

TESE
532

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

EFFEI

INSTITUTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

"ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO
DESEMPENHO DE CICLONES"

Rogério José da Silva

- 1988 -

Av. BPS, nº. 1303
37.500 - ITAJUBÁ - M. G. - Tel. (035) 622-1966
Telex: (031) 3485



ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL

DO DESEMPENHO DE CICLONES

ROGÉRIO JOSÉ DA SILVA

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Dissertação de Mestrado

"ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO
DESEMPENHO DE CICLONES"

ROGÉRIO JOSÉ DA SILVA

Orientador:

Prof. Dr. Sebastião Varella

Coorientador:

Prof. MSC. Eli Silva

ITAJUBÁ - MG

1 9 8 8

Dedico este trabalho: a meus avós D. Geralda e Eduardo (in memoriam).

À Cida, e meus familiares que muito me incentivaram neste curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Escola Federal de Engenharia de Itajubá pela acolhida, pelo suporte e facilidades oferecidas para a realização deste trabalho. Ao CNPq e CAPES pelas bolsas de estudo.

Ao Prof. Dr. Sebastião Varella, orientador e amigo, agradeço pela atenção, ensino e orientação oferecida para o desenvolvimento deste trabalho. Seus conselhos e apoio nas horas difíceis guardarei pelo resto da vida.

Ao Prof. MSC. Eli Silva, agradeço pela orientação dispensada durante a realização deste trabalho.

À Profª Irmã Emiliana e ao Prof. Vilmar Arthur Schwarz agradeço a acolhida e constante apoio dispensado.

Expressamos nossos agradecimentos aos amigos Vandir, Antonio Eduardo e Cleto, pelo auxílio na construção, montagens do banco de ensaios, e realização das experiências.

Nossos agradecimentos ao Engº Walter M. Garcia Unanuê pelas facilidades oferecidas no levantamento de dados na Cia. de Cimento Portland Paraíso.

À Sra. Janice Duarte Viana, agradecemos pela confecção destes originais.

R E S U M O

O trabalho inicia-se com uma revisão bibliográfica, de onde são levantadas as características gerais dos ciclones. São vistas as principais aplicações, tipos e parâmetros construtivos, bem como suas características de operação. Também é feita uma análise do escoamento no interior do ciclone, onde são vistas as forças, velocidades e correntes secundárias que atuam no processo de separação, tanto do ponto de vista teórico como experimental.

Foram levantados vários métodos semi-empíricos para a previsão da eficiência de separação e da perda de carga. Baseado nestes métodos, foi desenvolvido um programa de computador que permitisse verificar a influência da variação de cada parâmetro no desempenho do ciclone.

No trabalho experimental foram realizadas medições no escoamento, e os resultados obtidos são apresentados. Estes resultados são comparados rapidamente com os resultados obtidos por outros autores. Mediu-se também a eficiência de separação, em ensaios com o ciclone operando na posição normal e na posição invertida. Nesta última verificou-se que para materiais com baixa massa específica, os resultados são favoráveis.

Ao final do trabalho são apresentadas, as conclusões relativas à análise da influência de cada parâmetro no desempenho do ciclone, e algumas sugestões para trabalhos futuros.

ABSTRACT

A literature review is made aiming to identify the general characteristics of cyclones, such as main applications, types, parameters and its characteristics of operation.

Based on the review an analysis of flow in the cyclone is made both in the theoretical and experimental point of view, as well as the forces, velocities and secondary flows that participated in the separation process. Based on several semi-empirical methods to predict of separation efficiency and pressure loss, were accomplished in a computer program which allows to verify the influence of variation of each parameter in the cyclone performance.

Experimentally were made measurements in flow and the results obtained are presented. A comparison with the results from the other authors is made. Also measurements of the separation efficiency in tests with cyclone working in the normal and reverse position. In the latter could be observed that for materials with low density the results are favourable.

At end of the work were presented the conclusions about the analysis of influence of each parameter on cyclone performance, and some suggestions to future works.

CONTEÚDO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
CONTEÚDO	iii
LISTA DAS FIGURAS	vii
LISTA DAS TABELAS	xi
SIMBOLOGIA	xii

	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO	01
2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CICLONES	05
2.1-Princípio de Funcionamento	05
2.2-Características de Operação e Utiliza <u>ç</u> ão	07
2.3-Formas e Parâmetros Construtivos dos Ciclones	14
3. ANÁLISE DOS PARÂMETROS INFLUENTES NO <u>DE</u> SEMPENHO DE CICLONES	22
3.1-Generalidades	22
3.2-Escoamento no Ciclone	24
3.2.1-Força de resistência do meio	24
3.2.2-Força centrífuga e sua magnitude	26
3.2.3-Determinação e distribuição de velo <u>ci</u> dades	27
3.2.3.1-Velocidades tangenciais	28
3.2.3.2-Estudos experimentais das veloci <u>da</u> des	29
3.2.3.3-Correntes secundárias no interior do ciclone	33

3.3-Previsão Teórica da Eficiência do <u>Ci</u> clone	34
3.3.1-Introdução	34
3.3.2-Previsão da partícula de diâmetro crítico	35
3.3.2.1-Cálculo teórico da partícula de diâmetro crítico	36
3.3.2.2-Equações corrigidas para o cálcu lo da partícula de diâmetro críti co	39
3.3.3-Previsão da eficiência pelo diâme tro de corte das partículas	43
3.3.4-Previsão da eficiência pelo método fracional	48
3.4-Previsão Teórica da Perda de Carga em Ciclones	51
3.4.1-Introdução	51
3.4.2-Modelos teóricos para o cálculo da perda de carga	52
3.5-Estimativa do Diâmetro do Ciclone e da Velocidade Mínima de Arraste das Partículas	58
3.5.1-Diâmetro do ciclone	58
3.5.2-Velocidade mínima de arraste	59
3.6-Análise Teórica dos Parâmetros In <u>flu</u> entes na Eficiência e Perda de Carga dos Ciclones	60
3.6.1-Diâmetro do ciclone	63
3.6.2-Altura, largura e forma da entrada	65

3.6.2.1-Altura do canal de entrada	65
3.6.2.2-Largura do canal de entrada	67
3.6.2.3-Forma da entrada	68
3.6.3-Diâmetro do tubo de saída do gás	69
3.6.4-Profundidade do tubo de saída do gás	71
3.6.5-Altura da parte cilíndrica do ciclone	73
3.6.6-Altura total do ciclone	74
3.6.7-Diâmetro de saída da fase sólida	77
3.6.8-Massa específica das partículas	79
3.6.9-Velocidade de entrada	80
3.6.10-Temperatura de trabalho do gás	82
3.6.11-Outros parâmetros influentes	83
4. ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS INFLUENTES NO DESEMPENHO DE CICLONES	85
4.1-O Banco de Ensaios	85
4.2-Campo de Velocidades no Interior do Ciclone	87
4.2.1-Método de medidas e resultados obtidos	90
4.2.2-Comparação com outros resultados experimentais	95
4.3-O Ciclone Operando Invertido	97
4.4-O Ciclone Operando na Posição Normal	105
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	109
5.1-Conclusões	109
5.2-Sugestões para Trabalhos Futuros	112

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 114

APÊNDICE - LISTAGEM DO PROGRAMA UTILIZADO
PARA A ANÁLISE DE PARÂMETROS
INFLUENTES NO DESEMPENHO DE
CICLONES 119

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>	<u>TÍTULO</u>	<u>PÁGINA</u>
2.1	Modêlo dos movimentos espiralados e descarga de sólidos nos ciclones	07
2.2	Esquema de uma instalação de processo para a produção de HCl e Na ₂ SO ₄	10
2.3	Esquemas de instalações com ciclones preaquecedores	11
2.4	Esquema de um forno rotativo com preaquecedores de ciclones com 4 estágios e diagrama de temperatura	11
2.5	Esquema simplificado de uma instalação de turbina a gás de carvão	
2.6	Alguns tipos de entradas de ciclones de fluxo-reverso	15
2.7	Tipos de corpos de ciclones de fluxo-reverso	16
2.8	Ciclones de fluxo unidirecional	17
2.9	Ciclone cilíndrico de fluxo unidirecional	18
2.10	Ciclone de fluxo unidirecional ascendente e descendente	19
2.11	Ciclones tipo bateria	19
2.12	Principais parâmetros geométricos do ciclone de fluxo reverso	20
3.1	Determinação das componentes de velocidade de uma partícula na corrente gasosa espiralada	26

3.2	Componentes de velocidade	27
3.3	Variação da pressão estática e da pressão total em diferentes pontos do ciclone	30
3.4	Variação das velocidades em diferentes pontos de um ciclone	31
3.5	Regiões de alta e baixa eficiências de separação	33
3.6	Circulações secundárias no ciclone	34
3.7	Núcleo central admitido por vários autores	41
3.8	Curvas de eficiência de separação teórico e experimental em função da relação dp/dpc	44
3.9	Gráfico para determinação da eficiência fracionada	46
3.10	Curvas para o fator de atrito ψ versus o raio de entrada para diferentes ciclones	47
3.11	Fator de perdas na entrada em função do tipo de entrada	55
3.12	Curvas experimentais de Weidner para o fator de perdas de pressão	56
3.13	Fluxograma simplificado do programa para análise de desempenho de ciclones	57
3.14	Influência da variação de D_c sobre η	64
3.15	Influência da variação de D_c sobre Δp	65
3.16	Influência da variação de a/D_c sobre η	66
3.17	Influência da variação de a/D_c sobre Δp	66
3.18	Influência da variação de b/D_c sobre η	67
3.19	Influência da variação de b/D_c sobre Δp	68
3.20	Influência da forma de entrada na η e Δp	69
3.21	Influência da variação de D_e/D_c sobre η	70

3.22	Influência da variação de D_e/D_c sobre Δp	70
3.23	Influência da variação de S/D_c sobre η	72
3.24	Influência da variação de S/D_c sobre Δp	72
3.25	Influência da variação de h/D_c sobre η	73
3.26	Influência da variação de h/D_c sobre Δp	74
3.27	Influência da variação de H/D_c sobre η	75
3.28	Variação de $n \times N_v$ (para diferentes velocidades)	76
3.29	Influência da variação de H/D_c sobre Δp	77
3.30	Influência da variação de B/D_c sobre η	78
3.31	Influência da variação de B/D_c sobre Δp	78
3.32	Influência da variação de ρ_p sobre η	79
3.33	Influência da variação de ρ_p sobre Δp	80
3.34	Influência da variação de V_e sobre η	81
3.35	Influência da variação de V_e sobre Δp	81
3.36	Influência da variação da temperatura sobre a η	82
3.37	Influência da variação da Temperatura sobre Δp	83
4.1	Ciclone de alta eficiência	86
4.2	Esquema da instalação do Banco de Ensaio com o ciclone invertido	88
4.3	Esquema da instalação do Banco de Ensaio com o ciclone montado na posição normal	89
4.4	Esquema do sistema de medição construído	91
4.5	Levantamento de pressões no corpo cilíndrico do ciclone	92

- 4.6 Distribuição de velocidades no interior do ciclone 94
- 4.7 Comportamento da velocidade tangencial para diferentes ciclones 96

LISTA DE TABELAS

<u>TABELA</u>	<u>TÍTULO</u>	<u>PÁGINA</u>
2.1	Comparações econômicas entre vários sistemas coletores	9
3.1	Valores de k e ζ segundo Barth	56
3.2	Distribuição granulométrica da areia	62
3.3	Nomenclatura de símbolos	63
4.1	Distribuição granulométrica do cimento	98
4.2	Dados do Ensaio nº 1 (cimento)	99
4.3	Dados do Ensaio nº 2 (cimento)	99
4.4	Dados do Ensaio nº 3 (cimento)	100
4.5	Resultados experimentais dos ensaios com o ciclone operando na posição invertida (areia)	102
4.6	Resultados experimentais dos ensaios realizados com o ciclone operando na posição invertida (serragem)	103
4.7	Distribuição granulométrica em peso	104
4.8	Resultados experimentais dos ensaios realizados com o ciclone operando na posição normal (areia)	106
4.9	Resultados experimentais dos ensaios realizados com o ciclone operando na posição normal (serragem)	107

SIMBOLOGIA

A	- área das paredes interna do ciclone	(m^2)
A_E	- área da seção de entrada do gás	(m^2)
A_S	- área da seção de saída do gás	(m^2)
A_p	- área projetada da partícula	(m^2)
a	- altura do canal de entrada do gás	(m)
a_c	- aceleração centrífuga	(m/s^2)
B	- diâmetro da saída da fase sólida	(m)
b	- largura do duto de entrada do gás	(m)
C	- velocidade das partículas	(m/s)
C_{massa}	- concentração de farinha por m^3 de ar	(kg/m^3)
C_o	- concentração em massa das partículas no gás	(kg/m^3)
C_o'	- relação da concentração do vol. de sólidos sobre o vol. da mistura	(-)
C_{te}	- constante	(-)
C_{p1}	- projeção da velocidade V no plano (Y,Z)	(m/s)
C_{p2}	- projeção da velocidade V no plano (X,Z)	(m/s)
D_c	- diâmetro do ciclone	(m)
D_e	- diâmetro do tubo de saída do gás	(m)
dp	- diâmetro da partícula	(μm)
dp_{crit}	- partícula de diâmetro crítico	(μm)
dp_c	- diâmetro de corte das partículas	(μm)
F	- força centrífuga	(N)
F_R	- força de resistência do meio	(N)
f	- função de ...	

G - constante de perdas por atrito	(-)
G_c - fator de configuração do ciclone	(-)
g - aceleração da gravidade	(m/s ²)
H - altura total do ciclone	(m)
H_i - altura interna do ciclone abaixo do tubo de saída do gás	(m)
h - altura da parte cilíndrica do ciclone	(m)
K - constante	(-)
K_i - fração constante da circulação do total	(-)
K_{preaq} - fator do volume de ar nos preaquecedores	(-)
K_s - fator do tipo de borda do tubo de saída do gás	(-)
l - altura da borda do tubo de saída, à parede do ciclone	(m)
m - expoente	(-)
$\dot{m}_{clinker}$ - vazão mássica de clínquer	(kg/s)
\dot{m}_f - vazão mássica do fluido	(kg/s)
$\dot{m}_{farinha}$ - vazão mássica de farinha	(kg/s)
m_i - massa de uma dada faixa de tamanhos de partículas	(kg)
m_p - massa de uma partícula	(kg)
m_t - massa total de partículas	(kg)
\dot{m}_{tp} - vazão mássica total de partículas	(kg/s)
N_{CP} - número de ciclones em paralelo	(-)
N_H - número adimensional da relação A_E/A_S	(-)
N_i - número de voltas da espiral interna	(-)

N_V	- número de voltas da espiral externa	(-)
n	- expoente do vórtice	(-)
n'	- número de vezes que F_C excede a gravidade	(-)
Q	- vazão volumétrica no ciclone	(m ³ /s)
R	- distância radial entre a partícula e o eixo do ciclone	(m)
R_1	- raio do tubo de saída do gás	(m)
R_2	- raio da parte cilíndrica do ciclone	(m)
R_e	- número de Reynolds	(-)
R_m	- raio médio $(R_1+R_2)/2$	(m)
r_e	- raio de entrada	(m)
r_{es}	- raio da espiral onde $V = V_e$	(m)
r_i	- raio do núcleo do vórtice	(m)
r_g	- raio do ponto onde a velocidade do gás é estimada	(m)
r_o	- raio onde a componente U_T é máxima	(m)
S	- profundidade do tubo de saída do gás	(m)
T	- temperatura	(°C)
t	- tempo; tempo de passagem do gás pelo ciclone	(s)
tg	- tangente de um ângulo	(-)
U_a	- componente de velocidade na direção axial	(m/s)
U_R	- componente de velocidade na direção radial	(m/s)
U_{Rp}	- componente de velocidade na direção radial, junto à parede do ciclone	(m/s)
U_T	- componente de velocidade na direção tangencial	(m/s)
U_{Te}	- componente de velocidade tangencial no raio de entrada r_E	(m/s)

V	- velocidade local do escoamento	(m/s)
V_{av}	- velocidade de arraste vertical	(m/s)
V_e	- velocidade média de entrada do gás no ciclone	(m/s)
V_e'	- velocidade no raio de entrada	(m/s)
V_H	- volume no comprimento natural	(m/s)
V_{nl}	- volume no comprimento natural, sem o núcleo	(m/s)
V_s	- velocidade mínima de arraste	(m/s)
V_{ts}	- velocidade de saída do gás	(m/s)
V_{tt}	- volume do gás na temperatura de trabalho	(m/s)
α	- fator de perdas na entrada	(-)
β	- expoente na equação do vórtice livre	(-)
Δp	- perda de carga no ciclone	(mmCA)
ΔV	- variação de velocidade	(m/s)
δ	- ângulo formado entre a componente C_{pl} e U_T	(o)
ϵ	- coeficientes de perda de pressão	(-)
ϵ_o	- coeficiente de perdas de pressão na região de entrada	(-)
ϵ_{ts}	- coeficiente de perdas de pressão na região de saída	(-)
ζ	- fator de perda de pressão	(-)
η	- eficiência de separação do ciclone	(%)
η_i	- eficiência fracional para um dado dp	(%)
η_R	- eficiência relativa	(%)
η_T	- eficiência total do ciclone	(%)
θ	- ângulo do cone do ciclone	(o)
λ	- coeficiente de arrasto	(-)
μ	- viscosidade dinâmica do fluido	(Pa.S)
μ'	- coeficiente de atrito de Stanton e Pannell	(-)
$\rho_f - \rho'_f$	- massa específica do fluido-gás; corrigida	(kg/m ³)

$\rho_p - \rho'_p$	- massa específica da partícula, corrigida	(kg/m ³)
ρ_{ftt}	- massa específica do gás na temperatura de trabalho	(kg/m ³)
γ	- ângulo formado entre a componente C_{p2} e U_R	(o)
Σ	- somatório	(-)
τ	- tempo inercial de resposta da partícula à variação da velocidade do gás	(s)
ψ	- ângulo formado entre a componente C_{p1} e U_a	(-)
Ψ	- fator de atrito com as paredes	(-)

1 - INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de se diminuir a poluição ambiental causada pela emissão de materiais particulados na atmosfera, tem nos últimos anos contribuído para o desenvolvimento e melhoria de separadores de partículas carregadas por gases. Neste contexto aparecem os ciclones, que devido à sua simplicidade construtiva, e eficiência de separação, se apresentam como equipamentos de grande aplicação industrial.

Ao que se conhece, o mais antigo ciclone utilizado para a separação de sólidos de gases, foi contruído pela Knickerbocker Company, USA, em 1885. Posteriormente até 1930, não se tem conhecimento de trabalhos publicados sobre separadores ciclônicos, apesar destes já serem utilizados na indústria. A partir de então, surgiram os primeiros estudos na área, baseados principalmente em trabalhos experimentais. Por volta dos anos 50, foram publicados uma série de trabalhos, que trouxeram uma contribuição expressiva ao campo de conhecimento sobre ciclones. No período compreendido do final da década de 50 e toda a década de 60, pouca contribuição foi publicada nesta área. Devido entretanto a uma forte tendência ao controle da poluição ambiental, ocorrida no início dos anos 70, o estudo dos separadores ciclones foi retomado com intensidade.

Nesta época, a Escola Federal de Engenharia de Itajubá, através do Prof. Richard Bran, iniciou estudos nesta área. Para a realização de estudos experimentais foi construído um banco de ensaios, com um ciclone de grande porte. A pesquisa nesta área foi desenvolvida por algum tempo, e depois encerrada. Considerando que nos estudos de ciclones, muitas lacunas ainda persistem, resolveu-se então re-iniciar trabalhos de pesquisa nesta área, dentro da EFEI.

Atualmente, com a utilização do ciclone em aplicações específicas, cujas condições de operação são especiais, traz consigo a necessidade de se conhecer mais profundamente o comportamento dos ciclones. A partir da utilização de computadores, e modernas técnicas de medições de velocidades no interior de es

coamentos, é possível conhecer melhor o processo de separação nos ciclones. De estudos básicos do mecanismo de separação no ciclone, poder-se-ão fazer projetos otimizados deste equipamento, para várias condições de operação, com maior segurança na previsão do seu desempenho.

Neste trabalho, propõe-se então a realização de um estudo abrangente sobre o comportamento do ciclone, sob dois aspectos importantes, a eficiência de separação e a perda de carga. Neste estudo se trabalharia utilizando as facilidades de cálculo pelo uso do computador, e novas técnicas de medições em ciclones. Assim, surgiu o tema a ser desenvolvido: "Análise Teórico-Experimental do Desempenho de Ciclones", cujos objetivos são identificados no próximo parágrafo.

Procura-se desenvolver um estudo, que possa ser utilizado como base para trabalhos futuros com ciclones. Para que isto fosse possível, foram propostos os seguintes objetivos, a serem alcançados no desenvolvimento desta dissertação:

- analisar teoricamente os fatores que contribuem para uma melhoria da eficiência do ciclone, a partir do estudo de parâmetros geométricos construtivos e parâmetros operacionais;
- verificar em que grau estes parâmetros alteram também a perda de carga;
- comprovar experimentalmente se o ciclone pode operar na posição invertida, e quais seriam as suas implicações;
- verificar experimentalmente o comportamento da eficiência e perda de carga, em função da variação de parâmetros geométricos construtivos e operacionais do ciclone.

De modo a alcançar os objetivos propostos, o trabalho teve o seu tema desenvolvido em três áreas distintas, distribuídas conforme descrição a seguir.

Inicialmente, no Capítulo 2, são mostradas as características gerais dos ciclones. Ele inicia com uma descrição do princípio de funcionamento dos ciclones, onde é comentado sobre a possibilidade de funcionamento do ciclone na posição invertida,

sem a perda de eficiência. São mostradas as vantagens dos ci clones sobre outros tipos de coletores, inclusive com custos pa ra comparação. Em seguida são apresentadas: alguns tipos de aplicações dos ciclones, tipos construtivos, e suas caracterís ticas operacionais. Por fim, são mostrados os principais parâme tos construtivos do ciclone de fluxo-reverso, sobre o qual são desenvolvidas todas as análises.

No Capítulo 3, é realizada uma análise dos parâmetros influ entes no desempenho de ciclones. Discutem-se os principais mode los de estudo de ciclones, e apresenta-se a justificativa para o modelo seguido. É realizada uma revisão bibliográfica a partir da qual se desenvolve o estudo sobre o escoamento no ciclone. São analisadas as forças presentes, a distribuição das componen tes de velocidades, e as correntes secundárias que surgem no es coamento. Em seguida realizou-se uma revisão sobre os métodos de previsão teórica da eficiência do ciclone. Nesta parte são apresentados e discutidos os vários métodos, com as limitações para seu uso. Da mesma maneira são revistos vários métodos so bre a previsão teórica da perda de carga. Visando a análise dos parâmetros influentes na perda de carga e eficiência dos ciclones, foi desenvolvido um programa computacional, engloban do todas as equações levantadas anteriormente. Assim, tornou-se possível avaliar a influência de cada parâmetro, através dos resultados teóricos do comportamento da eficiência e perda de carga, obtidos pela simulação feita utilizando o programa. Es tes resultados são também comparados com resultados encontrados na revisão bibliográfica. Finalizando o Capítulo, são comenta dos os efeitos da concentração de sólidos e umidade sobre o de sempenho dos ciclones.

No Capítulo 4, é apresentado o trabalho experimental. Comen ta-se como foi projetado o banco de ensaios, e são dadas as suas dimensões. São mostrados os esquemas da instalação com o ciclone montado na posição invertida e na posição normal. Em seguida vêm o estudo do campo de velocidades, no qual se comen ta sobre o tipo de sonda utilizada, os detalhes construtivos, e a técnica seguida nas medições das pressões e ângulos de esco amento. Dos dados obtidos são levantados os diagramas com a distribuição das componentes de velocidades, e é feita uma com o

paração com resultados obtidos por outros autores. O ciclone montado invertido foi ensaiado, e os resultados conseguidos apresentados. Os resultados indicaram que o ciclone opera com boa eficiência, dependendo das condições de operação, como: velocidade de entrada do gás, diâmetro e massa específica das partículas. Foram realizados ensaios onde se verifica o efeito da concentração sobre a eficiência. Em seguida são apresentados os resultados dos ensaios com o ciclone na posição normal, onde a geometria construtiva do ciclone foi variada.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. A análise teórica dos parâmetros influentes no desempenho de ciclones é realizada, e a influência de vários parâmetros comprovada experimentalmente. Em especial, pode-se comprovar experimentalmente que o ciclone pode operar na posição invertida e também que a perda de carga é reduzida com o aumento da concentração de sólidos. No Apêndice é apresentada uma listagem do programa utilizado no Capítulo 3, para projeto e simulação com ciclones.

Os resultados teóricos experimentais apresentados neste trabalho permitem uma avaliação da influência dos vários parâmetros geométricos e operacionais na eficiência e perda de carga em ciclones. Isto é de extrema valia para a otimização do cálculo de ciclones, principalmente quando o ciclone for utilizado em aplicações específicas.

2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CICLONES

2.1 - Princípio de Funcionamento

Os ciclones são aparelhos utilizados na separação de partículas, cujo princípio de funcionamento baseia-se na inércia de movimento das mesmas, ou seja, através da ação da força centrífuga que aparece em virtude do vórtice criado no escoamento gasoso.

Perry [1], define o ciclone como sendo uma câmara de decantação, na qual a aceleração gravitacional é substituída pela aceleração centrífuga. Afirma ainda que nas condições de operação normalmente empregadas, a força centrífuga de separação pode variar de 5 (cinco) vezes a força da gravidade, em ciclones de grande diâmetro e pequena resistência ao escoamento, a até 2500 (duas mil e quinhentas) vezes a força da gravidade em unidades de pequeno diâmetro e de alta resistência ao escoamento.

A força de inércia que provoca a separação das partículas é, em geral, diretamente proporcional ao quadrado da velocidade do gás, e inversamente proporcional ao raio de curvatura da corrente gasosa.

Del Tanago [2] mostra que a uma velocidade do gás de 18 m/s pode-se ter uma força de separação de 11 vezes a gravidade, em um dado ciclone de 6m de diâmetro, e de 896 vezes a gravidade para um ciclone de 76mm de diâmetro.

Para se criar o movimento espiralado, e a consequente ação da força centrífuga sobre as partículas carregadas na corrente gasosa, o gás é introduzido no interior do ciclone tangencialmente junto às paredes do corpo deste, ou axialmente com o auxílio de palhetas que induzem o início do movimento em vórtice do gás. Assim, é criada uma espiral gasosa que percorre o interior do ciclone. No interior desta espiral, ocorre um movimento relativo de escoamento das partículas em direção a parede. Desta forma as partículas caminham num movimento espiralado de raio crescente até alcançarem as paredes do ciclone. Então, são arrastadas pela corrente do gás adjacente à

parede até a saída da fase sólida, onde as partículas arrastadas são separadas do gás.

Baturin [3] inicialmente afirma que em ciclones convencionais, as partículas são transferidas para a parede e depois deixam a corrente, caindo no fundo do cone, em parte pela gravidade e em parte pelo arrasto da corrente gasosa. Porém, afirma posteriormente que o efeito independe da posição do eixo longitudinal do ciclone, podendo o mesmo ser horizontal, vertical ou inclinado. Cita o fato de um ciclone invertido, no qual o pó foi separado do mesmo modo que na posição normal (cone para baixo), contra a ação da gravidade não se verificando diminuição considerável na eficiência.

Do mesmo modo, Górdon e Peisájov [4] afirmam que o efeito extrator de um ciclone, após as partículas alcançarem as paredes do mesmo, se deve primeiramente ao arrasto da corrente de gás, em direção ao vértice do cone. Por esta razão, eles afirmam que se pode colocar o ciclone não somente com o cone para baixo, como também na direção inclinada, horizontal, e até mesmo invertido, ou seja, com o cone para cima.

O modelo de escoamento no clássico ciclone de fluxo reverso ou de contra-corrente pode ser visualizado na Fig.2.1, onde o gás introduzido tangencialmente caminha num movimento espiralado descendente entre a parede e o tubo de saída do gás "limpo", formando uma espiral chamada principal ou externa. Esta espiral descendente estende-se até a parte mais estreita do cone, onde se situa a saída da fase sólida, que pode ter ou não um tubo cilíndrico ligando o cone a um depósito, onde são descarregadas as partículas separadas.

O gás "limpo" retorna em movimento espiralado ascendente interno, com o mesmo sentido de rotação da espiral externa, pela região central junto ao eixo imaginário do ciclone, que se estende até o tubo de saída do gás, dando descarga ao gás "limpo".

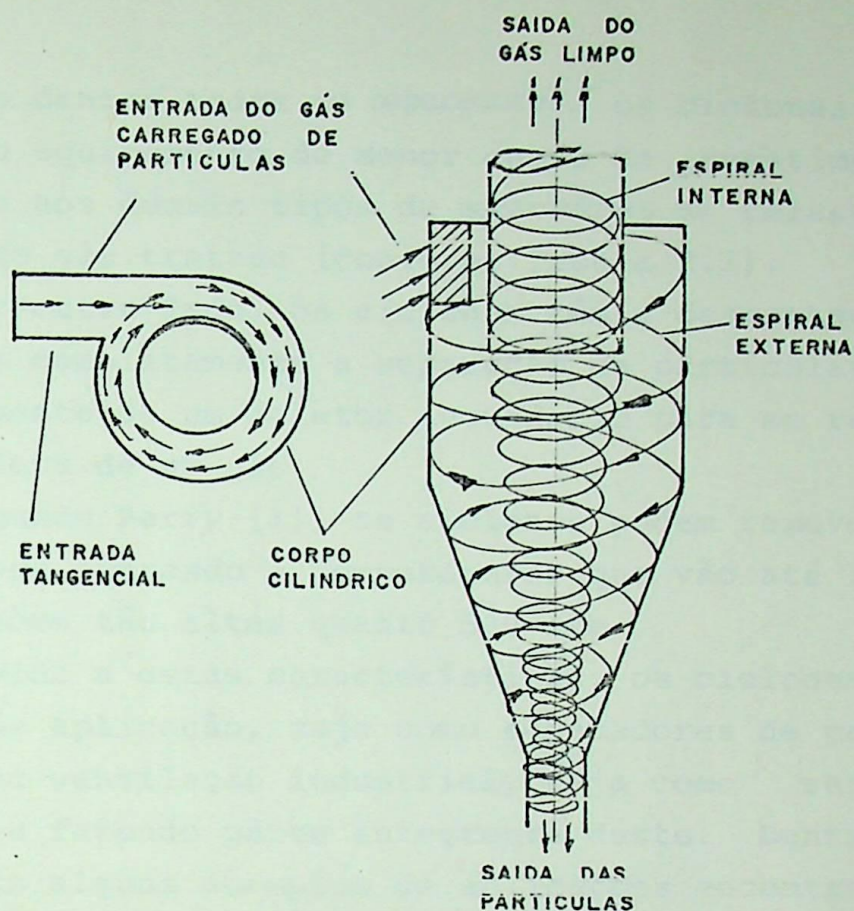


Figura 2.1 - Modelo dos movimentos espiralados e descarga de sólidos nos ciclones (Da Referência [5]).

