

2301035

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

PROJETO DE UM SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO E LAVAGEM DE GASES

Autor: Giancarlo Lombardi

Orientador: Prof. Dr. Clemente  
Greco

1984.

"Ora (direi) ouvir estrelas! Certo  
Perdeste o senso!" E eu vos direi, no entanto,  
Que, para ouvi-las, muita vez desperto  
E abro as janelas, pálido de espanto ...

E conversamos toda a noite, enquanto  
A via láctea, como um pálio aberto,  
Cintila. E, ao vir o sol, saudoso e em pranto,  
Inda as procuro pelo céu deserto.

Direis agora: "Tresloucado amigo!  
Que conversas com elas? Que sentido  
Tem o que dizem, quando estão contigo?"

E eu vos direi: "Amai para entendê-las!  
Pois só quem ama pode ter ouvido  
Capaz de ouvir e de entender estrelas."

Dedico este trabalho à minha noiva RITA DE CASSIA, eterna namorada e companheira, pela sua compreensão e apoio, de talhes sem os quais este não existiria

Meus agradecimentos especiais e sinceros são para os meus pais GIAN-FRANCO e ODETE que, com seus sacrifícios, esforços e cega dedicação aos filhos, garantiram-me todas as chances e oportunidades em minha vida, sendo que a eles devo tudo o que sou hoje.

Agradeço ao Prof. CLEMENTE GRECO que, permitindo o livre acesso as instalações da C.Greco - Engenharia, Estudos e Projetos Ltda. e atuando como experiente orientador, contribuiu em muito na realização desse trabalho.

Sou também muito grato a todos os companheiros da C.Greco - Engenharia, Estudos e Projetos Ltda. pela experiência prática transmitida, a qual sempre teve por meio de transporte a amizade e confiança.

## S U M Á R I O

Este trabalho visa preencher os requisitos da disciplina Projeto Mecânico I e II pertencente ao currículum do curso de Engenharia Mecânica ministrado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Inicialmente o trabalho apresenta todo um estudo teórico sobre os ciclones e lavadores do tipo Venturi formando assim uma sólida base para a etapa seguinte. Esta, por sua vez, trata-se do desenvolvimento de um programa para computador onde a base teórica transforma-se nos fundamentos de um projeto industrial. Este programa, utilizando o equacionamento de propriedades de fluidos que é também desenvolvido ao longo deste trabalho, torna-se prático e funcional, dispensando a referência a tabelas e gráficos.

Finalmente, justicando a denominação de Projeto Mecânico, procede-se ao projeto de um sistema de despoeiramento e lavagem de gases de exaustão de uma unidade de secagem de fertilizantes, onde demonstra-se a utilização do programa desenvolvido.

Este projeto juntamente com os trabalhos "Gerador de Gases Quentes em Leito Fluidizado" e "Projeto de um Secador Rotativo para Fertilizantes" formam um único compêndio este resultando no projeto básico de uma unidade de secagem de fertilizantes com capacidade de 100 t de produção.

O intuito final deste trabalho é o de permitir que o leitor tenha condições não só de compreender mas também de projetar, estudar e avaliar qualquer sistema de despoeiramento e lavagem de gases que seja composto por ciclones e lavadores Venturi.

I N D I C E

- Capítulo 1 - Equacionamento de propriedades de fluidos .....	1
· 1.1. Massa específica dos gases .....	2
· 1.2. Viscosidade cinemática dos gases .....	4
· 1.3. Viscosidade cinemática da água .....	5
· 1.4. Massa específica da água .....	6
· 1.5. Tensão superficial da água .....	7
- Capítulo 2 - Ciclones .....	8
· 2.1. Descrição genérica .....	8
· 2.2. Modelação matemática da eficiência .....	12
· 2.3. Modelação matemática da perda de carga ..	24
- Capítulo 3 - Lavador Venturi .....	27
· 3.1. Descrição genérica .....	27
· 3.2. Modelação matemática da eficiência .....	32
· 3.3. Modelação matemática da perda de carga ..	36
- Capítulo 4 - Desenvolvimento de um Programa Aplicativo .....	38

- Capítulo 5 - Projeto de um Sistema de Despoeiramento e Lavagem de Gases de Exaustão de uma Unidade de Secagem de Fertilizantes .....	46
. 5.1. Objetivos .....	46
. 5.2. Considerações gerais .....	47
. 5.3. Valores conhecidos .....	50
. 5.4. Desenvolvimento do projeto - Cálculo e adoção de valores .....	52
. 5.5. Considerações finais .....	62
- Bibliografia .....	64
- Anexo A - Notação .....	65
- Anexo B - Valores da viscosidade cinemática do ar .	70
- Anexo C - Valores de propriedades físicas da água .	72
- Anexo D - Exemplo de tabela de ciclones de famílias homotéticas .....	74
- Anexo E - Valores de referência para lavadores tipo Venturi .....	76
- Anexo F - Padrões de emissão para material particulado .....	78
- Anexo G - Catálogo para seleção de ventiladores ...	80
- Anexo H - Planta da instalação do sistema de despoeiramento e lavagem de gases .....	83

## CAPÍTULO 1

### PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

Neste capítulo inicial serão desenvolvidas expressões que permitem a obtenção das principais propriedades do ar e da água. A intenção é de que futuramente, quando por ocasião da entrada de dados no programa de computador que será desenvolvido, não haja a necessidade de constantes recorrências à tabelas de propriedades. O desenvolvimento e aplicação das expressões de tais propriedades permitirá, uma vez fornecidas pressão, temperaturas e umidade no caso do ar, que se obtenha todos os valores necessários a execução do programa.

A dedução da expressão que fornece a massa específica dos gases será deduzida fazendo-se a hipótese de comportamento de gás perfeito. Por outro lado, as expressões das viscosidades cinemáticas e da tensão superficial serão dadas por polinômios obtidos pelo método de Chebyshev aplicado a inúmeros pontos das respectivas tabelas.

### 1.1. Massa Específica dos Gases ( $\rho_g$ )

A pressão barométrica local é uma função da altitude local e pode ser obtida pela expressão:

$$P_b = \frac{760}{10,63} \cdot (10,33 - \frac{H_o}{900}) \quad (1.1)$$

A expressão total do gás é obtida somando-se a pressão estática do mesmo à pressão barométrica

$$P_t = \frac{P_e}{13,6} + P_b \quad \text{onde: } P_e \text{ (mm.c.a.)} \quad (1.2)$$

$P_b$  (mm.Hg)  
 $P_t$  (mm.Hg)

Admitindo-se que tanto o ar como o gás sejam gases perfeitos tem-se:

$$P = \rho \cdot \frac{R}{M} \cdot T \quad \text{equação de gás perfeito} \quad (1.3)$$

$$\rho = \frac{M \cdot P}{R \cdot T} \quad \text{nas condições normais de pressão e temperatura}$$

$$\begin{aligned} P &= 760 \text{ mm.Hg} \\ T &= 273^\circ \text{ K} (20^\circ \text{C}) \\ \rho_{ar} &= 1,293 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

da mesma forma:

$$\rho_g = \frac{M_g}{R} \cdot \frac{P_g}{T_g} \quad \text{sendo } P_g = P_t \text{ obtem-se:}$$

$$\rho_g = 1,293 \cdot \left( \frac{273}{T_g} + 273 \right) \cdot \frac{P_t}{760} \cdot \frac{M_g}{M_{ar}} \quad (1.4)$$

considerando-se que  $M = \frac{m}{n}$  onde  $M$  = massa molecular  
 $m$  = massa  
 $n$  = número de mols

$$\text{tem-se: } \frac{M_g}{M_{\text{ar}}} = \frac{\frac{m_{H_2O}}{(n_{H_2O} + n_{\text{ar}})} \cdot \frac{n_{\text{ar}}}{(m_{\text{ar}})}}{\frac{m_{H_2O} + m_{\text{ar}}}{(n_{H_2O} + n_{\text{ar}}) \cdot \frac{m_{\text{ar}}}{n_{\text{ar}}}}} = \frac{\frac{(m_{H_2O} + m_{\text{ar}})}{m_{\text{ar}}}}{\frac{(n_{H_2O} + n_{\text{ar}})}{n_{\text{ar}}}}} =$$

$$= \frac{w + 1}{\frac{n_{H_2O}}{n_{\text{ar}}} + 1}$$

$$\text{sendo } n_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{M_{H_2O}} \quad \text{e} \quad n_{\text{ar}} = \frac{m_{\text{ar}}}{M_{\text{ar}}}$$

$$\text{onde } M_{H_2O} = 18,02$$

$$M_{\text{ar}} = 28,97$$

$$\text{assim } \frac{n_{H_2O}}{n_{\text{ar}}} = \frac{w}{0,622}$$

portanto a massa específica do gás pode ser obtida pela expressão que segue:

$$\rho_g = 1,293 \cdot \left(\frac{273}{T_g + 273}\right) \cdot \frac{P_t}{760} \cdot \frac{(w + 1)}{\left(\frac{w}{0,622} + 1\right)} \quad (1.5)$$

## 1.2. Viscosidade Cinemática dos Gases ( $\mu_g$ )

Os valores da viscosidade cinemática dos gases serão adotados como sendo os mesmos que os do ar a uma pressão de 1 atmosfera absoluta. Estes valores, função da temperatura, podem ser observados no gráfico 1 e na tabela 1 do anexo B. Devido ao fato que a maior parte dos casos reais da prática envolvem temperaturas de gases inferiores a 500°C, desejar-se-á para esta faixa uma boa aproximação dos valores. Para isto, a curva do gráfico 1 será aproximada por um polinômio de 5º grau utilizando-se o procedimento de Chebyshev. Em seguida, para temperaturas maiores que 500°C, aplicando-se o mesmo procedimento a tabela 1, obter-se-á um polinômio de 3º grau.

Conclusão: Equações para a obtenção da viscosidade cinemática de gases

$$T_g < 500^\circ\text{C} \dots \mu_g = 1,326 \times 10^1 + 9,59 \times 10^{-2} \times T_g + 2,70 \times 10^{-4} \times T_g^2 - 1,27 \times 10^{-6} \times T_g^3 + 3,15 \times 10^{-9} \times T_g^4 - 2,76 \times 10^{-12} \times T_g^5 \quad (1.6)$$

$$T_g > 500^\circ\text{C} \dots \mu_g = 2,097 \times 10^1 + 7,37 \times 10^{-2} \times T_g + 1,04 \times 10^{-4} \times T_g^2 - 1,81 \times 10^{-8} \times T_g^3 \quad (1.7)$$

onde  $T_g = (\text{°C})$

$10^6 \cdot \mu_g = (\text{m}^2/\text{s})$

### 1.3. Viscosidade Cinemática da Água ( $\mu_1$ )

Os valores da viscosidade cinemática da água em função da temperatura podem ser observados no gráfico 1 do anexo C. Obtém-se uma boa aproximação desta curva entre as temperaturas de 5 a 100°C, limites de aplicabilidade prática de lavagem, com a equação que segue abaixo:

$$\mu_1 = 2,312 - 0,443 \times \ln (T_1) \quad (1.8)$$

onde  $T_1 = (\text{°C})$   
 $10^6 \cdot \mu_1 = (\text{m}^2/\text{s})$

#### 1.4. Massa Específica da Água ( $\rho_1$ )

Os valores da massa específica da água em função da temperatura podem ser observados no anexo C sendo que uma excelente aproximação pode ser obtida pela equação:

$$\rho_1 = 1,000 \times 10^3 + 3,252 \times 10^{-2} \times (T_1) - 6,945 \times 10^{-3} \times \\ \times (T_1)^2 + 3,619 \times 10^{-5} \times (T_1)^3 - 1,190 \times 10^{-7} \times \\ \times (T_1)^4 \quad (1.9)$$

onde  $T_1 = (\text{°C})$

$\rho_1 = (\text{kg/m}^3)$

### 1.5. Tensão Superficial da Água ( $\sigma$ )

Os valores da tensão superficial da água em função da temperatura podem ser observados no anexo C sendo que a expressão abaixo resulta uma aproximação satisfatória a nível de projeto:

$$\begin{aligned}\sigma = & 7,610 - 9,181 \times 10^{-3} \times (T_1) - 3,004 \times 10^{-4} \times (T_1)^2 + \\& + 5,382 \times 10^{-6} \times (T_1)^3 - 4,605 \times 10^{-8} \times (T_1)^4 + \\& + 1,465 \times 10^{-10} \times (T_1)^5\end{aligned}\quad (1.10)$$

onde  $100 \cdot \sigma = (\text{N/m})$

$T_1 = (\text{°C})$

## CAPÍTULO 2

### C I C L O N E S

#### 2.1. Descrição Genérica

Trata-se de um dispositivo muito simples utilizado para separação sólido-gás ou sólido-líquido. O trabalho em questão versará exclusivamente sobre o primeiro tipo de separação uma vez que o intuito final deste é o projeto de um sistema de despoeiramento de efluentes gasosos.

A captação de partículas por meio de ciclones se faz possível e viável quando o diâmetro médio das mesmas é igual ou maior que aproximadamente 5 microns ( $\mu\text{m}$ ) ou quando ocorrem aglomerações formadas por dispersóides finos. Os ciclones são principalmente empregados quando a carga de material particulado é elevada (maior que  $10 \text{ g/Nm}^3$ ) ou quando esta possui um razoável teor de umidade (propensão e formação de aglomerados).

Os ciclones apresentam inúmeras vantagens quando comparados com outros sistemas convencionais de despoeiramento, como por exemplo, o baixo custo de instalação e a fácil manutenção quando bem dimensionados e aplicados.

Na verdade, os ciclones em geral são de construção simples além de compactos e de fácil operação, sendo que a não ser a utilizada para vencer a resistência aerodinâmica ao escoamento, não necessita qualquer outro fornecimento de energia.

A eficiência de um ciclone, até pouco tempo atrás, não era possível de ser matematicamente modelada devido ao grande número de variáveis envolvidas e ao complicado movimento do ar no interior do mesmo. Hoje, como será visto nas secções

seguintes deste trabalho, expressões empíricas de excelentes respostas estão sendo obtidas. Este trabalho contém o que de mais recente há quanto a ciclones e suas aplicações industriais.

A separação do material particulado pelo ciclone está baseada na ação da força centrífuga que atua sobre as partículas. O fluxo de gás carregado de pó, geralmente, é introduzido pela parte superior do ciclone de maneira a entrar tangencialmente em seu interior como mostra a figura 1 abaixo.

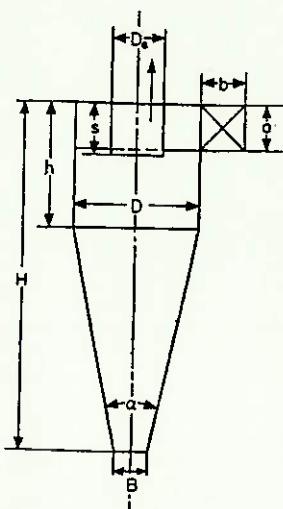


Figura 1

O ciclone é basicamente formado por um cilindro de diâmetro  $D$  com um tronco de cone associado a sua parte inferior. Observa-se que o fluxo de gás adentra ao ciclone por um tubo de secção retangular e tem por saída, um tubo cilíndrico de diâmetro  $D_e$  localizado concentricamente com o eixo do ciclone. Sob ação da força centrífuga as partículas tendem a se concentrar na fina camada de ar junto à parede interna do corpo do ciclone. Estabelece-se então o movimento helicoidal descendente dos gases, os quais percorrem várias voltas entre as paredes do corpo do ciclone e do tubo de saída (vôrtice externo ou outer vortex). Quando o fluxo de gás encontra a parte cônica, inicia-se uma mudança na direção do mesmo, originada por diferença de pressões, de maneira que o fluxo passa a mover-se para cima através do tubo de exaustão (vôrtice interno ou inner vortex). Define-se assim cla-

ramente a existência de dois movimentos helicoidais que podem ser observados na figura 2 e são:

- o primeiro externo e descendente no cilindro e no cone
- o segundo interno e ascendente partindo da extremidade do cone e saindo através do tubo de exaustão

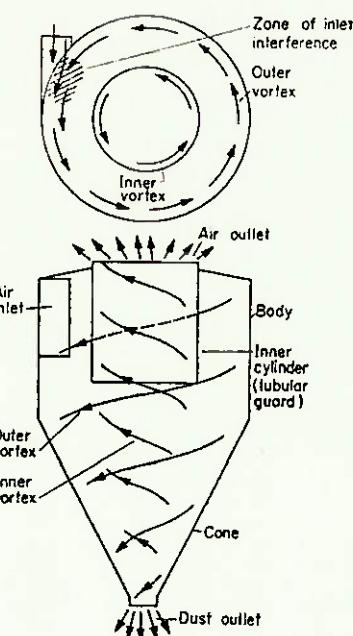


figura 2

Após chocarem-se contra as paredes do ciclone as partículas movem-se para baixo junto com os gases e são removidas através da boca de descarga localizada no fim da parte côncica. Por vezes, a descarga de pequenas quantidades de ar através desta boca tende a projetar as partículas separadas para fora do ciclone.

O movimento das partículas na direção da saída não é causado somente pela força gravitacional. Primordialmente este se deve ao fato que o fluxo de gás gira na parte cilíndrica e côncica tendo um movimento axial na direção da vértice da parte côncica. Este movimento pode tanto ser provocado por diferenças de pressões como também, em certos tipos especiais de ciclones (ver anexo D), pela inclinação com que os gases entram no interior do mesmo. Portanto, o ciclone pode

ser não só posicionado na vertical, com o cone para baixo, mas também inclinado horizontalmente ou até mesmo verticalmente com a parte cônica para cima.

A separação das partículas é tanto melhor quanto menor for o diâmetro do ciclone, maior for a velocidade de entrada dos gases e maior for o número de voltas das correntes helicoidais.

Nunca devem ser associados ciclones semelhantes em série pois as partículas não captadas pelos primeiros não o serão nos seguintes.

