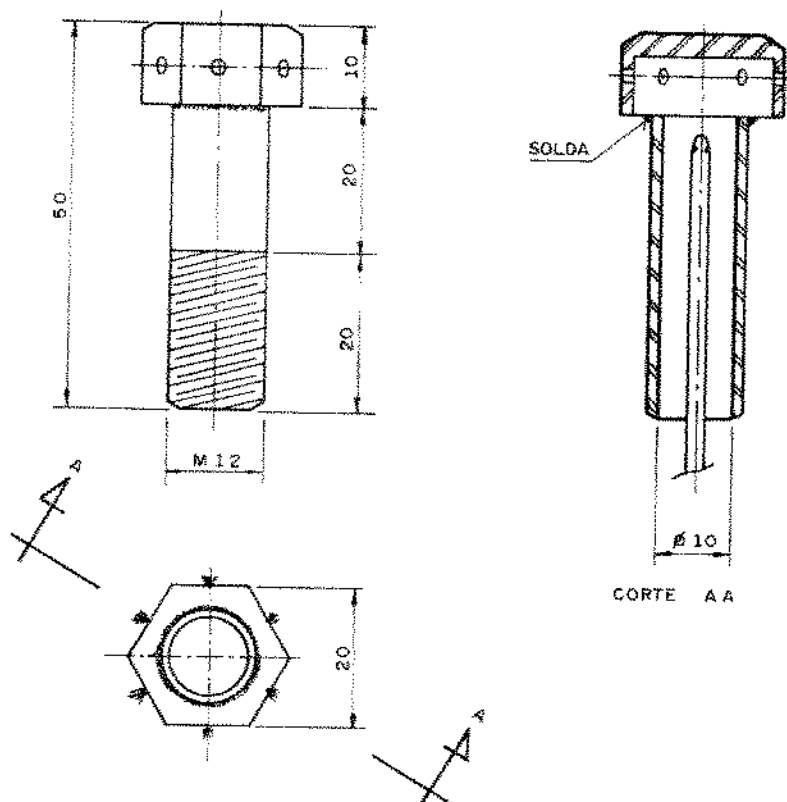


FIG. (2.3) DETALHE DO INJETOR

No topo do reator localiza-se uma tampa refratária de 220 mm de espessura, com uma abertura na lateral de 50x150 mm para possibilitar a saída dos gases de combustão para o ambiente. Um orifício na tampa é usado para inserir o termopar chromel-alumel que mede a temperatura do leito; sua extensão é protegida por um tubo de alumina de 10 mm de diâmetro, que, por sua vez fica dentro de um tubo de aço inox. No centro da tampa existe o orifício por onde é introduzido o corpo metálico a ser aquecido. O suporte do corpo metálico é mostrado na Figura 2.4(a). No seu interior passa o termopar que acompanha a temperatura no centro do corpo. Ele é protegido por um tubo de alumina de 4 mm de diâmetro inserido dentro de um tubo de aço inoxidável, no qual há refrigeração para evitar que a alumina se danifique. Os termopares utilizados nos testes foram devidamente calibrados.

Os corpos metálicos foram construídos em duas partes, havendo em cada uma delas um "rebaixo" a partir do centro do corpo, como mostra a Figura 2.4(b). Nele foi colocado a alumina protetora do termopar. Quando as 2 partes eram unidas, a ponta do termopar era achatada e sua localização disposta de maneira a garantir a medida da temperatura do centro do corpo. As duas partes eram fixadas com pontos de solda, para constituir o corpo de prova. Os termopares são ligados a um registrador potenciométrico de 2 canais marca OMEGA de precisão 0,1 mV.

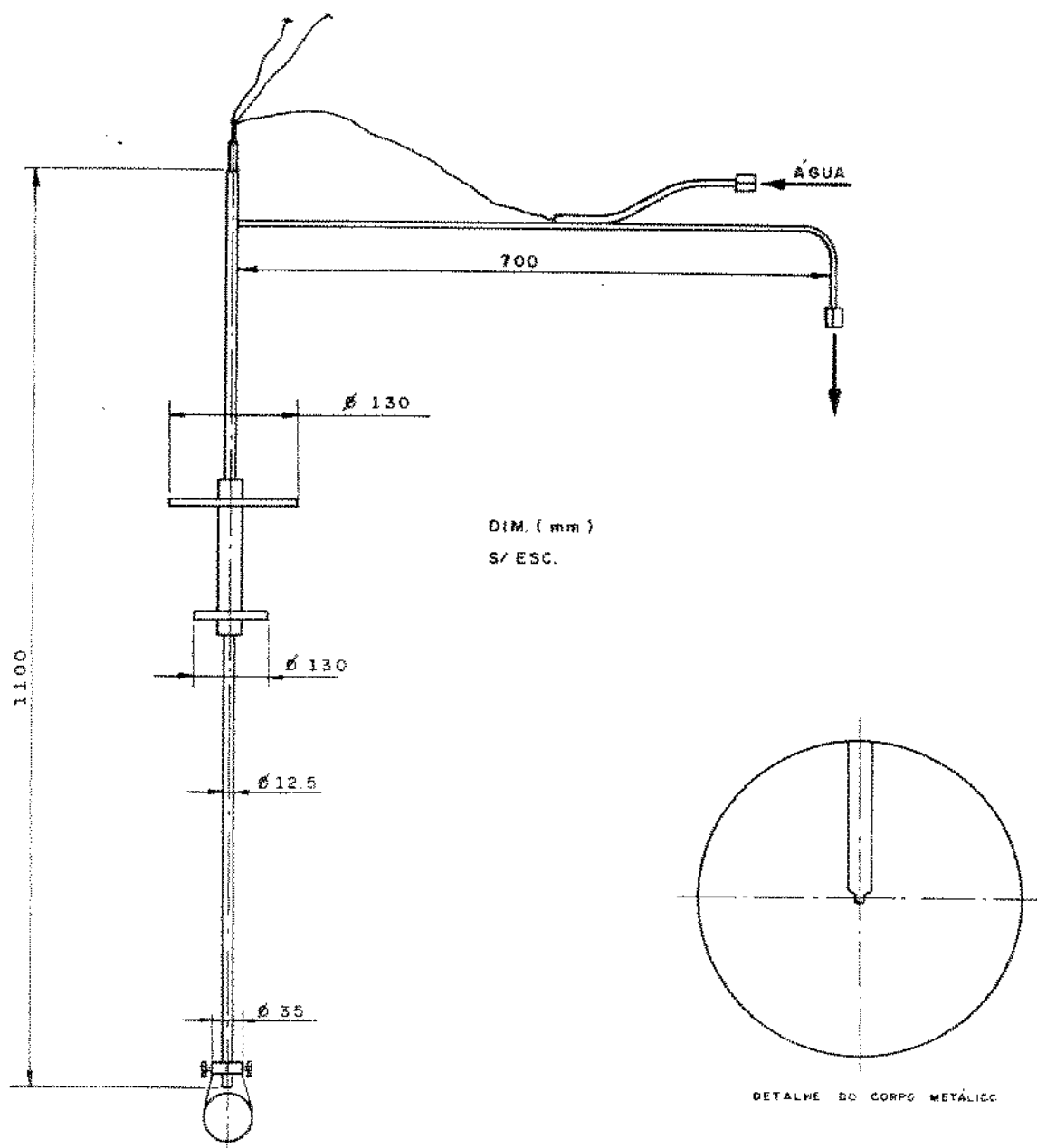


FIG.( 2.4 ) SUPORTE DO CORPO METÁLICO

## 2.2 - Procedimento Experimental

A primeira etapa do teste consiste no aquecimento do leito, que compreende as etapas seguintes:

- a. A areia é colocada no leito até um nível em torno de 10 cm.
- b. Aciona-se os sopradores até atingir uma velocidade adequada.
- c. Liga-se a bomba de água.
- d. Faz-se a ignição manual do leito, molhando um chumaço de estopa com álcool, que é jogado dentro do leito, cuja tampa está levantada. Abre-se, em seguida, a válvula de gás, de modo a obter uma relação ar-GLP tal que apareça uma chama de cor azul e se garanta que todos os injetores estão funcionando e abaixa-se a tampa do reator, na qual o termopar de medida de temperatura do leito já está instalado.
- f. À medida que o leito vai se aquecendo, coloca-se mais areia até que o nível do leito não expandido atinja a 350 mm.
- g. Ajusta-se a vazão de ar para a velocidade desejada dentro do leito.
- h. Ajusta-se a vazão de GLP até que a temperatura do leito se estabilize em 850°C.
- i. Espera-se o sistema atingir uma condição estável de operação.

A segunda etapa do teste compreende o aquecimento do corpo metálico propriamente dito. A sequência compreende:

- j. Instalação das mangueiras para a alimentação e descarga de água no suporte dos corpos metálicos.
- k. Imersão rápida do corpo metálico no

leito, de modo a minimizar seu aquecimento antes de sua colocação no interior do reator.

1. Registro da curva de aquecimento do corpo metálico, ou seja, da variação da temperatura do centro do corpo ao longo do tempo, até que a temperatura do centro do corpo atinja o valor da temperatura do leito.

m. Retirada do corpo metálico do leito.

São alteradas as condições do teste; atingida nova situação de regime nas condições desejadas, inicia-se novo teste pela repetição do procedimento apresentado.

Para desligar o sistema:

a. Desliga-se a válvula de fornecimento de GLP.

b. Após aproximadamente meia hora, desliga-se a alimentação de água para a placa distribuidora e o fornecimento de ar.

c. Finalmente, desliga-se a bomba de água e os sopradores.

A distribuição granulométrica do leito foi determinada após o conjunto de testes, realizados no dia.

Algumas das dificuldades durante os testes foram:

- Estabelecimento de um procedimento adequado para operação do sistema experimental. No início do aquecimento, muitas vezes, a chama se apagou e o leito caiu, ocorrendo vazamento de gás, como detectado pelo forte cheiro reinante. Este problema foi aliviado pela utilização de menor quantidade de areia no início do teste.

- Depois do leito aquecido, sua estabilização não era imediata, registrando-se diferenças de

temperatura em seu interior. Este tempo de estabilização chegou a ser, em alguns casos, de cerca de meio dia. Sendo assim, o número de testes por dia variou muito, desde situações em que nenhum teste acabou sendo realizado, até um máximo de 10 corridas por dia.

- Como os fios de termopares usados para medir a temperatura do corpo eram finos, seu rompimento ocorreu com muita frequência, principalmente entre o suporte e o corpo metálico, onde o tubo de alumina era exposto diretamente ao leite. O procedimento seguido para a instalação de um novo par termoeletrico exigia tempo e paciência, pois os fios tinham de ser passados pelo interior dos tubos de alumina e, depois, na continuação, saírem pela extremidade do suporte, tinham de ser revestidos por espaguete de alumina, para prover a proteção necessária.

- Outros problemas que podem ser mencionados compreendem o vazamento de água na placa distribuidora e nos suportes do corpo, testes para a escolha do diâmetro da placa de orifício que oferecesse melhor sensibilidade para leitura no manômetro, emperramento do cabo de aço que suportava a tampa do reator e a necessidade de troca do tubo de aço inoxidável que revestia internamente o reator, o qual ficou irregular devido às altas temperaturas que teve de suportar na fase inicial de operação do reator, quando se buscava estabelecer o melhor procedimento a ser seguido.

### CAPÍTULO 3

#### PROCESSAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS

O procedimento adotado para a obtenção do coeficiente de transferência de calor  $h$  a partir do conhecimento da variação com o tempo da temperatura no centro do corpo imerso no leito fluidizado, considera-se que o corpo metálico possui uma temperatura inicial uniforme  $T_o$  e que é subitamente colocado no leito, mantido a  $T_\infty$ , com o qual a troca calor com um coeficiente de transferência de calor  $h$  constante.

A distribuição de temperatura em esferas e cilindros nestas circunstâncias, conhecendo o valor de  $h$ , já foi apresentada anteriormente por Heisler, em 1947, e os resultados são disponíveis em gráficos. No presente caso usaremos a solução analítica, a qual fornece uma maior confiabilidade.

Os testes experimentais permitiram a medida das temperaturas do centro do corpo metálico, do ambiente  $T_o$  e do leito  $T_\infty$  ao longo do tempo, durante o aquecimento do corpo. Estes valores são usados para determinar o coeficiente de transferência de calor  $h$ , que deve ser interpretado, neste caso, como o valor médio desde o instante inicial (quando o corpo é imerso no leito) até o instante considerado.

Apresenta-se a seguir os detalhes do cálculo de  $h$  para dois tipos de corpos estudados: esfera e cilindro finito.

### 3.1 - Esfera

Para uma esfera sólida de raio  $R$ , sua distribuição de temperatura em regime transitório é dada pela equação da conservação de energia, como segue:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (3.1)$$

onde  $\alpha$  é a difusividade térmica do material do corpo, e  $r$  é a coordenada radial com origem no centro da esfera.

As condições de contorno são:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{em } r = 0, \text{ e}$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{h}{k} (T - T_{\infty}) \quad \text{em } r = R,$$

onde  $k$  é a condutividade térmica do material do corpo.

A condição inicial é:

$$T = T_0 \quad \text{em } t = 0$$

Fazendo  $\theta = T - T_{\infty}$ , obtém-se

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial \theta}{\partial r} \right]$$

Condições de contorno agora passam a ser:



$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \quad \text{em } r = 0;$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = - \frac{h}{k} \theta \quad \text{em } r = R,$$

e a condição inicial:

$$\theta = T_o - T_{\infty} = \theta_o \quad \text{em } t = 0$$

A solução analítica do problema acima para a temperatura, considerando o problema unidimensional, é :

$$\frac{\theta(r,t)}{\theta_o} = \frac{T(r,t) - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\text{sen} \lambda_n R - \lambda_n R \cos \lambda_n R}{\lambda_n R - \text{sen} \lambda_n R \cos \lambda_n R} \right) \frac{\text{sen} \lambda_n r}{\cos \lambda_n r} e^{-\alpha \lambda_n^2 t} \quad (3.2)$$

onde  $\lambda_n R$  são as raízes de:

$$\lambda_n R \cos \lambda_n R = (1 - Bi) \text{sen} \lambda_n R \quad (3.3)$$

O presente caso acompanha-se experimentalmente a temperatura no centro da esfera, isto é, em  $r = 0$ . Neste caso  $T(r,t) = T(0,t) = T_{\text{centro}}$  e a Eq(3.2) fica:

$$\frac{\theta(0,t)}{\theta_o} = \frac{T_{\text{centro}} - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} = \frac{T_{\text{centro}} - T_{\text{leito}}}{T_o - T_{\text{leito}}} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\text{sen} \lambda_n R - \lambda_n R \cos \lambda_n R}{\lambda_n R - \text{sen} \lambda_n R \cos \lambda_n R} \right) e^{-\alpha \lambda_n^2 t} \quad (3.4)$$

Feitas estas considerações é possível relatar o procedimento adotado para a obtenção de  $h$  a partir dos

valores experimentais obtidos:

- Estima-se  $Bi$ ;
- Obtém-se  $\ln R$  a partir da eq(3.3);
- Calcula-se o valor de

$$\left( \frac{T_{\text{centro}} - T_{\text{leito}}}{T_o - T_{\text{leito}}} \right)_{\text{Teórico}} \quad \text{correspondente,}$$

através da eq(3.4).

- Compara-se o valor  $\left( \frac{T_{\text{centro}} - T_{\text{leito}}}{T_o - T_{\text{leito}}} \right)_{\text{Teórico}}$

obtido com o valor  $\left( \frac{T_{\text{centro}} - T_{\text{leito}}}{T_o - T_{\text{leito}}} \right)_{\text{Experimental}}$

- Se a diferença for maior que o erro pré-fixado, repete-se o procedimento, supondo novo valor de  $Bi$ . No caso oposto, quando o  $Bi$  admitido levou a um resultado satisfatório, calcula-se o  $h$ , dado por  $h = Bi \frac{k}{D/2}$

### 3.2 - Cilindro Finito

A resolução para o caso do cilindro finito é semelhante à do caso anterior, para resolver este problema, no entanto, tem-se que combinar as soluções de uma placa infinita com a de um cilindro infinito, conforme proposto por Heisler em 1947.

#### 3.2.1 - Placa Infinita

Considerando uma placa infinita de espessura

igual a  $\delta$ , igual ao comprimento do cilindro finito, a distribuição de temperatura na placa é dada pela equação:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.5)$$

onde  $x$  é a ordenada a partir do centro da placa.

As condições de contorno são:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{em } x = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{h}{k} (T - T_{\infty}) \quad \text{em } x = \delta/2$$

e a condição inicial é:

$$T = T_0 \quad \text{em } t = 0$$

Fazendo  $\theta = T - T_{\infty}$ , obtém-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

As condições de contorno e inicial ficam:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad \text{em } x = 0;$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = -\frac{h}{k} \theta \quad \text{em } x = \delta/2, e$$

$$\theta(x, 0) = T_0 - T_{\infty} = \theta_0$$

A solução analítica para a temperatura é :

$$\frac{\theta(x, t)}{\theta_0} = \frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} =$$

$$2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}(\lambda n \delta / 2)}{(\lambda n \delta / 2 + \text{sen} \lambda n \delta / 2 \cos \lambda n \delta / 2)} \cos \lambda n x e^{-\lambda n^2 \alpha t} \quad (3.6)$$

onde  $\lambda n \delta / 2$  são as raízes de:

$$\lambda n \delta / 2 \text{ sen} \lambda n \delta / 2 = B i \cos \lambda n \delta / 2 \quad (3.7)$$

Para  $x = 0$ ,  $T(x, t) = T(0, t) = T_{\text{centro}}$  e a

Eq (3.6) fica:

$$\frac{\theta(0, t)}{\theta_0} = \frac{T_{\text{centro}} - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \frac{T_{\text{centro}} - T_{\text{leito}}}{T_0 - T_{\text{leito}}} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \lambda n \delta / 2}{\lambda n \delta / 2 + \text{sen} \lambda n \delta / 2 \cos \lambda n \delta / 2} e^{-\lambda n^2 \alpha t} \quad (3.8)$$

### 3.2.2 - Cilindro infinito

Numa barra cilíndrica muito longa, de raio  $R$ , a distribuição de temperatura em regime transitório é dada pela resolução da equação:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.9)$$

onde  $r$  é a ordenada radial medida a partir do eixo de simetria da barra e orientada para fora.

As condições de contorno são:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{em} \quad r = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{h}{k} (T - T_{\infty}) \quad \text{em} \quad r = R$$

e a condição inicial é:

$$T = 0 \quad \text{em} \quad t = 0$$

Analogamente, fazendo  $\theta = T - T_{\infty}$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right)$$

Condições de contorno:

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \quad \text{em} \quad r = 0$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{h}{k} \theta = 0 \quad \text{em} \quad r = R$$

e, condição inicial:

$$\theta = T_0 - T_{\infty} = \theta_0 \quad \text{em} \quad t = 0$$

A solução analítica para a temperatura do cilindro infinito, considerando um problema unidimensional, é dada por:

$$\frac{\theta(r,t)}{\theta_0} = \frac{T(r,t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_1(\lambda_n R) J_0(\lambda_n r)}{\lambda_n R [J_0^2(\lambda_n R) + J_1^2(\lambda_n R)]} e^{-\lambda_n^2 \alpha t} \quad (3.10)$$

onde  $\lambda_n R$  são as raízes de:

$$\lambda_n R J_1(\lambda_n R) = Bi J_0(\lambda_n R) \quad (3.11)$$

Como se determina experimentalmente a temperatura na linha de centro do cilindro, isto é,  $T(r,t) = T(0,t) = T_{\text{centro}}$ , a Eq(3.10) fica para este caso:

$$\frac{\theta(0,t)}{\theta_0} = \frac{T_{\text{centro}} - T_{\text{leito}}}{T_0 - T_{\text{leito}}} =$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_1(\lambda n R)}{\lambda n R [J_0^2(\lambda n R) + J_1^2(\lambda n R)]} e^{-\lambda n^2 \alpha t} \quad (3.12)$$

Combinando-se simultaneamente as soluções da placa infinita e do cilindro infinito, a fim de estudar o cilindro finito, tem-se:

$$\left[ \frac{\theta}{\theta_0} \right]_{\text{cilindro finito}} = \left[ \frac{\theta}{\theta_0} \right]_{\text{placa infinito}} \times \left[ \frac{\theta}{\theta_0} \right]_{\text{cilindro infinito}} \quad (3.13)$$

isto é, a partir das equações (3.8) e (3.12):

$$A = \frac{\text{sen} \lambda n \delta / 2}{\lambda n \delta / 2 + \text{sen} \lambda n \delta / 2 \cos \lambda n \delta / 2}$$

$$B = \frac{J_1(\lambda n R)}{\lambda n R [J_0^2(\lambda n R) + J_1^2(\lambda n R)]}$$

$$C = (e^{-\lambda n^2 \alpha t})^2$$

$$\left[ \frac{\theta}{\theta_0} \right]_{\text{cilindro}} = \frac{T_{\text{centro}} - T_{\text{leito}}}{T_0 - T_{\text{leito}}} =$$

$$2 \sum_{n=1}^{\infty} A \times B \times C \quad (3.14)$$

O procedimento adotado neste caso para determinar  $h$  a partir das medidas de temperatura no centro do cilindro, deferiu um pouco do caso da esfera, adotando-se inicialmente um valor estimado de  $h$  e não de  $Bi$ , conforme segue:

- Estima-se o coeficiente de transferência de calor,  $h$ ;

- Calcula-se o  $Bi$  da placa infinita e do cilindro infinito;

- Obtém-se  $\ln \delta/2$  da eq(3.7) e  $\ln R$  da eq(3.11);

- Calcula-se  $\left( \frac{T_{\text{centro}} - T_{\text{leito}}}{T_o - T_{\text{centro}}} \right)_{\text{Teórico}}$  da eq(3.13);

- Compara-se  $\left( \frac{T_{\text{centro}} - T_{\text{leito}}}{T_o - T_{\text{centro}}} \right)_{\text{Teórico}}$  e

$$\left( \frac{T_{\text{centro}} - T_{\text{leito}}}{T_o - T_{\text{centro}}} \right)_{\text{Experimental}}$$

- Se a diferença for maior que o erro pré estabelecido, retorna-se ao primeiro passo. Do contrário, o valor do coeficiente de transferência de calor é o  $h$  estimado.

## CAPÍTULO 4

### APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os dados experimentais obtidos para os quatro corpos metálicos estudados são apresentados neste capítulo, compreendendo as curvas de aquecimento dos corpos e a variação do coeficiente de transferência de calor em função da velocidade superficial do gás, da capacidade térmica relativa corpo metálico/partícula, da temperatura da superfície do corpo e do tempo.

Salvo menção em contrário, os valores de coeficiente de transferência de calor mostrados foram obtidos para o instante  $t = 120s$ .

#### 4.1 - CURVAS DE AQUECIMENTO DOS CORPOS METÁLICOS

A Figura 4.1 mostra curvas de aquecimento típicas para cada um dos corpos estudados. Verifica-se que, num mesmo instante, a temperatura do corpo é maior para areia mais fina, isto é, um diâmetro menor de partícula favorece a transferência de calor em leito fluidizado, o que vem a confirmar os resultados obtidos na literatura existente. No Anexo 1 são apresentados todas as curvas de aquecimento obtidas no presente trabalho.



As curvas de aquecimento apresentadas para cada corpo correspondem à maior velocidade superficial para o caso da areia de menor diâmetro, e à menor velocidade para o caso da areia de maior diâmetro, para permitir uma comparação das curvas para as duas areias, diminuindo o efeito da velocidade do gás.

Observa-se que não foi possível uma sobreposição das velocidades quando se trabalhou com os dois diâmetros de areia; velocidades superiores à indicada jogavam a areia mais fina para fora do leito, enquanto velocidades menores do que as que foram usadas para a areia mais grossa impediam a sua fluidização.

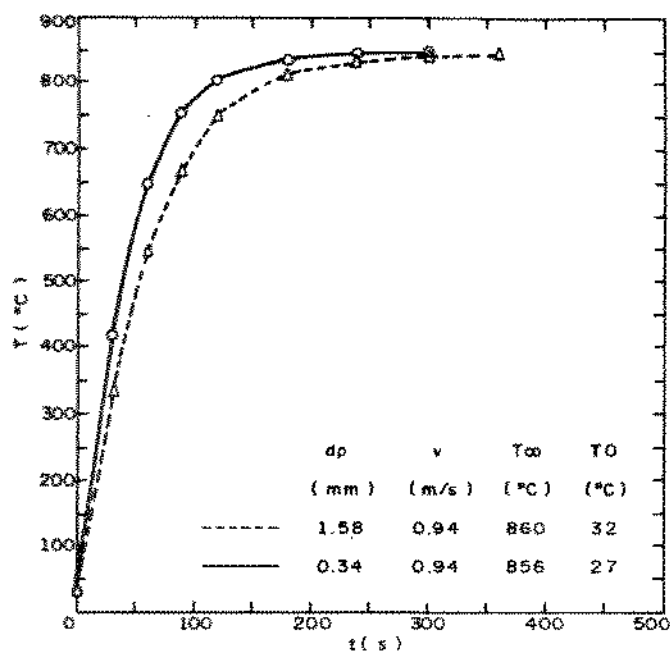
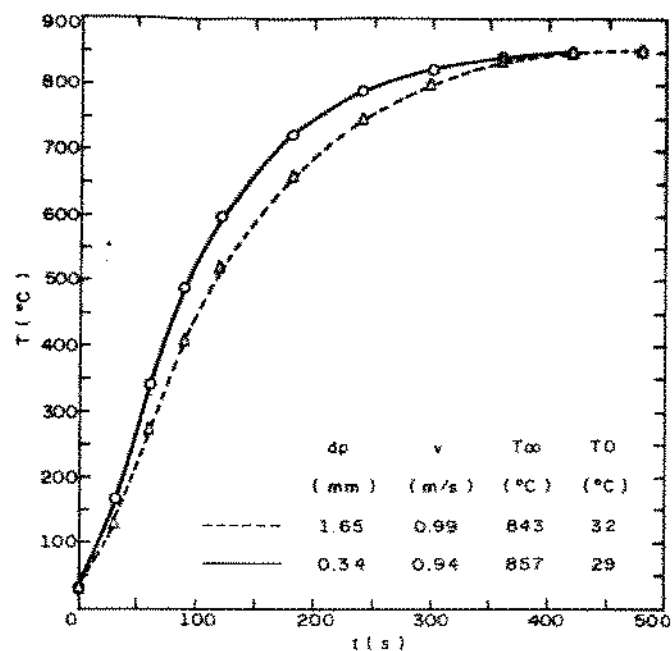
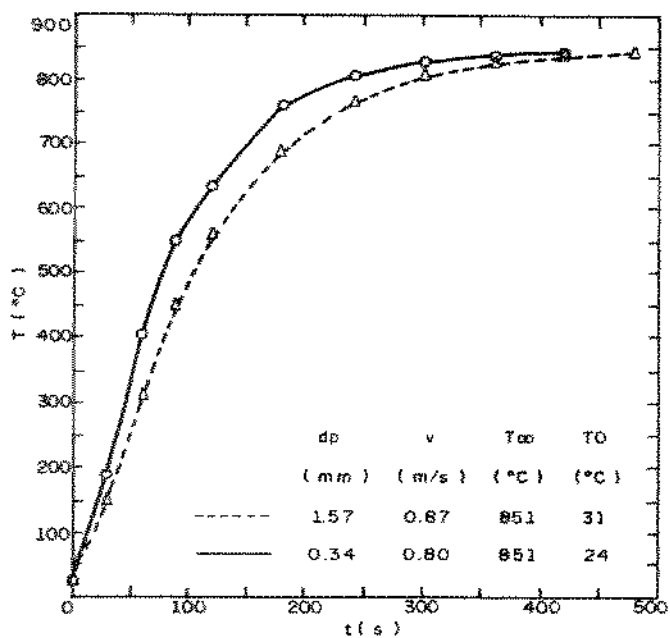
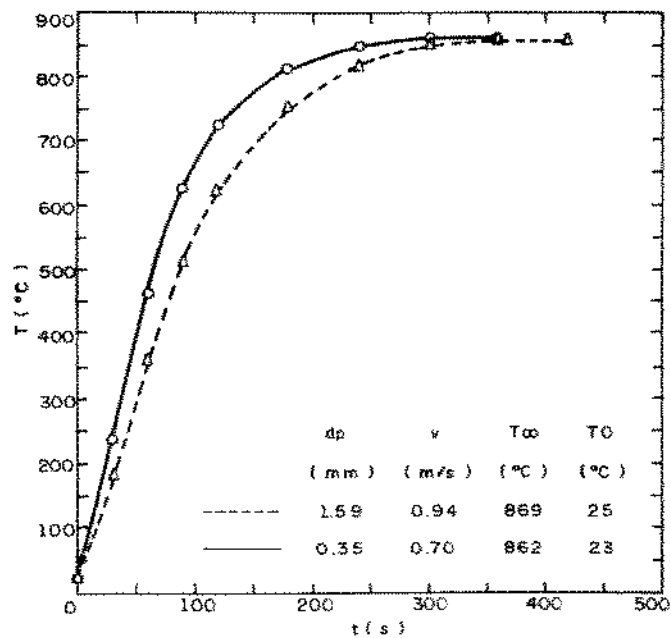
(a) ESFERA -  $D = 25$  mm(b) ESFERA -  $D = 50$  mm(d) CILINDRO -  $L/D = 4$ (e) CILINDRO -  $L/D = 8$ 

FIG. ( 4.1 ) CURVAS DE AQUECIMENTO

#### 4.2 - EFEITO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS NUM MESMO CORPO METÁLICO, VARIANDO O DIÂMETRO DAS PARTICULAS DO LEITO.

