## UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA DEPARTAMENTO DE TERMOFLUIDODINÂMICA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

## ESTUDO EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CICLONES

Autor: Alexandre de Paula Peres Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco

> Dissertação apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Campinas - São Paulo - Brasil

 $\bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet$ 

Dezembro de 1997

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 12 de dezembro de 1997 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:

Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco Orientador

22

Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira

Prof. Dr. Milton Mori 3

Esta versão corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida pelo Eng. Alexandre de Paula Peres e aprovada pela Comissão Julgadora em 12 de dezembro de 1997.

 $\supset$ 

Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco Orientador

Dedico este trabalho a meus pais. Osvaldo e Maria Luísa, por me darem luz e as condições para que trilhasse meu caminho e chegasse até aqui. Obrigado!

## AGRADECIMENTOS

A Marco Aurélio Cremasco, pela orientação segura e sincera no transcorrer deste trabalho.

Aos amigos William James Nogueira Lima, Marlus Pinheiro Rolemberg e Vandoel Pedro Barbosa Júnior, pelo auxílio inestimável e, indubitavelmente, por tornarem mais fácil ultrapassar as barreiras que a vida nos impõe.

Aos companheiros de laboratório: Clamer Dimas Fernandes Faria, Cristiane Toshie Uyeda, Danúzia Pinto da Silva, Everaldo Silvino dos Santos e Mara Heloísa Neves Olsen, os quais fizeram do ambiente de trabalho um ambiente familiar e harmonioso.

A Cíntia Heloísa Correa Pilenso, pela colaboração carinhosa nos últimos meses deste trabalho.

A Angela Mitsuyo Hayashi por transmitir alegria cotidiana, renovando nossas energias.

A "Seu" Levi Ismael Madeira e "Seu" José Salim, pela ajuda na elaboração e montagem do equipamento.

Aos eternos colegas de turma da EQ90/Unicamp, Ademir Schiezaro Júnior e Jefferson Luiz Gomes Correa, pelo simples fato de serem amigos.

A Sheila Costa Ramos, aluna de iniciação científica, pelo auxílio em algumas corridas experimentais.

A todos aqueles que diviram comigo em quase três anos de convivência, as alegrias e agruras do dia-a-dia na Cantina da Química, em especial, Basilino Barbosa de Freitas Júnior, Márcio de Alcântara Costa e Jair Francisco.

# **SUMÁRIO**

Sumário	i
Resumo	iv
Abstract	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Figuras	vii
Nomenclatura	ix
Capítulo 1: Introdução	1
1.1.O Ciclone trocador de calor	1
1.2.Objetivos do trabalho	6
Capítulo 2: Revisão Bibliográfica	8
2.1.Transferência de calor gás-parede	9
2.1.1. Gás limpo (sem particulados)	9
2.1.2. Gás com particulados sólidos	13
2.2. Transferência de calor gás-partículas	16
2.3.Tempo de residência	23
Capítulo 3: Materiais e Métodos	27
3.1.Materiais utilizados	27
3.2.Montagem experimental	29

3.3.Rotina experimental	38
3.3.1.Tempo de residência	38
3.3.2.Transferência de calor	39
3.4.Metodologia de cálculo	41
3.4.1.Vazão de alimentação do ar	41
3.4.2. Vazão mássica de sólidos	41
3.4.3.Tempo de residência dos particulados	43
3.4.3.1. Ação da válvula borboleta	43
3.4.4.Coeficiente de transferência de calor gás-parede	
( com e sem particulados)	43
3.4.5.Coeficiente de transferência de calor gás-partículas	45
Capítulo 4: Apresentação e Análise dos Resultados	47
4.1.Estudo da ação da válvula borboleta	47
4.2. Tempo de residência	49
4.2.1.Correlação geral para o tempo de residência	57
4.3.Transferência de calor gás-parede	60
4.3.1.Correlação geral para a troca térmica gás-parede	65
4.4. Transferência de calor gás(com partículas)-parede	68
4.4.1. Análise da influência dos particulados na	
transferência de calor gás-parede	69
4.4.2.Correlação geral para a troca térmica gás	
(com partículas)-parede	75
4.5.Transferência de calor gás-partículas	77
4.5.1.Correlação geral para a troca térmica gás-partículas	84

4.5.2.Comparação do ciclone Lapple com outros equipamentos utilizados na troca térmica gás-partículas	89
Capítulo 5: Conclusões e Sugestões	92
Conclusões	92
Sugestões	94
Referências Bibliográficas	95
Bibliografia Consultada	100

### **RESUMO**

No presente trabalho, foram estudados experimentalmente os fenômenos de transferência de calor e tempo de residência de sólidos no interior ciclônico, utilizando-se dois ciclones tipo Lapple de D=0,15 m e D=0,20m.

Uma série de experimentos foi realizada com o objetivo de quantificar a troca térmica, tanto entre a corrente gasosa, com e sem a presença de particulados, e as paredes do equipamento, quanto o contato gás-partículas, além da obtenção do tempo de residência dos sólidos. Trabalhou-se com uma ampla faixa de velocidade de alimentação do ar na entrada do ciclone,  $5,5 \le V_0 \le 17,1$ m/s, concentração volumétrica de sólidos,  $0,41x10^{-5} \le C_v \le 8,65x10^{-5}$ , temperatura do ar na entrada do ciclone,  $68^0 C \le T_0 \le 110^0 C$ , com microesferas de vidro de massa específica,  $\rho_p = 2460$ kg/m<sup>3</sup> e diâmetros de 0,84, 1,19, 1,69 e 3,00 mm e resina plástica de  $\rho_p = 1340$ kg/m<sup>3</sup> e d<sub>p</sub> = 3,49mm.

Decorrentes do estudo experimental, foram analisados os resultados de tempo de residência e dos coeficientes de transferência de calor, em termos do número de Nusselt gás-parede e gás-partícula, em ciclones do tipo Lapple. Como consequência, foram propostas correlações para estimar tais parâmetros. Para que fossem generalizadas as correlações propostas para diversas configurações ciclônicas, foram analisados dados experimentais de outros autores encontrados na literatura, provenientes de trabalhos com ciclones do tipo Stairmand e Bernauer.

## ABSTRACT

In this work is considered the experimental study of heat transfer phenomena and residence time of solids in the cyclone. Two Lapple cyclones are utilized, being one of D=0,15m and other with D=0,20m.

A set of experiments was realized in order to quantify the heat transfer between gas and wall, with and without particles, as between gas and particles. The residence time of particles in cyclones also was obtained. The experimental runs were made with wide range of feed air velocity in the entrance of the cyclone,  $5,5 \le V_0 \le 17,1$ m/s. particle volumetric concentration,  $0,41x10^{-5} \le C_v \le 8,65x10^{-5}$ , air temperature in the entrance of the cyclone,  $68,6^{\circ}C \le T_0 \le 110,4^{\circ}C$ . with glass microespheres with density,  $\rho_p = 2460 \text{kg}/\text{m}^3$  with 0.84, 1.19, 1.69 and 3.00 mm of diameter and plastic resine with  $\rho_p = 1340 \text{kg} / \text{m}^3$  and  $d_p = 3,49 \text{mm}$ .

After experimental study, correlation to estimate solids residence time and gaswall and gas-particles heat transfer coefficients in cyclones were proposed. Others results of authors found in the literature were added to those obtained in this work to generalize the proposed correlation.

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Dimensões do ciclone utilizado por Szekely e Carr (1966)	10
Tabela 2.2 Dimensões do ciclone Stairmand modificado	11
Tabela 2.3 - Dimensões do ciclone Bernauer	12
Tabela 2.4 - Correlações para o número de Nusselt gás-parede	
sem particulados	13
Tabela 2.5 - Dimensões do ciclone utilizado por Yen et al. (1990)	18
Tabela 2.6 - Dimensões do ciclone utilizado por Lédé et al. (1992)	21
Tabela 2.7 - Correlações para número de Nusselt gás-particula em ciclone	s 23
Tabela 2.8 - Correlações para o tempo de residência em ciclones	
encontradas na literatura	25
Tabela 3.1 - Características físicas dos materiais de teste	28
Tabela 3.2 - Dimensões dos ciclones (D=0,15m e D=0,20m)	36
Tabela 4.1 - Resultados obtidos no estudo da ação da válvula borboleta	48
Tabela 4.2 - Resultados de tempo de residência em ciclones Lapple	49
Tabela 4.3 - Análise do desempenho das correlações de tempo de	
residência contidas na Tabela 2.7 (N = 30 ensaios experimentais)	54
Tabela 4.4 - Resultados de transferência de calor para gás limpo	61
Tabela 4.5 - Análise do desempenho das correlações para a troca	
térmica gás-parede apresentadas na Tabela 2.4 (N = 8 ensaios)	62
Tabela 4.6 - Resultados de transferência de calor gás-parede	
com particulados	69
Tabela 4.7 - Resultados de transferência de calor gás-partículas	78
Tabela 4.8 - Desempenho das correlações da Tabela 2.6 (N = 27)	81
Tabela 4.9 - Correlações para cálculo do número de Nusselt	
gás-partículas em diversos equipamentos	90

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Classificação de trocadores de calor (Levenspiel, 1985)	2
Figura 1.2 - Classificação de trocadores de calor (Goldstein, 1988)	2
Figura 1.3 - Ciclone trocador de calor tipo "contato entre	
as correntes" (Cremasco et al., 1993)	4
Figura 1.4 - Ciclone trocador de calor tipo "recuperador"	
(Szekely e Carr, 1966)	4
Figura 2.1 - Distribuição de temperatura do ar limpo	
(Cremasco et al., 1993)	12
Figura 2.2 - Distribuições de temperatura do ar no ciclone, ar limpo (•)	
e ar com a presença de particulados (+), no caso microesfera de	
vidro ( $d_p = 1,43 \text{ mm e } C_v = 2,0x10^{-6}$ ), nas mesmas condições	
experimentais (Cremasco e Nebra, 1994)	15
Figura 3.1 - Montagem experimental (dimensões em metros)	29
Figura 3.2 - Detalhe fotográfico da montagem experimental	30
Figura 3.3 - Detalhe fotográfico do soprador	31
Figura 3.4 - Detalhe fotográfico do resfriador e do aquecedor	32
Figura 3.5 - Detalhe fotográfico do sistema de aquisição de dados	33
Figura 3.6 - Detalhe fotográfico do alimentador de sólidos	34
Figura 3.7 - Detalhe fotográfico do coletor de sólidos e da balança	35
Figura 3.8 - Ilustração dos ciclones utilizados	36
Figura 3.9 - Detalhe fotográfico de um dos ciclones utilizados	37
Figura 3.10 - Obtenção da vazão mássica de sólidos	42
Figura 4.1 - Influência da concentração volumétrica no tempo de	
residência das partículas	51
Figura 4.2 - Influência da concentração volumétrica no tempo de	
residência das partículas para o ciclone de D = 0,15m	52
Figura 4.3 - Influência da concentração volumétrica no tempo de	
residência das partículas para o ciclone de D = 0,20m	57

Figura 4.4 - Desempenho da Equação (4.7)	57
Figura 4.5 - Desempenho da Equação (4.7) frente ao ciclone Bernauer	58
Figura 4.6 - Desempenho da Equação (4.10)	60
Figura 4.7 - Influência do número de Reynolds do ciclone na troca térmica	62
Figura 4.8 - Desempenho da Equação(4.11)	64
Figura 4.9 - Desempenho da Equação (4.11) frente a outros ciclones	65
Figura 4.10 - Desempenho da Equação (4.14)	68
Figura 4.11 - Influência dos particulados no número de Nusselt	
para os ciclones Lapple	70
Figura 4.12 - Influência das características dos particulados	
no número de Nusselt para o ciclone de D=0,15m	70
Figura 4.13 - Influência das características dos particulados	
no número de Nusselt para o ciclone de D=0,20m	71
Figura 4.14 - Desempenho da Equação (2.11) frente aos	
dados experimentais obtidos neste trabalho	73
Figura 4.15 - Desempenho da Equação (4.15)	74
Figura 4.16 - Desempenho da Equação (4.15) frente aos dados de	
Cremasco e Nebra (1994)	75
Figura 4.17 - Desempenho da Equação (4.16)	77
Figura 4.18 - Influência das características dos particulados (Lapple 0,15m)	) 79
Figura 4.19 - Influência das características dos particulados (Lapple 0,20m)	) 80
Figura 4.20 - Influência do diâmetro do ciclone no Nusselt gás-partículas	80
Figura 4.21 - Desempenho da Equação (4.17)	83
Figura 4.22 - Desempenho da Equação (4.17) frente a outros ciclones	85
Figura 4.23 - Desempenho da Equação (4.18) para os dados de	
Lombardi (1991)	87
Figura 4.24 - Desempenho da Equação (4.19)	88
Figura 4.25 - Comparação do ciclone com outros sistemas	90

## NOMENCLATURA

## Letras Latinas

- a altura do bocal de entrada do ciclone, (L);
- $A_c$  área de troca térmica do ciclone, (L<sup>2</sup>);
- $A_p$  área de contato gás-partícula, (L<sup>2</sup>);
- b largura do duto de entrada do ciclone, (L);
- B diâmetro do tubo de saída inferior do ciclone, (L);
- $C_{M}$  concentração mássica de sólidos, (M de sólidos/ M de ar);
- Cp capacidade calorífica do ar,  $[EL(M\theta T)^{-1}]$ ;
- $Cp_p$  capacidade calorífica do sólido,  $[EL(M\theta T)^{-1}]$ ;
- $C_v$  concentração volumétrica de sólidos, (L<sup>3</sup> de sólidos/ L<sup>3</sup> de ar);
- d<sub>0</sub>-- diâmetro do bocal de entrada do ciclone;
- d<sub>p</sub> diâmetro da partícula, (L);
- D diâmetro da coluna cilíndrica do ciclone, (L);
- $\mathrm{D}_{\mathrm{e}}$  diâmetro do tubo de saída de gás, (L);
- f- fator de atrito mecânico, adimensional;
- g- aceleração da gravidade,  $(L/T^2)$ ;
- h- altura da seção cônica do ciclone, (L);
- h- coeficiente convectivo de transferência de calor,  $[E(\theta T)^{-1} L^{-2}]$ ;
- $h_0$  coeficiente convectivo de transferência de calor gás-parede, [E( $\theta$ T)<sup>-1</sup> L<sup>-2</sup>];
- $h_p$  coeficiente convectivo de transferência de calor gás-partícula, [E( $\theta$ T)<sup>-1</sup> L<sup>-2</sup>];
- h<sub>pp</sub>-coeficiente convectivo de transferência de calor partícula-parede,
- $[E(\theta T)^{-1} L^{-2}];$
- H- altura do ciclone, (L);
- k- condutividade térmica,  $[E(L\theta T)^{-1}];$
- m massa de sólidos, (M);

- m vazão mássica de ar, (M/T);
- m<sub>p</sub> vazão mássica de sólidos, (M/T);
- m<sub>R</sub> massa de sólidos remanescentes, (M);
- Mg massa molecular do gás, (M);
- N número de ensaios experimentais;

P - pressão ,  $(M/L.T^2)$ ;

- q taxa de transferência de calor,  $(ML^2/T)$ ;
- Q vazão volumétrica do gás,  $(L^3/T)$ ;
- R constante universal dos gases,  $(ML^2/mol.\theta)$ ;
- S altura do tubo de saída do gás, (L);
- s<sub>R</sub> massa de sólidos remanescentes no transporte pneumático, (M);
- t<sub>res</sub>- tempo de residência das partículas no ciclone, (T);
- t<sub>RS</sub> tempo de residência das partículas no ciclone e transporte pneumático, (T);
- T temperatura média,  $(\theta)$ ;
- $T_e$  temperatura da corrente gasosa na saída do ciclone, ( $\theta$ );
- $T_0$  temperatura da corrente gasosa na entrada do ciclone, ( $\theta$ );
- $T_p$  temperatura da partícula, ( $\theta$ );
- $T_w$  temperatura do fluido junto à parede, ( $\theta$ );
- $\Delta T_m$  média logarítmica da diferença de temperatura, ( $\theta$ );
- $\Delta T_{mp}$  média logarítmica da diferença de temperatura da partícula, ( $\theta$ );
- $\Delta T_p$  diferença de temperatura da partícula, ( $\theta$ );
- v velocidade do gás na linha,  $(LT^{-1})$ .
- $V_0$  velocidade do ar na entrada no ciclone, (LT<sup>-1</sup>).

#### Letras gregas

- γ- coeficiente de acomodação, adimensional;
- $\Lambda$  caminho livre médio das moléculas de gás, (L);

- $\mu$  viscosidade dinâmica do fluido, (ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>);
- v- viscosidade cinemática do fluido,  $(L^2 T^{-1})$ ;
- $\rho$  massa específica, (ML<sup>-3</sup>);
- σ- caminho livre médio modificado, (L);
- $\sigma$  desvio padrão;
- x média do valor calclado e experimental.

#### **Subscritos**

calc - valor calculado por correlação;
exp - valor experimental;
e- saída do ar;
e1 - ar na saída superior do ciclone;
e2 - ar na saída inferior do ciclone;
f- fluido (ar);
man - fluido manométrico;
p- partícula;
1 - entrada;
2 - saída.

## Números Adimensionais

$$Fr_{D} = \frac{V_{0}^{2}}{gD} - número de Froude modificado;$$
$$G = \left(\frac{D - D_{e}}{b}\right) - parâmetro geométrico;$$

 $Nu_c = \frac{h_p D}{k}$  - número de Nusselt gás-partícula referenciado ao diâmetro da coluna cilíndrica do ciclone;

$$Nu_{D} = \frac{hD}{k} - número de Nusselt gás-parede do ciclone com particulados;$$
$$Nu_{0} = \frac{hd_{o}}{k} - número de Nusselt gás-parede sem particulados referenciado ao$$

bocal de entrada do ciclone;

$$Nu_{0_D} = \frac{hD}{k}$$
 - número de Nusselt gás-parede do ciclone sem particulados;

 $Nu_p = \frac{h_p d_p}{k}$  - número de Nusselt para a troca gás-partícula;

 $Nu_{pp} = \frac{h_{pp} d_p}{k}$  - número de Nusselt partícula-parede;

 $\operatorname{Re}_{\mathrm{D}} = \frac{\operatorname{V}_{0}\mathrm{D}}{\operatorname{v}}$  - número de Reynolds referenciado ao diâmetro do ciclone;

 $\operatorname{Re}_{0} = \frac{\operatorname{V}_{0} \operatorname{d}_{0}}{\operatorname{v}}$  - número de Reynolds referenciado ao diâmetro do bocal de

entrada do ciclone;

 $Re_{p} = \frac{V_{0}d_{p}}{v} - número de Reynolds da partícula;$  $Re_{w} = \frac{vD}{v} - número de Reynolds referenciado às dimensões da câmara$ 

vorticial;

$$\Pr = \frac{\mu C_p}{k} - \text{número de Prandtl.}$$

# **CAPÍTULO** 1

## INTRODUÇÃO

#### 1.1. O Ciclone trocador de calor

O ciclone é um equipamento normalmente utilizado na separação de sólidos de uma corrente gasosa. O ciclone apresenta na sua forma clássica uma construção cone-cilíndrica patenteada em 1886 por G. Jackson (Ogawa, 1989). Popularizou-se também o seu uso na limpeza de gases a altas temperaturas (Patterson e Munz, 1996).