2.2 - Características de Operação e Utilização

Os ciclones representam um tipo muito difundido dentre os separadores de partículas devido às suas características de projeto e operação. Há quase um século esses equipamentos têm sido utilizados para separar da corrente gasosa, partículas sólidas e líquidas [5,6]. As razões para o seu uso intenso são claras e citadas por vários autores [1,3,4,7], como segue:

- . Possuem alta eficiência operacional
- . Podem operar com grandes cargas
- . São de construção simples
- . Não possuem partes móveis
- . Têm baixo custo de fabricação, operação e manutenção
- . Em ciclones bem projetados, pode-se separar com êxito partículas de até 5 μm .

Quanto às vantagens de custos de fabricação, operação e manutenção, numa tabela levantada pela Organização Mundial da Saúde e apresentada por Mesquita et alii [8], pode-se então

verificar que dentre todos os separadores, os ciclones se apresentam como o equipamento de menor custo de investimento, comparativamente aos demais tipos de separadores em relação a uma mesma vazão de gás tratado (conforme Tabela 2.1).

Por outro lado, os ciclones têm a desvantagem de não efetuarem completamente a separação de partículas, necessitando normalmente de um coletor secundário para se realizar a limpeza completa de um gás.

Segundo Perry [1], os ciclones podem remover partículas dos gases operando a temperaturas que vão até 1000°C ou mais, e pressões tão altas quanto 500 atm.

Devido a estas características, os ciclones têm um vasto campo de aplicação, seja como separadores de partículas em sistemas de ventilação industrial, seja como separadores de processo ou fazendo parte integrante deste. Dentre esses usos citaremos alguns exemplos de aplicações encontradas comumente, e algumas na área de tecnologia de ponta.

Na indústria química os ciclones podem ser utilizados como separadores de granulometria, onde as partículas não separadas, e carregadas pela corrente que deixa o ciclone, representam o produto final, e são retiradas do gás em um coletor secundário. Como exemplo de outra utilização na indústria química, podemos citar o processo de fabricação de $\text{HCl}(\text{g})$ e $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{S})$, com utilização de um reator de transporte e um ciclone, a partir de NaCl , SO_3 , N_2 , HCl e vapor à pressão atmosférica, conforme mostrado por Smith e Van Ness [9]. A temperatura de entrada no reator de transporte é de cerca de 480°C , e o esquema da instalação é apresentado na Fig. 2.2.

EQUIPAMENTO	Eficiência (%)	Custo Capital (1000\$)		Perda de Carga (mmCA)	Força (1000\$/ano)	Água recirculada (3,81 / 28,3m³)	Custo da água (1000\$ / ano)	Manutenção (1000\$/ano)	Custo total de operação (1000\$ /ano)	Taxas (5) (1000\$/ano)	Custo total do sistema (1000\$/ano)	Cent. P 28,3m
		Total(1)	Por 28,3m³/min.									
Ciclone Simples	65,3	9,240	0,14	94,0	4,732	-	-	0,168	4,900	1,924	5,824	0,020
Ciclone de Alta Eficiência	84,2	17,640	0,28	125,0	6,328	-	-	0,168	6,496	1,764	3,260	0,029
Ciclone Irrigado	91,0	21,840	0,36	99,0	5,634	4,0	1,848	0,420	7,952	2,184	10,136	0,034
Multiciclone	93,8	19,320	0,31	109,0	5,544	-	-	0,168	5,712	1,932	7,644	0,027
Precipitador Eletrostático	94,1	85,960	1,43	16,0	1,736	-	-	0,700	2,436	8,596	11,032	0,038
Eletrostático Irrigado	99,0	147,840	2,46	16,0	3,136	2,5	1,232	1,120	5,488	14,784	20,272	0,070
Filtro de Manga Convencional	99,9	49,280	0,81	102,0	5,264	-	-	8,940(2)	14,168	4,928	19,096	0,060
Filtro de Manga com Jato Reverso	99,9	47,600	0,78	127,0	11,172	-	-	7,560(3)	18,732	4,700	23,492	0,082
Torre de "Spray" Gravitacional	96,3	51,240	0,84	36,0	6,650	8,0	9,240	0,840	16,730	5,124	21,854	0,075
Lavador Úmido de Impactação	97,9	28,840	0,48	155,0	8,120	3,0	1,540	0,840	10,500	2,884	13,384	0,047
Lavador Auto-Induzido	93,5	24,360	0,42	155,0	7,896	0,6	0,308	0,560	8,764	2,436	11,200	0,038
Lavador	99,7	42,000	0,70	559,0	29,596	7,0	3,388	0,840	33,824	4,200	38,024	0,128
Desintegradores	98,5	66,640	1,12	-	63,560	5,0	2,380	0,560	66,500	6,664	75,104	0,257

(1) Inclui Acessórios

(2) Inclui uma troca total de mangas cada ano

(3) Inclui uma troca total de mangas duas vezes ao ano

(4) Supõe 8000 h/ano de operação

(5) 10% do custo capital

(6) Cent = 0,01 \$

TABELA 2.1

COMPARAÇÕES ECONÔMICAS ENTRE VÁRIOS SISTEMAS COLETORES (4)

TEMPERATURA = 20°C;

CONCENTRAÇÃO = 12 GRAMAS/m³

VAZÃO = 28m³/s

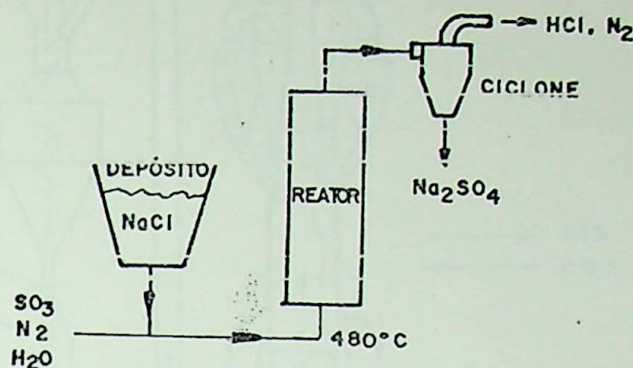


Figura 2.2 - Esquema de uma instalação de processo para a produção de HCl e Na₂SO₄ (Da Referência [9]).

Um marco decisivo no desenvolvimento da indústria cimenteira foi a invenção do sistema de ciclones preaquecedores de estágios de suspensão de farinha, cuja patente apresentada por Duda [10], data de 1 de Junho de 1932, de autoria de Mr. M. Vogel-Jørgensen, Engenheiro dinamarquês, a qual originou o processo de produção de cimento chamado "Via Sêca". O primeiro sistema em escala industrial foi instalado pela Humbolt Company em 1951 e, desde então, o princípio básico do sistema tem permanecido virtualmente inalterado.

Os muitos progressos individuais, no entanto, resultam em melhoria no arranjo e utilização dos ciclones preaquecedores. Alguns destes sistemas são apresentados na Fig. 2.3, a seguir. Como mostra a Fig. 2.3, o CRU ou farinha (mistura moída decalcáreo, argila, areia e corretivos), é introduzido no topo da torre de ciclones e desce trocando calor com os gases de combustão, oriundos do forno, que sobem. Devido ao fato da farinha ser constituída de particulado muito fino, e de ser arrastada pelo escoamento espiralado, o qual leva a um aumento do tempo de permanência das partículas em contato com o gás, a taxa de transferência de calor torna-se muito maior. Nesta troca de calor a temperatura da farinha chega a ser suficiente para que ocorra a descarbonetação parcial da farinha, ou seja, a precalcinação. A Fig. 2.4, mostra a seguir a relação entre as temperaturas do gás e da farinha em cada estágio de ciclone, numa instalação de forno rotativo para produção de clínquer a via sêca com precalcinador, cujo arranjo construtivo é o mais difundido na indústria cimenteira brasileira.

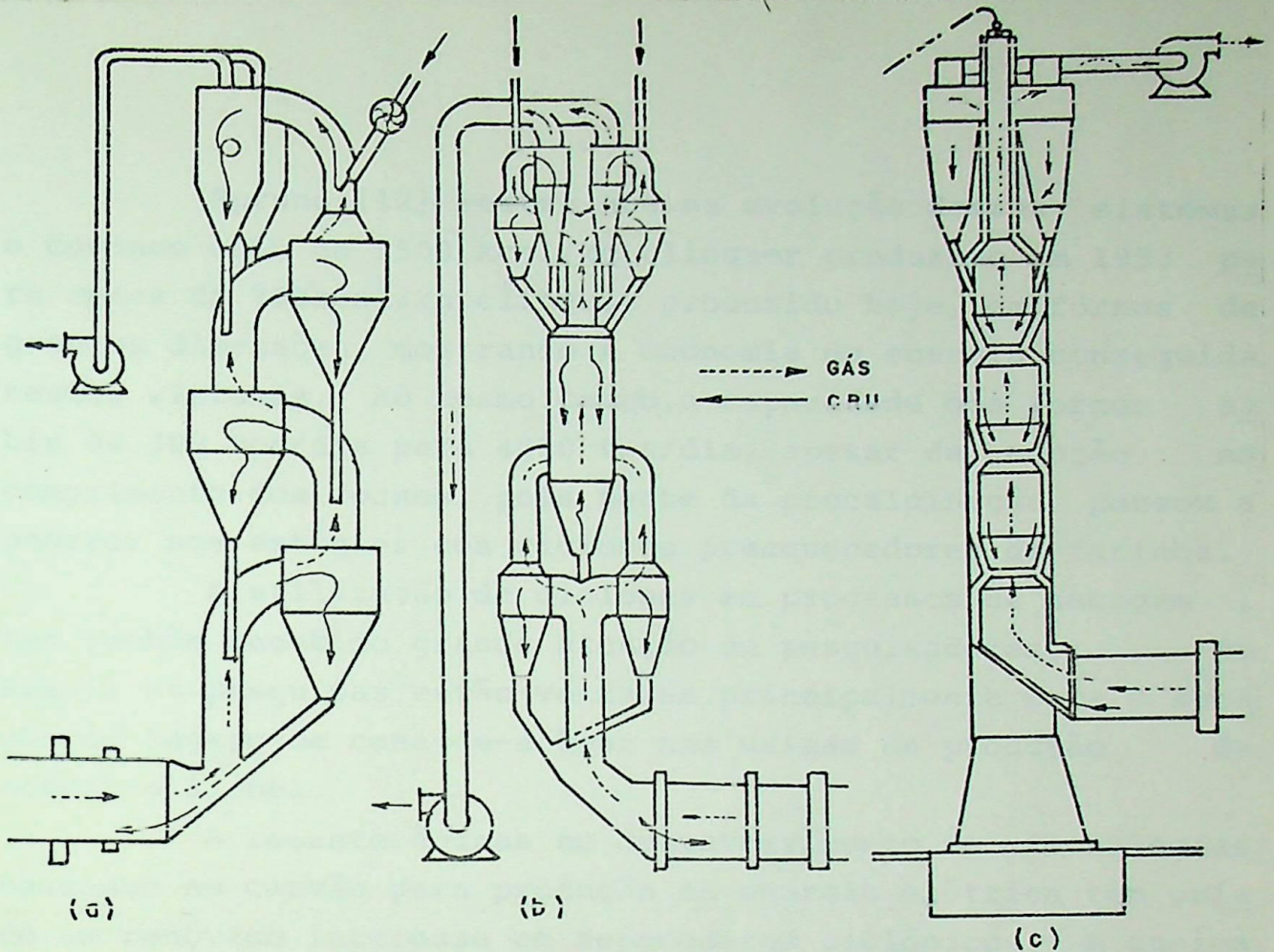


Figura 2.3-Esquemas de instalação com ciclones preaquecedores. a) Sistema idealizado por M.Vogel-Jørgenson, utilizado pelo Humbolt Company e F.L.Smith (mais comum); b) Sistema Polysius Dopol-preaquecedor; c) Sistema Krupp. (Da Ref. [11]).

TRANSFERÊNCIA DE CALOR

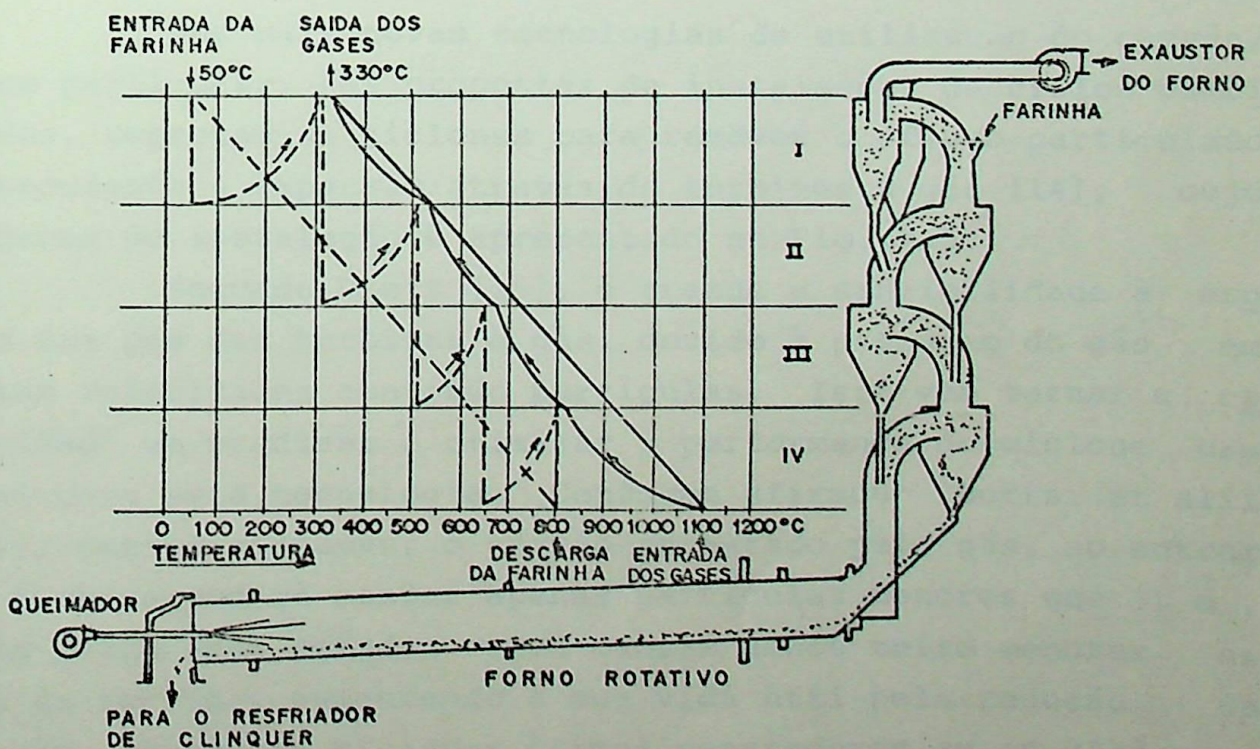


Figura 2.4-Eschema de um forno rotativo com preaquecedores de ciclones com 4 estágios e diagrama de temperaturas. (Da Ref. [11]).

Sprung [12] mostra que na evolução destes sistemas o consumo caiu de 1500 kcal/kg clínquer produzido em 1953 para cerca de 700kcal/kg clínquer produzido hoje, em fornos de grandes dimensões, mostrando a economia de energia conseguida nestes sistemas. Ao mesmo tempo, a capacidade dos fornos subiu de 300 ton/dia para 4500 ton/dia, apesar da redução no comprimento dos fornos, pois parte da precalcinação passou a ocorrer nos estágios dos ciclones preaquecedores de farinha.

A utilização de ciclones em processos de secagem, tem também recebido grande atenção de pesquisadores. No Brasil as pesquisas estão voltadas principalmente para a secagem de bagaço de cana-de-açúcar nas usinas de produção de açúcar e álcool.

A recente ênfase no desenvolvimento de tecnologias baseadas no carvão para produção de energia elétrica tem criado um renovado interesse em separadores ciclônicos. A queima de carvão pulverizado em sistemas de leito fluidizado, exige separadores de partículas eficientes para não causar poluição ambiental pelas cinzas presentes no carvão [13]. Os ciclones são então utilizados aí como separadores primários de partículas.

Nas mais novas tecnologias de utilização do carvão, e em particular, nas propostas de instalações de ciclos combinados, empregam-se ciclones para remover o efluxo particulado antecedente à expansão através de turbinas a gás [14], cujo esquema de instalação é apresentado na Fig. 2.5.

Segundo Dietz [15], é grande a sensibilidade à erosão das pás das turbinas a gás, devido à passagem do gás em altas velocidades contendo partículas. Isto vem tornar a capacidade em predizer e otimizar a performance do ciclone crucial para esta tecnologia. Conforme afirmou Botts et alii [16], nestes sistemas, o carvão arrastado pelo gás, ao entrar na turbina poderá conter apenas partículas menores que $3\mu m$, pois pelos seus estudos estas causam danos muito menores às pás da turbina, aumentando a sua vida útil pela redução da erosão. Sendo os ciclones ótimos separadores em condições severas de altas temperaturas e pressões (10 atm nestes ciclos), eles não conseguem separar bem partículas abaixo da

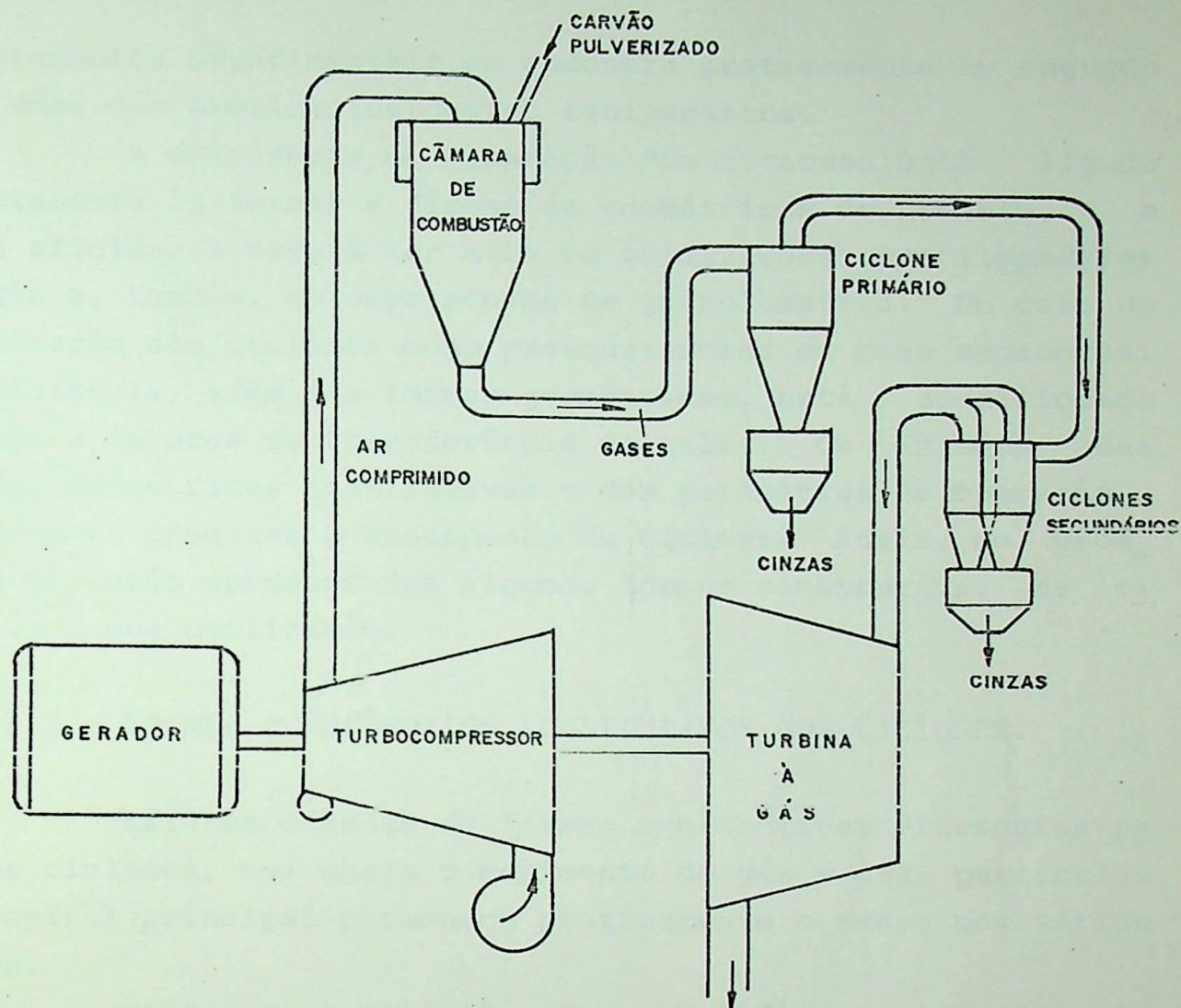


Figura 2.5 - Esquema simplificado de uma instalação de turbina à gás de carvão.

faixa de 20 μm nestas condições. A fragmentação das partículas com a utilização de laser até o limite aceitável, aliada a projetos de ciclones muito refinados, torna hoje extremamente viável o desenvolvimento destes ciclos para a geração de energia elétrica.

Infelizmente, na área de ciclones não existem ferramentas de projeto de grande precisão como em outros tipos de equipamentos, devido principalmente à complexidade do escoamento no seu interior.

Este trabalho procura levantar e analisar modelos empíricos de cálculo para projetos e simulação de condições operativas em ciclones, e confrontá-los com alguns dados experimentais levantados, buscando dar uma contribuição aos estudos nesta área, cuja tecnologia de desenvolvimento a partir de

ajustamentos experimentais se encontra praticamente em segredo nas mãos dos fabricantes destes equipamentos.

A eficiência de separação dos ciclones está ligada diretamente às formas e dimensões geométricas de projeto, e esta eficiência deverá ser alta em utilizações como limpadores de gás e, também, em separadores de granulometria. No caso da utilização dos ciclones como preaquecedores ou como secadores, a eficiência, além das formas geométricas, está condicionada também a fatores de transferência de calor. Os estudos das formas geométricas construtivas e dos parâmetros de operação, podem pois predizer o desempenho do ciclone. Assim, no próximo item serão apresentadas algumas formas construtivas de ciclones e sua utilização.

2.3 - Formas e Parâmetros Construtivos dos Ciclones.

Existem dezenas de formas construtivas diferentes para os ciclones, nos quais o movimento do gás e das partículas na espiral principal permanece praticamente o mesmo nos vários tipos.

Mesquita et alii [8], Strauss [17] e Hemeon [18], mostram algumas destas formas comumente empregadas, que são apresentadas e comentadas à frente. Inicialmente são mostrados e comentados os ciclones de fluxo-reverso de aplicação na maior parte dos sistemas industriais.

O ciclone simples de fluxo-reverso, Fig. 2.6a, de entrada tangencial, é um dos tipos mais usados industrialmente, sendo construído com certa facilidade pelo uso de chapas calandradas, em qualquer tamanho ou forma, e se presta bem à aplicação de revestimentos refratários internos. Possuem alto rendimento de separação, porém baixa capacidade de vazão de gás tratado.

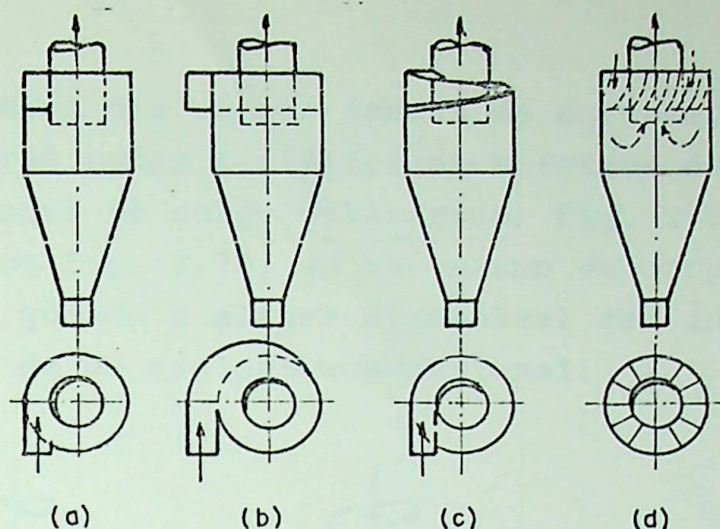


Figura 2.6 - Alguns tipos de entradas de ciclones de fluxo-reverso. (Da Ref. [17]).

Na Fig. 2.6b, é visto um esquema de um ciclone de entrada envolvente ou em voluta, que apresenta um valor médio em termos de perda de carga causada pela região de entrada. Estes ciclones possuem alta capacidade e alto rendimento de separação. A Fig. 2.6c apresenta o ciclone de entrada curvada, cujas características de operação são um alto rendimento e baixa vazão de tratamento. Quase todos os tipos de ciclones desenvolvidos nos Institutos: de Investigação Científica de Purificação de Gases; de Proteção ao Trabalho de Leningrado e também o de Sverdlovsk, todos da URSS adotam este tipo de entrada [4]. Nestes modelos o gás penetra no ciclone e adquire o movimento espiralado com a ajuda da entrada curvada. Outro modelo de entrada, corresponde ao ciclone de entrada axial, Fig. 2.6d, cujo movimento espiralado é imposto à corrente gasosa através de um defletor de lâminas colocado no anel formado entre o tubo de saída de gás "limpo", e a parede externa da câmara cilíndrica. Horzela [19] estabelece velocidades de entrada para os ciclones de entrada axial relativamente altas, da ordem de 25 m/s, comparadas às velocidades da ordem de 12 m/s a 22 m/s experimentadas em ciclones de entrada tangencial ou envolvente. Assim, os ciclones de entrada axial possuem uma capacidade de tratamento de gás cerca de duas vezes aquela dos ciclones de entrada envolvente do mesmo diâmetro. Porém os ciclones de entrada axial são limitados a poeiras que possam ser manipuladas sem desgaste excessivo ou perigo de obstrução nas aletas de entrada requeridas.

Além das várias formas de entrada, os ciclones de fluxo-reverso podem ter diferentes formas de corpo, Fig. 2.7, que podem ser: de corpo cilíndrico, Fig. 2.7a; de corpo cilíndrico/cônico Fig. 2.7b, ou até mesmo de corpo curvo Fig. 2.7c, utilizados quando a altura disponível for insuficiente para instalação de um ciclone convencional.

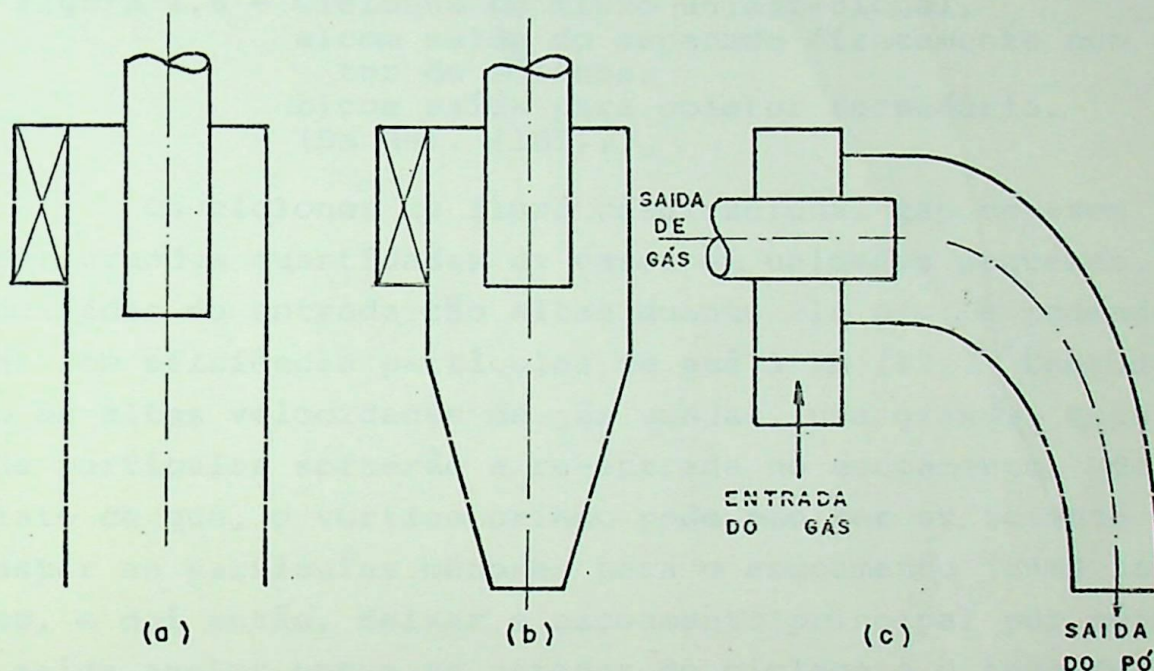


Figura 2.7 - Tipos de corpos de ciclones de fluxo-reverso (Da Ref. [17]).

Nos modelos de fluxo unidirecional, o tubo de saída do gás "limpo" do ciclone se situa no lado oposto à entrada do gás empoeirado, e geralmente nestes, o movimento giratório do gás é criado por meio de palhetas (ciclones de entrada axial), sendo na maioria dos casos usados como células primárias em sistemas de purificação de gases.

Dois tipos muito semelhantes destes ciclones são mostrados esquematicamente na Fig. 2.8. No primeiro (Fig. 2.8a), o separado cai diretamente no depósito, e no segundo (Fig. 2.8b), o separado iria passar ainda num coletor secundário.

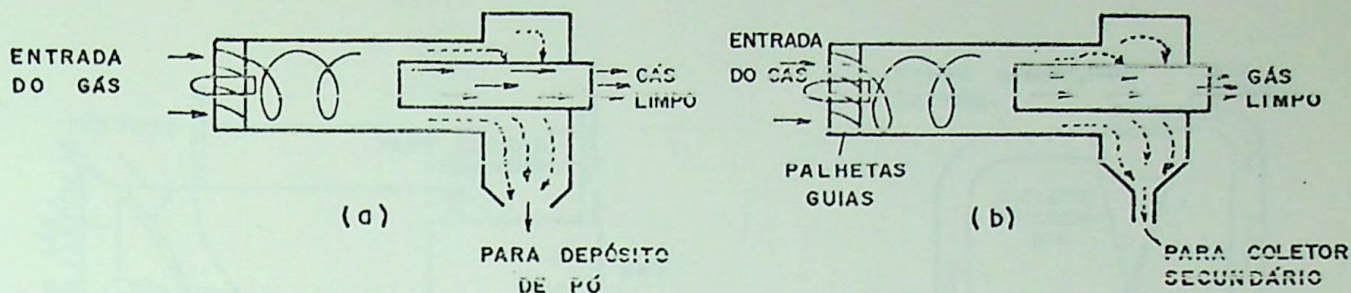


Figura 2.8 - Ciclones de fluxo unidirecional.

a) com saída do separado diretamente num coletor de sólidos;

b) com saída para coletor secundário.

(Da Ref. [18]).

Os ciclones de fluxo unidirecional são capazes de tratar grandes quantidades de gases em unidades pequenas, com velocidades de entrada tão altas quanto 210 m/s, e podendo separar com eficiência partículas de até 3 μm [17]. Contudo, devido às altas velocidades de gás usadas, uma grande quantidade de partículas sofrerão a re-entrada no escoamento, devido ao fato de que, o vórtice criado pode não ser suficiente para arrastar as partículas menores para o escoamento junto às paredes, e daí então, deixar o escoamento principal por meio de uma saída anelar entre as paredes do ciclone e o tubo de saída do gás limpo. Como, na saída da fase particulada, as partículas menores não podem ser retiradas diretamente num coletor primário, estes coletores exigem um ciclone secundário para completar a limpeza do gás, conforme visto na Fig. 2.9.