A variação do coeficiente de transferência de calor  $h$  com a velocidade  $v$  do gás para dois diâmetros médios de areia  $d_p$  num mesmo corpo é mostrada na Figura 4.2. Observa-se para o caso de areia grossa que, quando a velocidade do gás aumenta, há um pequeno aumento no coeficiente de transferência de calor, seguido de uma diminuição, sendo este efeito mais acentuado para o caso da esfera de menor diâmetro,  $D = 25$  mm. Para areia fina, o coeficiente de transferência de calor diminuiu sempre com o aumento da velocidade do gás. Uma possível explicação para este fato é que quando trabalhou-se com areia fina, tentou-se trabalhar com velocidades do gás próximas das velocidades utilizadas para a areia grossa, levando esta escolha de forma que caísse na faixa em que o coeficiente de transferência de calor diminui com o aumento da velocidade do gás. As faixas de velocidades do gás foram de 0,87 - 1,61 m/s para areia grossa e de 0,31 - 0,94 m/s para areia fina.

O comportamento dos dados para areia grossa se assemelham aos obtidos por Botterill et al., bem como por Kharchenko e Makhorin, os resultados deste último tendo sido apresentados na Figura 1.4; para areia fina não se nota semelhança. Para a areia de quartzo com  $d_p = 0,34$  mm e temperatura do leito de  $850^{\circ}\text{C}$  os valores obtidos por Kharchenko et al. ficaram praticamente inalterados, na faixa de velocidade estudada, que foi próxima à deste trabalho.

A variação do coeficiente de transferência de calor com a velocidade do gás, costuma ser explicada

por dois fatores: o aumento do coeficiente de transferência de calor com a velocidade seria devido ao aumento da turbulência local provocada pela movimentação das partículas do leite, enquanto o decréscimo seria devido à redução da concentração de partículas sólidas por unidade de volume do leite.

Observou-se ainda que  $h$  é maior para a partícula menor, efeito observado também por Kharchenco e al., Baskakov et al., Panov et al. e por Botterill et al..

Uma hipótese aventada para explicar o fato do coeficiente de transferência de calor aumentar quando diminui o tamanho das partículas seria o menor tempo de residência das partículas adjacentes à superfície do corpo; com isto menor seria o calor retirado destas partículas pelo corpo. Assim cada partícula teria sua temperatura se superfície próxima à temperatura do leite e, conseqüentemente, maior seria o  $\Delta T$  entre o corpo e as partículas, o que refletiria em um maior valor de  $h$ . Além disso, as partículas menores possuem maior área de transferência de calor do que uma mesma massa de partículas grandes, conseqüentemente, as partículas menores seriam capazes de suprir de forma mais eficiente o calor para o gás que as circunvizinham e, com isto, a troca de calor entre a superfície do corpo e o gás seria facilitada.

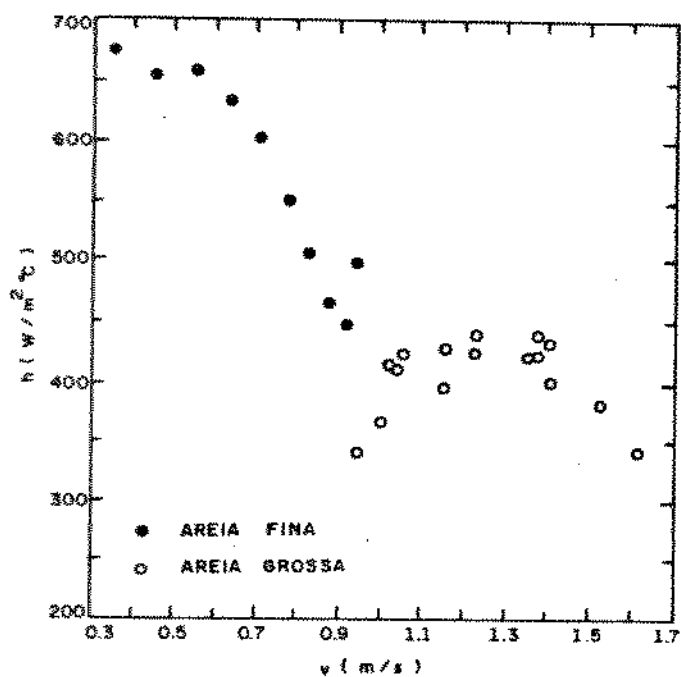
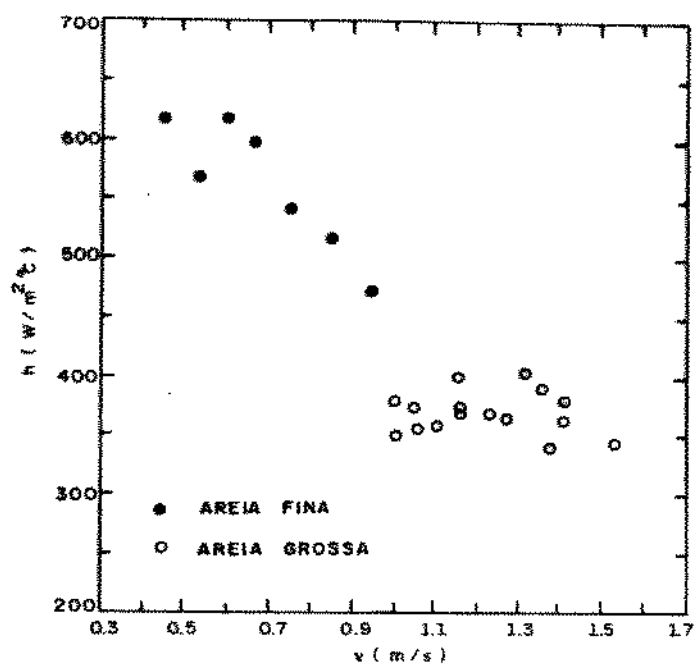
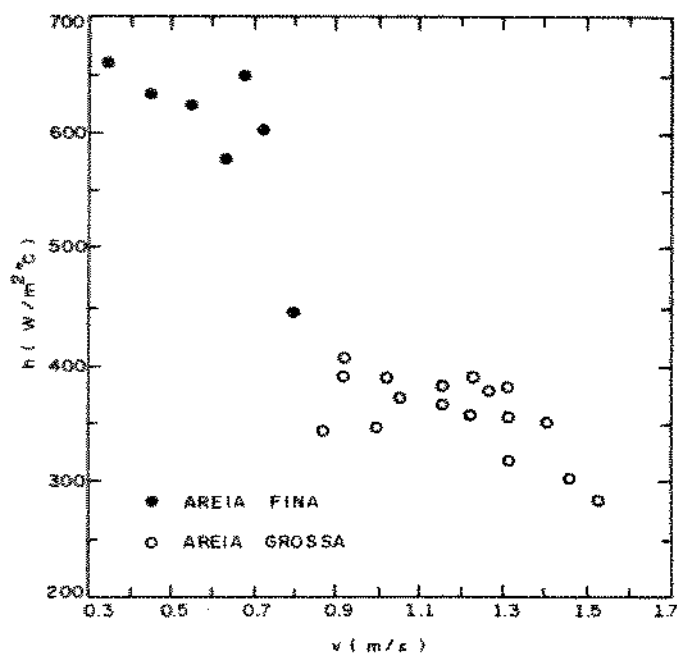
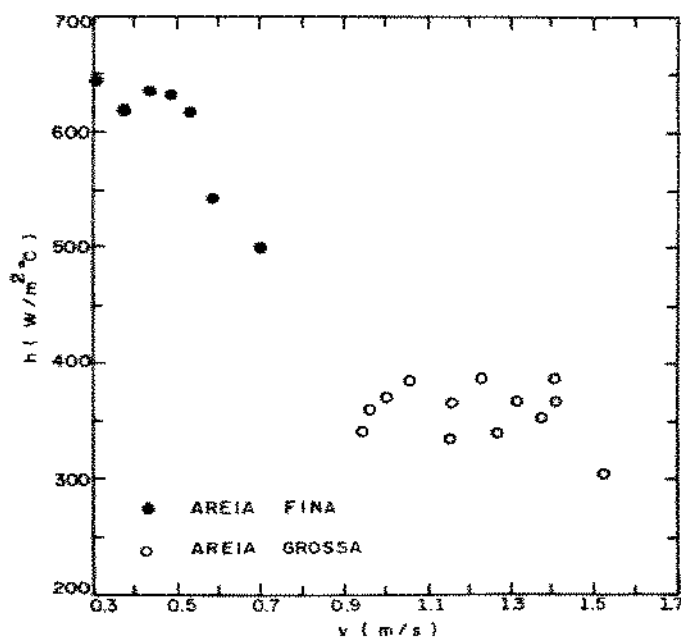
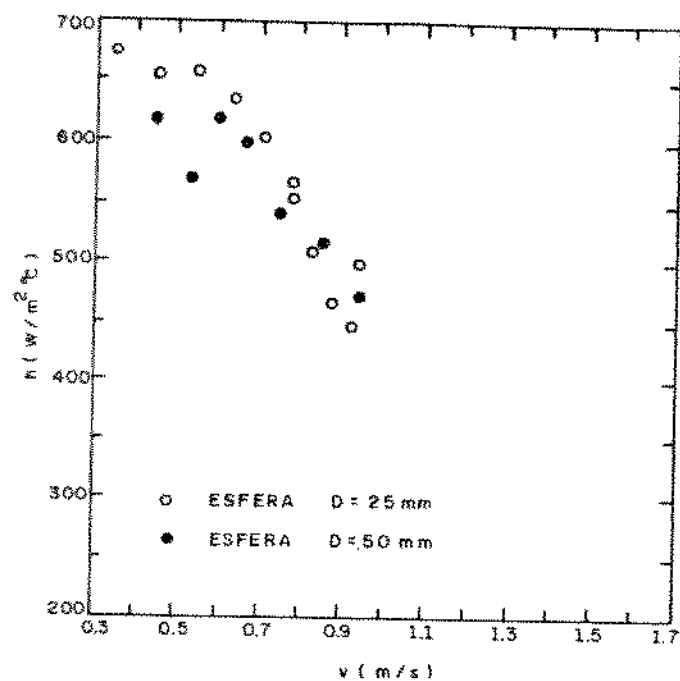
(a) ESFERA -  $D = 25$  mm(b) ESFERA -  $D = 50$  mm(c) CILINDRO -  $L/D = 4$ (d) CILINDRO -  $L/D = 8$ 

FIG. (4.2) VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM A VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS NUM MESMO CORPO METÁLICO E PARA DIFERENTES GRANULOMETRIA

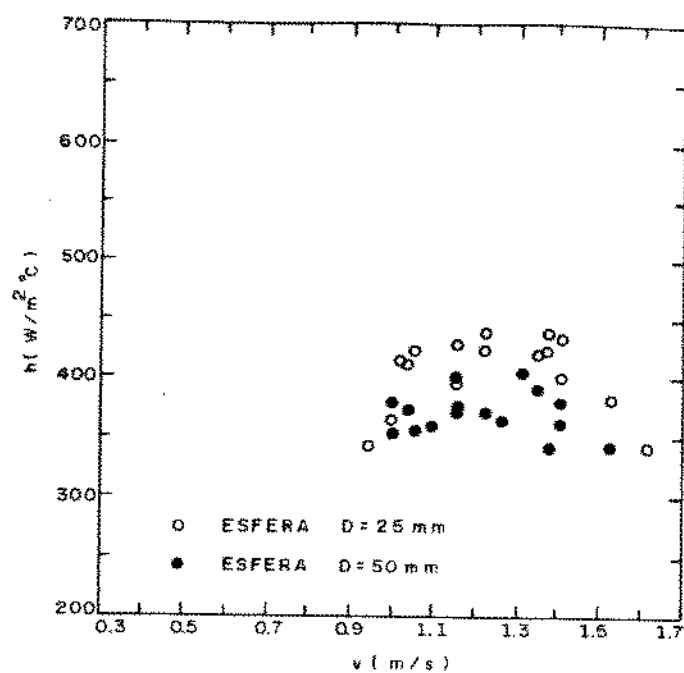
#### 4.3 - EFEITO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS NO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NUM LEITO COM UMA DETERMINADA AREIA, VARIANDO O CORPO NELA IMERSO

Comparando-se o coeficiente de transferência de calor em função da velocidade do gás para esferas de diferentes tamanhos quando imersas num leito com a mesma areia, nota-se que  $h$  para esfera menor,  $D = 25$  mm, é maior do que para a esfera de 50 mm, para ambas as areias, como se pode observar na Figura 4.3 (a) e (b). O aumento do coeficiente de transferência de calor com a diminuição do tamanho do corpo imerso também foi observado por Botterill et al., como se viu na Figura 1.5.

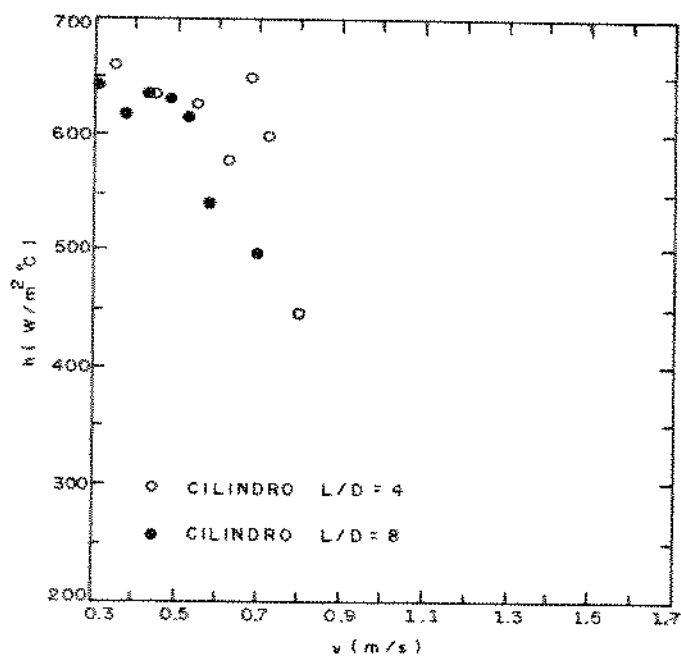
No caso dos cilindros, observa-se que, para a areia fina, o cilindro curto ( $L/D = 4$ ) apresentou valores de  $h$  ligeiramente superiores aos do cilindro longo, como mostra a Figura 4.3 (c). O mesmo comportamento não foi observado para areia grossa, tendo os valores de  $h$  se agrupado ao longo da faixa de velocidades estudada, como se vê na Figura 4.3 (d).



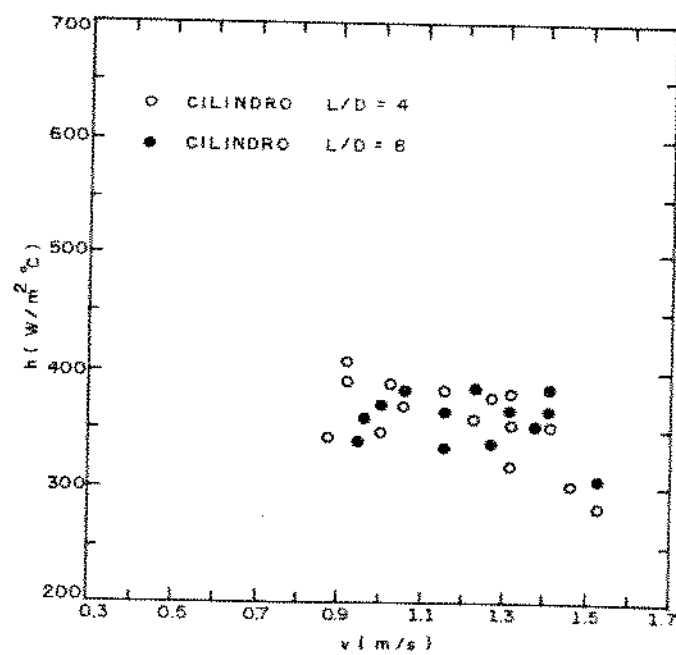
(a) AREIA FINA



(b) AREIA GROSSA



(c) AREIA FINA



(d) AREIA GROSSA

FIG. (4.3) VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM A VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS PARA UM LEITO FLUIDIZADO COM DETERMINADA AREIA, VARIANDO O CORPO NELE IMERSO

4.4 - EFEITO DA VELOCIDADE DO GÁS NO  
COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR  
PARA CORPOS DE MESMO VOLUME E FORMATO  
DIFERENTE

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram que não houve um efeito significativo do formato dos corpos metálicos, de mesmo volume, no coeficiente de transferência de calor  $h$ . Este efeito era previsto em função de uma eventual mudança do comportamento do leito ao se introduzir corpos de diferentes formatos, alterando, consequentemente, a transferência de calor leito-superfície. No caso de areia fina a esfera maior apresentou valores de  $h$  maiores na faixa de velocidades maiores, mas não se pode concluir com maior certeza sobre algum efeito de formato, pois o número de pontos experimentais ainda é restrito, e há sempre a possibilidade de erros experimentais.



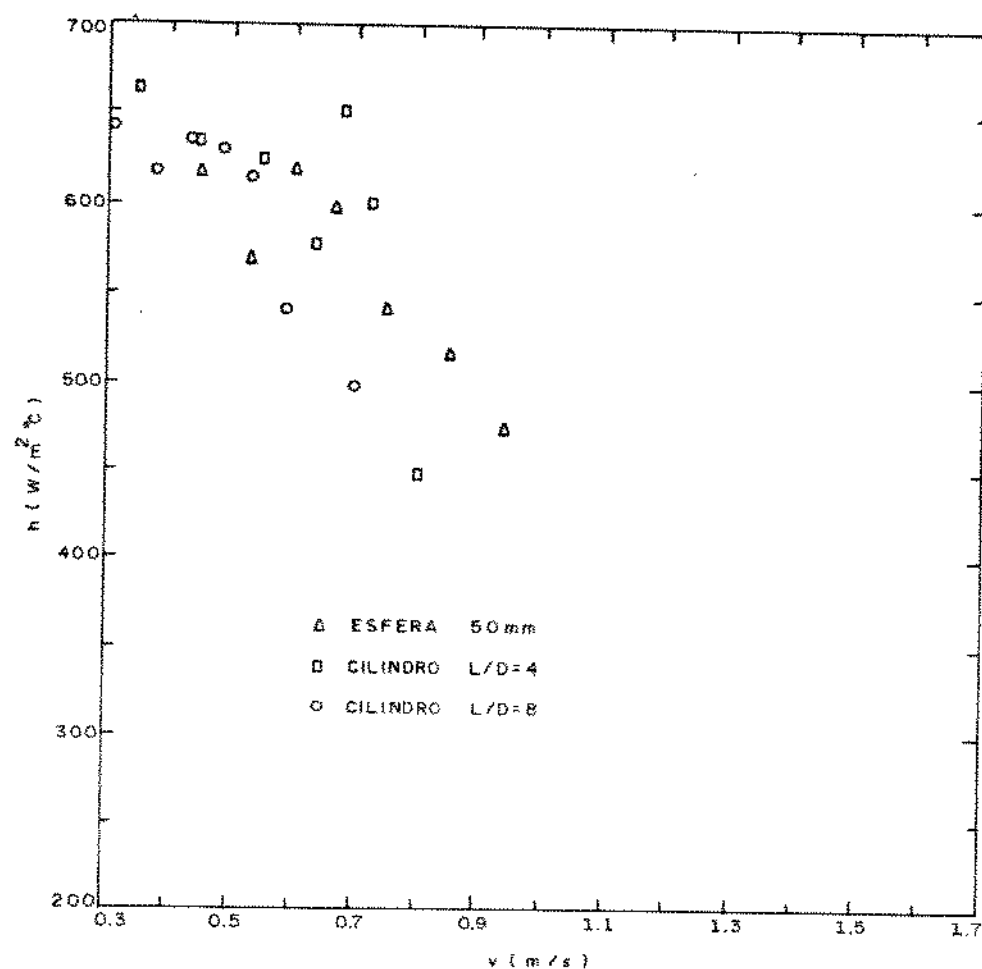


FIG. (4.4) COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS. CORPOS METÁLICOS DE MESMO VOLUME E FORMATOS DIFERENTES - AREIA FINA

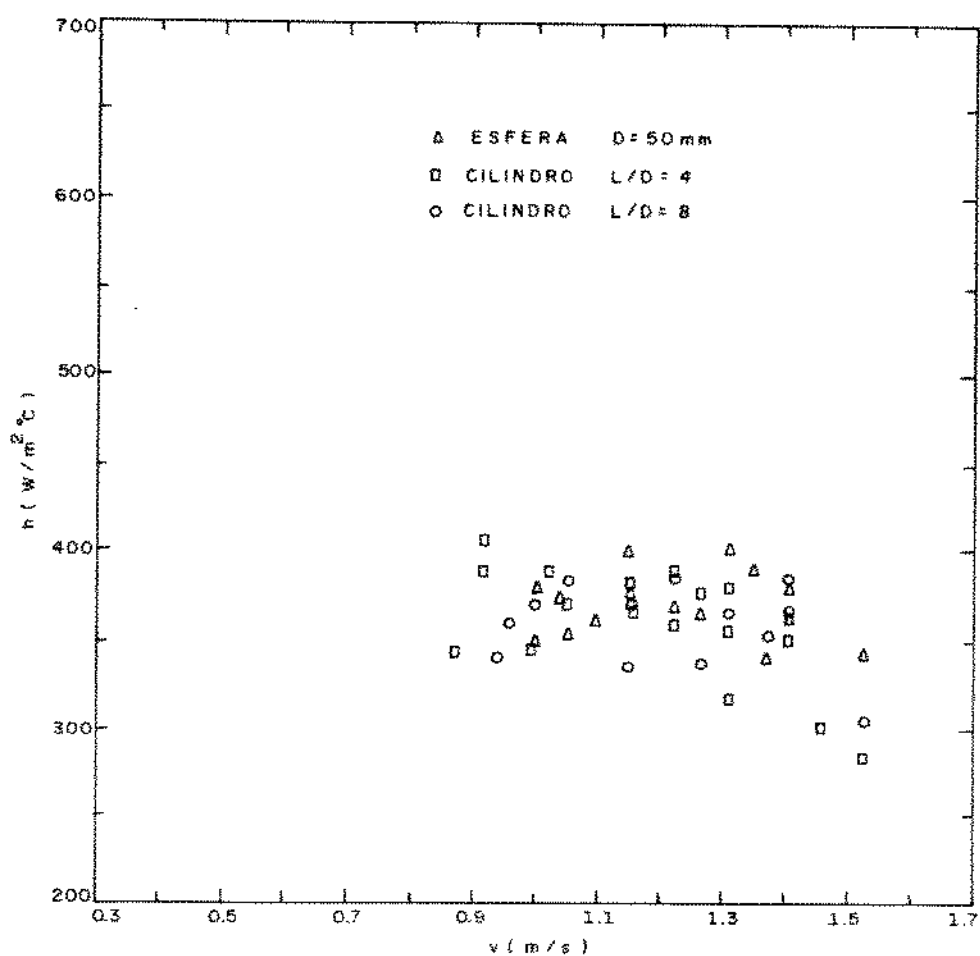


FIG.( 4.5 ) COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS. CORPOS METÁLICOS DE MESMO VOLUME E FORMATOS DIFERENTES - AREIA GROSSA

#### 4.5 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA FORMA ADIMENSIONAL $NU$ VERSUS $RE$

Uma alternativa de representação dos valores do coeficiente de transferência de calor em função da velocidade superficial do gás, ainda pouco utilizada na literatura da área, é mostrada na Figura 4.6, onde os parâmetros estão relacionados de forma adimensionalizada em termos dos números de Nusselt e Reynolds, onde o comprimento característico é o diâmetro de partícula,  $dp$ . Este gráfico representa duas esferas de diâmetro 25 mm e 50 mm, com areias de  $\approx 0,3$  e  $\approx 1,6$  mm de diâmetro, além dos resultados experimentais obtidos por Kharchenco e Makhorin para esfera de cobre de 60 mm de diâmetro mergulhada num leito de areia de quartzo de  $dp = 0,34$  mm, temperatura de  $900^{\circ}\text{C}$  e, ainda, resultados de Goldstein Jr. para esferas de 15 e 35 mm, areias de 0,2; 0,5 e 1,0 mm, e leito de  $\approx 850^{\circ}\text{C}$ . Nota-se claramente no gráfico que, independentemente das dimensões do corpo, há um acréscimo do valor de Nusselt quando o diâmetro da partícula aumenta. Como se viu anteriormente,  $h$  é maior para areias mais finas; o valor de Nusselt, no entanto, decresce devido à presença do diâmetro da partícula no numerador, com uma influência mais forte do que a do próprio  $h$ , mostrando que o acréscimo de  $h$  com a diminuição de  $dp$  obedece uma relação não linear.

Em relação ao efeito do tamanho dos corpos esféricos no coeficiente de transferência de calor, nenhuma informação adicional pôde ser verificada levando-se em conta os trabalhos dos outros autores, não se detectando nenhuma tendência antes não identificada.

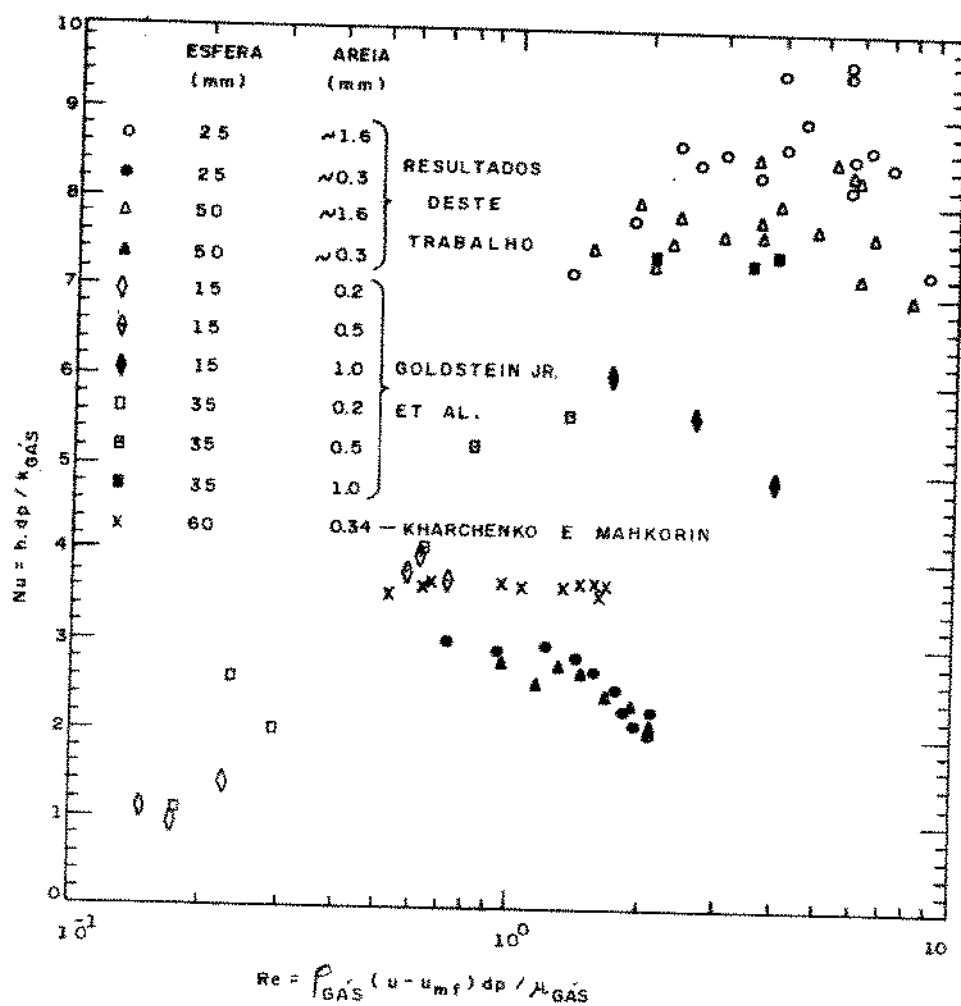


FIG. ( 4.6 ) REPRESENTAÇÃO ADIMENSIONAL DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR  $h$  EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS, PARA ESFERAS DE DIFERENTES DIÂMETROS E PARTICULADOS DE DIFERENTES GRANULOMETRIAS

#### 4.6 - EFEITO DA CAPACIDADE TÉRMICA RELATIVA CORPO METÁLICO/PARTÍCULA NO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A Figura 4.7 mostra o efeito da capacidade térmica relativa corpo metálico/partícula no coeficiente de transferência de calor  $h$ , para os corpos de mesmo volume: esfera ( $D = 50$  mm) e cilindros ( $L/D = 4$  e  $L/D = 8$ ), e a esfera menor ( $D = 25$  mm), com velocidades do gás na faixa de 0,35 a 0,94 m/s para areia fina ( $d_p \approx 0,3$  mm), e de 0,94 a 1,61 m/s para areia grossa ( $d_p \approx 1,6$  mm).