O regime dinâmico em seu interior tem aumentado a viabilidade da utilização do ciclone como um equipamento de troca térmica (Baskakov et al., 1988). Em outras aplicações nas quais há troca térmica, existem trabalhos que estudam a viabilidade do ciclone como secador, como os de Nebra (1985) e Benta (1997).

Independente de quais forem os veículos de troca térmica, é comum classificar os trocadores de calor de acordo com a forma de transferência de calor entre as correntes envolvidas ou entre tais correntes e a parede do equipamento. As classificações de Levenspiel (1985) e Goldstein (1992) podem ser resumidas nas Figuras 1.1 e 1.2, respectivamente.



Figura 1.1 - Classificação de trocadores de calor (Levenspiel, 1985).



Figura 1.2 - Classificação de trocadores de calor (Goldstein, 1992).

À primeira vista, não é uma tarefa simples enquadrar o ciclone em uma das classificações apresentadas nas Figuras 1.1 e 1.2, isto decorre do modo como se dá a alimentação de calor ao interior ciclônico.

Tomando-se como referência o aquecimento de sólidos grossos de  $d_p>1mm$  e  $\rho_p>1500kg/m^3$ , parte-se do pressuposto que as partículas antes de entrarem no ciclone apresentam-se a temperatura ambiente. Já no interior do equipamento, as partículas encontram-se preferencialmente encostadas nas paredes, podendo vir a serem aquecidas, basicamente, por duas maneiras:

1- <u>via fluido de aquecimento</u>, ar ou gás de combustão, o qual entra em escoamento paralelo com as partículas. No interior ciclônico, as partículas recebem calor pelo contato direto com a corrente aquecida do fluido. Neste caso, o ciclone se enquadra, conforme classificação de Levenspiel (1985), no tipo "contato entre as correntes"; este tipo de troca térmica foi utilizado por Baskakov et al. (1988) e Cremasco et al. (1993) e está ilustrado na Figura 1.3;

2- <u>via manta de aquecimento</u> como aquele ilustrado na Figura 1.4 e utilizado por Szekely e Carr (1966), Lede et al. (1989) e Lombardi (1991). No interior ciclônico, tanto as partículas quanto o fluido de transporte recebem calor da parede do equipamento. Aqui, o ciclone se enquadraria, de acordo com a classificação de Goldstein (1992), no tipo "recuperadores", mais especificamente como um "aquecedor" ou "resfriador".



Figura 1.3 - Ciclone trocador de calor tipo "contato entre as correntes" (Cremasco et al., 1993).



Figura 1.4 - Ciclone trocador de calor tipo "recuperador" (Szekelly e Carr, 1966).

Pode-se fazer uma analogia à classificação de Strumillo e Kudra (1990) desenvolvida para secadores: leito estacionário (p.ex., bandeja), leito móvel (p.ex., rotativo) e regime fluidodinâmico ativo (p.ex., leito de jorro). Não fica difícil enquadrar o ciclone nesta última categoria: secador de regime fluidodinâmico ativo. Por conseguinte, o ciclone pode ser identificado como um trocador de calor de regime fluidodinâmico ativo com um complemento quanto à forma de aquecimento (ou resfriamento):

- contato direto entre correntes;

- recuperador.

Observa-se que esta definição é decorrente da fluidodinâmica e dos fenômenos de transferência de calor que ocorrem no interior do ciclone, tornando imprescindível o conhecimento de ambos para um futuro projeto de engenharia.

#### 1.2. Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é o estudo experimental da troca térmica gásparede (com e sem a presença de particulados) e gás-partícula em um trocador ciclônico do tipo contato entre correntes, como aquele ilustrado na Figura 1.3. Para tanto, são efetuados ensaios experimentais em dois ciclones tipo Lapple (com D=0,20m e D=0,15m) projetados e adquiridos pelo Laboratório da Processos em Meios Porosos (LPMP) da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Dentre as diversas opções de configurações ciclônicas existentes, decidiuse trabalhar com um ciclone clássico. Partindo desse pressuposto, o universo foi restrito a dois equipamentos, os ciclones Stairmand e Lapple. O primeiro apresenta, como característica básica, alta eficiência de separação e maior queda de pressão quando comparadas a um ciclone Lapple de mesmo diâmetro. Todavia, como esse trabalho se propõe a avaliar o ciclone como um trocador de calor ou aquecedor de particulados grossos, cuja eficiência de separação em ambos os ciclones é de 100%, optou-se pelo Lapple, pois é sabido que apresenta menor queda de pressão quando comparado ao ciclone Stairmand, ambos com o mesmo diâmetro da coluna cilíndrica.

Dada a importância do contato sólido/fluido no interior ciclônico, estudarse-á experimentalmente o tempo de residência de sólidos, considerando-se tanto as características da alimentação da mistura gás/partículas no ciclone e características físicas da fase particulada, bem como o efeito da geometria dos ciclones utilizados nesta Dissertação, a qual é a primeira a ser realizada abordando este assunto no LPMP/FEQ/UNICAMP.

Como decorrência dos ensaios experimentais, serão estabelecidas correlações para os fenômenos de transferência de calor abordados, de tal sorte

que retratem a influência dos particulados sólidos nos valores dos coeficientes convectivos de transferência de calor gás-parede e gás-partículas.

As correlações serão obtidas em função do número de Nusselt, número adimensional utilizado na análise da magnitude dos fenômenos envolvidos, e das características peculiares dos particulados. Já para o tempo de residência, as características geométricas do ciclone e as características dos particulados devem ser os parâmetros preponderantes.

Serão analisados também dados experimentais de transferência de calor retirados da literatura em ciclones de configurações geométricas diferentes daquelas utilizadas neste trabalho, provenientes dos trabalhos de Lombardi (1991) obtidos em um ciclone Stairmand modificado de alta eficiência e de Godoy (1989) e Cremasco e Nebra (1994), ambos obtidos em um ciclone Bernauer, cuja principal característica é a entrada em espiral. Pretende-se, com essa análise, a obtenção de correlações mais genéricas para o tempo de residência e coeficientes de transferência de calor para os ciclones.

# **CAPÍTULO 2**

# **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Como salientado no capítulo anterior, os estudos sobre a transferência de calor em ciclones não podem ignorar a relação entre a fluidodinâmica da corrente gasosa, com e sem particulados, no interior ciclônico e os fenômenos de transferência de calor. No entanto, uma extensa revisão bibliográfica no que tange o escoamento do ar, com e sem a presença de particulados, e a proposta de um modelo que descreve os campos de velocidade das fases fluida e particulada e o tempo de residência dos sólidos, podem ser encontradas no trabalho de Cremasco (1994).

Neste capítulo enfatizam-se trabalhos que tratam da transferência de calor e tempo de residência em ciclones, os quais são fundamentais para os objetos de estudo deste trabalho. Divide-se a análise dos trabalhos já publicados sobre transferência de calor em ciclones em duas partes, uma que trata da transferência de calor gás-parede com e sem a presença de particulados e uma outra, envolvendo a transferência de calor gás-partícula.

Nota-se, entretanto, que a quantidade de estudos sobre a transferência de calor em ciclones ainda pode ser considerada pequena, apesar da aplicação do ciclone como trocador de calor, mais especificamente como pré-aquecedor, datar de 1932 (Cremasco et al., 1993).

Dada a importância do conhecimento do tempo de residência para o estudo da troca térmica gás (com partículas)-parede e gás-partículas, além da obtenção experimental do coeficiente de troca térmica gás-partículas, uma breve revisão sobre este parâmetro também será realizada.

### 2.1. Transferência de calor gás-parede

#### 2.1.1. Gás limpo (sem particulados)

O estudo da transferência de calor em ciclones vem se tornando importante devido à crescente utilização destes equipamentos como secador, trocador de calor, combustor ciclônico, ou mesmo separador a altas temperaruras.

Klucovsky et al. (1962), utilizando um sistema ciclônico de diâmetro da coluna cilíndrica igual a 0,12 m, obtiveram coeficientes de transferência de calor gás-parede sem a presença de particulados. Os gases utilizados foram: ar, hidrogênio e propileno, sendo que, para cada experimento, um desses gases entra no equipamento a temperatura ambiente, sendo aquecido pelas paredes do ciclone. Os autores concluíram que o ciclone proporciona valores elevados para os coeficientes de transferência de calor entre as paredes do equipamento e o fluxo de gás. Nos experimentos, o ciclone foi mantido imerso em um banho termostático a 101<sup>o</sup>C. Esses autores propuseram a seguinte correlação para a estimativa do número de Nusselt:

$$Nu_{0} = 0,275 \operatorname{Re}_{0}^{0,8}$$
(2.1)

 $Nu_0 = \frac{h_0 d_0}{I}$ 

em que:

e

$$\operatorname{Re}_{0} = \frac{\operatorname{V}_{0} \operatorname{d}_{0}}{\operatorname{v}}$$
(2.3)

$$com d_0 = \frac{2ab}{(a+b)} (2.4)$$

(2.2)

O valor alto da constante (0,275) presente na Equação (2.1) deve ser atribuído ao fato de o sistema experimental em questão simular apenas a região de entrada do ciclone e o fluxo de gás incidir tangencialmente sobre a parede. Outra conclusão retirada deste trabalho é que o comprimento do tubo de entrada não influi significativamente no coeficiente de transferência de calor.

Szekely e Carr (1966) com um ciclone cujas dimensões estão apresentadas na Tabela 2.1, estudaram a transferência de calor gás-parede, obtendo, para o ar sem particulados, a correlação:

$$Nu_0 = 0,042 \operatorname{Re}_0^{0.8} \tag{2.5}$$

com intervalo de aplicabilidade de:  $2,0x10^4 \le \text{Re}_0 \le 7,0x10^4$ .

Tabela 2.1 - Dimensões do ciclone utilizado por Szekely e Carr (1966), D=0,152m.

a/D	b/D	h/D	H/D
0,17	0,38	1,00	2,17

A Equação (2.5) considera valores médios de transferência de calor em todo o ciclone e o número de Reynolds ( $Re_0$ ) é análogo ao da Equação (2.3). A importância do trabalho de Szekely e Carr (1966), é que a sua correlação, Equação (2.5), apresenta boa concordância com os dados experimentais obtidos por outros autores, como Lombardi (1991) e Cremasco et al. (1993).

Tomeczek e Tomornicki (1984) trabalharam com uma câmara vorticial com diâmetro da coluna cilíndrica igual a 0,17 m, na qual o aquecimento se dava por resistências elétricas justapostas à parede. Trabalhando com ar limpo, foi obtida a seguinte correlação para o cálculo do número de Nusselt gásparede:

$$Nu_0 = 0,184G^{0,594} Re_w^{0,65} Pr^{1/3}$$
(2.6)

em que:

$$G = \left(\frac{D - D_e}{b}\right) \tag{2.7}$$

$$\operatorname{Re}_{w} = \frac{vD}{v}$$
(2.8)

$$v = \frac{2Q}{(D - D_c)H}$$
(2.9)

 $\operatorname{com}$  H = altura da câmara vorticial.

No trabalho de Cremasco et al. (1993), verificou-se que , efetuando-se a substituição de v por  $V_0$  e tratando-se H como a altura do ciclone, a correlação de Tomeczeck e Komornicki (1984), Equação (2.6), pode ser aplicada com boa performance em ciclones Bernauer para o cálculo do número de Nusselt gásparede.

Lombardi (1991), utilizando um ciclone do tipo Stairmand modificado, cujas dimensões são apresentadas na Tabela 2.2, focou seus estudos na obtenção experimental de coeficientes de transferência de calor gás-partícula. Mas também foi feita, com dados preliminares de resultados com experimentos realizados com ar limpo, a análise da adequação da correlação de Szekely e Carr (1966) aos seus resultados experimentais. O autor considerou o desempenho da Equação (2.2) satisfatório.

Tabela 2.2 - Dimensões do ciclone Stairmand modificado (D=0,22m).

Tabera 2.2 - Dimensoes do elefone Stanmand mounteddo (D 0,22m).						
a/D	b/D	De/D	S/D	h/D	H/D	B/D
0,50	0,20	0,50	0,50	1,50	4,00	0,19

Cremasco et al. (1993) realizaram um estudo experimental sobre a transferência de calor gás-parede em um ciclone Bernauer com entrada em espiral de diâmetro igual a 0,315 m, ilustrado na Figura 1.3, e cujas dimensões

são mostradas na Tabela 2.3. O ar limpo, submetido a um aquecedor contendo 17 resistências elétricas, entra no ciclone tangencialmente.

Tabela 2	.3 - Dim	ensões do	ciclone	Bernaue	r (D=0,32	2m)
/17	1./0			1. / 1		

a/D	b/D	De/D	S/D	h/D	H/D	B/D
0,79	0,18	0,58	1,08	1,33	4,37	0,29

De posse dos dados experimentais, esses autores determinaram distribuições de temperatura do ar no interior do ciclone (Figura 2.1) e de velocidade do ar e obtiveram coeficientes médios de transferência de calor gásparede, originando a correlação:

$$Nu_{0} = 0,063 \operatorname{Re}_{0}^{0,75} \tag{2.10}$$

em que  $Nu_0$  e  $Re_0$  são definidos de acordo com as Equações (2.2) e (2.3), respectivamente.



Figura 2.1 - Distribuição de temperatura do ar limpo (Cremasco et al., 1993).

Esses autores testaram as correlações de Szekely e Carr (1966) e Tomeczek e Tomornicki (1984) e verificaram a boa concordância de ambas com os seus resultados experimentais.

A Tabela 2.4 sintetiza as correlações para estimativa do número de Nusselt gás-parede (sem particulados) encontradas na literatura.

Tabela 2.4 - Correlações para o número de Nusselt gás-parede sem particulados.

Autores	Correlações	Observações
Klucovsky et al.		câmara ciclônica
(1962),	$Nu_{*} = 0.275  Re_{*}^{0.8}$	D=0,12m
Equação (2.1)		ar, hidrogênio e propileno
		aquecimento parede-gás
Szekely e Carr		ciclone deD=0,152m
(1966),	$Nu_{0} = 0.042 Re_{0}^{0.8}$	aquecimento parede-ar
Equação (2.5)	0 2 0	$2,0x10^4 \le \text{Re}_0 \le 7,0x10^4$
Tomeczeck e	$Nu_0 = 0.184G^{0.594} Re^{0.65} Pr^{1/3}$	câmara vorticial
Komonornicki (1984),		D=0,17m
Equação (2.6)		aquecimento parede-ar
Cremasco et al.		ciclone com entrada em
(1993),	Nu. = $0.063 \mathrm{Re}^{0.75}_{1.00}$	espiral de D=0,32m
Equação (2.10)		aquecimento ar-parede
		$0,6x10^4 \le \text{Re}_0 \le 3,0x10^4$

### 2.1.2. Gás com particulados sólidos

Aprofundando seus estudos, Szekely e Carr (1966) realizaram testes com particulados sólidos em suspensão em ar, sendo os mesmos: areia, bronze e ferro no ciclone de dimensões apresentadas na Tabela 2.1. O aquecimento provinha de resistências elétricas justapostas às paredes externas do ciclone, conforme ilustrado na Figura 1.4. Por intermédio dos resultados obtidos, comprovou-se que a presença de particulados sólidos no fluxo gasoso, mesmo em pequenas quantidades, é uma barreira para a passagem de calor das paredes para o gás. Também foi estudada a influência da massa específica, calor específico e tamanho dos particulados. Em geral, quanto maior a massa e calor específicos, maior a taxa de transferência de calor das paredes para os sólidos, acarretando, em conseqüência disto, diminuição na transferência de calor gásparede.

Abriu-se definitivamente, com o trabalho de Szekely e Carr (1966), a discussão da utilização do ciclone como trocador de calor, principalmente nos casos nos quais é necessária boa troca de calor entre as paredes do equipamento e os sólidos presentes na corrente gasosa.

Baskakov et al. (1988) centraram seus estudos na utilização do ciclone como um equipamento de recuperação de calor de gases com particulados sólidos em alta concentração. Um ciclone, com diâmetro da coluna cilíndrica de 0,204 m e nove seções de resfriamento (camisas d'água) distribuídas pelo corpo do equipamento, foi o utilizado. Dentre os resultados apresentados, destaca-se a obtenção da distribuição de temperatura do ar previamente aquecido, com e sem particulados, sendo tomadas as temperaturas radialmente em 8 pontos, em cada uma das nove seções de resfriamento ao longo da altura do ciclone.

Para ambos os casos, escoamento do ar com e sem particulados, nota-se que as temperaturas mais baixas se encontram próximas à parede, atingindo um máximo ao caminhar para o centro, com uma leve queda nos últimos pontos de tomada de temperatura, próximos à região central do ciclone. Este comportamento já era suposto, pois ocorre a transferência de calor do fluxo gasoso para a parede, e a região central está sujeita ao intercâmbio de calor com o fluxo ascendente de gás, que já perdeu calor quando descendente. Determinou-se ainda a extensão do resfriamento da corrente gasosa com particulados, relativa ao resfriamento do ar limpo, em função da concentração de particulados, deixando clara a influência dos particulados na transferência de calor gás-parede. No trabalho de Cremasco e Nebra (1994), no qual foi utilizado um ciclone Bernauer, o qual está ilustrado na Figura 1.3 e cujas dimensões estão apresentadas na Tabela 2.3, encontra-se um estudo experimental que mostra a influência que as partículas exercem na distribuição de temperatura do gás, mais especificamente do ar. Esses autores apresentam a distribuição de temperatura no interior de um ciclone, mas não propõem correlações para o coeficiente convectivo de transferência de calor; seja para a troca gás-partícula seja para a troca gás-parede. Os autores observaram que a presença de sólidos altera visivelmente a distribuição de temperatura do ar, pois a massa de sólidos absorve calor, conseqüentemente provoca o resfriamento da corrente gasosa. A Figura 2.2 apresenta as distribuições de temperatura obtidas.



Figura 2.2 - Distribuições de temperatura do ar no ciclone, ar limpo (•) e ar com a presença de particulados (+), no caso microesfera de vidro ( $d_p = 1,43$  mm e  $C_v = 2,0x10^{-6}$ ), nas mesmas condições experimentais (Cremasco e Nebra, 1994).