Outros tipos de ciclones unidirecionais são utilizados quando grandes células unitárias simples são requeridas para tratar gases, onde o espaço disponível seja pequeno, com por exemplo: em pequenas caldeiras. Conforme Strauss [17], a vazão de gás nestas unidades pode chegar a 85.000 m^3/h , onde se exigem baixas perdas de carga, e o grau de particulado removido não seja muito crítico, como no caso de caldeiras marítimas. Assim os coletores apresentados nas Figuras 2.10a e 2.10b, são particularmente usados em instalações que utilizam tiragem natural nas chaminés. Nestes modelos, a entrada do gás é dotada de aletas condutoras presas às paredes na periferia, e, ao centro, a uma guia cônica, que cria o movimento espiralado. É dotado de uma saída lateral ao longo da parede, para permitir que as partículas que alcançam sejam

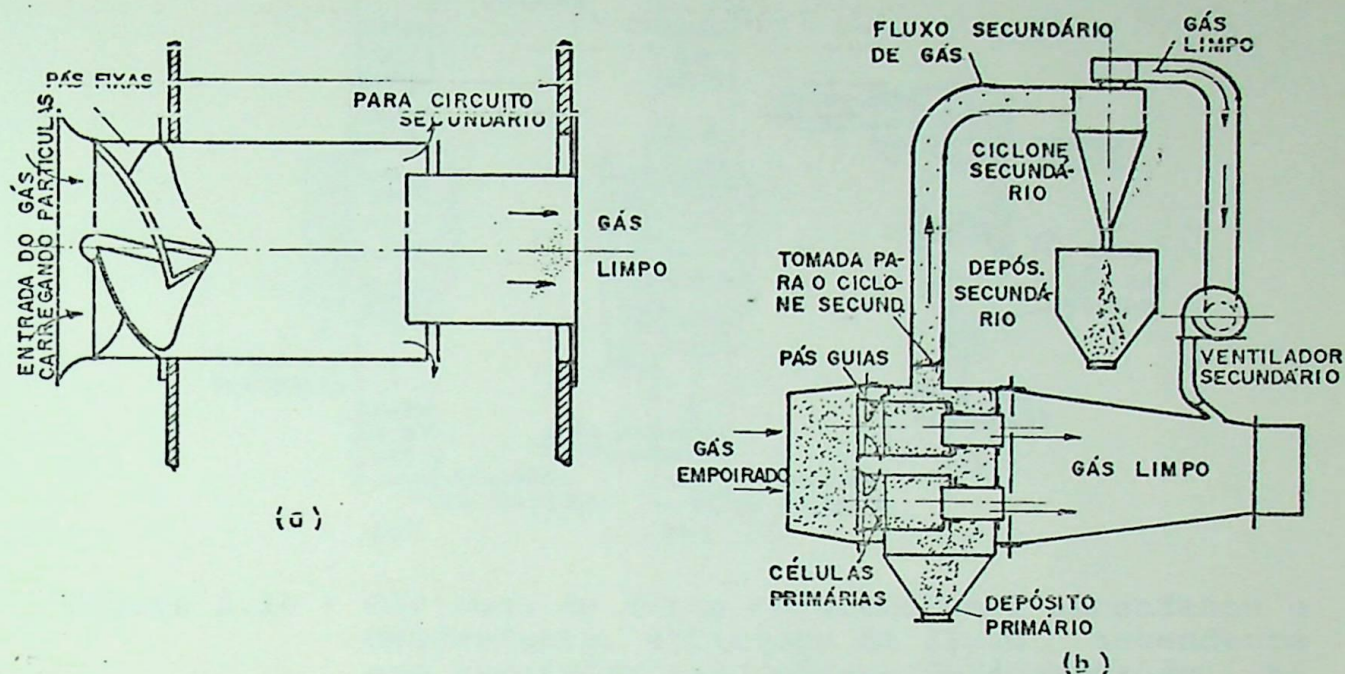


Figura 2.9 - Ciclone cilíndrico de fluxo unidirecional.

- a) Esquema do ciclone com entrada com aletas fixas e saída anelar;
- b) Instalação típica para uma unidade multicelular.

(Da Ref. [17]).

descarregadas diretamente num coletor de sólidos, Fig. 2.10a, ou ainda sejam introduzidas num ciclone secundário de pequeno diâmetro cuja entrada tangencial é a saída tangencial do gás mais carregado de partículas, Fig. 2.10b. O gás "limpo" que sai deste ciclone secundário é introduzido novamente na corrente gasosa principal.

O ciclone de fluxo unidirecional de corpo cilíndrico cônico com saída de gás concêntrica é apresentado na Fig. 2.10c. Ele possui entrada de gás tangencial, e a criação do vórtice é auxiliada por meio de um tronco cônico preso à tampa superior, impelindo o fluxo na direção das paredes. O material retirado da corrente principal de escoamento flui carregado por uma parte do gás, para a seção mais estreita do cone, e o gás "limpo" deixa o ciclone por meio de um tubo concêntrico ao tronco cilíndrico.

Quando houver a necessidade de se tratar um gás com particulado muito fino, dispendo-se de pequeno espaço disponível, os ciclones tipo bateria ou múltiplos-ciclones são ideais

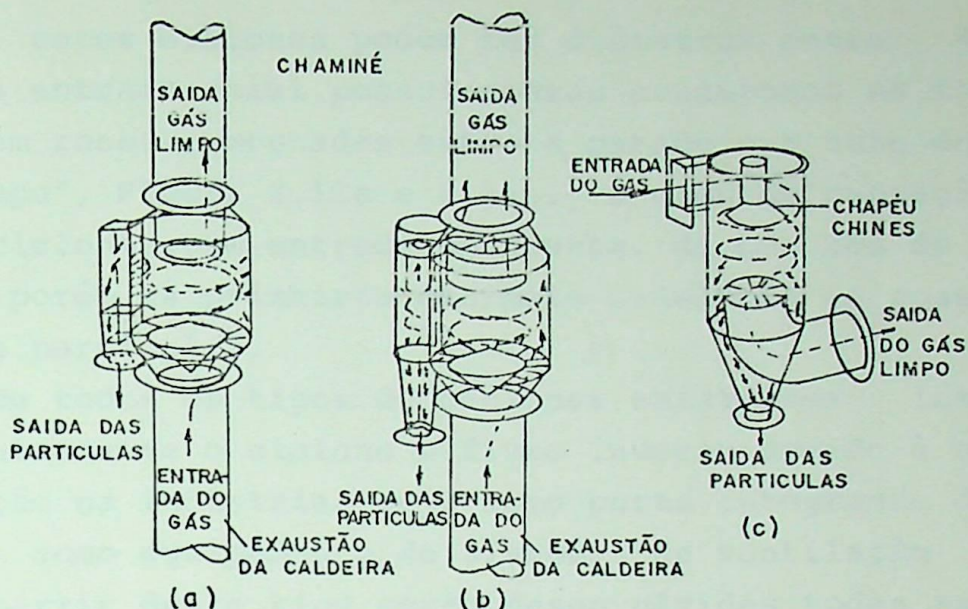


Figura 2.10 - Ciclones de fluxo unidirecional ascendente e descendente. a) Ciclone de fluxo ascendente com separador tipo câmara de decantação. b) Ciclone de fluxo ascendente com ciclone secundário de entrada tangencial. c) Ciclone de vórtice descendente. (Da Ref. [17]).

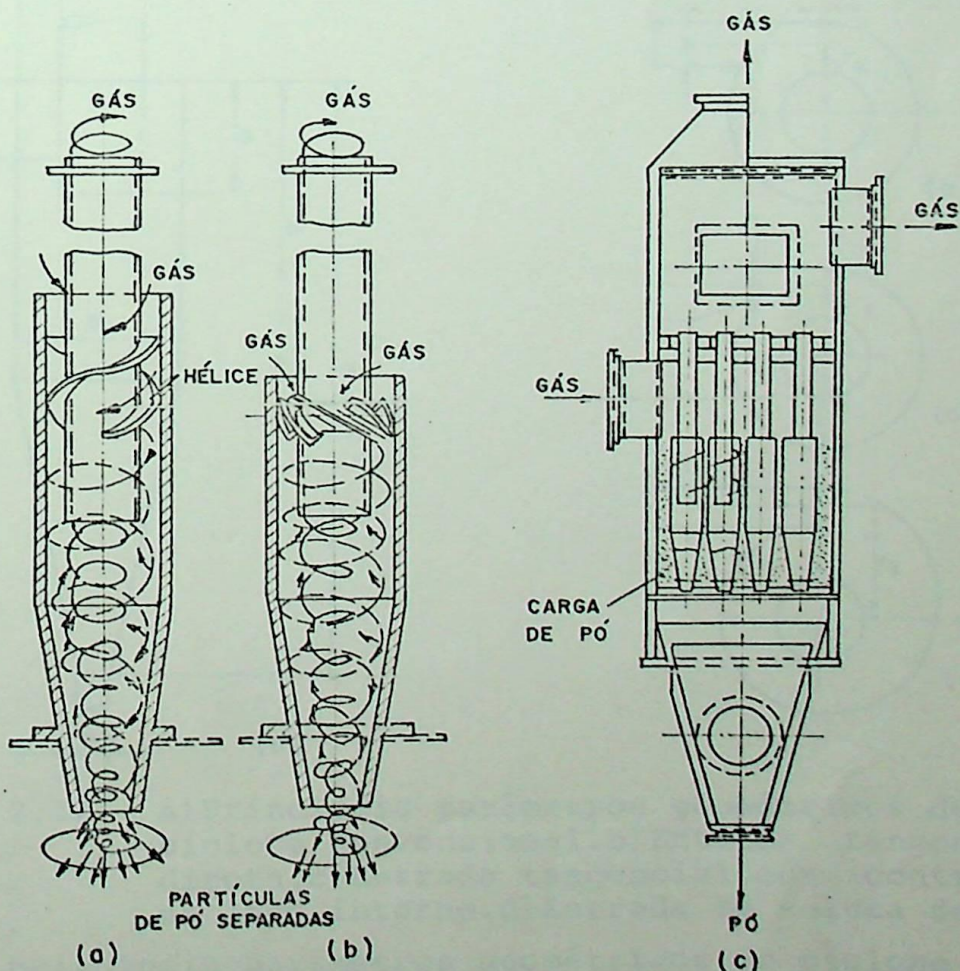


Figura 2.11 - Ciclones tipo bateria. a) Entrada axial em hélice. b) Entrada em roseta. c) Vista geral do ciclone tipo bateria. (Da Ref. [4]).

Geralmente, estes ciclones podem ter diâmetros entre 40 e 250mm, cuja entrada axial possui aletas condutoras na forma de hélice ou em roseta, montadas entre a parede e o tubo de saída do gás "limpo", Figura 2.11a e 2.11b. O grau de captação é maior nos ciclones com entrada em roseta, do que nos de aletas em hélice, porém os primeiros são mais sensíveis ao possível ataque pelas partículas.

De todos os tipos de ciclones existentes interessa nos particularmente o ciclone de fluxo inverso devido à sua larga utilização na indústria, seja como parte integrante do processo, seja como equipamento de sistemas de ventilação industrial. A partir deste tipo serão desenvolvidas todas as análises deste trabalho.

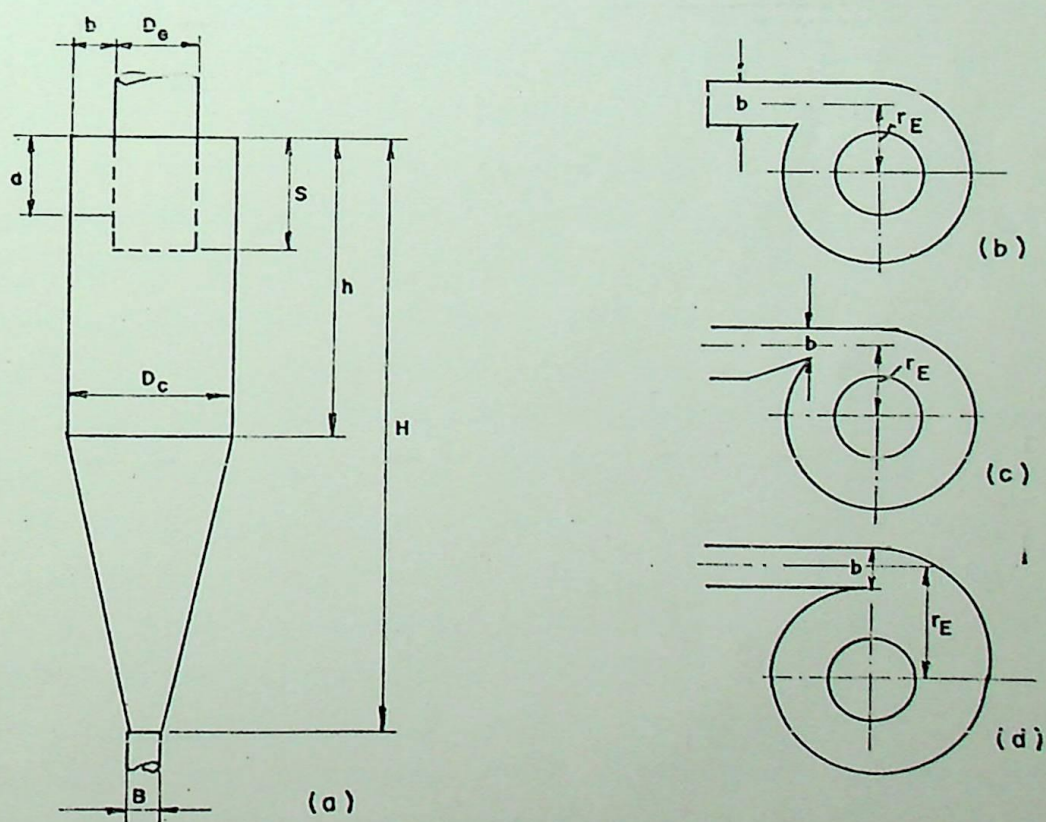


Figura 2.12 - a) Principais parâmetros geométricos de um ciclone convencional. b) Entrada tangencial direta. c) Entrada tangencial com contração no lado interno. d) Entrada em voluta de 180°.

Os principais parâmetros geométricos do ciclone de fluxo-reverso são apresentados na Figura 2.12.

Nas diversas famílias de ciclone de fluxo-reverso, as diferenças básicas entre elas estarão na variação da altura da

parte cilíndrica, ângulo do cone, profundidade e diâmetro do tubo de saída do gás, altura e largura da entrada. Um estudo aprofundado destes parâmetros irá nos mostrar a influência de cada um na eficiência e perda de carga no ciclone. É esta uma das propostas deste trabalho.

A partir de agora todo estudo será referido ao ciclone de fluxo-reverso, o qual denominaremos apenas de "ciclone".

3 - ANÁLISE DOS PARÂMETROS INFLUENTES NO DESEMPENHO DE CICLONES

3.1 - Generalidades

O estudo do comportamento de ciclones em termos de eficiência de separação (η) e perda de carga (Δp), a partir da análise dos parâmetros influentes no desempenho do mesmo, é de grande importância pois permite a otimização da forma construtiva do ciclone para cada tipo de aplicação. Para este estudo existem basicamente duas linhas de pesquisa: a que procura modelar matematicamente a η e Δp como uma função dos parâmetros geométricos construtivos e operacionais do ciclone; e a outra que procura a modelagem do escoamento turbulento e do movimento das partículas, no interior do ciclone.

Existe certa dificuldade no desenvolvimento de modelos matemáticos para o cálculo preciso do comportamento de ciclones. Segundo Boysan et alii [6], não se conhece ainda exatamente o processo de separação que ocorre no ciclone, cujo conhecimento pode indicar modificações que resultem em melhoria da performance do mesmo. Apesar da simplicidade construtiva do ciclone, a dinâmica dos fluidos é complexa, o que classifica o seu campo de escoamento como um dos mais sofisticados problemas de mecânica dos fluidos [13]. Isto é devido a aspectos como, vorticidade constante, e em alguns casos diversas zonas anulares de fluxo inverso. A teoria de tais fluxos confinados em vórtice tem sido incapaz de prever muitos aspectos do campo de escoamento observados.

No entanto, apesar da complexidade, modelos empíricos e semi-empíricos, baseados em observações experimentais foram propostos. Os vários métodos de resolução destes modelos nem sempre fornecem resultados numéricos que indicam a eficiência, fornecendo muitas vezes valores que são apenas um indicativo da eficiência [7].

Na modelagem do escoamento turbulento encontra-se um número maior de incógnitas do que equações, o que implica no levantamento de equações empíricas e simplificações para resolução destes sistemas. A solução destes pelos mais variados

métodos permite a previsão de: η , Δp , distribuição de velocidades e pressões no escoamento com certa aproximação com resultados experimentais. Na revisão bibliográfica encontrou-se alguns métodos de resolução destes modelos, que são encontrados nas Referências [6,17].

Dos seus estudos Boysan et alii [6] desenvolveu um modelo, partindo das equações da continuidade e momento, utilizando ainda as equações diferenciais parciais da energia de turbulência e sua taxa de dissipação, e resolveu o modelo desenvolvido pelo método das diferenças finitas. Este modelo permite predizer não apenas os parâmetros totais de projeto, como o comportamento das componentes de velocidades e trajetórias das partículas. Diagramas de distribuição de velocidades, eficiência e perda de carga, conseguidos pela simulação por este modelo em computador são encontrados no mesmo artigo.

Strauss [17] apresentou dois métodos de resolução do modelo de escoamento. Um método utiliza a teoria do vórtice livre, e o outro a teoria do vórtice, que é bem mais sofisticada do que o primeiro. Entretanto, estes modelos não relacionam diretamente o comportamento do ciclone aos seus parâmetros construtivos e operacionais, e por isto não serão alvo de análise deste trabalho.

O estudo do desempenho de ciclones pelos modelos que relacionam a η e Δp como uma função dos parâmetros construtivos e operacionais, permite uma análise mais imediata de quais parâmetros exercem maior ou menor influência no desempenho dos mesmos. Entende-se por parâmetros geométricos construtivos as seguintes dimensões: o diâmetro da parte cilíndrica do ciclone; o diâmetro e a profundidade do tubo de saída do gás; o diâmetro de saída da fase sólida; a altura da parte cilíndrica e a altura total do ciclone. Por parâmetros operacionais entende-se: a velocidade de entrada do gás no ciclone; a massa específica do gás e da partícula; a temperatura de trabalho e a viscosidade dinâmica do gás.

Neste capítulo a partir de uma revisão bibliográfica, serão abordadas inicialmente as características da distribuição de forças e velocidades no interior do ciclone, bem como escoamentos secundários. Este estudo preliminar visa a dar su

porte para o entendimento de simplificações feitas no desenvolvimento de modelos e equações empíricas, aplicáveis ao estudo de comportamento de ciclones. Procura-se ainda entender por este estudo as possíveis divergências entre os resultados experimentais e teóricos. Após a abordagem destes aspectos básicos, são mostrados algumas equações matemáticas para o cálculo da partícula de diâmetro crítico, diâmetro de corte, e um método de cálculo da eficiência fracional. São apresentados também alguns métodos encontrados na revisão da literatura, para a previsão da perda de carga em ciclones convencionais.

Uma vez realizado este levantamento, para facilitar a análise da influência de cada parâmetro, mantendo-se constante todos os demais parâmetros, foi desenvolvido um programa num computador HP-3000, em FORTRAN IV, para a realização das simulações. Um fluxograma resumido deste programa é apresentado no item (3.6) deste capítulo. Os resultados conseguidos das simulações deste programa são plotadas em gráficos, e a partir destes são feitas as comparações e comentários em vista dos valores encontrados, e dos dados obtidos da revisão bibliográfica.

3.2 - escoamento no Ciclone

É importante conhecer como o escoamento do gás se comporta no interior do ciclone, de forma a permitir a análise do fenômeno de separação e seus parâmetros influentes. Neste item são estudadas as forças de resistência do meio, e a força centrífuga criada do movimento giratório. Logo após são analisadas as distribuições de velocidades e pressões, e sua determinação, e ainda os escoamentos secundários no ciclone.

3.2.1 - Força de resistência do meio

Nas simplificações adotadas para o estudo de ciclones, considera-se que o regime de escoamento seja laminar. Assim sendo, a força de resistência do meio ao deslocamento da partícula será dada pela Lei de Stokes, onde:

$$F_R = 3 \pi \mu \cdot d_p \cdot U_R \quad (3.1)$$

Partindo-se das definições do coeficiente de arrasto[4], tem-se:

$$\lambda = \frac{F_R}{\frac{1}{2} \rho_f \cdot U_R^2 A_p} \quad (3.2)$$

onde:

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4}$$

Substituindo-se F_R dado pela Equação (3.1) em (3.2), vem:

$$\lambda = \frac{24\mu}{\rho_f \cdot U_R d_p} \quad \text{como } Re = \frac{\rho_f \cdot d_p \cdot U_R}{\mu} ,$$

$$\lambda = \frac{24}{Re} , \quad (3.3)$$

Caso em que vale a Lei de Stokes.

Para o caso de regime turbulento, o coeficiente λ pode ser considerado constante e igual a 0,44. Assim a força de resistência do gás, pode ser expressa como:

$$F_R = 0,44 \cdot \frac{\pi d_p^2}{4} \cdot \frac{U_R^2 \rho_f}{2}$$

$$F_R = 0,173 d_p^2 \cdot U_R^2 \cdot \rho_f \quad (3.4)$$

Em regime transitório, o coeficiente de ar rasto é:

$$\lambda = \frac{18,5}{Re^{0,6}} \quad (3.5)$$

neste caso,

$$F_R = 2,3125 \frac{\pi d_p^2 \cdot U_R^2 \rho_f}{Re^{0,6}} \quad (3.6)$$

A Lei de Stokes é válida para $Re \leq 1$, Equação (3.1). Na faixa de $1 < Re < 500$ o coeficiente de arrasto é dado pela Equação (3.5), e para o caso de regime turbulento $500 < Re < 10^5$, $\lambda = 0,44$, conforme Referência [20].

A adoção de que o regime seja sempre laminar poderá introduzir erros nos resultados finais, porém existem outras considerações que influirão de modo mais acentuado para a distorção de resultados.

OBS.: Uma análise mais detalhada deste equacionamento pode ser encontrado na Ref. 4 (Gordón e Peisājov - pp. 70 - 76).

3.2.2 - Força centrífuga e sua magnitude

A força centrífuga atuante numa partícula movendo-se dentro de um escoamento gasoso em movimento de vórtice, pode ser calculada por:

$$F_c = \frac{m_p \cdot U_T^2}{R} \quad (3.7)$$

A força centrífuga na partícula é a força normal à tangente do arco. Na Figura (3.1a) são identificados alguns parâmetros influentes na intensidade desta força.

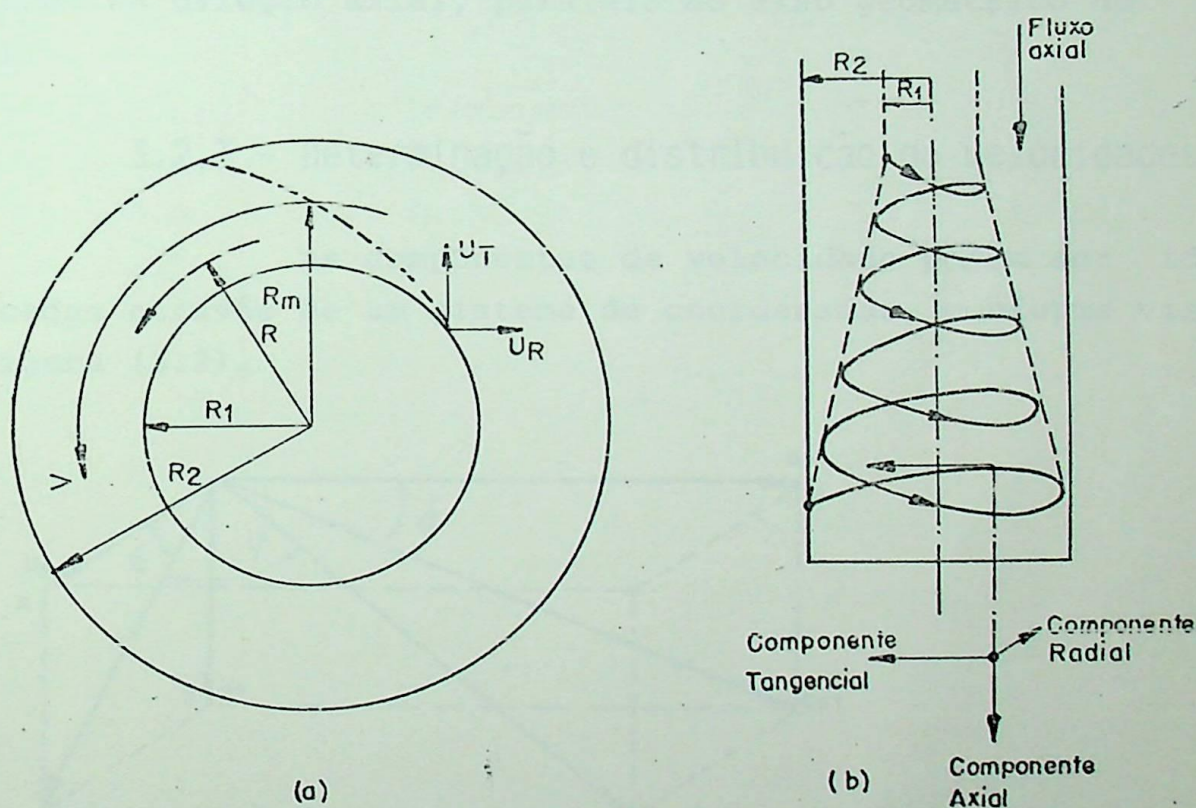


Figura 3.1 - Determinação das componentes de velocidade de uma partícula na corrente gasosa espiralada. [Ref.17].

A magnitude da força centrífuga é frequentemente definida como o número de vezes, n' , que esta excede a força da gravidade. Portanto:

$$n' = \frac{F_c}{m_p \cdot g} = \frac{U_T^2}{R \cdot g} \quad (3.8)$$

Straus [17] mostra que, quando a trajetória do gás é uma espiral ao longo das paredes de um cilindro, as

partículas devido a ação da força centrífuga, tenderão a se distanciar do centro do cilindro indo em direção das paredes. Como as partículas são arrastadas pela corrente gasosa, sua trajetória será então uma hélice expandindo Figura (3.1b). Deste modo a velocidade de escoamento da partícula pode ser desmembrada em três componentes, a saber:

- Velocidade tangencial (U_T), definida como sendo a componente de velocidade na direção tangencial;
- Velocidade radial (U_R), definida como sendo a componente de velocidade na direção radial;
- Velocidade axial (U_a), definida como a componente de velocidade na direção axial, paralela ao eixo geométrico do clone.

3.2.3 - Determinação e distribuição de velocidades

As componentes de velocidade podem ser identificadas através de um sistema de coordenadas, conforme visto na Figura (3.2).

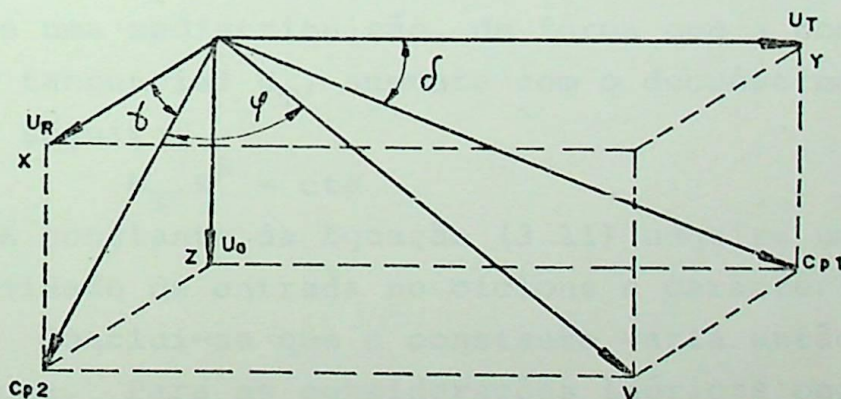


Figura 3.2 - Componentes de velocidade.

Pelo sistema de coordenadas, pode-se avaliar a intensidade das componentes, a partir de levantamentos experimentais da velocidade local de escoamento e sua direção no espaço. Analizando resultados experimentais publicados [7], verificou-se que a componente radial de velocidade é muito pequena, e por isso geralmente ela é desprezada na maioria dos estudos. No levantamento das componentes U_T e U_a , é necessário determinar a intensidade de V , e o ângulo de inclinação da espiral dado por δ . Quando deseja-se determinar U_R desconhecendo

-se os ângulos γ e ψ , Varella [21] afirma que a velocidade radial pode ser relacionada à velocidade axial ou vertical. Analisando os resultados experimentais de Kelsal, ele mostra que a velocidade radial é máxima próxima à parede do ciclone, e diminui até zero para os outros casos, e estabelece a seguinte relação na parede:

$$U_{Rp} = U_a \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{2} \quad (3.9)$$

Por sua vez, a variação da velocidade radial U_R , com o raio, é dada por:

$$U_R = U_a \cdot \frac{R}{R_2} \quad (3.10)$$

3.2.3.1 - Velocidades tangenciais: como visto na Equação (3.7), a força centrífuga é proporcional à velocidade tangencial, e isto torna esta componente muito importante, merecendo uma consideração a parte sobre a sua intensidade e distribuição.

Segundo Perry [1] e Dorman [7], é frequentemente assumido que a fórmula do vórtice livre pode ser aplicada ao sistema.

Quando o gás penetra no corpo do ciclone, sua velocidade sofre uma redistribuição, de forma que a componente de velocidade tangencial U_T , aumenta com o decréscimo do raio R , conforme a seguir:

$$U_T \cdot R^\beta = \text{cte} \quad (3.11)$$

A constante da Equação (3.11) adquire um valor para cada velocidade de entrada no ciclone e características construtivas. Conclui-se que a constante varia então para cada tipo de ciclone. Para as considerações teóricas onde se considera que o atrito com a parede seja nulo, adota-se $\beta=1$.

Shepherd e Lapple [3], a partir de seus trabalhos experimentais, propuseram uma faixa de variação de β , entre 0,5 e 0,7, sobre uma grande parte do raio do ciclone.

Ter Linden [22], encontrou $\beta=0,52$ para velocidades tangenciais medidas na parte cilíndrica do ciclone, entre o raio do tubo de saída do gás e o raio da saída da fase sólida. De modo geral β é tomado próximo de 0,5 na maior parte dos trabalhos. As exceções são, o primitivo trabalho de Prockat, e dos

estudos de First e Alexandre [7], que dão para o expoente β valores entre 0,7 e 0,88.

Para o cálculo teórico da velocidade tangencial, Ter Linden [22] a partir de seus estudos chegou à seguinte Equação:

$$U_T = \frac{U_{Te}}{r_g^{0,52}} \cdot \left(\frac{DC}{2} \right)^{0,52} \quad (3.12)$$

Esta Equação é aplicável para o cálculo de velocidades tangenciais na parte cilíndrica do ciclone. U_{Te} é a velocidade tangencial na circunferência de entrada. Uma vez que U_{Te} não sofre muito desvio em relação à velocidade média de entrada do gás no ciclone, pode-se considerar $U_{Te} = V_e$. Sendo r_g o raio até o ponto em que a velocidade é estimada, e U_{Te} praticamente constante, a velocidade tangencial irá aumentar à medida da diminuição do raio r_g .

3.2.3.2 - Estudos experimentais das velocidades: o estudo da distribuição de velocidades contribui para o entendimento do mecanismo de separação. O conhecimento destas velocidades permite a avaliação das zonas de maior probabilidade de separação. Assim, as partículas introduzidas no interior do ciclone, dependendo de sua posição, poderá ser separada com maior ou menor eficiência.