Habitualmente nos interiores dos ciclones, especialmente na porta inferior do cone, existe uma pressão negativa bem acentuada. Quando isto ocorre, o tubo de descarga do material coletado não deve permitir a entrada de ar para dentro do ciclone, uma vez que este ar arrastaria grande número de partículas de volta ao fluxo de gases. Por outro lado, não se deve permitir que o material captado se acumule na parte inferior do cone pois o movimento de rotação do ar reinseria as partículas na corrente ascendente de gases e mesmo porque este acúmulo pode chegar até a mudar as características geométricas do ciclone. A solução para este problema pode ser o uso de válvulas do tipo "mancuna", as quais se abrem quando é atingido um determinado peso de material particulado sobre a mesma ou então o uso de tampas em série de modo que uma somente se abra quando a outra estiver fechada (compartimento estanque).

## 2.2. Modelação Matemática da Eficiência

Um grande número de ensaios e teorias tem sido desenvolvidos objetivando obter relações que permitam prever a eficiência de ciclones convencionais de fluxo reverso. Os modelos essencialmente teóricos partem de hipóteses que não se confirmam experimentalmente de modo que os valores previstos não são concretos. Isto ocorre porque no interior deste tipo de ciclone o fluxo de gases possui um regime muitas vezes não permanente e de escoamento muito complexo. Modelos teóricos que consideram o caminho percorrido pelas partículas em ciclones convencionais ainda estão por ser desenvolvidos, embora anteceda-se que resultados satisfatórios poderão ser obtidos. Atualmente as curvas de eficiência de ciclones podem ser obtidas através do uso de coeficientes experimentais, método este que tem apresentado boas aproximações. Vale explicar que a curva de eficiência de um ciclone relaciona a eficiência de separação com cada diâmetro do material particulado que está sendo ciclonado (veja figura 3).

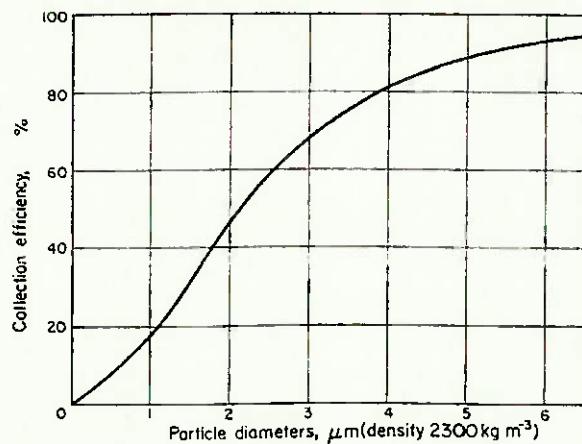


Figura 3

Nesta parte do trabalho objetiva-se obter três pontos notáveis com os quais será possível a definição da curva de eficiência para um dado ciclone. Estes pontos são os seguintes:

1. Diâmetro mínimo ( $d_o$ )
2. Diâmetro de corte ( $d_{50}$ )
3. Diâmetro crítico ( $d_{100}$ )

A seguir veremos o que representa cada um destes diâmetros e quais os procedimentos para suas respectivas obtenções.

#### 2.2.1. Diâmetro mínimo ( $d_o$ )

O Diâmetro Mínimo de captação de um ciclone representa o menor diâmetro que é possível de ser separado do fluxo de gases por este equipamento. Sendo assim, para diâmetros iguais ou menores que o Diâmetro Mínimo teremos uma eficiência de captação igual a zero (0%).

Para a obtenção do Diâmetro Mínimo bem como dos outros dois diâmetros notáveis são feitas as seguintes hipóteses:

- (i) Não existe influência de uma partícula em movimento sobre as demais e vice-versa
- (ii) Uma vez que uma partícula se choca com a parede interna do ciclone, é desprezível a possibilidade de que ela volte ao fluxo de gases
- (iii) A Lei de Stokes é válida para o movimento da partícula em relação ao escoamento dos gases
- (iv) Considera-se que o regime no interior do ciclone seja permanente
- (v) A velocidade tangencial das partículas é constante em um mesmo raio de rotação

(vi) A força centrífuga a que a partícula está submetida é muito maior que a força peso atuante sobre a mesma de forma que instantaneamente o movimento da partícula só possui componentes radial e tangencial

(vii) As partículas são aproximadamente esféricas

O Diâmetro Mínimo é obtido afirmando-se que as forças envolvidas estão em equilíbrio ou seja, a força centrífuga e a resistência dos gases ao movimento da partícula possuem o mesmo valor em módulo (a menos da força peso assumida de pequeno valor relativo a força centrífuga).

Stokes estuda o escoamento de um fluido viscoso e incompressível em torno de uma esfera determinando que o Arrasto (força que o fluido exerce sobre a esfera) é dado pela expressão:

$$\text{Arrasto} = 6 \cdot \pi \cdot a \cdot \mu_g \cdot U \cdot \rho_g \quad (2.1)$$

onde  $a$  = raio da esfera

$\mu_g$  = viscosidade cinemática do gás

$U$  = velocidade da esfera em relação ao gás ao longe

$\rho_g$  = massa específica do gás

A força centrífuga atuante sobre a partícula pode ser expressa pela relação:

$$\text{Força centrífuga} = \frac{m \cdot u^2}{R} \quad (2.2)$$

onde  $m$  = massa da partícula

$u$  = velocidade tangencial da partícula

$R$  = distância da partícula ao eixo axial de rotação

Relacionando estas duas expressões para serem aplicadas a um ciclone convencional devem ser feitas as seguintes alterações:

- a. o raio da esfera ( $a$ ) passará a ser o raio da partícula a ser captada;
- b. a velocidade tangencial ( $u$ ) será a máxima velocidade (para Diâmetro Mínimo é o pior caso) que uma partícula poderá ter à entrada do ciclone. Segundo Barth tem-se:

$$\frac{u}{V_e} = \frac{\pi \cdot D_e \cdot (D-b)}{2ab\alpha + \pi \cdot (H-S) \cdot (D-b) \cdot \mu'} \quad (2.3)$$

onde  $V_e$  = velocidade à entrada do tubo de saída

$$V_e = \frac{4 \cdot Q}{3600 \cdot \pi \cdot D_e^2} \quad (2.4)$$

$\mu'$  = coeficiente de atrito entre a parede e os gases (frequentemente  $\mu' = 0,02$ )

$K$  = coeficiente de entrada dos gases no ciclone. Para entrada helicoidal  $K=1$  e para outros tipos de entrada ver figuras 4a e 4b

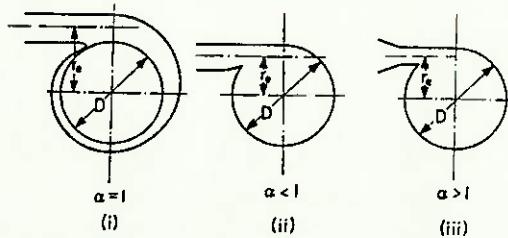


Figura 4a

Entrance designs (a)

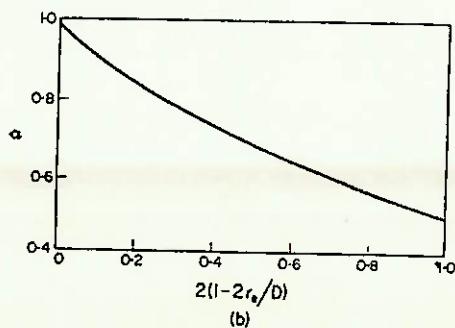


figura 4b

c. a distância da partícula ao eixo axial de rotação (R) será o valor intermediário entre as duas posições extremas representadas pelos diâmetros D e D<sub>e</sub>, portanto:

$$R = \frac{D + D_e}{4} \quad (2.5)$$

Para a igualdade abaixo obtém-se o valor do Diâmetro Mínimo:

Força Centrifuga = Arrasto

$$\frac{m \cdot u^2}{R} = 6 \cdot \pi \cdot a \cdot \mu_g \cdot U \cdot \rho_g$$

$$\text{sendo } a = \frac{d}{2} \quad \text{e} \quad m = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_p$$

$$U = \frac{u^2 \cdot \rho_p \cdot d^2}{18 \cdot R \cdot \mu_g \cdot \rho_g} \quad \text{onde} \quad R = \frac{D + D_e}{4} \quad (2.5a)$$

Sabe-se que o tempo que uma partícula permanece no interior do ciclone é o chamado tempo de residiência dada por:

$$t = \frac{3600 \cdot X \cdot V}{Q} \quad (2.6)$$

onde o volume efetivo de um ciclone com dimensões mostradas na figura 1 é:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ \frac{(H-h)}{(D-B)} \cdot \frac{(D^3 - B^3)}{3} + D^2 \cdot h - D_e^2 \cdot S \right] \quad (2.7)$$

Com a hipótese (ii) e assumindo-se que partículas de diâmetro igual ou menor que o Diâmetro Mínimo percorrem uma trajetória quase que linear entre a boca de entrada e o tubo de escape com uma velocidade U tem-se:

$$t = \frac{D - D_e}{2} \cdot \frac{1}{U}$$

$$\therefore U = \frac{D - D_e}{2t} \quad (2.8)$$

determina-se assim o valor de U

$$U = \frac{(D - D_e) \cdot Q}{2 \cdot 3600 \cdot x \cdot v} \quad (2.9)$$

Desta forma, na equação 2.5a. obtém-se o valor do Diâmetro Mínimo:

$$d_o^2 = \frac{18 \cdot R \cdot \mu_g \cdot \rho_g \cdot U}{u^2 \cdot \rho_p} = \frac{18 \cdot (D + D_e) \cdot \mu_g \cdot \rho_g \cdot (D - D_e) \cdot Q}{4 \cdot 2 \cdot 3600 \cdot u^2 \cdot \rho_p \cdot x \cdot v}$$

$$d_o = \left[ \frac{(D^2 - D_e^2) \cdot \mu_g \cdot \rho_g \cdot Q}{u^2 \cdot \rho_p \cdot x \cdot v \cdot 1600} \right]^{1/2} \times 10^6 \quad (2.10)$$

onde  $d_o$  = Diâmetro Mínimo ( $\mu\text{m}$ )

$u$  = máxima velocidade tangencial (equação 2.3) ( $\text{m/s}$ )

$V$  = volume do ciclone (equação 2.7) ( $\text{m}^3$ )

demais variáveis ver anexo A

### 2.2.2. Diâmetro de Corte ( $d_{50}$ )

O Diâmetro de Corte de um ciclone representa o diâmetro para o qual uma eficiência de 50% é obtida na captação do material particulado. Partículas com diâmetro igual ao Diâmetro de Corte tem, quando em rotação no ponto de máxima velocidade tangencial, 50% de chances de serem arremessadas contra a parede e 50% de serem aspiradas pelo tubo de saída. Ca-

so haja uma continuidade no movimento rotacional desta partícula, estará ocorrendo, como no caso anterior, um equilíbrio entre as forças de arrasto e centrífuga.

Stairmand em Trans. Instn. Chemical Engineering (1951) sugere que o ponto de máxima velocidade tangencial deve ocorrer sobre o diâmetro  $D_e/2$ , de maneira que a velocidade radial média da partícula em direção ao tubo de escape é dada por:

$$u = \frac{2 \cdot Q}{\pi D_e \cdot (H-S) \cdot 3600 \cdot x} \quad (2.11)$$

onde a área de escoamento é

$$A = \pi \cdot \frac{D_e}{2} \cdot (H-S)$$

(ver figura 5)

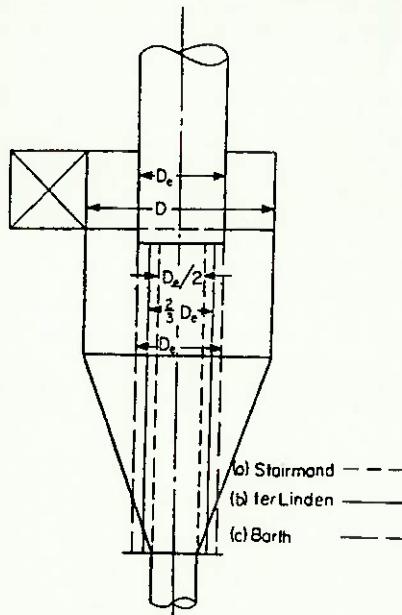


figura 5

Sendo que a resistência dos gases ao movimento da partícula é dada pela Lei de Stokes tem-se:

$$\text{Arrasto} = 6 \cdot \pi \cdot \frac{d_{50}}{2} \cdot \mu_g \cdot \rho_g \cdot \frac{2Q}{\pi \cdot D_e \cdot (H-S) \cdot 3600 \cdot x} \quad (2.12)$$

Esta força como já vimos deve ser equilibrada pela força centrífuga de onde obtém-se:

$$d_{50} = \frac{3}{v_i \cdot \phi} \left[ \frac{Q \cdot \mu_g \cdot D_e \cdot \rho_g}{7200 \cdot \pi \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot (H-S) \cdot D} \right]^{1/2} \times 10^6 \quad (2.13)$$

onde  $d_{50}$  = Diâmetro de corte ( $\mu\text{m}$ )

$v_i$  = velocidade média de entrada no ciclone (m/s)

$$v_i = \frac{Q}{3600 \cdot a \cdot b \cdot x} \quad (2.14)$$

$\phi$  = coeficiente de atrito

demais variáveis ver apêndice A

O coeficiente de atrito é definido como sendo a relação entre a velocidade tangencial da partícula no raio de entrada do ciclone ( $D/2 - b/2$ ) e a velocidade média no tubo de entrada do mesmo. Experimentalmente obtém-se a relação:

$$\phi = \frac{\left[ \frac{D_e}{2(D-b)} + \frac{4 \cdot G \cdot A}{a \cdot b} \right]^{1/2} - \left[ \frac{D_e}{2(D-b)} \right]^{1/2}}{\frac{2 \cdot G \cdot A}{a \cdot b}} \quad (2.15)$$

onde  $G$  = constante de perda por atrito segundo Stanton e Pannell em Physical Transport (1914)

$G = 0,005$  para gases

$A$  = área de contato do ciclone com os gases

A área A de contato do ciclone com os gases é formada por três principais parcelas:

- a) parte cilíndrica do ciclone
- b) parte cônica do ciclone
- c) parte do tubo de escape que está no interior do ciclone

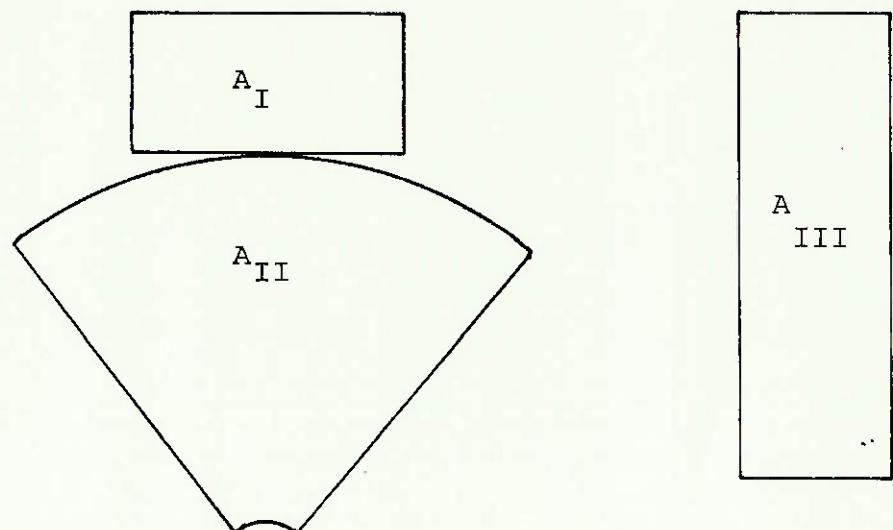


Figura 6

$$A_I = \pi D h$$

$$A_{II} = \pi \cdot \left[ (H-h)^2 + \left( \frac{D}{2} - \frac{B}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot \frac{(B+D)}{2}$$

$$A_{III} = \pi D_e S$$

$$\text{Tem-se desta forma o valor de } A = A_I + A_{II} + A_{III}$$

$$A = \pi \cdot \left[ D_e S + D h + \left[ (H-h)^2 + \frac{(D-B)^2}{4} \right]^{1/2} \cdot \frac{(B+D)}{2} \right] \quad (2.16)$$

### 2.2.3. Diâmetro Crítico ( $d_{100}$ )

O Diâmetro Crítico de um ciclone representa o diâmetro de partícula a partir do qual a eficiência de captação é de 100%. Inicialmente a principal hipótese para a obtenção deste ponto notável foi a de que as partículas cujo diâmetro eram iguais ou maiores que o Diâmetro Crítico colidiram com a parede do ciclone sem mudar sua trajetória. Em outras palavras, estas partículas manteriam sua direção de movimento após deixar a boca de entrada do ciclone, atravessando o fluxo de gases tangencialmente para atingir a superfície do mesmo. Mais recentemente, segundo Davies em Proc. Instr. Mechanical Engineering (1951), admite-se que estas partículas possam se mover através de uma secção anular em movimento semelhante a uma vórtice livre. Assumindo como já foi visto na equação 2.6. que o tempo de residência  $t$  é uma função da vazão de gases e das características geométricas do ciclone, obtém-se a seguinte expressão:

$$d_{100} = 3 \times 10^6 \cdot \left[ \frac{Q \cdot \mu_g \cdot \rho_g}{3600 \cdot X \cdot 2 \cdot V_i^2 \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot \pi} \cdot \right. \\ \left. \cdot \left( \frac{1 - \left( \frac{2 \cdot D_e}{3D} \right)^4}{\frac{H-h}{D-B} \cdot \frac{D^3 - B^3}{D^2} + h - S \cdot \left( \frac{D_e}{D} \right)^2} \right)^{1/2} \right] \quad (2.17)$$

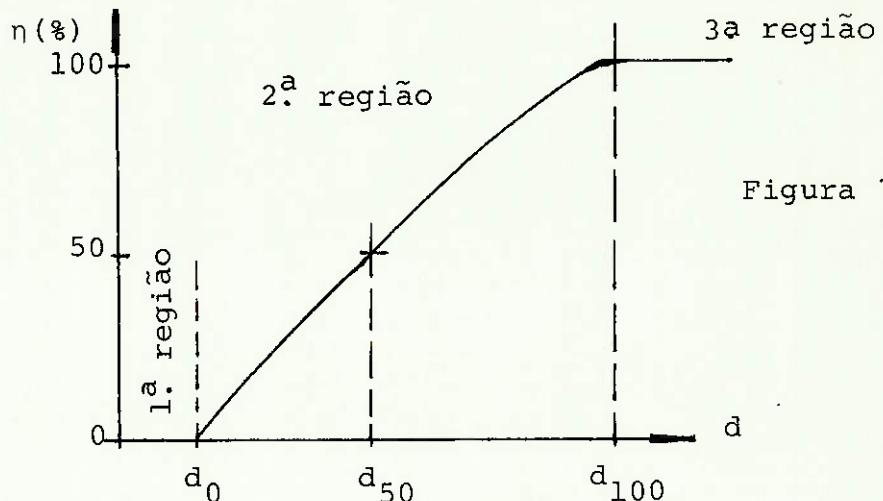
### 2.2.4. Ajustamento da Curva de Eficiência

Pode-se, com a definição dos três pontos notáveis obtidos anteriormente, determinar a curva de eficiência, também conhecida como curva de eficiência fracionária, a qual, como já visto, correlaciona o diâmetro de partícula com a eficiência de captação do ci-

clone para a mesma.