Peres e Cremasco (1996) também estudaram a influência dos particulados sólidos na distribuição de temperatura da corrente gasosa em um ciclone Bernauer de entrada em espiral com D=0,315m (dimensões na Tabela 2.3), propondo uma correlação para o coeficiente de transferência de calor gás(com particulados)-parede, na forma:

Nu = 
$$\frac{1}{3} \left( \frac{d_p}{d_0} \right)^{-0.38} \left( \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right)^{-0.33} \left( \frac{f}{C_v} \right)^{0.062} Re_0^{0.6}$$
 (2.11)

$$Nu = \frac{hd_0}{k}$$
(2.12)

e Re<sub>0</sub> definido de acordo com a Equação (2.3).

Quantifica-se na Equação (2.11) a influência de parâmetros como a concentração volumétrica, diâmetro e massa específica dos particulados, na troca térmica entre a corrente gasosa e as paredes do ciclone.

### 2.2. Transferência de calor gás-partículas

Este tipo de troca térmica, já bastante estudada em outros equipamentos que proporcionam o contato gás-partícula, tais como transporte pneumático, leito fluidizado, tem como resultado clássico, para uma partícula esférica estacionária em um meio infinito, a solução analítica:

$$Nu_{p} = 2,0$$
 (2.13)

Esta equação foi o ponto de partida para muitos trabalhos posteriores, tal como o de Sidel'kovski e Shchevelev (1966) que realizaram a modelagem matemática da troca de calor convectiva entre gás e partículas finas

com

 $(d_p=100\mu m)$  em sistemas ciclônicos. Esses autores propuseram, a partir de dados experimentais encontrados na literatura, a seguinte correlação:

$$Nu_{p} = 2 + 0.16 \operatorname{Re}_{p}^{2/3}$$
 (2.14)

$$Nu_{p} = \frac{h_{p}d_{p}}{k}$$
(2.15)

$$\operatorname{Re}_{p} = \frac{\operatorname{ud}_{p}}{v}$$
(2.16)

e com u definida como a velocidade relativa das partículas, com um longo equacionamento apresentado pelos autores.

Para os estudos em ciclones, encontra-se uma correlação para o coeficiente de transferência de calor gás-partícula no trabalho de Frolov (1987), a qual apresenta um avanço significativo ao levar em consideração o efeito da concentração volumétrica das partículas ( $C_v$ ), tal como se segue:

Nu<sub>p</sub> = 
$$2(1 - C_v^{0,33})^{-1} + \frac{2}{3}(1 - C_v) \operatorname{Re}_p^{0,55} \operatorname{Pr}^{1/3}$$
 (2.17)

$$\operatorname{Re}_{p} = \frac{V_{0}d_{p}}{v}$$
(2.18)

na qual  $V_0$  é definida como a velocidade do gás na entrada do ciclone, sendo calculada pela equação:

$$V_0 = \frac{Q}{ab}$$
(2.19)

sendo

sendo

Yen et al. (1990) investigaram mais profundamente a transferência de calor gás-partícula em um ciclone. Para tanto, avaliaram a influência que as condições da vazão de alimentação do ar, bem como das partículas, exercem no coeficiente de troca térmica gás-partículas. Esses autores utilizaram um ciclone cujas dimensões estão apresentadas na Tabela 2.5, no qual entrava ar aquecido, a diversas vazões, carregado com partículas de areia com tamanhos de 24 a 65 mesh. Com um ciclone transparente de dimensões idênticas às do sistema experimental, foi verificado que as partículas sólidas se movem em espiral para baixo ao longo das paredes do ciclone e não se distribuem uniformemente na sua superfície. As distribuições de temperatura do gás em várias posições do ciclone foram encontradas, verificando-se o resfriamento do ar próximo ao ápice do ciclone, corroborando com trabalhos anteriores que já demonstravam que a menor temperatura do gás se encontra no ápice do equipamento.

Tabela 2.5 - Dimensões do ciclone utilizado por Yen et al. (1990), D=0,13m.					
a/D	D <sub>e</sub> /D	S/D	h/D	H/D	B/D
0,39	0,39	0,46	0,96	3,08	0,23

1 (1000) D-0 10

A dependência do coeficiente de transferência de calor gás-partícula, h<sub>p</sub>, em relação ao diâmetro da partícula e velocidade do gás na entrada do ciclone, foi obtida experimentalmente. Observou-se que o aumento do diâmetro das partículas, assim como o aumento da concentração de partículas sólidas, causa aumento no valor do coeficiente de transferência de calor gás-partículas.

Verificou-se que o coeficiente de transferência de calor gás-partícula aumenta à medida que se aumenta a velocidade do ar na entrada do ciclone somente a partir de uma certa concentração mássica de sólidos, pois para concentrações mássicas de sólidos inferiores a 0,1, constatou-se que o coeficiente de transferência de calor praticamente independe da velocidade do gás na entrada do ciclone.

O emprego da análise dimensional por parte dos autores aos resultados experimentais permitiu que se chegasse à seguinte correlação para o número de Nusselt da partícula referenciado ao diâmetro da coluna cilíndrica do ciclone, Nu<sub>c</sub>, para a transferência de calor gás-partícula:

Nu<sub>c</sub> = 
$$\left(\frac{h_p D}{k}\right) = 1300 \left(\frac{2d_p}{D}\right) C_M^{0,47} Re_D^{0,41} Pr^{1/3}$$
 (2.20)

sendo: 
$$\operatorname{Re}_{\mathrm{D}} = \frac{\mathrm{V}_{0}\mathrm{D}}{\mathrm{v}}$$
 (2.21)

e a troca térmica gás-partícula expressa por:

$$\mathbf{q} = \mathbf{m}_{p} C \mathbf{p}_{p} \Delta T_{p} = \mathbf{h}_{p} A_{p} \Delta T_{mp}$$
(2.22)

$$\Delta T_{\rm p} = T_{\rm p_{\rm e}} - T_{\rm p_{\rm 0}} \tag{2.23}$$

$$\Delta T_{m_{p}} = \frac{\left(T - T_{p}\right)_{0} - \left(T - T_{p}\right)_{e}}{\ln \left[\frac{\left(T - T_{p}\right)_{0}}{\left(T - T_{p}\right)_{e}}\right]}$$
(2.24)

$$A_{p} = \frac{\overset{\bullet}{m_{p}} t_{res}}{\frac{\pi}{6} \rho_{p} d_{p}^{3}} \cdot \frac{\pi d_{p}^{2}}{\phi} = \frac{6 \overset{\bullet}{m_{p}} t_{res}}{\phi \rho_{p} d_{p}}$$
(2.25)

sendo que  $A_p$  é a área de contato entre o gás e as partículas no ciclone e  $t_{res}$  é o tempo de residência das partículas.

Substituindo a Equação (2.25) na Equação (2.22), Yen et al. (1990) chegaram à estimativa do coeficiente de transferência de calor gás-partículas:

e
$$h_{p} = \frac{1}{6} \rho_{p} \phi d_{p} C_{p_{p}} \frac{\Delta T_{p}}{t_{res} \Delta T_{m_{p}}}$$
(2.26)

Lombardi (1991) deu uma importante contribuição aos estudos da transferência de calor em ciclones, utilizando um ciclone tipo Stairmand modificado de alta eficiência (altura da seção cilíndrica, h, 6% maior que o padrão e diâmetro do tubo de saída inferior, B, 49% menor), com diâmetro de 0,22 m (como indicado na Tabela 2.2), pelo qual escoava ar aquecido em seu interior e com quatro camisas d'água para resfriamento nas suas paredes externas, assim distribuídas no corpo do ciclone: uma plana na parte superior, uma cilíndrica na seção de entrada, outra cilíndrica na região entre a entrada e a seção cônica e a última, cobrindo a seção cônica do equipamento.

Os particulados sólidos utilizados foram microesferas de vidro, com os diâmetros médios de 109  $\mu$ m, 196  $\mu$ m e 269  $\mu$ m. Para cada diâmetro de partícula, trabalhou-se com cinco valores de velocidade do gás na entrada do ciclone (entre 6 e 14 m/s) e para cada velocidade, quatro valores de descarga de sólidos (de 0,082 a 0,30 kg/s).

No trabalho de Lombardi (1991), mesmo apresentando um amplo espectro de resultados experimentais, não se encontram correlações para os coeficientes de transferência de calor gás-partícula.

As medidas de transferência de calor foram efetuadas localmente, em cada seção correspondente a uma determinada camisa d'água e globalmente, considerando todo o ciclone, por intermédio de termopares colocados ao longo do equipamento.

Constatou-se um comportamento distinto para cada seção do ciclone, a tampa, as duas seções cilíndricas pelo autor consideradas e a seção cônica do equipamento.

De um modo geral, observou-se que o coeficiente de transferência de calor é afetado localmente pela presença do particulado. O valor do coeficiente médio de transferência de calor gás-partícula, aumenta com o aumento da concentração de sólidos e com a redução do diâmetro da partícula. Essa última constatação, segundo o autor, baseia-se no fato de o particulado mais fino cobrir uma extensão maior da parede e ter maior capacidade de intercâmbio. Esta análise se contrapõe aos resultados obtidos por Yen et al. (1990), pois segundo esses autores, o aumento do diâmetro da partícula aumenta o coeficiente de transferência de calor gás-partícula.

Lédé et al. (1992) realizaram um estudo experimental da transferência de calor entre as paredes de um reator ciclônico de diâmetro da coluna cilíndrica igual a 0,04 m e as fases gasosa e sólida. As dimensões do ciclone utilizado estão apresentadas na Tabela 2.6. Efetuaram experimentos com a utilização de diferentes gases na entrada do equipamento (ar, argônio, gás carbônico e hélio), a velocidade do gás, o material particulado (areia e bronze) de tamanhos entre 0,1 e 0,5 mm e a temperatura das paredes do ciclone, mantidas aquecidas a uma temperatura constante para cada experimento.

l abela 2.6	- Dimenso	es do cicio	ne utilizado	por Lede	et al. (1992	.), D=0,04m
a/D	b/D	D <sub>c</sub> /D	S/D	h/D	H/D	B/D
0,5	0,075	0,35	0,63	1,75	4,25	0,28

. . 1 4111 at al (1002) D=0.04

Os autores não propuseram nenhuma correlação para a estimativa do valor do coeficiente de transferência de calor gás-partícula. No tocante à troca de calor entre as partículas e a parede do ciclone, muito se avançou com o trabalho desses autores que culminou com a proposta de uma correlação para a troca térmica partícula-parede, na qual se afirma que esse coeficiente de transferência de calor não depende do tempo de contato nem das propriedades físicas do sólido, mas somente da sua granulometria e das propriedades do gás. Com isto, a correlação para o coeficiente de transferência de calor partícula-parede proposta por esses autores é:

$$Nu_{pp} = \left(\frac{2\sigma}{\phi d_{p}} + 1\right) \ln\left(\frac{\phi d_{p}}{2\sigma} + 1\right) - 1$$
(2.27)

$$\sigma = 2\Lambda \frac{2-\gamma}{\gamma}$$

em que 
$$\Lambda = \frac{16}{5} \left( \frac{RT_w}{2\Pi M_g} \right)$$

e 
$$\log_{10}\left(\frac{1}{\gamma}-1\right) = 0,6 - \frac{\frac{1000}{T_{w}}+1}{C_{A}}$$

sendo T<sub>w</sub>, temperatura da parede, expressa em Kelvin e C<sub>A</sub>, uma constante que para o ar é igual a 2,8.

 $\frac{\mu}{P}$ 

Peres e Cremasco (1997), analisando os resultados experimentais obtidos por Cremasco (1994) em um ciclone Bernauer, cujas dimensões estão na Tabela 2.3, trabalhando com microesferas de vidro e resina plástica, propuseram uma correlação para a estimativa do coeficiente de transferência de calor gás-partícula:

Nu<sub>p</sub> = 
$$28 \left( \frac{d_p}{d_0} \right) \left( \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0.7} \left( \frac{f}{C_v} \right)^{-0.9} Re_p^{0.75} Pr^{1/3}$$
 (2.28)

com Nu<sub>p</sub> dado pela Equação (2.15) e Re<sub>p</sub> pela Equação (2.18).

Comparando-se os expoentes dos parâmetros: concentração volumétrica, diâmetro e massa específica dos particulados, percebe-se que são de sinal contrário aos daqueles encontrados na Equação (2.11); comportamento já

com:

esperado, já que os particulados "roubam" calor da corrente gasosa, calor este que, em parte, iria para a parede.

A Tabela 2.7 fornece um resumo das correlações para o número de Nusselt para a transferência de calor gás-partícula em ciclones apresentadas neste trabalho.

Autores	Correlações	Observações
Sidel'kovski e		câmara ciclônica
Shchevelev (1966),	$Nu_n = 2 + 0.16 Re_n^{2/3}$	D=2m
Equação (2.14)	P ' P	d <sub>p</sub> =100μm
Frolov (1987),	$(1 - 0.33)^{-1} - \frac{2}{2}(1 - 0.55)$	1/3
Equação (2.17)	$\operatorname{Nu}_{p} = 2(1 - C_{v})^{2} + \frac{1}{3}(1 - C_{v})\operatorname{Re}_{p}^{2}$ Pi	
	$(2d_{\rm p})$ 0.47 0.41 1/2	ciclone
Yen et al. (1990),	$  Nu_c = 1300   -\frac{P}{D}   C_M^{0,47} Re_D^{0,41} Pr^{1/3}$	D==0,130m
Equação (2.20)		24 <d<sub>p&lt;65mesh</d<sub>
,		areia
Peres e Cremasco	$(d_{p})(\rho_{p}-\rho_{f})^{0,7}(f)^{-0,9}$	ciclone
(1997),	$  Nu_p = 28 \left( \frac{p}{d_p} \right) \left( \frac{r_p + r_1}{c_p} \right) = \left( \frac{r_1}{c_p} \right) = Re_p^{0.75} Pr^{1/3}$	D=0,32m
Equação (2.28)		0,84 <d<sub>p&lt;3,0mm</d<sub>
·····		plástico, vidro

Tabela 2.7 - Correlações para número de Nusselt gás-partícula em ciclones.

#### 2.3. Tempo de residência

A importância do conhecimento do tempo de residência está no fato de ser um parâmetro que fornece o tempo que a partícula se mantém em contato com o gás e com a parede do ciclone, sendo utilizado para o cálculo do coeficiente de troca de calor gás-partícula, como pode ser verificado na Equação (2.25), bem como para auxiliar a interpretação física dos fenômenos de troca térmica.

Neste tópico, dar-se-á um panorama dos trabalhos significativos encontrados na literatura voltados para a determinação do tempo de residência dos particulados no interior ciclônico.

Cremasco e Nebra (1994) afirmam que os sólidos sofrem ação de diversas forças no interior do ciclone, as quais estão intimamente relacionadas tanto com o campo de velocidade dos sólidos quanto o da corrente gasosa. Os autores constataram que o tempo de residência pode vir a ser o parâmetro a sintetizar o efeito dessas forças, por ser inversamente proporcional à componente axial de velocidade dos sólidos.

Dentre os métodos experimentais mais utilizados para a determinação do tempo de residência dos particulados, destacam-se:

<u>Método dos sólidos remanescentes</u>: Mede-se a vazão de sólidos que atravessa o ciclone em um tempo determinado. Interrompe-se a a alimentação e determinase a massa de particulados remanescentes no equipamento. O quociente destas duas medidas efetuadas fornece o tempo de residência médio dos particulados sólidos. Método utilizado por Mori et al.(1968), Lédé et al.(1989), Yen et al.(1990), Godoy et al.(1993) e Cremasco(1994).

<u>Método da DTR (distribuição do tempo de residência)</u>: Mede-se o tempo de residência de uma partícula repetidas vezes nas mesmas condições experimentais, obtendo-se a DTR estatisticamente, foi utilizado por Kang et al.(1989) e Lédé et al.(1989).

Lédé et al.(1989) compararam os resultados obtidos nos dois métodos e concluiram que levam a valores muito próximos entre si.

A Tabela 2.8 apresenta as correlações para o tempo de residência encontradas na literatura.

Tabela 2.8 - Correlações para o tempo de residência em ciclones encontradas na literatura. (baseado em Cremasco, 1996).

Autores	$t/t_o$ , em que $t_0(s)$	Limites de aplicação					
Mori et al. (1968)	$t/t_{o} = \left(\frac{d_{p}}{X}\right) C_{M}^{-0.75} F r_{D}^{0.80}$ $t_{0} = D/V_{0}; X = 0.74 \times 10^{-4} m, F r_{D} = \frac{V_{0}^{2}}{gD}$	$\begin{array}{c} D=0,06;0,12;0,24m\\ 20\sim40$					
Kang et al. (1989)	$t/t_{o} = 3.2 \times 10^{-2} V_{R}^{0,70} \rho_{R}^{0,42} H_{R}^{-1,70} Re_{p}^{0,43}$ $t_{0} = t_{0}^{(1)} = \frac{V_{s} - 0.5 V_{nl}}{Q}$ $\rho_{R} = \frac{\rho_{p}}{\rho} - 1, H_{R} = \frac{H}{H - h}, Re_{p} = \frac{d_{p} V_{0}}{v}$	$D=0,125m; \\ 0,14 < dp < 0,22mm; \\ 6,0 < V_0 < 17m/s; \\ 0,0 < C_V < 10^{-4} \\ carvão, vidro$					
Lede et al. (1989)	$t/t_o = 4 \times 10^{-5} \text{ Re}_p^{1,09} + 1$ $t_0 = t_0^{(3)} = \frac{H - 0.5a}{V_T}$	D=0,03;0,04;0,15m 0,2 <dp<3,2mm; 415 &lt; <math>Re_{po} &lt; 2,5 \times 10^{-5}</math> areia,vidro;bronze,madeira</dp<3,2mm; 					
Yen et al. (1990)	$t/t_{o} = \left(\frac{d_{p}}{X}\right)^{-0.125} C_{M}^{-0.75} Fr_{D}^{0.50}$ $t_{0} = D/V_{0}; X = 1,27 \times 10^{-3} m$	D=0,13m;0,3 <dp<0,6mm 7,0&lt;<math>V_0</math>&lt;15,7m/s; areia</dp<0,6mm 					
Godoy et al. (1993)	$t/t_{o} = {}_{1,69 \times 10^{-5}} \left(\frac{\rho_{p}}{\rho}\right)^{1,58} C_{V}^{-0.5} Re_{p}^{-0.12}$ $t_{0} = t_{0}^{(1)}$	D=0,315m;0,4 <dp<2,7 mm<br="">6,2&lt;<math>V_0</math>&lt;11,5m/s 7,0×10<sup>-6</sup> &lt; C<sub>V</sub> &lt; 5,0×10<sup>-4</sup> plástico,vidro,borra de café</dp<2,7>					
Cremasco (1996)	$\frac{t}{t_0} = 3.8 \times 10^{-5} \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^{1,2} (fC_M)^{-0.7} Fr_D^{-0.5} Re_p^{-0.1}$ com $t_0 = H/V_0$	$\begin{array}{c} D=0,315m; 1,2 < dp < 3,0 \text{ mm} \\ 5,36 < V_0 < 6, 0 \text{m/s} \\ 7,0 \times 10^{-6} < C_V < 5,0 \times 10^{-4} \\ \text{plástico e vidro} \end{array}$					
${}^{(1)}V_{n\ell} = \frac{\pi D^2}{4} \left[ (h-S) \right]$	$+\frac{\left(\ell+S-h\right)}{3}\left(1+\frac{d}{D}+\frac{d^2}{D^2}\right)\right]-\frac{\pi D_e^2}{4}\ell,\text{com}$	$\ell = 2,3D_e \left(\frac{D^2}{ab}\right)^{1/3}$ (em ft) e					
$\mathbf{d} = \mathbf{D} - \left(\mathbf{D} - \mathbf{B}\right) \left(\frac{\mathbf{S} + \ell}{\mathbf{H} - \ell}\right)$	$\frac{-\mathbf{h}}{\mathbf{h}} \mathbf{e} \ \mathbf{V}_{\mathbf{S}} = \frac{\pi}{4} \left( \mathbf{D}^2 - \mathbf{D}_{\mathbf{e}}^2 \right) \left( \mathbf{S} - \frac{\mathbf{a}}{2} \right);$						
${}^{(2)}V_{t} = \left[\frac{4}{225} \frac{g^{2} (\rho_{p-} \rho)^{2}}{\rho \mu}\right]^{1/3} d_{p}$							
$(3)_{V_{t}} = 0,27 \left[ \frac{gd_{p}(\rho_{p}-\rho_{p})}{2} \right]$	${}^{(3)}V_{t} = 0,27 \left[ \frac{gd_{p}(\rho_{p-}\rho)Re_{t}^{0,6}}{\rho} \right]^{0,5}, com \left( l \le Re_{t} \le 10^{3} \right);$						
$eV_t = 1,74\left[\frac{gd_p(\rho_{p-}\rho)}{\rho}\right]^{0,5}$ , para( $Re_t \ge 10^3$ ), com $Re_t = \frac{\rho v_t d_p}{\mu}$							

Observa-se que as correlações levam em consideração o efeito da concentração de particulados, exceção feita às correlações de Kang et al. (1989) e Lédé et al.(1989). O efeito dos parâmetros geométricos dos ciclones é outro fator importante presente nas correlações, assim como as propriedades físicas dos particulados sólidos. Salienta-se que a escolha de  $t_0$ , parâmetro geométrico de adimensionalização é particular a cada autor e que representa o tempo de residência do gás no interior do ciclone.