Ao que se conhece, H. Mulder foi o primeiro pesquisador a realizar medições de velocidades e pressões no interior do ciclone. Ele realizou suas medições utilizando um medidor tipo Globo-Pitot, e os resultados deste trabalho para diferentes pontos do ciclone, foram publicados no artigo de Ter Linden [22]. Na Fig. (3.3) são apresentadas as variações das pressões totais e estáticas dentro de um dado ciclone. Nos ensaios realizados a pressão estática na entrada era de 90mmCA, e após a passagem pelo ciclone, o gás era descarregado livremente na atmosfera. Debaxo do ciclone foi colocado um depósito para partículas, hermeticamente fechado, em cujo interior foi medido um vácuo de 30mmCA.

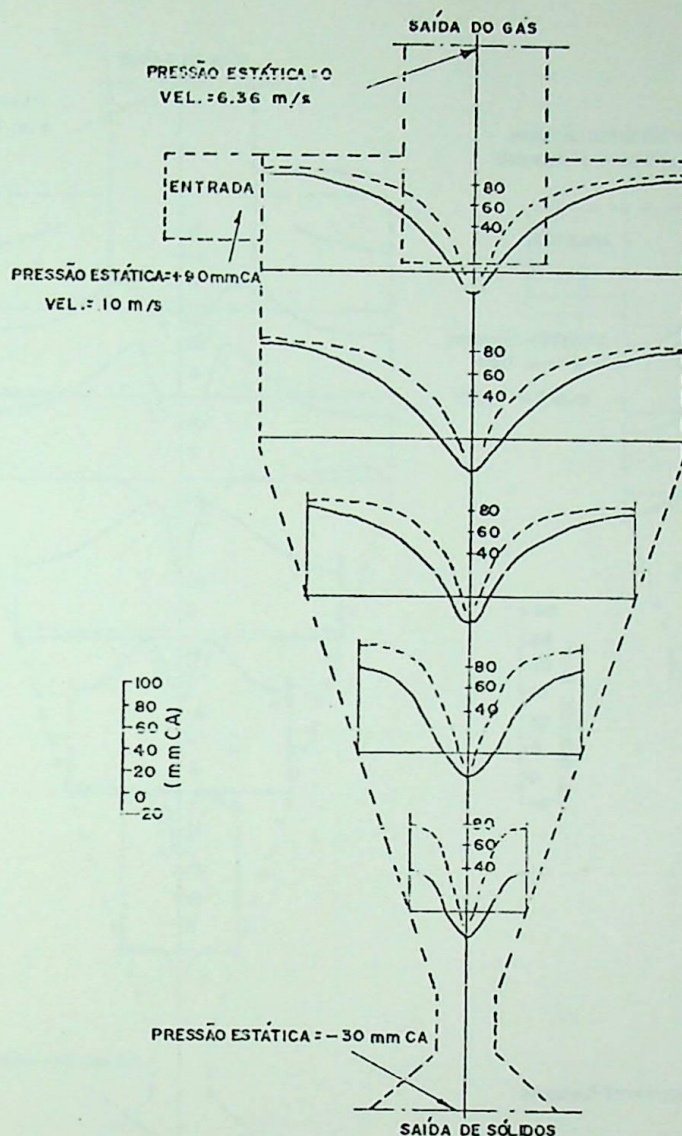


Figura 3.3 - Variação da pressão estática [—] e da pressão total [---] em diferentes pontos do ciclone. (Da Ref. [22]).

A partir da variação das alturas dinâmicas, visto na Figura 3.3, foram calculadas as velocidades tangenciais, radiais e axial, cujo comportamento pode ser visto nas Figuras (3.4a) e (3.4b).

No diagrama de pressões é visto que a exceção de um núcleo de baixa pressão junto ao eixo imaginário do ciclone, em todas as demais regiões do ciclone as pressões possuem valores elevados. Este núcleo de baixa pressão provocado pelo vórtice, se estende desde o interior do depósito de partículas até a região interior do tubo de saída do gás limpo. A envoltória da superfície desse núcleo é irregular e apresenta movimento devido às ondas de deslocamento do fluido. Com pequenas vazões

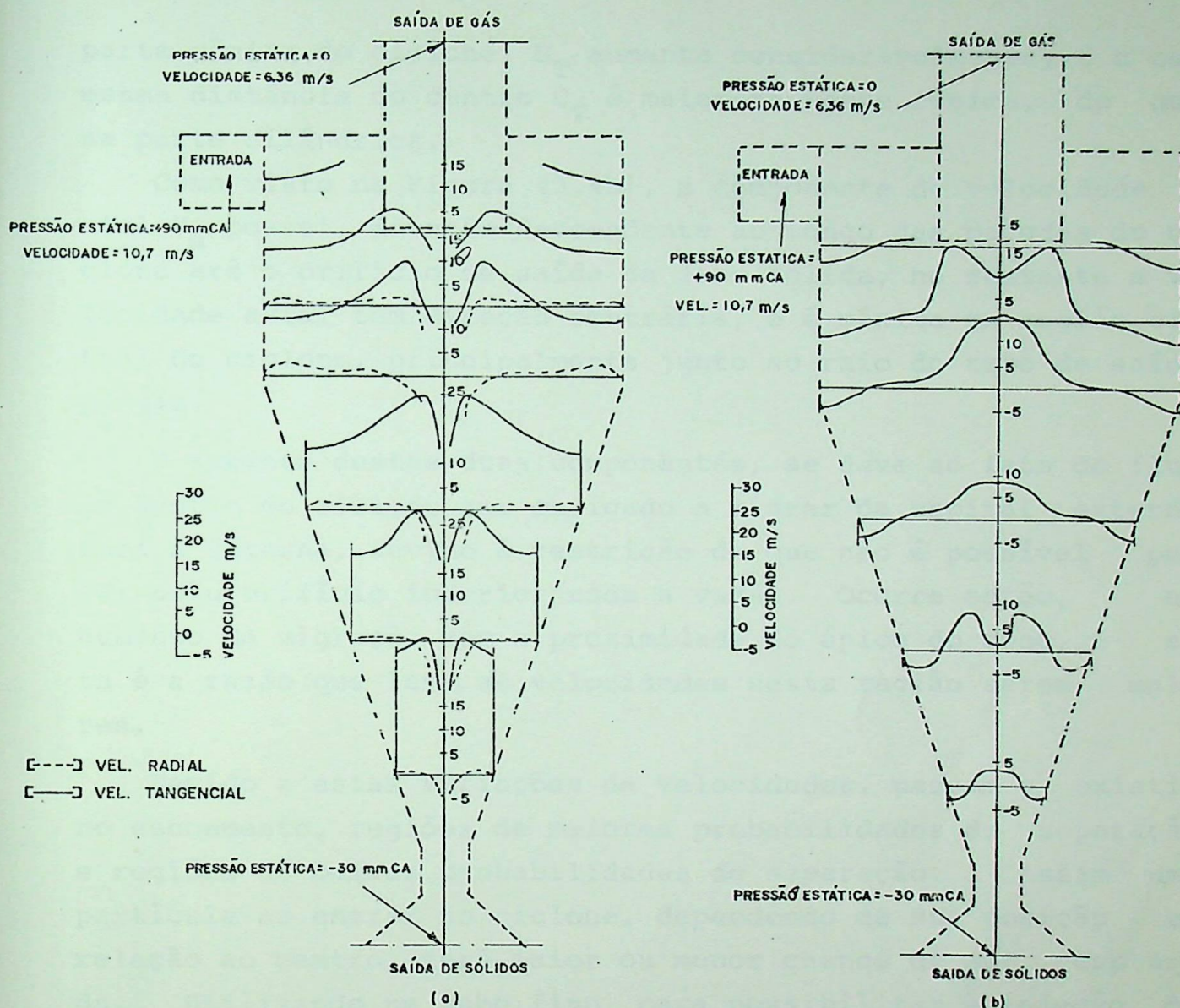


Figura 3.4 - Variação das velocidades em diferentes pontos de um ciclone. (a) Variação da velocidade tangencial e radial. (b) Variação da velocidade axial. (Da Ref. [22]).

ocorre o colapso da coluna, e havendo um aumento da vazão, o diâmetro do núcleo tende a crescer, até alcançar um valor que não se altera mais. Este diâmetro da coluna de ar é uma indicação de estabilidade no escoamento [21]. Isso implica em dizer que, qualquer ciclone possui uma vazão mínima que permite a estabilidade. Segundo Ter Linden [22], essa coluna no núcleo do ciclone pode ser considerada aproximadamente cilíndrica, com diâmetro de cerca de $(0,4 \cdot D_e)$.

Na direção do centro da circunferência a componente U_T aumenta, e alcança o seu valor máximo em um raio $r_0 \approx 0,65 R_1$, onde $R_1 = D_e/2$, após o que torna a decrescer (Figura 3.4a). Na

parte cônica do ciclone, U_T aumenta consideravelmente, e a uma mesma distância do centro U_T é maior na parte cônica, do que na parte cilíndrica.

Como visto na Figura (3.4b), a componente de velocidade axial U_a possui, direção descendente ao longo das paredes do ciclone até o orifício de saída da fase sólida, no restante a velocidade axial tem direção contrária, e é máxima na região central do ciclone, principalmente junto ao raio do tubo de saída do gás.

O aumento destas duas componentes, se deve ao fato do fluido dentro do ciclone ser obrigado a migrar da espiral externa para a interna, devido à restrição de que não é possível passar pelo orifício inferior toda a vazão. Ocorre então, um aumento da migração com a proximidade do ápice do cone, e esta é a razão que leva as velocidades nesta região serem maiores.

Devido a estas variações de velocidades, passam a existir no escoamento, regiões de maiores probabilidades de separação e regiões de baixas probabilidades de separação. Assim uma partícula ao entrar no ciclone, dependendo de sua posição em relação ao centro, terá maior ou menor chance de ser capturada. Utilizando um tubo fino, para possibilitar a injeção de partículas no interior do ciclone, em várias profundidades diferentes, Ter Linden [22] levantou várias curvas de zonas de eficiência dentro de um ciclone, cujos resultados publicados são vistos na Figura (3.5), apresentada a seguir.

Quanto à velocidade radial, sua distribuição foi confirmada também por Razgaitis e Guenther [13], os quais utilizaram para suas medições um tubo de pitot. A velocidade é praticamente constante na região situada entre o raio do tubo de saída do gás, e até bem próximo da parede. Na região central a velocidade radial sofre uma grande redução.

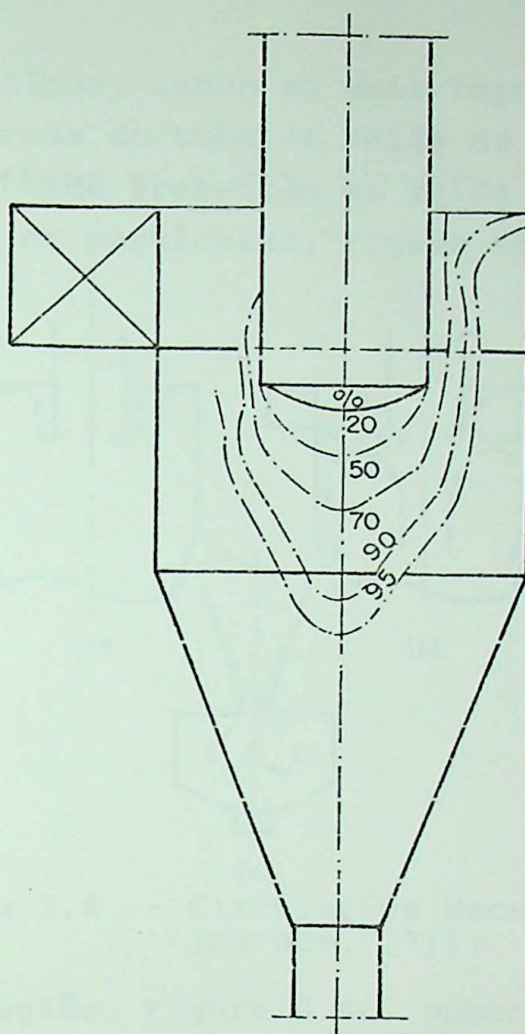


Figura 3.5 - Regiões de alta e baixa eficiências de separação. (Da Ref. [22]).

3.2.3.3 - Correntes secundárias no interior do ciclone: A formação de correntes secundárias no escoamento dentro do ciclone, tem um aspecto importante na eficiência de separação. A descrição destas correntes por diferentes autores são às vezes conflitantes, talvez por causa de fluxos diferentes causados por pequenas variações de projeto. Dorman[7] diz que, geralmente no topo do ciclone existe uma circulação adjacente à parede da tampa da câmara cilíndrica do ciclone, e a superfície exterior do duto de saída do gás, conforme indicado na Figura (3.6a). Estas correntes surgem devido ao rápido movimento adjacente à parede, e muito próximo a ela, o atrito reduz suficientemente a sua intensidade, diminuindo consequentemente a força centrífuga atuante nas partículas nesta região.

O fluxo secundário no escoamento, pode carregar partículas para a entrada do duto de saída, sem alcançar as altas forças de separação do vórtice. Várias outras correntes surgem

no interior do ciclone, sendo as mais importantes: circulação secundária na entrada do tubo de saída do gás, Figura (3.6b) ; circulação na região de transição da saída da fase sólida e o interior do coletor de partículas, Figura (3.6c).

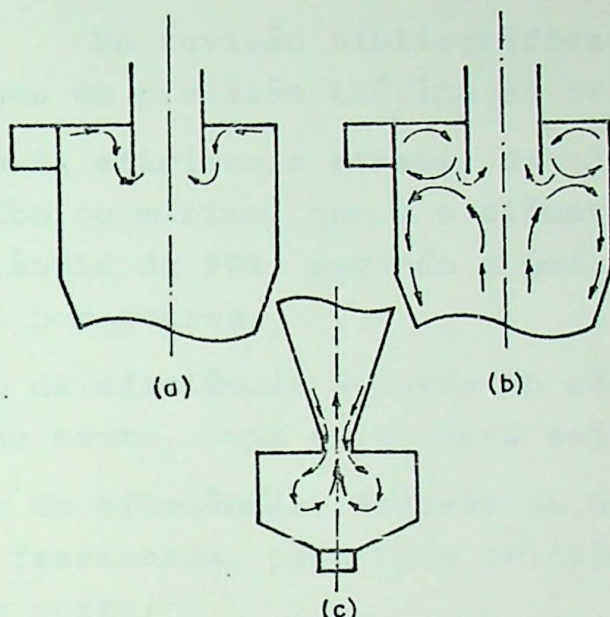


Figura 3.6 - Circulações Secundárias no Ciclone.
(Da Ref. [7]).

Na última região, Figura 3.6c, ocorre a re-entrada das partículas separadas novamente na corrente gasosa. Uma primeira causa seria uma alta velocidade de gás nesta região que não permitiria a deposição das partículas, e conseqüentemente a sua separação do gás. A segunda causa de re-entrada das partículas no escoamento, reside no fato de que existe uma coluna de baixa pressão no centro do ciclone, e que se prolonga até o interior do depósito. Caso este depósito não seja hermeticamente fechado, poderá haver um fluxo de ar do exterior para o interior do ciclone, arrastando partículas anteriormente separadas de volta ao escoamento da espiral interna. Esta espiral caminha até o tubo de saída do gás, diminuindo assim a eficiência de separação, conforme adverte Horzela [19].

3.3 - Previsão Teórica da Eficiência do Ciclone

3.3.1 - Introdução

Existem várias equações empíricas, levantadas para predizer a eficiência do ciclone. Em sua grande maioria foram feitas uma série de hipóteses simplificadoras que não são

confirmadas experimentalmente. O uso de fatores de correção in tro du zem nestas equações razoável aproximação de seus re sul ta dos comparados a resultados obtidos experimentalmente.

Na revisão bibliográfica foram encontradas as seguintes linhas de previsão teórica da eficiência:

- Previsão da eficiência através do cálculo da partícula de diâmetro crítico ou mínimo, que é o diâmetro da partícula se pa ra da com eficiência de 90%, segundo a definição de alguns au to re s, e de 100% por outros;

- Previsão da eficiência através do cálculo da pa rt í cu la com diâmetro de corte, cuja eficiência seja de 50%;

- Previsão da eficiência, através da utilização de cu rv as de eficiência fracionada, para cada relação diâmetro da pa rt í cu la/diâmetro de corte;

- Previsão da eficiência pelo cálculo da eficiência fr ac io n a d a para cada diâmetro de partícula presente no escoamento.

Todos estes métodos relacionam a eficiência do ciclone, em função dos parâmetros geométricos construtivos e das condições de operação do ciclone. A partir deles foram identificados cada parâmetro influente, e estes são analisados individualmente no item 3.6.

3.3.2 - Previsão da partícula de diâmetro crítico

Para se calcular a menor dimensão de pa rt í cu la que pode ser separada com alta eficiência pelo ciclone, é ne ce ss á ri o primeiramente a elaboração de um modelo teórico do pr oc e ss o.

A primeira teoria desenvolvida voltou-se para o estudo do lançamento das partículas de pó em direção às pa re de s do ciclone, pela ação da força centrífuga produzida pelo mo vi me nt o circulatório do gás. A eficiência de separação neste caso depende portanto: da magnitude da força centrífuga, da distância da partícula até a parede, e o tempo de a ç ã o da força. Neste modelo a componente radial da velocidade do gás é desprezada. Isto devido ao fato dela ser muito pequena pe rt o

da parede.

O movimento de uma partícula de pó, em relação ao gás que a transporta em um ciclone, é determinado pela relação entre a massa da partícula (m_p), e pela força de arraste resultante da diferença de velocidade entre a partícula e o gás. Pode-se considerar que a Lei de Stokes é obedecida, por conseguinte que o arraste é proporcional à diferença de velocidades. As propriedades aerodinâmicas das partículas são deste modo caracterizadas pelo tempo (τ) com que a partícula responde à mudança de velocidade do gás, definido como [7]:

$$\tau = \frac{\text{massa}}{\text{força de arraste em unidade de } \Delta V}$$

Assumindo que a partícula tenha forma esférica, sua massa será:

$$m_p = \frac{\pi \cdot d_p^3 \cdot \rho_p}{6} \quad (3.13)$$

e tomando a força de arraste igual à força de resistência do meio para regime laminar, vem:

$$\tau = \frac{\pi \cdot d_p^3 \cdot \rho_p}{6 \cdot 3 \cdot \pi d_p \cdot \mu}$$

assim:

$$\tau = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu} \quad (3.14)$$

3.3.2.1 - Cálculo teórico da partícula de diâmetro crítico: Para se chegar ao cálculo teórico do diâmetro crítico parte-se das seguintes suposições [3,4,7]:

- As partículas no escoamento gasoso possuem mesma velocidade de circunferencial do gás. A força radial resultante do movimento circular, impele a partícula para a parede com uma velocidade radial constante;

- Existe um equilíbrio entre a força centrífuga e a força

de arraste resultante do movimento radial da partícula;

- Na entrada do ciclone $U_R = 0$, porém à medida do avanço do escoamento para o interior do ciclone, U_R é incrementada, e ao cabo de alguns centésimos de segundos chega a ser suficiente para que ocorra o equilíbrio de forças, logo:

$$F_C = F_R$$

- O movimento posterior da partícula na direção da parede será por inércia com velocidade constante.

Assim tem-se a seguinte condição inicial dada por Dorman [7]:

$$\tau \cdot \frac{U_T^2}{R} = \frac{dR}{dt} \quad (3.15)$$

Admitindo ser a velocidade tangencial (U_T), constante e igual à velocidade média na entrada do ciclone (V_e), vem:

$$\tau \cdot V_e^2 \cdot dt = R \cdot dR \quad (3.16)$$

Integrando para um tempo inicial, $t = 0$ até um tempo final:

$$\int \tau \cdot V_e^2 \cdot dt = \int_{t=0}^t R \cdot dR$$

Assim,

$$2 \cdot \tau \cdot V_e^2 \cdot t = R_t^2 - R_{t=0}^2 \quad (3.17)$$

A limitação da trajetória da partícula será inicialmente, da posição mais próxima do centro até a parede, levando-se em conta que a partícula deverá alcançar a parede exatamente no tempo de passagem do gás pela espiral externa. Deste modo fixa-se $R_t = D_c/2$ (distância do eixo à parede), e $R_{t=0} = D_c/2 - b$ (distância da parede ao lado interno da entrada).

O tempo gasto para a passagem do gás no ciclone, será o caminho percorrido pela espiral, a qual dá um certo N_v no ciclone, e cujo diâmetro da espiral será considerado como o raio médio entre D_c e D_e . Como $R_1 = D_e / 2$, $R_2 = D_c / 2$, e

$$R_m = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (3.18)$$

então:

$$t = \frac{2\pi R_m \cdot N_V}{V} \quad (3.19)$$

Substituindo na Equação (3.17), R_t , $R_{t=0}$ (Eq.3.14) e t (Eq.3.19), vem:

$$2 \cdot \frac{\rho_p \cdot dp^2}{18 \cdot \mu} \cdot v_e^2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R_m \cdot N_V}{v_e} = \left(\frac{D_C}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_C}{2} - b\right)^2$$

Logo:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot R_m \cdot N_V \cdot \rho_p \cdot dp^2 \cdot v_e}{9 \cdot \mu} = b \cdot (D_C - b)$$

A partícula de diâmetro crítico por este método será:

$$dp_{crit} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot b \cdot (D_C - b)}{2 \cdot \pi \cdot R_m \cdot N_V \cdot \rho_p \cdot v_e}} \quad (3.20)$$

Gordón e Peisajóv [4] partiram do equilíbrio entre a força centrífuga e a força de resistência do meio, no qual substituindo os valores da F_R (Eq.3.1), e admitindo que na F_C (Eq. 3.7), $U_T = v_e$, obtiveram:

$$3 \cdot \pi \cdot dp \cdot \mu \cdot U_R = \frac{m_p \cdot v_e^2}{R_m}$$

logo:

$$3 \cdot \pi \cdot dp \cdot U_R = \frac{\pi \cdot dp^3 \cdot \rho_p \cdot v_e^2}{6 \cdot R}$$

Assim a velocidade radial da partícula será:

$$U_R = \frac{dp^2 \cdot \rho_p \cdot v_e^2}{18 \cdot \mu \cdot R_m} \quad (3.21)$$

Considerando o tempo que uma partícula levaria para percorrer a distância $(R_2 - R_1)$, até a parede, onde esse tempo é dado por:

$$t = \frac{R_2 - R_1}{U_R} \quad (3.22)$$

e substituindo as Equações (3.19) e (3.21), na Equação (3.22),

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot R_m \cdot N_V}{V_e} = \frac{(R_2 - R_1)}{\left(\frac{d_p^2 \cdot \rho_p \cdot V_e^2}{18 \cdot \mu \cdot R_m} \right)}$$

Chegaram à seguinte equação para o cálculo da partícula de diâmetro crítico:

$$d_{p_{crit}} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot (R_2 - R_1)}{\pi \cdot \rho_p \cdot N_V \cdot V_e}} \quad (3.23)$$

3.3.2.2 - Equações corrigidas para o cálculo da partícula de diâmetro crítico: Outras equações foram levantadas para o cálculo da partícula de diâmetro crítico. Cada autor, levando em conta resultados experimentais, ou novas suposições para o processo ideal, apresentaram correções para as equações (3.20) e (3.23) deduzidas a partir de suposições ideais.

Rosin, Rammler e Intelman [1,23] basearam-se nas seguintes suposições para o processo ideal:

- a Lei de Stokes é aplicada para as partículas na corrente de gás;
- as partículas tem forma esférica;
- as partículas são distribuídas uniformemente na seção transversal de entrada;
- as partículas na corrente gasosa não tocam umas com as outras;
- as partículas que alcançam as paredes do ciclone uma vez, não voltam para a corrente.

Deste modo chegaram à seguinte equação:

$$d_{p_{crit}} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu}{\pi \cdot \rho_p \cdot V_e \cdot N_V} \cdot b \cdot \left(1 - \frac{b}{D_C} \right)} \quad (3.24)$$

Davies [23] considera também como fator determinante na separação de partículas do escoamento gasoso, o fato das partículas terem de alcançar a periferia da corrente espiralada na parede do ciclone. Davies se preocupa com as diferenças de

densidade entre o gás e a partícula, e também com a altura do ciclone. Sua equação é:

$$d_{p_{crit}} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\mu \cdot D_c^2}{2 \cdot H \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot v_e} \left[1 - \left(\frac{D_e}{D_c} \right)^4 \right]} \quad (3.25)$$

Dalla Valle [23], por outro lado, supõe que a separação das partículas ocorre na parte cônica do ciclone, onde existe uma migração maior do gás, da espiral externa, para a espiral interna. A velocidade tangencial é maior nesta região devido à diminuição do diâmetro do tronco de cone. A relação que ele sugere para o cálculo do $d_{p_{crit}}$ da partícula, é a seguinte:

$$d_{p_{crit}} = 3 \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot D_e}{2 \cdot \pi \cdot N_i \cdot v_e \cdot \rho_p \cdot \left(\frac{4 \cdot r_{es}}{D_e} \right)^m}} \quad (3.26)$$

O número de voltas da espiral interna não pode ser determinado claramente com base nas dimensões do ciclone, que é influenciado principalmente pela altura H . De acordo com a informação do autor, N_i está dentro do limite de 0,5 a 3,0 e o expoente m pode variar de 0,5 a 0,7. r_{es} determina o diâmetro da espiral em que a velocidade do gás é igual à velocidade de entrada v_e .

Ter Linden [7, 17, 23] com base em extensas investigações experimentais, sugeriu que o diâmetro crítico da partícula é uma função da velocidade tangencial U_T , e do diâmetro do duto de saída. Embora a forma geral da curva de eficiência fracionada depende igualmente de outras dimensões, tal como, H , S , D_c , incluindo o ângulo do cone, e o ângulo da voluta de entrada a curva permanece praticamente inalterada, quando as dimensões relativas são mantidas constante. O tamanho crítico da partícula é dado por:

$$d_{p_{crit}} = 3 \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \frac{D_e \cdot g \cdot \mu \cdot U_R}{U_T^2 (\rho_p - \rho_f)}} \quad (3.27)$$

Esta equação admite que a velocidade tangencial máxima é alcançada em 2/3 do raio do tubo de saída do gás, Fig.(3.7), e que a eficiência é uma função também da velocidade radial.

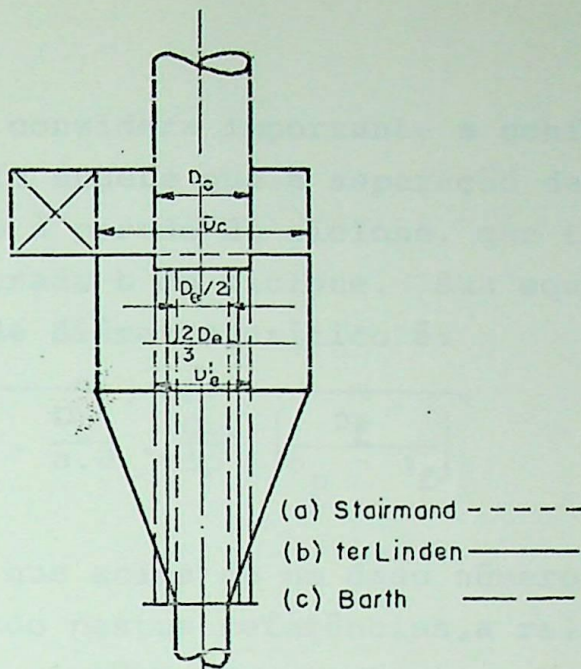


Figura 3.7 - Núcleo central admitido por vários autores. (Da Ref. [17]).

Ter Linden [22], conforme já citado no item (3.1.3.2), a partir de seus resultados experimentais criou a hipótese de separação de partículas através da definição de uma "zona perigosa". Conforme apresentado na Fig.(3.5), foi estabelecido que a eficiência de separação das partículas, é uma função da região na qual elas caíram na entrada, se de baixa ou de alta separação. A sua equação foi baseada na suposição de que a força centrífuga atuante na partícula deve vencer a resistência do meio, criando condições propícias para evitar a "zona perigosa".

As zonas de velocidades radial e tangencial na extremidade da "zona perigosa", selecionada para uma eficiência de separação de 20%, podem ser calculadas de acordo com as equações dadas pela Ref.[1]:

- A velocidade radial será:

$$U_R = \frac{A_E \cdot V_e}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot H_i} \quad (3.28)$$

- A velocidade tangencial:

$$U_T = V_e \cdot \sqrt{\frac{D_c}{2 \cdot R}} \quad (3.29)$$

Rietema [17,23] considera importante a configuração do escoamento gasoso. Ele sugere que a separação das partículas ocorre na camada junto à parede do ciclone, que tem como espessura, a largura de entrada b do ciclone. Sua equação para o cálculo da partícula de diâmetro crítico é:

$$d_{p_{crit}} = \sqrt{9 \cdot \frac{U_a}{V_e} \cdot \frac{D_c}{a \cdot H} \cdot \frac{Q \cdot \mu}{\Delta p} \left(\frac{\rho_f}{\rho_p - \rho_f} \right)} \quad (3.30)$$

Ele estabeleceu que acima de um dado número de Reynolds, que não foi especificado nestas referências, a relação U_a/V_e pode ser considerada aproximadamente constante. Então para um ciclone com as dimensões D_c , a , e H , conhecidas, o diâmetro crítico torna-se uma função da vazão de gás e da queda de pressão.

Feifel [23], investigou o cálculo do diâmetro crítico da partícula, utilizando uma simplificação bi-dimensional da interpretação do escoamento no interior do ciclone. No seu desenvolvimento admitiu-se que existe um cilindro de raio R , onde ocorre o equilíbrio entre a força centrífuga e o vetor radial, que é, a resistência do meio atuante sobre a partícula. Neste caso se uma partícula de dado tamanho $d_{p_{crit}}$ entrar na região deste suposto cilindro, ela não deverá ser eliminada do escoamento gasoso. Ele propôs uma equação para a velocidade da partícula, apresentada a seguir:

$$C = \frac{g}{a_c} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{r_{ex}}{r_{in}} \right) \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta p}{1000}} \cdot \frac{r_{in}}{R} \quad (3.31)$$

Stokes por sua vez definiu esta velocidade como:

$$C = \frac{1}{18} \cdot d_p^2 \cdot \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot g}{\mu} \quad (3.32)$$

A aceleração centrífuga na Eq. (3.31) é dada por:

$$a_c = 2 \cdot g \cdot h \cdot \left(\frac{r_{in}}{R} \right)^2 \cdot \frac{1}{R} \quad (3.33)$$

Partindo da condição dada pela Eq. (31), ele propôs:

$$d_{p_{crit}} = \left[\frac{1}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{r_{ex}}{r_{in}} \right) \frac{R_1}{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta p}{100}} \frac{18 \cdot \mu}{(\rho_p - \rho_f)} \cdot \frac{R_1}{r_i} \right]^{1/2} \quad (3.34)$$

onde : $r_{ex} = D_c$ e $r_{in} = (D_c - 2b)$

Pela introdução do parâmetro Q , dentro da Eq. (3.34) devido ao fato de não ser conhecida previamente a Δp . Como:

$$Q = \pi \cdot R^2 \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta p} \cdot Y \quad (3.35)$$

e:

$$Y = \sqrt{1 - \left(\frac{r_i}{R_1} \right)^2} - \left(\frac{r_i}{R_1} \right)^2 \cdot \ln \left[\frac{R_1}{r_i} + \sqrt{\left(\frac{R_1}{r_i} \right)^2 - 1} \right] \quad (3.36)$$

Re-arranjando a Eq. (3.34) vem:

$$d_{p_{crit}} = \sqrt{\frac{9}{4} \cdot \frac{\mu}{(\rho_p - \rho_f)} \cdot Y \cdot \frac{De^3}{a \cdot b} \cdot \frac{R_1}{r_i} \cdot \ln \left(\frac{r_{ex}}{r_{in}} \right)} \quad (3.37)$$

O valor de R_1/r_i nas Equações (3.34) e (3.37), foi baseado dentro dos limites experimentais levantados por Storch, variando entre 1,2 e 1,5, conforme citado por Svanda [23].