Subtraindo o efeito da capacidade térmica fica claro, observando-se os conjuntos de pontos (1) e (3), que o  $h$  aumenta para a areia fina mesmo que a velocidade do gás para a areia grossa seja maior, com já pudemos observar nos gráficos de  $h_{xv}$ . O efeito do tamanho da areia se mostra mais importante que o efeito do tamanho do corpo quando se compara os valores de  $h$  entre os conjuntos de ponto (1)-(2) e (1)-(3). Para a areia fina a influência do tamanho do corpo foi menos evidente do que para areia grossa, como pode ser notado analisando o conjunto de pontos (3) e (4).

Nos conjuntos de pontos (2) e (3), que praticamente apresentam os mesmos valores de  $(\rho V c)_{\text{corpo metálico}} / (\rho V c)_{\text{partícula}}$ , correspondentes às combinações corpo grande/areia grossa (2) e corpo pequeno/areia fina (3), verifica-se que o efeito combinado de aumentar os tamanhos do corpo e da areia simultaneamente, reduz os valores de  $h$  pela metade.

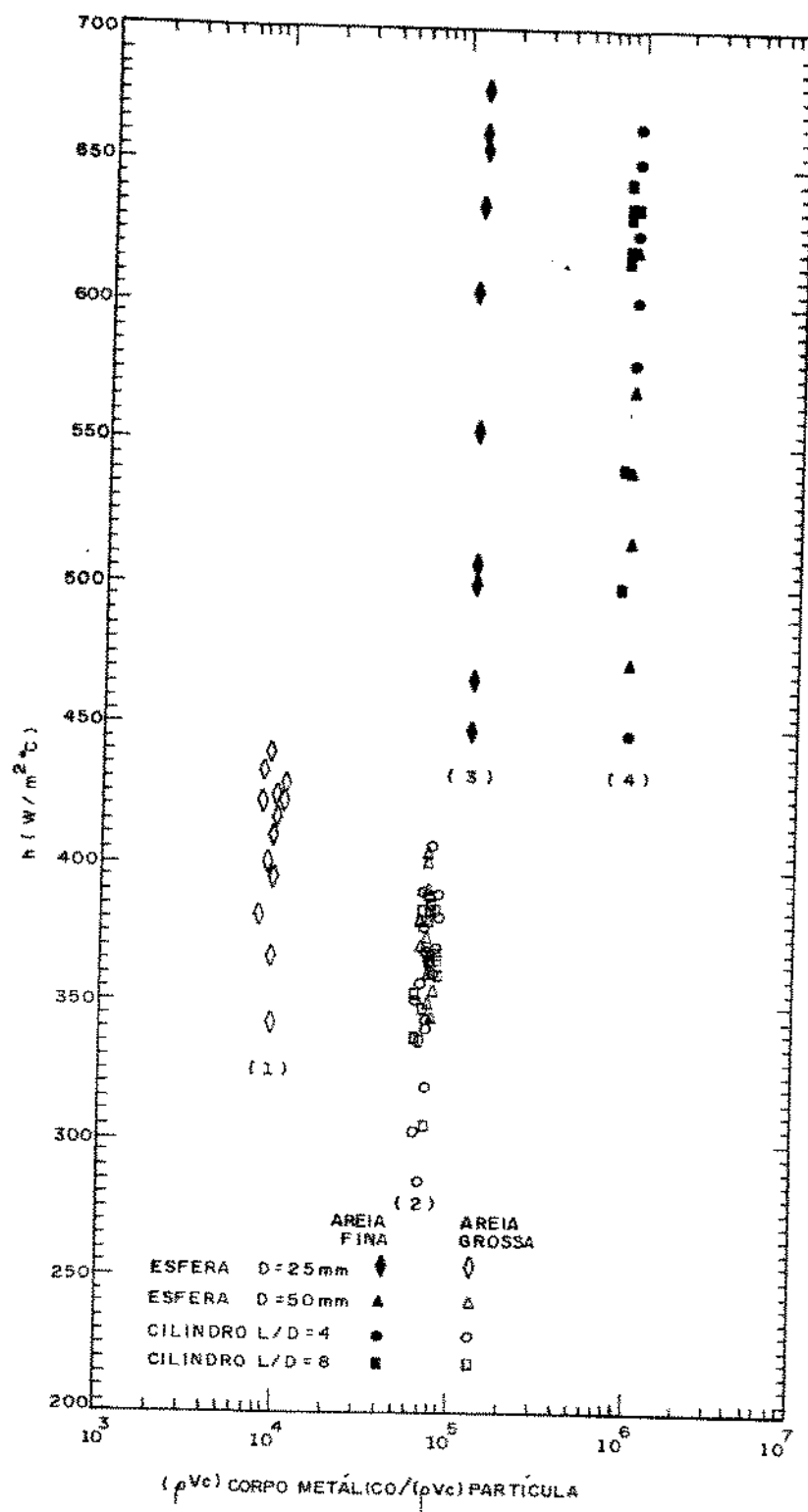


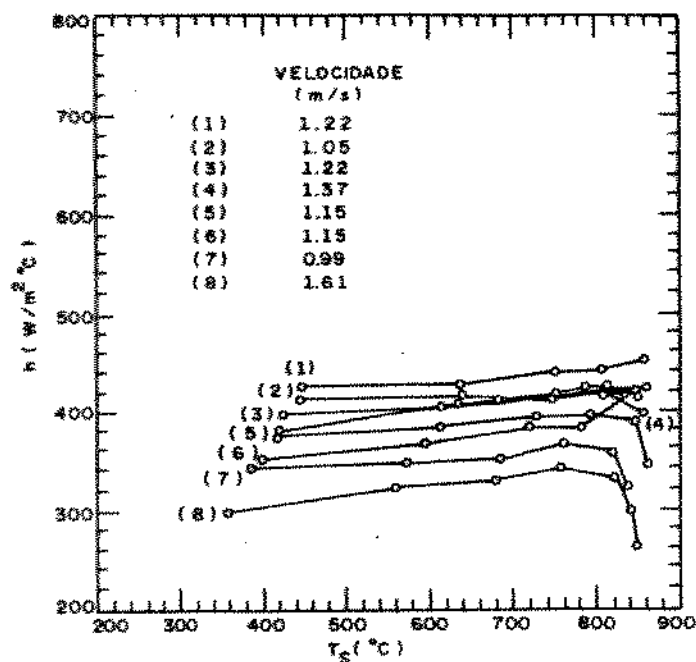
FIG.(4.7) EFEITO DA CAPACIDADE TÉRMICA RELATIVA CORPO METÁLICO/PARTÍCULA NO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

#### 4.7 - EFEITO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO CORPO IMERSO NO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

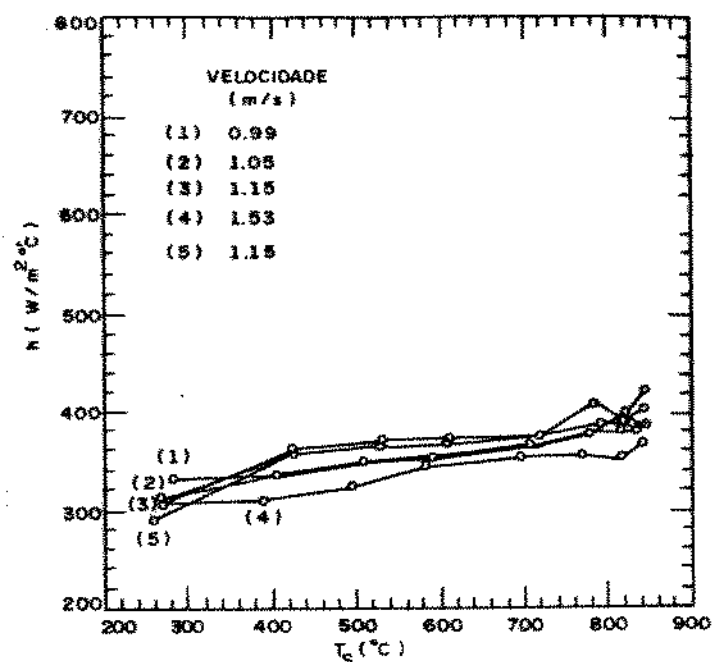
O efeito da temperatura da superfície  $T_s$  no valor de  $h$  para um corpo esférico em leito de areia grossa é apresentado nas Figuras 4.8 (a) e (b), onde se observa que  $h$  aumenta suavemente com  $T_s$ . No caso da esfera pequena ( $D = 25\text{mm}$ ), observa-se adicionalmente que o valor de  $h$  diminui em alguns casos quando a temperatura da superfície se aproxima da temperatura do leito. Para a areia fina, Figuras 4.8 (c) e (d), não se observa o mesmo comportamento da areia grossa. Os resultados apresentados por Botterill et al., Figura 1.6, para partículas esféricas e areias de  $1,15\text{ mm}$  ( $T_{\text{leito}} = 450^\circ\text{C}$ ) e  $0,37\text{ mm}$  ( $T_{\text{leito}} = 500^\circ\text{C}$ ) mostram que  $h$  sempre aumenta com  $T_s$ , e que o efeito de  $T_s$  é menor para areia mais grossa. Este último efeito não ficou perfeitamente definido para os dados deste trabalho.

A maneira com que a temperatura da superfície atuaria no coeficiente de transferência de calor neste caso seria através de seu efeito na condutividade térmica do gás diretamente adjacente a esta, pois a condutividade térmica do gás aumenta com o aumento da temperatura, facilitando a transferência de calor.

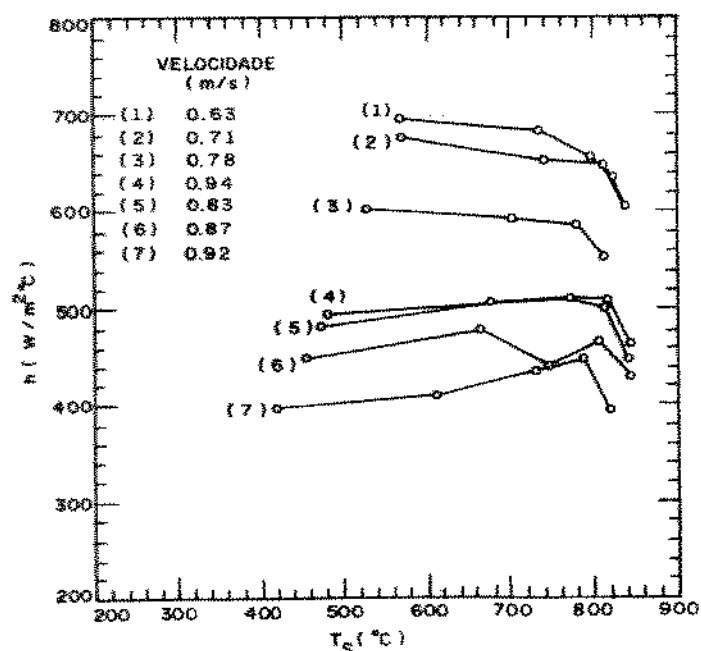
O comportamento das curvas quando  $T_s$  se aproxima da temperatura do leito, não foi previamente descrito na literatura, e não se tem explicação no momento para o mesmo.



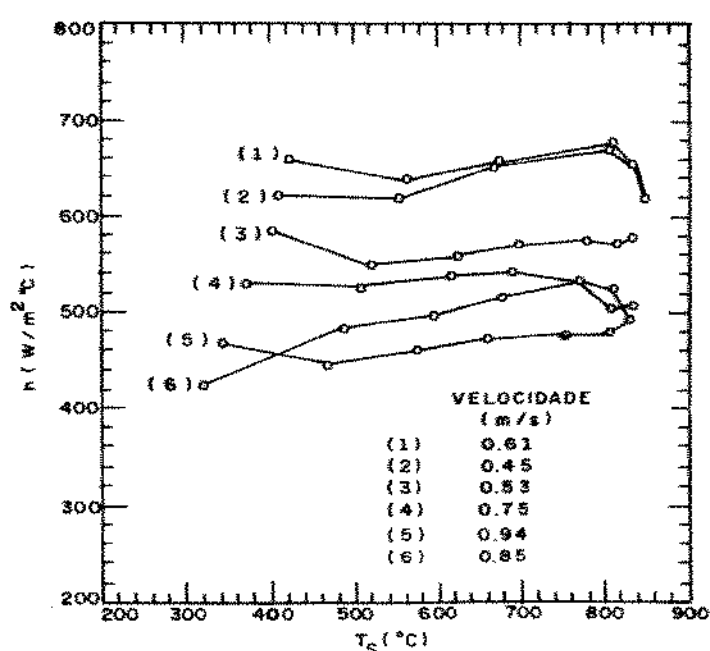
(a) ESFERA PEQUENA - AREIA GROSSA



(b) ESFERA GRANDE - AREIA GROSSA



(c) ESFERA PEQUENA - AREIA FINA



(d) ESFERA GRANDE - AREIA FINA

FIG. ( 4.8 ) EFEITO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE NO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR



#### 4.8 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM O TEMPO

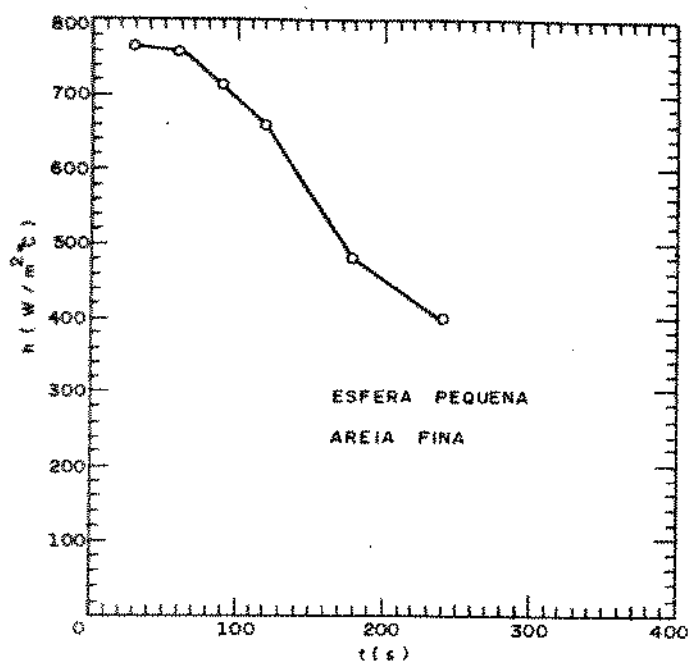
Um parâmetro importante na medida do coeficiente de transferência de calor é o tempo, parâmetro ao qual os trabalhos anteriores não fazem nenhuma referência. Como se pode observar na Figura 4.9, o valor de  $h$  depende do tempo, embora em algumas situações ele seja praticamente constante. Este fato é tanto mais importante porque os trabalhos anteriores não mencionam a que instante se referem os valores apresentados, dificultando a comparação e a análise dos resultados.

Como já se mencionou anteriormente, o valor de  $h$  obtido é o valor médio desde o instante inicial do processo, quando o corpo é imerso no líquido, até o instante considerado, ou seja, é aproximadamente a média dos valores do coeficiente de transferência de calor instantâneo do início do processo e no instante considerado.

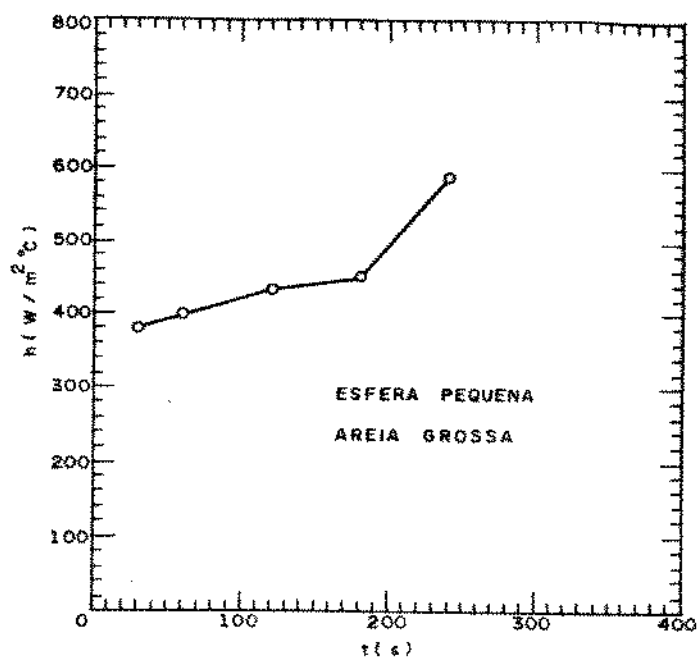
A partir daí, procurou-se estimar o valor do coeficiente de transferência de calor instantâneo, admitindo que para tempos próximos de zero o coeficiente de transferência de calor médio e instantâneo seriam iguais.

Ao levantar o coeficiente de transferência de calor médio para valores de tempo próximos a zero, observou-se, no entanto, uma tendência de crescimento assintótico, como pode ser visto na Figura 4.10, impossibilitando o cálculo dos valores instantâneos pela rota proposta. Note-se ainda que, para a esfera maior, não foi possível obter valores menores do que  $t = 15s$ , havendo problema de divergência na aplicação do programa de cálculo empregado para a determinação de  $h$ .

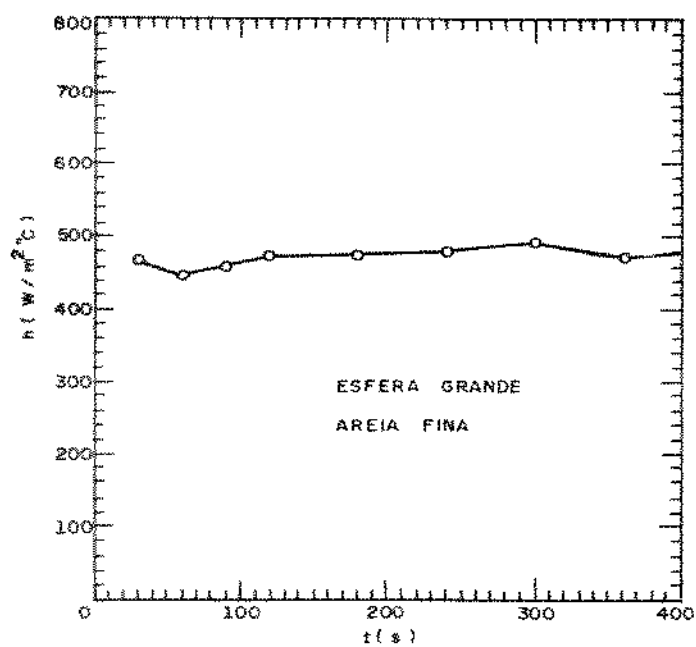
A análise de incerteza dos resultados experimentais é apresentada no Anexo 2.



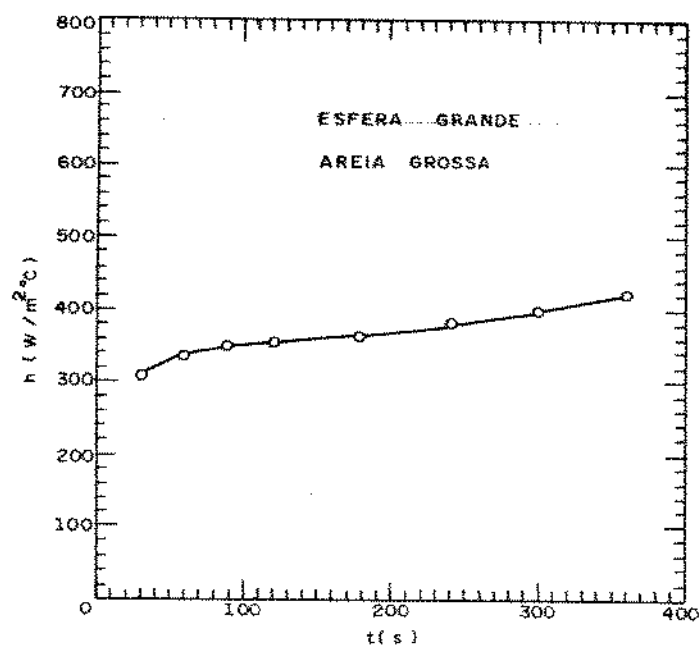
(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. ( 4.9 ) VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM O TEMPO

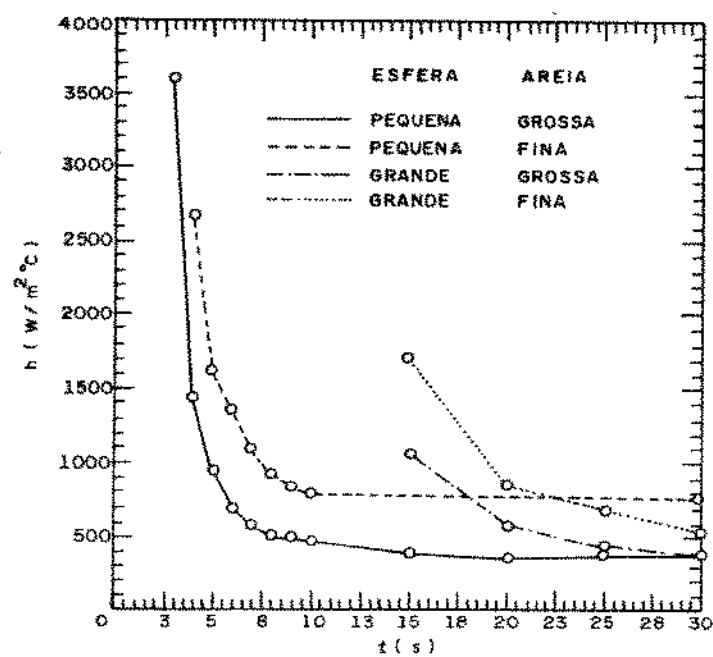


FIG. ( 4.10 ) VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR  
COM O TEMPO NO INÍCIO DO PROCESSO

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Embora o processo de tratamento térmico de corpos metálicos em leito fluidizado borbulhante já esteja sendo implantado em alguns países, incluindo o Brasil, é necessário pesquisar a influência dos vários parâmetros no aquecimento destes corpos.

Neste trabalho estudou-se o coeficiente de transferência de calor de um corpo metálico imerso num leito fluidizado.

As principais conclusões obtidas são as seguintes:

- Partículas menores favorecem a transferência de calor entre o corpo metálico e leito, mesmo que a velocidade de fluidização do gás seja menor do que a empregada para particulado de maior diâmetro.

- O coeficiente de transferência de calor depende da velocidade do gás no leito, existindo uma faixa onde ela favorece a transferência de calor, como se observou na Figura 4.2.

- Não houve efeito significativo do formato dos corpos metálicos no coeficiente de transferência de calor, confirmando -se apenas o efeito de tamanho dos mesmos.

- Pela primeira vez se apresentou a variação do coeficiente de transferência de calor com o tempo de imersão do corpo metálico, podendo-se observar que é importante mencionar o instante em que o coeficiente de transferência de calor foi calculado, já que  $h$  varia com o tempo.