# **CAPÍTULO 3**

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Processos em Meios Porosos (LPMP) da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), constituindo este trabalho o primeiro a tratar dos fenômenos de transferência de calor em ciclones no laboratório supracitado.

#### 3.1. Materiais utilizados

Para a realização deste trabalho, os materiais de teste utilizados foram: microesferas de vidro (com 4 tamanhos distintos) e resina plástica. Esses materiais foram os escolhidos devido à disponibilidade, facilidade de manuseio e permitirem a separação de 100% no ciclone.

O diâmetro médio dos sólidos utilizados foi obtido mediante peneiramento, a partir da definição do diâmetro médio de Sauter:

$$\bar{\mathbf{d}}_{p} = \frac{1}{\Sigma\left(\frac{\mathbf{x}_{i}}{\mathbf{d}_{i}}\right)}$$
(3.1)

na qual x<sub>i</sub> é a fração mássica retida na peneira i.

As massas específicas dos materiais, apresentadas na Tabela 3.1, foram obtidas pelo método da picnometria. Os valores de esfericidade, calor

específico dos sólidos e fator de atrito mecânico partícula-parede, foram retirados da literatura.

material	d <sub>p</sub> (mm)	$\rho_{p}(kg/m^{3})$	<b>\$</b> <sup>(1)</sup>	$Cp_p (kJ/kgK)^{(1)}$	<b>f</b> <sup>(1)</sup>
microesfera de vidro	0,84	2460	1,0	1,55	0,1
microesfera de vidro	1,19	2460	1,0	1,55	0,1
microesfera de vidro	1,69	2460	1,0	1,55	0,1
microesfera de vidro	3,0	2460	1,0	1,55	0,1
resina plástica	3,49	1340	0,85	1,26	0,5

Tabela 3.1 - Características físicas dos materiais de teste.

<sup>(1)</sup>Advindos da literatura, Cremasco e Nebra (1994).

#### 3.2. Montagem experimental

A montagem experimental, ilustrada na Figuras 3.1 e 3.2, construída neste trabalho e instalada no LPMP/FEQ/UNICAMP, é toda isolada em fibra cerâmica de 1 polegada de espessura e alumínio corrugado de 0,15mm de espessura.



- 1 soprador
- 2 resfriador
- 3 aquecedor
- 4 tubo de Pitot

- 5 alimentador de sólidos
- 6 ciclone
- 7 coletor de sólidos
- 8 aquisitor de dados

Figura 3.1 - Montagem experimental (dimensões em metros).



Figura 3.2 - Detalhe fotográfico da montagem experimental.

 $\frac{1}{2}$ 

A montagem experimental consiste basicamente de:

- urn soprador do tipo turbo ventilador com 7,5 HP de potência, como mostrado na Figura 3.3;

- um resfriador tipo tubo-carcaça, mostrado na Figura 3.4, no qual o fluido refrigerante utilizado foi a água em contracorrente com o fluxo de ar. Na saída do ar do resfriador estava acoplado um termopar para acompanhamento de controle da temperatura do ar;

- urn aquecedor elétrico, mostrado na Figura 3.4, com quatro resistências com chaves tipo liga-desliga, de modo a controlar a temperatura do ar de aquecimento;



Figura 3.3 - Detalhe fotográfico do soprador.



Figura 3.4 - Detalhe fotográfico do resfriador e do aquecedor.

- um medidor de vazão tipo tubo de Pitot para a medida da velocidade do ar, calibrado no laboratório do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, num tubo de vento Print & Partness;

 termopares tipo T ligados a um sistema de aquisição de dados acoplado a um micro-computador 486, com software aquisitor de dados AQDADOS LYNX CAD 12/32;

A Figura 3.5 mostra o sistema de aquisição de dados utilizado.



Figura 3.5 - Detalhe fotográfico do sistema de aquisição de dados.

- um alimentador de sólidos marca Norma, modelo DE-2, que possui um silo fixo e uma calha vibratória, como mostrado na Figura 3.6. Tem-se acoplado ao alimentador um controlador de vazão de sólidos;

- um sistema de alimentação, projet**ad**o no LPMP/FEQ/UNICAMP, de mistura ar/particulado, em chapa galvaniza**d**a  $n^0$  24. Elaborou-se um estrangulamento na entrada de partículas para melhor**ar** o acesso destas à corrente gasosa;



Figura 3.6 - Detalhe fotográfico do alimentador de sólidos.

- manômetros de tubo em "U" para medidas de queda de pressão;

- uma válvula borboleta (presente apenas nos experimentos de determinação do tempo de residência) instalada entre uma das extremidades do alimentador da mistura ar/partículas e o ciclone, visando interromper o fluxo dessa mistura simultaneamente à interrupção da alimentação de ar nas tomadas de massa de sólido remanescente, para o posterior cálculo do tempo de residência;

- um coletor de sólidos acoplado à base inferior do ciclone, mostrado na Figura
3.7, de dimensões 0,20 x 0,25 x 0,30m;

- uma balança semi analítica, mostrada na Figura 3.7, marca C&F P.15, de divisão 50 g, destinada à medida da vazão mássica de sólidos;

- uma balança eletrônica marca Gehaka BG 400, de divisão 0,001 g, destinada à medida da massa remanescente coletada nos experimentos de tempo de residência;



Figura 3.7 - Detalhe fotográfico do coletor de sólidos e da balança.

- dois ciclones tipo Lapple de chapa galvanizada  $n^0$  24. A Figura 3.8 esquematiza os ciclones utilizados, cujas dimensões são apresentadas na Tabela 3.2 e um dos ciclones é mostrado na Figura 3.9.



Figura 3.8 - Ilustração dos ciclones utilizados.

1 abela 3.2	- Dimense	bes dos cici	ones $(D-0,$	S/D         h/D         H/D			
a/D	b/D	D <sub>e</sub> /D	S/D	h/D	H/D	B/D	
0,50	0,25	0,50	0,63	2,00	4,00	0,25	

Tabela 3.2 - Dimensões dos ciclones (D=0,15m e D=0,20m)



Figura 3.9 - Detalhe fotográfico de um dos ciclones utilizados.

#### 3.3. Rotina experimental

#### 3.3.1. Tempo de residência

- liga-se o soprador;

- abre-se a torneira de água para que ocorra o funcionamento do resfriador e se mantenha a temperatura de entrada do ar no ciclone próxima à ambiente;

- acompanha-se a leitura da temperatura no aquisitor de dados acoplado ao micro computador;

- estabelece-se o grau de vibração para a calha de sólidos;

Efetuam-se as medidas:

a) Vazão de alimentação do ar

- leitura da deflexão do fluido manométrico no tubo em "U", obtendo-se assim a queda de pressão medida pelo tubo de Pitot na linha de ar;

b) Vazão mássica de sólidos

 leitura da massa coletada na descarga de sólidos na balança de menor divisão 50 g;

- leitura no cronômetro do tempo despendido para coleta de sólidos.

c) Massa de sólidos remanescentes

Interrompe-se simultaneamente a alimentação de sólidos e de ar, e fechase a válvula borboleta de modo a isolar completamente o ciclone do fluxo de mistura ar/partículas. Coletam-se as partículas remanescentes em um recipiente apropriado e efetua-se a medida:

- leitura da massa de sólidos coletada na balança de menor divisão 0,001 g.

d) Massa de sólidos remanescentes no transporte pneumático

Em alguns ensaios, após obtida a massa de sólidos remanescentes no ciclone, abre-se a válvula borboleta e liga-se o soprador, de modo que o ar carregue as partículas retidas na seção de transporte pneumático para o ciclone. Coletam-se as partículas em um recipiente apropriado e efetua-se a medida:

- leitura da massa de sólidos coletada na balança de menor divisão 0,001 g.

#### 3.3.2. Transferência de calor

Visando a obtenção dos coeficientes de transferência de calor gás-parede (com e sem partículas) e gás-partícula, primeiramente escolhia-se a vazão assim como a temperatura do ar na entrada do ciclone. Antes de proceder a qualquer medida, aguardava-se o sistema atingir regime térmico permanente, o que acontecia por volta de duas horas após a ignição do sistema. O regime é considerado permanente quando as temperaturas acusadas pelos termopares situados na entrada do ciclone, saída do ar e saída dos sólidos não apresentam variação significativa ( $\pm 0,5^{\circ}$ C).

- liga-se o aquecedor com a combinação de resistências necessária para que se atinja determinada temperatura do ar de alimentação ao ciclone;

- estabelece-se o grau de vibração para a calha de sólidos (exceto nos ensaios experimentais para a determinação da troca de calor gás limpo/parede);

- acompanha-se a leitura da temperatura no aquisitor de dados acoplado ao micro computador até que se estabeleça regime térmico permanente;

Atingido o regime térmico permanente, as medidas efetuadas são:

a) Vazão de alimentação do ar

 leitura da deflexão manométrica do tubo de Pitot no manômetro de tubo em "U";

b) Vazão mássica de sólidos

 leitura da massa coletada na descarga de sólidos na balança de menor divisão 50 g;

- leitura no cronômetro do tempo despendido para coleta de sólidos.

c) Temperatura

- leitura das temperaturas nos termopares situados junto à parede do ciclone, na entrada e saída do ar de aquecimento e na saída de sólidos;

- leitura da temperatura de saída dos sólidos, os quais eram recolhidos em um calorímetro dotado de um termopar.

#### 3.4. Metodologia de cálculo

#### 3.4.1. Vazão de alimentação de ar

A partir da leitura da queda de pressão no manômetro de tubo em "U" instalado na linha de ar, calcula-se a vazão do ar de acordo com a formulação de calibração do tubo de Pitot, que segue:

$$Q = \frac{v\pi D^2}{4}$$
(3.1)

em que: 
$$\mathbf{v} = \mathbf{C} \left[ 2g\Delta \mathbf{P} \left( \frac{\rho_{\text{man}}}{\rho} - 1 \right) \right]^{1/2}$$
 (3.2)

sendo a constante de calibração C obtida da equação empírica:

$$C = 0,934308 + 0,128677\Delta P - 0,114387\Delta P^{2} + 0,0445225\Delta P^{3} - 0,00751935\Delta P^{4} + 0,00045763\Delta P^{5}$$

 $\operatorname{com} \Delta P$  dado em cm.

#### 3.4.2. Vazão mássica de sólidos

A vazão mássica de sólidos é obtida a partir da confecção do gráfico da variação da massa de sólidos retidos no coletor ao longo do tempo. O coeficiente angular da reta encontrada é a vazão mássica de sólidos, como ilustrado na Figura 3.10.

$${}^{\bullet}_{m} = \frac{m}{t}$$
(3.3)



Figura 3.10 - Obtenção da vazão mássica de sólidos.

É possível conhecer a concentração de sólidos na corrente gasosa, de posse da vazão de ar e vazão mássica de sólidos, nas formas:

Concentração volumétrica (Cv):

$$C_{v} = \frac{\frac{\dot{m}_{p} / \rho_{p}}{\dot{m}_{p} / \rho_{p} + Q}$$
(3.4)

Concentração mássica (C<sub>M</sub>):

$$C_{\rm M} = C_{\rm v} \frac{\rho_{\rm p}}{\rho} \tag{3.5}$$

#### 3.4.3. Tempo de residência dos particulados

O tempo de residência é calculado de acordo com o método dos sólidos remanescentes.

$$t_{\rm res} = \frac{m_{\rm R}}{m_{\rm p}}$$
(3.6)

em que  $m_R$  é a massa de sólidos remanescentes no ciclone.

#### 3.4.3.1. Ação da válvula borboleta

Obtida a massa de sólidos remanescentes no transporte pneumático ( $s_R$ ), calcula-se o tempo ( $t_{RS}$ ) que seria obtido se não existisses o desvio do fluxo de ar ou, mais especificamente, a válvula borboleta.

$$t_{\rm RS} = \frac{m_{\rm R} + s_{\rm R}}{m_{\rm p}}$$
(3.7)

# 3.4.4. Coeficiente de transferência de calor gás-parede (com e sem particulados)

O procedimento para a estimativa do coeficiente de troca térmica gásparede nesse trabalho é o mesmo daquele adotado por adotado por Szekely e Carr (1966), Cremasco et al. (1993), Peres e Cremasco (1996,1997):

$$h = \frac{q}{A_c \Delta T_m}$$
(3.8)

e

em que: 
$$q = m C_p (T_0 - T_e)$$
 (3.9)

$$\Delta T_{m} = \frac{(T_{0} - T_{w}) - (T_{e} - T_{w})}{\ell n \left(\frac{T_{0} - T_{w}}{T_{e} - T_{w}}\right)}$$
(3.10)

sendo  $T_w$  a média dos valores da temperatura do ar ou da mistura gáspartículas tomadas junto à parede do ciclone na entrada e saída da mistura.  $T_0$  e  $T_e$  são as médias das temperaturas de entrada e de saída da mistura, respectivamente, provenientes da varredura efetuada pelos termopares ao longo do raio. Neste caso, os termopares foram deslocados radialmente da parede do equipamento ao centro do fluxo da mistura e fixados em um ponto determinado para a obtenção das temperaturas. A área de troca térmica,  $A_c$ , considera toda a área lateral do ciclone, inclusive a tampa, e o valor calculado é:  $A_c = 0,304m^2$ , para o ciclone de D = 0,15m e  $A_c = 0,503m^2$ , para o ciclone de D = 0,20m,

Os valores do número de Nusselt experimental são calculados em função do diâmetro do ciclone:

$$Nu_{D} = \frac{hD}{k}$$
(3.11)

com k do ar avaliado na temperatura média entre a entrada e a saída da mistura, (Perry e Chilton, 1985).

$$k = 10,13 + 0,049T + 3,3x10^{-5}T^2 - 2,38x10^{-8}T^3$$
 (3.12)

com k dado em  $\left[10^{-3} \,\mathrm{Wm}^{-1} \mathrm{K}^{-1}\right]$  e T em [K].

$$\bar{T} = \frac{1}{2} (T_0 + T_e)$$
 (3.13)

#### 3.4.5. Coeficiente de transferência de calor gás-partícula

Os valores do número de Nusselt gás-partícula experimental são determinados segundo:

$$Nu_{p} = \frac{h_{p}d_{p}}{k}$$
(2.15)

em que a condutividade térmica do ar, k, foi avaliada na temperatura média do ar medida na entrada e na saída do ciclone, definida de acordo com as Equações (3.12) e (3.13).

O procedimento para a estimativa do coeficiente de troca térmica gáspartícula é o mesmo do adotado por Yen et al. (1990) e Peres e Cremasco (1997):

$$\mathbf{h}_{p} = \frac{1}{6} \rho_{p} \phi \mathbf{d}_{p} C \mathbf{p}_{p} \frac{\Delta T_{p}}{\mathbf{t}_{res} \Delta T_{mp}}$$
(2.26)

sendo

$$\Delta T_{\rm p} = T_{\rm p_e} - T_{\rm p_0} \tag{2.23}$$

$$\Delta T_{m_{p}} = \frac{\left(T - T_{p}\right)_{0} - \left(T - T_{p}\right)_{e}}{\ln \left[\frac{\left(T - T_{p}\right)_{0}}{\left(T - T_{p}\right)_{e}}\right]}$$
(2.24)

e t<sub>res</sub> é o tempo de residência das partículas.

Por intermédio da rotina experimental e da metodologia de cálculo apresentadas neste capítulo, obtêm-se os resultados experimentais de tempo de residência e os coeficientes de transferência de calor entre o gás e as paredes (com e sem particulados) e entre o gás e as partículas, nos ciclones Lapple, objetos de estudo desta Dissertação.

Os resultados advindos desse estudo experimental são apresentados e analisados no Capítulo 4.

# **CAPÍTULO 4**

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste tópico são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos nesta Dissertação. O primeiro passo é estudar os resultados coletados referentes ao tempo de residência das partículas (microesferas de vidro e resina plástica) no interior ciclônico, verificando a influência da geometria do ciclone nesta grandeza. Paralelamente, a influência de parâmetros como concentração volumétrica, diâmetro e massa específica das partículas e velocidade do ar será avaliada, sendo que o estudo da ação da válvula borboleta também é efetuado.

Determinado o tempo de residência das partículas no interior dos ciclones Lapple (D = 0,15m; 0,20m), efetuar-se-á a análise dos ensaios experimentais de transferência de calor relativos aos coeficientes de troca térmica gás-parede (com e sem particulados), quanto gás-partícula. Paralelamente, serão analisados os dados experimentais oriundos dos trabalhos de Godoy (1989), Lombardi (1991), Cremasco et al. (1993), Cremasco e Nebra (1994) e Peres e Cremasco (1996).