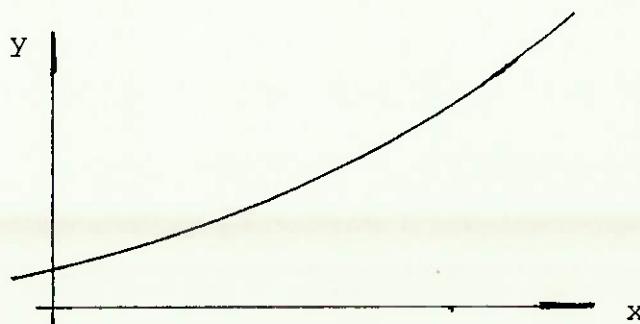
Determinados os Diâmetros Mínimos, de Corte e Crítico, respectivamente  $d_0$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{100}$ , pode-se dividir a curva de eficiência em três regiões distintas que, para um diâmetro qualquer de partícula  $d$ , são:

- a) 1<sup>a</sup> região -  $d < d_0$  - eficiência  $\eta = 0\%$
- b) 2<sup>a</sup> região -  $d_0 < d < d_{100}$  - eficiência  $0 < \eta < 100\%$
- c) 3<sup>a</sup> região -  $d > d_{100}$  - eficiência  $\eta = 100\%$



Na figura 7 observa-se que na 2<sup>a</sup> região existe um relacionamento entre diâmetro e eficiência de captação que pode ser aproximada por uma função exponencial. Procede-se ao ajuste de uma curva nesta região da seguinte forma:

Seja a equação genérica  $y = a \cdot e^{bx}$  de uma curva de acordo com a figura 8 onde tem-se os coeficientes:



$$a = \frac{\sum x_i \ln y_i - \frac{1}{n} \cdot (\sum x_i) (\sum \ln y_i)}{\sum x_i^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum x_i)^2} \quad (2.17)$$

$$a = \exp \left[ \frac{\sum \ln y_i - b \sum x_i}{n} \right] \quad (2.18)$$

Sendo os pontos  $(x_i, y_i)$  os seguintes: (n=3)

$$(x_1, y_1) = (0, d_0)$$

$$(x_2, y_2) = (50, d_{50})$$

$$(x_3, y_3) = (100, d_{100})$$

obtem-se assim a curva de eficiência fracionária em função do diâmetro da partícula para esta região.

### 2.3. Modelação Matemática da Perda de Carga

Da mesma forma que a modelação matemática da eficiência de um ciclone (ítem 2.2.), aqui também os desenvolvimentos teóricos tem se deparado com problemas referentes a significância e validade de seus resultados. Por outro lado, os ensaios e coeficientes experimentais, embora apresentem na prática uma boa aplicabilidade, apresentam o grande inconveniente de apenas valerem, quando muito, para ciclones homotéticos aos ensaiados.

No anexo D encontra-se uma típica tabela de coeficientes de perda de carga para quatro (4) famílias homotéticas de ciclones. Os modelos CN11, CN15 e CN24 pertencentes ao anexo são considerados como sendo muito aplicáveis em indústrias de fertilizantes, de cimento, de processamento de rochas fosfáticas e também siderúrgicas. Para a utilização do anexo D as seguintes relações se fazem necessárias:

$$w_o = v_i$$

$$\gamma = \rho_g$$

$$w_1 = \frac{Q \cdot 4}{3600 \cdot X \cdot \pi D^2}$$

Contudo, na prática, muito facilmente encontram-se ciclones cujas características geométricas os diferenciam das famílias do anexo D bem como também de todas as outras que por ventura possam ter sido ensaiadas e/ou catalogadas. É com base nesta possibilidade que se reconhece a necessidade da modelação matemática da perda de carga para um ciclo ne convencional de fluxo reverso.

Inicialmente deve-se esclarecer que as principais causas responsáveis pela resistência aerodinâmica ao fluxo de gases são os seguintes:

- i) tubo de entrada do ciclone

- ii) expansão ou compressão dos gases ao entrarem no ciclone
- iii) atrito dos gases com as paredes do ciclone
- iv) redução de energia cinética dos gases em rotação no ciclone
- v) entrada dos gases no tubo de saída do ciclone
- vi) variação de pressão estática ao longo da trajetória do fluxo de gases.

Segundo Ter Linden em Tonindustrie Zeitung (1953) a perda de carga devido a redução de energia cinética dos gases no interior do ciclone seria muito maior que as outras causas, de maneira que estas poderiam ser desprezadas. Com base nesta hipótese obter-se-ia a perda de carga em termos da velocidade média de entrada e de um coeficiente adimensional (analogia aos ensaios de laboratório).

$$\Delta H = \frac{\xi \cdot v_i^2 \cdot (\rho_g + \rho_p')}{2 \cdot g} \quad (2.19)$$

onde  $\Delta H$  = perda de carga no ciclone ( $\text{kg/m}^2$  ou mm.c.a.)

$\rho_p' = C(\rho_p - \rho_g)$  para  $C$  = fator de correção que corrige a perda de carga em função da concentração do material particulado

Utilizando esta equação 2.19 por sua forma genérica mas discordando da hipótese simplificadora de Ter Linden, Barth apresenta um sofisticado método para o cálculo do coeficiente de perda de carga baseando-se nas causas acima mencionadas que são então divididas em dois grupos principais:

- a) perda de carga à entrada do ciclone e perda devido ao atrito dos gases com as paredes (índice i)
- b) perda de carga devido a mudança da direção do fluxo de gases e a entrada do tubo de saída (índice e)

Tem-se então a expressão:

$$\epsilon = \frac{\xi}{\left(\frac{4 \cdot ab}{\pi \cdot D_e^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{u}{V_e}\right)^2} \quad (2.20)$$

onde  $\epsilon$  = coeficiente global de perda de carga no ciclone

Da equação 2.3. obtém-se  $\frac{u}{V_e}$  sendo que vale a relação

$$\epsilon = \epsilon_i + \epsilon_e \quad (2.21)$$

Os coeficientes de perda de carga  $\epsilon_i$  e  $\epsilon_e$  são obtidos pelas expressões que seguem:

$$\epsilon_i = \frac{D_e}{D} \cdot \left[ \frac{1}{(1 - 2 \cdot \frac{u}{V_e} \cdot \frac{(H-S)}{D_e} \cdot \mu')^2} - 1 \right] \quad (2.22)$$

$$\epsilon_e = \frac{3,41}{\left(\frac{u}{V_e}\right)^{2/3}} + 1 \quad (2.23)$$

Somando-se os valores obtidos pelas expressões 2.22 e 2.23 obtém-se o valor de  $\epsilon$ . Com este, na equação 2.20 calcula-se o coeficiente de perda de carga  $\xi$  que possibilita a avaliação teórica da perda de carga do fluxo de gases no ciclone pela equação 2.19.

CAPÍTULO 3

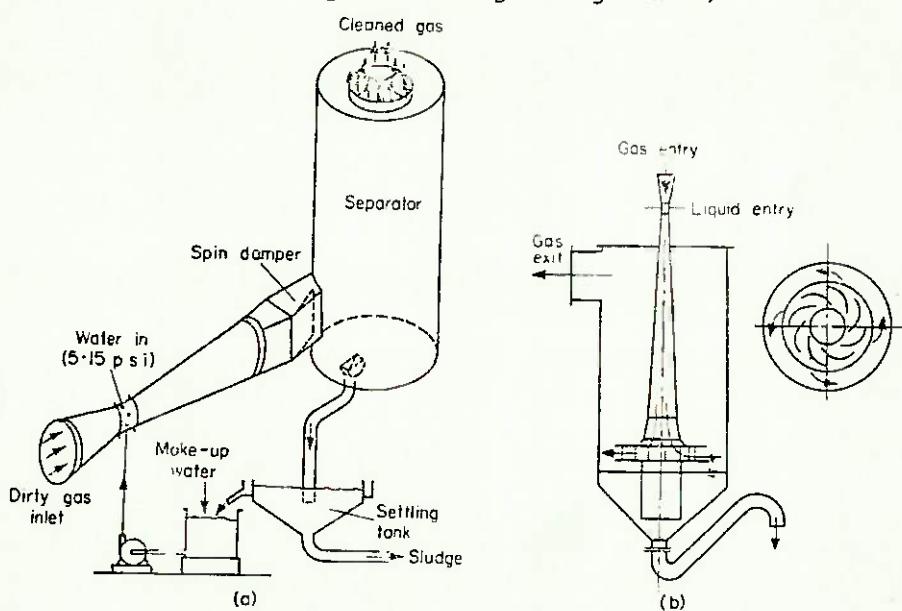
L A V A D O R   V E N T U R I

3.1. Descrição Genérica

Os lavadores tipo Venturi foram patenteados pela primeira vez em 1925 mas sua aplicação industrial só se tornou uma realidade 20 anos mais tarde. O primeiro lavador Venturi industrial que se tem conhecimento foi instalado em 1945 visando recuperar sulfato de sódio dos gases de exaustão de uma caldeira de recuperação. Desde então, lavadores Venturi tem sido amplamente utilizados em processos de absorção de gases e remoção de partículas, principalmente em indústrias químicas e siderúrgicas.

Basicamente um lavador do tipo Venturi consiste de um dispositivo que aumenta sensivelmente a velocidade de escoamento do fluxo de gases injetando, neste dado momento, uma certa quantidade de líquido (veja figura 9)

Figura 9



Sabe-se que a alta velocidade dos gases na chamada "garganta" do Venturi, ponto de injeção do líquido, é responsável por uma atomização do fluido de lavagem. Praticamente toda a energia necessária para o funcionamento de um lavador Venturi é empregada para se vencer a resistência aerodinâmica deste à passagem do fluxo de gases.

A captação de partículas dos gases pelo lavador Venturi é explicada com base em dois fenômenos ou mecanismos que são a impactação inercial e a condensação. Como o fluido de lavagem é injetado geralmente perpendicular à direção do escoamento dos gases, suas partículas quando atomizadas possuem uma velocidade relativa às partículas dos gases, muito alta. Em outras palavras, isto significa que as gotículas atomizadas passam a atuar como obstáculos ao acelerado material particulado. Este mecanismo é chamado de impactação inercial, sendo que é considerado como sendo o principal mecanismo envolvido neste tipo de lavador.

O outro fenômeno envolvido é o chamado efeito de condensação. Se o gás na região de baixa pressão (ou alta velocidade segundo a relação de Bernouilli) encontra-se saturado ou supersaturado, então ocorrerá condensação na região de alta pressão (ou baixa velocidade). Em outras palavras, se o fluxo de gases se encontrar saturado (ou supersaturado) à garganta do Venturi, as partículas, atuando como núcleos heterogêneos, propiciarão a condensação assim que os gases atingirem o difusor. Este fenômeno que propicia o aumento do tamanho das partículas, que por sua vez reduz a velocidade das mesmas, amplia o efeito de impactação inercial. Da mesma forma, por aumentar a superfície molhada das partículas, proporciona a aglomeração de novas outras, resultando globalmente em um aumento na eficiência de captação.

Como será visto em detalhes nos itens seguintes, a velocidade dos gases na garganta do Venturi é uma das variáveis mais importantes na operação deste tipo de lavador. Foi com vista neste aspecto que recentemente foi desenvolvido um tipo de lavador Venturi que possui seção variável de escoamento em sua garganta. Esta variação, automática ou manual, é obtida pela aproximação ou afastamento de um corpo em forma de cunha ou disco da entrada da garganta do Venturi. Desta forma, é possível manter-se uma determinada



velocidade na garganta do Venturi mesmo que ocorram variações no fluxo de gases (vazão, temperatura, umidade, etc). Isto é interessante uma vez que, como serão vistos, em seguida, a eficiência de captação é diretamente relacionada com a velocidade. Este recurso adicional, embora encareça o custo do equipamento, se faz bastante útil em plantas onde os regimes de funcionamento são muito distintos, mas a tolerância no padrão de emissão de gases é fixado.

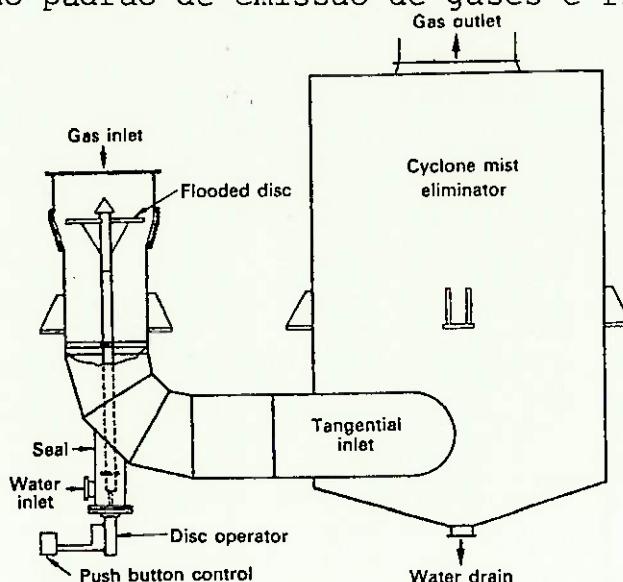


Figura 10

Costuma-se associar à saída do lavador Venturi um separador de gotas que, como o próprio nome já indica, visa separar dos gases as partículas compostas por líquidos e líquidos + sólidos. O separador de gotas mais comumente utilizado é o ciclônico invertido. Neste tipo de separador, cuja teoria que o explica foi vista no Capítulo 2 deste trabalho, os gases entram tangencialmente por sua parte inferior e, com movimento helicoidal, dirigem-se para cima, onde encontra-se a saída para a atmosfera (ver figura 9). O posicionamento invertido deste ciclone em nada é anormal uma vez que também já foi dito que a direção de escoamento do fluxo de gases não depende exclusivamente da aceleração da gravidade. A captação do material separado é feita pela parte inferior do separador de gotas. Um acessório que vem ganhando bastante credibilidade e que visa aumentar a efici-

ciência do separador de gotas convencional é o chamado Demister. Trata-se ou de um conjunto de pás superpostas e de inclinação definida (figura 11) ou de um conjunto de telas superpostas (figura 12) colocados tangencialmente ao fluxo de gases um pouco antes da entrada do tubo de saída do separador visando obter altas eficiências de captação para geometrias simples de separadores.