Embora os resultados apresentados neste trabalho tenham estado em concordância com o de outros autores na maior parte dos casos, há alguns tópicos que merecem um estudo mais detalhado:

- A variação do coeficiente de transferência de calor com o tempo, como uma extensão do problema levantado no presente trabalho;

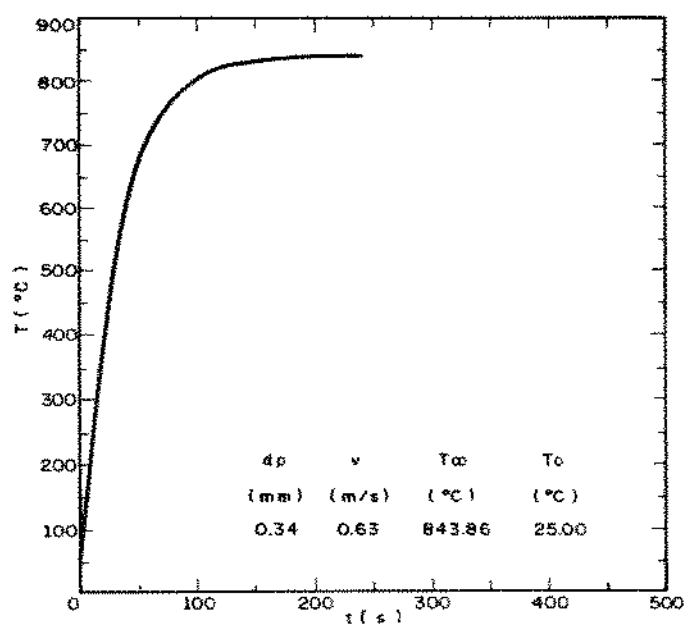
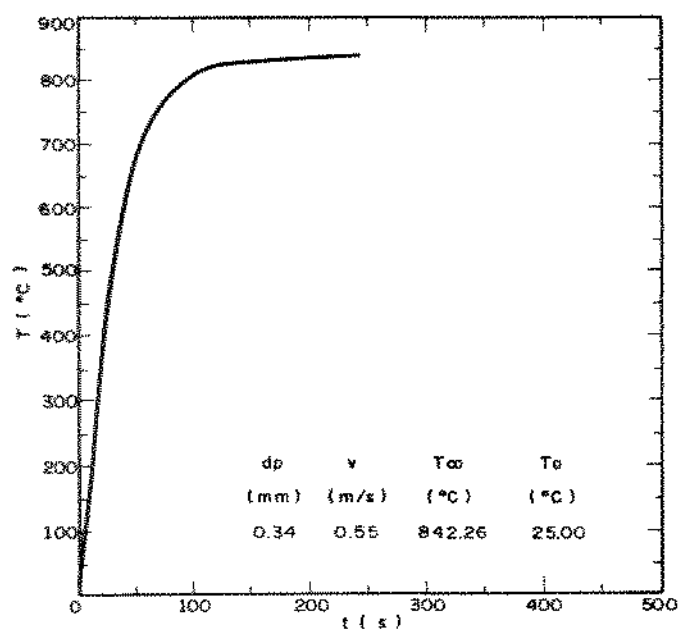
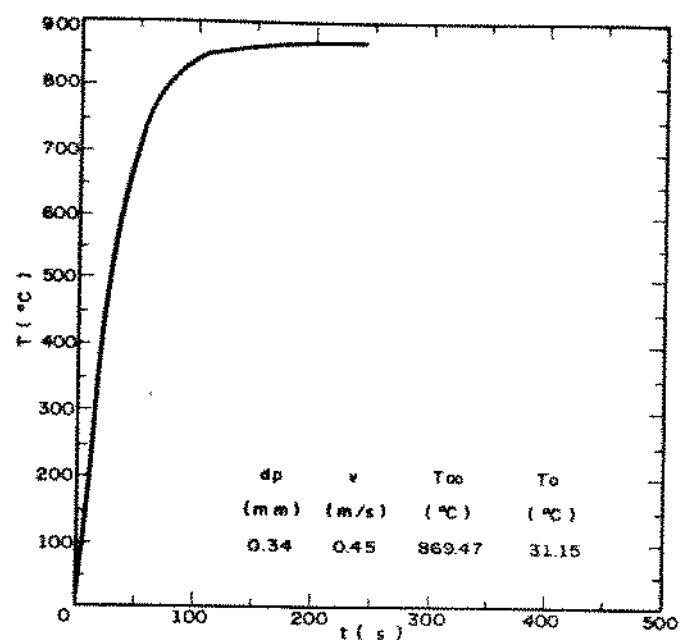
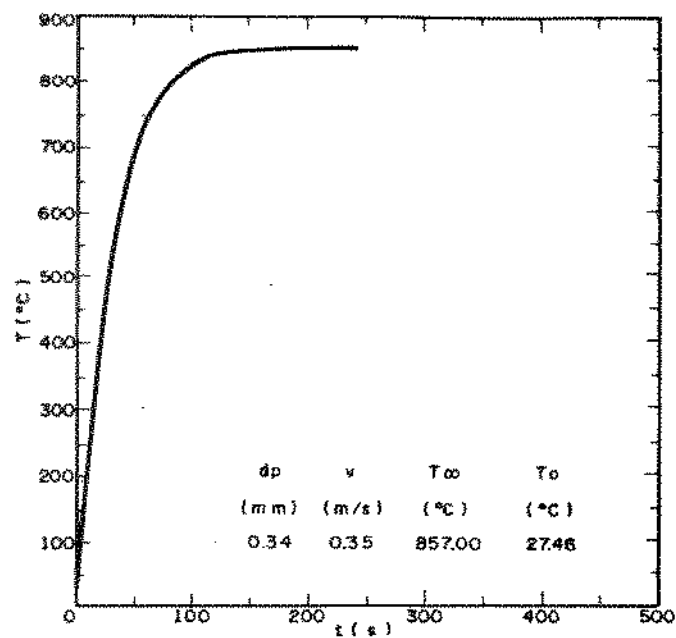
- Influência da altura do leito no coeficiente de transferência de calor;

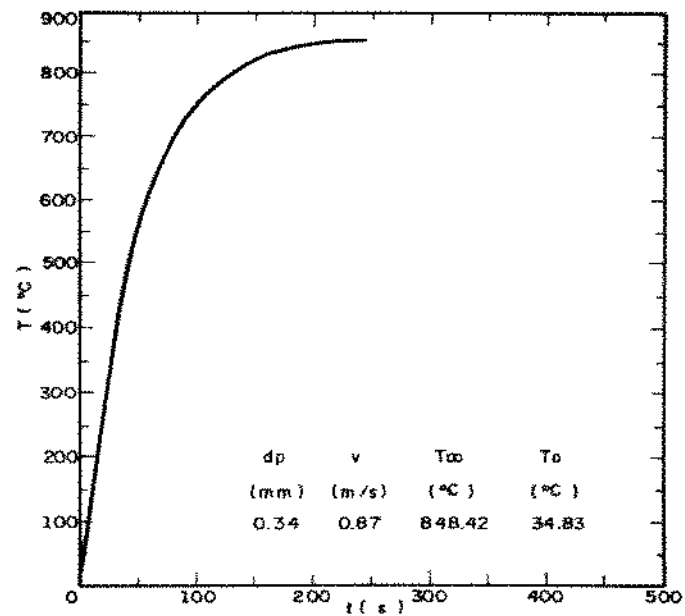
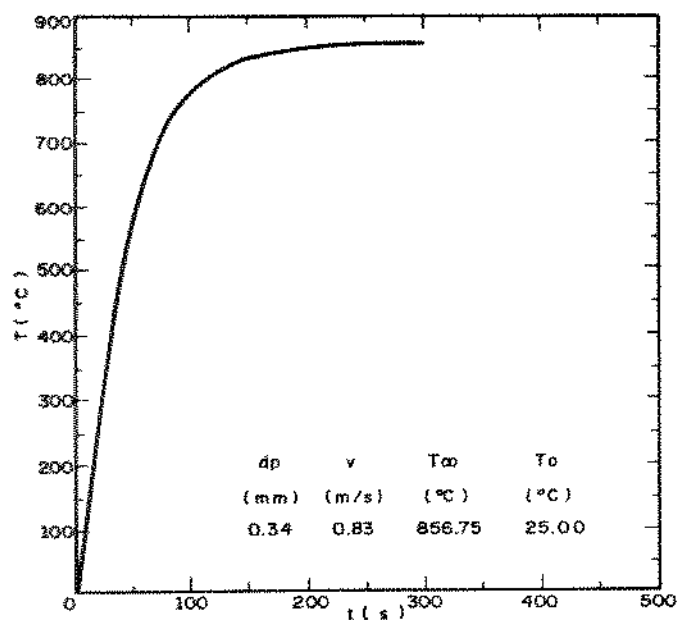
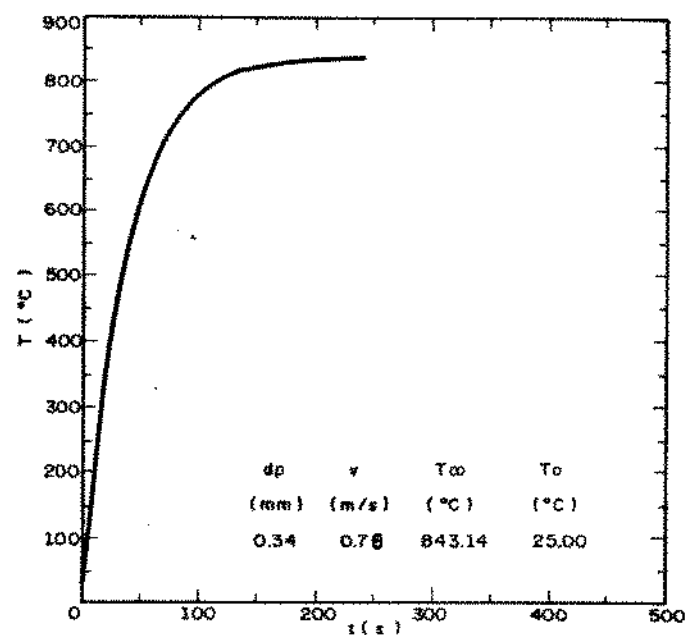
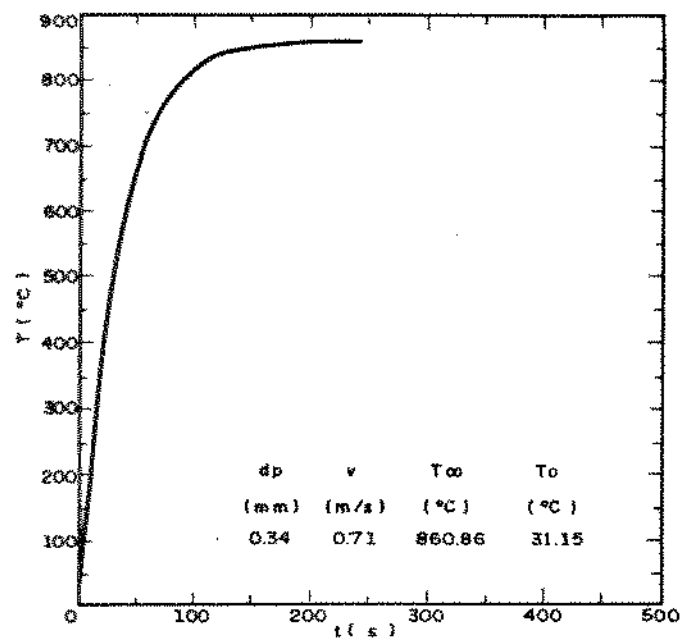
- Influência das capacidades térmicas do corpo metálico e das partículas sólidas, numa faixa maior de valores relativos;

- Influência de partículas com faixas granulométricas não uniformes, no coeficiente de transferência de calor.

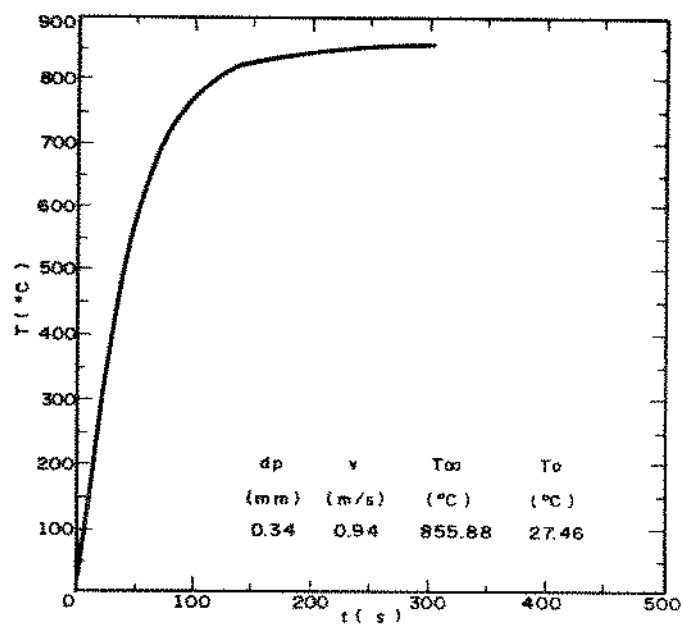
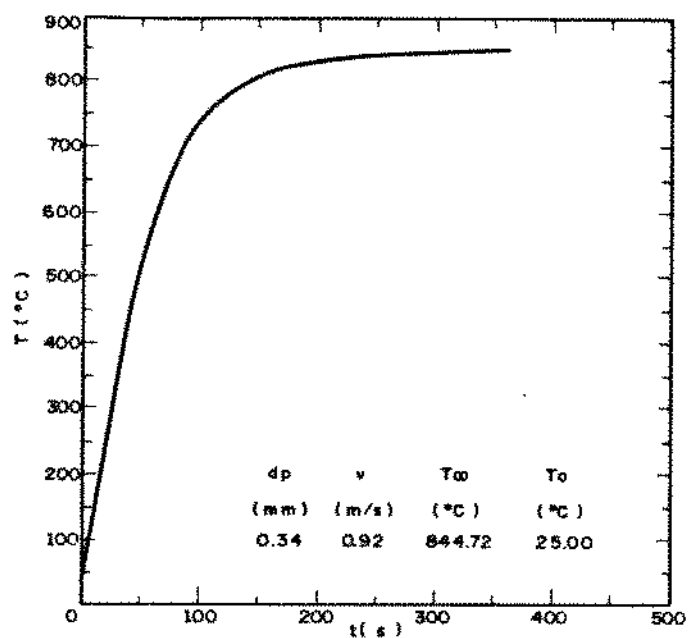
## ANEXO 1

### CURVAS DE AQUECIMENTO DOS CORPOS METÁLICOS

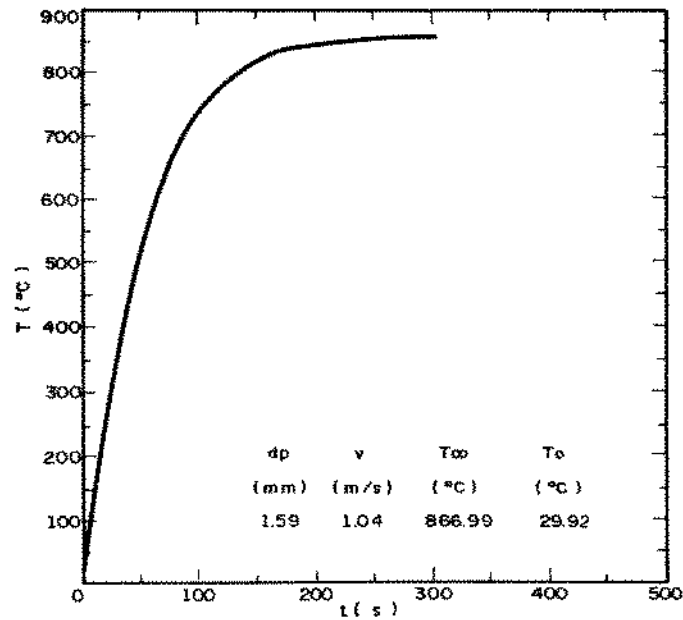
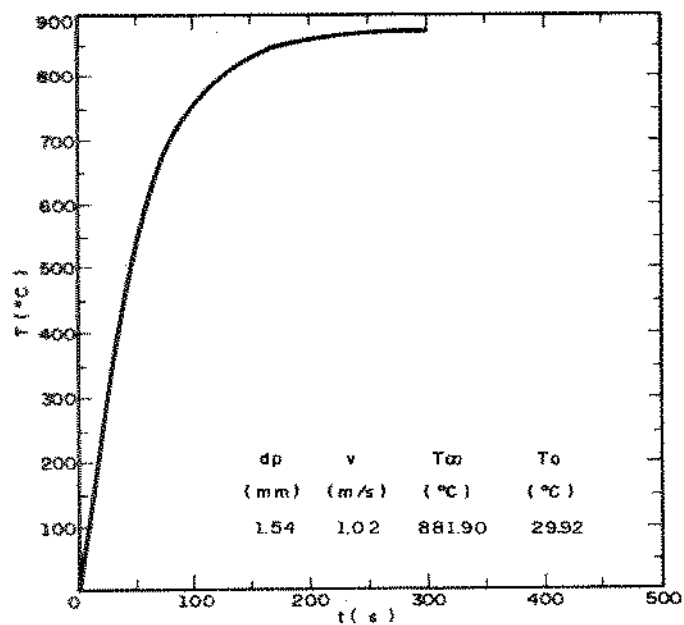
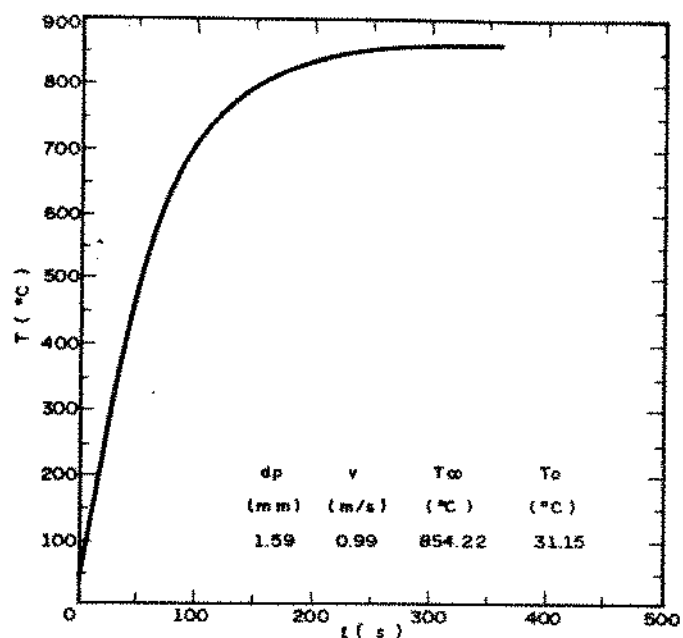
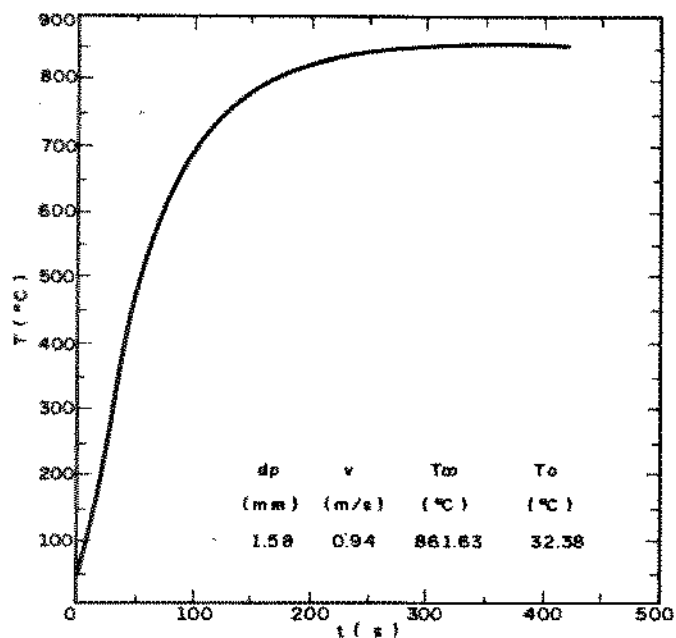
CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 25$  mm

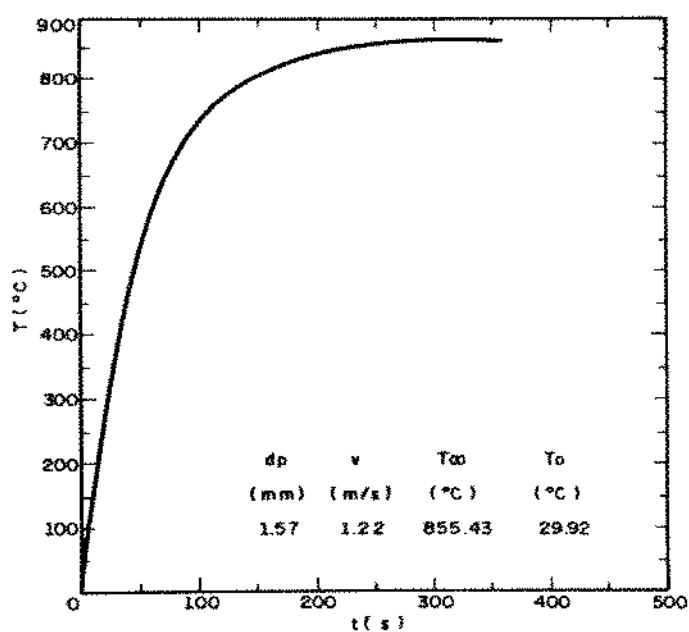
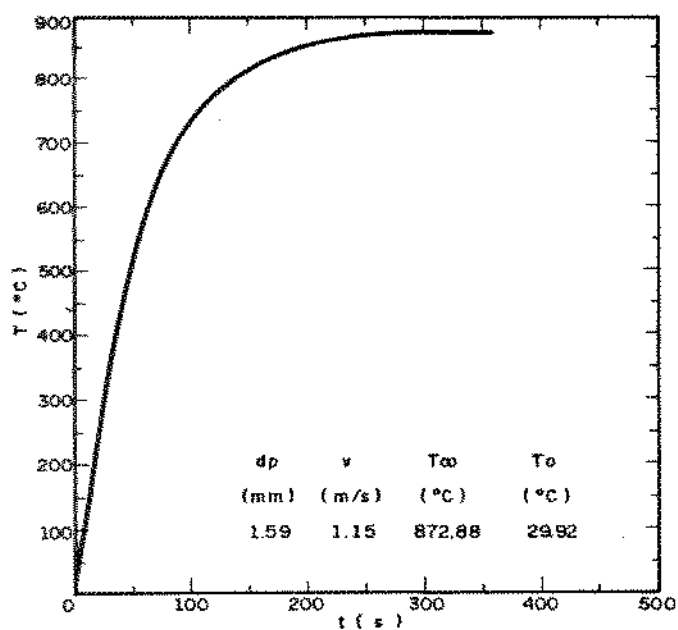
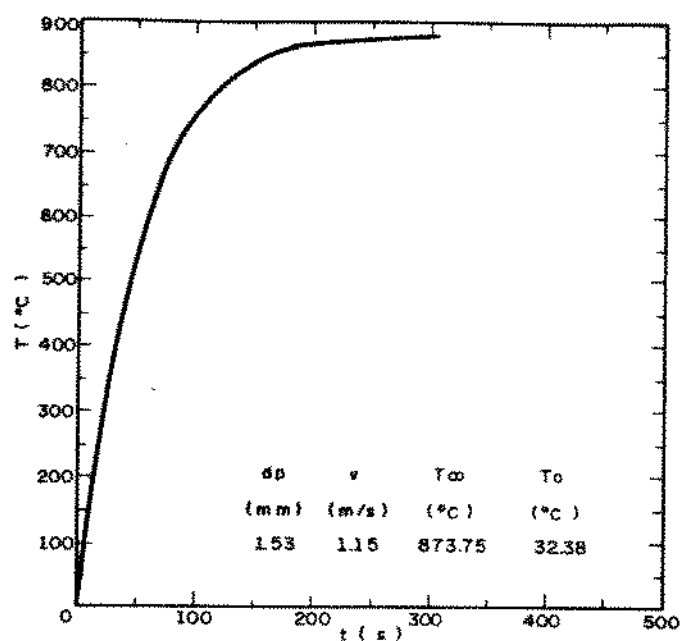
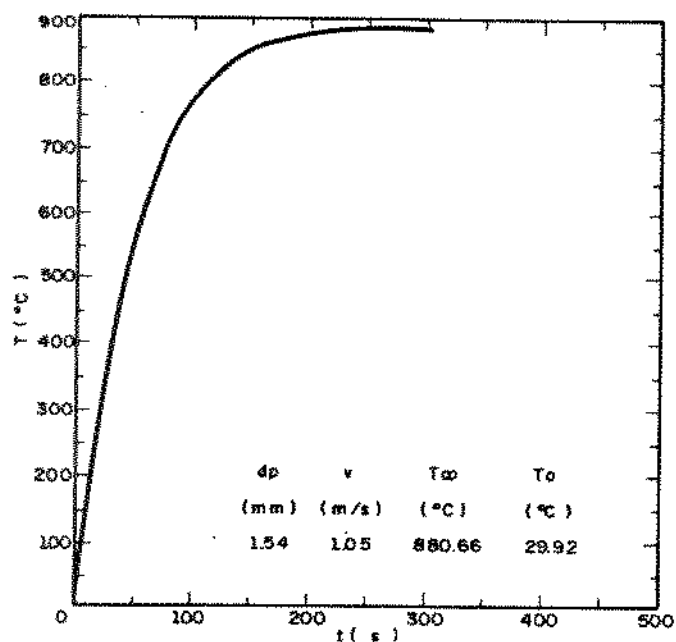
CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 25$  mm

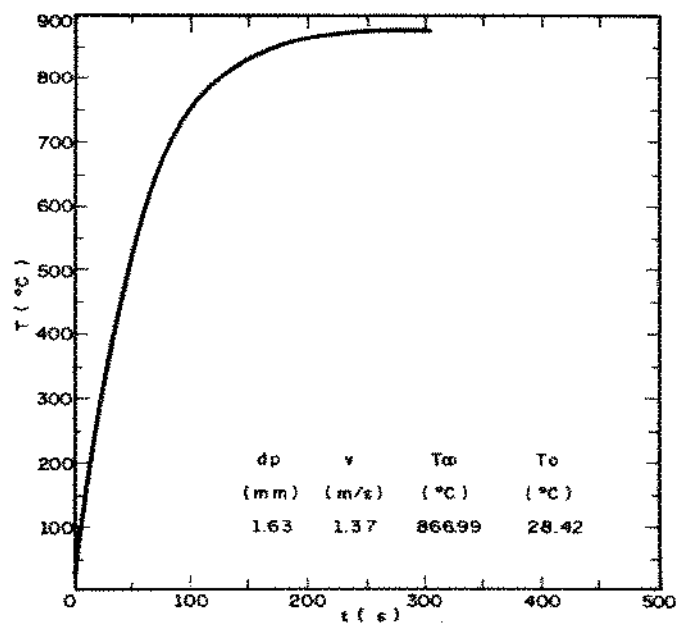
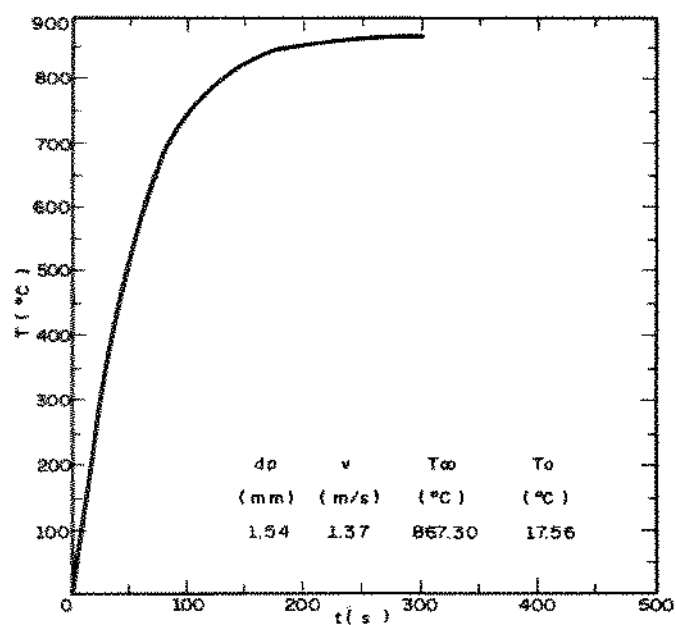
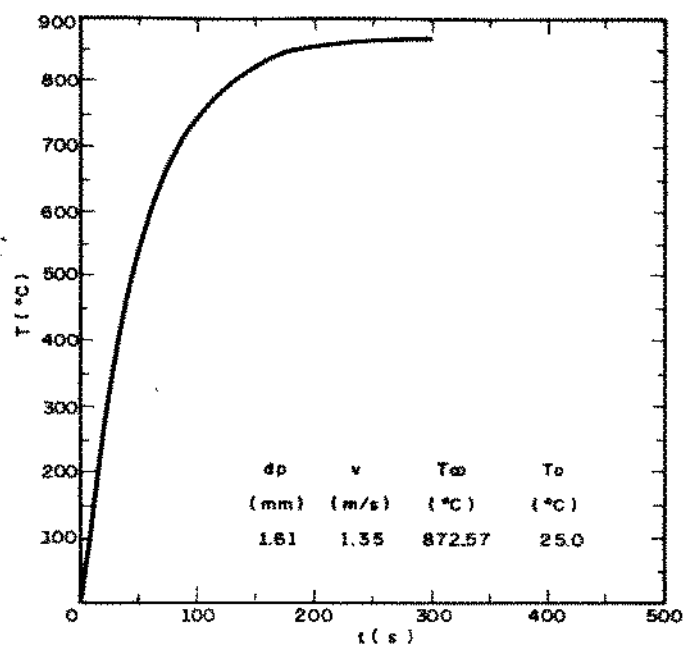
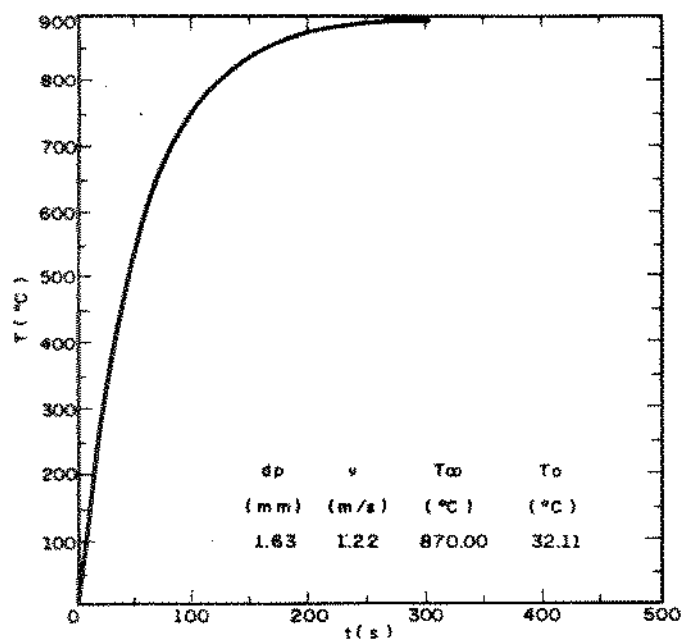