3.3.3 - Previsão da eficiência pelo diâmetro de corte das partículas

Uma outra forma de medir a eficiência de separação de um ciclone, é através do diâmetro de corte das partículas, cuja eficiência de separação para o dado diâmetro seja de 50%. Muitos pesquisadores tem se dedicado ao estudo deste método, e alguns modelos levantados são apresentados a seguir.

Rushton e Bradley [24] realizando uma série de setenta testes, onde mediram o desempenho de um ciclone em várias vazões, concentração de sólidos, e umidade, chegaram à seguinte Equação para o cálculo do diâmetro de corte da partícula:

$$d_{p_c} = \sqrt{\frac{K \cdot \mu \cdot g \cdot b}{V_e \cdot N_v \cdot (\rho_p - \rho_f)}} \quad (3.38)$$

onde k é uma constante de valor não revelado pelos autores.

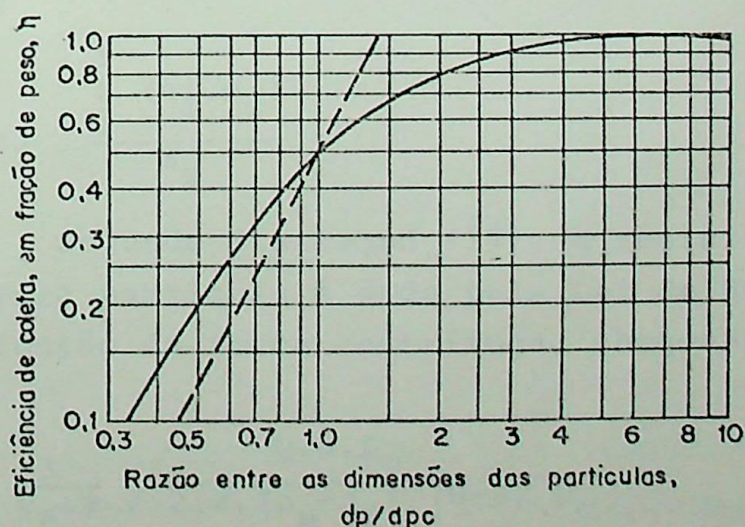
Tawari e Zens [25], afirmam que em baixo carregamento na entrada (2,5 gramas/m³ ou menos) as partículas podem se comportar independentemente umas das outras. Neste caso, a eficiência de separação pode ser correlacionada pelo diâmetro de corte d_{pc} , dado segundo a equação de Rosin et alii [1, 26]:

$$d_{p_c} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N_v \cdot V_e \cdot (\rho_p - \rho_f)}} \quad (3.39)$$

A equação é aplicável para ciclones com as seguintes proporções geométricas:

$a/D_c = 0,5$; $b/D_c = 0,25$; $S/D_c = 0,625$; $h/D_c = 2,0$; $H/D_c = 4,0$ e $B/D_c = 0,25$. Rosin et alii [1], a partir de resultados empíricos conseguidos pela Eq. (3.39), e após a realização de vários ensaios, levantaram um gráfico que em essência é uma forma generalizada do gráfico da eficiência relativa encontrada frequentemente na literatura comercial.

Na ausência de circulação secundária no ciclone, a curva de eficiência de separação e o número de voltas da espiral N_v , devem ser únicos para um ciclone com determinadas proporções geométricas. Na Figura 3.8 são apresentadas as curvas por eles levantadas.



[---] Teórico (Rosin, Rammler e Intelmann) [—] Experimental

Figura 3.8 - Curvas de eficiência de separação teórico e experimental em função da relação d_p/d_{pc} . (Da Ref. [1]).

Para o ciclone ensaiado, o fator $N_v \approx 5$. Alguns autores dizem que este valor pode chegar à 10, e também pode diminuir para 2 voltas caso se tenha uma guia interna, velocidade de entrada em torno de 15 m/s, e o gás à pressão atmosférica.

A Figura 3.8 dá a eficiência de separação que se pode esperar para uma certa dimensão da partícula. Como qualquer particulado é constituído praticamente por partículas distribuídas segundo faixas granulométricas, a eficiência global será um somatório da eficiência de separação para cada tamanho de partícula, segundo a percentagem de cada faixa no total.

Com base nestes estudos, o American Petroleum Institute publicou um gráfico [25], onde tendo-se a distribuição granulométrica das partículas e conhecendo o diâmetro de corte das partículas, se consegue a eficiência fracionada para cada faixa. Fazendo a multiplicação da fração mássica de cada uma delas pela eficiência encontrada, o somatório destes valores será a eficiência total aproximada para o ciclone. Porém não foi apresentada qualquer referência às proporções geométricas dos ciclones ensaiados pelo API, dos quais se levantou a curva apresentada na Figura 3.9.

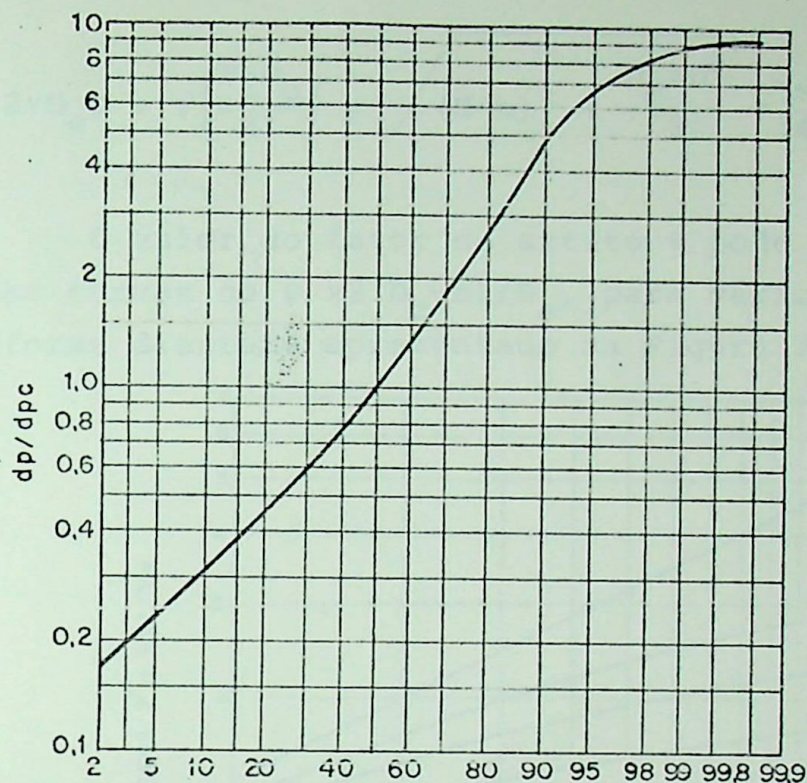
Deste modo, a eficiência total será calculada pela expressão:

$$\eta_T = 100 \cdot \frac{\sum_1^i (\eta_i \cdot m_i)}{m_t} \quad (3.40)$$

Segundo Stairmand [17], a resistência do fluido encontrada pela partícula é dada pela Lei de Stokes, e equilibrando-a em função da força centrífuga, chegou-se à seguinte equação:

$$dp_c = \frac{3}{V_e \cdot \psi} \sqrt{\frac{Q \cdot \mu \cdot D_c}{2 \cdot \pi \cdot (\rho_p - \rho_f) (H-S) D_c}} \quad (3.41)$$

O fator de atrito nas paredes ψ é tomado como sendo a relação da velocidade angular V_e no raio de entrada r_E , definido por:



η_i - Eficiência de separação para determinado tamanho de partícula (%)

Figura 3.9 - Gráfico para determinação da eficiência fracionada. (Da Ref. [25]).

$$r_E = R_2 - \frac{b}{2} \quad (3.42)$$

e a velocidade linear no duto de entrada V_e . Assim:

$$\psi = \frac{V_e'}{V_e} \quad (3.43)$$

Sendo definido também como:

$$\psi = \frac{-\sqrt{\frac{D_e}{2(D_c - b)}} + \sqrt{\left\{\frac{D_e}{2(D_c - b)} + \frac{4 GA}{ab}\right\}}}{\frac{2 GA}{ab}} \quad (3.44)$$

onde:

$G = 0,005$ para ciclones - constante adimensional de perdas por atrito de Stanton e Pannell.

A superfície das paredes internas do ciclone (A) exposta aos gases, será a soma das seguintes áreas: da parte cilíndrica, da área do cone, da superfície interna e externa do tubo de saída do gás. Usando as fórmulas de cálculo matemático [27], encontra-se:

$$A = \pi D_c h + 2\pi D_e S + \pi \left(\frac{B+D_c}{2} \right) \cdot \sqrt{(H-h)^2 + \frac{D_c + B^2}{2}} + \frac{\pi}{4} (D_c^2 - D_e^2) \quad (3.45)$$

O valor do fator de atrito ψ pode ser obtido diretamente das curvas de $\psi \times 2(D_c - b)/D_e$, para vários valores de GA/ab , conforme diagrama apresentado na Figura 3.10.

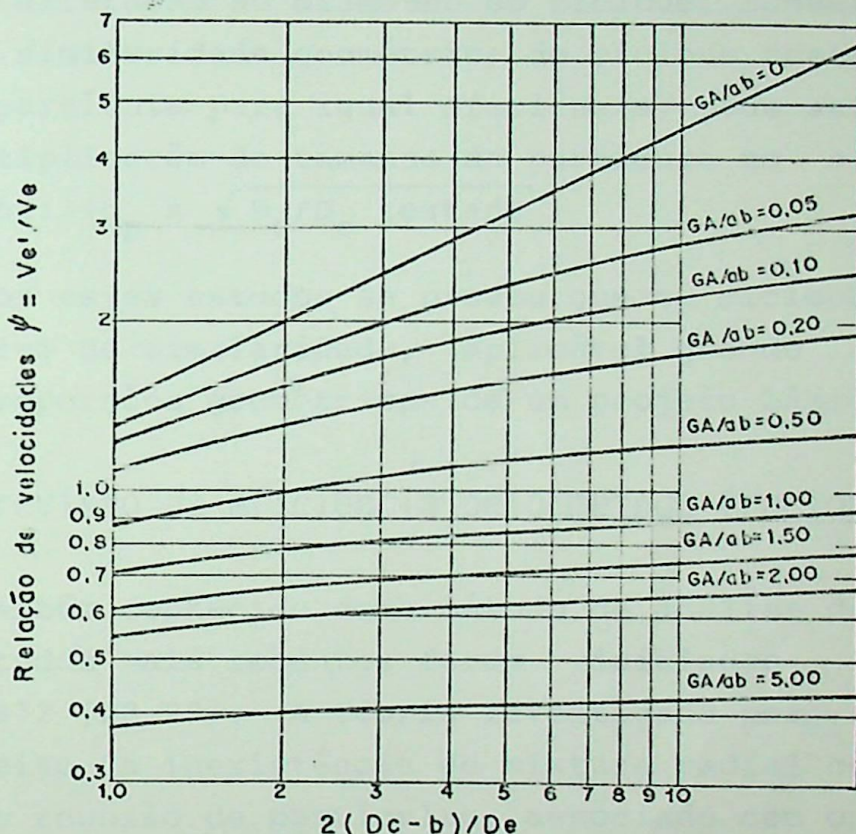


Figura 3.10 - Curvas para o fator de atrito ψ versus o raio de entrada para diferentes ciclones. (Da Ref. [17]).

Stairmand [17], ensaiou ciclones de alta e média eficiência, com diâmetros de 200 mm, à temperatura de 20°C, e operando com uma velocidade de entrada de 15 m/s. Utilizando partículas com massa específica de 2000 Kg/m³, ele levantou curvas de eficiência fracionada para as várias faixas de tamanho das partículas. A partir destes ensaios, foi verificado que uma vez levantada uma curva para um dado ciclone, pode esta curva ser transposta se alteradas algumas condições operativas pelas seguintes relações:

- alterando a massa específica para ρ_p , então o novo diâmetro da partícula será: $(d_p \times \sqrt{\rho_{p \text{ teste}}/\rho_p})$;

- se a vazão de entrada for alterada para Q , o novo diâmetro será: $(d_p \times \sqrt{Q_{\text{teste}}/Q})$;
- ocorrendo um aumento da temperatura do gás, e consequentemente um aumento da viscosidade do gás, o novo diâmetro será: $(d_p \times \sqrt{\mu/\mu_{\text{teste}}})$;
- se houver uma alteração do diâmetro do ciclone, conservando-se porém a similaridade geométrica do ciclone testado, o tamanho da partícula para igual eficiência, pode ser obtido pela multiplicação do tamanho da partícula no ciclone original por: $(d_p \times \sqrt{D_c/D_c \text{ testado}})$

Por estes estudos se provou que em ciclones, existe também uma lei de similaridade, aplicável quando se mantêm as mesmas proporções geométricas de um projeto básico.

3.3.4 - Previsão da eficiência pelo método fracional

Também conhecido como método de análise de parâmetros, cujos estudos mais recentes foram iniciados por Leith e Licht em 1972 [28-29]. A teoria investigada por eles se baseava no conceito da inexistência de mistura radial contínua, ou seja, a não reunião de partículas, associado com o cálculo de um tempo médio de permanência para o gás no ciclone tendo uma entrada tangencial. Porém, o modelo de Leith e Licht não se aplica em velocidades de entrada muito altas, ou alto fluxo volumétrico, pois à velocidade infinita ele prevê eficiência de 100%, o que na verdade não ocorre, pois o aumento da velocidade acima de certo limite tem como consequência a re-entrada do coletado novamente na corrente gasosa.

Zenz, investigou o transporte de partículas em tubos horizontais, e estabeleceu um modelo experimental para a "saltação" das partículas em termos do número de Reynolds e do coeficiente de arraste [29]. Kalen e Zenz, estabeleceram um modelo que prevê um valor ótimo para a velocidade de entrada e a velocidade na qual as partículas re-entram no escoamento.

Partindo da análise do modelo teórico da efi

ciência de separação de Leith e Licht [30], esperava-se que o rendimento de separação aumentasse com uma velocidade radial crescente, para um tempo fixo de permanência do particulado dentro do ciclone. Este tempo de permanência é uma função da velocidade de entrada do gás no ciclone e de sua geometria construtiva. Se por outro lado, para a condição de velocidade radial constante, porém com um valor do tempo de permanência decrescente, foi postulada então que a eficiência de separação seria dada por:

$$\eta_T = f \left(\frac{\tau \cdot K_i \cdot V_e}{R_2} \right) \quad (3.46)$$

Esta Equação (3.46) foi reformulada para considerar o efeito da re-distribuição contínua do particulado não separado, devido à turbulência na parede. Assim:

$$\eta_T = 1 - \exp \left[-f \left(\frac{\tau \cdot K_i \cdot V_e}{R_2} \right) \right] \quad (3.47)$$

Combinando esta proposta com a correlação de velocidade mínima de transporte horizontal (saltation velocity) de Kalen e Zenz, Koch e Licht [29] propuseram o seguinte método para o cálculo da eficiência de separação para cada tamanho de partícula que entra no ciclone.

$$\eta_i = 1 - \exp \left[-2 \left(\frac{G_c \cdot \tau_i \cdot Q(n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0,5}{n+1}} \right] \quad (3.48)$$

onde se definem:

$$\tau_i = \frac{\rho_p \cdot dp_i^2}{18 \cdot \mu}$$

(Eq. (3.14) utilizada para cada tamanho de partícula presente no escoamento).

$$G_c = \frac{8 \cdot K_c}{K_1^2 \cdot K_2^2} \quad (3.49)$$

$$K_1 = \frac{a}{D_c} \quad (3.50)$$

$$K_2 = \frac{b}{D_c} \quad (3.51)$$

$$K_C = \frac{[2 \cdot V_S + (Vn\ell \text{ ou } V_H)]}{2 \cdot D_C^3} \quad (3.52)$$

$$V_S = \frac{[\pi(S-a/2)(D_C^2 - D_e^2)]}{4} \quad (3.53)$$

Na Eq. (3.52) o termo ($Vn\ell$ ou V_H) se refere ao fato de que, dependendo do comprimento e do volume do ciclone no comprimento natural " ℓ ", se adota um ou outro. Para os cálculos, " ℓ " é definido como:

$$\ell = 2,3 \cdot D_e \cdot \left(\frac{D_C^2}{a \cdot b}\right)^{1/3} \quad (3.54)$$

Caso [$\ell < (H-s)$] deve-se calcular o volume no comprimento natural, excluindo-se o núcleo, que é dado por [31]:

$$Vn\ell = \frac{\pi \cdot D_C^2}{4} (h-s) + \frac{\pi \cdot D_C^2}{4} \frac{(\ell + S - h)}{3} \cdot \left[1 + \frac{d}{D_C} + \frac{d^2}{D_C^2}\right] - \frac{\pi \cdot D_e \cdot \ell}{4} \quad (3.55)$$

onde, o diâmetro do núcleo central no ponto de giro do vórtice é definido por:

$$d = D_C - (D_C - B) \left(\frac{S + \ell - h}{H-h}\right) \quad (3.56)$$

Caso [$\ell > (H-S)$], calcula-se o volume do ciclone abaixo do duto de saída do gás, em que V_H é definido por [31]:

$$V_H = \frac{\pi \cdot D_C^2}{4} \cdot (h-s) + \left(\frac{\pi \cdot D_C^2}{4}\right) \cdot \left(\frac{H-h}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{B}{D_C} + \frac{B^2}{D_C^2}\right) - \frac{\pi \cdot D_C^2}{4} \cdot (H-S) \quad (3.57)$$

O expoente do vórtice, n , na Eq. (3.48) pode ser calculado como:

$$n = 1 - \left[1 - \frac{(39,37 \cdot D_C)^{0,14}}{2,5}\right] \left[\frac{1,8T + 492}{530}\right]^{0,3} \quad (3.58)$$

Assim, a eficiência total por este método, é dada pelo somatório das eficiências fracionadas, de cada faixa ou diâmetro de partícula presente no escoamento. Deste modo:

$$\eta_T = \sum_i (m_i \cdot \eta_i) \quad (3.59)$$

onde, m_i representa uma massa introduzida no ciclone, composta de partículas de uma determinada faixa de tamanho.

3.4 - Previsão Teórica da Perda de Carga em Ciclones

3.4.1 - Introdução

Assim como, para a eficiência de separação, existe também um grande interesse na investigação teórica e experimental, da relação dos parâmetros geométricos de projeto de um ciclone com a sua perda de carga. A maioria das investigações teóricas utilizam modelos que tem falhas evidentes. Porém, principalmente as expressões que requerem a atribuição de valores experimentais em certa quantidade, tem como consequência que as diferenças são mínimas entre os valores alcançados teoricamente e experimentalmente.

Em princípio o conhecimento da queda de pressão ou perda de carga no ciclone, e os fatores que a afetam é requerido para que o consumo de energia possa ser previsto. A precisão da estimativa da perda de carga permite selecionar corretamente o compressor, soprador ou ventilador utilizado num sistema. A grande preocupação atual está em projetar ciclones altamente eficientes, mas que apresentem uma perda de carga mínima.

Shepherd e Lapple [7], em 1939 foram os primeiros a correlacionar as causas da perda de carga no ciclone. Assim vários outros autores vêm estudando o assunto, e em geral as origens das perdas de pressão num ciclone estão relacionadas a [17,32]:

- perdas por atrito no duto de entrada;
- perdas devido à expansão ou compressão na entrada;
- perdas devido ao atrito nas paredes internas do ciclone;
- perdas de energia cinética na trajetória da espiral do gás no interior do ciclone;

- perdas na entrada do duto de saída do gás;
- perdas na altura estática entre a entrada e o duto de saída do gás;
- recuperação de energia no duto de saída do gás.

3.4.2 - Modelos teóricos para o cálculo da perda de carga

Shepherd and Lapple [7,29], estudaram o efeito da variação da altura a e da largura b do duto de entrada tangencial, o diâmetro D_e , e a profundidade S , em um ciclone de diâmetro e altura total fixados. Variando a largura de entrada, e utilizando uma lâmina ajustável que se projetava até a parede do tubo de saída do gás, eles verificaram que a perda de carga (Δp), em um determinado tipo de ciclone era proporcional ao quadrado da vazão. Desta forma Δp pode ser expressa como uma função da pressão dinâmica na entrada ou a velocidade. Verificou-se que a perda de carga não era influenciada pela profundidade S , porém foi relacionada a outros parâmetros, como mostra a Eq. (3.60).

$$\Delta p = 0,0342 \cdot \rho_f \cdot V_e^2 \cdot N_H \quad (3.60)$$

onde:

$$N_H = 7,5 \cdot \frac{a \cdot b}{D_e^2} \quad (3.61)$$

Shepherd e Lapple, tornaram a repetir parte do seu trabalho sem a lâmina de entrada do ciclone, e, para as mesmas condições obtiveram a relação:

$$N_H = 16 \cdot \frac{a \cdot b}{D_e^2} = 4\pi \cdot \frac{A_E}{A_S} \quad (3.62)$$

Ter Linden [17] considera que a energia cinética perdida pelos gases no interior do ciclone é de certo modo grande, se comparada com outras causas de perda de carga. Assim, ele apresenta a perda de carga como uma função da velocidade de entrada, massa específica do fluido e da partícula, e de um fator adimensional de perda de pressão ζ , conforme a equação dada:

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{v_e^2 (\rho_f + \rho'_p)}{6g} \quad (3.63)$$

A massa específica corrigida das partículas (ρ'_p), será dada como uma função da quantidade de material sólido no escoamento, sendo esta massa admitida como sendo:

$$\rho'_p = Co' (\rho_p - \rho_f) \quad (3.64)$$

A concentração de partículas sólidas presentes no escoamento pode ser dada em termos de concentração volumétrica, conforme [33]. Esta concentração é definida como a relação do volume de sólidos sobre o volume total da mistura.

$$Co' = \frac{\frac{\dot{m}_{tp}}{\rho_p}}{\frac{\dot{m}_{tp}}{\rho_p} + \frac{\dot{m}_f}{\rho_f}} \quad (3.65)$$

Barth [7,17] apresentou um método elaborado de cálculo do fator de perda de pressão ζ , para as componentes de entrada e saída do ciclone, a saber:

- a) Perdas de pressão na entrada e perdas de pressão por atrito nas paredes internas do ciclone (identificadas pela índice o);
- b) Perdas de pressão no núcleo central e entrada do tubo de saída (identificadas pelo índice ts).

O fator de perda de pressão ζ é expresso como uma função da relação de velocidades (entrada/saída), da velocidade tangencial máxima, e de um coeficiente de perdas " ϵ ", que é definido como:

$$\epsilon = \frac{\zeta}{\left(\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi \cdot D_e^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{U_{Tm\acute{a}x}}{V_{ts}}\right)^2} \quad (3.66)$$

onde, V_{ts} é:

$$V_{ts} = \frac{4Q}{\pi \cdot D_e^2} \quad (3.67)$$

O coeficiente de perdas, consiste da soma das duas componentes ϵ_o e ϵ_{ts} que são os coeficientes de perda

na entrada e saída do ciclone respectivamente.

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_{ts} \quad (3.68)$$

O coeficiente de perda na entrada é:

$$\epsilon_0 = \frac{D_e}{D_c} \left\{ \frac{1}{\left| 1 - \frac{2 \cdot U_{Tm\acute{a}x} \cdot (H-S) \mu'}{V_{ts} \cdot D_e} \right|^2} - 1 \right\} \quad (3.69)$$

Sendo μ' = coeficiente de atrito entre o gás e a parede.
(frequentemente assumido. $\mu' = 0,02$)

Para a região de saída, o coeficiente de perda é:

$$\epsilon_{ts} = \frac{K}{\left(\frac{U_{Tm\acute{a}x}}{V_{ts}} \right)^{\frac{2}{3}}} + 1 \quad (3.70)$$

A relação de velocidades ($U_{Tm\acute{a}x}/V_{ts}$), foi expressa por Barth como uma função das dimensões do ciclone, do coeficiente de atrito do gás e parede (μ') e um fator de perdas devido à configuração de entrada α , dada por:

$$\frac{U_{Tm\acute{a}x}}{V_{ts}} = \frac{\pi \cdot D_e \cdot (D_c - b)}{2 \cdot a \cdot b \cdot \alpha + \pi (H-S) (D_c - b) \mu'} \quad (3.71)$$

O fator de perda na entrada (α) depende do tipo de entrada usada. Na Figura (3.11a) são apresentados três tipos de entrada encontrados. No primeiro caso (Fig. 3.11a.I), cuja entrada tem a forma de espiral envolvente $\alpha=1$. Para entrada direta com contração no lado interno (Fig. 3.11a.II), $\alpha < 1$. No caso de uma entrada com estrangulamento da seção da entrada (Fig. 3.11a.III) $\alpha > 1$. Sendo que o tipo III, não é recomendado na prática. O fator de perdas para o tipo II, pode ser obtido a partir da curva [$\alpha X^2 (1 - 2r_E/D_c)$], apresentada na Figura (3.11b).

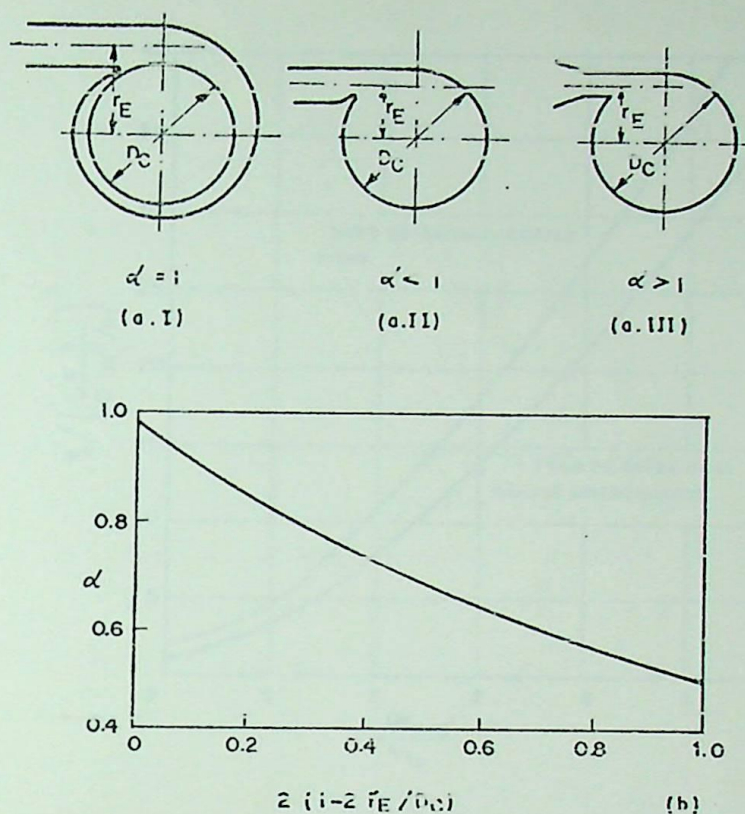


Figura 3.11 - Fator de perdas na entrada em função do tipo de entrada. a) Tipos de entradas para ciclones e os correspondentes valores de α . b) Valores do fator de perda α , para o modelo II, quando $\alpha < 1$. (Da Ref. [17]).

Weidner [17,34] a partir de uma série de ensaios experimentais, nos quais foram medidos $\zeta / \{ab/(\pi D_e^2/4)\}^2$ para vários valores da relação de velocidades ($U_{Tm\acute{a}x}/V_{ts}$), obteve as duas curvas apresentadas na Figura 3.12. A curva (a) apresenta os resultados para um ciclone onde a borda de entrada do tubo de saída do gás possuía cantos vivos, e a curva (b) para o caso da borda com cantos arredondados.

(Figura 3.12 a seguir)

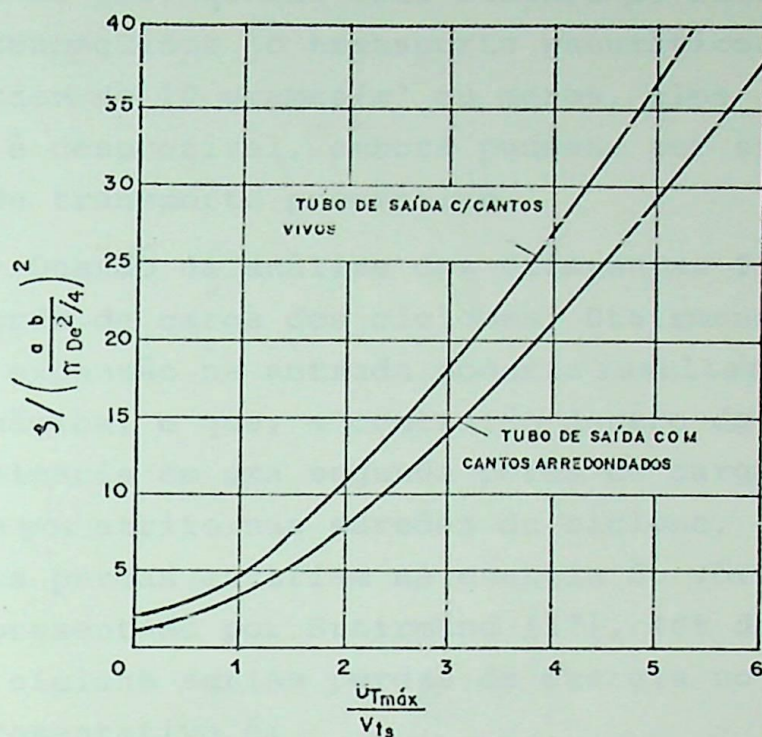


Figura 3.12 - Curvas experimentais de Weidner para o fator de perdas de pressão. (Da Ref. [17]).

O valor de K utilizado na Eq. (3.67), e o valor do fator de perda de pressão ζ , são apresentados na Tabela 3.1 dada à frente, correspondente aos resultados de Barth [17] para o cálculo da perda de carga.

TABELA 3.1 - VALORES DE K E ζ SEGUNDO BARTH [17]			
		Tubo de saída com:	
		cantos vivos	cantos arredondados
$\zeta \left(\frac{4ab}{\pi D_e^2} \right)^2$	K	4,40	3,41
	$\frac{U_{Tmáx}}{V_{ts}} > 1$	Curva a Fig. 3.12	Curva b Fig. 3.12
	$\frac{U_{Tmáx}}{V_{ts}} < 1$	2,0	1,1

Sproull, e posteriormente Muschelknautz e Brünner [34], investigaram que ζ depende também da concentra

ção de partículas no gás, quando esta alcança os altos valores de concentração conseguidos no transporte pneumático. Com cargas normais da ordem de 10 gramas/m³ ou menos, eles mostraram que a diminuição é desprezível, embora pudesse ser significativa nos sistemas de transporte pneumático.