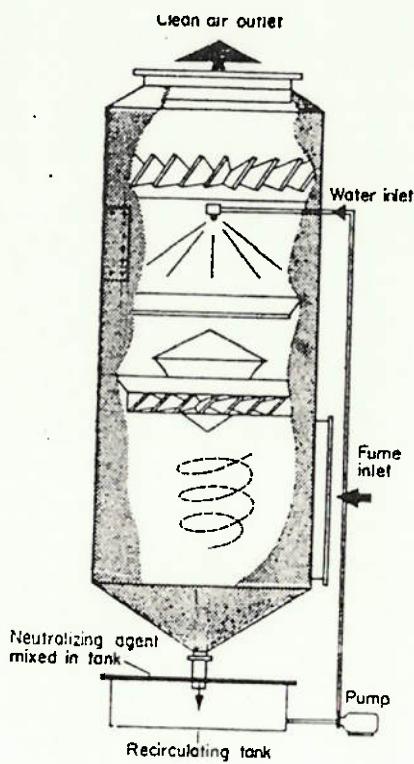


figura 11

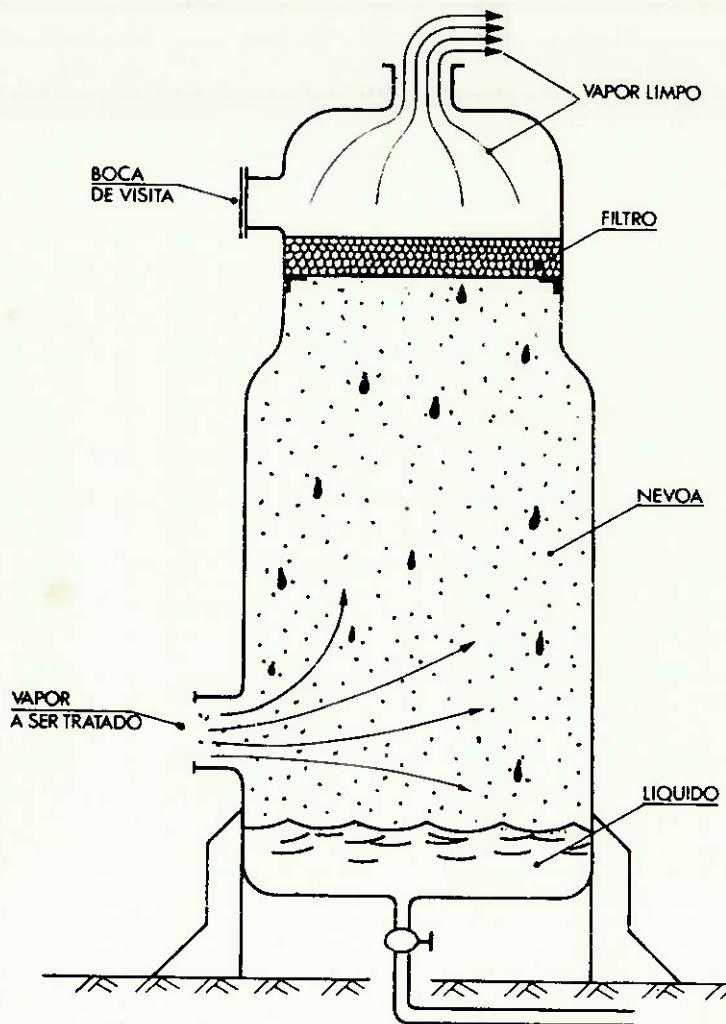


Figura 12a

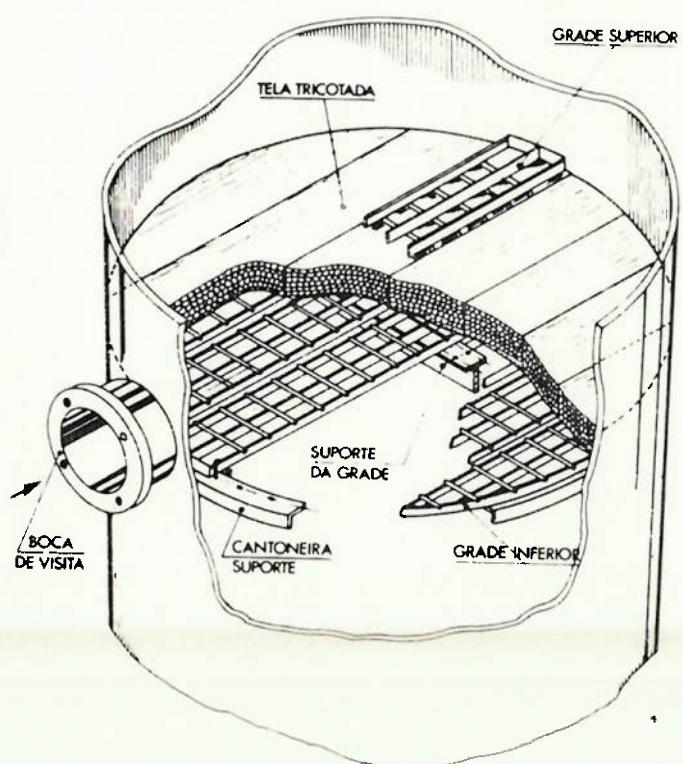


Figura 12b

### 3.2. Modelação Matemática da Eficiência

As primeiras aproximações feitas na tentativa de se obter a modelação da eficiência de captação em lavadores do tipo Venturi datam de 1951 e foram obtidas por Johnstone. Junta mente com Roberts em Industrial Chemical Engineering (1949), estes afirmavam existir uma relação direta e fundamental entre a superfície das gotículas atomizadas e a eficiência da captação. Com bases nesta hipótese foi desenvolvida a relação que segue abaixo a título de ilustração:

$$\eta = 1 - e^{(-KR\sqrt{\psi})}$$

onde R = relação líquido-gás

K = constante que é função da superfície das gotí culas

$\psi$  = parâmetro de impactação inercial

Os estudos buscando relações que cada vez mais precisamente refletissem o comportamento dos Venturis continuaram sempre tentando não repetir erros anteriores. Por exemplo, os dados obtidos por Johnstone sofrem a séria acusação de não poderem ser aplicados em escala industrial uma vez que foram obtidos em protótipos de laboratório.

Surgiram recentemente os sofisticados métodos de avaliação, propostos por T.D. Placek e L.K. Peters, onde um modelo teórico da eficiência de lavadores Venturi é governado por complexas equações diferenciais envolvendo transferências de calor, massa e quantidade de movimento. Este método, por sua vez, resulta complexo demais para aplicações que visam projetos industriais.

Distinguindo-se os mecanismos primários e secundários envolvidos na captação do material particulado, foi possível o desenvolvimento de um modelo matemático que, envolvendo as variáveis de operação, satisfaz as necessidades a nível de projeto. Uma vez assumido que as partículas dos gases se movem acompanhando as linhas de corrente deste, os mecanismos primários, como já vistos a impactação inercial e a condensação, são os responsáveis reais da captação enquanto que, os mecanismos secundários, relacionados com a transferência de calor e massa entre gases e gotículas, não são considerados na modelação.

Inicialmente, como apanhado geral dos principais desenvolvimentos sobre o assunto, definiu-se a relação líquido-gás de lavagem e a velocidade na garganta do Venturi como sendo as principais variáveis de operação. Em segundo plano situam-se a geometria do Venturi e as distribuições granulométricas das gotículas atomizadas e das partículas dos gases. Importantes considerações de projeto são referidas quanto ao comprimento da garganta e quanto a localização da injeção do líquido de lavagem.

A modelação que a seguir será apresentada foi desenvolvida por Calvert em Wet Scrubber System Study (1972) e como já foi dito, satisfaz as necessidades da modelação matemática da eficiência a um nível de projeto. Baseando na análise do movimento das partículas e das gotículas na garganta do Venturi tem-se:

$$\eta = 1 - \exp (36,364 \times 10^{-3} \cdot R \cdot V_g \cdot \rho_1 \cdot D_o \cdot F(\psi, f) / \mu_g \cdot \rho_g) \quad (3.2)$$

onde  $\eta$  é a eficiência de captação para um dado diâmetro

Obs.: todas as variáveis bem como suas respectivas unidades encontram-se explicadas no anexo A.

Sendo  $F(\psi, f)$  a função dada por:

$$F(\psi, f) = \frac{2}{\psi} \cdot (-0,7 - 0,5\psi f + 1,4 \ln(\frac{0,5\psi f + 0,7}{0,7}) + \frac{0,49}{0,5\psi f + 0,7}) \quad (3.3)$$

onde  $f$  é uma constante (ver obs. 1) e  $\psi$  o parâmetro de impactação inercial dada por:

$$\psi = \frac{C \cdot \rho_p \cdot V_g \cdot D_p^2}{18 \cdot D_o \cdot \rho_g \cdot \mu_g} \quad (3.4)$$

Sendo  $C$  o fator de correção de Cunningham que obtém-se de:

$$C = 1 + \frac{2 \cdot A \cdot \lambda}{D_p} \quad (3.5)$$

Para  $\lambda$  sendo o caminho médio livre entre as moléculas do gás na secção de escoamento (ver obs. 2) e  $A$  igual a:

$$A = 1,257 + 0,4 \cdot \exp(-\frac{1,1 \cdot D_p}{2\lambda}) \quad (3.6)$$

O diâmetro médio das gotículas do líquido de lavagem podem ser previstos segundo Nukiyama e Tanasawa por:

$$D_o = \frac{18506}{V_g} \left( \frac{10 \cdot \sigma}{\rho_1} \right)^{0,5} + 2824,71 \frac{\left( \frac{\rho_l \mu_1}{10 \sigma} \right)^{0,45}}{\left( 10 \sigma \cdot \rho_1 \right)^{0,225}} \cdot R^{1,5} \quad (3.7)$$

Obs. 1: Foi sugerido por alguns pesquisadores que a capacidade de reter água (higroscopicidade) por alguns tipos de material particulado estaria relacionado com uma eficiência maior de captação em lavadores Venturi. Considerando este fato a constante  $f$  para materiais hidrófilos vale de 0,4 a 0,5 enquanto que para materiais não-hidrófilos, de 0,1 a 0,3.

Obs. 2: O valor de  $\lambda$  pode ser estimado usando a teoria cinemática dos gases sendo função da viscosidade, densidade, peso molecular e temperatura absoluta dos gases em escoamento. Por outro lado, o caminho médio livre das moléculas pode ser obtido em manuais de química para um dado gás a uma certa temperatura.

Uma vez definida as variáveis envolvidas no processo de captação, para um dado diâmetro médio do material particulado  $D_p$ , obtém-se o valor da eficiência fracionária  $\eta$ .

### 3.3. Modelação Matemática da Perda de Carga

Basicamente a energia consumida por um lavador tipo Venturi é quase toda proveniente da resistência aerodinâmica deste a passagem dos gases. Esta resistência pode ser dividida em duas causas através das quais poder-se-á estimá-la em termos de perda de carga.

Inicialmente, devido ao fato de existirem velocidades da ordem de 40 a 60 m/s à garganta do Venturi, uma considerável parcela da perda de carga recai sobre o escoamento neste trecho, uma vez que como se sabe, esta é proporcional ao quadrado da velocidade.

Uma outra causa significativa da perda de carga neste tipo de lavador é proveniente da troca de energia cinética  $\Delta E_c$  que ocorre quando do impacto do gás com o líquido de lavagem. Esta relação é obtida por:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_g \cdot m_l}{m_g + m_l} \cdot (v_g - v_l) \quad (3.8)$$

onde:  $m_g$  = massa de gás por unidade de tempo

$m_l$  = massa de líquido por unidade de tempo

$v_g$  = velocidade do gás

$v_l$  = velocidade do líquido

Tomando-se as velocidades  $v_g$  e  $v_l$  como sendo as velocidades na direção do eixo de simetria do Venturi antes do impacto, observa-se que quando o líquido é injetado perpendicularmente ao escoamento dos gases,  $v_l = 0$ , uma grande energia é consumida pelo equipamento. Nos casos em que os lavadores utilizam bicos injetores direcionados à jusante do escoamento,  $v_l > 0$ , muito menos energia é consumida para os mesmos valores de  $m_g$  e  $m_l$ , embora a prática demonstre que a eficiência de captação para estes tipos de lavadores seja inferior do anterior.

Uma expressão que vem sendo utilizada por fornecer valores de perda de carga próximos aos obtidos na prática é dada por:

$$\Delta H = (\zeta_g + \zeta_1 \cdot q) \cdot \frac{\rho_g \cdot v_g^2}{2 \cdot g} \quad (3.9)$$

$$\text{para a qual: } q = \frac{R \cdot \rho_1}{\rho_g} \quad (3.10)$$

os valores de  $\zeta_1$  são obtidos de tabelas experimentais (anexo E) e o valor de  $\zeta_g$  varia entre 0,10 e 0,15 dependendo da geometria do Venturi.

Nesta expressão, observa-se que o coeficiente  $\zeta_g$  pondera a perda de carga pelo escoamento do gás e o coeficiente  $\zeta_1$  pela transferência de energia cinética para uma injeção a 90°C.

## CAPÍTULO 4

### DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA APLICATIVO

Visando dar um enfoque aplicativo de todos os desenvolvimentos teóricos até agora abrangidos neste trabalho, optou-se pela realização de um programa de computador voltado diretamente à aplicação em projetos industriais. Este programa vem preencher uma lacuna existente nos métodos de projeto os quais se deparam com longos processos iterativos quando do cálculo de sistemas de despoeiramento e lavagem de gases. Estes processos acabam muitas vezes por obrigar a tomada de medidas simplificadoras que induzem geralmente aos superdimensionamentos. Sabe-se que na prática isto é o procedimento normal de projeto refletido em termos de coeficientes de segurança mas, uma vez em tempos de crises energéticas, faz-se necessário o real entendimento dos parâmetros envolvidos, bem como a procura de maiores eficiências para os equipamentos projetados.

O programa aplicativo foi desenvolvido em linguagem Basic de maneira a poder ser utilizado na maioria dos microcomputadores existentes atualmente no mercado, bastando apenas que este possua uma capacidade de memória programável de 16 K bites. A versão que se encontra em anexo a este capítulo ocupa pouco mais que 17 k bites de memória podendo ser reduzido mediante determinadas modificações. Por sua vez, sendo o programa desenvolvido em uma HP-85, talvez se faça necessária a transformação de alguns comandos especiais para sua adaptação a outros microcomputadores.

Existem dois corpos principais no interior do programa sendo estes chamados CICLONE e LAVADOR. Tanto no dimensionamento de uma bateria de ciclonagem (vários ciclones iguais em paralelo) como no de um lavador tipo Venturi podemos ter dois tipos distintos de procedimentos.

No primeiro, após a entrada de todos os dados pertinentes ao escoamento, obtém-se como saída principal a curva de eficiência fracionária (expressa em termos dos diâmetros mínimo, crítico e de corte) e a perda de carga do equipamento. Com esta saída é possível estudar-se a influência de uma ou mais variáveis, simultaneamente, na

performance global do equipamento. Um dos muitos usos que esta saída permite é, por exemplo no caso de ciclones, a de coletar-se as dimensões de um ciclone qualquer e selecionando o modo correto do programa obtér-se, para este ciclone, sua curva de eficiência e respectiva perda de carga.

No segundo procedimento, além de como no anterior proceder-se a entrada de dados referentes ao escoamento, deve-se entrar com as características granulométricas do material particulado. Estas características são o número de faixas granulométricas, seus limites inferiores e superiores e a porcentagem em massa de cada faixa. Estas são as respostas básicas de um ensaio granulométrico que não é mais que um requisito mínimo para um projeto de um sistema de despoieiramento e lavagem de gases. Como resposta a esta nova entrada de dados, além da curva de eficiência fracionária e da perda de carga do equipamento, teremos a concentração de particulados em suspensão à saída do mesmo bem como as novas porcentagens em massa e concentrações parciais para cada uma das faixas granulométricas de entrada. É muito interessante observar-se que no decorrer deste procedimento de cálculo, a saída granulométrica de um equipamento é a entrada do equipamento seguinte. Assim, o programa aplicativo permite que em poucos minutos se obtenha a concentração que é lançada para a atmosfera por uma determinada unidade de despoieramento e lavagem para um dada concentração de entrada.

O programa é dotado de um interessante desvio que permite, uma única vez introduzida a composição granulométrica do material particulado, reiterar-se o dimensionamento do equipamento até obter-se o valor desejado para a concentração à saída.

Faz parte do corpo do programa CICLONE uma subrotina que gera na tela um preciso desenho representando um ciclone genérico. Neste, as respectivas cotas como variáveis permitem não só, como já foi visto, auxiliar na entrada de quaisquer dimensões, mas também na visualização do formato do equipamento, uma vez que, ao final do

programa, as cotas do ciclone dimensionado podem ser visualizadas como uma das saídas.

Vale ainda expor que o programa possibilita, se for assim desejado, o uso de ciclones homotéticos de três diferentes famílias. Estas famílias foram selecionadas por apresentarem muito bons valores de eficiência contra perda de carga na prática podendo ser observados no anexo D deste trabalho. Neste caso não são necessários todas as dimensões do ciclone selecionado, pois com apenas o diâmetro principal do mesmo (D) o programa se incumbirá, uma vez selecionada a família homotética, de obtê-las.

Para encerrar esta breve apresentação sobre algumas características do programa aplicativo justifica-se salientar que, a fim de agilizar a utilização deste, teve-se como meta a não necessidade de recorrências a tabelas, cartas psicrométricas e demais fontes de propriedades dos fluidos envolvidos no sistema. Para tornar isto possível foram utilizadas as relações previamente desenvolvidas no Capítulo 1 deste trabalho, de modo a necessitar-se apenas de valores de pressão estática, temperatura, umidade absoluta e altitude, como entradas do programa.

Nas páginas a seguir encontra-se a listagem do programa aplicativo.



```

45 R1=1.293*(273/(273+T))*((P/76
0)*(W+1)/(W-.522+1))
50 IF T>500 THEN GOTO 465
55 N=(13.26+.0959*T+.000271*T^2
-.00000128*T^3+.0000000315*T^4
-.18E-12*T^5)*.000001
56 GOTO 470
55 N=(20.96667+.073717*T+.00010
396*T^2-.0000001E125*T^3)*
.000001
70 IF FLAG(5)=1 THEN GOTO 1230
75 D3=1-(2*D1/(3*D1))^4/((H-L)/
(D-K)*(D^3-K^3)/D^2+L-S*(D1/
D)^2)
80 D3=3*(D3*N*R1/(7200*PI*X*X*
V1^2*(R2-R1)))^.5
85 A1=PI*(D*L+D1*K)
90 A2=((H-L)^2+((D-K)/2)^2)^.5*
PI*(K+D)/2
15 A3=R1+A2
10 A4=.01*A3/(A*B)
15 A5=D1/(2*(D-B))
0 A6=((A5+2*A40^.5-A5^.5)/A4
5 D2=(Q*N*D1*R1/(7200*PI*(R2-R
1)*((H-S)*D*X))^.5*3/(V*A6)
10 V0=PI/4*((H-L)/((D-K)*(D^3-K^
3)/3+D^2*L-D1^2*S))
15 V1=4*Q/(3600*X*PI*D1^2)
0 H2=PI*D1*(D-B)/(2*A*B*1+PI*(H-S)*(D-B)*.02)
5 V2=H2*X*V1
0 T3=V0/(0/(X*3600))
5 D0=((D^2-D1^2)*N*R1*9*0/(4*X
0*X2^2*R2*3600*X))^.5
0 D0=00*1000000
5 D2=D2*1000000
0 D3=D3*1000000
5 DISP USING "16A,DDDD,D,X,2A"
; "DIAMETRO MINIMO=",D0;"µm"
0 DISP USING "18A,DDDD,D,X,2A"
; "DIAMETRO DE CORTE=",D2;"µ
m"
5 DISP USING "17A,DDDD,D,X,2A"
; "DIAMETRO CRITICO=",D3;"µ
m"
0 DISP USING "22A,00,D,X,3A"
; "VELOCIDADE DE ENTRADA=",V;
"m/s"
5 DISP USING "20A,00,D,X,3A"
; "VELOCIDADE DE SAIDA=",V1;""
m/s"
3 IF FLAG(9)=1 THEN 620 ELSE 6
10
3 IF B5>100 THEN B5=100
3 DISP USING "13A,000,00,1A"
; "EFICIENCIA E'",B5;"%"
: RETURN
: H7=H7*R1*X*V2
: GOTO 660
620 H2=PI*D1*(D-B)/(2*A*B*1+PI*(H-S)*(D-B)*.02)
625 H3=3.41/H2^.67+1
630 H4=D1/D*(1/(1-2*H2*(H-S)*.02
*/D1)^2-1)
635 H5=H3+H4
640 H6=H5*(A*B/(PI*(D1^2/4)))^.2*
H2^.2
645 C1=C*.001/R2
650 C1=0
655 H7=H6*V^2*(R1+C1*(R2-R1))/19
.6
660 DISP USING "15A,DDDD,D,X,4A"
; "PERDA DE CARGA=",H7;"mmC
A"
665 DISP
670 E1=LOG(D0)
675 E2=LOG(D2)
680 E3=LOG(D3)
685 B1=(50*E2-25*(E1+E2))/1250
690 B2=EXP(.5*(E1+E2)-25*B1)
695 B3=(50*(E2+2*E3)-75*(E2+E3))/1250
700 B4=EXP((E2+E3)/2-B3*.75)
705 IF FLAG(10)=1 THEN 1195
710 DISP "'DESEJA A EFICIENCIA P
ARA ALGUM DIAMETRO (S/N)'"
; @ INPUT A$
715 IF A$="S" THEN GOTO 720 ELSE
815
720 DISP "DIAMETRO (µm)" ; @ INPUT
D4
725 IF D4<D3 THEN GOTO 745
730 B5=100
735 IF FLAG(10)=0 THEN GOSUB 595
740 GOTO 800
745 IF D4>D2 THEN GOTO 750 ELSE
GOTO 770
750 B5=LOG(D4/84)/B3
755 IF FLAG(10)=1 THEN GOTO 1125
760 IF FLAG(10)=0 THEN GOSUB 595
765 GOTO 800
770 IF D4>D0 THEN GOTO 790
775 B5=0
780 IF FLAG(10)=0 THEN GOSUB 595
785 GOTO 800
790 B5=LOG(D4/B2)/B1
795 IF FLAG(10)=0 THEN GOSUB 595
800 IF FLAG(10)=0 THEN DISP "DES
EJA A EFICIENCIA PARA OUTRO
DIAMETRO"; @ INPUT A$
805 IF FLAG(10)=1 THEN 1125
810 GOTO 715
815 DISP "DESEJA NOVO CALCULO PA
RA OS MESMOS DADOS COM O
OUTRO CICLONE"; @ INPUT A$
820 IF A$="S" THEN SFLAG 1 ELSE
830
825 GOTO 125
830 DISP "DESEJA AS COTAS DO CIC
LONE SELECCIONADO"; @ INF
UT A$