#### 4.1. Estudo da ação da válvula borboleta

Durante alguns dos ensaios estudou-se a importância da válvula borboleta na determinação do tempo de residência. Verificou-se que, em certos casos, a ausência dessa válvula acarretaria um grande erro na determinação do tempo de residência, como pode ser observado na Tabela 4.1. Esta tabela foi confeccionada calculando-se o tempo de residência que seria obtido caso não fosse interrompido simultaneamente a alimentação de sólidos e de ar no ciclone. Esse tempo  $(t_{RS})$  é calculado segundo a Equação (3.7).

ens.	D	material	d <sub>p</sub>	$C_v x 10^5$	•	m <sub>R</sub>	SR	t <sub>res</sub>	$t_{RS}(s)$
	(m)		(mm)		$\mathbf{m}_{p}$	(g)	(g)	(s)	
					(g/s)				
1	0,15	esf.vidro	1,19	1,21	0,88	7,02	0,35	8,38	8,40
2	0,15	esf.vidro	1,19	1,46	0,83	3,74	0,26	4,71	4,82
3	0,15	esf.vidro	1,19	2,59	0,88	1,26	0,85	1,81	2,38
4	0,15	esf.vidro	1,19	2,14	0,59	0,60	0,94	1,34	2,59
5	0,15	esf.vidro	1,69	1,95	0,67	1,09	0,60	2,09	2,53
6	0,15	esf.vidro	1,69	2,02	1,63	13,45	0,11	8,27	8,32
7	0,15	esf.vidro	1,69	0,91	0,75	8,80	0,42	12,13	12,29
8	0,20	esf.vidro	0,84	1,29	1,10	21,95	0,05	19,45	20,00
9	0,20	esf.vidro	0,84	2,91	0,99	3,14	2,27	2,67	5,45
10	0,20	esf.vidro	0,84	1,71	0,58	1,81	0,87	2,65	4,61
11	0,20	esf.vidro	1,19	8,23	2,81	6,09	3,40	2,01	3,38
12	0,20	esf.vidro	1,19	0,94	0,32	1,20	0,48	3,21	5,24
13	0,20	esf.vidro	1,19	0,73	0,44	6,07	0,36	13,30	14,61
14	0,20	esf.vidro	1,69	3,03	1,04	3,18	2,25	2,65	5,24
15	0,20	esf.vidro	1,69	0,90	0,54	9,23	0,39	16,50	17,83

Tabela 4.1 - Resultados obtidos no estudo da ação da válvula borboleta.

Constata-se, pela inspeção da Tabela 4.1, que para ensaios como o 4, do 9 ao 12 e 14, que com a presença da válvula borboleta, evitam-se erros na determinação do tempo de residência superiores a 100%. Isso ocorre pelo fato de ficar sólido retido na região de transporte pneumático entre a alimentação e a entrada do ciclone. Sem a válvula borboleta, há um fluxo de ar residual, fruto da inércia do ventilador, que acaba por arrastar a massa de sólidos remanescentes no transporte pneumático ( $s_R$ ) para o ciclone, superestimando os resultados. Sendo assim, comprovou-se que a interrupção instantânea e simultânea das alimentações de ar e sólidos é de suma importância nos cálculos de tempo de residência dos sólidos e é uma condição garantida neste trabalho.

### 4.2. Tempo de residência

Foram efetuados 30 experimentos para a obtenção do tempo de residência dos particulados sólidos (microesferas de vidro e resina plástica) apresentados na Tabela 3.1. Deste conjunto, 17 experimentos foram realizados no ciclone de D=0,15m e 13 no ciclone de D=0,20m, com a velocidade de entrada do ar nos ciclones na faixa entre 5,54 e 17,13 m/s. Os resultados experimentais são apresentados na Tabela 4.2.

ensaios	D (m)	material	$d_{p}(mm)$	$V_0 (m/s)$	$C_v x 10^3$	$t_{res}(s)$
1	0,15	plástico	3,49	6,85	7,64	0,94
2	0,15	plástico	3,49	6,85	3,59	0,93
3	0,15	plástico	3,49	12,12	1,43	5,19
4	0,15	plástico	3,49	16,66	4,16	5,38
5	0,15	plástico	3,49	17,13	2,11	9,01
6	0,15	esf. vidro	0,84	6,84	2,31	1,90
7	0,15	esf. vidro	0,84	6,84	1,22	1,88
8	0,15	esf. vidro	0,84	10,65	0,63	4,22
9	0,15	esf. vidro	0,84	17,13	0,62	18,13
10	0,15	esf. vidro	0,84	16,65	1,18	10,87
11	0,15	esf. vidro	1,19	14,58	1,23	8,38
12	0,15	esf. vidro	1,19	11,41	1,56	4,71
13	0,15	esf. vidro	1,19	6,84	2,59	1,81
14	0,15	esf. vidro	1,19	5,54	2,14	1,34
15	0,15	esf. vidro	1,69	6,84	1,95	2,09
16	0,15	esf. vidro	1,69	16,16	2,15	8,27
17	0,15	esf. vidro	1,69	16,65	0,90	12,13
18	0,20	plástico	3,49	16,16	4,26	6,25
19	0,20	plástico	3,49	15,66	1,63	12,10
20	0,20	plástico	3,49	7,96	2,73	2,10
21	0,20	plástico	3,49	7,96	5,41	2,25
22	0,20	plástico	3,49	12,12	2,92	4,11
23	0,20	esf. vidro	0,84	17,13	1,29	19,45
24	0,20	esf. vidro	0,84	6,84	2,91	2,67
25	0,20	esf. vidro	0,84	6,84	1,71	2,65
26	0,20	esf. vidro	1,19	6,84	8,23	2,01
27	0,20	esf. vidro	1,19	6,85	0,94	3,21
28	0,20	esf. vidro	1,19	12,12	0,73	13,3
29	0,20	esf. vidro	1,69	6,85	3,03	2,65
30	0,20	esf. vidro	1,69	12,12	0,90	16,5

Tabela 4.2 - Resultados de tempo de residência em ciclones Lapple.

Em primeira análise, como pode ser visto nos ensaios 4 e 18, 7 e 25, 17 e 30, verifica-se que o ciclone de maior diâmetro (D=0,20m) apresenta, para todos os materiais estudados, tempos de residência ligeiramente superiores àqueles encontrados para o ciclone de D=0,15m, o que era esperado, já que nas mesmas condições experimentais, os sólidos têm de percorrer uma maior distância no interior do ciclone de maior diâmetro.

A influência das propriedades físicas dos sólidos e das características do ciclone pode ser estudada separadamente, avaliando-se os efeitos de cada parâmetro no tempo de residência.

a) Concentração volumétrica dos sólidos

Pela inspeção das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, constata-se que com o aumento da concentração volumétrica de sólidos ocorre redução no tempo de residência desses particulados no ciclone, corroborando as observações feitas por Mori et al. (1969), Yen et al. (1990), Godoy et al. (1993) e Cremasco (1994, 1995).

O comportamento apresentado nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 é justificado devido ao fato de ao se aumentar a concentração de sólidos junto à periferia do ciclone, diminui-se a componente tangencial da velocidade da corrente gasosa e em conseqüência, a ação da força centrífuga que prende as partículas à parede, acarretando a diminuição no tempo de residência. Nota-se, para  $C_v > 4,0x10^{-5}$ , que não há mais influência da concentração volumétrica dos sólidos no tempo de residência. Existe uma tendência de maior influência das características físicas dos materiais e dos tamanhos dos ciclones utilizados.

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 ilustram a influência da concentração volumétrica dos sólidos no tempo de residência desses materiais no ciclone.



Figura 4.1 - Influência da concentração volumétrica no tempo de residência das partículas.



Figura 4.2 - Influência da concentração volumétrica no tempo de residência das partículas para o ciclone de D = 0,15m.



Figura 4.3 - Influência da concentração volumétrica no tempo de residência das partículas para o ciclone de D = 0,20 m.

#### b) Diâmetro das partículas

Comportamento análogo aos relatados por Mori et al. (1968) e Cremasco (1994) é constatado. Diminuindo-se o diâmetro das partículas, as mesmas tendem a permanecer por menos tempo no ciclone. Em função das características físicas dos materiais utilizados neste trabalho, a tendência deles é a de permanecerem junto à periferia ciclônica. Em virtude desse comportamento, a componente axial da velocidade das partículas se apresenta no mesmo sentido da componente axial da velocidade do ar. Deste modo, diminuindo-se o diâmetro das partículas, aumenta-se a ação da força de arraste na direção axial perto da parede do ciclone, aumentando a aceleração da componente axial da velocidade da fase particulada, diminuindo o valor da componente axial da velocidade da fase particulada, diminuindo o tempo de residência das partículas no ciclone, já que este é inversamente proporcional à componente axial da velocidade das partículas.

#### c) Massa específica da partícula

Observa-se, em concordância com Kang et al. (1989) e Godoy et al. (1993), que ao se aumentar a massa específica da partícula, eleva-se o seu tempo de permanência no interior ciclônico. Pode-se atribuir a esse comportamento a mesma justificativa apresentada para o diâmetro da partícula. Ao se aumentar a massa específica da partícula, diminui-se a ação do arraste e com isto desacelera-se a componente axial da velocidade das partículas, aumentando, por via de conseqüência, o tempo de residência das partículas.

#### d) Diâmetro do tubo de saída inferior (B)

Por intermédio da análise da geometria dos ciclones, deduz-se que ao se diminuir o diâmetro do tubo de saída inferior do ciclone, aumenta-se o tempo em que as partículas permanecem no ciclone. Este comportamento pode estar associado ao fato de ao se diminuir B, aumenta-se a zona de recirculação da mistura na base do ciclone, o que provoca a suspensão do particulado nesta região e acarreta aumento do tempo de residência das partículas.

e) Número de Froude modificado

O número de Froude modificado é definido por:

$$Fr_{D} = \frac{V_{0}^{2}}{gD}$$
(4.1)

Como pode ser observado na Equação (4.1), o número de Froude modificado fornece a razão entre as ações das forças centrífuga e gravitacional atuantes sobre a partícula. A ação da força centrífuga "prende" as partículas na parede, em contrapartida, a ação gravitacional as "empurra" em direção ao coletor de sólidos. Pelo fato de a força gravitacional ser constante, ao se aumentar a velocidade do ar na entrada do ciclone, eleva-se a ação da força centrífuga no interior do ciclone, "prendendo" por mais tempo as partículas junto à parede do equipamento e, por conseguinte, elevando o tempo de residência dos sólidos.

De posse dos resultados experimentais expressos na Tabela 4.2, foram testadas as correlações mostradas na Tabela 2.7 desta Dissertação. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 4.3.

continuas na Tabera 2.7.	n = 30  ensa	ios experimentais	<u>).</u>
Correlação	x	M.D.R. (%)	σ
Mori et al. (1968)	2,38	69,41	7,89
Kang et al. (1989)	0,11	90,31	0,16
Lede et al. (1989)	0,024	97,58	0,017
Yen et al. (1990)	0,46	52,65	0,31
Godoy et al. (1993)	1,71	114,67	1,78
Cremasco (1994)	3,97	362,66	3,34

Tabela 4.3 - Análise do desempenho das correlações de tempo de residência contidas na Tabela 2.7. (N = 30 ensaios experimentais).

Sendo a média da razão dos valores calculados e experimentais (x), média dos desvios relativos (M.D.R.) e desvio padrão (σ) calculados por:

M.D.R = 
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} D.R \times 100\%$$
 (4.2)

$$D.R = \frac{|exp-calc|}{exp}$$
(4.3)

$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} \frac{\text{calc}}{\exp}$$
(4.4)

com

$$\sigma = \left[ \left(\frac{1}{N-1}\right) \left(\sum_{i=1}^{n} x^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{I=1}^{n} x\right)^2 \right) \right]^{1/2}$$

e

$$x = \frac{\text{calc}}{\exp}$$
(4.6)

Analisando-se a Tabela 4.3, constata-se que nenhuma das correlações se mostrou adequada à estimativa do tempo de residência dos particulados utilizados nos ciclones tipo Lapple desse trabalho. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de cada um dos autores ter trabalhado com partículas sólidas diversas, com granulometria diferente e em ciclones de configurações geométricas distintas.

Quanto às correlações de Godoy (1989) e Cremasco (1994), as que apresentaram maiores desvios, embora tenham utilizado os mesmos materiais de teste desse trabalho (microesferas de vidro e resina plástica), deve-se atentar para o fato de terem sido obtidas em um ciclone Bernauer com características muito peculiares, com entrada em espiral, o que permite uma ação maior da força centrífuga, e uma longa distância (1,1m) entre a alimentação de sólidos e a entrada do ciclone, sem que houvesse um mecanismo eficiente de interrupção simultânea da alimentação de ar e de sólidos ao ciclone, por intermédio de uma válvula borboleta ou um desvio de fluxo, comprometendo a extensão dos resultados desses autores a outras configurações ciclônicas.

De posse das análises precedentes, conclui-se que o tempo de residência das partículas no interior do ciclone é dependente da faixa de velocidade de entrada do ar no ciclone, da concentração volumétrica dos sólidos e características das partículas, além das características geométricas dos ciclones. Sendo assim, tornou-se necessária a proposta de uma correlação para o tempo de residência em ciclones Lapple, expressa por:

(4.5)
$$\frac{t}{t_{o}} = 4,86 \times 10^{-8} \left(\frac{d_{p}}{B}\right)^{0,10} \left(\frac{\rho_{p} - \rho_{f}}{\rho_{f}}\right)^{0,40} C_{v}^{-0,35} Fr_{D}^{0,84} Re_{D}^{1,08}$$
(4.7)

$$t_0 = \frac{D}{V_0} \tag{4.8}$$

sendo N = 30, média da relação entre os valores de tempo de residência calculados e experimentais,  $\bar{x} = 0,998$ , média dos desvios relativos, M.D.R.=13,66% e desvio padrão,  $\sigma = 0,18$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6).

Essa correlação, Equação (4.7), aplica-se a ciclones do tipo Lapple de diâmetros da coluna cilíndrica de 0,15m e 0,20m, nos seguintes intervalos:

 $5,54 \text{ m/s} \le \text{V}_0 \le 17,13 \text{ m/s};$  $0,62 \text{ x} 10^{-5} \le \text{C}_{\text{v}} \le 8,23 \text{ x} 10^{-5};$  $0,84 \text{ mm} \le \text{d}_{\text{p}} \le 3,49 \text{ mm}.$ 

A Figura 4.4 apresenta o desempenho da correlação proposta neste trabalho frente aos resultados experimentais.

com



Figura 4.4 - Desempenho da Equação (4.7).

## 4.2.1. Correlação geral para o tempo de residência

Obtida a Equação (4.7), decidiu-se avaliar a sua aplicabilidade a outras configurações geométricas de ciclone. Com esse intuito, resgataram-se os resultados experimentais de Godoy (1989) e Cremasco (1994). Esses autores coletaram seus dados em um ciclone com entrada em espiral da marca Bernauer, cujas dimensões foram apresentadas na Tabela 2.3, de características muito distintas dos ciclones Lapple. Foram tomados 6 dados experimentais de tempo de residência de particulados de Godoy (1989) e 7 de Cremasco (1994), sendo que ambos utilizaram microesferas de vidro e resina plástica compreendidas na faixa de  $0,84 \le d_p \le 2,7 \text{ mm.}$  e trabalharam com  $7,0x10^{-6} \le C_v \le 5,0x10^{-4}$  e  $5,36 \le V_0 \le 11,50 \text{ m/s.}$ 

Verificaram-se, para N=13, os seguintes desvios: média da razão dos valores calculados e experimentais,  $\bar{x} = 0,552$ , média dos desvios relativos, M.D.R. = 44,84% e desvio padrão,  $\sigma = 0,22$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6). A Figura 4.5 ilustra o desempenho da Equação (4.7) para o ciclone Bernauer.



Figura 4.5 - Desempenho da Equação (4.7) frente ao ciclone Bernauer.

Comparando-se as Figuras 4.4 e 4.5, nota-se que os resultados de tempo de residência nos ciclones Bernauer são inferiores aos obtidos nos ciclones Lapple. Isso pode ser explicado em virtude desses ciclones apresentarem configurações geométricas bem distintas entre si, destacando-se o fato de a entrada no ciclone Bernauer ser em espiral. Esta característica geométrica permite ao ciclone Bernauer apresentar maior ação da força centrífuga, para as mesmas condições de alimentação do gás na entrada do equipamento.

No entanto, embora a força centrífuga seja maior para as mesmas condições de entrada no ciclone, Godoy (1989) e Cremasco (1994) trabalharam

com faixas de velocidade do ar na entrada do ciclone inferiores ao desta Dissertação, acarretando menores valores de tempo de residência dos particulados no ciclone Bernauer.

Deste modo, visando a proposição de uma correlação geral para a estimativa do tempo de residência em ciclones de diferentes configurações, torna-se necessário o ajuste do efeito do número de Froude modificado e a inserção de um parâmetro geométrico (H/D). Feito isto, a correlação obtida é:

$$\frac{t}{t_{o}} = 2,19 \times 10^{-10} \left(\frac{d_{p}}{B}\right)^{0,10} \left(\frac{\rho_{p} - \rho_{f}}{\rho_{f}}\right)^{0,40} \left(\frac{H}{D}\right)^{4,0} C_{v}^{-0,35} Fr_{D}^{0,74} Re_{D}^{1,10}$$
(4.10)

com t<sub>0</sub> avaliado de acordo com a Equação (4.8) e N = 43, Fr<sub>D</sub> e Re<sub>D</sub> dados, respectivamente, pelas Equações (4.1) e (4.9). Os desvios obtidos para a Equação (4.10) foram: média da razão dos valores calculados e experimentais,  $\bar{x} = 0,932$ , média dos desvios relativos, M.D.R. = 18,92% e desvio padrão,  $\sigma = 0,23$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6).

Essa correlação, Equação (4.10), aplica-se a ciclones do tipo Lapple (D=0,15m e 0,20m) e Bernauer (D=0,32m), nos seguintes intervalos:

 $5,54 \text{ m/s} \le V_0 \le 17,13 \text{ m/s};$  $0,62 \times 10^{-5} \le C_v \le 50,0 \times 10^{-5};$  $0,84 \text{ mm} \le d_p \le 3,49 \text{ mm}.$ 

A Figura 4.6 apresenta a performance da Equação (4.10) frente aos resultados experimentais.



Figura 4.6 - Desempenho da Equação (4.10).

Com a obtenção da Equação (4.10), a qual apresenta desempenho satisfatório, como pode ser notado pela inspeção da Figura 4.6, finaliza-se a apresentação e análise dos resultados de tempo de residência, partindo-se agora para os resultados de transferência de calor.