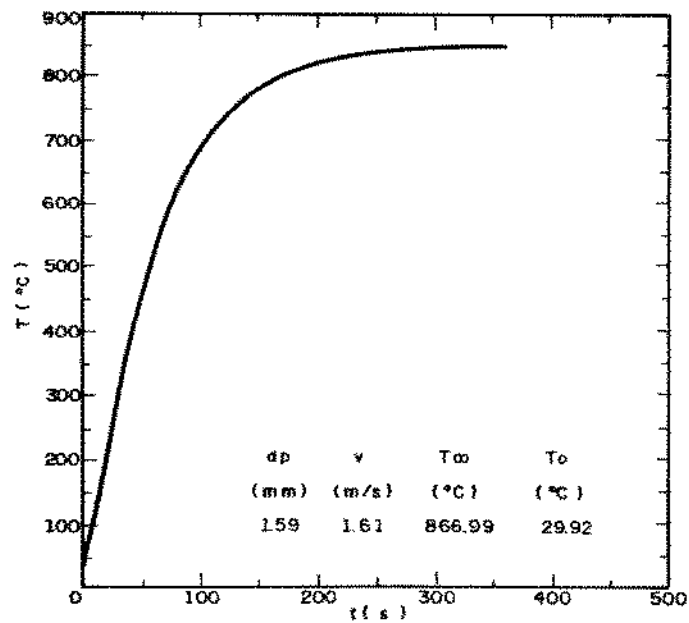
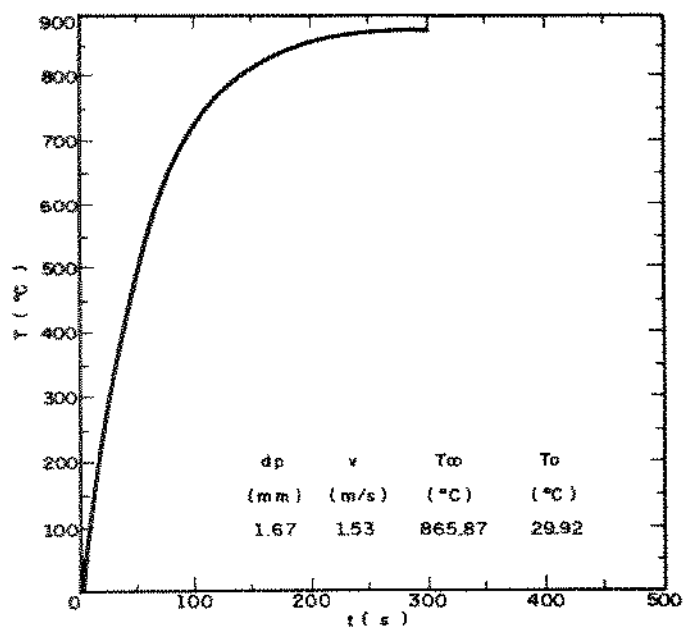
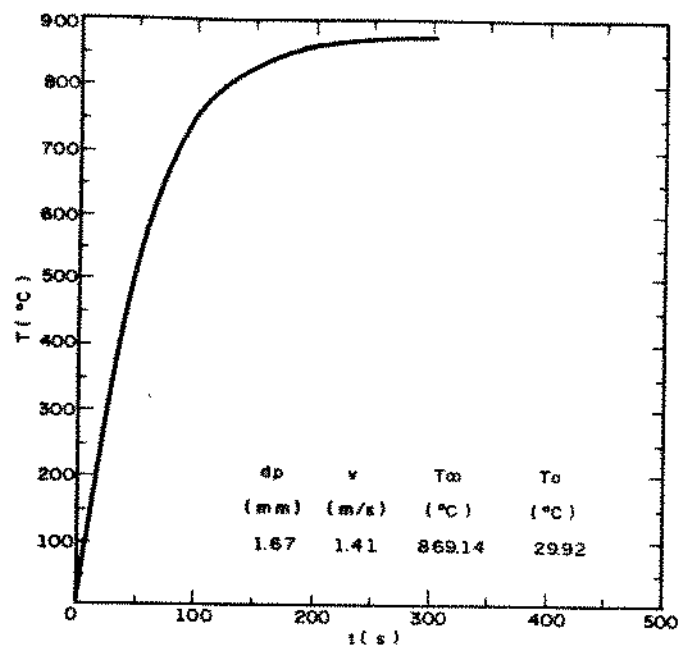
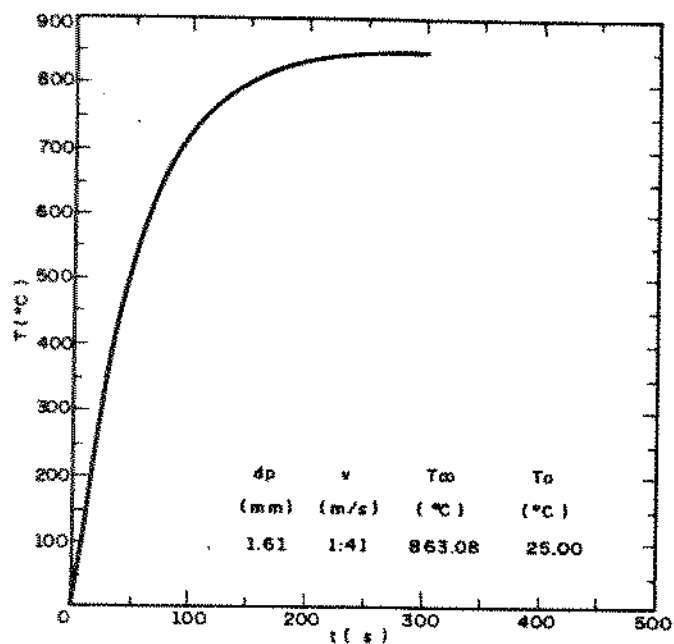


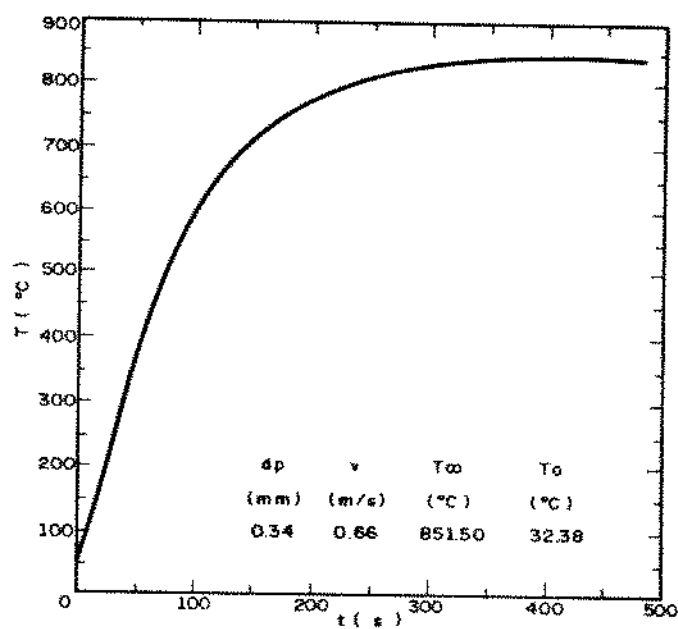
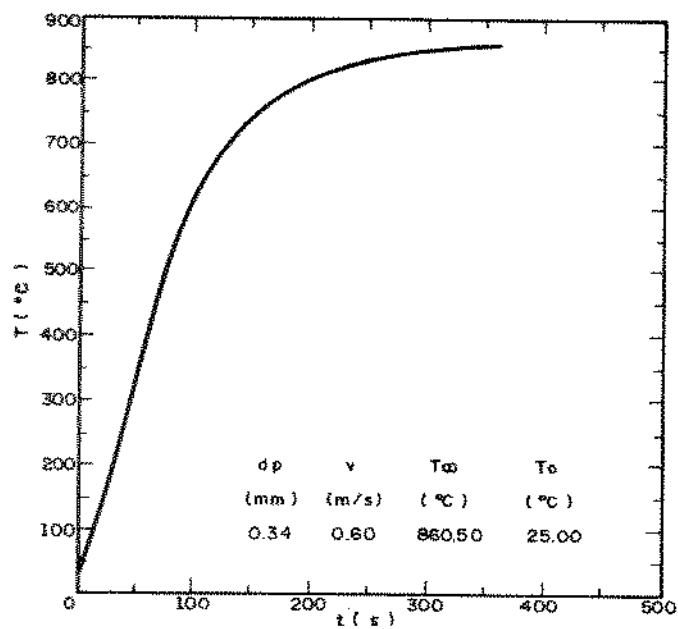
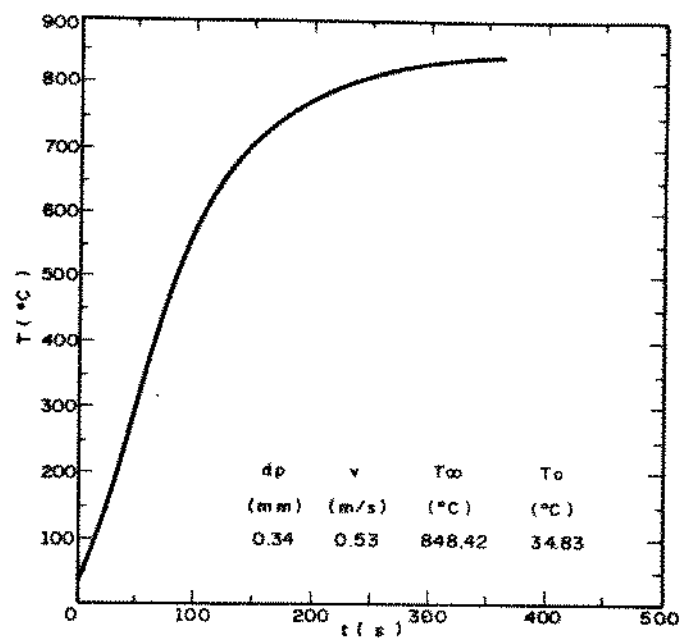
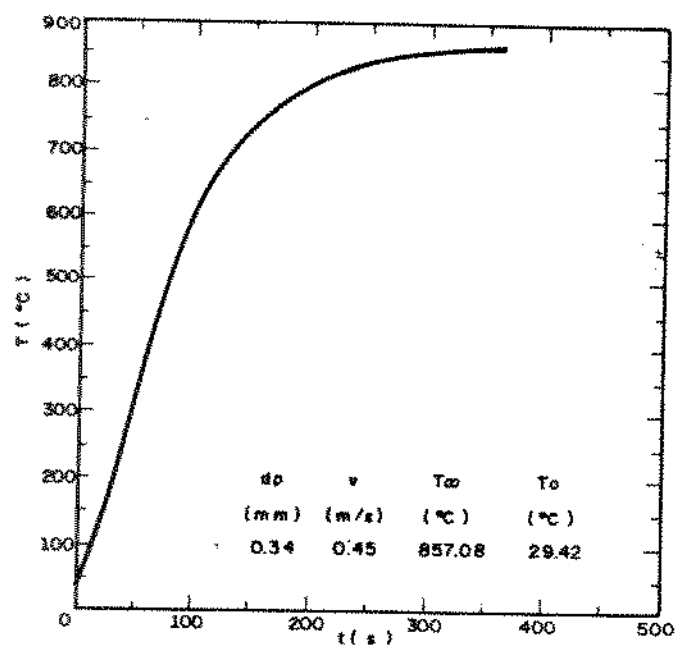
CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 25$  mm

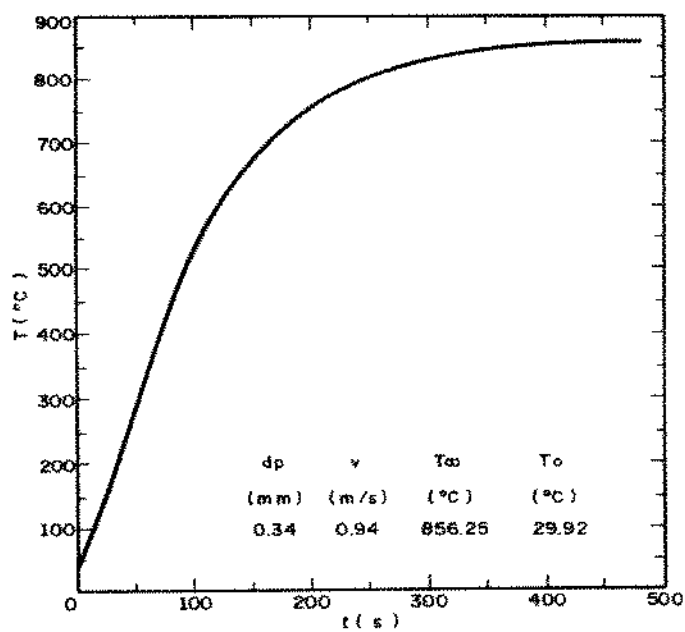
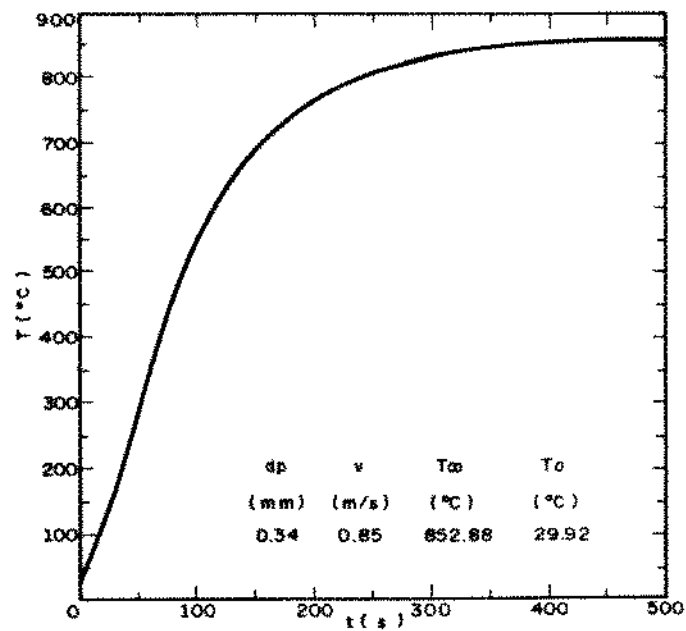
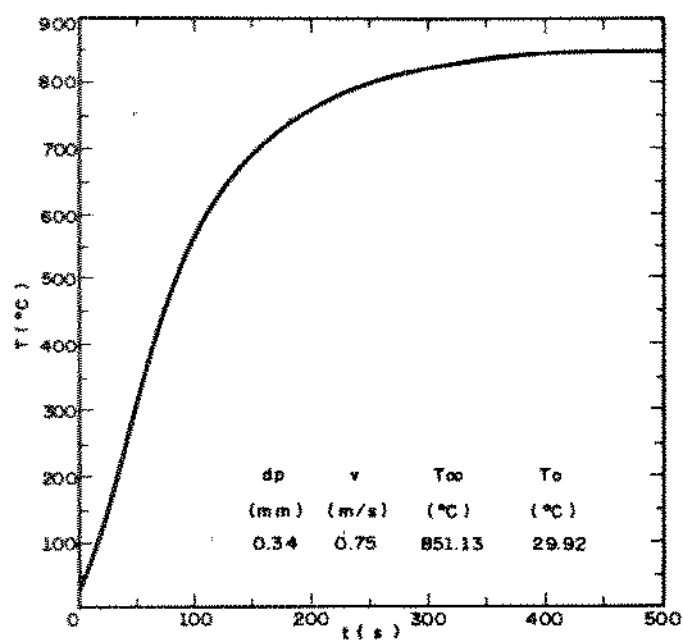
CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 25 \text{ mm}$

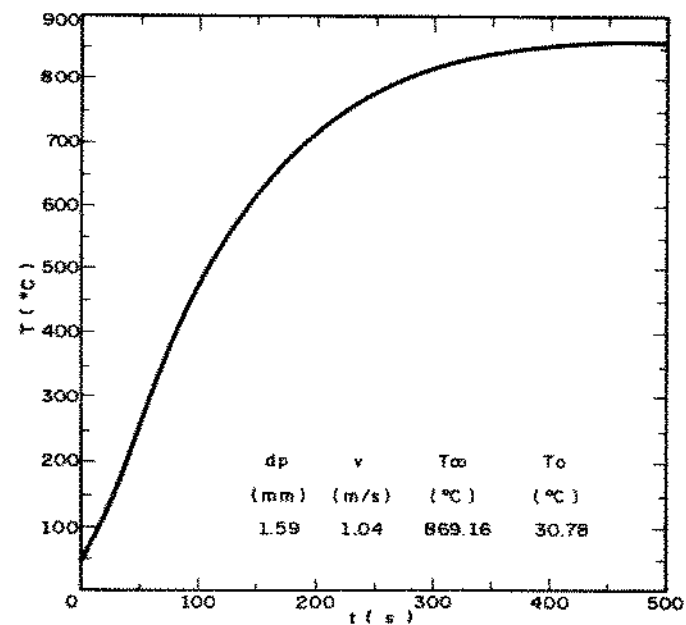
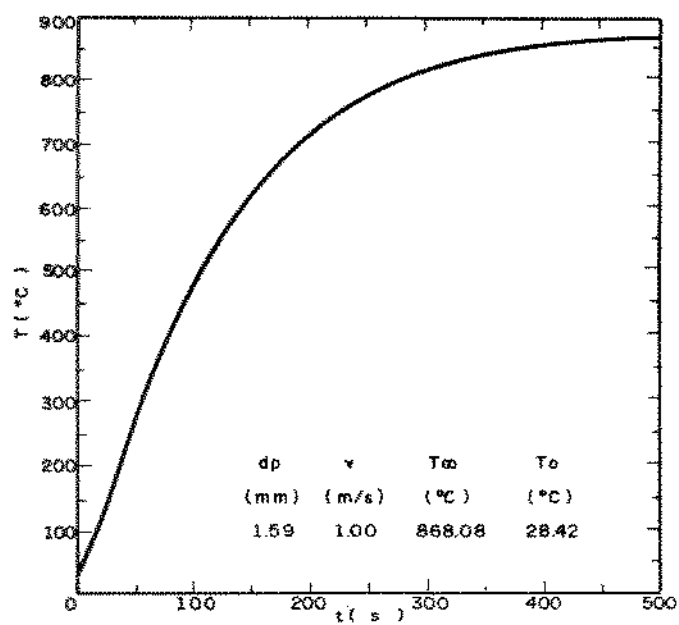
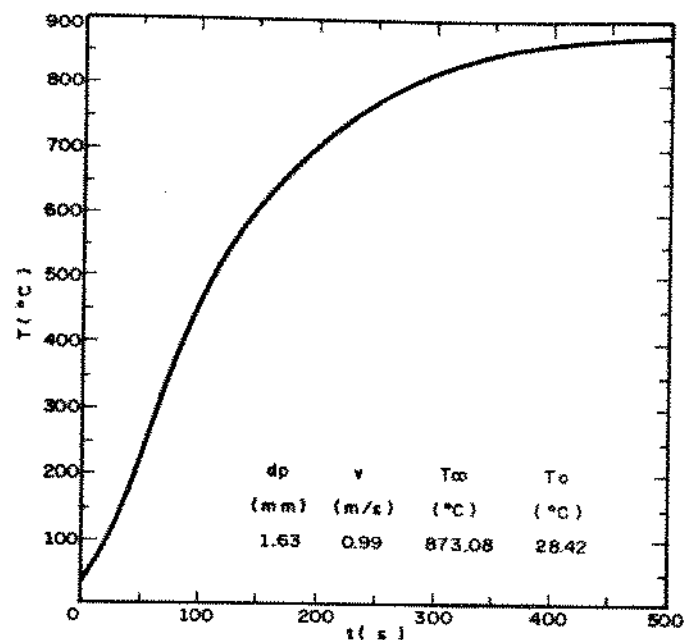
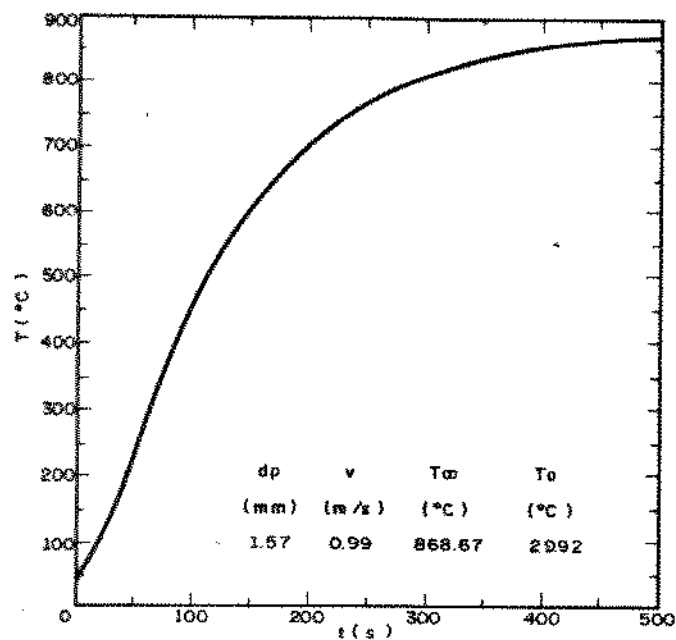
CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 25 \text{ mm}$

CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 25 \text{ mm}$

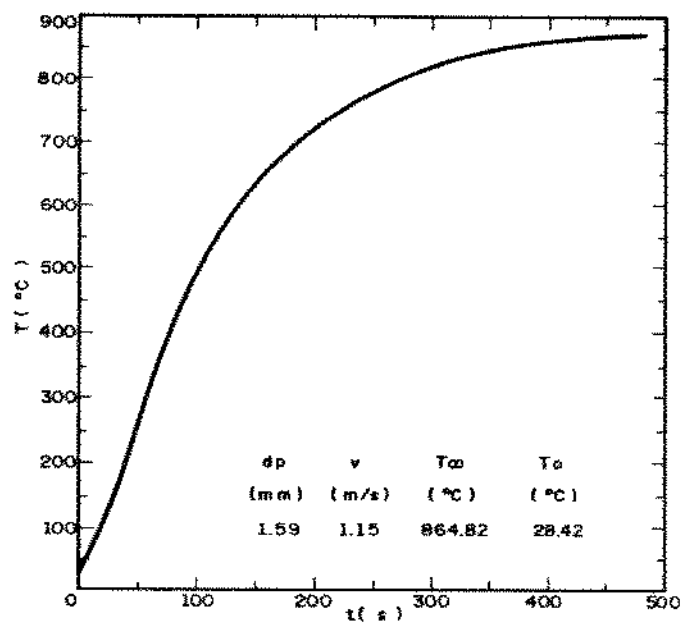
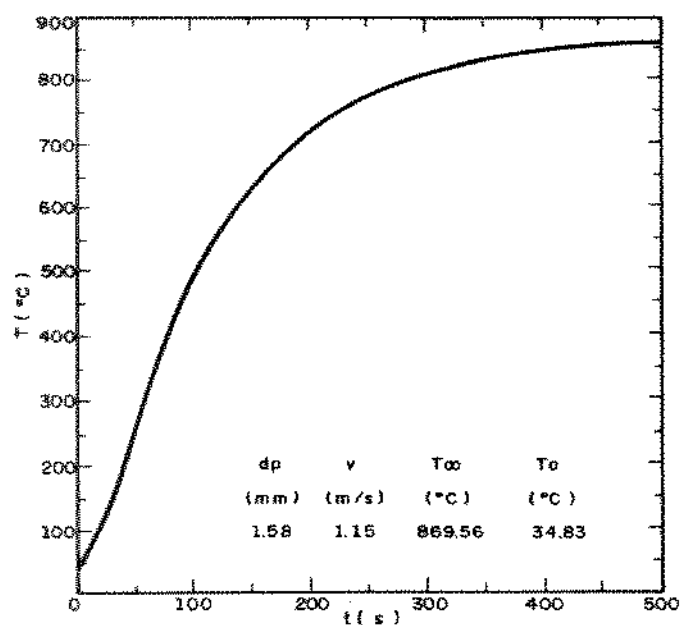
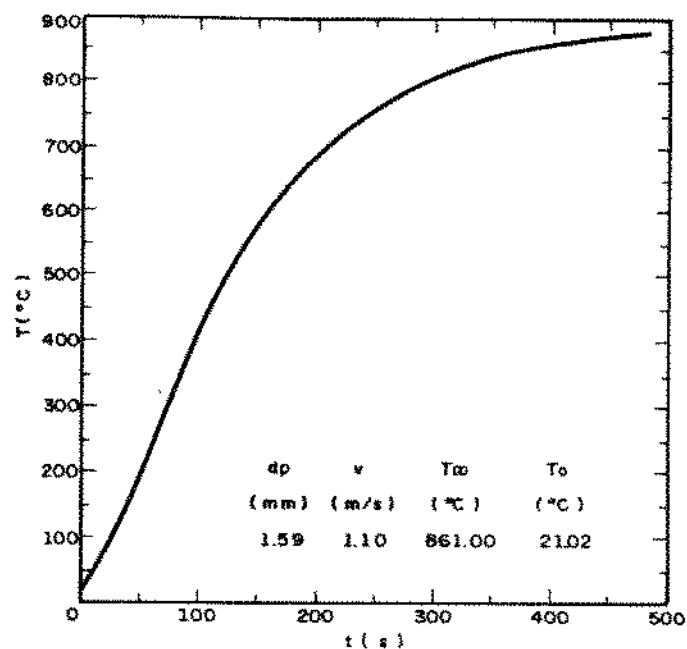
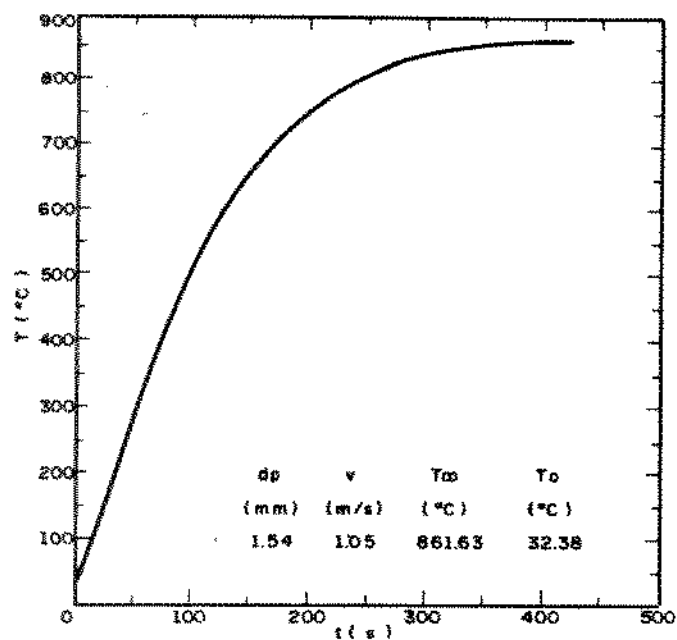
CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 25$  mm