```

```

75 IF A$=="S" THEN 845
10 BEEP 100,70 @ END
15 CLEAR @ DISP "MEDIDAS EM m"
20 DISP "D=";D
25 DISP "a=";A
30 DISP "b=";B
35 DISP "H=";H
40 DISP "h=";L
45 DISP "De=";D1
50 DISP "E=";K
55 DISP "s=";S
60 GOTO 840
65 GCLEAR @ SCALE 1,256,1,196
70 MOVE 117,10 @ IDRAW -27,90 @
    IDRAW 6,60 @ IDRAW 90,0 @
    DRAW 0,-20 @ IDRAW -40,0 @ M
    OVE 110,140
75 MOVE 160,160 @ IDRAW 0,-60 @
    IDRAW -27,-90 @ IDRAW -16,0
    @ MOVE 110,110 @ IDRAW 0,70
    @ IDRAW 30,0 @ IDRAW 0,-70
80 IDRAW -30,0 @ MOVE 160,140 @
    IDRAW 20,20 @ MOVE 160,160
    @ IDRAW 20,-20 @ MOVE 90,100
    @ IDRAW 70,0
85 MOVE 68,160 @ IDRAW 21,0 @ M
    OVE 68,10 @ IDRAW 48,0 @ MOV
    E 78,100 @ IDRAW 11,0 @ MOVE
    181,160 @ IDRAW 6,0
90 MOVE 181,140 @ IDRAW 6,0 @ M
    OVE 103,110 @ IDRAW 6,0 @ MO
    VE 117,5 @ IDRAW 0,-6 @ MOVE
    133,9 @ IDRAW 6,-6
95 MOVE 160,161 @ IDRAW 0,6 @ M
    OVE 180,161 @ IDRAW 6,6 @ MO
    VE 110,181 @ IDRAW 0,6 @ MOV
    E 140,181 @ IDRAW 6,6
100 MOVE 70,10 @ IDRAW 0,150 @ M
    OVE 80,100 @ IDRAW 6,60 @ MO
    VE 105,110 @ IDRAW 6,50 @ MO
    VE 185,140 @ IDRAW 6,20
105 MOVE 110,185 @ IDRAW 30,0 @
    MOVE 90,105 @ IDRAW 32,0 @ M
    OVE 132,105 @ IDRAW 28,0
110 MOVE 117,5 @ IDRAW 16,0 @ MO
    VE 160,165 @ IDRAW 20,0 @ LD
    IR 0
    MOVE 60,85 @ LABEL "H" @ MOV
    E 75,130 @ LABEL "h" @ MOVE
    125,191 @ LABEL "D" @ MOVE 1
    00,135 @ LABEL "s"
    LDIR 0
    MOVE 125,12 @ LABEL "B" @ MO
    VE 170,172 @ LABEL "b" @ MOV
    E 192,150 @ LABEL "a"
    MOVE 126,186 @ LABEL "De"
    MOVE 125,0 @ LDIR 90 @ LABEL
    "-----"
    LDIR 0
    975 MOVE 110,135 @ LABEL "----"
    980 MOVE 69,160 @ IDRAW 0,-4 @ M
    OVE 79,160 @ IDRAW 0,-4 @ MO
    VE 104,160 @ IDRAW 0,-4 @ MO
    VE 69,10 @ IDRAW 0,4
    985 MOVE 79,100 @ IDRAW 0,4 @ MO
    VE 104,110 @ IDRAW 0,4 @ MO
    E 186,160 @ IDRAW 0,-4 @ MOV
    E 186,140 @ IDRAW 0,4
    990 MOVE 110,166 @ IDRAW 4,0 @ M
    OVE 140,186 @ IDRAW -4,0 @ M
    OVE 90,106 @ IDRAW 4,0 @ MOV
    E 160,106 @ IDRAW -4,0
    995 MOVE 160,166 @ IDRAW 4,0 @ M
    OVE 180,166 @ IDRAW -4,0 @ M
    OVE 117,6 @ IDRAW 4,0 @ MOVE
    133,6 @ IDRAW -4,0
1000 MOVE 200,10 @ LABEL "#CONT#
"
1005 IF FLAG(9)=1 THEN COPY
1010 PAUSE
1015 RETURN
1020 ! "MEDIDAS SEMELHANTES"
1025 A=.66*D
1030 B=.26*D
1035 D1=.6*D
1040 K=.35*D
1045 RETURN
1050 CLEAR
1055 SFLAG 10
1060 DISP "NUMERO DE FAIXAS GRAN
    VULOMETRICAS":@ INPUT N2
1065 DISP "ENTRE SEMPRE COM OS
    LIMITES INFERIOR ,SUPERI
    OR E % EM MASSA SEPARADOS P
    OR VIRGULA"
1070 N3=0
1075 IF N3+1=N2 THEN GOTO 1095
1080 DISP N3+1," a faixa=L1,Ls,%"
    @ INPUT G(2*N3+1),G(2*N3
    +2),M(N3+1)
1085 N3=N3+1
1090 GOTO 1075
1095 DISP N3+1," a faixa=L1,Zm"
    @ INPUT G(2*N3+1),M(N3+1)
1100 GOTO 125
1105 N3=0
1110 IF N3+1=N2 THEN 1145
1115 D4=(G(2*N3+1)+G(2*N3+2))/2
1120 GOTO 725
1125 IF B5>100 THEN B5=100
1130 C(N3+1)=C#M(N3+1)/100*(1-B5
    /100)
1135 IF N3+2>N2 THEN 1155 ELSE N
    3=N3+1
1140 GOTO 1110
1145 D4=G(2*N3+1)
1150 GOTO 725
1155 N3=1 @ C2=0
1160 IF N3>N2 THEN 1180

```

e<sup>lnx5</sup> e<sup>ln5</sup> 5 = C

1165 C2=C2+C(N3)  
 1170 N3=N3+1  
 1175 GOTO 1160  
 1180 DISP USING "21A,000,00,5A"  
 ; "CONCENTRACAO A SAIDA=";C  
 1185 DISP "DESEJA A MASSA E A %  
 DE CADA FAIXA GRANULOMET  
 RICA A SAIDA"; @ INPUT A\$  
 1190 IF A\$="N" THEN 815  
 1195 N3=1  
 1200 IF N3>N2 THEN 815  
 1205 K(N3)=100\*C(N3)/C2  
 1210 DISP USING "00,9A,000,00,7A"  
 ; "000,0,2A"; N3;"a." faixa="  
 ; C(N3); "9/Hm3 (";K(N3); "%")"  
 1215 N3=N3+1  
 1220 GOTO 1200  
 1225 GOTO 815  
 1230 DISP "RELACAO LÍQUIDO>GAS(L  
 >Nm3)" ; @ INPUT R  
 1235 DISP "MATERIAL HIGROSCÓPICO  
 (%S/N)" ; @ INPUT B\$  
 1240 IF B\$="S" THEN F=-45 ELSE F  
 =-2  
 1245 DISP "VELOCIDADE NA GARGANTA  
 A (m/s)"; @ INPUT V1  
 1250 DISP "TEMPERATURA DO LÍQUID  
 O (C)"; @ INPUT T1  
 1255 T2=(7.60968-.009181\*T1-.000  
 7004\*T1^2+.000005382\*T1^3-.  
 00000004605\*T1^4+1.465E-10\*  
 T1^5)\*10  
 1260 T4=1000+.0325\*T1-.006945\*T1  
 ^2+.00003619\*T1^3-.00000011  
 9\*T1^4  
 1265 T6=(2.312-.443\*LOG(T1))\*.00  
 001\*T4  
 1270 T5=(18506/V1\*(T2/T4)^-5+282  
 4.71\*(T6^2/(T2\*T4))^1.225\*R^  
 1.5)\*.000001  
 1275 CLEAR  
 1280 IF FLAG(2)=1 THEN 1430  
 1285 DISP "K1)...EFICIENCIA E  
 PERDA DE CARGA (EPC)"  
 1290 DISP "K2)...CONCENTRACAO  
 A SAIDA EM FUNCAO DE N PARA  
 METROS C\$=f(N)"  
 1295 ON KEY# 1, "EPC" GOTO 1315  
 1300 ON KEY# 2, "C\$=f(N)" GOTO 13  
 80  
 1305 KEY LABEL  
 1310 GOTO 1310  
 1315 CLEAR  
 1320 DISP "DIAMETRO DA PARTICULA  
 (mm)"; @ INPUT D4  
 1325 GOTO 1330  
 1330 D5=1.257+.4\*EXP(-(1.1\*D4\*.0  
 00061\*(2\*6.53\*.00000001)))  
 1335 D6=1+2\*D5\*6.53\*.00000001/D4  
 \* .000001

1340 D7=D6\*R2\*V1\*(D4\*.000001)^2/  
 (18\*T5\*N\*R1)  
 1345 D8=2/D7\*(-.7-.5\*D7\*F+1.4\*KL0  
 \*G(-.5\*D7\*F+.7)/(.7)+.49\*(-.5\*  
 D7\*F+.7))  
 1350 D9=(1-E)\*P(135,004\*P(1000+71\*  
 T4\*T5\*D8/(N\*R1))/2)\*100  
 1355 IF FLAG(6)=1 THEN GOTO 1450  
 1360 DISP USING "16A,000,0,5A,00  
 0,0,1A"; "EFICIENCIA PARA"  
 ; D4;"%"; E;"D9;"%"  
 1365 DISP "DESEJA EFICIENCIA D  
 E OUTROS DIAMETROS (%/N)  
 "; @ INPUT A\$  
 1370 IF A\$="S" THEN 1320  
 1375 GOTO 1545  
 1380 CLEAR  
 1385 SFLAG 6  
 1390 DISP "NUMERO DE FAIXAS GRAN  
 ULOMETRICAS"; @ INPUT N2  
 1395 DISP "ENTRE SEMPRE COM OS  
 LIMITES INFERIOR, SUPERI  
 OR E % EM MASSA SEPARADOS P  
 OR VIRGULA"  
 1400 N3=0  
 1405 IF N3+1=N2 THEN GOTO 1425  
 1410 DISP N3+1;"a." faixa=L1,L2,%  
 m%" ; @ INPUT G(2\*N3+1),G(2\*N3  
 +2),M(N3+1)  
 1415 N3=N3+1  
 1420 GOTO 1405  
 1425 DISP N3+1;"a." faixa=L1,L2,%  
 ; @ INPUT G(2\*N3+1),M(N3+1)  
 1430 N3=0  
 1435 IF N3+1=N2 THEN 1465  
 1440 D4=(G(2\*N3+1)+G(2\*N3+2))/2  
 1445 GOTO 1325  
 1450 C(N3+1)=C\*M(N3+1)/100\*(1-D9  
 /100)  
 1455 IF N3+2>N2 THEN 1475 ELSE N  
 3=N3+1  
 1460 GOTO 1435  
 1465 D4=G(2\*N3+1)  
 1470 GOTO 1325  
 1475 N3=1 @ C2=0  
 1480 IF N3>N2 THEN 1500  
 1485 C2=C2+C(N2)  
 1490 N3=N3+1  
 1495 GOTO 1480  
 1500 DISP USING "21A,000,00,5A"  
 ; "CONCENTRACAO A SAIDA=";C  
 ; "9/Hm3"  
 1505 DISP "DESEJA A MASSA E A %  
 DE CADA FAIXA GRANULOMET  
 RICA A SAIDA"; @ INPUT A\$  
 1510 IF A\$="N" THEN 1545  
 1515 N3=1  
 1520 IF N3>N2 THEN 1545  
 1525 K(N3)=100\*C(N3)/C2  
 1530 DISP USING "00,9A,000,00,7A"  
 ; "000,0,2A"; N3;"a." faixa="  
 ; C(N3); "9/Hm3 (";K(N3); "%")"

```
1535 N3=N3+1
1540 GOTO 1520
1545 J1=R*R1/T4*1000
1550 IF J1>.33 THEN 1565
1555 J2=.61
1560 GOTO 1615
1565 IF J1>.515 THEN 1580
1570 J2=.591+.001*V1
1575 GOTO 1615
1580 IF J1>1725 THEN 1595
1585 J2=.555+.002*V1
1590 GOTO 1615
1595 IF J1>.935 THEN 1610
1600 J2=.461+.004*V1
1605 GOTO 1615
1610 J2=.427+.006*V1
1615 H7=((1+01*J2)*R1*V1^2*19.6
1620 T=T+273
1625 H7=((R*T/353)^2.25*V1/9-R*
T*4.98/353+12.6)*R*T/353+5.4
>*1.1*V1^2/T
1630 T=T-273
1635 DISP USING "15A,000.0,X,4A"
;"PERDA DE CARGA=",H7;"mm
CA"
1640 IF FLAG(6)=0 THEN 1660
1645 DISP @ DISP "DESEJA NOVO CA
LCULO COM MESMA GRANULOME
TRIA";@ INPUT G$
1650 IF G$="S" THEN SFLAG 2 ELSE
CFLAG 2
1655 IF FLAG(2)=1 THEN 40
1660 BEEP 100,10 @ END
```

## CAPÍTULO 5

### PROJETO DE UM SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO E LAVAGEM DE GASES DE EXAUSTÃO DE UMA UNI - DADE DE SECAGEM DE FERTILIZANTES

#### 5.1. Objetivos

O objetivo principal desta parte do trabalho é de definir as características básicas de um sistema de retenção de material particulado contido nos gases efluentes de um processo de secagem de fertilizantes. Este sistema será projetado de modo a completar a unidade de secagem de fertilizantes que foi desenvolvida nos trabalhos "Gerador de Gases Quentes em Leito Fluidizado" e "Projeto de um Secador Rotativo para Fertilizantes". (ambos TFs de 1984)

Desejando também demonstrar a versatilidade do programa aplicativo desenvolvido neste trabalho, o mesmo será aplicado ao projeto em questão, de maneira que as saídas fornecidas pelo computador poderão ser vistas acompanhando o seu desenvolvimento.

## 5.2. Considerações Gerais

Os sistemas de despoeiramento e lavagem de gases são hoje uma parte de vital importância no contexto de plantas industriais. Sobre um primeiro aspecto pode-se imaginar os reflexos no meio ambiente que seriam trazidos se a descarga de algumas toneladas de material particulado por hora na atmosfera fosse uma constante em muitas indústrias. Sobre um segundo aspecto, não menos importante, avalia-se os problemas quanto ao rendimento da instalação o qual seria reduzido não só em termos de produção diária, mas também em termos de consumo específico, uma vez que o material perdido consome uma parcela energética para ser processado.