## 4.3. Transferência de calor gás-parede

Para o estudo da troca térmica entre o gás e as paredes do ciclone com gás limpo, ou seja, sem a presença de particulados, efetuaram-se 8 ensaios experimentais, sendo 4 para cada ciclone, com  $5,61 \le V_0 \le 12,37$  m/s,  $68,6^0 C \le T_0 \le 109,6^0 C$  e com um coletor de sólidos acoplado na saída inferior do equipamento. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.4.

ensaios	D (m)	$V_0 (m/s)$	$T_0(^{\circ}C)$	$T_{e}(^{\circ}C)$	$T_{e2}$ (°C)	$T_w(^{\circ}C)$	$h_0 (W/m^2K)$
1	0,15	10,87	70,0	66,7	44,0	63,5	51,35
2	0,15	12,37	109,6	102,5	65,0	96,3	62,93
3	0,15	5,61	68,6	64,3	36,6	62,5	45,66
4	0,15	5,61	109,0	99,0	62,6	95,0	46,87
5	0,20	5,60	79,3	73,1	32,3	71,3	33,67
6	0,20	11,65	108,0	100,9	43,5	98,0	58,10
7	0,20	8,11	103,8	95,7	43,8	92,4	40,50
8	0,20	10,04	105,3	96,0	40,5	93,0	57,07

Tabela 4.4 - Resultados de transferência de calor para gás limpo.

A análise dos efeitos das condições de alimentação do ar no ciclone que influenciam a troca de calor entre o ar e as paredes do ciclone pode ser efetuada separadamente.

## a) Velocidade do ar na entrada do ciclone

Por intermédio da análise dos ensaios 1 e 3, 2 e 4, 7 e 8, nos quais se têm o diâmetro do ciclone fixo e as temperaturas do ar na entrada do ciclone praticamente iguais, constata-se que ao se aumentar a velocidade do ar na entrada do ciclone ( $V_0$ ), aumenta-se o coeficiente de transferência de calor gásparede ( $h_0$ ). Isto pode ser atribuído ao aumento da força centrífuga e do turbilhonamento no interior ciclônico, acarretando maior dissipação de calor do ar para as paredes do equipamento, quantificado no aumento do coeficiente  $h_0$ .

### b) Temperatura do ar na entrada do ciclone

Analisando-se os ensaios 3 e 4, nos quais se mantêm o diâmetro do ciclone fixo (D=0,15m) e a mesma velocidade do ar na entrada do ciclone ( $V_0$ =5,61m/s), pode ser observado que o aumento da temperatura do ar de entrada causa o aumento do coeficiente de troca térmica gás-parede. Esse comportamento já era esperado, pois ao se aumentar a temperatura do ar, aumenta-se a quantidade de calor a ser dissipada para as paredes do ciclones, refletida no coeficiente h<sub>0</sub>.

A Figura 4.7 ilustra a relação entre o número de Nusselt gás-parede e o número de Reynolds para os 8 ensaios realizados nos ciclones Lapple.



Figura 4.7 - Influência do número de Reynolds do ciclone na troca térmica.

Com o intuito de ajustar os dados experimentais, foram testadas as correlações para a transferência de calor gás-parede em ciclones apresentadas na Tabela 2.4, como mostrado na Tabela 4.5, sendo que a média da razão dos valores calculados e experimentais,  $\mathbf{x}$ , média dos desvios relativos, M.D.R. e desvio padrão,  $\sigma$ , são calculados por intermédio das Equações 4.2 a 4.6.

Correlação	- x	M.D.R. (%)	σ
Klucovsky et al. (1962)	10,93	992,85	1,601
Szekely e Carr (1966)	1,67	66,91	0,245
Tomeczeck e Komornicki (1984)	1,39	38,75	0,154
Cremasco et al. (1993)	1,50	49,56	0,201

Tabela 4.5 - Análise do desempenho das correlações para a troca térmica gásparede apresentadas na Tabela 2.4. (N = 8 ensaios)

Deve ser salientado que para utilizar a correlação de Tomeczeck e Komornicki (1984), na qual H é referenciado como sendo a altura da câmara vorticial, efetuou-se procedimento análogo ao de Cremasco et al. (1993), ou seja, adotou-se a altura da câmara vorticial como sendo a altura do ciclone e a velocidade do ar como a sua velocidade na entrada do ciclone.

Nota-se que todas as correlações para a estimativa do coeficiente de transferência de calor gás-parede encontradas na literatura apresentam desvios elevados frente aos dados coletados na presente Dissertação. Esses desvios decorrem do fato de cada correlação ser específica para uma configuração ciclônica, apresentar limites de aplicação para as condições de alimentação distintos e variações na forma que se dá a troca térmica: da parede para o gás, para todos os casos presentes na Tabela 2.4, com exceção do trabalho de Cremasco et al. (1993), no qual a troca térmica ocorre do gás para a parede, assim como neste trabalho.

Como pode ser observado por intermédio das análises dos resultados experimentais obtidos, as condições de alimentação e a configuração ciclônica são parâmetros preponderantes na troca térmica entre o gás e as paredes do equipamento. Sendo assim, tornou-se necessária a proposição de uma correlação para os ciclones Lapple avaliados nesta Dissertação, na forma:

$$Nu_{0_{\rm D}} = 0,194 \, \mathrm{Re}_{\rm D}^{0,65} \, \mathrm{Pr}^{1/3} \tag{4.11}$$

em que:

$$Nu_{0_{D}} = \frac{h_0 D}{k}$$
(4.12)

$$\operatorname{Re}_{\mathrm{D}} = \frac{\mathrm{V}_{0}\mathrm{D}}{\mathrm{v}} \tag{4.13}$$

com N = 8, média da razão dos valores calculados e experimentais,  $\bar{x} = 0,964$ , média dos desvios relativos, M.D.R. = 9,20% e desvio padrão,  $\sigma = 0,11$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6).

Essa correlação, Equação (4.11), aplica-se a ciclones do tipo Lapple (D=0,15m e 0,20m), nos seguintes intervalos:

$$5,6 \,\text{lm} / \text{s} \le V_0 \le 12,37 \,\text{m} / \text{s};$$
  
 $68,6^0 \,\text{C} \le T_0 \le 109,6^0 \,\text{C}.$ 

A Figura 4.8 ilustra o comportamento da correlação proposta para a troca térmica entre o gás limpo e as paredes do ciclone.



Figura 4.8 - Desempenho da Equação(4.11).

#### 4.3.1. Correlação geral para a troca térmica gás-parede

Como já salientado, a Equação (4.11) correlaciona dados experimentais obtidos em ciclones de configuração geométrica tipo Lapple. Visando-se testar a adequação dessa correlação a outros equipamentos ciclônicos, foram retirados da literatura resultados experimentais de troca térmica entre o gás e a parede. Foram levantados um conjunto de 10 dados coletados em um ciclone Stairmand modificado, cujas dimensões são apresentadas na Tabela 2.2, por Lombardi (1991),dados de com na faixa  $1,65m/s \le V_0 \le 6,60m/s$ ,  $150^{\circ}C \le T_0 \le 224^{\circ}C$  e 7 resultados em um ciclone Bernauer, de dimensões mostradas na Tabela 2.3, por Cremasco et al. (1993), na faixa de  $5,36 \le V_0 \le 11,50 \text{m} / \text{s} = 65,0^0 \text{C} \le T_0 \le 190,0^0 \text{C}$ .

A Figura 4.9 ilustra o comportamento da Equação (4.11) frente aos dados obtidos em outras configurações ciclônicas.



Figura 4.9 - Desempenho da Equação (4.11) frente a outros ciclones.

Os desvios obtidos foram: para N = 17, média da razão dos valores calculados e experimentais,  $\bar{x} = 0,666$ , média dos desvios relativos, M.D.R.=33,38% e desvio padrão,  $\sigma = 0,0784$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6).

Analisando-se os desvios obtidos e a Figura 4.9, constata-se que a Equação (4.11) não é aplicável aos ciclones Stairmand modificado e Bernauer, pois subestima a troca térmica gás-parede (expressa em termos do número de Nusselt) nesses equipamentos, em virtude de suas configurações geométricas serem distintas do ciclone Lapple. O ciclone Stairmand é um ciclone de alta eficiência, sendo projetado para 100% de separação, o que acarreta maior ação da força centrífuga e, consequentemente, maior dissipação de calor para as paredes, refletida em maiores valores para os coeficientes de transferência de calor; agravado pelo fato de a configuração utilizada por Lombardi (1991) apresentar menor diâmetro da saída inferior (B), o que gera zonas de recirculação secundárias do gás na base do equipamento e conseqüente aumento da troca térmica gás-parede.

Quanto ao ciclone Bernauer utilizado por Cremasco et al.(1993), também pode ser considerado de alta eficiência, devido ao fato de apresentar entrada em espiral, característica que leva a maior ação da força centrífuga e conseqüentemente, maior dissipação de calor para as paredes do equipamento, aumentando o coeficiente de troca térmica.

Com o propósito de se ajustarem os resultados experimentais provenientes de quatro ciclones distintos, torna-se necessária a inserção de um parâmetro geométrico. Elegeu-se o mesmo adotado por Tomeczeck e Komornicki (1984), por se mostrar o mais adequado, sendo a correlação geral para a estimativa da troca térmica gás-parede obtida para ciclones expressa por:

彩

$$Nu_{0_{\rm D}} = 0,23 {\rm G}^{0,8} {\rm Re}_{\rm D}^{0,6} {\rm Pr}^{1/3}$$
(4.14)

sendo que G é definido de acordo com a Equação (2.10), ou seja:

$$G = \left(\frac{D - D_e}{b}\right) \tag{2.10}$$

Os desvios calculados por intermédio das Equações (4.2) a (4.6) são: média da razão dos valores de número de Nusselt gás-parede experimentais e calculados,  $\bar{x} = 1,013$ , média dos desvios relativos, M.D.R. = 13,37% e desvio padrão,  $\sigma=0,169$ .

Essa correlação, Equação (4.14), aplica-se a ciclones do tipo Lapple (D=0,15m e 0,20m), Bernauer (D=0,32m) e Stairmand modificado (D=0,22m), nos seguintes intervalos:

$$1,65m / s \le V_0 \le 17,13m / s;$$
  
 $65,0^0 C \le T_0 \le 224^0 C.$ 

A Figura 4.10 mostra o desempenho da Equação (4.14).



Figura 4.10 - Desempenho da Equação (4.14).

## 4.4. Transferência de calor gás (com partículas) - parede

Foram realizados 28 ensaios experimentais com o objetivo de se estudar a troca térmica em função do coeficiente de transferência de calor entre a corrente gasosa com a presença de partículas e as paredes do ciclone, sendo 15 experimentos no ciclone de D = 0,15m e 13 no de D = 0,20m. A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos.

ens	D	material	$\overline{V}_0$	$C_v x 10^5$	T <sub>0</sub>	Te	T <sub>e2</sub>	$T_{w}$	h
	(m)		(m/s)		(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	$(W/m^2K)$
1	0,15	plástico	11,62	2,50	75,0	73,2	63,0	67,7	23,62
2	0,15	plástico	10,89	1,80	109,5	105,5	86,6	96,0	25,65
3	0,15	plástico	8,06	7,50	106,5	101,0	69,4	91,7	16,15
4	0,15	esf.(0,84)	8,07	0,93	73,0	69,5	49,5	64,0	21,64
5	0,15	esf.(0,84)	10,81	0,76	76,0	72,5	58,0	67,1	23,69
6	0,15	esf.(0,84)	6,95	2,16	95,0	89,0	61,0	81,0	15,14
7	0,15	esf.(1,19)	10,79	0,96	83,0	79,2	61,0	72,6	13,41
8	0,15	esf.(1,19)	6,94	1,95	73,0	68,5	51,3	63,0	25,39
9	0,15	esf.(1,19)	10,82	0,96	106,5	99,8	73,5	91,8	25,20
10	0,15	esf.(1,69)	11,55	0,80	112,0	105,5	63,2	97,0	16,33
11	0,15	esf.(1,69)	10,80	1,05	75,0	70,7	48,0	65,6	28,03
12	0,15	esf.(1,69)	6,92	0,93	69,3	65,1	43,0	59,8	16,52
13	0,15	esf.(3,0)	8,05	1,82	68,4	65,6	44,8	61,1	24,88
14	0,15	esf.(3,0)	10,76	1,03	76,2	72,0	52,0	67,0	19,22
15	0,15	esf.(3,0)	10,80	1,51	107,0	100,6	70,0	92,0	29,41
16	0,20	plástico	11,55	8,64	77,0	71,4	47,2	70,5	19,81
17	0,20	plástico	6,95	7,20	80,2	72,9	38,6	72,0	12,96
18	0,20	plástico	11,65	3,89	106,6	97,8	59,5	96,7	20,03
19	0,20	plástico	8,13	7,02	106,7	96,4	50,7	95,1	13,81
20	0,20	esf.(0,84)	8,12	4,18	105,1	94,8	50,3	95,4	12,35
21	0,20	esf.(0,84)	11,61	0,42	87,6	82,0	48,0	80,7	17,54
22	0,20	esf.(1,19)	12,37	2,55	107,7	99,7	63,2	92,8	20,96
23	0,20	esf.(1,19)	6,98	4,25	104,3	93,1	51,9	90,0	21,16
24	0,20	esf.(1,19)	11,61	3,77	78,0	72,2	47,7	70,7	22,29
25	0,20	esf.(1,69)	8,12	0,80	105,7	95,0	44,7	91,9	12,98
26	0,20	esf.(3,0)	6,98	5,34	102,0	90,8	43,5	89,9	19,83
27	0,20	esf.(3,0)	10,89	3,61	110,4	98,9	56,8	97,8	14,62
28	0,20	esf.(3,0)	11,64	5,89	82,9	76,2	44,3	72,3	21,44

Tabela 4.6- Resultados de transferência de calor gás-parede com particulados.

# 4.4.1. Análise da influência dos particulados na transferência de calor gás-parede

Para que se tenha noção de como a presença de partículas influencia a troca térmica gás-parede, construíram-se as Figuras 4.11, 4.12 e 4.13, as quais apresentam a relação entre a razão dos números de Nusselt para os ciclones Lapple para a transferência de calor gás-parede, com e sem a presença de

particulados, em função da concentração volumétrica de partículas nas mesmas condições de velocidade e temperatura do ar na entrada do ciclone.



Figura 4.11 - Influência dos particulados no número de Nusselt para os ciclones Lapple.



Figura 4.12 - Influência das características dos particulados no número de Nusselt para o ciclone de D=0,15m.



Figura 4.13 - Influência das características dos particulados no número de Nusselt para o ciclone de D=0,20m.

A presença de partículas, mesmo em baixa concentração, influencia a troca térmica gás-parede, evidenciada no número de Nusselt, já que o ar perde calor para a parede do equipamento e para as partículas.

Um dos objetivos principais do estudo do tempo de residência anteriormente desenvolvido é fornecer subsídios para auxiliar a interpretação física dos fenômenos de transferência de calor com particulados, já que um dos parâmetros fundamentais da influência dos particulados na troca térmica é o tempo que as partículas sólidas permanecem na periferia ciclônica em contato com a corrente gasosa; outra grande influência é exercida pela área de troca de calor gás-partículas.

a) Concentração volumétrica: aumentando-se a concentração volumétrica das partículas, aumenta-se a quantidade de matéria que retira calor da corrente gasosa, ou seja, eleva-se a área de contato entre o gás e as partículas,

provocando a diminuição do calor fornecido à parede do equipamento, refletido no número de Nusselt gás (com partículas)-parede.

b) Diâmetro de partícula: na medida em que se aumenta o diâmetro das partículas, aumenta-se o seu tempo de residência, como pode ser verificado nas Equações (4.7) e (4.10). Ao aumentar o tempo de residência da população de particulados, esta vai absorver quantidade maior de calor; diminuindo a quantidade de calor fornecida à parede, acarretando na diminuição do coeficiente de transferência de calor gás-parede.

c) Massa específica de partícula: ao aumentar a massa específica da partícula, eleva-se o seu tempo de permanência no interior ciclônico, como pode ser constatado nas Equações (4.7) e (4.10), ocasionando, para o coeficiente de troca térmica gás-parede, efeito similar ao descrito para a influência do diâmetro de partícula.

A única correlação para a estimativa do coeficiente de transferência de calor gás(com partículas)-parede que foi encontrada na literatura é a correlação de Peres e Cremasco (1996), Equação (2.11), válida para dados obtidos em um ciclone Bernauer (configuração mostrada na Tabela 2.3). Procurou-se então ajustar os dados experimentais a essa correlação, acarretando, para N = 28, os desvios: média da razão dos valores experimentais e calculados,  $\bar{x} = 2,48$ , média dos desvios relativos, M.D.R. = 148,13% e desvio padrão,  $\sigma = 0,503$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6).

A Figura 4.14 ilustra o desempenho da Equação (2.11) frente aos dados experimentais coletados nesta Dissertação.



Figura 4.14 - Desempenho da Equação (2.11) frente aos dados experimentais obtidos neste trabalho.

Ao serem analisados os desvios apresentados e a Figura 4.14, observa-se que a Equação (2.11) não se aplica aos ciclones Lapple, por serem equipamentos de configurações geométricas distintas. Como já salientado, o fato de o ciclone Bernauer apresentar entrada em espiral propicia maior ação da força centrífuga, perdendo-se deste modo mais calor para as paredes nesta configuração quando comparada à dissipação de calor no ciclone Lapple. Isto é refletido na superestimativa dos coeficientes de troca térmica para os ciclones Lapple, expressos em termos do número de Nusselt gás (com partículas)parede.

No intuito de ajustar os dados experimentais e serem quantificadas as influências de cada parâmetro, propõe-se a seguinte correlação para a troca térmica gás(com partículas)-parede para os ciclones Lapple, expressa por:

Nu<sub>D</sub> = 0,086 
$$\left(\frac{d_p}{D}\right)^{-0,11} \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}\right)^{-0,13} C_v^{-0,08} Re_D^{0,60} Pr^{1/3}$$
 (4.15)

com os desvios, para N = 28: média da relação entre os valores do número de Nusselt gás-parede calculados e experimentais,  $\bar{x} = 0,964$ , média dos desvios relativos, M.D.R.=11,02% e desvio padrão,  $\sigma = 0,127$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6). A Figura 4.15 ilustra o desempenho da Equação (4.15) obtida neste trabalho.



Figura 4.15 - Desempenho da Equação (4.15).