Quando da análise dos diferentes fatores responsáveis pela perda de carga dos ciclones, Stairmand [34] propôs que a súbita expansão na entrada poderia resultar numa perda de pressão dinâmica, e que, a contração dentro do tubo de saída do gás resultaria em uma segunda perda de carga. Ocorreria também perdas por atrito nas paredes do ciclone, enquanto que o restante das perdas estariam na energia do vórtice. Segundo o modelo apresentado por Stairmand [17], 40% das perdas de pressão em um ciclone seriam perdas de energia no vórtice, cuja equação representativa é:

$$\Delta p = \frac{\rho_f + \rho'_f}{2g} \left[v_e^2 \left\{ 1 + 2\psi^2 \left\{ 2 \cdot \frac{(D_c - b)}{D_e} \right\} - 1 \right\} + 2v_{ts}^2 \right] \quad (3.72)$$

Casal e Martinez-Benet [32] utilizando dados experimentais publicados por Shepherd e Lapple, Stairmand, Caplan, Parker et alii, e uma análise estatística sobre os resultados obtidos para gases carregados de partículas em baixa concentração, verificaram que a pressão dinâmica de entrada está relacionada com as relações: a/D_c; b/D_c; D_c/D_e; e ab/D_e². Foi realizada uma linearização de diferentes expressões de uma ou mais variáveis independentes, com parâmetros para cada equação, determinados pelo método dos mínimos quadrados. Na análise, precisão e facilidade de uso foram as principais considerações feitas por eles. Sendo obtido o melhor resultado com o grupo adimensional ab/D_e², e com base nele propuseram a equação:

$$\Delta p = \rho_f \cdot \frac{v_e^2}{2g} \left[11,3 \left(\frac{a \cdot b}{D_e^2} \right)^2 + 3,33 \right] \quad (3.73)$$

Assim foram vistos os principais métodos de cálculo da perda de carga, e de antemão concluímos que pelas equações apresentadas, a Δp é uma função principalmente da: v_e

ρ_f , relação entre a área de entrada e a área de saída do gás.

3.5 - Estimativa do Diâmetro do Ciclone e da Velocidade Mínima de Arraste das Partículas

Um bom projeto de ciclone prevê e previne dois tipos de problemas: se a velocidade de entrada do ar for muito baixa os sólidos tenderão a se depositar na região de entrada do ciclone; ou, caso ela seja muito alta, os sólidos passarão através do ciclone sem serem depositados, diminuindo assim a eficiência de separação. Torna-se então necessário encontrar a velocidade de entrada ideal, que será definida em função do tipo de material a ser separado e também do diâmetro do ciclone. Como cada material tem sua velocidade mínima de arraste, procura-se estimar esta velocidade, e a partir dela encontrar V_e . Entretanto, é preciso estimar primeiramente o diâmetro do ciclone.

3.5.1 - Diâmetro do ciclone

Vários estudos foram realizados de forma a estimar o diâmetro do ciclone. Aqui, são vistas algumas equações que representam um esforço para se chegar ao diâmetro ótimo do ciclone, em função das suas condições de operação.

Rosin et alii [23] desenvolveram uma equação empírica, válida somente quando $b \approx D_c/5$, dada por:

$$D_c \approx 2,2 \cdot \frac{d_{p_{crit}}^2 \cdot \rho_p \cdot V_e \cdot N_v}{\mu} \quad (3.74)$$

Para utilizar esta equação o $d_{p_{crit}}$ e N_v geralmente são adotados.

Martinez-Benet e Casal [35] por sua vez estimam o diâmetro do ciclone como uma função dentre outras, do diâmetro de corte e de N_v , que são também adotados. Assim;

$$D_c = \left[\frac{d_{p_c}^2 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot \pi \cdot N_v \cdot Q}{9 \cdot K_1 \cdot K_2^2 \cdot \mu \cdot N_{CP}} \right]^{1/3} \quad (3.75)$$

Constantinescu [36] propôs que o diâmetro

do ciclone é uma função de uma Δp admitida, e de uma área de entrada definida ($a \cdot b$), onde $a/b \approx 2$. Assim:

$$D_c = \sqrt{\frac{\rho_f \cdot \bar{v}_e^2 \cdot a \cdot b}{\Delta P}} + 2b \quad (3.76)$$

Os valores de a e b são determinados de modo a manter a mesma velocidade do gás no tubo antecedente ao ciclone. Valdez et alii [37], reescreveram a Eq. (3.76), de forma a se introduzir nela fatores adimensionais, assim:

$$D_c = \left[\left(\frac{1,085}{K_3^4} + \frac{0,32}{(K_1 \cdot K_2)^2} \right) \cdot 5,2 \frac{\rho_f \cdot Q^2}{\Delta P \cdot g} \right]^{1/4} \quad (3.77)$$

onde: $K_3 = D_e/D_c$ (3.78)

Assim é importante ressaltar que no caso do ciclone ser destinado ao trabalho como proauecedor de farinha (mistura moída de calcáreo, argila, areia e corretivos) o seu diâmetro pode ser estimado pela seguinte equação, que segundo Duda [10] foi desenvolvida na URSS:

$$D_c = 0,536 \sqrt[4]{V_{tt}^2 \cdot \rho_f' \cdot \frac{\epsilon}{\Delta P}} \quad (3.79)$$

$$V_{tt} = 2 \cdot K_{preaq} \cdot \frac{\dot{m}_{clinker}}{\rho_{ftt}} \quad (3.80)$$

$$\rho_f' = \rho_{ftt} + C_{massa} \quad (3.81)$$

onde: K_{preaq} varia de 1,2 a 1,5 Nm³ de ar/kg clínquer

$$C_{massa} = \frac{\dot{m}_{farinha}}{V_{tt}} \quad (3.82)$$

Neste caso específico o diâmetro construtivo final será função também de fatores inerentes à transferência de calor do gás para a farinha.

3.5.2 - Velocidade mínima de arraste

Para a determinação da velocidade de entrada leva-se em conta a velocidade mínima de arraste ou "Saltation

velocity". Esta é definida como, a velocidade mínima necessária para prevenir o assentamento das partículas carregadas pelo gás. Se adota este conceito no transporte pneumático de pequenas quantidades de sólidos em tubo horizontal, e também no canal de entrada do ciclone [38].

Kalen e Zenz [37, 39] desenvolveram um número de correlação para a velocidade mínima de arraste (V_S), e determinaram experimentalmente que a máxima eficiência ocorre quando $V_e/V_S = 1,25$. Verificaram em valores maiores da relação uma queda na eficiência, devido a re-entrada de partículas no escoamento. Assim o limite superior para prevenir esta re-entrada foi estabelecido em $V_e/V_S = 1,36$.

A Equação para cálculo de V_e é dada por [29, 35]:

$$V_S = 4.91\omega \left[\frac{K_2^{0,4}}{(1-K_2)^{1/3}} \right] D_C^{0,067} \cdot V_e^{2/3} \quad (3.83)$$

$$\omega = \left[\frac{4 \cdot g \mu \cdot (\rho_p - \rho_f)}{3 \rho_f^2} \right]^{1/3} \quad (3.84)$$

Os valores de V_e e V_S podem ser obtidos também diretamente, através do diagrama de Zanker [39]. Quando a relação V_e/V_S necessitar ser otimizada, ele sugeriu alterar primeiramente D_C ou o fator K_2 , e após então alterar V_e .

Para a determinação inicial de V_e para a Eq. (3.83), adotou-se $V_S = V_{av}$ onde V_{av} é definido em [40] por:

$$V_{av} = 0,0383 \left(dp_{m\acute{a}x} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{0,5} \quad (3.85)$$

3.6 - Análise Teórica dos Parâmetros Influentes na Eficiência e Perda de Carga dos Ciclones

Para permitir uma análise comparativa de cada parâmetro pelo uso dos métodos de estimativa da η e Δp apresentados, foi desenvolvido um programa computacional, cujo fluxograma é apresentado na Figura (3.13).

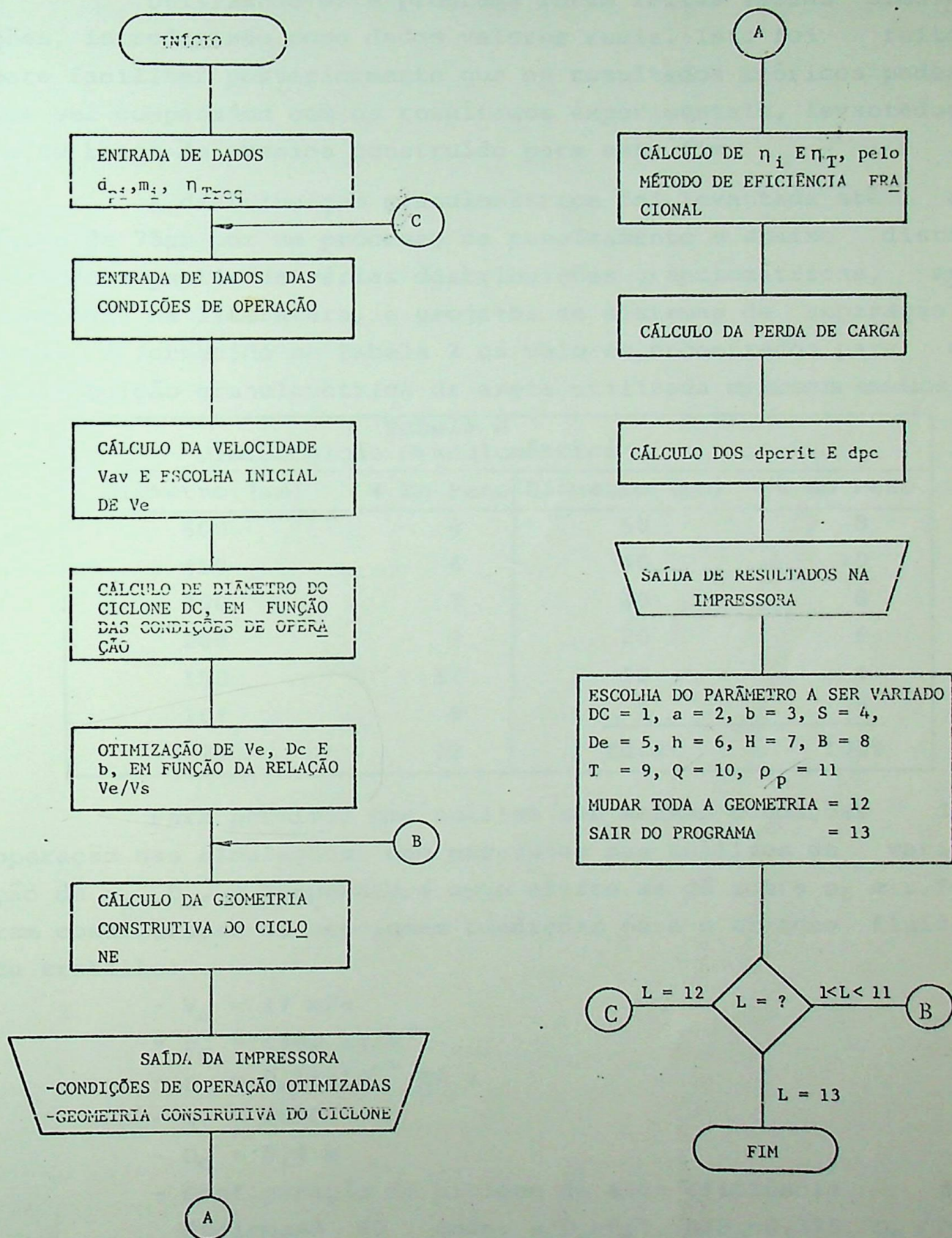


FIG. 3.13 - Fluxograma simplificado do programa para análise de desempenho do ciclone.

Utilizando este programa foram feitas várias simulações, introduzindo como dados valores reais. Isto foi feito para facilitar posteriormente que os resultados teóricos pudessem ser comparados com os resultados experimentais, levantados em um banco de ensaios construído para este fim.

A distribuição granulométrica foi levantada até a faixa de 75 μ m por um processo de peneiramento e abaixo disto adotado a partir de várias distribuições granulométricas, encontradas na literatura, e projetos de sistemas de separação. Assim, é fornecido na Tabela 2 os valores encontrados para a distribuição granulométrica da areia utilizada em nossos ensaios.

Diâmetro (μ m)	% Em Peso	Diâmetro (μ m)	% Em Peso
600	6	60	8
450	6	40	10
300	7	30	8
200	9	20	6
150	11	10	4
104	9	5	5
75	12	Total	100%

Para permitir uma análise sob mesmas condições de operação nas simulações, com exceções nas análises da variação de ρ_p , D_c , e Temperatura cujo efeito se dá sobre ρ_f e μ , foram consideradas as seguintes condições para o ar como fluido de trabalho:

- $V_e = 17$ m/s
- $\rho_p = 1400$ kg/m³
- $\mu = 0,18 \times 10^{-4}$ Pa.s
- $T = 20^\circ\text{C}$
- $D_c = 0,4$ m
- Configuração de ciclone de alta eficiência de Stairmand 40, onde: $a/D_c = 0,5$, $B/D_c = 0,375$, $D_e/D_c = 0,5$; $H/D_c = 4,0$; $h/D_c = 1,5$; adotando-se $S/D_c = 0,6$ e $b/D_c = 0,25$.
- Concentração de 180 gramas de areia/m³ de ar.

Em todos os gráficos os resultados das simulações foram plotados obedecendo a seguinte nomenclatura apresentada na Tabela 3.

TABELA 3 - Nomenclatura de Símbolos	
Δ - dp_{crit} Seg. Eq. (3.24)	\diamond - Δp Seg. Eq. (3.60)
ϕ - dp_{crit} Seg. Eq. (3.25)	\boxtimes - Δp Seg. Eq. (3.63)
\square - dp_{crit} Seg. Eq. (3.26)	\times - Δp Seg. Eq. (3.63) s/carga
∇ - dp_{crit} Seg. Eq. (3.37)	\triangle - Δp Seg. Eq. (3.72)
\blacksquare - dp_c Seg. Eq. (3.39)	\odot - Δp Seg. Eq. (3.72) s/carga
\bullet - Modelo de eficiência fracional (Eq. 3.48) e 3.59).	\boxminus - Δp Seg. Eq. (3.73)

Após uma análise minuciosa dos valores obtidos para a Δp segundo as equações citadas na Tab. 3, e comparando os resultados obtidos experimentalmente por vários autores [32], a partir de uma análise de desvio padrão, foram introduzidos fatores de correção nas equações (3.63) e (3.72). Assim, os fatores são: $K = 0,33$ para Eq. (3.72) com carga; $K = 0,455$ para Eq. (3.72) sem carga; $K = 0,25$ para Eq. (3.63) com carga; $K = 0,333$ para Eq. (3.63) sem carga. Deste modo, as curvas com os resultados obtidos pelo uso direto destas equações foram plotadas em linhas tracejadas (---), e os resultados obtidos destas equações, com a utilização dos fatores de correção foram plotados com linha cheia (—), bem como os resultados das equações (3.60) e (3.73), cujos desvios dos valores experimentais não ultrapassaram 10%.

3.6.1 - DIÂMETRO DO CICLONE

Conforme os valores apresentados por Del Tanago [2], a força de separação em relação à gravidade varia acentuadamente com o diâmetro do ciclone. Isto é verificado pela Eq. (3.7), onde a redução do diâmetro do ciclone, aumenta a força centrífuga. Nos ciclones de pequeno diâmetro a força de separação em relação à gravidade é dezenas de vezes maior do que num ciclone de grande diâmetro.

Deste modo, a influência da variação do diâmetro do ciclone não pode ser considerada sob o mesmo ângulo,

sobre o alcance total da investigação dos diâmetros. Deve-se esperar respostas diferentes quando se trata com ciclones de pequeno diâmetro, e ciclones de grande diâmetro. Na Fig. (3.14) é apresentada a variação da eficiência do ciclone, quando o diâmetro D_c foi alterado de 0,2 a 1,0m, mantendo-se constante todas as proporções geométricas construtivas. Pode-se observar na Figura que o diâmetro do ciclone tem influência sobre a eficiência.

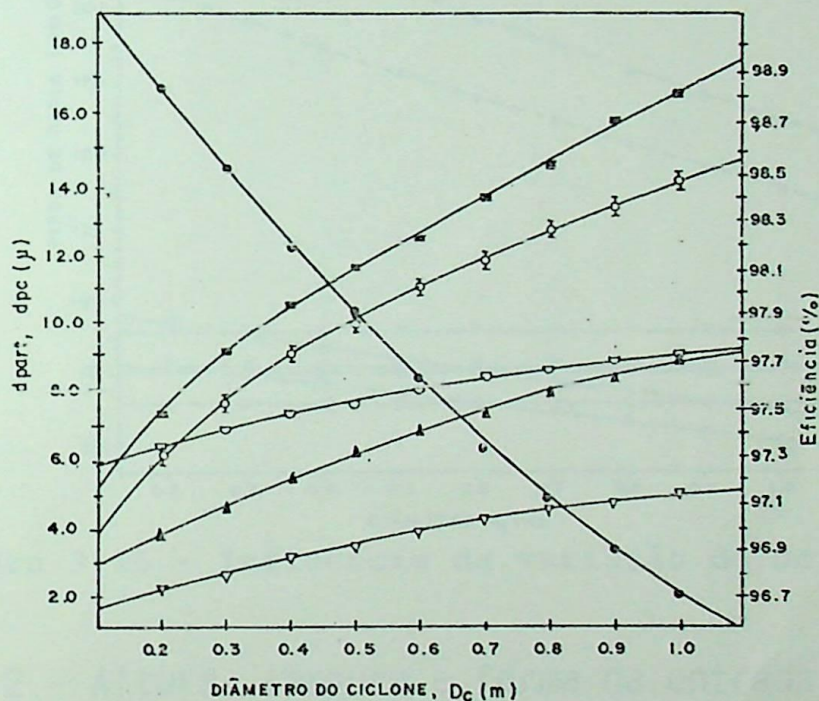


Figura 3.14 - Influência da variação de D_c sobre η .

Em todas as curvas pode ser visto que a eficiência diminui com o aumento do diâmetro do ciclone, o que é citado em um grande número de referências. Quando o partícula do tem uma parcela considerável de finos menores que $15\mu\text{m}$, se utilizam unidades de multiciclones de pequeno diâmetro para se conseguir uma eficiência razoável para a vazão de gás a ser tratada [1]. A influência do D_c na perda de carga pode ser analisada através das curvas da Fig. (3.15).

Pode-se concluir pelas curvas, exceto por Stairmand, que Δp não varia com o diâmetro do ciclone se as proporções geométricas forem mantidas. Na Eq. (3.72), o fator ψ é reduzido pelo aumento do diâmetro. O conseqüente aumento da área exposta aos gases, é superado pelo aumento da vazão de gás,

e assim a parcela de atrito gás-parede fica reduzida.

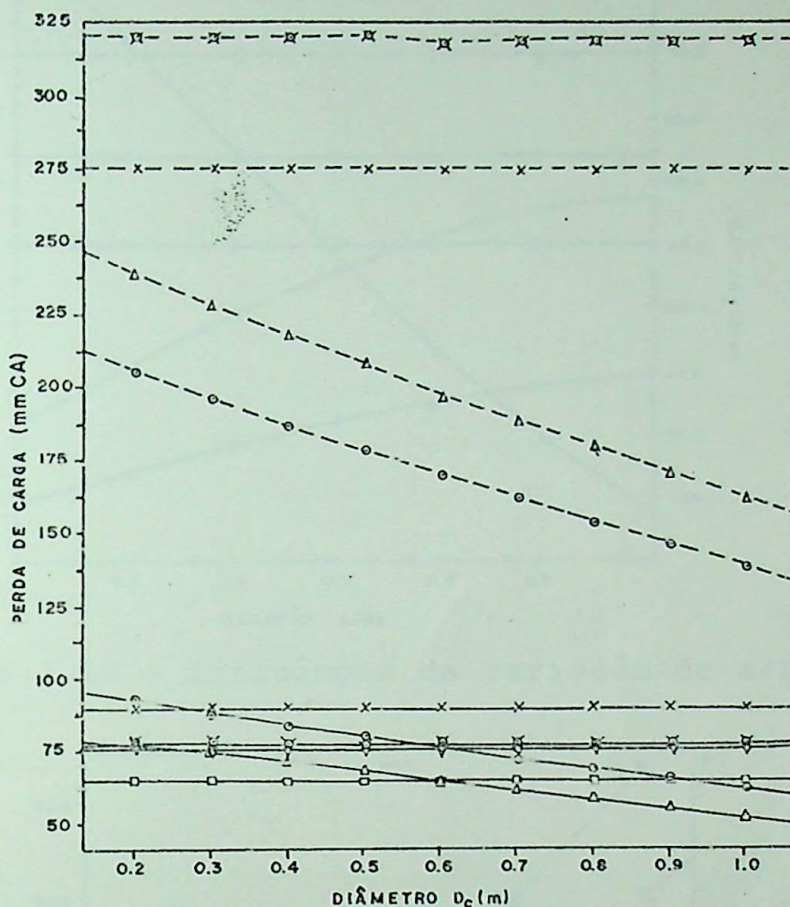


Figura 3.15 - Influência da variação do D_c sobre Δp .

3.6.2 - Altura, largura e forma da entrada

Um dos parâmetros básicos determinantes da eficiência de um ciclone é a velocidade de entrada. Esta é determinada pela seção de entrada e também pela quantidade de gás introduzida. A análise da forma e da seção de entrada permite conhecer ainda mais detalhadamente a influência da entrada na eficiência e na perda de carga.

3.6.2.1 - Altura do canal de entrada: A influência deste parâmetro na eficiência pode ser visto na Fig. (3.16), e a perda de carga na Fig. (3.17) seguintes.

Em três curvas do gráfico se vê que a eficiência cai com o aumento da relação a/D_c , por outro lado a diminuição da relação implica numa menor vazão de gás introduzido. Como a perda de carga também diminui em relações menores de a/D_c , pode-se neste caso trabalhar com vazões maiores, pelo aumento da velo

cidade de entrada (V_e).

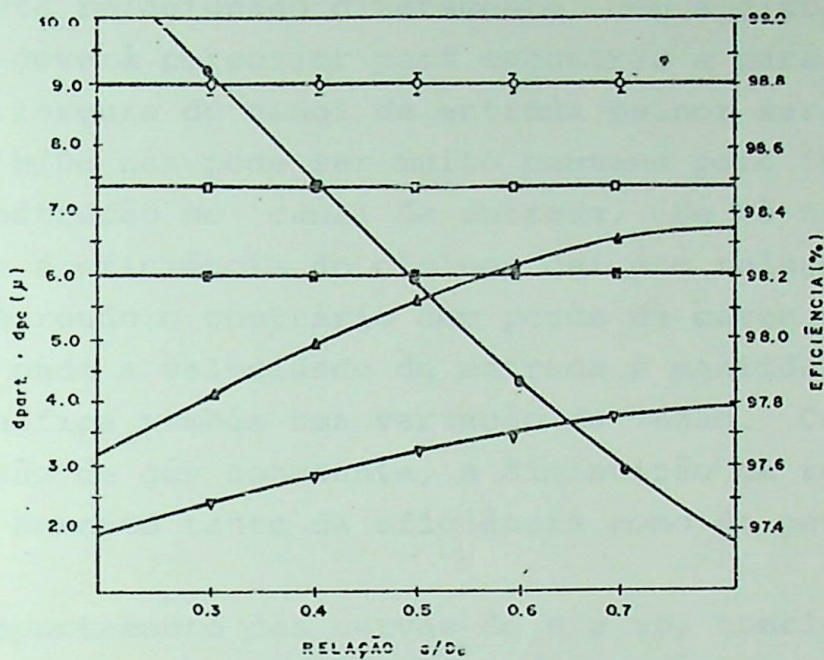


Figura 3.16 - Influência da variação de a/D_c sobre η .

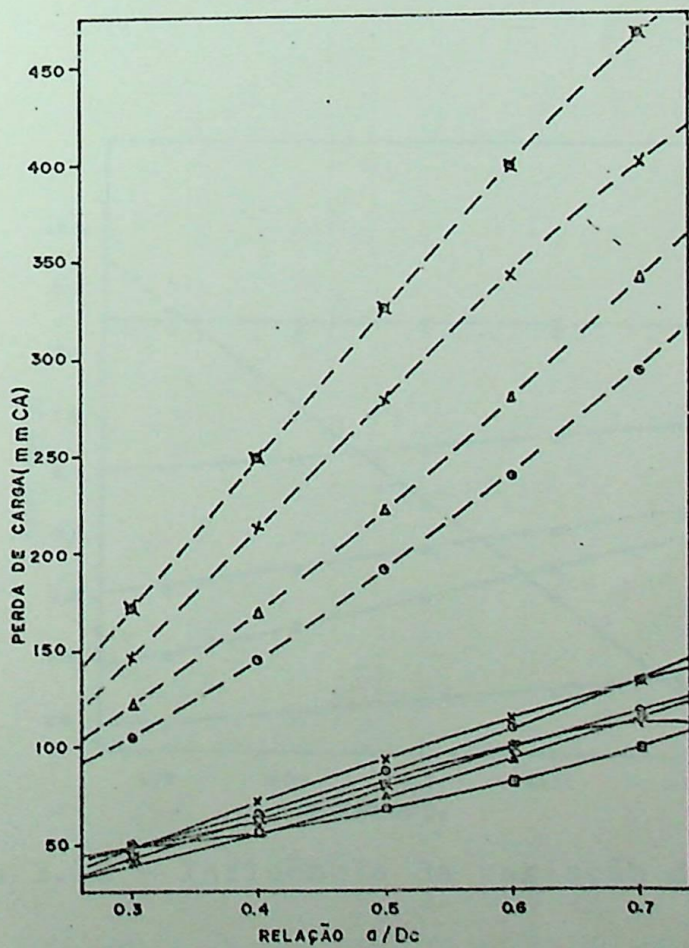


Figura 3.17 - Influência da variação de a/D_c sobre Δp .

3.6.2.2 - Largura do canal de entrada: Este parâmetro está relacionado diretamente com a distância que a partícula deverá percorrer para encontrar a parede. Quanto menor for a largura do canal de entrada melhor será a separação, porém, b/D_c não pode ser muito pequeno pois isto poderá acarretar obstrução no canal de entrada. Se vê nas Fig. (3.18 e 3.19), que a eficiência do ciclone cai com relações maiores de b/D_c , ocorrendo o contrário com perda de carga que cresce.

No caso onde a velocidade de entrada é mantida, a variação de b/D_c significa também uma variação da vazão. Como $\Delta p = f(Q)$, para uma vazão de gás constante, a diminuição da relação b/D_c acarreta um aumento tanto da eficiência como da perda de carga.

Pelo comportamento das curvas de η e Δp , conclui-se que existe um valor ótimo da largura b para cada tipo de ciclone, e aplicação específica.

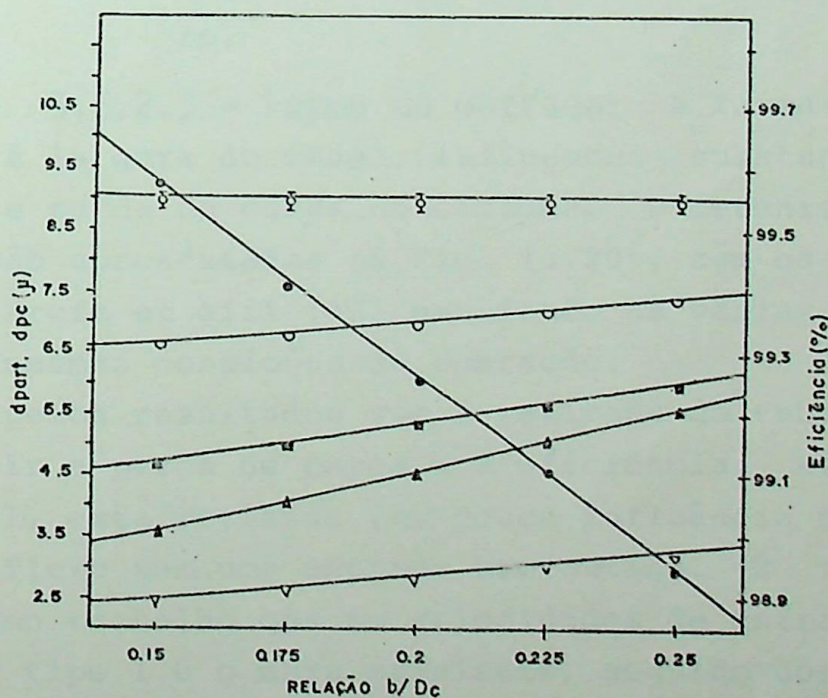


Figura 3.18 - Influência da variação de b/D_c sobre η

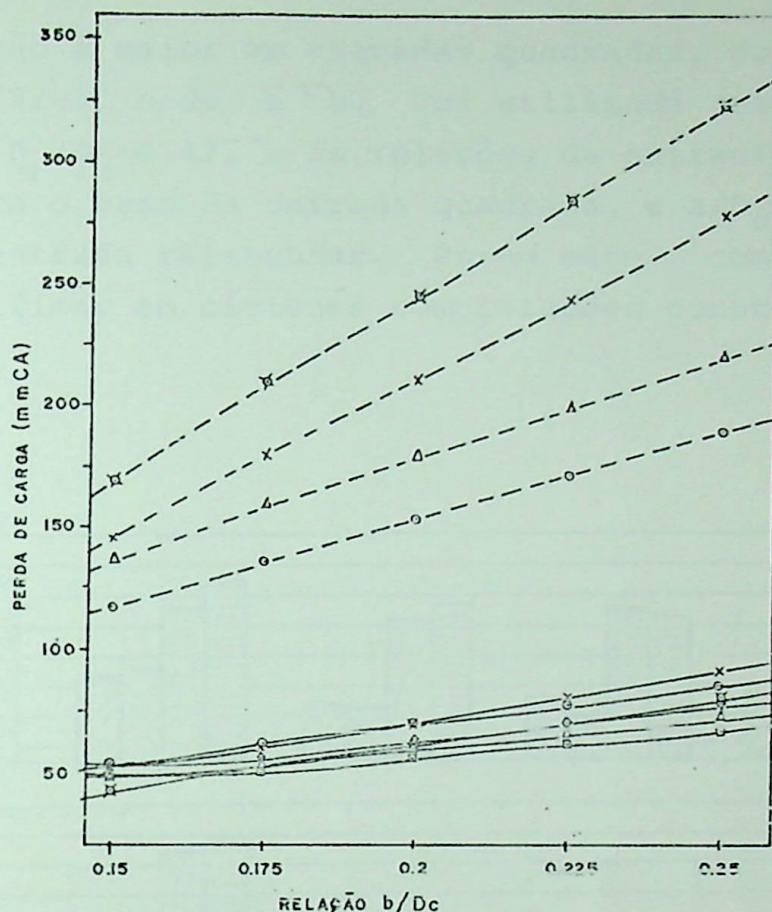


Figura 3.19 - Influência da variação de b/D_c sobre Δp .

3.6.2.3 - Forma da entrada: A forma da entrada associada à largura do canal, influencia substancialmente a eficiência e perda de carga no ciclone. Diferentes formas de entrada são apresentadas na Fig. (3.20), com os resultados obtidos por Kreft et alii [42] ensaiando as várias formas de ciclones sob mesmas condições de operação.