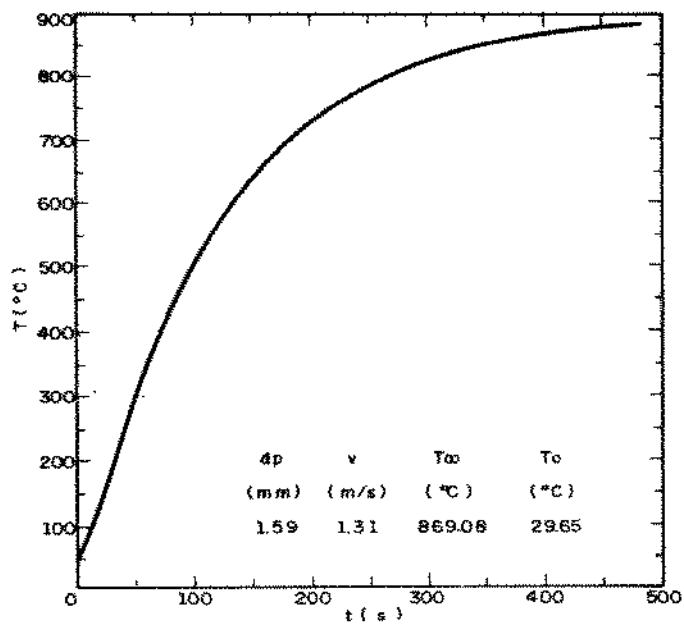
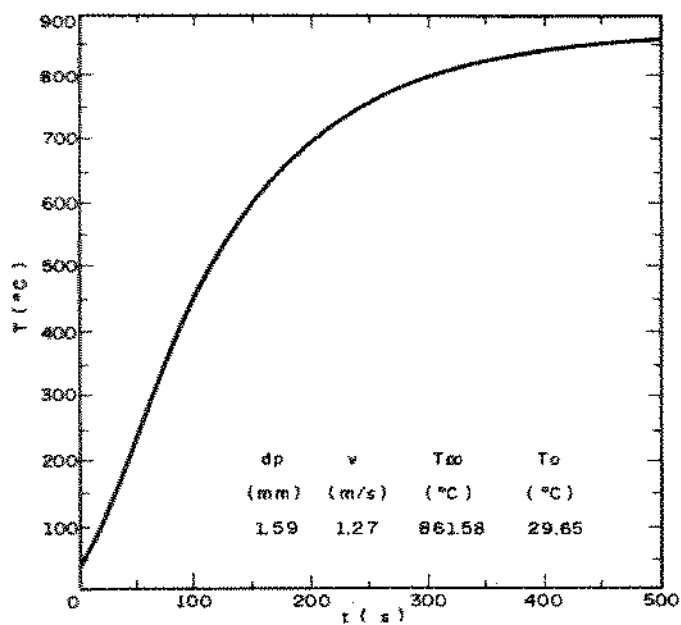
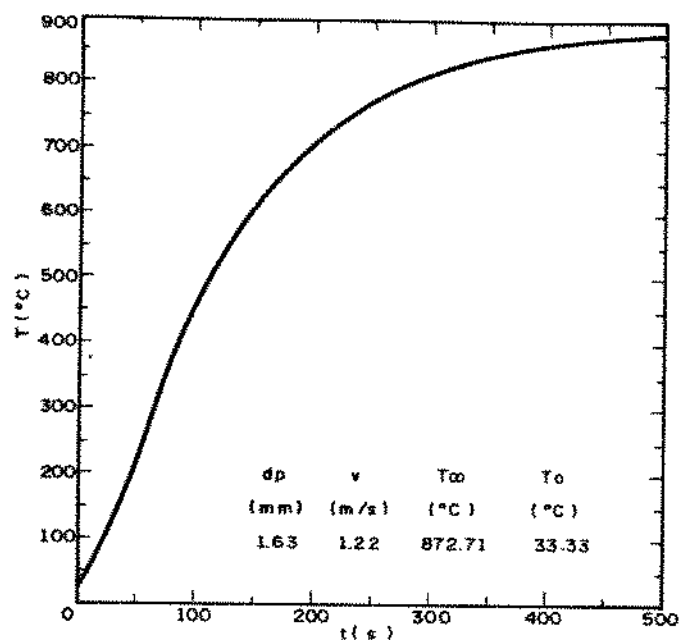
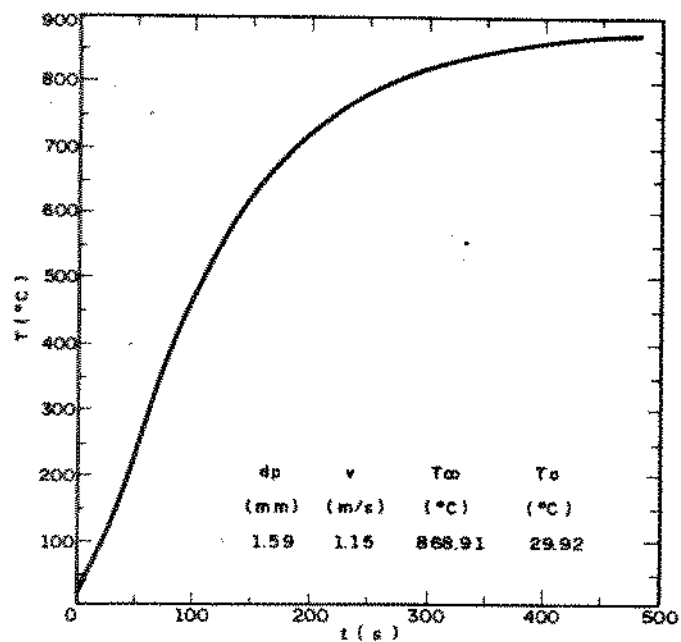
CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 50$  mm

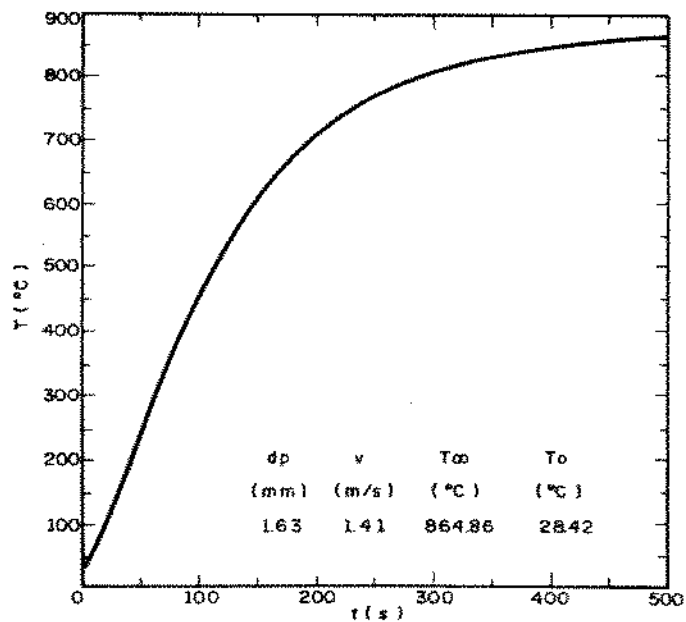
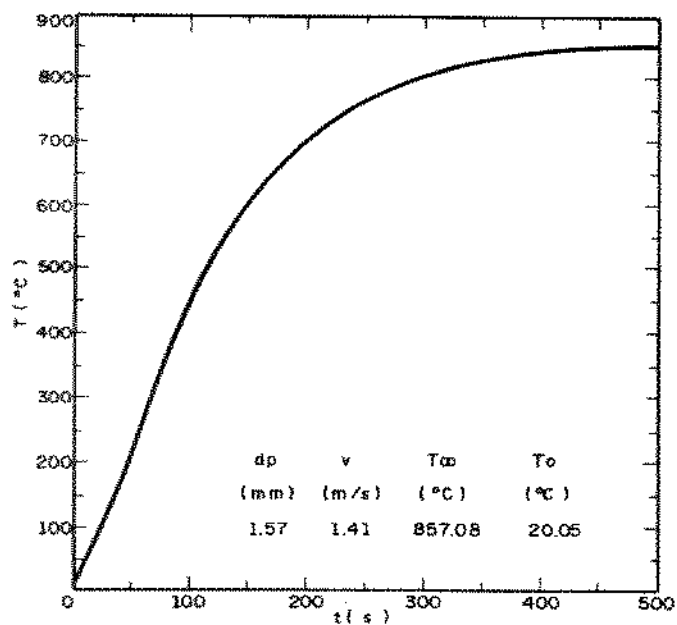
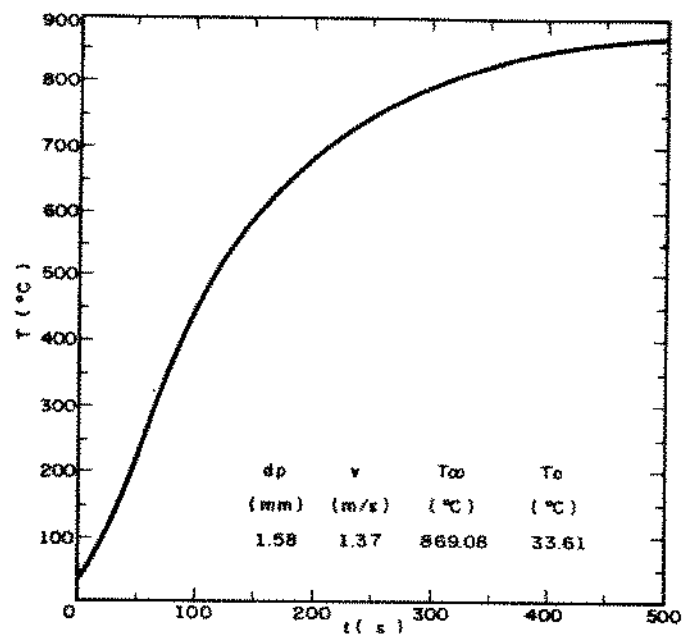
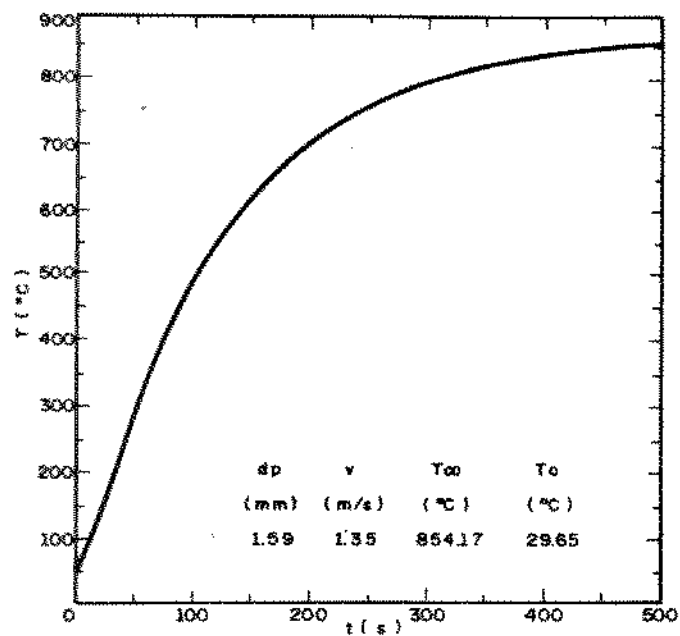
CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 50$  mm

CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 50$  mm

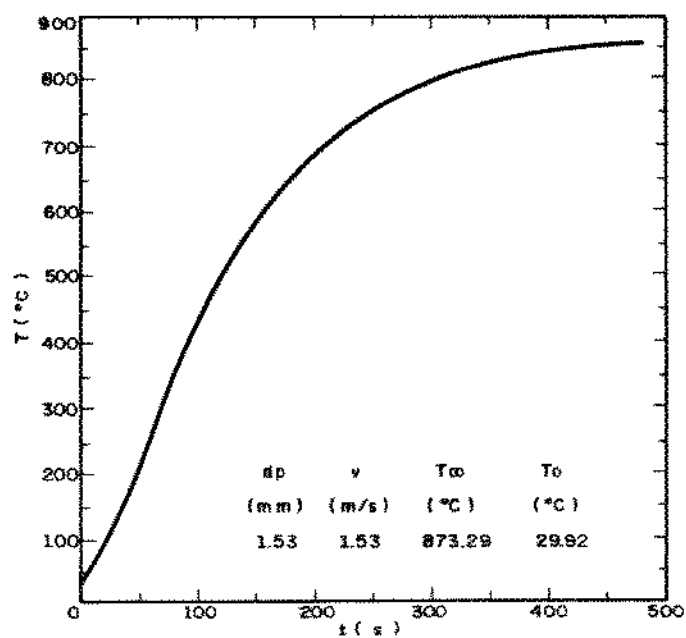


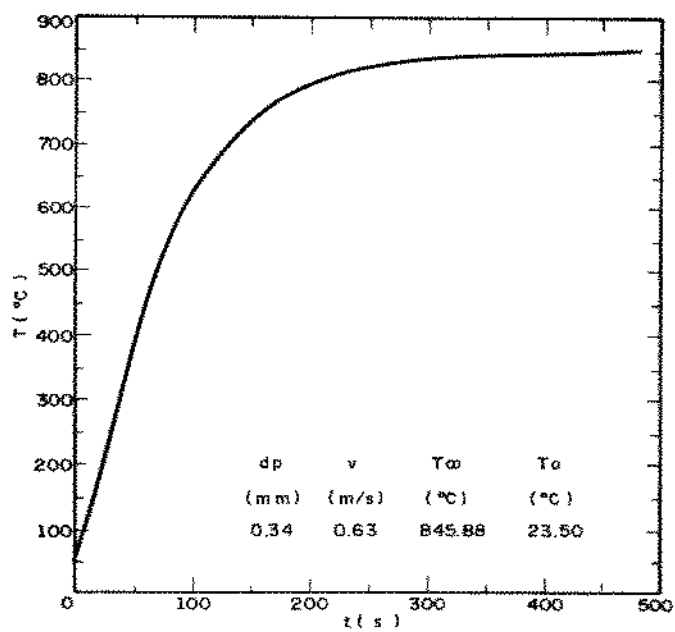
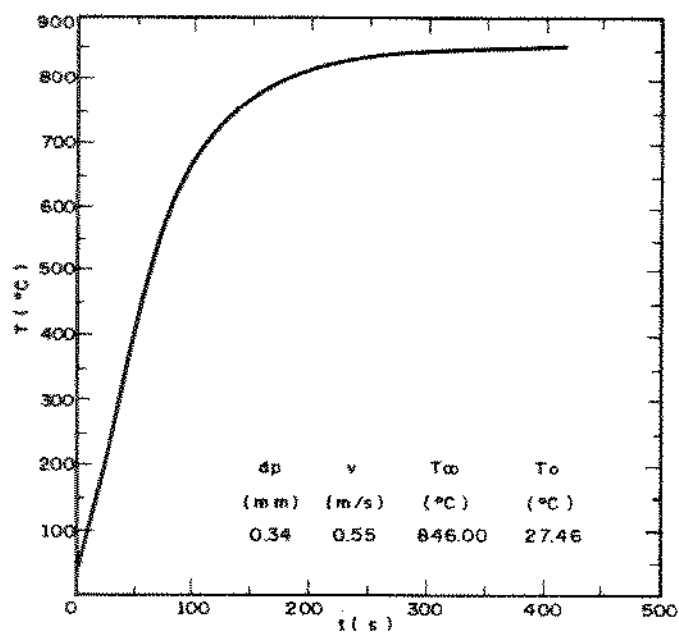
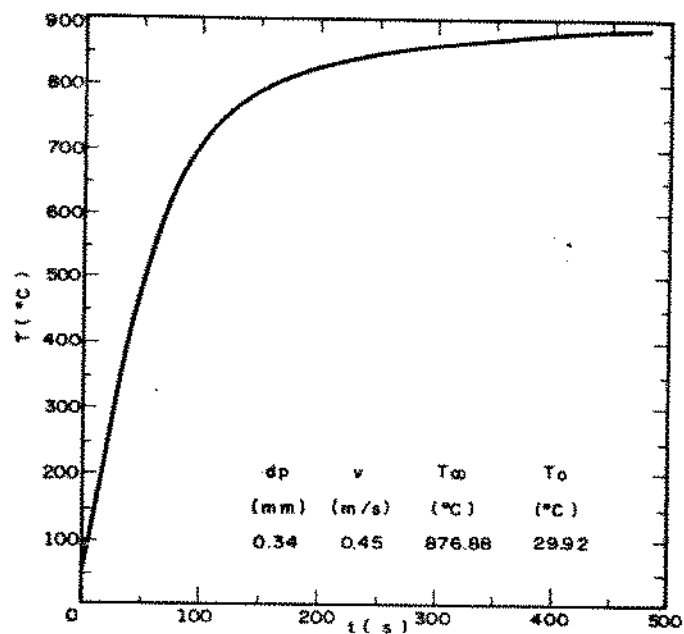
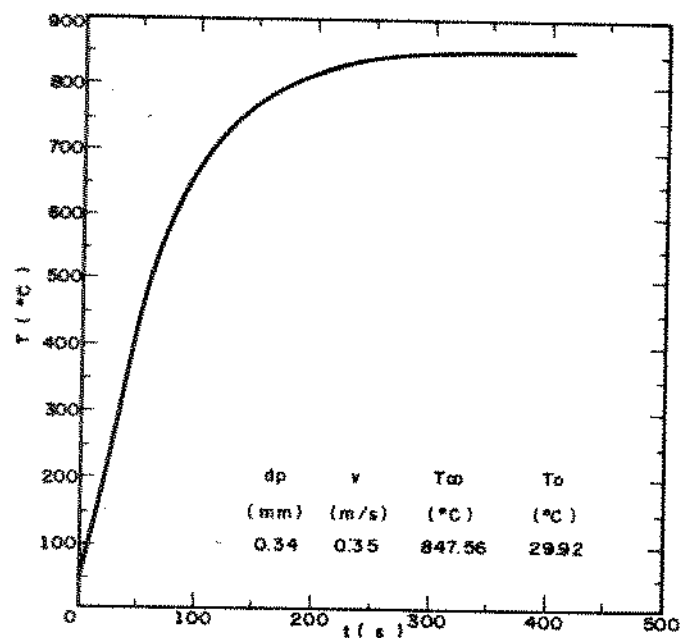
CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 50 \text{ mm}$

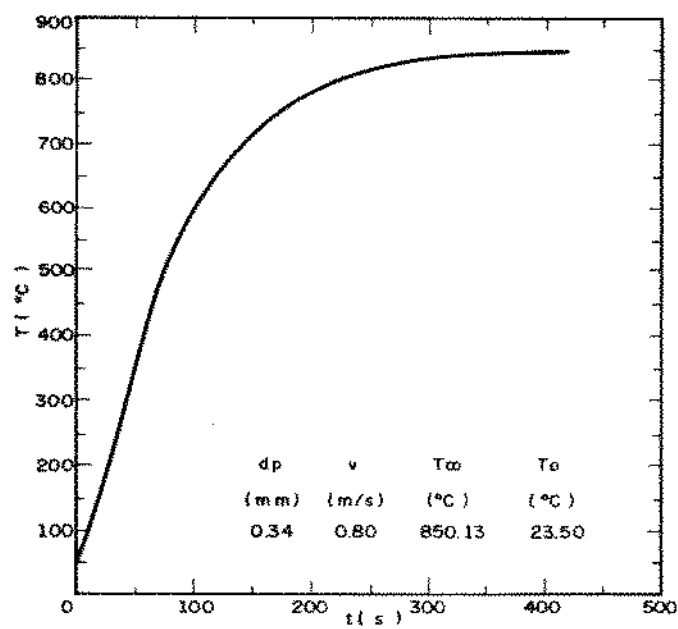
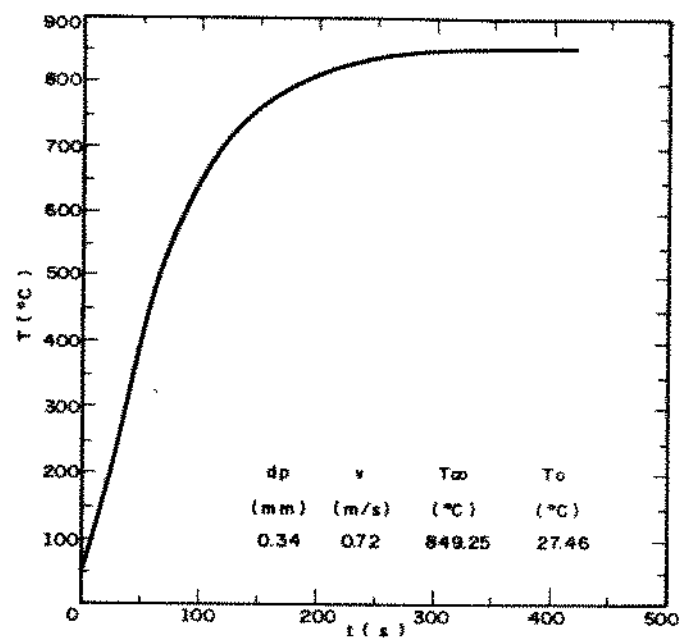
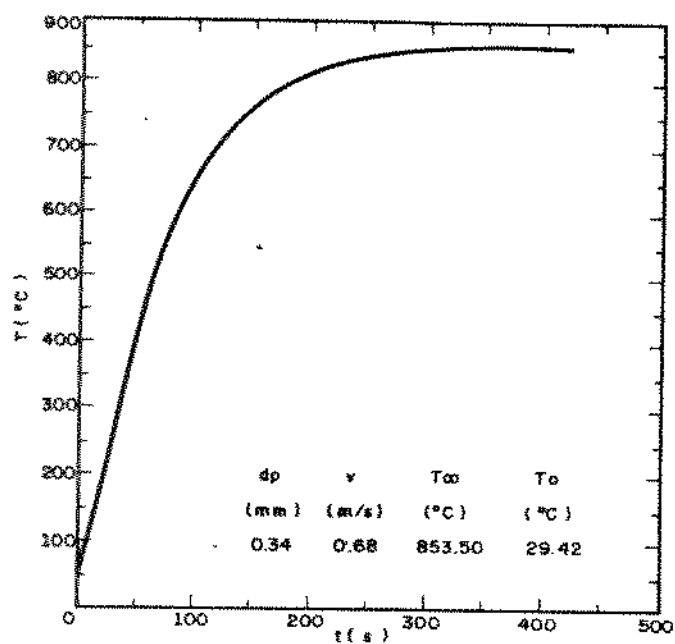
CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 50$  mm

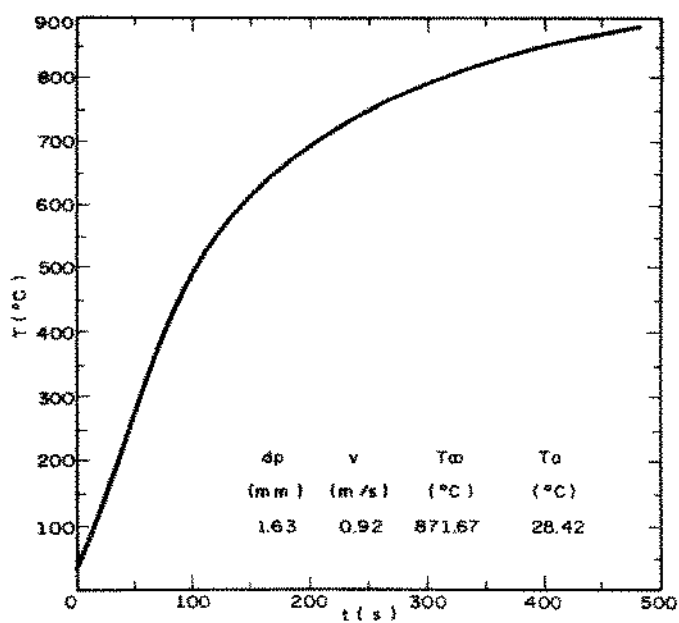
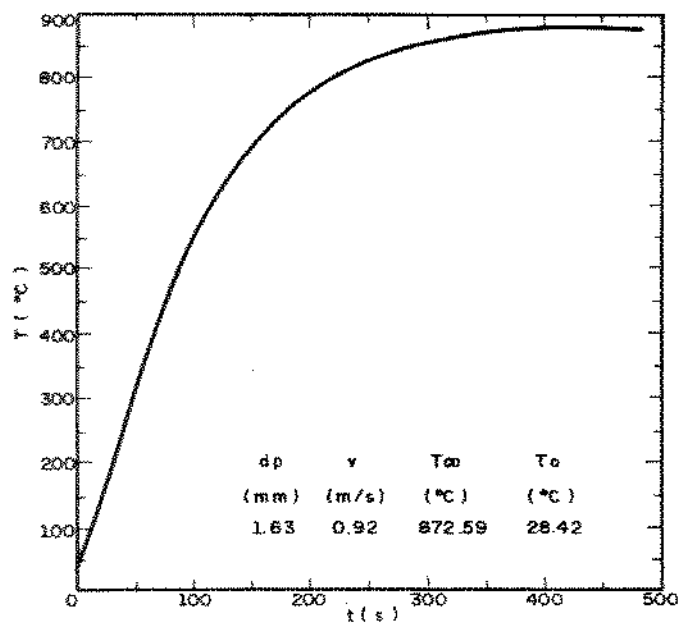
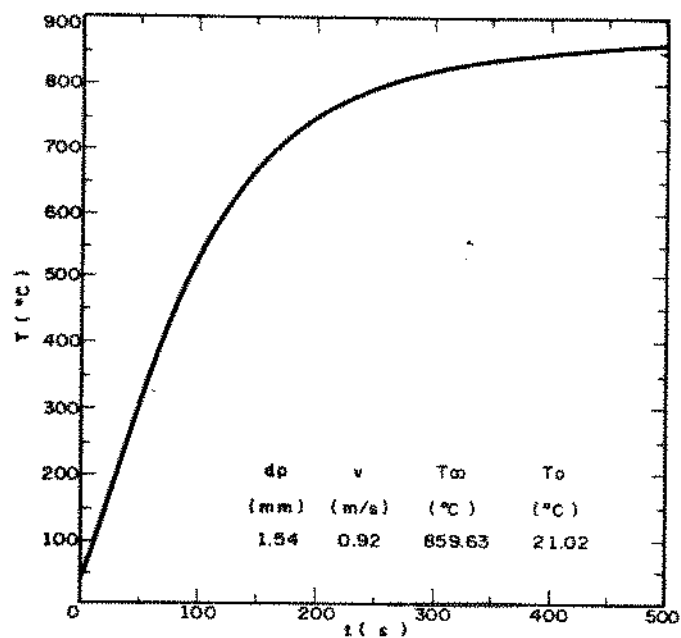
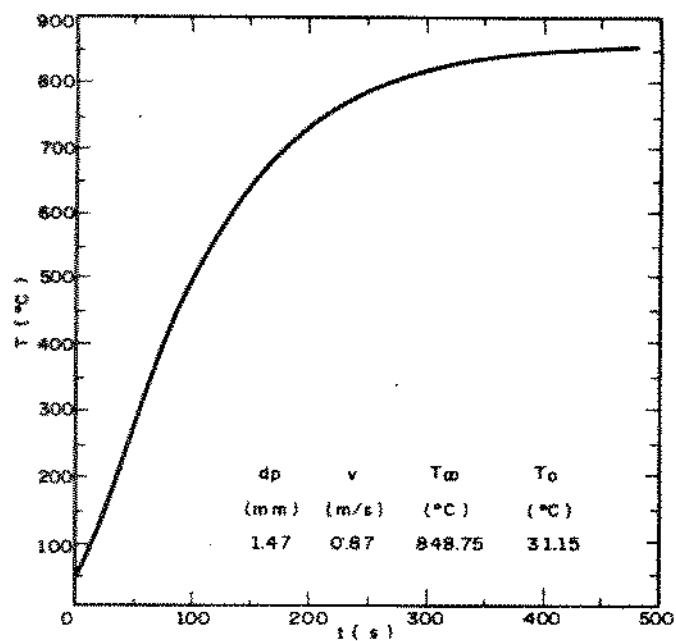