Essa correlação, Equação (4.15), aplica-se a ciclones do tipo Lapple (D=0,15m e 0,20m), nos seguintes intervalos:

$$6,92 \text{ m / s} \le V_0 \le 12,37 \text{ m / s};$$
  
 $0,42 \text{ x} 10^{-5} \le C_v \le 8,64 \text{ x} 10^{-5};$   
 $68,4^0 \text{ C} \le T_0 \le 112^0 \text{ C};$   
 $0,84 \text{ mm} \le d_p \le 3,49 \text{ mm}.$ 

# 4.4.2. Correlação geral para a troca térmica gás(com partículas)parede

De modo a verificar a aplicabilidade da Equação (4.15) para outros sistemas, resgataram-se os resultados experimentais de Cremasco e Nebra (1994), um total de 16, para o coeficiente de transferência de calor gás-parede obtidos em um ciclone Bernauer, cujas medidas são apresentadas na Tabela 2.3  $5,36 \le V_0 \le 11,50 \text{ m/s}$ , dados faixa de os na e com  $0,47 \times 10^{-6} \le C_v \le 7,80 \times 10^{-6}$  e  $65,0^0 C \le T_0 \le 190^0 C$ . O desempenho da Equação (4.15) é ilustrado na Figura 4.16 e os desvios encontrados são: média da razão entre os valores calculados e experimentais, x = 0,408, média dos desvios relativos, M.D.R. = 30,77% e desvio padrão,  $\sigma = 0,094$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6).



Figura 4.16 - Desempenho da Equação(4.15) frente aos dados de Cremasco e Nebra (1994).

Comparando-se a Figura 4.16 com a Figura 4.14, fica evidente que as correlações encontradas são específicas para cada configuração geométrica ciclônica, em virtude de cada configuração ser projetada objetivando um comportamento fluidodinâmico distinto, de acordo com a finalidade que se pretende dar ao equipamento. Enquanto o ciclone Lapple tem como característica principal o fato de proporcionar menor perda de carga, o ciclone Bernauer, com sua entrada em espiral, visa alta eficiência de separação, caracterizando-se como um ciclone que proporciona maior ação da força centrífuga, conseqüentemente, maiores coeficientes de troca térmica.

Para que se amplie o leque de aplicabilidade dessas correlações, juntando os dados deste trabalho com aqueles provenientes do trabalho de Cremasco e Nebra (1994), torna-se necessária a inserção de um parâmetro geométrico que reflita a influência geométrica dos ciclones, sendo que o parâmetro G, dado pela Equação (2.10), se mostrou o mais adequado. Com isto, obtém-se a correlação:

Nu<sub>D</sub> = 4,48x10<sup>-3</sup> 
$$\left(\frac{d_p}{D}\right)^{-0,11} \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}\right)^{-0,24} C_v^{-0,18} G^{4,0} \operatorname{Re}_D^{0,60} \operatorname{Pr}^{1/3}$$
 (4.16)

para N = 42, com os desvios: média da razão dos valores calculados e experimentais,  $\bar{x} = 1,007$ , média dos desvios relativos, M.D.R. = 14,77% e desvio padrão,  $\sigma = 0,201$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6).

Essa correlação, Equação (4.15), aplica-se a ciclones do tipo Lapple (D=0,15m e 0,20m) e Bernauer (D=0,32m), nos seguintes intervalos:

$$5,36m/s \le V_0 \le 12,37m/s;$$
  

$$0,47x10^{-6} \le C_v \le 8,64x10^{-5};$$
  

$$65,0^0 C \le T_0 \le 190^0 C;$$
  

$$0,84mm \le d_p \le 3,49mm.$$

Analisando-se os desvios, percebe-se que podem ser considerados satisfatórios, comprovando que a escolha do parâmetro G é adequada, por ser um parâmetro que leva consigo os efeitos das singularidades geométricas de cada equipamento. A Figura 4.17 ilustra o desempenho da Equação (4.16), aplicável aos ciclones Lapple e Bernauer, para a estimativa do coeficiente de transferência de calor gás(com partículas)-parede.



Figura 4.17 - Desempenho da Equação (4.16).

## 4.5. Transferência de calor gás-partículas

Realizaram-se 27 ensaios experimentais com o intuito de se estudar a troca térmica entre o ar e as partículas, em função da obtenção dos coeficientes de transferência de calor gás-partículas. Deste conjunto, foram 15 experimentos no ciclone de D=0,15m e 12 no de D=0,20m. A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.7 - Resultados de transferência de calor gás-partículas.

ens.	D (m)	material	$V_0 (m/s)$	$C_v x 10^5$	$T_0(^{\circ}C)$	$T_{e}(^{\circ}C)$	$T_w(^{0}C)$	$T_{e2}(^{\circ}C)$	$T_{p0}(^{0}C)$	T <sub>p</sub> °C)	$h_p (W/m^2 K)$
1	0,15	plástico	11,62	2,50	70,5	67,6	63,7	58,5	23,0	36,5	93,07
2	0,15	plástico	10,89	1,80	108,5	103,0	95,2	83,5	26,0	52,8	100,56
3	0,15	plástico	8,06	7,50	106,5	101,0	91,7	69,4	22,0	36,0	107,59
4	0,15	esf.(0,84)	8,07	0,93	76,0	72,5	67,1	58,0	23,0	42,5	32,65
5	0,15	esf.(0,84)	10,81	0,76	106,5	102,5	93,0	87,0	23,0	60,0	62,97
6	0,15	esf.(0,84)	6,95	2,16	95,0	89,0	81,0	61,0	23,0	45,0	78,58
7	0,15	esf.(1,19)	10,79	0,96	83,0	79,2	72,6	61,0	24,0	39,0	30,81
8	0,15	esf.(1,19)	6,94	1,95	73,0	68,5	63,0	51,3	24,0	34,0	65,03
9	0,15	esf.(1,19)	10,82	0,99	106,5	99,8	91,8	73,5	24,0	40,0	30,25
10	0,15	esf.(1,69)	11,55	0,80	108,0	102,3	93,0	54,4	22,0	36,0	56,25
11	0,15	esf.(1,69)	10,80	1,05	112,0	105,5	97,0	63,2	22,0	36,5	27,54
12	0,15	esf.(1,69)	6,92	0,93	75,0	70,7	65,6	48,0	23,0	33,3	37,47
13	0,15	esf.(1,69)	8,05	1,82	69,3	65,1	59,8	43,0	22,0	27,0	33,26
14	0,15	esf.(3,0)	10,76	1,03	76,2	72,0	67,0	52,0	22,0	31,0	51,09
15	0,15	esf.(3,0)	10,80	1,51	107,0	100,6	92,0	70,0	22,0	37,0	62,32
16	0,20	plástico	11,55	8,64	77,0	71,4	70,5	47,2	22,0	32,0	67,09
17	0,20	plástico	6,95	7,20	80,2	71,9	72,0	38,6	24,0	31,0	77,11
18	0,20	plástico	11,65	3,89	106,6	97,8	96,7	59,5	27,0	41,0	41,85
19	0,20	plástico	8,13	7,02	106,7	96,4	95,1	50,7	27,0	34,5	59,24
20	0,20	esf.(0,84)	8,12	4,18	105,1	94,8	95,4	50,3	26,0	44,0	75,42
21	0,20	esf.(0,84)	11,61	0,42	87,6	80,0	80,7	48,0	25,0	37,0	12,24
22	0,20	esf.(0,84)	12,37	2,55	104,0	95,9	94,4	54,9	27,0	51,0	16,69
23	0,20	esf.(1,19)	6,98	4,25	107,7	99,7	92,8	63,2	26,0	57,0	72,43
24	0,20	esf.(1,19)	11,61	3,77	104,3	93,1	90,0	51,9	26,0	40,5	78,50
25	0,20	esf.(1,19)	10,87	5,76	78,0	72,2	70,7	47,7	25,0	42,0	66,05
26	0,20	esf.(1,69)	8,12	0,80	105,7	95,0	91,9	44,7	26,0	32,0	23,83
27	0,20	esf.(3,0)	6,98	5,34	102,0	90,8	89,9	43,5	26,0	33,3	95,85

De posse dos coeficientes de transferência de calor gás-partículas, foram calculados os números de Nusselt gás-partículas por intermédio da Equação (2.15) e, para auxiliar na avaliação dos resultados obtidos, foram confeccionadas as Figuras 4.18, 4.19 e 4.20, as quais ilustram a influência das características da fase particulada na troca térmica gás-partículas, expressa em termos do número de Nusselt gás-partículas, para cada um dos ciclones Lapple utilizados.



Figura 4.18 - Influência das características dos particulados no número de Nusselt gás-partículas (Lapple 0,15m).



Figura 4.19 - Influência das características dos particulados no número de Nusselt gás-partículas (Lapple 0,20m).



Figura 4.20 - Influência do diâmetro do ciclone no número de Nusselt gás-partículas.

Pela inspeção da Figura 4.20, fica evidenciado, no comportamento da partícula de plástico, o fato de ao se aumentar o tamanho (diâmetro do ciclone), diminui-se a troca térmica gás-partículas. Isto pode ser justificado por uma característica peculiar dos ciclones tipo Lapple de a mistura se movimentar perfazendo um total de cinco espiras (Massarani, 1997). Partindo do pressuposto que este número permaneça constante para qualquer diâmetro; ocorre, com o aumento do ciclone, um espaçamento maior entre tais espiras. Como conseqüência, o ar perde mais calor para as paredes do que para as partículas, acarretando menor coeficiente de transferência de calor gás-partículas.

De posse dos resultados do número de Nusselt gás-partículas, avaliam-se as correlações apresentadas na Tabela 2.7, cujo desempenho é mostrado na Tabela 4.8. Os desvios comprovam, sobretudo, que os resultados obtidos para uma determinada configuração ciclônica associada às características físicas das partículas não podem ser estendidas a outros equipamentos ciclônicos. Isto pode ser constatado, em particular, quando se analisa a correlação de Peres e Cremasco (1997), Equação 2.28, os quais se utilizaram de partículas semelhantes àquelas utilizadas nesta Dissertação. Esses autores trabalharam com um ciclone Bernauer, com as dimensões apresentadas na Tabela 2.3, cuja característica principal é a entrada em espiral. Este tipo de configuração permite ação maior da força centrífuga às partículas quando comparada ao ciclone tipo Lapple, influenciando de modo distinto o tempo que as partículas

Correlação	x	M.D.R. (%)	σ
Sidel'kovski e Shchevelev (1966)	8,777	777,64	8,422
Frolov (1987)	13,421	1242,13	13,314
Yen et al. (1990)	2,239	129,05	1,132
Peres e Cremasco (1997)	3,152	215,17	1,189

Tabela 4.8 - Desempenho das correlações da Tabela 2.7 (N = 27).

Como já salientado, não é recomendável o uso das correlações encontradas na Tabela 2.6 para a estimativa da troca térmica gás-partícula no caso específico dos ciclones Lapple. Com isto, para auxiliar a interpretação dos resultados obtidos, propõe-se uma correlação para o número de Nusselt para a troca de calor entre o ar e as partículas, a qual quantifica as influências da fase particulada e é expressa por:

$$Nu_{p} = 1,75x10^{2} \left(\frac{d_{p}}{D}\right)^{0.93} \left(\frac{\rho_{p} - \rho_{f}}{\rho_{f}}\right)^{0.82} C_{v}^{0.64} Re_{p}^{0.14} Pr^{1/3}$$
(4.17)

com

$$\operatorname{Re}_{p} = \frac{\operatorname{V}_{0}d_{p}}{v}$$
(2.18)

e Nu<sub>p</sub> dado pela Equação (2.15).

Essa correlação, Equação (4.17), aplica-se a ciclones do tipo Lapple (D=0,15m e 0,20m) nos seguintes intervalos:

6,92m / s 
$$\leq V_0 \leq 12,37m$$
 / s;  
0,42x10<sup>-5</sup>  $\leq C_v \leq 8,64x10^{-5}$ ;  
69,3<sup>0</sup> C  $\leq T_0 \leq 112^0$  C;  
0,84mm  $\leq d_p \leq 3,49$ mm.

Os desvios encontrados, para N = 27, são: média da relação entre os valores calculados e experimentais,  $\bar{x} = 0,957$ , média dos desvios relativos, M.D.R. = 16,81% e desvio padrão,  $\sigma = 0,193$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6).

A Figura 4.21 ilustra o desempenho da Equação (4.17) frente aos

resultados experimentais do número de Nusselt gás-partículas obtidos nos ciclones Lapple utilizados nesta Dissertação.



Figura 4.21 - Desempenho da Equação (4.17).

A análise da influência de cada parâmetro característico da fase particulada na transferência de calor gás-partículas pode ser efetuada separadamente, por intermédio do tempo de residência das partículas e da área de troca térmica gás-partículas:

a) Concentração volumétrica: aumentando-se a concentração volumétrica das partículas, aumenta-se a quantidade de matéria que retira calor da corrente gasosa. Por via de conseqüência, o coeficiente de troca térmica entre o ar e as partículas é maior quanto maior a concentração volumétrica de sólidos, C<sub>v</sub>, corroborando os estudos de Yen et al. (1990).

b) Diâmetro de partícula: a influência desse parâmetro pode ser avaliada em função do tempo de residência, na medida em que se aumenta o diâmetro das partículas, aumenta-se o seu tempo de residência, como já comentado nesse trabalho. Ao aumentar o tempo de residência da população de particulados, há a tendência desta população absorver quantidade maior de calor; acarretando a elevação do coeficiente de transferência de calor gás-partículas. Essa observação vem de encontro aos estudos desenvolvidos por Yen et al. (1990).

c) Massa específica de partícula: a influência desse parâmetro pode ser avaliada em função do tempo de residência. Como já salientado, ao aumentar a massa específica da partícula, eleva-se o seu tempo de permanência no interior ciclônico, ocasionando para o coeficiente de troca térmica gás-partícula, efeito similar ao descrito para a influência do diâmetro da partícula.

## 4.5.1. Correlação geral para a troca térmica gás-partículas

Na intenção de verificar a aplicabilidade da Equação (4.17) a outros sistemas, resgataram-se resultados experimentais para a o coeficiente de troca térmica gás-partículas de outros autores. Foram levantados 50 resultados obtidos em um ciclone Stairmand modificado (dimensões na Tabela 2.2) por Lombardi (1991), com a faixa de  $5,35 \le V_0 \le 14,93$ m/s e  $0,15 \times 10^{-3} \le C_v \le 4,0 \times 10^{-3}$  e 11 em um ciclone Bernauer (dimensões na Tabela 2.3) por Cremasco e Nebra (1994) na faixa de  $2,10 \le V_0 \le 7,0$ m/s e  $0,47 \times 10^{-5} \le C_v \le 7,80 \times 10^{-5}$ .

Os desvios oriundos da utilização da Equação (4.17), a qual prediz o coeficiente de troca térmica gás-partículas para os ciclones Lapple, são: para N=61, média da razão dos valores calculados e experimentais,  $\bar{x} = 8,68$ , média dos desvios relativos, M.D.R = 780,4% e desvio padrão,  $\sigma = 5,035$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6). A Figura 4.22 ilustra o desempenho

dessa equação frente a outros ciclones.



Figura 4.22 - Desempenho da Equação (4.17) frente a outros ciclones.

Como pode ser observado, a correlação para cálculo do número de Nusselt gás-partícula para os ciclones Lapple superestima os valores de Nusselt quando utilizada para o cálculo em ciclones tipo Stairmand modificado e subestima os valores de Nusselt para o ciclone Bernauer.

Para o ciclone Stairmand, as justificativas encontradas para a má performance apresentada são as características distintas da fase particulada, tais como massa específica e diâmetro das partículas, a alta faixa de concentração volumétrica empregada por Lombardi (1991), além do fato de ser um ciclone de alta eficiência, com maior ação da força centrífuga; agravado por ter menor diâmetro do tubo de saída inferior (B), acarretando maior tempo de residência das partículas no ciclone, logo, maior troca térmica gás-partícula.

De posse de um grande número de resultados (um conjunto de 50) provenientes do trabalho de Lombardi (1991), esses dados foram correlacionados para que se conhecesse a influência de sólidos de menor tamanho (microesferas de vidro de  $\rho_p = 2650 \text{ kg/m}^3 \text{ e d}_p = 109$ , 196 e 269 µm), de faixas elevadas de concentração volumétrica e das características peculiares desse equipamento na troca térmica gás-partículas. A correlação específica para o ciclone Stairmand modificado, cujas medidas estão presentes na Tabela 2.2, é:

Nu<sub>p</sub> = 18,95 
$$\left(\frac{d_p}{D}\right)^{0,26} C_v^{0,34} Re_p^{0,10} Pr^{1/3}$$
 (4.18)

com os desvios: média da razão dos valores calculados e experimentais, x = 0,988, média dos desvios relativos, M.D.R. = 16,31% e desvio padrão,  $\sigma = 0,206$ , calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6).

Ao se analisar especificamente o comportamento do parâmetro diâmetro da partícula (d<sub>p</sub>) refletido no expoente de  $\left(\frac{d_p}{D}\right)$ , Re<sub>p</sub> e Nu<sub>p</sub>, presentes na Equação (4.18), verifica-se que o expoente de d<sub>p</sub> é negativo (-0,64), ou seja, o coeficiente de troca térmica gás-partículas é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas, vindo de encontro à constatação feita por Lombardi (1991) da partícula mais fina (de menor diâmetro) cobrir uma extensão maior da parede e ter maior capacidade de intercâmbio térmico. Esse comportamento deve ser atribuído a partículas de diâmetro muito pequeno, como as que foram objeto do estudo de Lombardi (1991).

A Figura 4.23 ilustra o desempenho da Equação (4.18) frente aos dados de Lombardi (1991), coletados no ciclone Stairmand modificado.



Figura 4.23 - Desempenho da Equação (4.18) para os dados de Lombardi (1991).

Quanto à performance do ciclone Bernauer, como os resultados obtidos nessa Dissertação não foram bem ajustados pela Equação (2.28), específica para o ciclone Bernauer, era de se esperar a recíproca, ou seja, que a correlação válida para os ciclones Lapple não ajustasse os dados coletados no ciclone Bernauer.

Como pode ser observado por intermédio da comparação entre as Equações (2.28), (4.17) e (4.18), as diferenças encontradas evidenciam a importância da configuração geométrica do ciclone na troca térmica. Ciclones de alta eficiência, devido à fluidodinâmica da mistura ar-partículas que propiciam, tendem a ser melhores trocadores de calor, sendo que as características da fase particulada e o tamanho do equipamento, como já demonstrado, também são parâmetros de suma importância na troca térmica entre o ar e as partículas.

Para se estabelecer uma correlação mais genérica para a estimativa do coeficiente de transferência de calor gás-partículas em ciclones, resgatam-se apenas os 11 resultados obtidos por Cremasco e Nebra (1994) no ciclone Bernauer, somando-se aos 27 coletados nos ciclones Lapple desta Dissertação, pois são trabalhos com materiais de mesma granulometria e faixa de concentração volumétrica. Sendo assim, para N = 38, a correlação proposta é:

$$Nu_{p} = 3,22 \left(\frac{d_{p}}{D}\right)^{0.95} \left(\frac{\rho_{p} - \rho_{f}}{\rho_{f}}\right)^{0.85} \left(\frac{H}{D}\right)^{3,2} C_{v}^{0.69} \operatorname{Re}_{p}^{0.14} \operatorname{Pr}^{1/3} \quad (4.19)$$

com os desvios obtidos: média da relação entre os valores de Nusselt gáspartículas calculados e experimentais,  $\bar{x} = 0,958$ , média dos desvios relativos, M.D.R.=19,33% e desvio padrão,  $\sigma$ = 0,285, calculados de acordo com as Equações (4.2) a (4.6). A Figura 4.24 ilustra o desempenho da Equação (4.19).