Verifica-se pelos resultados que a retirada do tubo de saída do gás faz cair a perda de carga e a eficiência. No caso do ciclone tipo 1, esta retirada tem pouca influência na eficiência, pois o fluxo tem uma entrada bem guiada. É verificado também no mesmo trabalho que em velocidades de entrada crescente, o ciclone tipo 1 é o mais eficiente, seguido dos ciclones de entrada do tipo 2 da Figura. Os ciclones de entrada direta (tipo 3), são mais eficientes a baixas velocidades, devido ao fato de serem criados escoamentos secundários na região de entrada do gás, em altas velocidades.

Estudando a seção de entrada Ter Linden [23] verificou que a eficiência de separação de ciclones com seção quadrada é superior aos de seção de entrada retangular. Por outro lado,

a queda de pressão é maior em entradas quadradas, do que as de entrada retangulares, onde $a > b$. Foi utilizado neste estudo um ciclone onde $D_e/D_c=0,42$, e as relações de entrada foram $a/D_c=b/D_c=0,33$ para o caso da entrada quadrada, e $a/D_c=0,33$, $b/D_c=0,17$ para a entrada retangular. Porém este comportamento pode não se verificar em ciclones com relações construtivas diferentes.

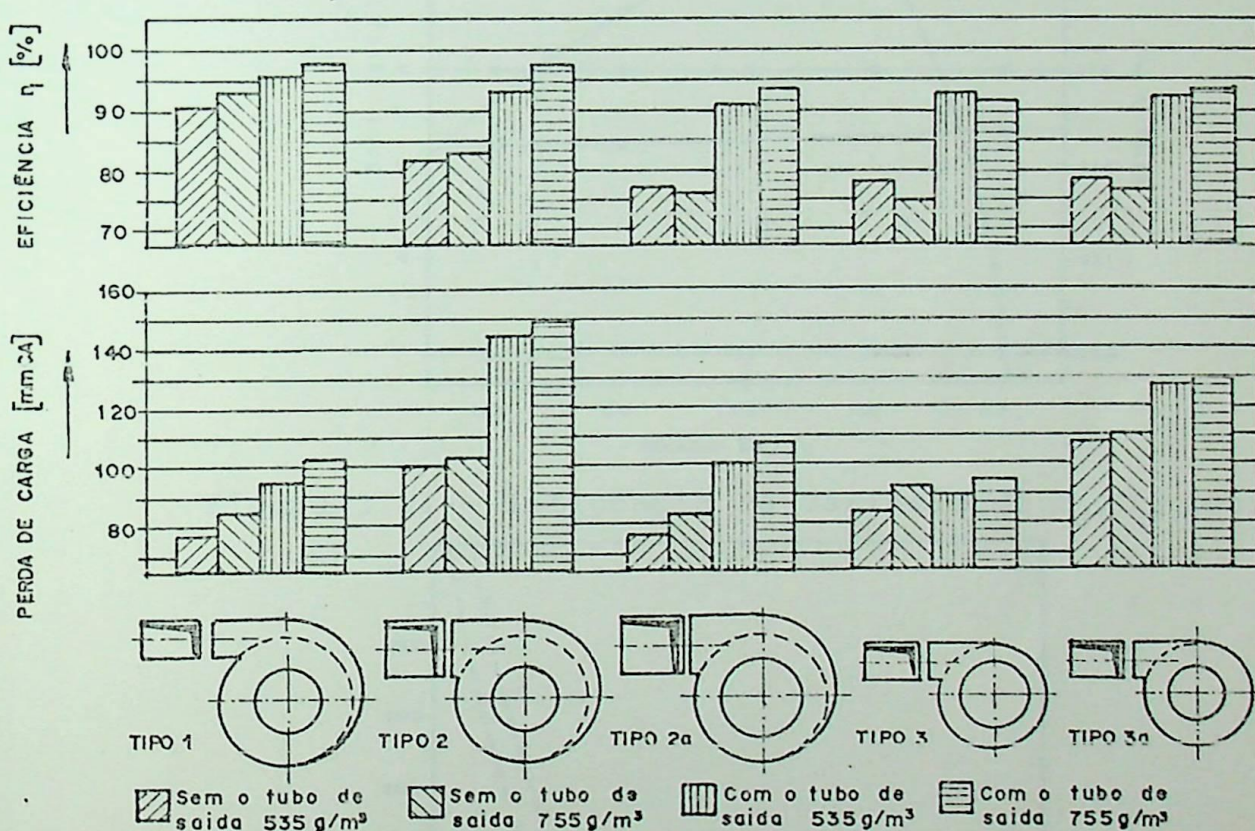


Figura 3.20 - Influência da forma de entrada na η e Δp .

(1) Voluta externa, $D_e/D_c=0,5$; (2) Voluta semi-externa, $D_e/D_c=0,5$; (2.a) Voluta semi-externa, $D_e/D_c=0,625$; (3) Entrada direta, $D_e/D_c=0,65$; (3.a) Entrada direta, $D_e/D_c=0,5$. (Da Ref. [41]).

3.6.3 - Diâmetro do tubo de saída do gás

A divisão de espaço interno do ciclone em zonas de eficiências diferentes Fig. (3.5), é influenciada sub

tancialmente pelo diâmetro do tubo de saída. A Fig. (3.21) mostra os resultados do comportamento de eficiência devido à variação de D_e/D_c , mantidos constantes os demais parâmetros. Já a Fig. (3.22) apresenta a influência de D_e sobre a perda de carga.

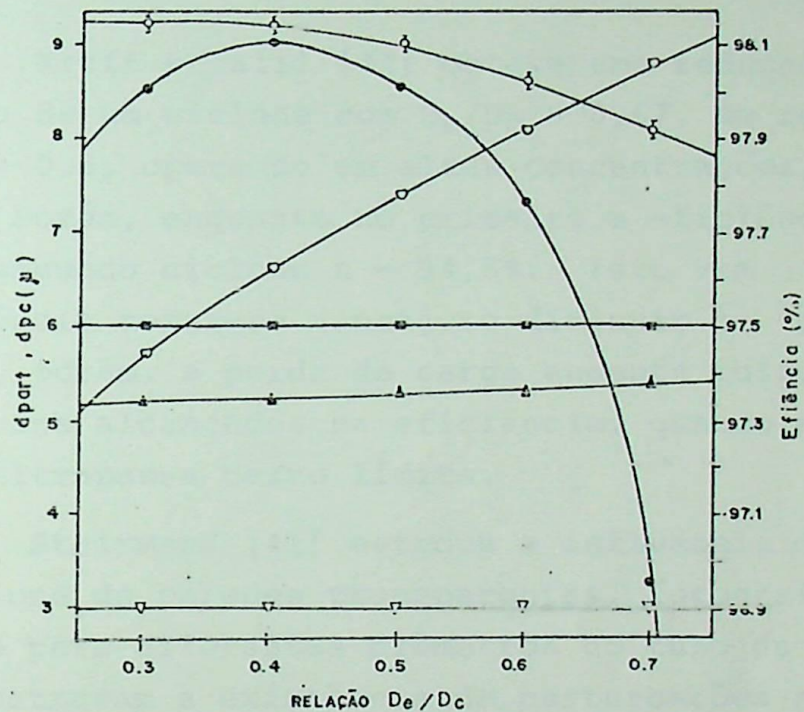


Figura 3.21 - Influência da variação de D_e/D_c sobre η

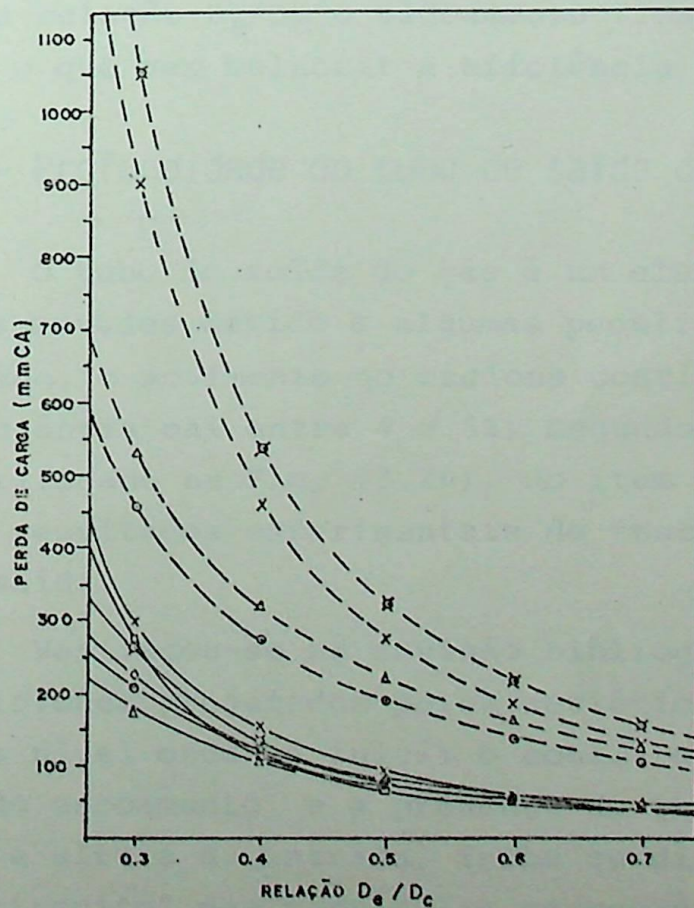


Figura 3.22 - Influência da variação de D_e/D_c sobre Δp .

Pelos gráficos verifica-se que a relação D_e/D_c é melhor dentro da faixa de 0,4 a 0,5. Os valores maiores indicam que uma perda de carga menor será obtida quando estes forem utilizados, tendo porém como penalização a queda de eficiência.

Kreft et alii [42] obteve uma redução de 27% na perda de carga de um ciclone com $D_e/D_c = 0,67$, em relação a outro com $D_e/D_c = 0,5$, operando em altas concentrações, da ordem de 755g/m^3 . Porém, enquanto no primeiro a eficiência foi de $\eta = 92\%$, no segundo ciclone $\eta = 94,5\%$. Isto vem indicar que para a eficiência torna-se vantajoso diminuir o diâmetro do tubo de saída, porém, a perda de carga aumenta muito além do que os benefícios alcançados na eficiência, quando a diminuição de D_e/D_c ultrapassa certo limite.

Stairmand [41] estudou a influência de D_e através de um ciclone de paredes transparentes, fotografando o núcleo do vórtice para diferentes diâmetros do tubo de saída. As fotografias mostraram a existência de perturbações no núcleo, quando se aumentou D_e . Isto implica em dizer que, com baixos valores na relação D_e/D_c o escoamento fica desprovido de perturbações, o que vem melhorar a eficiência de separação.

3.6.4 - Profundidade do tubo de saída do gás

O tubo de saída do gás é um elemento que recebe ainda muitos estudos devido a algumas peculiaridades. Se o tubo for retirado, o movimento no ciclone continua sendo helicoidal e a eficiência cai entre 4 e 5%, segundo Baturin [3]. Isto pode ser verificado na Fig. (3.20), do item 3.6.2.3, onde são mostrados os resultados experimentais de testes feitos com e sem o tubo de saída.

Verificou-se na revisão bibliográfica que, geralmente nos ciclones projetados pelos soviéticos este tubo se prolonga até o nível onde se inicia o cone. O fato está ligado a melhoria do escoamento, e a presença do tubo com profundidade maior que a altura da entrada, inibe ou dificulta a formação de "curto-circuito" das partículas carregadas pelo gás

na região posterior à entrada.

A profundidade do tubo de saída é bastante discutida por vários autores, de modo que não existe uma indicação precisa sobre a profundidade ótima. Os resultados teóricos da influência da variação de S sobre a eficiência e perda de carga são dadas respectivamente pelas Figuras (3.23) e (3.24).

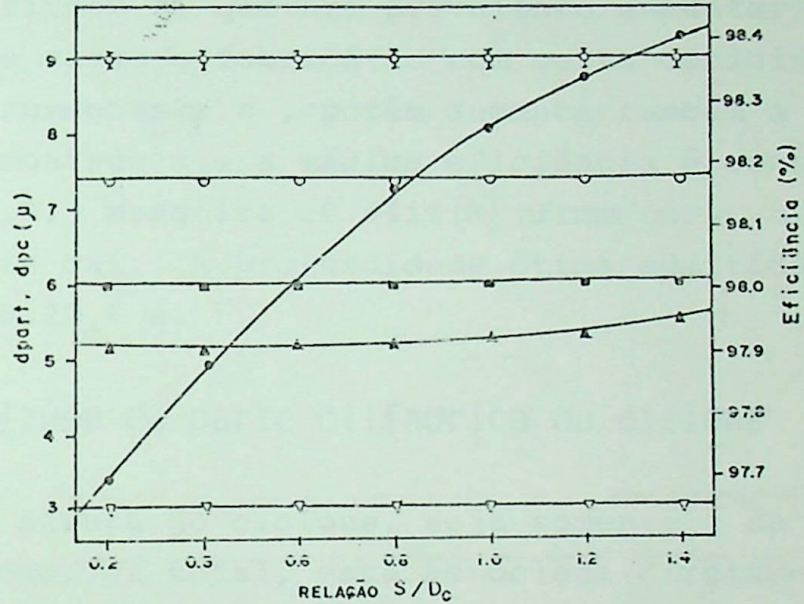


Figura 3.23 - Influência da variação de S/D_c sobre η

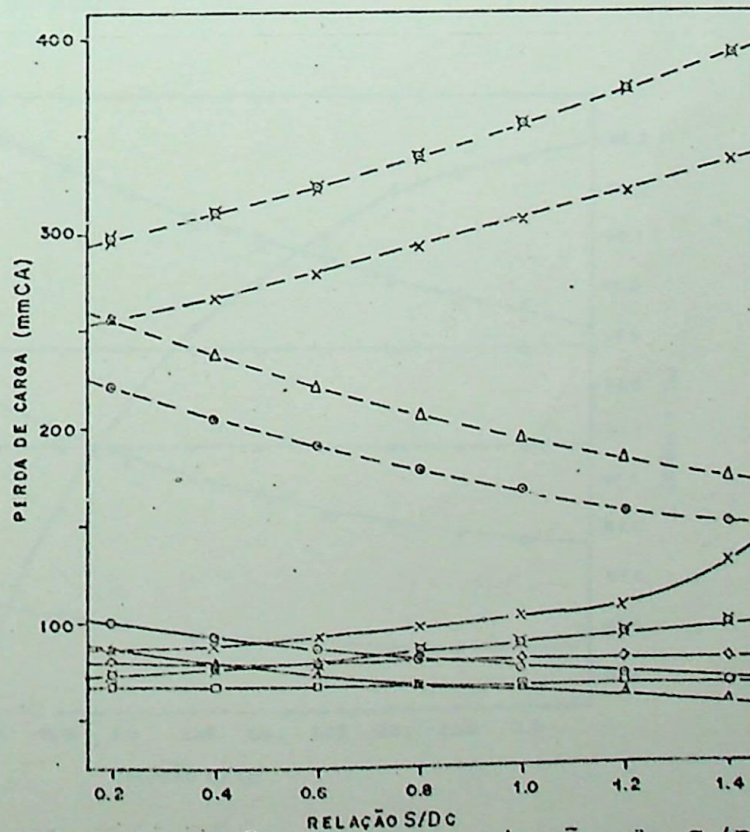


Figura 3.24 - Influência da variação de S/D_c sobre Δp .

Na Figura (3.23) a melhoria da η é verificada pela curva do método fracional, e na Figura (3.24) se vê a diminuição por um método e um aumento por outro. Este fato mostra a contradição existente quanto à sua influência.

Conforme a Ref. [4], após o ensaio de vários tipos de ciclone, afirmou-se que era proveitoso aumentar a profundidade do tubo de saída e fabricá-lo com certa conicidade. Estes dois fatores aumentam a η , porém aumenta também a Δp . Kreft et alii [42] mostrou que a máxima eficiência é conseguida quando $S/D_c = 0,7-0,8$. Mesquita et alii [8] afirma que η aumenta até $S/D_e = 1$ e depois cai. A profundidade ótima admitida por Svanda [23], é $S = 0,2D_e + a$.

3.6.5 Altura da parte cilíndrica do ciclone

A altura do ciclone, seja somente da parte cilíndrica, ou do cone, ou total, está associada diretamente ao número de voltas do gás no ciclone. Portanto, um aumento na altura da parte cilíndrica acarreta um aumento na eficiência, conforme a Figura (3.25).

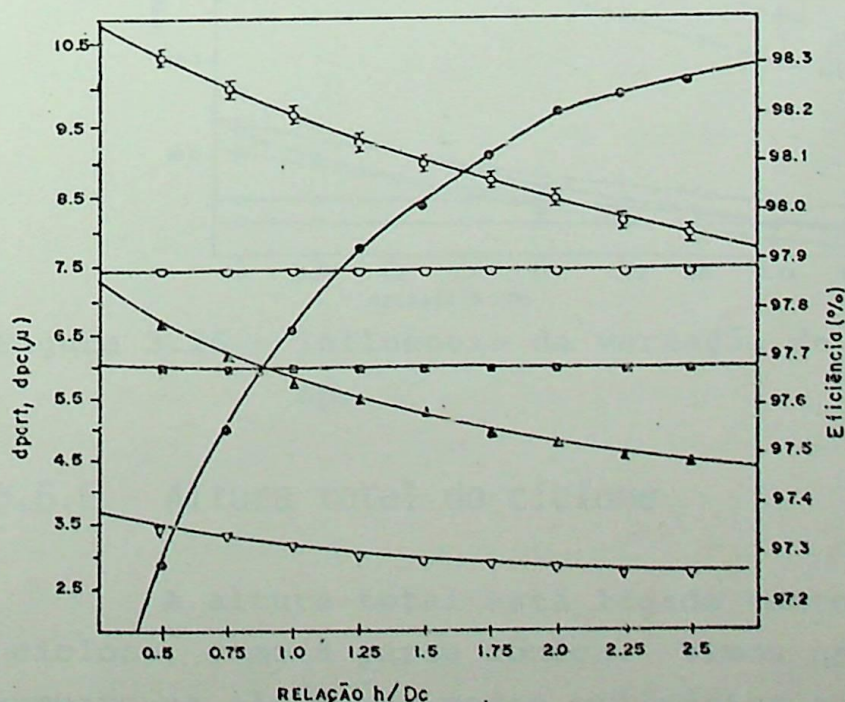


Figura 3.25 - Influência da variação de h/D_c sobre η

A altura da parte cilíndrica deve ser suficiente para garantir que a corrente gasosa dê três voltas completas, no mínimo. Isto implica que cada ciclone terá uma altura h ótima. Acima deste valor, a eficiência melhoraria muito pouco, e o equipamento aumenta de volume indevidamente.

No caso de perda de carga, o aumento da relação h/D_c implica numa redução da perda de carga, Fig. (3.26). Quanto a altura h , não foi encontrado nenhum comentário específico sobre a sua influência, que confirmasse os resultados obtidos. Geralmente os estudos em geral incluem o efeito da variação de h/D_c , no efeito da variação da altura do ciclone como um todo.

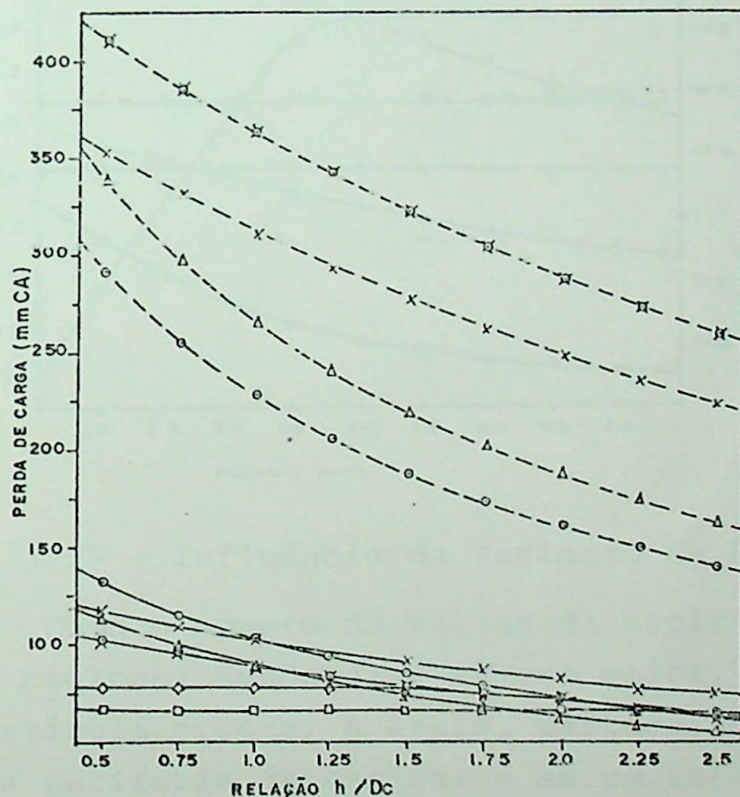


Figura 3.26 - Influência da variação de h/D_c sobre Δp .

3.6.6 - Altura total do ciclone

A altura total está ligada tanto à parte cilíndrica do ciclone, como à parte cônica. Vimos no item anterior que, o aumento na altura da parte cilíndrica acarreta um aumento na eficiência. O mesmo acontece com a parte cônica, pois quando o ângulo do cone é reduzido, mantendo-se B constante, deverá haver um aumento da altura do cone, e um aumento da

eficiência. Del Tanago [2] afirmou também a ocorrência de melhoria na eficiência de separação no caso de cones com ângulos pequenos.

Na Fig. (3.27) é visto a influência da relação H/D_c sobre a eficiência. Nota-se que acima de um certo valor, η tende à estabilização.

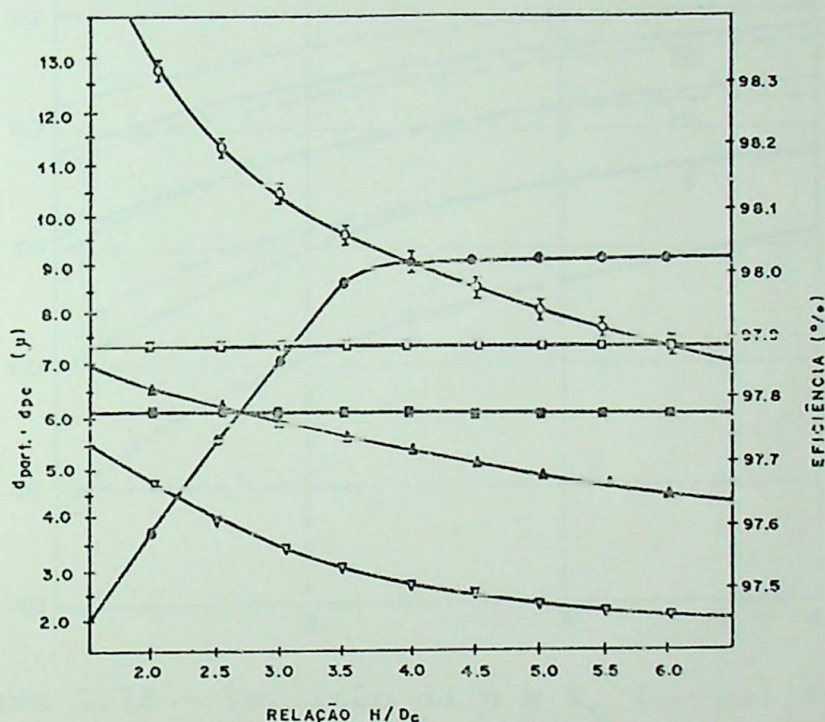


Figura 3.27 - Influência da variação de H/D_c sobre η

Como o número de voltas da espiral está associado à altura do ciclone, sendo este número maior, o tempo de permanência da partícula cresce, e assim, partículas menores poderão alcançar a periferia da espiral e serem separadas do gás [43]. Rosin et alii [23] realizaram experiências onde se estudou o comportamento de $\eta \times N_v$, em diferentes velocidades, utilizando um ciclone com: $D_c=3m$; $b=0,5m$; $\rho_p=1200Kg/m^3$, e $T=20^\circ C$. Os resultados mostraram que com um aumento do N_v , a diferença na eficiência para vários tamanhos de partículas diminui, conforme visto na Fig. (3.28), e esta é mais acentuada para altos valores de V_e .

A perda de carga com o aumento da altura total H , sofre uma ligeira queda [8]. Isto poderia ser explicado pelo fato do atrito do gás relativo às paredes do ciclone diminuir.

nuir a energia cinética do gás, reduzindo a intensidade do vórtice e conseqüentemente a perda de carga. Em casos extremos vórtices secundários podem ser criados na parte cônica do ciclone diminuindo η [18]. Deste modo, o aumento de H acima de certo limite deverá vir acompanhado por um aumento da V_e [23].

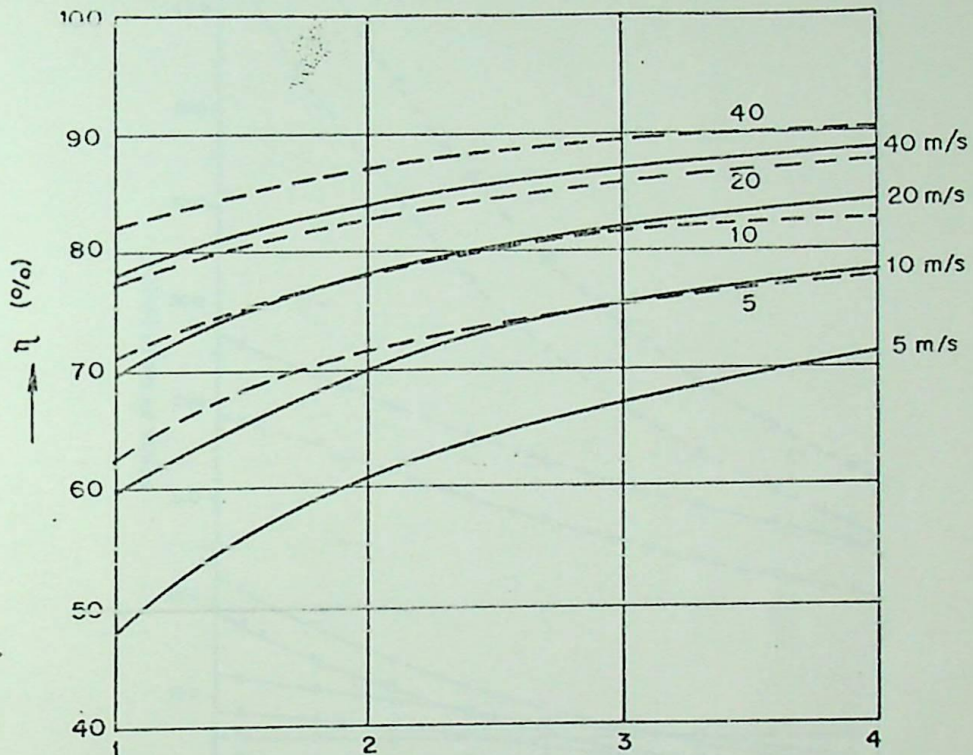


Figura 3.28 - Variação da $\eta \times N_v$ (-----) 40% das partículas acima de 200μ .
(—) 20% das partículas acima de 200μ . (Da Ref. [23]).

Os resultados teóricos referentes a influência da variação de H/D_c sobre a eficiência são apresentados na Fig. (3.29).

(Fig. 3.29 a seguir).

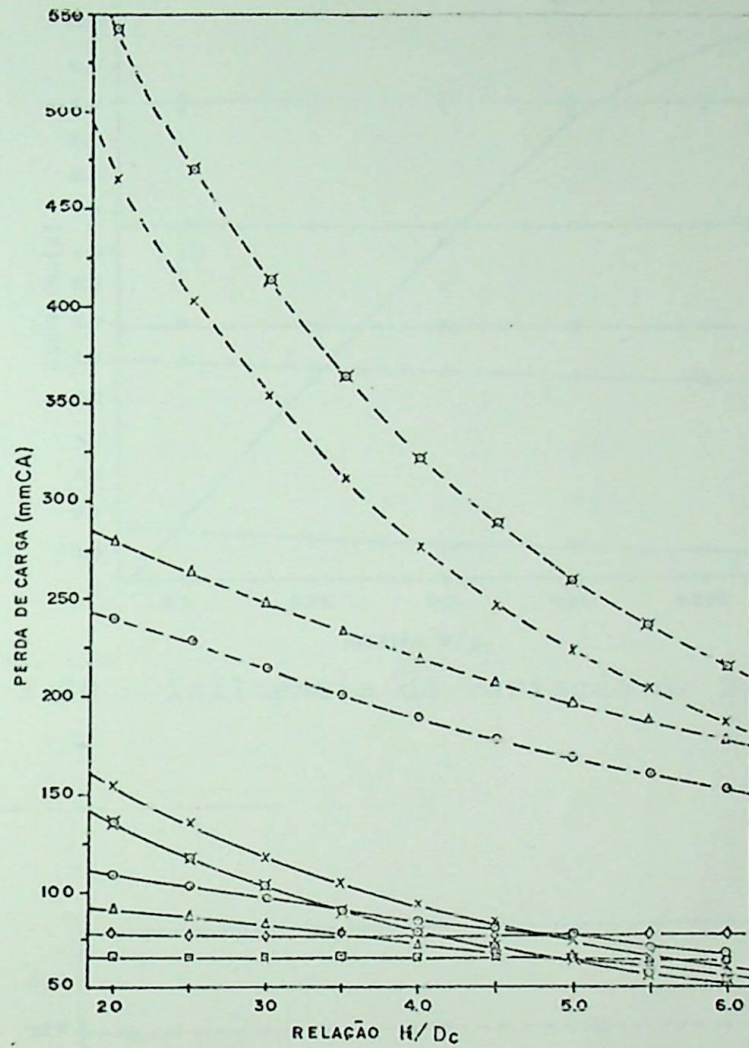


Figura 3.29 - Influência da variação de H/D_c sobre Δp .

3.6.7 - Diâmetro de saída da fase sólida

Nos resultados teóricos obtidos e apresentados nas Fig. (3.30) e (3.31), é verificado que a eficiência e a perda de carga praticamente não variam com o diâmetro B.

(Fig. 3.30 a seguir).