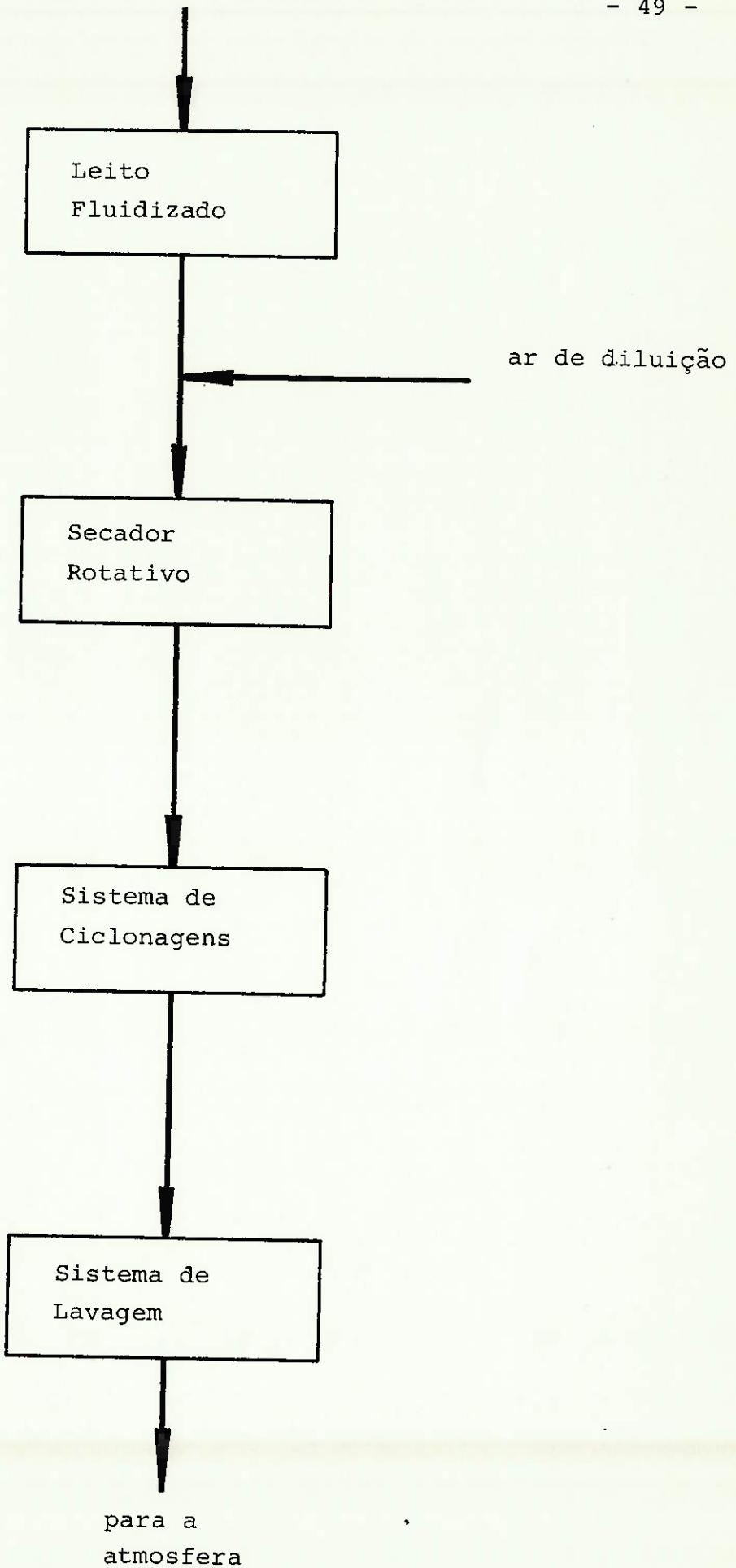
O processo de secagem de fertilizantes em secador rotativo será considerado com a fonte de material particulado em suspensão. O secador rotativo pode ser entendido como um corpo cilíndrico ôco dotado de rotação ao redor de seu eixo de simetria que por sua vez possui uma certa inclinação em relação ao nível horizontal. Pela extermidade mais elevada ocorre a entrada do material úmido o qual forçadamente percorre o comprimento do secador. Ao longo deste percurso se dá a transferência de calor e massa entre este material e o ar quente que é aspirado, geralmente pela extremidade oposta caracterizando um fluxo contra-corrente. Os gases de secagem encontram-se à saída do secador carregados do material sendo que esta concentração é função de fatores como umidade, tipo e processos mecânicos que o material foi anteriormente submetido.

A prática tem demonstrado que para este tipo de planta os equipamentos que melhor se aplicam são os ciclones e os lavadores tipo Venturi. Os ciclones conseguem captar grandes quantidades de material particulado permitindo sua imediata transformação em produto final, sendo isto possível por-

que a separação mecânica ocorre sem o uso de agentes externos contaminantes. Os lavadores tipo Venturi atuam volta - dos principalmente a proteção ambiental pois, embora a lama destes proveniente seja possível de ser reprocessada, seu custo de funcionamento, manutenção e reprocesso não justificariam o acréscimo na produção. Estes lavadores são contudo amplamente utilizados uma vez que a captação de particulados da ordem de 2  $\mu\text{m}$  através de outros equipamentos apresenta custos de implantação e manutenção muito elevados. Além disso, em alguns processos da indústria de fertilizantes ocorre a liberação de gases tóxicos os quais necessariamente devem ser removidos através da lavagem dos mesmos, por exemplo com soluções alcalinas, isto feito por vezes em um mesmo lavador que serve ao secador. Optou-se pelo lavador tipo Venturi também pelo fato de que, com pequenos investimentos, sua eficiência pode, se necessário for, ser aumentada. Na folha seguinte pode ser observado um fluxograma no qual o fluxo de gases na unidade esta representado. Deve-se lembrar, como foi visto no capítulo 3 deste trabalho, que na prática procede-se a instalação de um separador de gotículas após o lavador tipo Venturi. Este equipamento será dimensionado no devido momento de modo a permitir a recuperação do particulado fino e do líquido de lavagem, os quais neste ponto encontram-se formando partículas únicas.

ar de combustão

- 49 -



### 5.3. Valores Conhecidos

A seguir serão listados todos os valores que devem ser obtidos da unidade industrial para que o projeto do Sistema de Despoeiramento e Lavagem possa ser realizado.

Os valores mencionados seguem especificações ditadas pelo trabalho "Projeto de um Secador Rotativo para Fertilizantes", o qual é por este complementado, sendo que foi prevista certa margem de segurança quanto a produção de 100 t de fertilizantes por hora.

- Fluxo total de gases úmidos à saída do secador: 150.000 kg/h;
- Temperatura dos gases à saída do secador: 100°C;
- Umidade absoluta dos gases à saída do secador: 0,15 kg água/kg ar seco;
- Altitude local da unidade: nível do mar (0 m);
- Massa específica do material particulado: 1600 kg/m<sup>3</sup>;
- Composição granulométrica do material arrastado do secador pelos gases:

Faixa granulométrica	Limite inferior-Limite superior ( $\mu\text{m}$ )	Porcentagem em massa (%)
1 <sup>a</sup> .	0 - 1	1,3
2 <sup>a</sup> .	1 - 2	1,0
3 <sup>a</sup> .	2 - 3	0,9
4 <sup>a</sup> .	3 - 4	0,8
5 <sup>a</sup> .	4 - 5	1,0
6 <sup>a</sup> .	5 - 10	3,0
7 <sup>a</sup> .	10 - 25	7,0
8 <sup>a</sup> .	25 - 50	10,0
9 <sup>a</sup> .	50 - 100	15,0
10 <sup>a</sup> .	100 - 150	10,0
11 <sup>a</sup> .	150 - 300	25,0
12 <sup>a</sup> .	300	25,0

- Concentração de material particulado nos gases à saída do secador: 35 g/ $\text{Nm}^3$ ;
- Padrão de emissão permissível para material particulado: 0,2 kg/t processada (ver anexo F).

#### 5.4. Desenvolvimento do Projeto - Cálculo e Adoção de Valores

Os valores aqui apresentados são referentes ao dimensionamento final do sistema, não cabendo aqui o relato das interações que levaram a sua obtenção.

Com os dados do ítem anterior obtém-se que à saída do seca dor os gases possuem massa específica de aproximadamente  $0,85 \text{ kg/m}^3$  e desta forma, a vazão total de gases nas baterias de despoeiramento será de aproximadamente  $175.000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Optou-se pela utilização de duas baterias de ciclonagens, prática esta muito bem aceita por propiciar satisfatórias relações de eficiência contra perda de carga.

##### 5.4.1. Ciclonagem primária

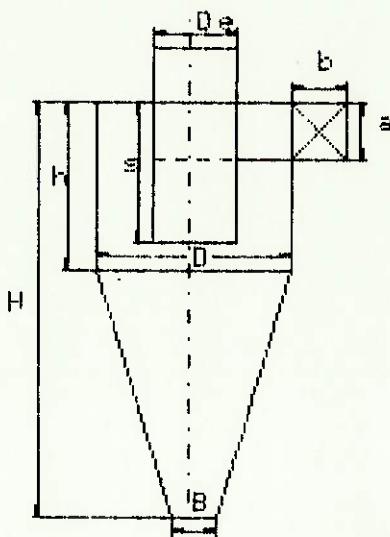
- Número de ciclones em paralelo na bateria primária: 2 ;
- Tipo de ciclones selecionado para a bateria: modelo CN 15 de alta eficiência;
- Diâmetro do corpo cilíndrico de cada ciclone: 2,5 m.

Com os valores do ítem 5.3. e os dados acima pode - se correr o programa em modo CICLONE do qual são obtidas as seguintes saídas:

ENTRE COM O DIAMETRO DO CICLONE  
2.5  
DIAMETRO MINIMO= 7.1 cm  
DIAMETRO DE CORTE= 9.8 cm  
DIAMETRO CRITICO= 29.4 cm  
VELOCIDADE DE ENTRADA=21.7 m/s  
VELOCIDADE DE SAIDA=13.6 m/s  
PERDA DE CARGA= 66.2 mmHg

CONCENTRAÇÃO À SAÍDA= 3,28 g Nm<sup>-3</sup>  
DESEJA A MASSA E A % DE CADA  
FAIXA GRANULOMÉTRICA À SAÍDA?

1 a.	feixa =	45 g /Nm <sup>3</sup>	%	0,1
2 a.	feixa =	35 g /Nm <sup>3</sup>	%	1,2
3 a.	feixa =	30 g /Nm <sup>3</sup>	%	1,2
4 a.	feixa =	28 g /Nm <sup>3</sup>	%	0,9
5 a.	feixa =	26 g /Nm <sup>3</sup>	%	0,7
6 a.	feixa =	25 g /Nm <sup>3</sup>	%	4,4
7 a.	feixa =	20 g /Nm <sup>3</sup>	%	0,6
8 a.	feixa =	18 g /Nm <sup>3</sup>	%	0,6
9 a.	feixa =	16 g /Nm <sup>3</sup>	%	0,6
10 a.	feixa =	14 g /Nm <sup>3</sup>	%	0,6
11 a.	feixa =	12 g /Nm <sup>3</sup>	%	0,6
12 a.	feixa =	10 g /Nm <sup>3</sup>	%	0,6



MEDIDAS EM m  
 $D = 2,5$   
 $a = 1,65$   
 $b = .65$   
 $H = 10,65$   
 $b = 5,65$   
 $D_{ef} = 1,5$   
 $B = .875$   
 $s = 4,35$

Ressaltando-se os valores significativos para a continuidade do dimensionamento tem-se:

- Perda de carga na ciclonagem primária: 66,2 mm.c.a.;
- Concentração de material particulado nos gases à saída da ciclonagem primária: 3,28 g/Nm<sup>3</sup>

Estes valores permitem realizar o seguinte balanço de massa para a ciclonagem primária:

- fluxo de material particulado arrastado do secador: 4060 kg/h;
- fluxo de material particulado captado pelas baterias de ciclones primários: 3680 kg/h;
- fluxo de material particulado arrastado através da ciclonagem primária: 380 kg/h;
- eficiência da ciclonagem primária: 90,6%.

#### 5.4.2. Ciclonagem secundária

Deve-se observar aqui que a composição granulométrica do material a ser agora ciclonado é a obtida como saída da ciclonagem primária. Esta encontra-se anexada no ítem anterior e tem como limites de cada faixa granulométrica os mesmos especificados no item 5.3.

- número de ciclones em paralelo na bateria secundária: 6;
- tipo de ciclones selecionado para a bateria: modelo CN 15 de alta eficiência;
- diâmetro do corpo cilíndrico de cada ciclone: 1,1 m.

Com os valores do ítem 5.3. e os dados acima pode-se correr o programa em modo CICLONE do qual são obtidas as seguintes saídas:

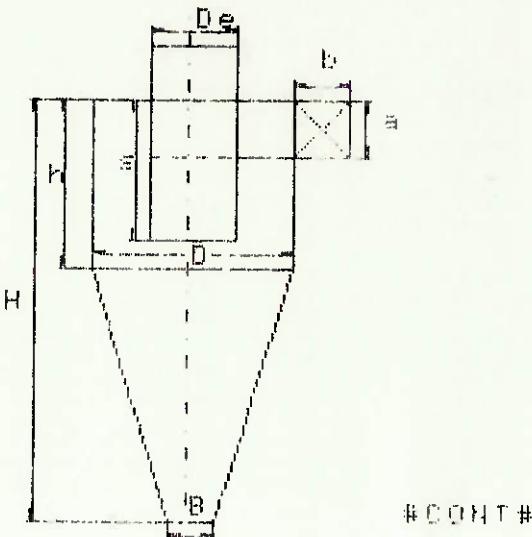
ENTRE COM O DIAMETRO DO CICLONE  
(m)?  
1.1  
DIAMETRO MINIMO= 3.6  $\mu\text{m}$   
DIAMETRO DE CORTE= 4.8  $\mu\text{m}$   
DIAMETRO CRITICO= 9.8  $\mu\text{m}$   
VELOCIDADE DE ENTRADA=39.0 m/s  
VELOCIDADE DE SAIDA=23.7 m/s  
PERDA DE CARGA= 196.1 mmCA

CONCENTRACAO A SAIDA= 1.88g/Nm<sup>3</sup>  
DESEJA A MASSA E A % DE CADA  
FAIXA GRANULOMETRICA A SAIDA?

2

- |     |        |           |   |        |
|-----|--------|-----------|---|--------|
| 1a. | faixa= | .46e/Nm3  | < | 25.32% |
| 2a. | faixa= | .35e/Nm3  | < | 19.52% |
| 3a. | faixa= | .31e/Nm3  | < | 17.52% |
| 4a. | faixa= | .28e/Nm3  | < | 15.52% |
| 5a. | faixa= | .22e/Nm3  | < | 12.22% |
| 6a. | faixa= | .18e/Nm3  | < | 10.12% |
| 7a. | faixa= | 0.00e/Nm3 | < | 0.02%  |

DESEJA NOVO CALCULO PARA OS  
MESMOS DADOS COM OUTRO CICLONE?



## MEDIDAS EM m

C = 1

3 = 726

$$b = .286$$

五 4.606

$$h = 2.486$$

$D_0 = .66$

E = .385

1914

Ressaltando-se os valores significativos para a continuidade do dimensionamento tem-se:

- perda de carga na ciclonagem secundária: 196,1 mm.c.a.;
  - concentração de material particulado nos gases à saída da ciclonagem secundária: 1,80 g/Nm<sup>3</sup>.

Estes valores permitem realizar o seguinte balanço de massa para a ciclonagem secundária:

- Fluxo de material particulado que entra na ciclonagem secundária: 380 kg/h;
- Fluxo de material particulado captado pela bateria de ciclones secundária: 171 kg/h;
- Fluxo de material particulado arrastado através da ciclonagem secundária: 209 kg/h;
- Eficiência da ciclonagem secundária: 45,0%.

#### 5.4.3. Lavador Venturi

Nesta etapa do dimensionamento do sistema seria interessante que uma distribuição granulométrica mais precisa fosse utilizada como entrada do lavador. Com tal objetivo será aqui aplicada a teoria de Rosen & Rammller.

Segundo Rosen & Rammller em Journal Inst. Fuel (1934) é possível avaliar-se a distribuição em porcentagens de massa para particulados abaixo de um determinado diâmetro de partícula através da seguinte formula:

$$R = 100 \cdot \exp (-Bx^n)$$

onde:  $R$  = porcentagem de pó que se deposita em uma rede de malha de  $x$  microns;

$B, n$  = constante do pó.

Sabe-se que:

$$\ln \left( \frac{R}{100} \right) = -Bx^n$$

tem-se:

$$\ln \left[ -\ln \left( \frac{R}{100} \right) \right] = \ln B + n \ln x$$

Pode-se definir os coeficientes da curva acima na forma  $y = a + bx$  para os pontos segundo o item 5.3.:

x (μm)	ln x	R (%)	ln -ln (R/100)
300	5,70	25,0	0,33
150	5,01	50,0	-0,37
100	4,61	60,0	-0,67
50	3,91	75,0	-1,25
25	3,22	85,0	-1,82
10	3,30	92,0	-2,48
5	1,61	95,0	-2,97

Obtem-se para estes valores a seguinte equação de reta:

$$y = -4,323 + 0,798 \cdot x$$

Desta forma tem-se:

$$\ln B = -4,323$$

$$B = 0,0133$$

$$n = 0,8152$$

e assim:

$$R = 100 \cdot \exp (-0,0133 \cdot d^{0,8152})$$

Vale ressaltar que a saída granulométrica da ciclone secundária poderia ser utilizada diretamente como entrada do lavador mas, por se tratar de um dimensionamento final, optou-se pelo apuramento dos dados. Seguem os valores para o dimensionamento do lavador Venturi:

- composição granulométrica do material particulado arrastado para o lavador Venturi:

faixa granulométrica	limite inferior-limite superior ( $\mu\text{m}$ )	porcentagem em massa (%)
1 <sup>a</sup>	0 - 0,2	6,6
2 <sup>a</sup>	0,2 - 0,4	5,3
3 <sup>a</sup>	0,4 - 0,6	4,6
4 <sup>a</sup>	0,6 - 1,0	8,8
5 <sup>a</sup>	1,0 - 1,2	4,2
6 <sup>a</sup>	1,2 - 1,4	3,9
7 <sup>a</sup>	1,4 - 1,6	3,9
8 <sup>a</sup>	1,6 - 2,0	7,5
9 <sup>a</sup>	2,0 - 3,0	17,5
10 <sup>a</sup>	3,0 - 4,0	15,5
11 <sup>a</sup>	4,0 - 5,0	12,2
12 <sup>a</sup>	5,0 - 10,0	10,1
13 <sup>a</sup>	10,0	0,0

- líquido de lavagem: água;
- temperatura do líquido de lavagem: 25°C;
- velocidade na garganta do Venturi: 40 m/s;

- relação vazão do líquido de lavagem - volume de gás: 0,8 l/Nm<sup>3</sup>;
- temperatura dos gases à entrada do lavador Venturi: 80°C.