Figura 4.24 - Desempenho da Equação (4.19).

Essa correlação, Equação (4.19), aplica-se a ciclones do tipo Lapple (D=0,15m e 0,20m) e Bernauer (D=0,32m), nos seguintes intervalos:

2,10m/s 
$$\leq V_0 \leq 12,37$$
m/s;  
0,42x10<sup>-5</sup>  $\leq C_v \leq 8,64x10^{-5}$ ;  
65,0<sup>0</sup> C  $\leq T_0 \leq 190,0^0$  C;  
0,84mm  $\leq d_p \leq 3,49$ mm.

Analisando-se a performance da Equação (4.19), verifica-se que a inserção do parâmetro  $\left(\frac{H}{D}\right)$  traduz a influência da geometria do ciclone na troca térmica, bem como no tempo de residência, como pode ser observado na Equação (4.10), já que estes fenômenos estão intimamente relacionados, como já demonstrado neste trabalho.

## 4.5.2. Comparação do ciclone Lapple com outros equipamentos utilizados na troca térmica gás-partícula

Com os resultados obtidos, pode ser estabelecida uma comparação entre os coeficientes de transferência de calor gás-partícula em ciclones com aqueles encontrados em outros sistemas de transferência de calor, caso de leitos fluidizados, leitos fixos e transporte pneumático. Por intermédio de correlações encontradas na literatura e presentes na Tabela 4.9, elabora-se a Figura 4.25.



Figura 4.25 - Comparação do ciclone com outros sistemas.

Tabela 4.9 -	Correlações	para cá	lculo do	número	de	Nusselt	gás-part	ículas	em
diversos equ	ipamentos.								

Sistema	Autor	Correlação
esfera	Ranz e Marshall (1952)	$Nu_p = 2 + 0.6 Pr^{1/3} Re_p^{0.5}$
isolada		
leito fixo	Kunni e Levenspiel	$Nu_p = 2 + 1.8 Pr^{1/3} Re_p^{0.6}$
	(1969)	
transporte pneumático	Torrezan et al. (1983)	$Nu_{p} = 2 + \left\{ \begin{bmatrix} 0,4 \operatorname{Re}_{p}^{0,5} \end{bmatrix}^{\frac{5}{4}} + \\ \begin{bmatrix} (0,308 - 74,627C_{v}) \operatorname{Re}_{p}^{0,82} \end{bmatrix}^{\frac{5}{4}} \end{bmatrix}^{\frac{4}{5}}$
leito	Levenspiel (1984)	$Nu_p = 0,03 Re_p^{1,3}$
fluidizado		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

Observa-se, por inspeção da Figura 4.25, que há menor transferência de calor gás-partículas nos ciclones em relação aos outros sistemas de troca térmica. Isto pode ser atribuído ao baixo tempo de residência das partículas no interior do ciclone quando comparados a outros equipamentos. Esse resultado vem corroborar os estudos de Yen et al. (1990).

Verifica-se, sobretudo, que os ciclones não vêm a ser uma alternativa para a substituição dos equipamentos trocadores de calor gás-partículas atualmente utilizados, mas como equipamentos pré-aquecedores. Por outro lado, não se pode negligenciar a contribuição em relação à troca térmica quando o ciclone estiver acoplado a outros equipamentos de contato gás-partículas.

No entanto, constata-se que a troca térmica entre o gás e as partículas nos ciclones não pode ser desprezada em projetos de engenharia, principalmente quando se opera com este equipamento acoplado a outros, utilizando-se temperaturas elevadas.
# **CAPÍTULO 5**

### CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível quantificar a influência das características físicas das partículas, tais como: diâmetro, massa específica e concentração volumétrica, no tempo de residência dos particulados sólidos, constatando-se a importância da ação que as forças de arraste, gravitacional e centrífuga exercem na fluidodinâmica da mistura no interior do ciclone e, via de consequência, no tempo de residência e na troca térmica em ciclones Lapple, bem como em outras configurações como Stairmand e Bernauer.

Comparando-se os dados experimentais coletados nos ciclones Lapple utilizados nesta Dissertação com dados experimentais de outros autores retirados da literatura, verificou-se que além da distância maior que as partículas devem percorrer em ciclones maiores, um outro parâmetro geométrico atua fortemente no escoamento da fase leve: o diâmetro B, o qual atua no escoamento secundário em função da criação de zonas de recirculação na base do ciclone, sendo que essas zonas atuam na permanência das partículas, principalmente para altas velocidades.

No que se refere aos estudos de transferência de calor em ciclones trocadores de calor do tipo recuperadores, utilizando-se contato entre as correntes gasosa e particulada, foi observado que se têm como parâmetros preponderantes o tempo de residência das partículas e a área de contato gáspartículas, de tal sorte que as equações para o cálculo da troca térmica apresentadas são fundamentadas nestes parâmetros. Conclui-se então que as características da fase particulada e a geometria dos ciclones são parâmetros de influência significativa na troca térmica entre a mistura e as paredes, bem como entre o gás e as partículas, sendo essas influências quantificadas nas correlações apresentadas nesse trabalho.

Verificou-se que a presença de particulados diminui a transferência de calor entre o gás e as paredes em até 70% para  $C_v > 10^{-4}$  e que a partir dessa concentração volumétrica, a perda de calor passa a ser regida principalmente pelas características físicas das partículas.

Reconheceu-se a importância da granulometria dos sólidos na troca térmica entre o gás e as partículas, dependendo da faixa de tamanho que se trabalha, o aumento do diâmetro das partículas favorece a transferência de calor do gás para as partículas (particulados grossos) ou desfavorece a transferência de calor (partículas finas).

Uma outra constatação não menos importante diz respeito à estimativa do número de Nusselt para as trocas térmicas entre o gás, as partículas e as paredes do ciclone, a acuidade da correlação utilizada para a obtenção desse número deve ser questionada, por ser um fator de extrema utilidade quando se deseja avaliar as trocas térmicas propiciadas por esse equipamento. Seguindo esta linha de raciocínio, comprovou-se que não se pode utilizar qualquer correlação para a estimativa dos coeficientes de transferência de calor, já que a escolha equivocada acarretará erros, comprometendo a análise dos resultados obtidos.

Finalmente, verificou-se que os ciclones trocadores de calor gás-partículas apresentam valores para os coeficientes de troca térmica gás-partículas inferiores a outros equipamentos, como leito fixo, fluidizado e pneumático. Isto se deve, basicamente, ao menor tempo de residência das partículas no ciclone. Todavia, ao se trabalhar com um desses equipamentos acoplados a um ciclone, não se pode desprezar os efeitos térmicos que ocorrem no ciclone.

### SUGESTÕES

1-1

Como se averiguou que a troca térmica entre o gás e as partículas propiciada pelos ciclones é bem inferior a de outros sistemas, sugere-se que os ciclones atuem como equipamentos de auxílio ao processo de secagem ou para a pré-secagem, contudo, desaconselha-se a substituição dos sistemas de troca térmica atualmente utilizados pelos ciclones.

Uma alternativa viável para que se explore mais o potencial de aquecimento de sólidos nos ciclones é o estudo dos coeficientes de troca térmica alcançados quando se tem ciclones em série, espera-se que ao se entrar com sólidos já aquecidos no equipamento, provenientes do ciclone anterior, elevar-se-ão esses coeficientes e uma série de ciclones pode vir a ser mais atrativa para finalidades de troca térmica.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BASKAKOV,A.P., DOLGOV,V.N. and GOLDOBIN,Yu.,M. Aerodynamics and Heat Transfer of Cyclone with Particle Laden Gas, in <u>Proceedings</u> of the International Conference on Circulating Fluidized Beds, v.1, p.106-113, Compiegne, France, 1988.
- BENTA,E.S. Estudo da Secagem de Sabugo de Milho em Ciclone. Tese de Mestrado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 122p., 1997.
- CREMASCO,M.A. Estudo sobre o Escoamento Ar/Partículas em um Reator Ciclônico. Tese de Doutorado, FEM/UNICAMP, Campinas, 182p., 1994.
- CREMASCO,M.A. Proposta de uma Correlação para o Tempo de Residência de Particulados Grossos em Ciclones, <u>Anais do XXIII Encontro</u> <u>Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos</u>, v.2, p.653-661, Maringá, 1996.
- CREMASCO,M.A., MOMPEAN DA CRUZ,G.M. and NEBRA,S.A. Experimental Study of the Gas-Wall Heat Transfer in Cyclones, in Proceedings of the International Symposium on Heat and Mass Transfer in Energy Systems and Environmentals Effects, v.1, Cancun, México, 1993.
- CREMASCO,M.A. e NEBRA,S.A. Estudo Experimental da Influência da Particulados na Transferência de Calor Gás-Parede em um Ciclone, <u>Anais do XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos</u>, v.1, p.301, Ouro Preto, 1994.

- FROLOV, V.F. Modelling of Drying of Dispersed Materials, <u>Kymia</u>, Leningrad. (em russo),1987 apud SILVA, M.A. e NEBRA, S.A. Simulação de Transferência de Calor em Ciclone. <u>Anais do XXII Encontro sobre</u> <u>Escoamento em Meios Porosos</u>, v.1, p.251, Florianópolis, 1994.
- GODOY,A.L. Estudo Teórico e Experimental do Tempo de Permanência de <u>Partículas em Ciclones de Gás</u>. Tese de Mestrado, FEC/UNICAMP, Campinas, 101p., 1989.
- GODOY,A.L., SILVA,M.A. e NEBRA,S.A. Análise Experimental do Tempo de Permanência em Ciclones de Gás, <u>Anais do XX Encontro sobre</u> <u>Escoamento em Meios Porosos</u>, v.1, p.251, São Carlos, 1993.

GOLDSTEIN, Jr.L. <u>Apostila do Curso de Trocadores de Calor</u>, Instituto Brasileiro do Petróleo (IBP), Rio de Janeiro, 1992.

- KANG,S.K., KWON,T.W. and KIM,S.D. Hydrodynamics Characteristics of Cyclone Reactors, <u>Powder Technology</u>, v.58, p.211, 1989.
- KLUCOVSKY,P., HASPRA,J. and DUKYJ, J. A Cyclone as a Heat Exchanger, <u>International Chemical Engineering</u>, v.2, n.2, p.279-282, 1962.
- KUNII, D. and LEVENSPIEL, O. Fluidization Engineering, John Wiley & Sons, U.S.A., 1969.
- LÉDÉ, J., LI, H.Z., SOULIGNAC, F. et VILLERMAUX, J. Le Cyclone Reacteur. Partie II: Mesure de la Distribution des Temps de Séjour de la Phase Solide, <u>The Chemical Engineering Journal</u>, v.42, p.103, 1989.

- LÉDÉ, J., LI, H.Z., SOULIGNAC, F. et VILLERMAUX, J. Le Cyclone Reacteur. Partie IV: Mesure de la Efficacité des Transferts de Chaleur entre les Parois et les Phases Gazeuse et Solide, <u>The Chemical Engineering</u> <u>Journal</u>, v.48, p.83, 1992.
- LEVENSPIEL,O. Engineering Flow and Heat Exchange, Plenum, New York, 1985.
- LOMBARDI,G. <u>Contribuição ao estudo da Transferência de Calor em</u> <u>Ciclones</u>, USP/São Carlos, Tese de Livre Docência, 1991.
- MASSARANI,G. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados, Editora UFRJ, 1997.
- MORI,T., SUGANUMA,A. and TANAKA,S. On Collection Efficiency of Gas Cyclone in Coarse Particle Range, Journal of Chemical Engineering of Japan, v.1, n.1, p.82, 1968.
- NEBRA,S.A. <u>Secagem Pneumática de Bagaço de Cana</u>. Tese de Doutorado, FEC/UNICAMP, Campinas, 121p., 1985.
- OGAWA, A. Estimation of the Collection Efficiences of the Three Types of the Cyclone Dust from the Standpoint of the Flow Patterns in the Cylindrical Cyclone Dust Collectors, <u>Bulletin of JSME</u>, v.27, n.223, p.64-69, 1989.
- PATTERSON,P.A. and MUNZ,R.J. Gas and Particle Flow Patterns in Cyclones at Room and Elevated Temperatures, <u>The Canadian Journal of Chemical Engineering</u>, v.74, p.213-221, 1996.

- PERES,A.P. e CREMASCO,M.A. Proposta de uma Correlação para o Coeficiente de Transferência de Calor Gás/Parede em um Ciclone, <u>Anais</u> <u>do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ)</u>, v.1, p.37-42, Rio de Janeiro, 1996.
- PERES,A.P. e CREMASCO,M.A. Study of Heat Transfer in Cyclone: Correlations Proposal to Gas/Wall Heat Transfer Coefficient. <u>Actas del</u> <u>XII Congreso Nacional de Ingenieria Quimica</u>, v.2, p.529-534, Valparaiso, Chile, 1996.
- PERES,A.P. e CREMASCO,M.A. Proposta de uma Correlação para o Coeficiente de Transferência de Calor Gás/Partícula em um Ciclone. <u>Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXIV ENEMP)</u>, v.2, p.512-517, Uberlândia, 1997.
- PERRY,R.H. and CHILTON,C.H. <u>Chemical Engineers' Handbook</u>, 5<sup>th</sup> edition. Mc Graw Hill Book Company, Tokyo, 1985.
- RANZ, W.E. and MARSHALL, W.R. <u>Chemical Engineering Progress</u>, v.48, p.141, 1952.
- SIDEL'KOVSKI,L.N. and SHCHEVELEV,V.N. Mathematical Modelling of Convective Heat Exchange between Gas and Particle in Cyclone Chambers, <u>Heat Exchange in Cyclones</u>, 1966.
- STRUMILLO,C. and KUDRA,T. <u>Drying: principles, applications and design</u>. Gordon and Breach Sci. Pub., Montreaux, 1990.
- SZEKELY, J. and CARR, R. Heat Transfer in a Cyclone, <u>Chemical Engineering</u> <u>Science</u>, v.21, p.1119-1132, 1966.

- TOMECZEK, J. and KOMORNICKI, W. A Convective Heat Transfer Coefficient in a Highly Circulating Furnace, <u>International Journal of</u> <u>Heat and Mass Transfer</u>, v.8, p.1145, 1984.
- TORREZAN,L.B.M., SARTORI,D.J.M. e SANTANA,C.C. <u>Anais doXI</u> <u>Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos</u>, v.1, p.94-106, Rio de Janeiro, 1983.
- YEN,S.C., LU,W-M and SHUNG,S.C. Gas-Solid Heat Transfer in a Gas Cyclone. Journal of Chinese Institute of Chemical Engineering, v.21, n.4, p.197-206, 1990.

#### **BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

- ABRAHAMSON, J., MARTIN, C.G. and WONG, K.W. The Physical Mechanisms of Dust Collection in a Cyclone, <u>Institute of Chemical</u> <u>Engineering</u>, v.56, p.169-177, 1978.
- BANDROWSKI,J. and KACZMARZYK,G. Gas-to-Particle Heat Transfer in Vertical Pneumatic Conveying of Granular Materials, <u>Chemical</u> <u>Engineering Science</u>, v.33, p.1303-1310, Great Britain, 1978.
- BLOOR, M.I.G. and INGHAM, D.B. Theoretical Investigation of the Flow in a Conical Hydrocyclone, Inst. Chem. Eng., v.51, p.36-41, 1973.
- BLOOR, M.I.G. and INGHAM, D.B. Turbulent Spin in a Cyclone, Institute of Chemical Engineering, v.53, p.1-6, 1975.
- DAVIDSON, J.F. and HARRISON, D. Fluidization, Academic Press, London, 1971.
- DIBB,A. <u>Comportamento Fluidodinâmico do Ciclone em Diferentes</u> <u>Geometrias</u>, Dissertação de Mestrado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 68p., 1997.
- FOUST,A.S., WENZEL,L.A., CLUMP,C.W., MAUS,L. and ANDERSEN,B.L. <u>Princípios das Operações Unitárias</u>. Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.
- FREIRE, J.T. Transferência de Calor em Sistemas Particulados, <u>Revista</u> <u>Brasileira de Engenharia (RBE)</u>, n.3, 1991.

- HOFFMANN,A.C., GROOT,M. and HOSPERS,A. The Effect of the Dust Collection System on the Flowpattern and Separation Efficiency of a Gas Cyclone, <u>The Canadian Journal of Chemical Engineering</u>, v.74, p.464-470, 1996
- KIRAKOSYAN, V.A., BASKAKOV, A.P., LAVROVSKAYA, E.Yu. and POPOV, Yu., A. Heat-Transfer Intensity from Swirling Disperse Flow to Cyclone-Chamber Wall, <u>Journal of Engineering Physics</u>, v.59, n.4, p.1291-1297, 1991.
- LÉDÉ,J., LI,H.Z. et VILLERMAUX,J. Le Cyclone Réacteur. Partie I: Mesure Directe de la Distribution des Temps de Séjour de la Phase Gazeuse -Lois d'Éxtrapolation, <u>The Chemical Engineering Journal</u>, v.42, p.37-55, 1989.
- LÉDÉ, J., MERCADIER, J. and VILLERMAUX, J. Le Cyclone, un Réacteur de Sublimation: Application à la Sublimation de l'acide isocyanurique, <u>The</u> <u>Chemical Engineering Journal</u>, v.62, p.13-21, 1996.
- OGAWA,A. and SEITO,O. Collection Characteristics of the Special Forms of the Returned Flow Types of the Cyclone Dust Collectors, <u>Bulletin of</u> <u>JSME</u>, v.29, n.256, p.3409-3414, 1986.
- PARIDA,A. and CHAND,P. Turbulent Swirl with Gas Solid Flow in Cyclone, Chemical Engineering Science, v.35, p.949-954, Great Britain, 1980.
- RANZ,W.E. Wall Flows in a Cyclone Separator: A Description of Internal Phenomena, <u>Aerosol Science and Technology</u>, v.4, p.417-432, 1985.

- SABUROV,E.N. and KARPOV,S.V. Convective Heat Transfer from Cylinders in Vertical Cyclone Chambers, <u>Heat Transfer-Soviet Research</u>, v.9, n.5, p.21-29, 1977.
- SILVA,M.A. e NEBRA,S.A. Simulação da Transferência de Calor no Ciclone, <u>Anais do XXII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos</u>, v.1, p.251, Florianópolis, 1994.
- VALENTIN, L.M.T. <u>Transferência de Calor no Transporte Vertical</u>. Tese de Mestrado, FEC/UNICAMP, Campinas, 130p., 1986.
- WAKAO,N., KAGUEI,S. and FUMAZKRI,R. <u>Chemical Engineering Science</u>, v.34, p.325-336, 1979.
- ZHOU,L.X. and SOO,S.L. Gas-Solid Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator, Powder Technology, v.63, p.45-63, 1990.