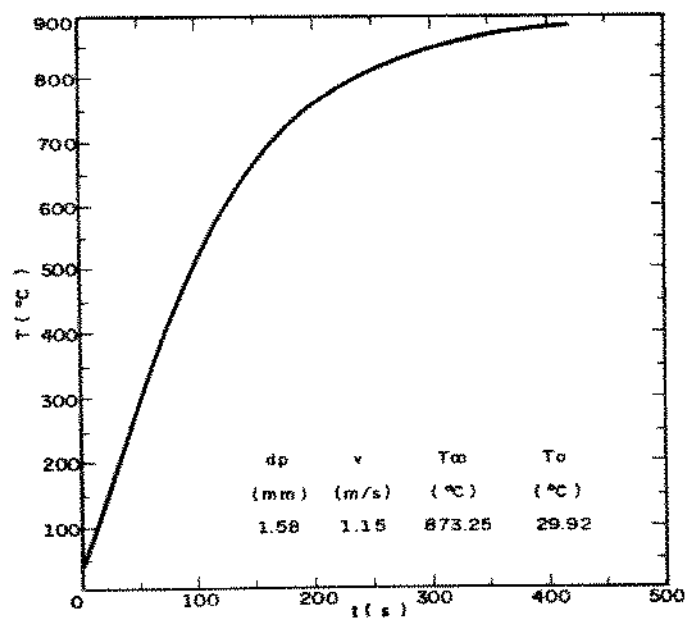
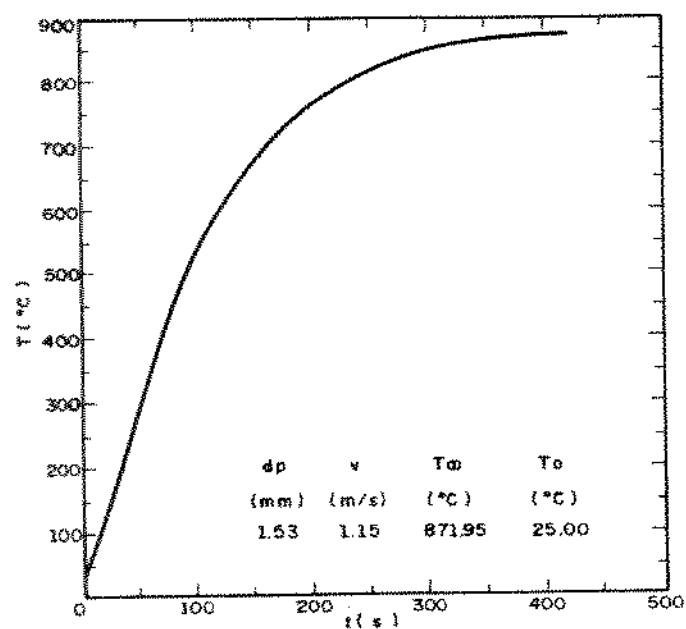
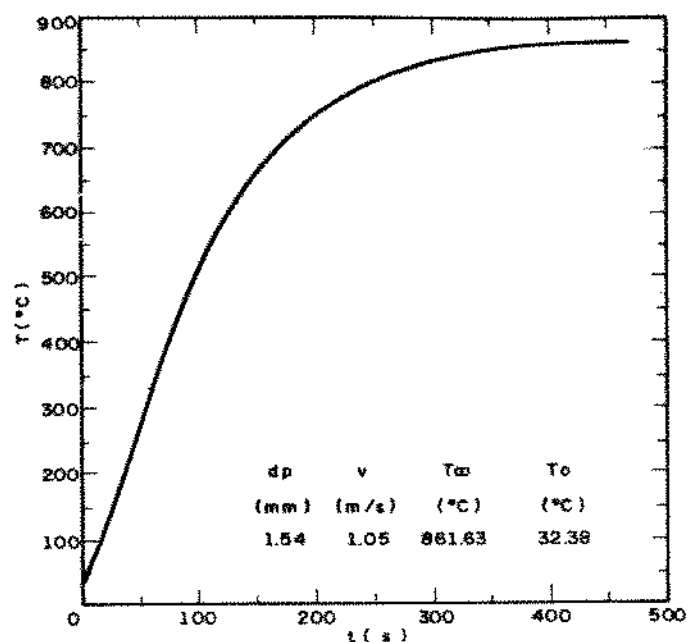
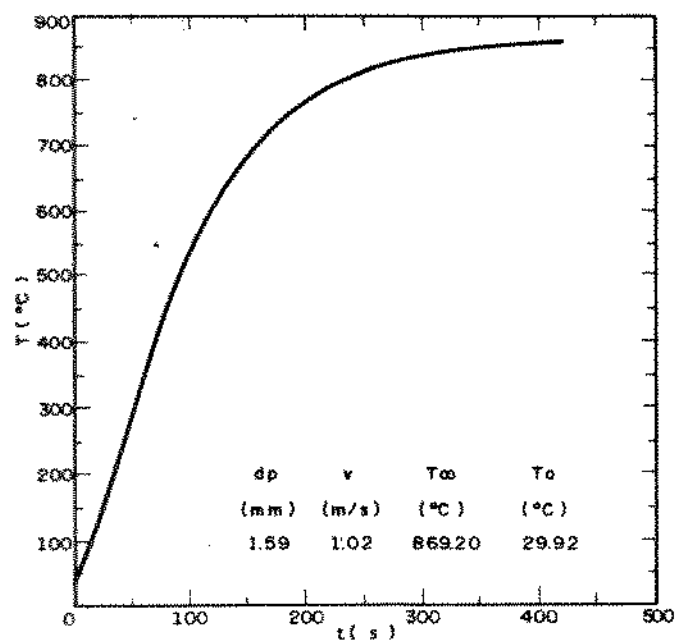
CURVAS DE AQUECIMENTO - ESFERA D=50mm

CURVA DE AQUECIMENTO - ESFERA  $D = 50 \text{ mm}$

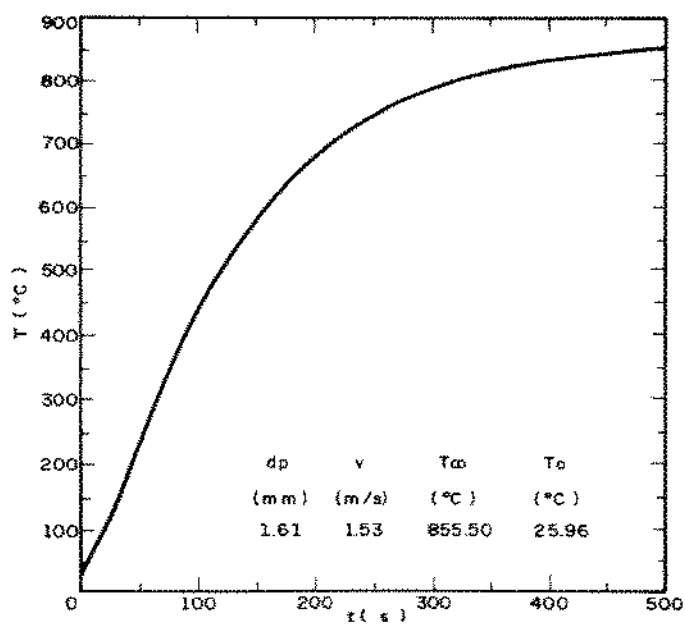
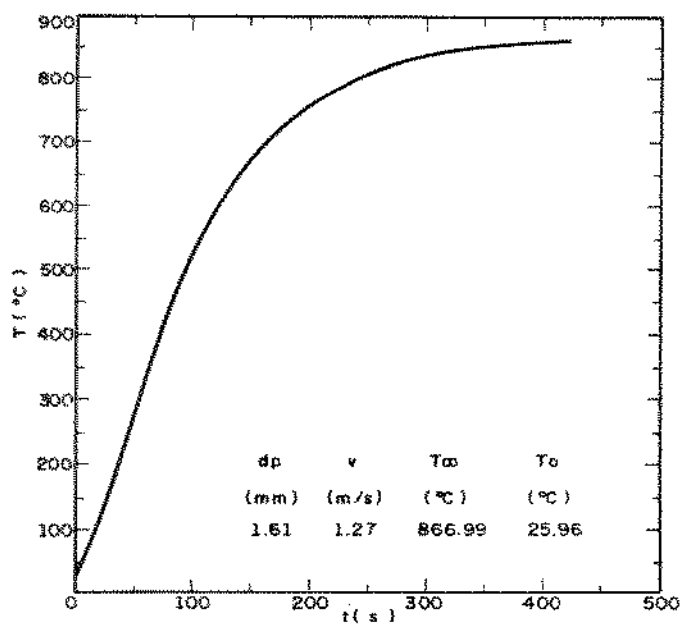
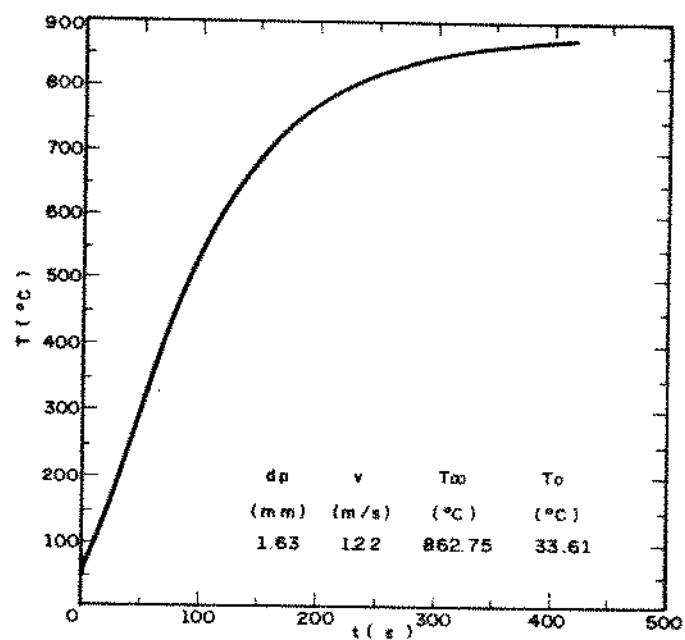
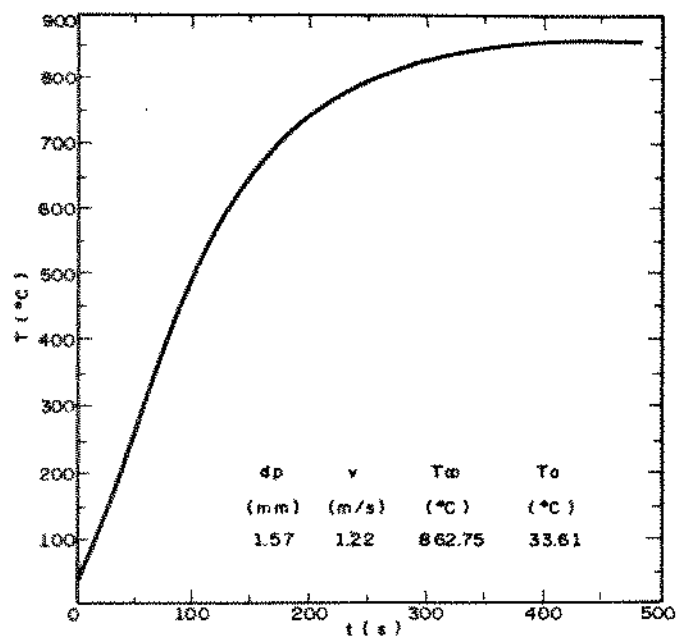
CURVAS DE AQUECIMENTO - CILINDRO  $L/D=4$

CURVAS DE AQUECIMENTO - CILINDRO  $L/D = 4$

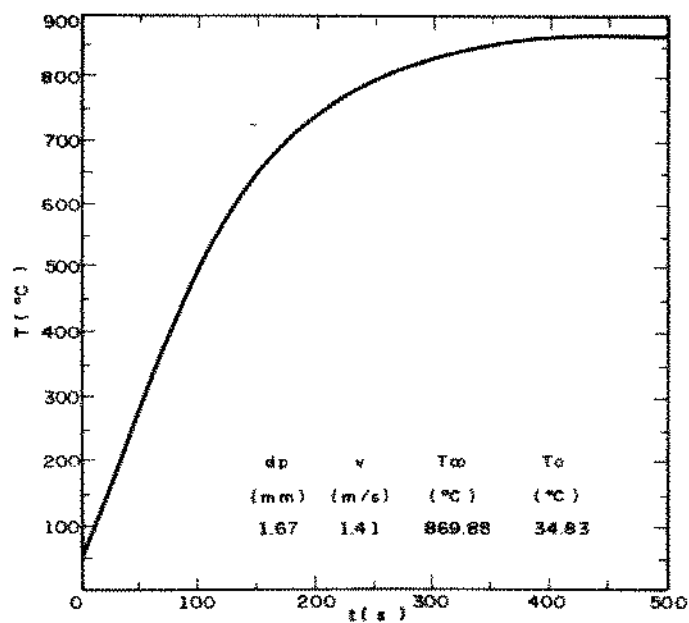
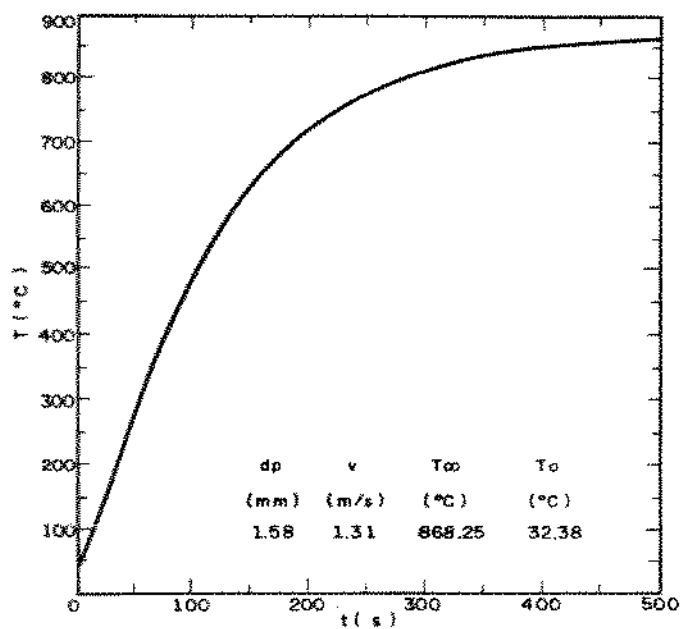
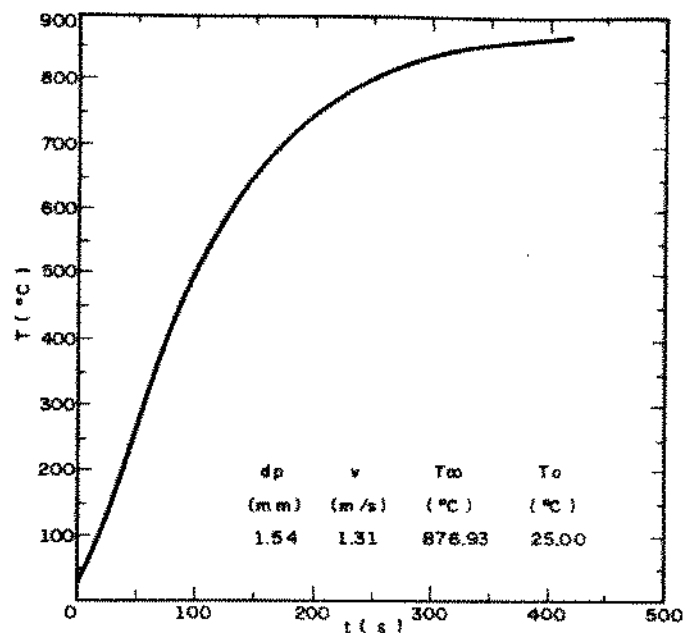
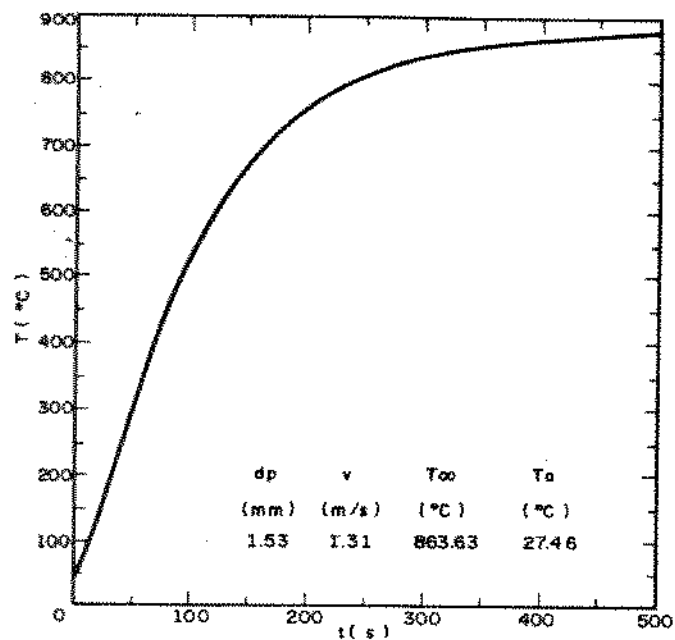
CURVAS DE AQUECIMENTO - CILINDRO  $L/D=4$

CURVAS DE AQUECIMENTO - CILINDRO  $L/D = 4$

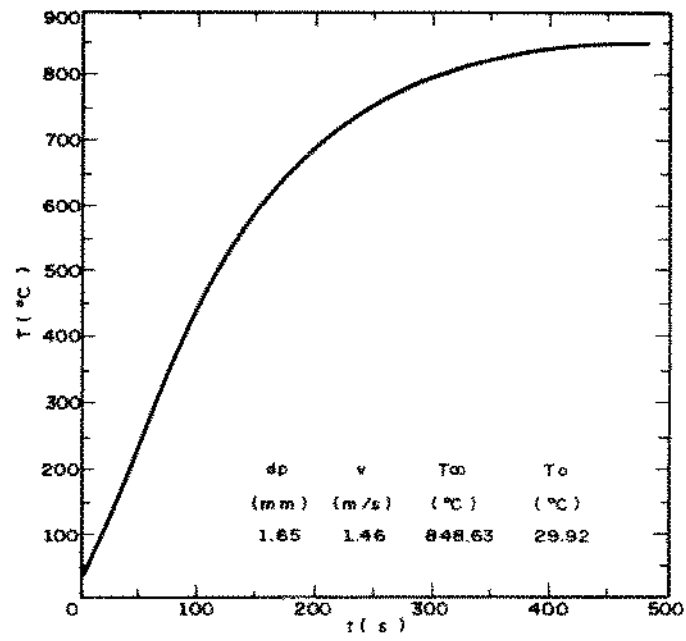


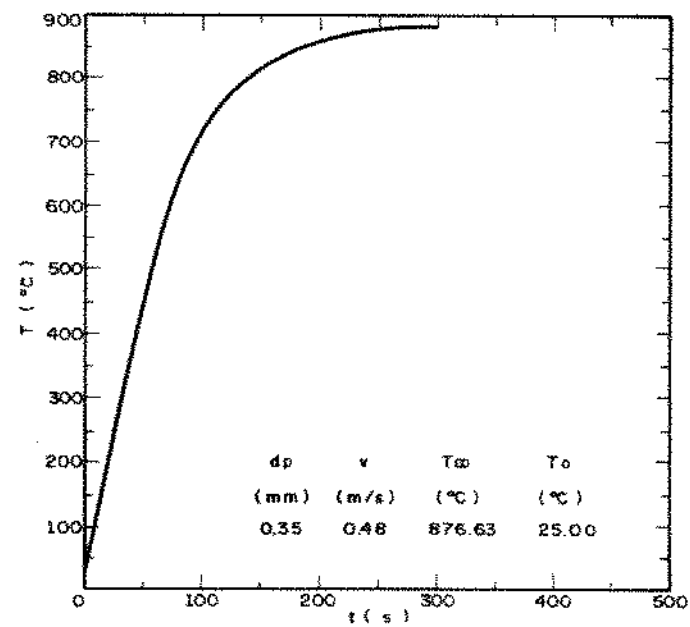
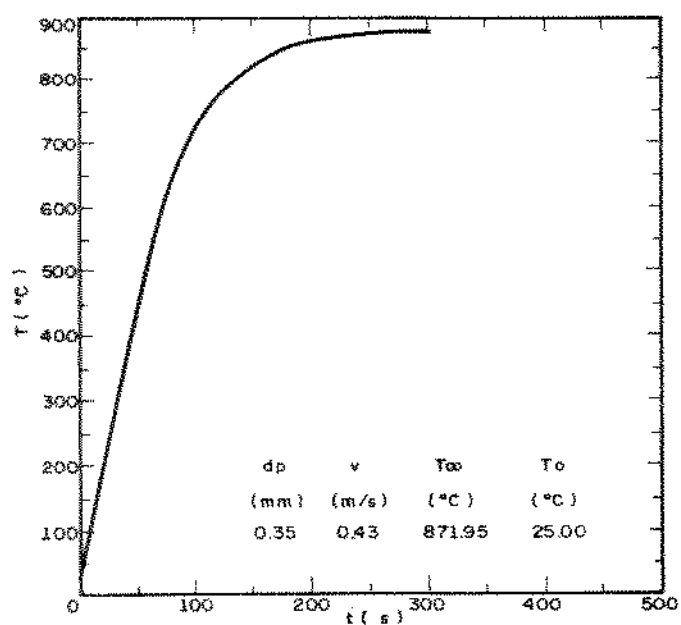
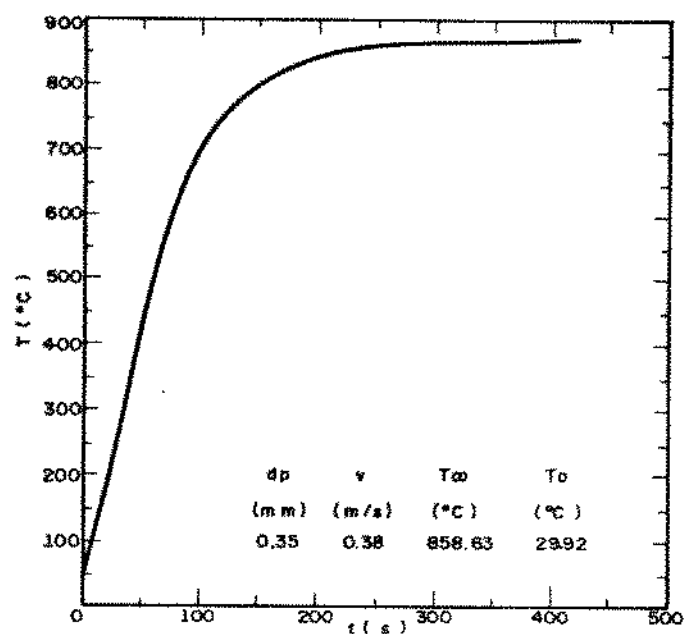
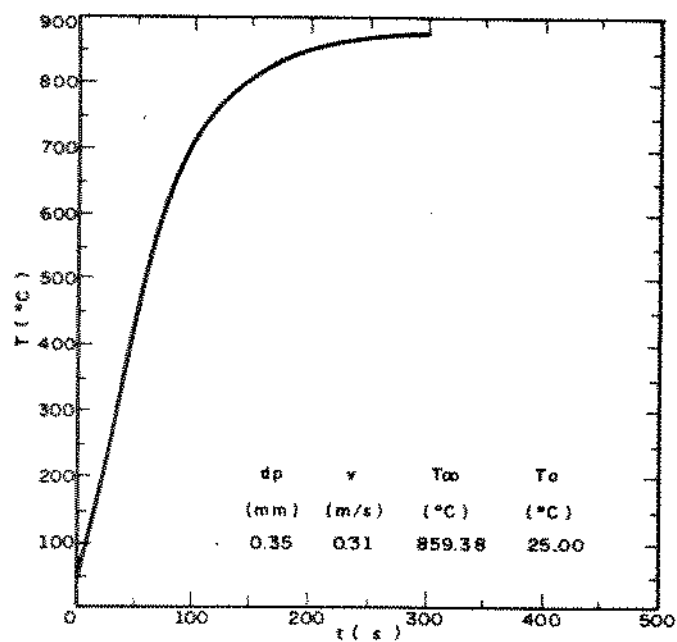


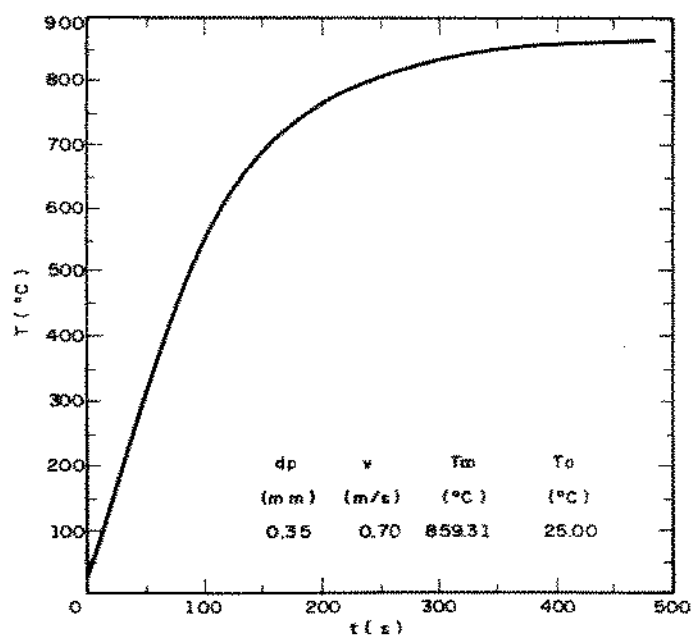
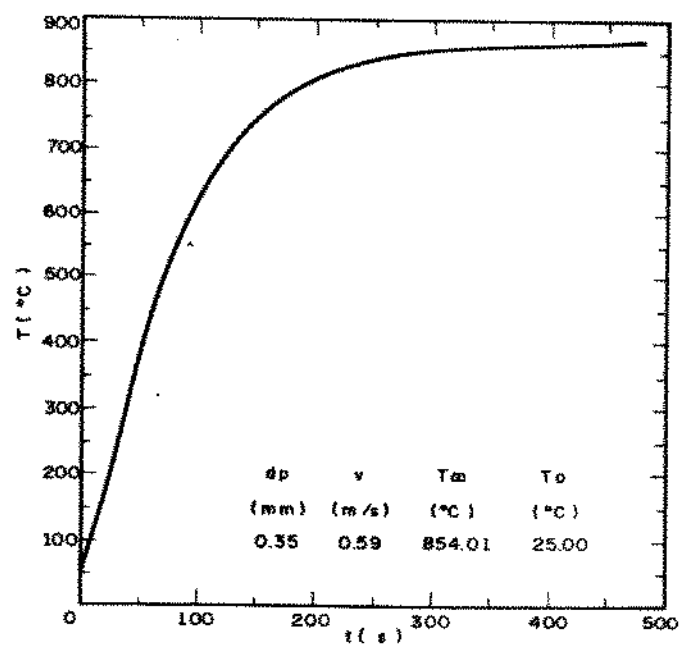
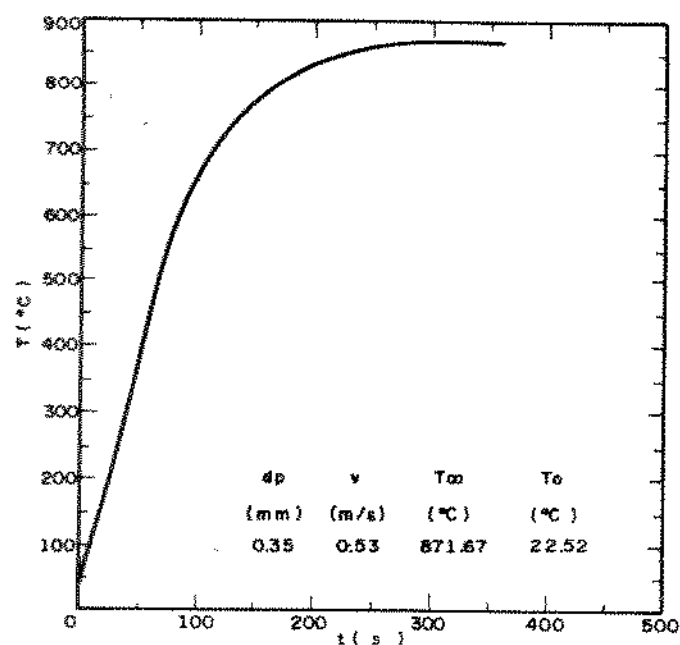
CURVAS DE AQUECIMENTO - CILINDRO L/D = 4