Com os valores do ítem 5.3. e os dados acima pode-se correr o programa em modo LAVADOR do qual são obtidas as seguintes saídas:

CONCENTRAÇÃO A SAÍDA= 123 Nm<sup>3</sup>  
DESEJA A MASSA E A % DE CADA  
FAIXA GRANULOMÉTRICA A SAÍDA?

S

1a. faixa=	114/Nm <sup>3</sup>	< 95	1%
2a. faixa=	01a/Nm <sup>3</sup>	< 4	8%
3a. faixa=	00a/Nm <sup>3</sup>	<	8%
4a. faixa=	0,00a/Nm <sup>3</sup>	<	0,0%
5a. faixa=	0,00a/Nm <sup>3</sup>	<	0,0%
6a. faixa=	0,00a/Nm <sup>3</sup>	<	0,0%
7a. faixa=	0,00a/Nm <sup>3</sup>	<	0,0%
8a. faixa=	0,00a/Nm <sup>3</sup>	<	0,0%
9a. faixa=	0,00a/Nm <sup>3</sup>	<	0,0%
10a. faixa=	0,00a/Nm <sup>3</sup>	<	0,0%
11a. faixa=	0,00a/Nm <sup>3</sup>	<	0,0%
12a. faixa=	0,00a/Nm <sup>3</sup>	<	0,0%
13a. faixa=	0,00a/Nm <sup>3</sup>	<	0,0%

PERDA DE CARGA=114,8 mm.c.a

Ressaltando-se os valores significativos para a conclusão do dimensionamento tem-se:

- perda de carga no lavador Venturi: 114,8 mm.c.a.;
- concentração do material particulado nos gases à saída do lavador Venturi: 0,12 g/Nm<sup>3</sup>

Estes valores permitem realizar o seguinte balanço de massa para o lavador Venturi:

- fluxo de material particulado que entra no lavador: 209 kg/h;
- fluxo de material particulado captado pelo lavador: 195 kg/h;

- fluxo de material particulado arrastado através do lavador para a atmosfera: 14 kg/h;
- eficiência do lavador Venturi: 93,3%;
- vazão do líquido de lavagem: 92,9 m<sup>3</sup>/h.

Para a bomba do lavador são então definidos os valores:

- vazão do líquido de lavagem: 92,9 m<sup>3</sup>/h;
- pressão do líquido de lavagem: 40 m.c.a;
- potência da bomba de lavagem: 18 c.v.

#### 5.4.4. Separador de gotas

Os dados aqui apresentados são procedentes da prática e caracterizam um separador de gotas de geometria cilíndrica onde os gases adentram tangencialmente pela parte inferior. As partículas líquidas e sólidas captadas são coletadas em um tanque de decantação associado a saída inferior do separador de gotas. Da parte superior deste tanque é novamente extraído o líquido de lavagem sendo necessária vazão de reposição pois além de uma parte do líquido ser carregada pelos gases que vão para a atmosfera, é necessário manter-se um nível máximo de concentração de sólidos totais. Costuma-se por segurança não considerar a eficiência do separador de gotas na redução da concentração de material particulado não umedecido.

- temperatura dos gases à entrada do separador de gotas: 60°C;
- velocidade dos gases à entrada do separador de gotas: 15 m/s;

- velocidade dos gases no interior do separador de gotas: 2 m/s;
- tempo de permanência dos gases no separador de gotas: 3 s;
- massa específica dos gases à entrada do separador de gotas: 1,0 kg/m<sup>3</sup>;
- perda de carga no separador de gotas: 70 mm.c.a. (incluindo separador tipo demister);
- vazão do líquido de lavagem, a ser extraído da circulação do lavador e reposto mediante a utilização de líquido limpo a fim de manter a concentração de sólidos totais em no máximo 20%: 1 m<sup>3</sup>/h;
- vazão do líquido de lavagem a ser reposta devido a vaporização do mesmo: 2 m<sup>3</sup>/h.

#### 5.4.5. Tubulações do Sistema

Em plantas de produção de fertilizantes os gases atuam como agente de transporte pneumático de maneira que, para que não ocorra a sedimentação do material particulado no interior das tubulações, deve-se ter velocidades mínimas da ordem de 25 m/s e dessa forma tem-se:

- velocidade mínima dos gases no interior das tubulações: 25 m/s;
- perda de carga nas tubulações do sistema: 225 mm.c.a. à 20°C.

Obs.: a perda de carga nas tubulações do sistema foi calculada com base na disposição geométrica que se encontra na planta da instalação (anexo H) e com a utilização do procedimento de avaliação sugerido em Memento de Pertes de Charge (veja bibliografia).

### 5.5. Considerações Finais

Segundo dados obtidos dos trabalhos "Gerador de Gases Quentes em Leito Fluidizado" e "Projeto de um Secador Rotativo para Fertilizantes" tem-se os seguintes parâmetros:

- pressão estática dos gases à saída do gerador de gases quentes (leito fluidizado): -10 mm.c.a.;
- perda de carga no secador rotativo: 50 mm.c.a.

Seguem abaixo os valores finais resultantes da utilização do sistema de despoieiramento e lavagem de gases projetado:

- produção de unidade de secagem: 100 t/h;
- vazão total de gases no sistema: 116.000 Nm<sup>3</sup>/h;
- concentração do material particulado à entrada do sistema: 35 g/Nm<sup>3</sup>;
- fluxo de material particulado entrando no sistema: 4.060 kg/h;
- fluxo de material particulado captado pela bateria de ciclones primários: 3.680 kg/h;
- fluxo de material particulado captado pela bateria de ciclones secundários: 171 kg/h;
- fluxo de material particulado captado pelo lavador tipo Venturi: 195 kg/h;
- fluxo de material particulado lançado à atmosfera pelo sistema: 14 kg/h;
- concentração de material particulado à saída do sistema: 120 mg/Nm<sup>3</sup>;

- eficiência global de captação do sistema: 99,66%;
- padrão de emissão de material particulado nos gases à saída do sistema: 0,14 kg/t;
- perda de carga no sistema (incluindo tubulações desde a entrada da ciclonagem primária até a tubulação de descarga para a atmosfera): 830 mm.c.a. à 20°C;
- perda de carga total a ser vencida pelos ventiladores: 910 mm.c.a. à 20°C;
- potência de acionamento dos ventiladores de exaustão da unidade de secagem admitido um rendimento de 65%: 455c.v. à 20°C ao nível do mar;
- vazão de gases passando em cada ventilador: 87.500 m<sup>3</sup>/h.

Obs.: Os ventiladores deverão ser colocados à saída da ciclonagem secundária, em paralelo, logo à entrada do lavador Venturi. Optou-se pelo funcionamento dos ventiladores com gases ainda com uma certa carga de pó ao invés de com uma umidade muito elevada (depois do lavador) procurando-se obter maior durabilidade destes que por este motivo devem possuir pás do tipo retas radiais.

Através do catálogo existente no anexo G pode-se acompanhar a seleção dos ventiladores que preenchem os requisitos necessários de vazão, pressão e resistência às condições de desgaste e abrasão.

B I B L I O G R A F I A

- STRAUSS, Werner, Industrial Gas Cleaning, Pergamon Press, Oxford, 1975.
- IDEL'CIK, I.E., Memento des Pertes de Charge, Eyrolles, Paris, 1960.
- STREETER, Victor L., Mecânica dos Fluidos, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1982.
- GUEDES Jr., Oswaldo F., Ciclones, EPUSP, São Paulo, 1974.
- OLLERO, Pedro, Program Calculates Venturi - Escrubber Efficiency, Chemical Engineering, may, 28, 1984, p.103.
- PLACEK, T.D. & Peters, L.K., Analysis of Particulate Removal in Venturi Scrubbers, AIChE Journal, Vol. 27, 1981, p.984.
- PLACEK, T.D. & Peters, L.K., Analysis of Particulate Removal in Venturi Scrubbers, AIChE Journal, Vol. 28, 1982, p.31.
- SILVA, Remy Benedicto e outros, Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor, Grêmio Politécnico, São Paulo, 1980.
- SONNTAG, Richard E. & Van Wylen, Gordon J., Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Edgard Blücher, São Paulo, 1973.
- SILVA, Remy Benedicto, Ventilação Mecânica, Grêmio Politécnico, São Paulo, 1980.
- AMERICAN Conference of Governmental Industrial Hygienists, Industrial Ventilation, Committee on Industrial Ventilation, 14<sup>a</sup> edição, 1970.

ANEXO A

### NOTAÇÃO

Neste anexo encontram-se todas as letras e símbolos gráficos que foram utilizados como grandezas ao longo deste trabalho, sendo aqui explicado seus significados bem como suas unidades (geralmente do Sistema Internacional - SI).

Símbolos	Grandeza representada	(Unidades)
a	- Altura da boca de entrada do ciclone	(m)
a	- Raio da partícula esférica na Lei de Stokes	(m)
A	- Área de contato dos gases com o interior do ciclone ne	(m <sup>2</sup> )
A	- Área transversal de escoamento onde ocorre máxima velocidade tangencial	(m <sup>2</sup> )
b	- Largura da boca de entrada do ciclone	(m)
B	- Diâmetro da boca de descarga do ciclone	(m)
c	- Fator de concentração (massa ou volume) de partí- culas	
C	- Fator de correção Cunningham	
C <sub>e</sub>	- Concentração de material particulado nos gases à entrada do equipamentos	(g/m <sup>3</sup> )
d	- Diâmetro de uma partícula qualquer em movimento nos gases	(m)
d <sub>0</sub>	- Diâmetro mínimo do particulado que pode ser captado pelo ciclone	(μm)
d <sub>50</sub>	- Diâmetro de corte do ciclone	(μm)
d <sub>100</sub>	- Diâmetro crítico do ciclone	(μm)
D	- Diâmetro principal do corpo do ciclone	(m)

$D_0$	- Diâmetro médio das gotículas do líquido de lava -	(m)
$g_{\text{em}}$		
$D_e$	- Diâmetro do tubo de saída do ciclone	(m)
$D_p$	- Diâmetro médio do material particulado	( $\mu\text{m}$ )
$f$	- Constante relativa a higroscopidez do material	
$g$	- Aceleração da gravidade	( $\text{m/s}^2$ )
$G$	- Constante de perda de carga por atrito	
$h$	- Altura do corpo cilíndrico do ciclone	(m)
$H$	- Altura total do ciclone	(m)
$H_o$	- Altitude local	(m)
$K$	- Constante da equação de Johnstone	
$m$	- Massa da amostra	(kg)
$m$	- Massa da partícula em movimento nos gases	(kg)
$m_{\text{ar}}$	- Massa de ar seco da amostra	(kg)
$m_g$	- Massa de gás escoando por unidade de tempo	(kg/s)
$m_{\text{H}_2\text{O}}$	- Massa de água da amostra	(kg)
$m_l$	- Massa de líquido de lavagem por unidade de tempo	(kg/s)
$M$	- Massa molecular da amostra	(kg)
$M_{\text{ar}}$	- Massa molecular do ar seco	(kg)
$M_g$	- Massa molecular do gás contendo ar seco e vapor de água	(kg)
$n$	- Número de moles da amostra	
$n_{\text{ar}}$	- Número de moles de ar seco da amostra	
$n_{\text{H}_2\text{O}}$	- Número de moles de água da amostra	
$P$	- Pressão total da amostra	( $\text{kgf/cm}^2$ )
$P_b$	- Pressão barométrica local	( $\text{mmH}_g$ )
$P_e$	- Pressão estática do gás na secção de escoamento	( $\text{mmH}_g$ )
$P_t$	- Pressão total do gás na secção de escoamento	( $\text{mmH}_g$ )

Q	- Vazão total dos gases no sistema	(m <sup>3</sup> /h)
R	- Distância da partícula ao centro de rotação	(m)
R	- Constante universal dos gases	(kgf m/kg °K)
R	- Relação líquido - gás no lavador Venturi	(l/Nm <sup>3</sup> )
s	- Comprimento interno do tubo de saída do ciclone	(m)
t	- Tempo de residência do gás do interior do ciclone	(s)
T	- Temperatura da amostra	(°K)
T <sub>g</sub>	- Temperatura do gás na secção de escoamento	(°C)
T <sub>l</sub>	- Temperatura do líquido de lavagem	(°C)
u	- Velocidade tangencial máxima no interior do ciclone	(m/s)
U	- Velocidade relativa de uma esfera ao gás na Lei de Stokes	(m/s)
V	- Volume efetivo interno do ciclone	(m <sup>3</sup> )
V <sub>e</sub>	- Velocidade do gás à entrada do tubo de saída	(m/s)
V <sub>g</sub>	- Velocidade do gás à garganta do Venturi	(m/s)
V <sub>i</sub>	- Velocidade média do gás à entrada do ciclone	(m/s)
V <sub>l</sub>	- Velocidade de injeção do líquido de lavagem	(m/s)
X	- Número de ciclones em paralelo em uma mesma bateria de ciclonagem	
α	- Coeficiente de entrada dos gases no ciclone	
ΔE <sub>c</sub>	- Variação de energia cinética	(kg.m/s)
ΔH	- Perda de carga	(mm.c.a.=kgf/m <sup>2</sup> )
ε	- Coeficiente global de perda de carga no ciclone - ne	
ε <sub>e</sub>	- Coeficiente de perda de carga devido a saída do ciclone	
ε <sub>i</sub>	- Coeficiente de perda de carga devido a entrada do ciclone	

$\eta$	- Eficiência da captação das partículas	(%)
$\lambda$	- Caminho médio livre entre as moléculas de gás na secção de escoamento	(m)
$\mu'$	- Coeficiente de atrito entre as paredes do ciclone e os gases	
$\mu_s$	- Viscosidade cinemática do gás na secção de escoamento	( $m^2/s$ )
$\mu_l$	- Viscosidade cinemática do líquido de lavagem	( $m^2/s$ )
$\rho$	- Massa específica da amostra	( $kg/m^3$ )
$\rho_g$	- Massa específica do gás na secção de escoamento	( $kg/m^3$ )
$\rho_l$	- Massa específica do líquido de lavagem	( $kg/m^3$ )
$\rho_p$	- Massa específica da partícula a ser captada	( $kg/m^3$ )
$\rho'_p$	- Massa específica modificada da partícula	( $kg/m^3$ )
$\sigma$	- Tensão superficial do líquido de lavagem	(N/m)
$w$	- Umidade absoluta do gás	( $kg\ águia/kg\ ar\ seco$ )
$\phi$	- Coeficiente do atrito	
$\psi$	- Parâmetro de impactação inercial	
$\xi$	- Coeficiente de perda de carga	
$\zeta_g$	- Coeficiente de perda de carga por escoamento na garganta	
$\zeta_l$	- Coeficiente de perda de carga por variação da energia cinética	