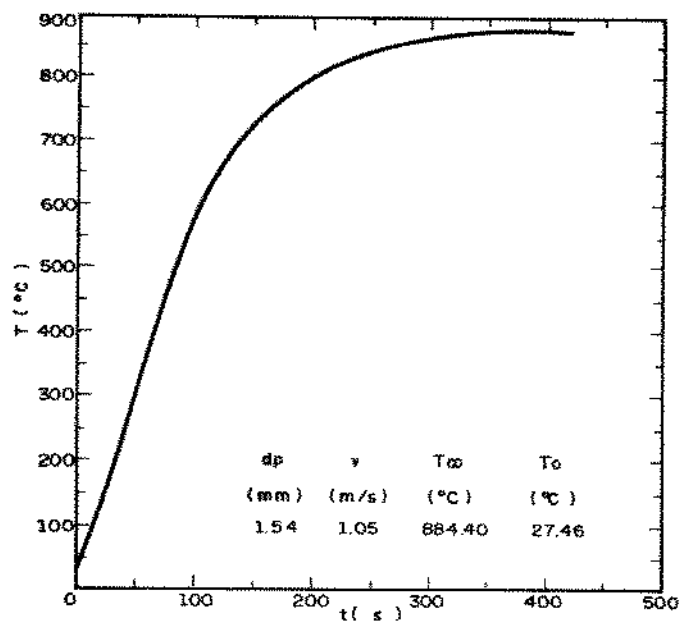
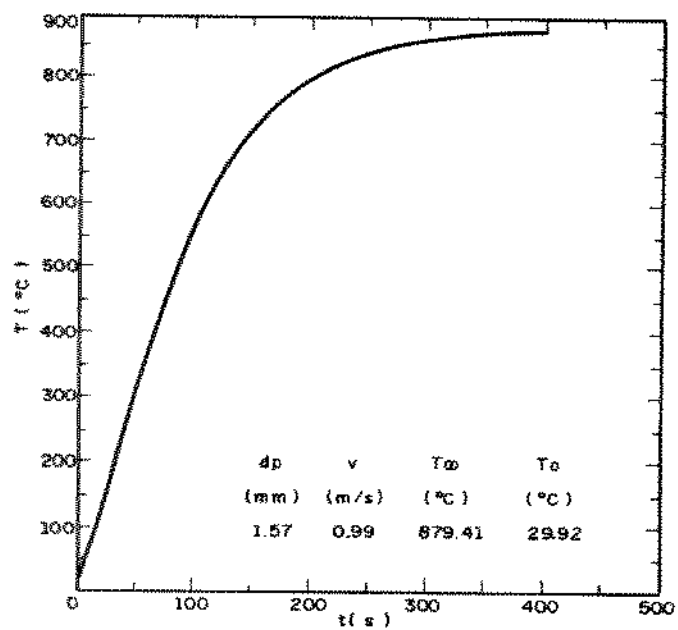
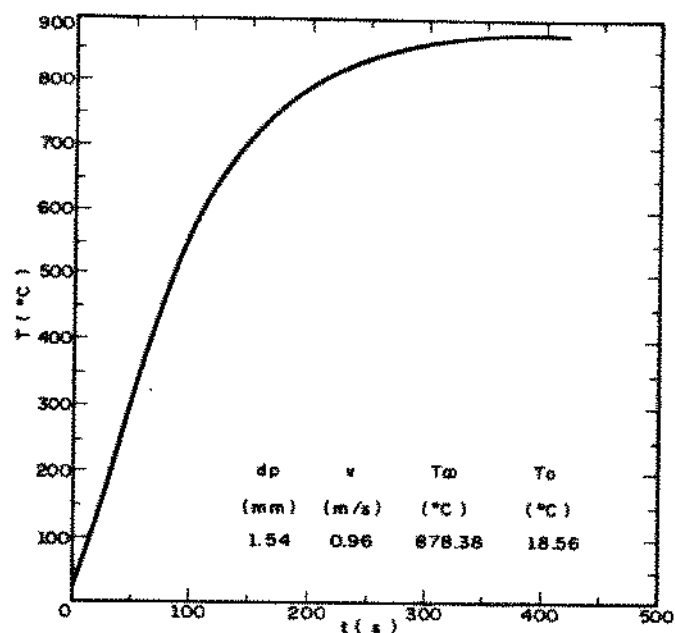
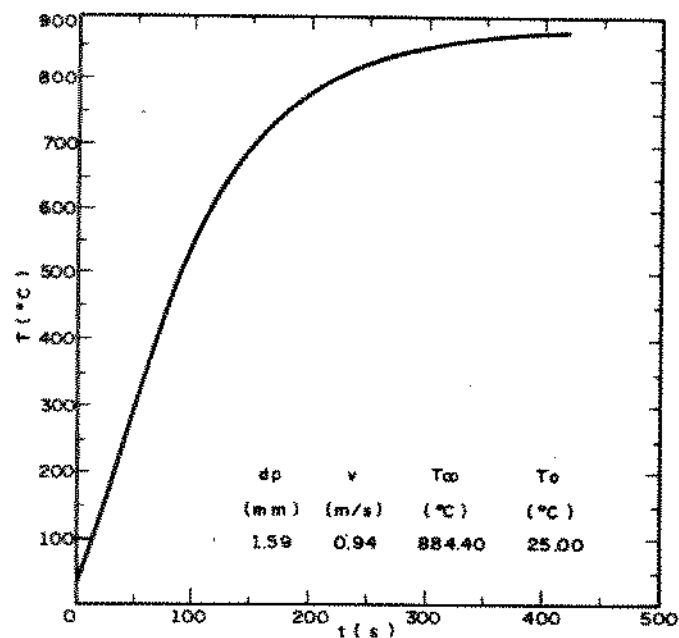


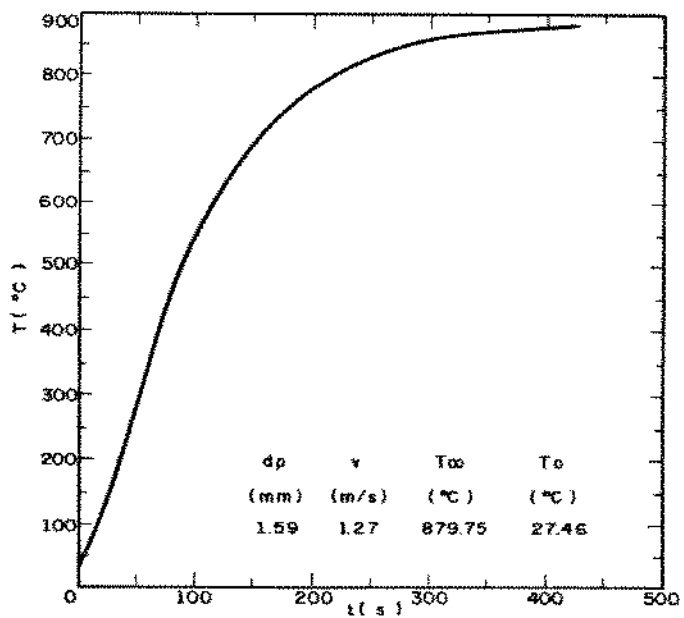
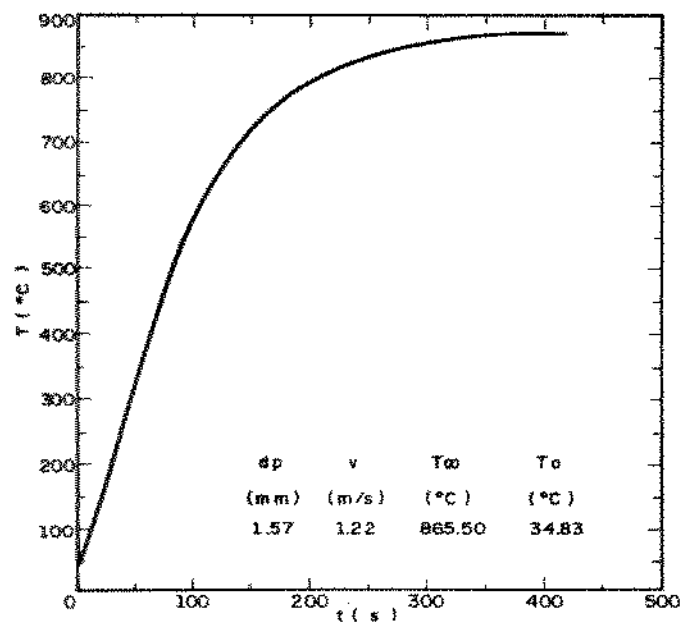
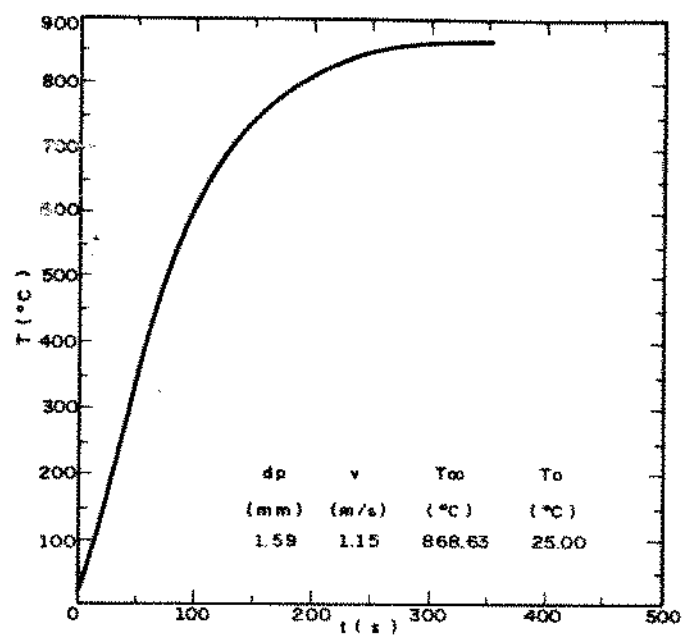
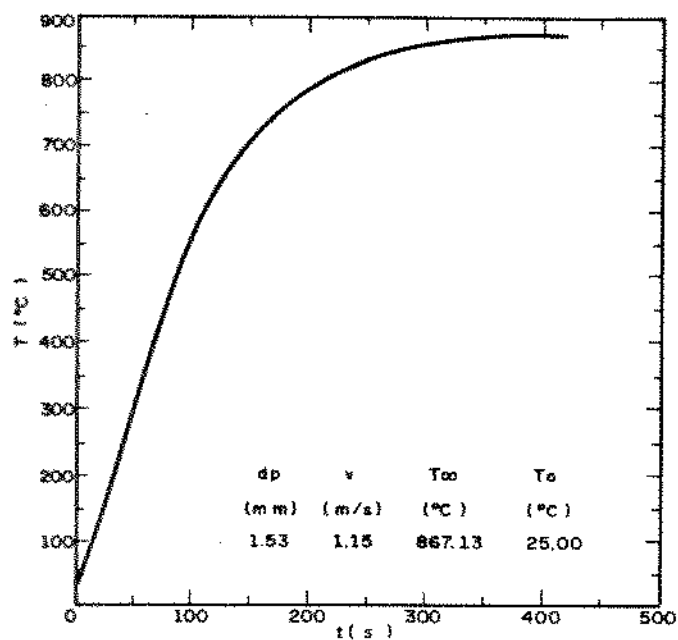
CURVAS DE AQUECIMENTO - CILINDRO L/D = 4

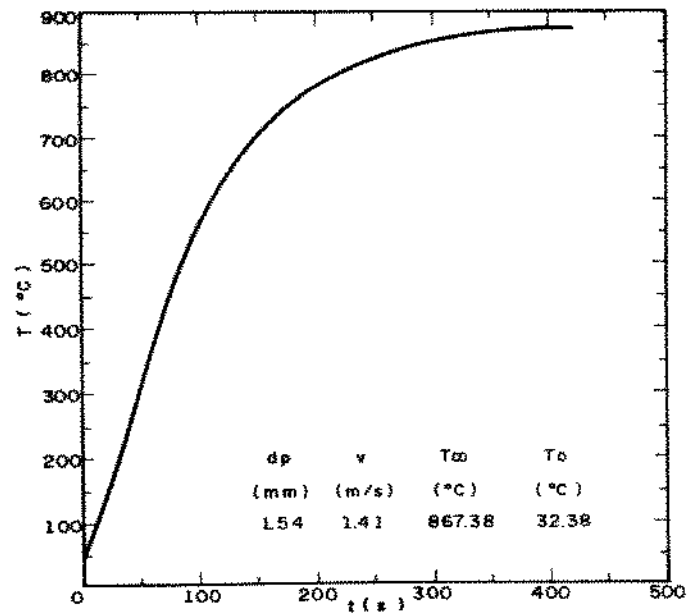
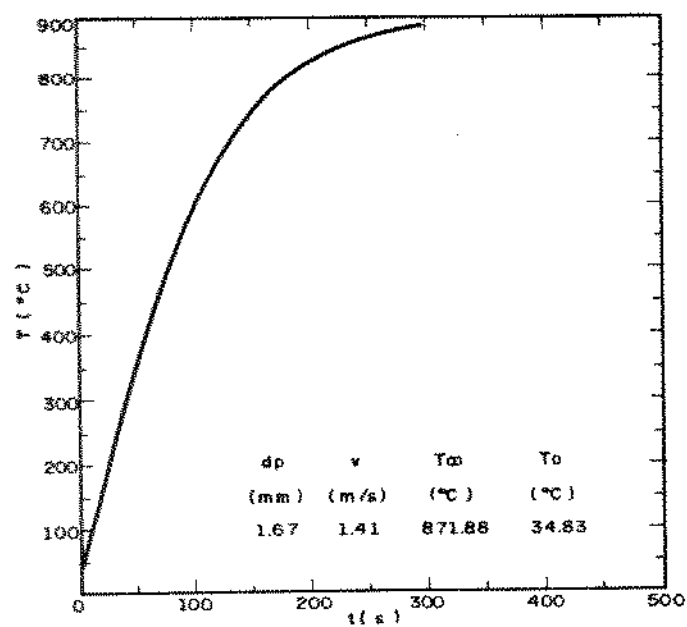
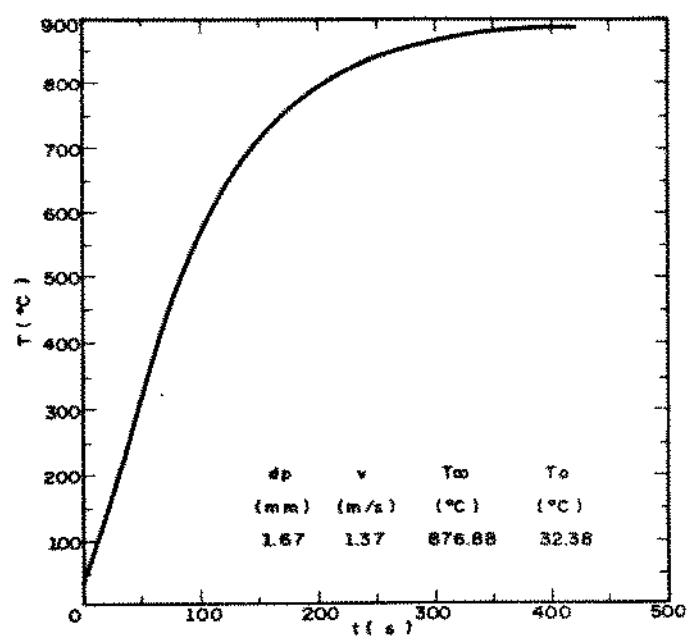
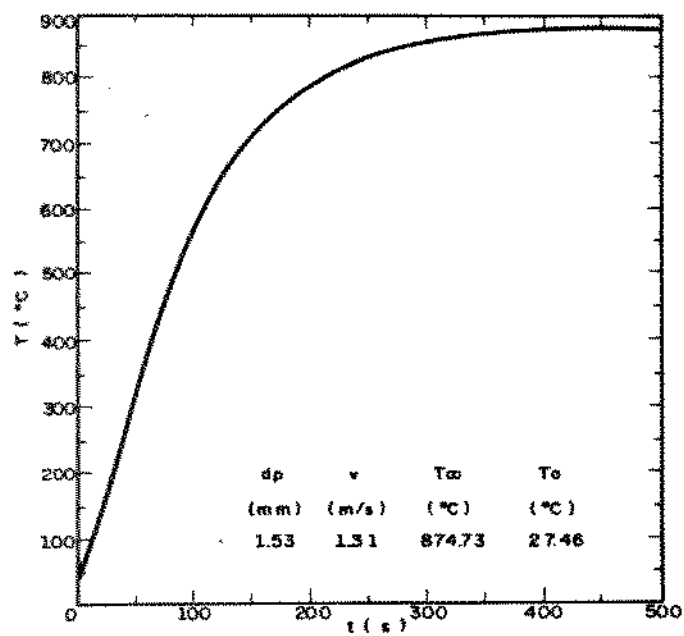
CURVA DE AQUECIMENTO - CILINDRO  $L/D = 4$

CURVAS DE AQUECIMENTO - CILINDRO  $L/D = 6$

CURVAS DE AQUECIMENTO - CILINDRO  $L/D = 8$

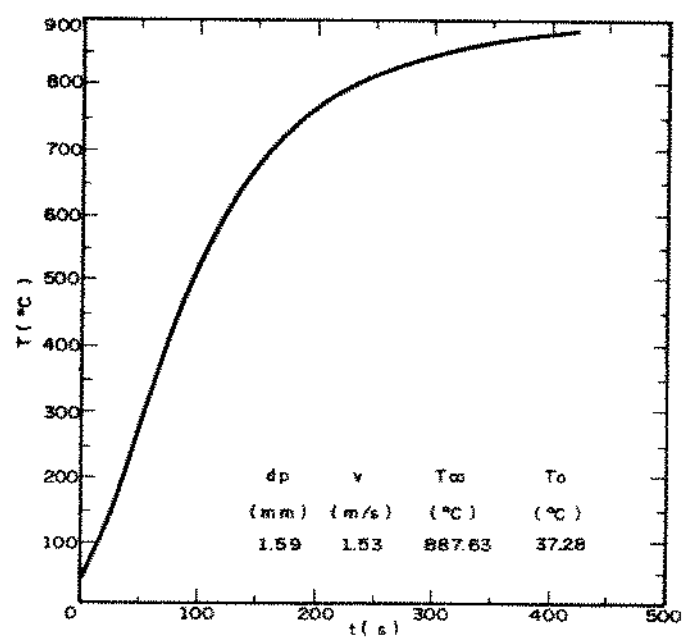
CURVAS DE AQUECIMENTO - CILINDRO  $L/D = 8$

CURVAS DE AQUECIMENTO - CILINDRO  $L/D = 8$



CURVAS DE AQUECIMENTO - CILINDRO L/D=8



CURVA DE AQUECIMENTO - CILINDRO  $L/D=8$

## ANEXO 2

### ANÁLISE DE ERRO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

## ANALISE DE ERRO

O método clássico para estimar a incerteza nos resultados experimentais é o de Kline e McClintock (1953), ilustrado no livro de J. P. Holman (1986).

Segundo ele a incerteza no valor do coeficiente de transferência de calor  $h$  do presente trabalho, é dado pela expressão seguinte:

$$w_h = \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial k} w_k \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial D} w_D \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial T_c} w_{T_c} \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial T_\infty} w_{T_\infty} \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial T_o} w_{T_o} \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial t} w_t \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial \alpha} w_\alpha \right)^2 \right] \quad (A.1)$$

onde  $k$ ,  $D$ ,  $T_c$ ,  $T_\infty$ ,  $T_o$ ,  $t$  e  $\alpha$  são as variáveis independentes das quais  $h$  é função.

As incertezas dessas variáveis foram estimadas e seus valores são dados abaixo:

$$\begin{aligned} w_k &= 0,1 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \\ w_D &= 0,001 \text{ m} \\ w_{T_c} &= 2,53 \text{ } ^\circ\text{C} \\ w_{T_\infty} &= 2,53 \text{ } ^\circ\text{C} \\ w_{T_o} &= 2,53 \text{ } ^\circ\text{C} \\ w_t &= 2 \text{ s} \\ w_\alpha &= 0,001 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

Para efeito desta análise, o cálculo de  $w_h$  foi efetuado para o caso da esfera imersa no leito fluidizado borbulhante, admitindo-se que para o cilindro um erro da mesma ordem de grandeza.

Repete-se a seguir as equações (3.2) e (3.3), que permitem o cálculo de h:

$$\frac{T_c - T_\infty}{T_o - T_\infty} = 2 \sum_{n=1}^6 \left( \frac{\text{sen} \lambda_n R - \lambda_n R \cos \lambda_n R}{\lambda_n R - \text{sen} \lambda_n R \cos \lambda_n R} \right) e^{-\alpha \lambda_n^2 t} \quad (3.2)$$

onde

$$\lambda_n R \cos \lambda_n R = (1 - \text{Bi}) \text{sen} \lambda_n R \quad (3.3)$$

isto é,

$$\text{Bi} = 1 - \lambda_n R / \text{tg} \lambda_n R \quad (\text{A.2})$$

Dividindo-se o numerador e o denominador da expressão entre parênteses em (3.2) por  $\text{sen} \lambda_n R$  vem:

$$A = \frac{1 - \lambda_n R / \text{tg} \lambda_n R}{\lambda_n R / \text{sen} \lambda_n R - \cos \lambda_n R}$$

Introduzindo-se (A.2), tem-se

$$A = \frac{\text{Bi}}{\lambda_n R / \text{sen} \lambda_n R - \cos \lambda_n R} \quad (\text{A.3})$$

Substituindo-se (A.3) em (3.2), resulta:

$$\frac{T_c - T_\infty}{T_o - T_\infty} = 2 \sum_{n=1}^6 \frac{\text{Bi}}{\frac{\lambda_n R}{\text{sen} \lambda_n R} - \cos \lambda_n R} e^{-\alpha \lambda_n^2 t}$$

Mas  $\text{Bi} = \frac{h R}{k}$ , portanto:

$$\frac{T_c - T_\infty}{T_o - T_\infty} = 2 \sum_{n=1}^6 \frac{\frac{h R}{k}}{\frac{\lambda_n R}{\text{sen} \lambda_n R} - \cos \lambda_n R} e^{-\alpha \lambda_n^2 t}$$

ou

$$\frac{T_c - T_\infty}{T_o - T_\infty} = 2 \frac{h R}{k} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} e^{-\alpha \lambda n^2 t}$$

e, isolando  $h$  :

$$h = \frac{k}{D} \frac{T_c - T_\infty}{T_o - T_\infty} \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right)^{-1}$$

As derivadas necessárias em (A.1) são:

$$\frac{\partial h}{\partial k} = \frac{k}{D} \frac{T_c - T_\infty}{T_o - T_\infty} \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right)^{-1} ;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial D} &= k \frac{T_c - T_\infty}{T_o - T_\infty} \left( \frac{1}{D^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right)^{-1} \\ &\quad - \frac{1}{D} \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right)^{-2} \\ &\quad \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-\lambda n \text{sen} \lambda n + \lambda n^2 R \cos \lambda n R - \lambda n \text{sen} \lambda n R}{\left( \frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R \right)^2} e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right) ; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial h}{\partial T_c} = \frac{k}{D} \frac{1}{T_o - T_\infty} \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right)^{-1} ;$$

$$\frac{\partial h}{\partial T_{\infty}} = \frac{k}{D} \frac{T_c - T_{\infty}}{(T_o - T_{\infty})^2} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right]^{-1};$$

$$\frac{\partial h}{\partial T_o} = \frac{k}{D} \frac{T_{\infty} - T_c}{(T_o - T_{\infty})^2} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right]^{-1};$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{D} \frac{T_c - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} - \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right]^{-2}$$

$$\left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} \alpha \lambda n^2 e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right]$$

e

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = \frac{k}{D} \frac{T_c - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} - \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right]^{-2}$$

$$\left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-1}{\frac{\lambda n R}{\text{sen} \lambda n R} - \cos \lambda n R} \lambda n^2 t e^{-\alpha \lambda n^2 t} \right]$$

Para a esfera de 25mm, areia de  $d_p = 1,59\text{mm}$ , velocidade superficial de 1,04 m/s no instante  $t = 180\text{s}$ , tem-se :

$$\begin{aligned}
 h &= 376,64 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 T_o &= 29,92^\circ\text{C} ; \\
 T_c &= 835,83^\circ\text{C} ; \\
 T_\infty &= 866,99^\circ\text{C} ; \\
 \lambda_1 R &= 0,76 ; \\
 \lambda_2 R &= 4,54 ; \\
 \lambda_3 R &= 7,75 ; \\
 \lambda_4 R &= 10,92 ; \\
 \lambda_5 R &= 14,08 \text{ e} \\
 \lambda_6 R &= 17,28.
 \end{aligned}$$

onde os valores de  $\lambda_n R$  podem ser obtidos através de programa de computador, ou alternativamente das tabelas do livro de Carslaw e Jaeger (1959).

Substituindo-se estes valores nas expressões derivadas, obtém-se:

$$\frac{\partial h}{\partial k} = 16,49 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{\partial h}{\partial D} = 10481,40 \text{ m}$$

$$\frac{\partial h}{\partial T_c} = -12,88^\circ\text{C}$$

$$\frac{\partial h}{\partial T_\infty} = 12,40^\circ\text{C}$$

$$\frac{\partial h}{\partial T_o} = 0,48^\circ\text{C}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = 7,6 \text{ s}$$

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = 265,60 \cdot 10^6$$

Dai, substituindo-se e (A.1), tem-se:

$$w_h = 51,58 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

O que indica uma incerteza da ordem de 13,7%



### Referências Bibliográficas

Arpaci, V. S., *Conduction Heat Transfer*, Addison Wesley Publishing Company, 1966.

Baskakov, A. P., Berg, B. V., Vitt, O. K., Filippovsky, N. F., Kirakosyan, V. A., Goldobin, J. M. and Maskaev, V. K., "Heat Transfer to Objects Immersed in Fluidized Beds", *Powder Technology*, N° 8, pp. 273-282, June 1973.

Baskakov, A. P., Zavarov, A. S., Grachev, S. V., Rishkov, A. F., Filippovsky, N. F. and Svetlakov, V. I., "Heat and Chemical Heat Treatment in Fluidized and Vidrofluidized Beds", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 10, N° 1, pp. 9-17, 1989.

Botterill, J. S. M., "Fluid-Beds Heat Transfer", *Academic Press*, London, 1975.

Botterill, J. S. M., Teoman, Y. and Yüregir, K. R., "Factors Affecting Heat Transfer Between Gas-Fluidized Beds and Immersed Surfaces", *Powder Technology*, Vol. 39, pp. 177-189, Oct. 1984.

Botterill, J. S. M. "Fluid Bed Heat Transfer", in: *Gas Fluidization Technology*, Geldart, D., John Wiley & Sons, Chap. 9, 1986.

Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., *Conduction of Heats in Solids*, Oxford University Press, London, 1959.

Costa e Silva, A. L. e Mei, P. R., *Aços e Ligas Especiais*, SP: Eletrometal S. A. Metais Especiais, 2<sup>a</sup> ed., Sumaré 1988.

George, A. H. e Welty, J. R., "Local Heat Transfer Coefficients for a Horizontal Tube in a Large-Particle Fluidized Bed at Elevated Temperature", *Aiche Journal*, Vol. 30, N<sup>o</sup> 3, pp. 482-485, May 1984.

Goldstein Jr., L., Coelho, L. O. P. e Lombardi, G., "Heat Transfer between a Immersed Sphere and a Gas-Fluidized Bed at High Temperature", XI - COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo, Dec. 1991.

Gupta, S. N. Chaube, R. B. and Upadhyay, S. N., "Fluid - Particle Heat Transfer in Fixed and Fluidized Beds", *Chemical Engineering Science*, Vol. 29, pp. 839-843, 1974.

Heisler, M. P., "Temperature Charts for Induction and Constant-Temperature Heating", *Trans ASME*, Vol. 69, pp. 227-236, April 1947.

Holman, J. P., *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill Book Company, 1966.

Isachenko, V. P., Osipova, V. A. and Sukomel, A. S., *Heat Transfer*, Mir Publishers, Moscow, 1977.

Jolley, L. J., "Heat Transfer in Beds of Fluidized Solids", *Fuel - A Journal of Fuel Science*, Vol. 28, N<sup>o</sup> 5, pp. 114-115, May 1949.

Kharchenko, N. V. and Makhorin, K. E., "The Rate Transfer Between a Fluidized Bed and an Immersed Body at High Temperature", *International Chemical Engineering*, Vol. 4, N<sup>o</sup> 4, pp. 650-654, Oct. 1964.

Kunii, D. and Levenspiel, O., *Fluidization Engineering*, John Wiley, New York, 1977.

Mathur, A. and Saxena, S. C., "Total and Radiative Heat Transfer to an Immersed Surface in a Gas-Fluidized Bed", *AIChE Journal*, Vol. 33, N<sup>o</sup> 7, pp. 1124-1134, July 1987.

Panov, O. M., Baskakov, A. P., Goldobin, Y. M., Filippovsky, N. F. and Mazur, Y. S., "Experimental Investigation of the Radiant and Conductive-Convective Components of External Heat", *J. Eng. Phys.*, Vol. 36, pp. 275-279, 1979.

Saxena, S. C., "Heat Transfer Between Immersed Surfaces and Gas-Fluidized Beds", *Advances in Heat Transfer*, Vol. 19, Academic Press, pp. 97-190, 1989.

Thring, R. H., "Fluidised Bed Combustion for the Stirling Engine", *Heat Mass Transfer*, Vol. 20, pp. 911-918, 1977.

Wright, S. J., Hickman, R. and Ketley, H. C., "Heat Transfer in Fluidized Beds of Wide Size Spectrum at Elevated Temperatures", *British Engineering*, Vol. 15, N<sup>o</sup> 12, pp. 1551-1554, Dec. 1970.

Yoshida, K., Ueno, T. and Kunii, D., "Mechanism of Bed-Wall Heat Transfer in a Fluidized Bed at High Temperatures", *Chemical Engineering Science*, Vol. 29, pp. 77-82, 1974.

Zhang, H., Cen, K. and Huang, G., "Heat Transfer to the Immersed Tubes in Fluidized-Bed Combustion of Low-Grade Coal", *International Chemical Engineering*, Vol. 24 N<sup>o</sup> 1, pp. 158-167, Jan. 1984.