ANEXO B

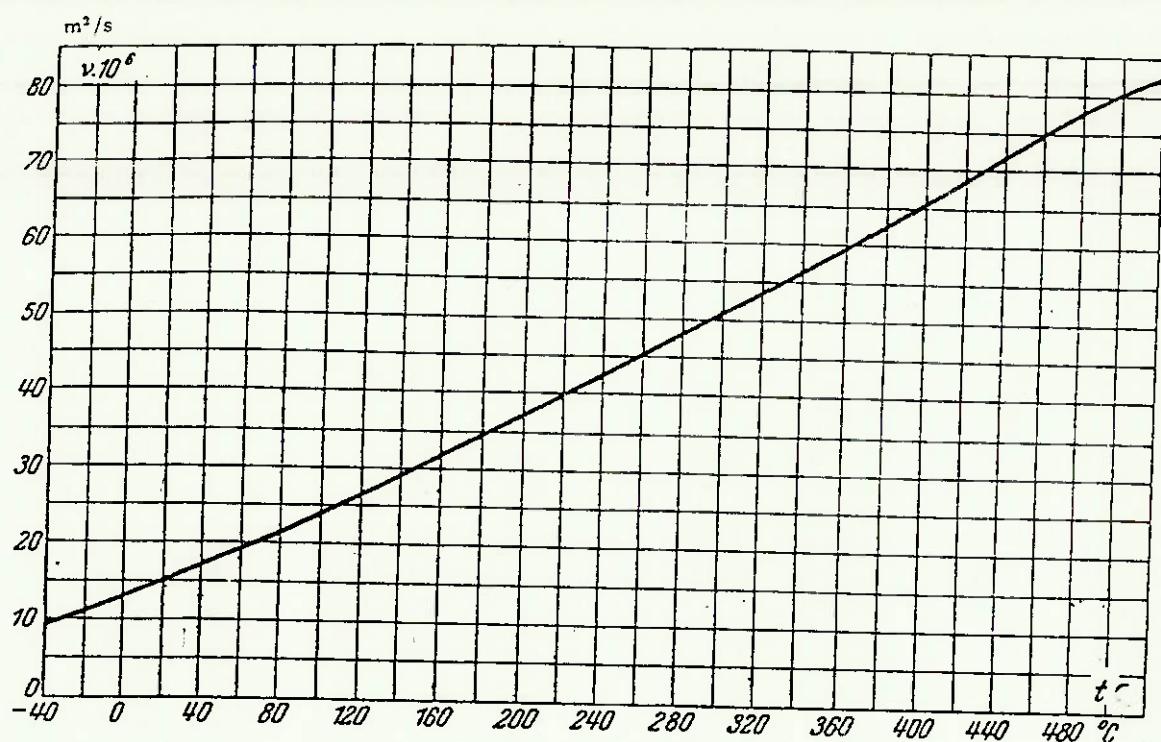
VALORES DA VISCOSIDADE CINEMÁTICA DO AR

Gráfico 1

Tabela 1

Gaz	Formule	Température (°C)													
		- 20	0	20	40	60	80	100	150	200	300	400	600	800	
Acétylène	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	4,73	8,20	9,35	10,60	11,94	13,25	14,50	—	—	—	—	—	—	
Acide sulphydrique	H <sub>2</sub> S	—	7,62	8,70	—	—	—	14,10	—	19,80	28,00	37,30	65,20	82,00	
Air	—	11,66	13,20	15,00	16,98	18,85	20,89	23,00	30	34,90	48,20	63,20	96,50	134,00	
Ammoniac	NH <sub>3</sub>	6,81	12,00	14,00	16,00	18,10	20,35	22,70	29,30	36,00	—	—	—	—	
Anhydride sulfureux	SO <sub>2</sub>	—	4,00	4,60	—	—	—	7,60	—	12,20	17,60	—	—	—	
Argon	Ar	—	11,90	13,30	—	—	—	20,70	—	31,20	43,30	56,50	87,50	113,00	
Azote	N <sub>2</sub>	11,67	13,30	15,00	16,85	18,80	20,65	22,30	28,30	34,10	47,20	61,40	93,50	130,00	
Benzol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1,66	11,95	2,26	2,60	2,94	3,33	3,73	4,80	6,02	8,85	—	—	—	
Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	—	25,80	29,70	—	—	—	48,50	—	—	—	—	—	—	
Chlore	Cl <sub>2</sub>	3,09	3,80	4,36	5,02	5,66	6,36	7,15	9,10	11,50	16,25	—	—	—	
Chlorure de méthyle	CH <sub>3</sub> Cl	—	4,28	4,90	—	—	—	8,05	—	13,10	—	—	—	—	
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	—	6,35	7,28	—	—	—	11,60	14,70	18,10	—	—	—	—	
Ethylène	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	6,80	7,50	8,66	9,73	10,85	12,15	13,40	17,30	21,20	—	—	—	—	
Gaz carbonique	CO <sub>2</sub>	5,62	7,00	8,02	9,05	10,30	12,10	12,80	—	—	—	—	—	—	
Hélium	He	9,12	10,40	11,74	13,12	14,55	15,97	17,50	—	26,20	36,10	47,30	72,80	102,50	
Hydrogène	H <sub>2</sub>	84,00	93,50	105,00	117,30	130,00	143,00	156,60	195,00	233,00	324,00	423,00	651,00	918,00	
Krypton	Kr	—	6,26	7,13	—	—	—	13,70	—	—	—	—	—	—	
Méthane	CH <sub>4</sub>	12,57	14,20	16,50	18,44	20,07	22,90	25,40	31,8	39,00	54,50	—	—	—	
Oxyde azoteux	N <sub>2</sub> O	—	6,82	7,93	—	—	—	12,70	—	19,70	28,20	—	—	—	
Oxyde azotique	NO	—	13,30	15,10	—	—	—	23,20	—	30,50	—	—	—	—	
Oxyde de carbone	CO	11,86	13,50	15,16	17,00	18,96	21,00	22,70	28,4	34,30	46,85	—	—	—	
Oxygène	O <sub>2</sub>	11,04	13,40	15,36	17,13	19,05	21,16	23,40	—	35,20	48,70	63,80	97,50	135,70	
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3,04	3,70	4,26	4,90	5,52	6,18	6,76	8,70	10,84	15,10	—	—	—	
Propylène	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	—	4,08	4,70	—	—	—	7,70	11,4	—	—	—	—	—	
Vapeur d'eau	H <sub>2</sub> O	9,50	11,12	12,90	14,84	16,90	18,66	21,50	—	—	—	—	—	—	
Xénon	Xe	—	3,59	4,15	—	—	—	6,70	—	—	—	—	—	—	

ANEXO C

VALORES DE PROPRIEDADES FÍSICAS DA ÁGUA

Tabela C.1 Propriedades físicas da água em unidades SI

Temp., °C	Peso específico $\gamma$ , N/m³	Massa específica $\rho$ , kg/m³	Viscosidade $\mu$ , N · s/m² $10^3 \mu =$	Viscosidade cinemática $\nu$ , m²/s $10^6 \nu =$	Tensão superficial $\sigma$ , N/m $100 \sigma =$	Carga de pressão de vapor $p_v/\gamma$ , m	Módulo de elasticidade volumétrica $K$ , N/m² $10^{-7} K =$
0	9805	999,9	1,792	1,792	7,62	0,06	204
5	9806	1000,0	1,519	1,519	7,54	0,09	206
10	9803	999,7	1,308	1,308	7,48	0,12	211
15	9798	999,1	1,140	1,141	7,41	0,17	214
20	9789	998,2	1,005	1,007	7,36	0,25	220
25	9779	997,1	0,894	0,897	7,26	0,33	222
30	9767	995,7	0,801	0,804	7,18	0,44	223
35	9752	994,1	0,723	0,727	7,10	0,58	224
40	9737	992,2	0,656	0,661	7,01	0,76	227
45	9720	990,2	0,599	0,605	6,92	0,98	229
50	9697	988,1	0,549	0,556	6,82	1,26	230
55	9679	985,7	0,506	0,513	6,74	1,61	231
60	9658	983,2	0,469	0,477	6,68	2,03	228
65	9635	980,6	0,436	0,444	6,58	2,56	226
70	9600	977,8	0,406	0,415	6,50	3,20	225
75	9589	974,9	0,380	0,390	6,40	3,96	223
80	9557	971,8	0,357	0,367	6,30	4,86	221
85	9529	968,6	0,336	0,347	6,20	5,93	217
90	9499	965,3	0,317	0,328	6,12	7,18	216
95	9469	961,9	0,299	0,311	6,02	8,62	211
100	9438	958,4	0,284	0,296	5,94	10,33	207

ANEXO D

## EXEMPLO DE TABELA DE CICLONES DE FAMÍLIAS HOMOTÉTICAS

## Cyclones NIIOGAZ

Chapitre XII

**Diagramme 12.2**

Désignation du cyclone								Schéma	Coefficient de perte de charge
Différents types de cyclones NIIOGAZ avec leurs caractéristiques géométriques									
Cyclone NIIOGAZ CN 15									
$D_0$	$d_1$	$b$	$b_1$	$l$	$D_{cp}$	$h$	$\alpha$		
0,6 $D_1$	0,3 - 0,4 $D_1$	0,2 $D_1$	0,26 $D_1$	0,6 $D_1$	0,8 $D_1$	0,21 - 0,32 $D_1$	15°		
$D_1$	$a$	$h_T$	$h_c$	$h_K$	$h_B$	$H$			
de 40 à 800 mm	0,66 $D_1$	1,74 $D_1$	2,26 $D_1$	2 $D_1$	0,3 $D_1$	4,56 $D_1$			
Cyclone NIIOGAZ CN 15 U.									
$D_0$	$d_1$	$b$	$b_1$	$l$	$D_{cp}$	$h$	$\alpha$		
0,6 $D_1$	0,3 - 0,4 $D_1$	0,2 $D_1$	0,26 $D_1$	0,6 $D_1$	0,8 $D_1$	0,24 - 0,32 $D_1$	15°		
$D_1$	$a$	$h_T$	$h_c$	$h_K$	$h_B$	$H$			
de 200 à 800 mm	0,66 $D_1$	1,5 $D_1$	1,51 $D_1$	1,50 $D_1$	0,3 $D_1$	3,31 $D_1$			
Cyclone NIIOGAZ CN 24									
$D_0$	$d_1$	$b$	$b_1$	$l$	$D_{cp}$	$h$	$\alpha$		
0,6 $D_1$	0,3 - 0,4 $D_1$	0,2 $D_1$	0,26 $D_1$	0,6 $D_1$	0,8 $D_1$	0,24 - 0,32 $D_1$	24°		
$D_1$	$a$	$h_T$	$h_c$	$h_K$	$h_B$	$H$			
de 400 à 1000 mm	1,11 $D_1$	2,11 $D_1$	2,11 $D_1$	1,75 $D_1$	0,4 $D_1$	4,26 $D_1$			
Cyclone NIIOGAZ CN 11									
$D_0$	$d_1$	$b$	$b_1$	$l$	$D_{cp}$	$h$	$\alpha$		
0,6 $D_1$	0,3 - 0,4 $D_1$	0,2 $D_1$	0,26 $D_1$	0,6 $D_1$	0,8 $D_1$	0,24 - 0,32 $D_1$	11°		
$D_1$	$a$	$h_T$	$h_c$	$h_K$	$h_B$	$H$			
de 40 à 200 mm	0,48 $D_1$	1,36 $D_1$	2,08 $D_1$	2 $D_1$	0,3 $D_1$	4,38 $D_1$			

ANEXO E

## VALORES DE REFERÊNCIA PARA LAVADORES TIPO VENTURI

### Scrubber Venturi (laveur)

### Chapitre XII

#### Diagramme 12.6

$$\Delta H = \xi_C + \xi_l q) \frac{\gamma_G w_G^2}{2g} \quad [kgp/m^2]$$

avec :

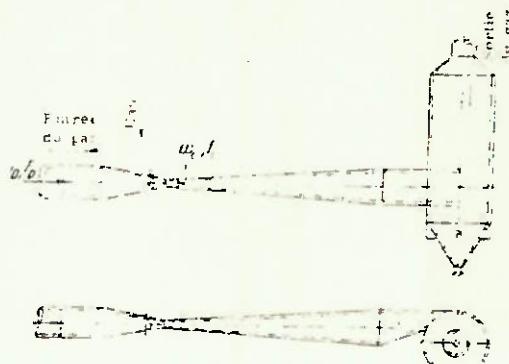
$\xi_C \approx 0.10$  à  $0.15$  : en fonction du soin d'exécution ;

$\xi_l$  : est donné sur le graphique en fonction de  $w_G$  et  $q$  ;

$$q = m \frac{\gamma_l}{\gamma_G} \quad (kg/kg)$$

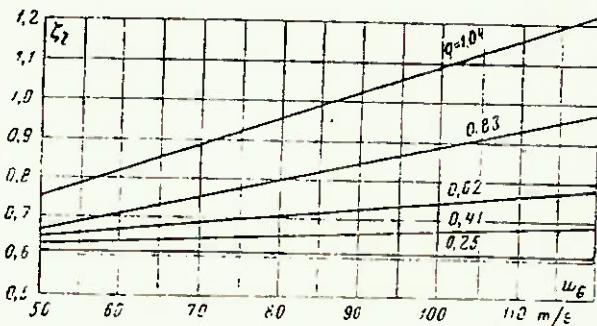
$\gamma_G$  : poids spécifique du gaz dans l'orifice et du liquide pulvérisé,  $kgp/m^3$  ;

$m$  : débit spécifique du liquide pulvérisé, en litre par  $m^3$  de gaz ;



Valeurs de  $\xi_l$

$q, k_g/k_s$	$w_G, m/s$							
	50	60	70	80	90	100	110	120
0,25	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
0,41	0,63	0,64	0,65	0,66	0,66	0,67	0,68	0,69
0,62	0,65	0,66	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,76
0,83	0,67	0,70	0,75	0,79	0,83	0,88	0,92	0,97
1,04	0,75	0,82	0,88	0,94	1,00	1,08	1,14	1,22



ANEXO F

PADRÕES DE EMISSÃO PARA MATERIAL PARTICULADO

EMISLAÇÃO

22 -

DO EST. DE SÃO PAULO

ANEXO 8 AO REGULAMENTO APROVADO PELO DECRETO N. 840  
DE 8 DE SETEMBRO DE 1976, A QUE SE REFERE O ARTIGO 33-B  
DO MESMO REGULAMENTO, ACRESCENTADO PELO DECRETO N. 1636  
DE 22 DE JANEIRO DE 1982

PADRÕES DE EMISSÃO PARA MATERIAL PARTICULADO

Atividade Industrial	Fonte de Emissão	Padrão de Emissão	Observações
Indústria siderúrgica	conversor LD	10 kg/ Nm	
	trituração	0,1 kg/t processada	Padrão de emissão por fonte
Processamento de rocha fosfática	secagem	0,2 kg/t processada	
	outras fontes não-especificadas	0,1 kg/t processada	Padrão de emissão por fonte
	fabricação de superfosfato granulado	1,5 kg/t processada	
Produção de fertilizantes fosfatados	fabricação de superfosfato não-granulado	0,45 kg/t processada	Padrão de emissão global do estabelecimento
Produção de cimento	secador, moagem, separadores, ciclônico, peneira vibratória, sistema de transportes, silos e encadeiras	0,5 kg/t de produto	Padrão de emissão global do estabelecimento
Produção de sulfato de cálcio	secador, calcinador	0,7 kg/t processada	Padrão de emissão global do estabelecimento
	outras fontes não-especificadas	0,05 kg/t processada	Padrão de emissão por fonte

Observações:

1 — Considera-se como tonelada processada todas as substâncias adicionadas ao processo, exceto combustíveis.

2 — Processamento de rocha fosfática — Os padrões não se aplicam às operações de recebimento, descarga, manuseio e armazenamento da rocha.

**CORREGEDORIA-GERAL DA JUSTIÇA**

PROVIMENTO N. 1 — DE 18 DE JANEIRO DE 1982

Institui as Normas do Pessoal das Serventias Não-Oficializadas,  
e dá outras providências

O Desembargador Bruno Affonso de André, Corregedor-Geral da Justiça, no uso de suas atribuições,

ANEXO G



# Pré-seleção de ventiladores

## Ventiladores exclusivamente para passagem de ar.

<b>Axiais</b>	VBA-90G VBA-93G*	VBA-91 VBA-94	VBA-91G VBA-95	VBA-92*
<b>Centrífugos</b>	VBR-100 VBR-220* VBR-500*	VBR-110* VBR-300* VBR-510*	VBR-120 VBR-400* VBR-510*	VBR-200 VBR-410 VBR-420 VBR-210*

## Ventiladores que permitem passagem de pó.

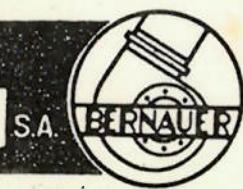
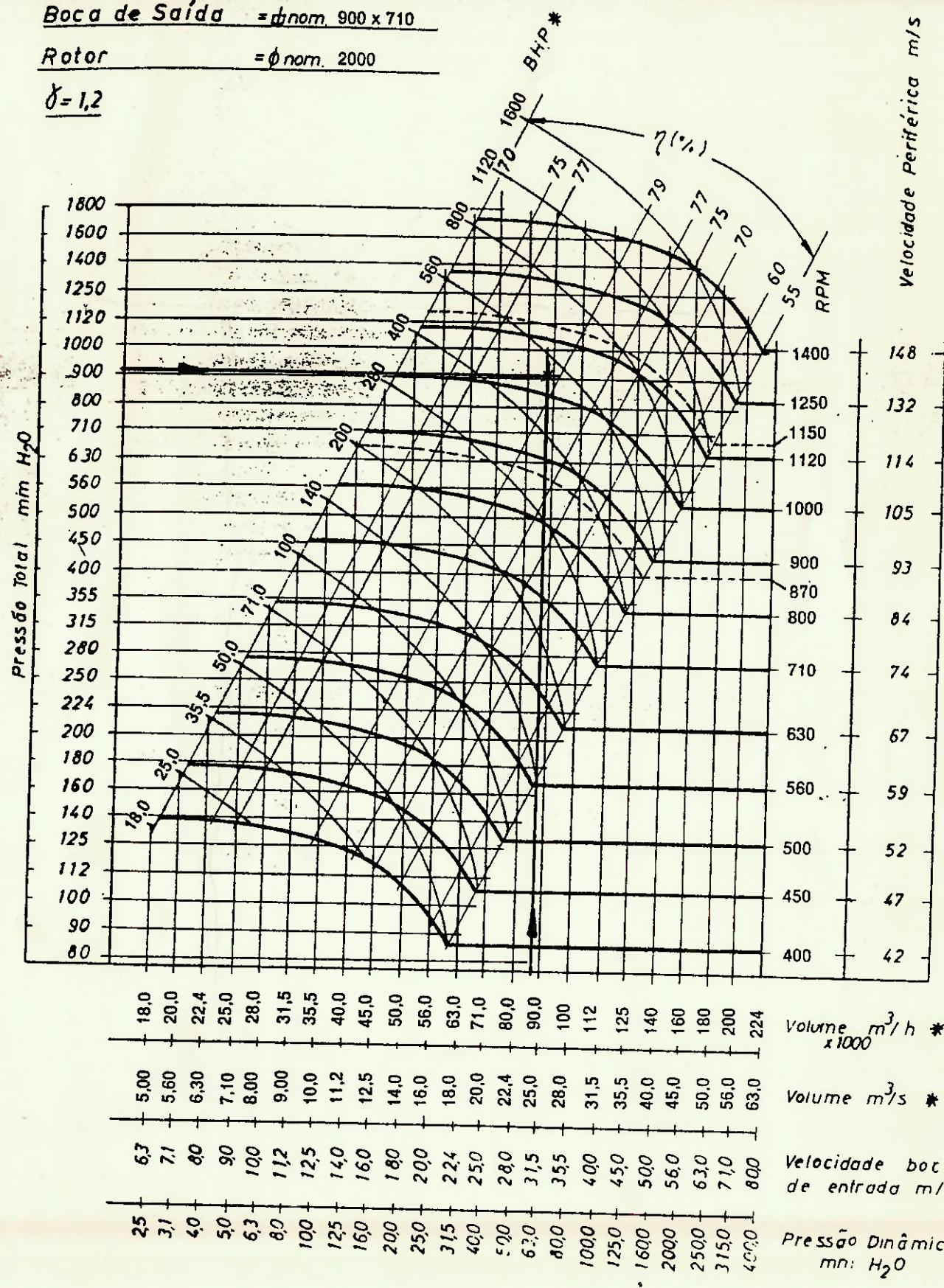
VBR-131*	VBR-231*	VBR-311*	VBR-321	VBR-431*	<u>VBR-522</u>
VBR-532*	VBR-602				

## Ventiladores exclusivamente para passagem de material.

VBR-142*	VBR-242*	VBR-253*	VBR-263*	VBR-273	VBR-322*
VBR-443*					

\* A seleção destes ventiladores deverá ser efetuada pela engenharia Bernauer.

VENTILADORES

**BERNAUER****Ventilador tipo****VBR-522/2000**Boca de Entrada =  $\phi$  nom. 1000Boca de Saída =  $\phi$  nom. 900 x 710Rotor =  $\phi$  nom. 2000 $\delta = 1,2$ **Curva característica**

\* valores arredondados conforme norma R-20-(DIN-323)