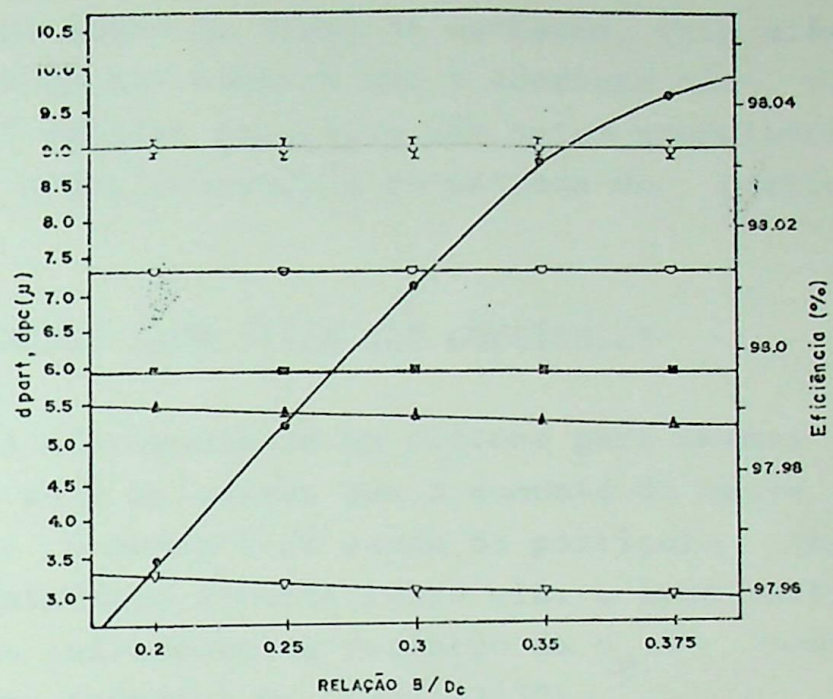


Figura 3.30 - Influência da variação de B/D_c sobre η

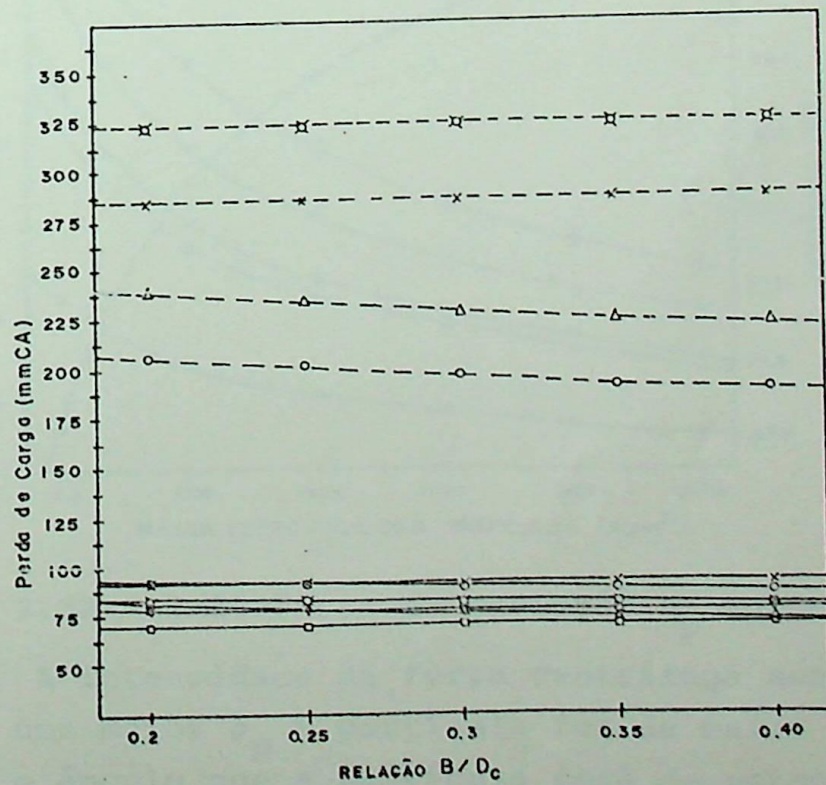


Figura 3.31 - Influência da variação de B/D_c sobre Δp .

Do ponto de vista da operação, este diâmetro deve ser selecionado de tal maneira que a abertura não chegue a obstruir, e que os sólidos separados não sejam acumulados na parte mais baixa do cone, evitando a re-entrada de partículas na espiral interna.

3.6.8 - Massa específica das partículas

A eficiência de um ciclone para mesmas condições de operação, será melhorada com o aumento da massa específica dos sólidos. O aumento da massa da partícula implica numa maior força centrífuga atuante sobre ela, e isto melhora a sua precipitação. A influência da variação da ρ_p é mostrada através de resultados teóricos na Fig. (3.32).

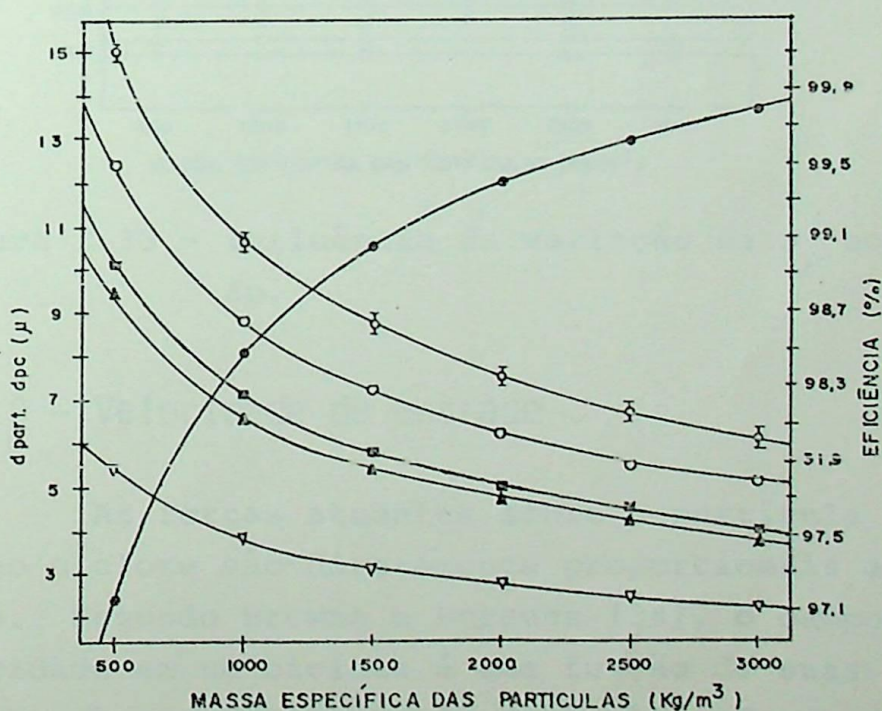


Figura 3.32 - Influência da variação ρ_p sobre η

A intensidade da força centrífuga será ainda maior se, além de uma maior ρ_p a partícula for de maior tamanho. Neste caso, o ângulo que a partícula terá de percorrer até encontrar a periferia do escoamento será menor. Com respeito à perda de carga, o efeito do aumento da ρ_p é nulo, conforme resultados teóricos apresentados na Fig. (3.33).

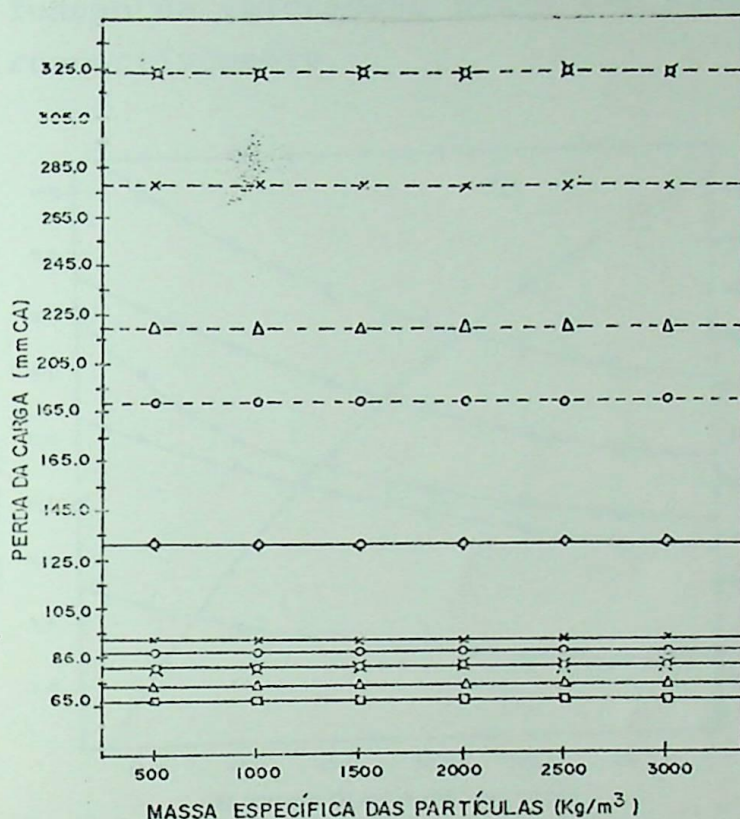


Figura 3.33 - Influência da variação da ρ_p sobre a Δp .

3.6.9 - Velocidade de entrada

As forças atuantes sobre a partícula dentro do escoamento no ciclone são diretamente proporcionais a velocidade de entrada. Segundo Browne e Strauss [34], o campo adimensional de velocidade em um ciclone é uma função de suas proporções geométricas. Desta forma quando V_e é alterada, todas as velocidades através do ciclone são alteradas proporcionalmente. Como a força centrífuga é proporcional ao quadrado da velocidade de tangencial, e esta sendo proporcional a V_e , a eficiência irá então melhorar com o aumento desta velocidade. Porém, o aumento da velocidade V_e está limitado a duas restrições: a re-entrada de partículas separadas no escoamento; e a perda de carga máxima admissível, aceita por vários autores como 250 mmCA. Por sua vez, existe também restrições quando a velocidade mínima para prevenir a deposição de partículas na entrada, e neste caso

a velocidade V_e deverá levar em conta o tipo e granulometria do material. Os efeitos do aumento da eficiência e também da perda de carga em função da velocidade podem ser vistos nas Fig. (3.34) e (3.35) respectivamente.

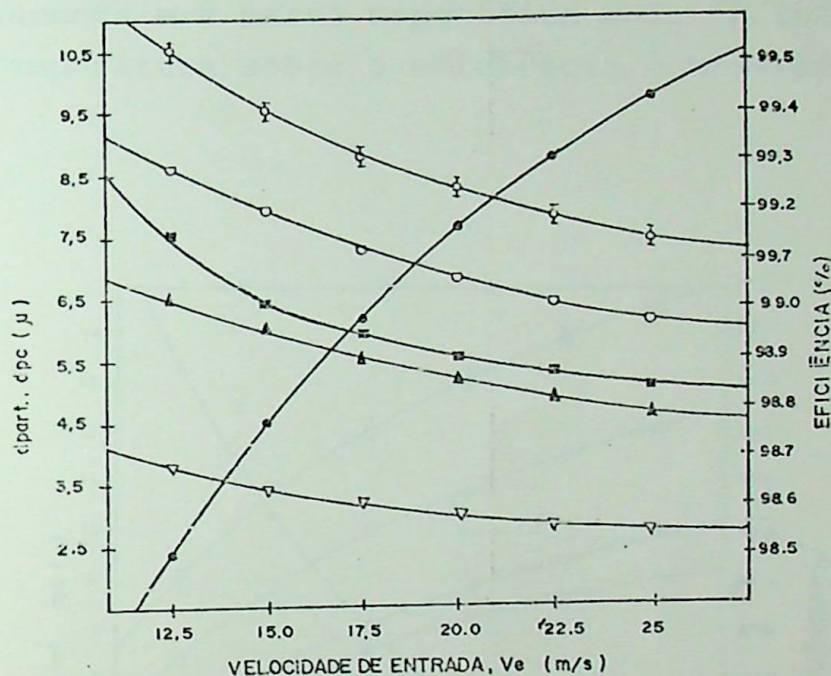


Figura 3.34 - Influência da variação da V_e sobre η

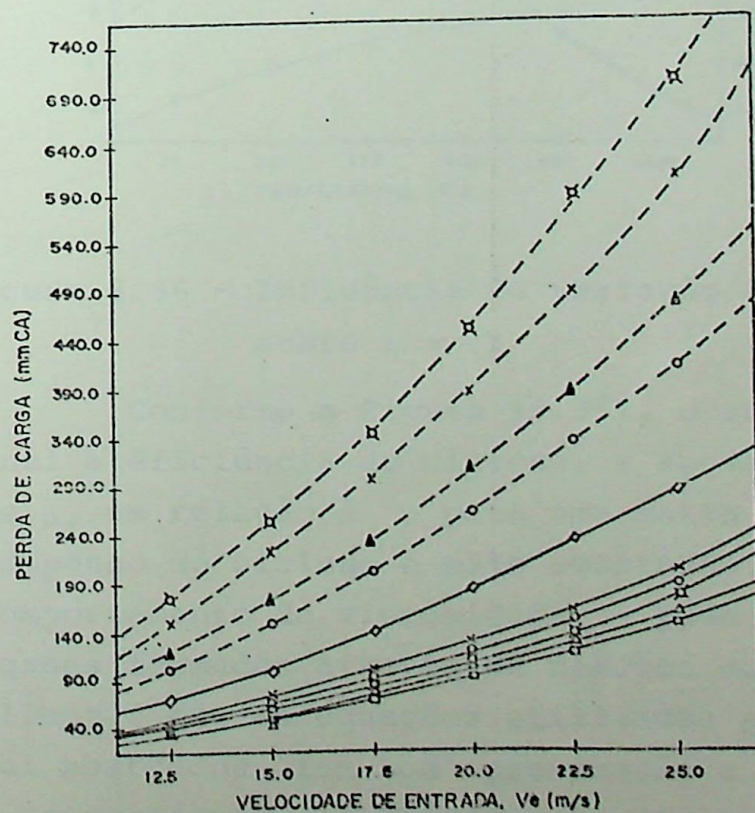


Figura 3.35 - Influência da variação da V_e sobre Δp .

3.6.10 - Temperatura de trabalho do gás

Dois fatores muito importantes no desempenho de ciclones são função direta da Temperatura: a viscosidade, e a massa específica do gás. Aumentando-se a temperatura, a viscosidade aumenta e a massa específica cai. A influência da variação da Temperatura sobre a eficiência é mostrada na Figura (3.36).

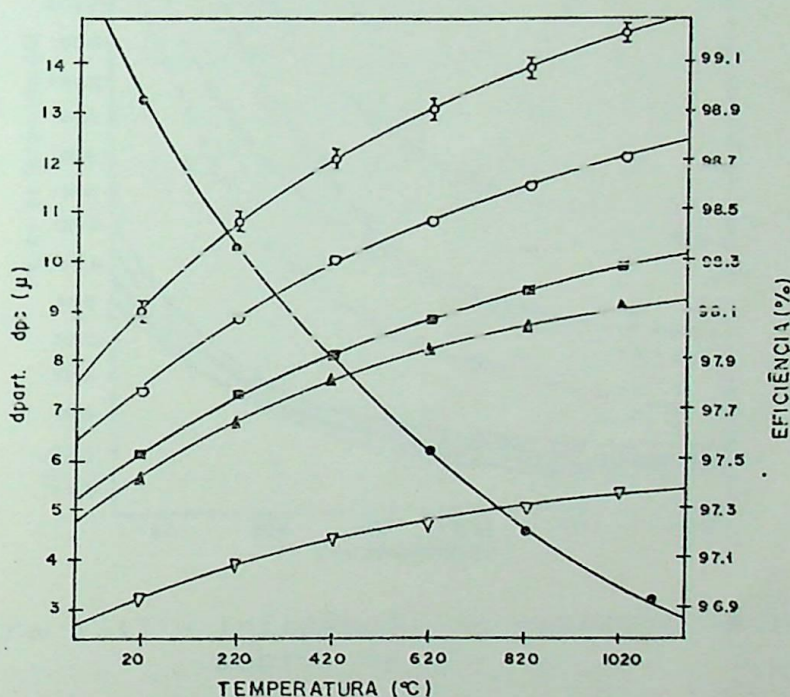


Figura 3.36 - Influência da variação da Temperatura sobre a η .

Conforme a Figura (3.36), o aumento da temperatura diminui a eficiência do ciclone, e apesar da variação muito maior de ρ_f em relação à μ para uma mesma ΔT , o efeito da μ no desempenho do ciclone é mais acentuado. Em altas temperaturas o comportamento da viscosidade pode ser ainda modificado por gases formados através de reações dos sólidos. É importante salientar que as equações utilizadas para obter os resultados aqui mostrados, tem boa aproximação a baixas temperaturas e baixo carregamento de sólidos. Kreft et alii [42] realizou experiências com temperaturas variando entre 20 e 600°C onde se verificou mesma tendência de queda na eficiência. Quanto

a diminuição da perda de carga, apresentada na Fig. (3.37) foi confirmado também experimentalmente que ela ocorre, devido à diminuição da viscosidade.

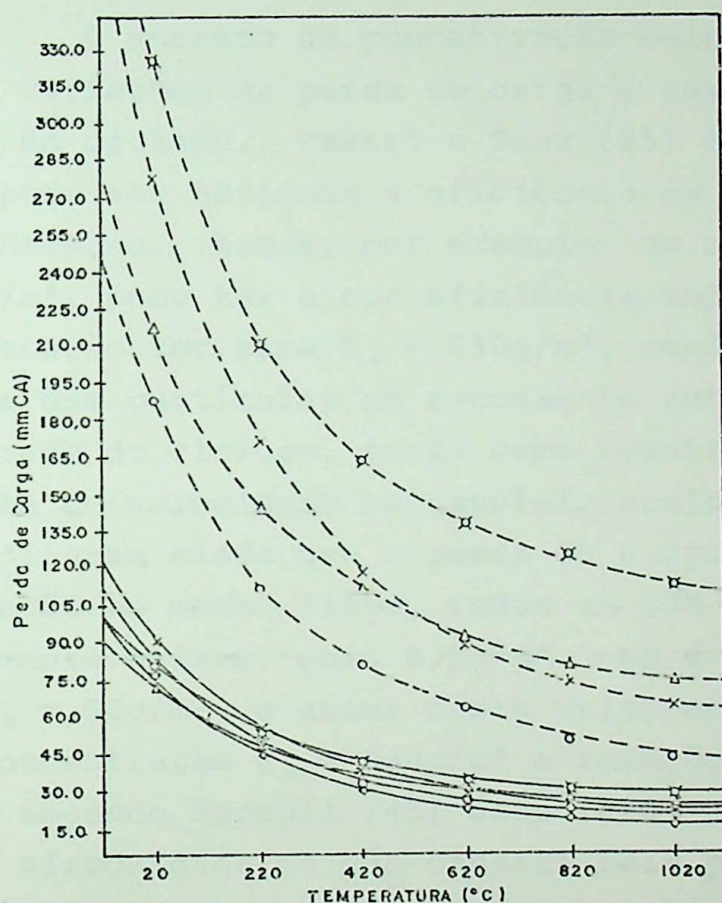


Figura 3.37 - Influência da variação da temperatura sobre Δp .

3.6.11 - Outros parâmetros influentes

Ainda influenciam substancialmente na eficiência do ciclone: a concentração de sólidos, e a umidade do gás. Existe dentro do escoamento a ocorrência de aglomeração das partículas formando coágulos de diferentes tamanhos, porém fracamente ligados. Este fato em velocidades moderadas, contribui para uma melhoria da eficiência de separação, principalmente para pequenos diâmetros de partícula (menores que $5\mu\text{m}$), segundo Abrahamson et alii [28]. O efeito da aglomeração será mais evidente com o aumento da umidade do gás, que melhora a ligação nos coágulos.

A umidade do gás no entanto, tem a desvantagem de produzir aglomeração nas paredes, e obstrução do tubo de

saída da fase sólida por queda de placas formadas nas paredes [24]. Este é um problema comum encontrado em torres de preaquecedores de ciclone, devido a circulação e condensação de álcalis em estágios superiores.

O aumento da concentração melhora a eficiência, e acarreta variações na perda de carga e campo de velocidades no interior do ciclone. Tawari e Zenz [25] levantaram um diagrama onde pode ser estimada a eficiência em função da variação da concentração. Assim, por exemplo, um ciclone com $\eta = 85\%$ à $C_0 = 2,5\text{g/m}^3$, pode ter a sua eficiência melhorada para 98% se a concentração for para $C_0 = 230\text{g/m}^3$, conforme o diagrama. A presença das partículas no escoamento aumenta o fator de atrito da parede do ciclone, tendo como resultado a diminuição da componente de velocidade tangencial, conforme Ref. [44]. Os autores verificaram ainda que a perda de carga com o gás empoeirado em relação ao mesmo limpo, reduz em 30% a Δp em concentrações extremamente baixas, como $0,2\text{g/m}^3$. Δp é praticamente constante até $C_0 = 50\text{g/m}^3$, e acima deste valor ela volta a diminuir. Em uma concentração $C_0 = 230\text{g/m}^3$ a redução verificada na Δp foi de 13% . Segundo Sproull [45] este fato ocorre devido a diminuição da viscosidade do gás causada pela presença das partículas.

Outro fator que leva à redução da perda de carga nos ciclones é a rugosidade da parede. Iinoya [1], revestiu as paredes com diferentes granulometrias de areia, e obteve uma redução de quase 50% na Δp com diâmetro entre 500 e $1000\mu\text{m}$. Conclui-se então que o atrito com a parede aparentemente reduz a intensidade do vórtice, e conseqüentemente Δp .

4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS INFLUENTES NO DESEMPENHO DE CICLONES

Neste capítulo são analisados experimentalmente os parâmetros que influenciam o desempenho dos ciclones, a partir de resultados obtidos em um banco de ensaios, que foi construído especialmente para este fim.

Os ensaios para levantamento de resultados experimentais foram divididos em três séries. Na primeira série de ensaios foi feito o levantamento do campo de velocidades do escoamento do interior do ciclone. Na segunda série de ensaios, se verificou o desempenho do ciclone na posição invertida, utilizando-se materiais de massas específicas diferentes, e também a diferentes condições de operação. Na terceira série de ensaios, verificou-se o comportamento do ciclone, em função de variações na geometria construtiva e condições de operação. Nos ensaios com carga foram utilizados três materiais distintos: areia, cimento e serragem. Os resultados obtidos nestes ensaios são apresentados e comparados com os resultados teóricos e experimentais encontrados na literatura.

4.1 - O Banco de Ensaios

Com o objetivo de realizar ensaios para o levantamento do campo de distribuição de velocidades, eficiência e perda de carga, projetou-se um banco de testes com um ciclone de alta eficiência, adotando-se a configuração de Stairmand [41]. O diâmetro do ciclone foi adotado, e pensou-se em construí-lo dentro de uma escala que permitisse montá-lo em várias posições, e que tivesse escala dentro da faixa dos pequenos ciclones industriais.

As dimensões do ciclone são apresentadas na Fig. 4.1, onde podem ser vistos alguns detalhes construtivos adotados. O corpo cilíndrico, a tampa e o cone são flangeados de modo a permitir variações na altura do ciclone, e retirada da transição do cone para o depósito. O tubo de saída do gás é móvel para permitir a variação de sua profundidade. A seção de entrada

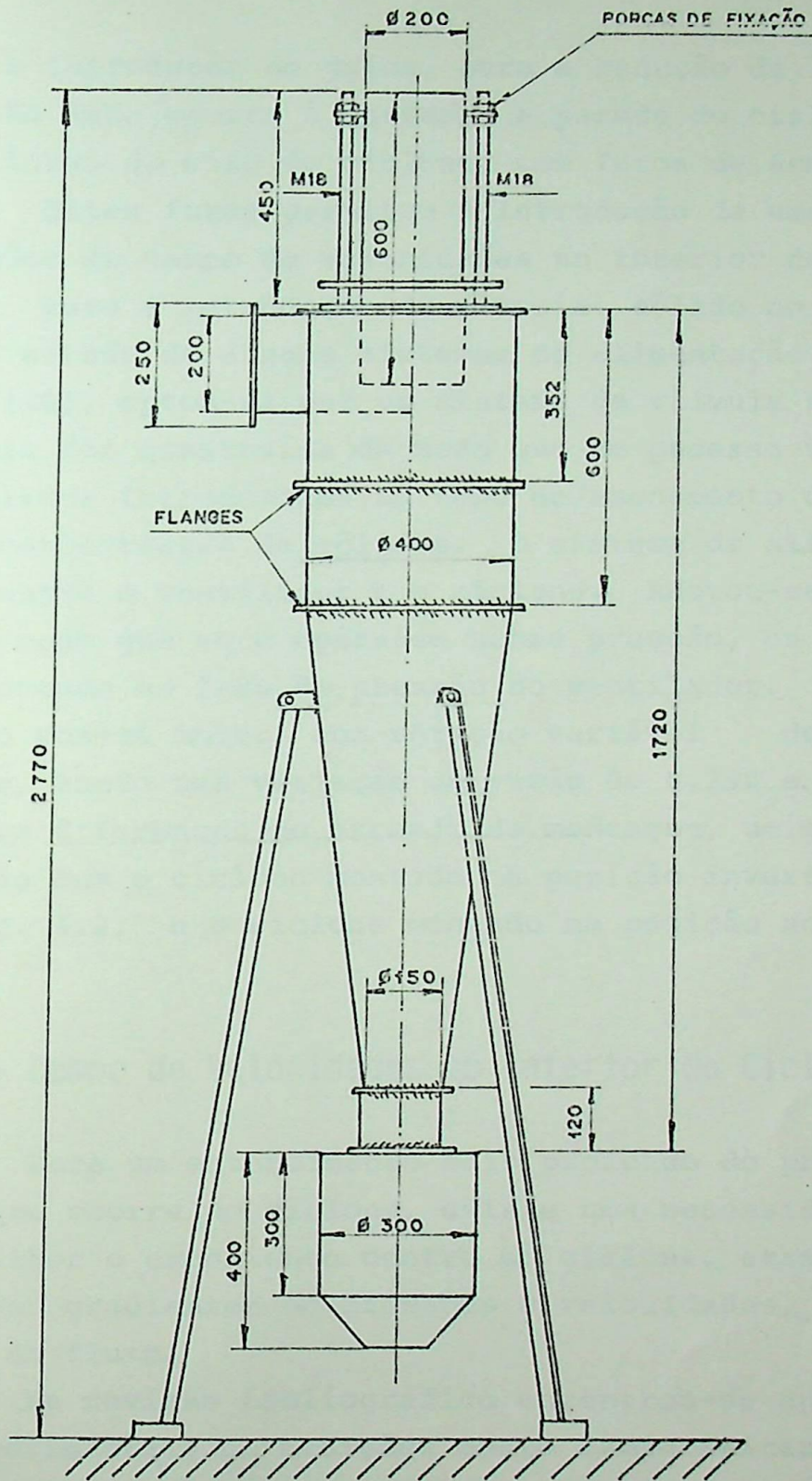


Fig. 4.1 - Ciclone de alta eficiência.

permite a introdução de guias, para a redução da largura de entrada. No lado oposto à entrada, a parede do ciclone foi perfurada ao longo do eixo do ciclone, com furos de 6mm e distantes de 64mm. Estes furos permitem a introdução de uma sonda para as medições do campo de velocidades no interior do ciclone.

Para a introdução de material sólido no escoamento de ar, após estudo de alguns sistemas de alimentação apresentados na Ref. [46], optou-se por um sistema de válvula rotativa. Esta válvula foi construída de modo que se pudesse variar o volume de sólidos introduzidos no tubo de escoamento do ar, variando assim a concentração de sólidos. O sistema de alimentação foi montado entre o ventilador e o ciclone. Adotou-se montar o ciclone de modo que este operasse sobre pressão, ou seja, o ciclone foi montado no lado de pressão do ventilador. O ventilador utilizado possui motor, com rotação variável de 2.300 a 3.500 rpm, tendo uma variação da vazão de 0,290 a 0,475 m³/s. Como houve diferenças de arranjo de montagem, um esquema da instalação com o ciclone montado na posição invertida é mostrado na Fig. 4.2, e o ciclone montado na posição normal na Fig. 4.3.

4.2 - Campo de Velocidades no Interior do Ciclone

Para um entendimento mais profundo do processo de separação que ocorre no ciclone, existe uma necessidade de se conhecer melhor o escoamento dentro do ciclone, através da identificação dos gradientes de pressões e velocidades, e ainda as direções do fluxo.

Na revisão bibliográfica encontrou-se apenas os resultados experimentais de medições deste campo feitas por: Kelsal [21], o qual trabalhou com um hidrociclone cônico; os levantamentos de First et alii [47] para ciclones a gás; e as clássicas medições apresentadas por Ter Linden [23]. Porém cada autor trabalhou com um tipo diferente de ciclone, com proporções geométricas distintas, e velocidades e pressões na entrada diferentes. Entre os resultados dos três, existem diferenças significativas na distribuição do campo. Como o ciclone por nós construído possui configuração diferente dos demais ciclo

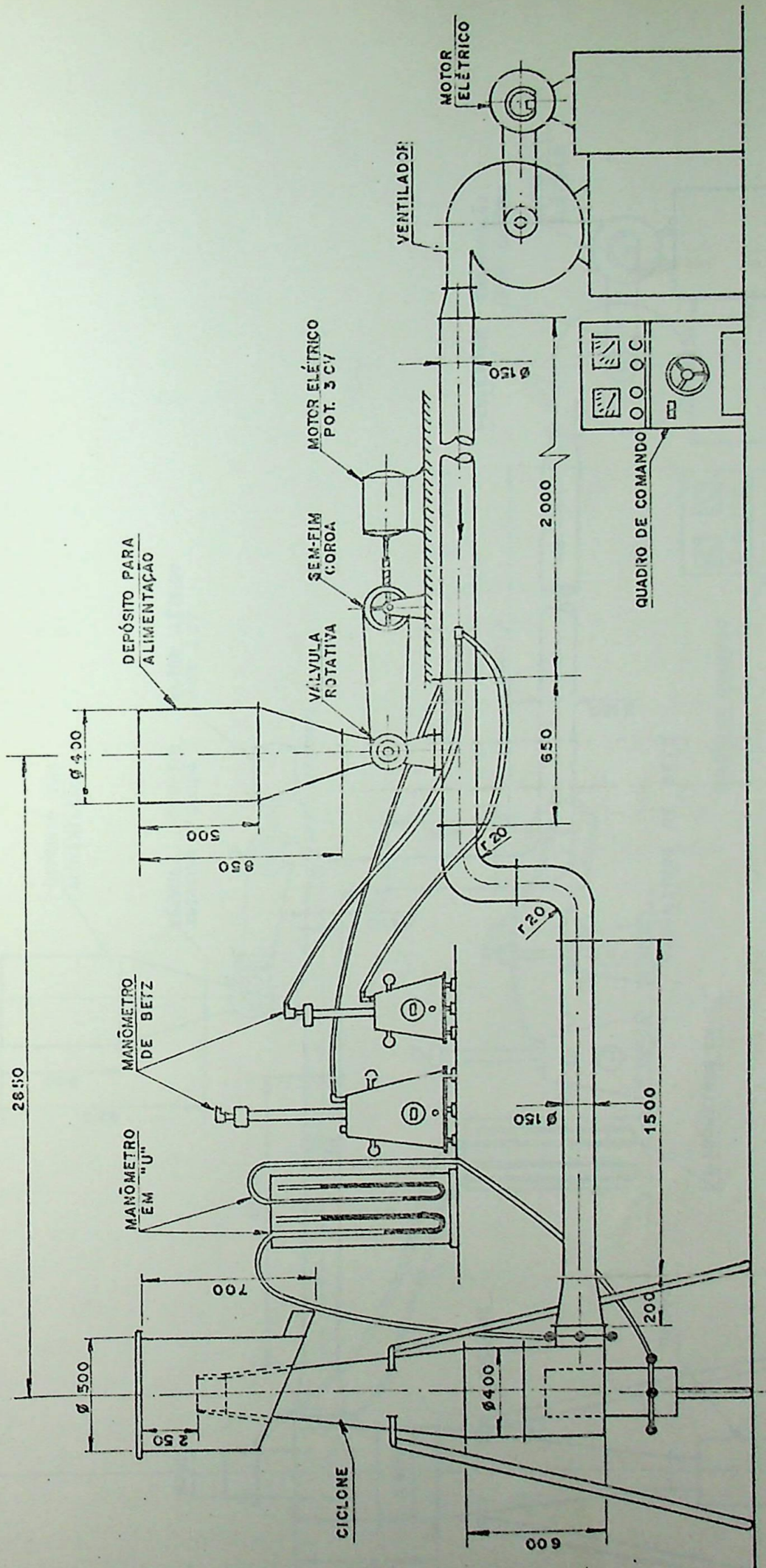


Fig. 4.2 - Esquema da instalação do Barco de Ensaio com o ciclone invertido.

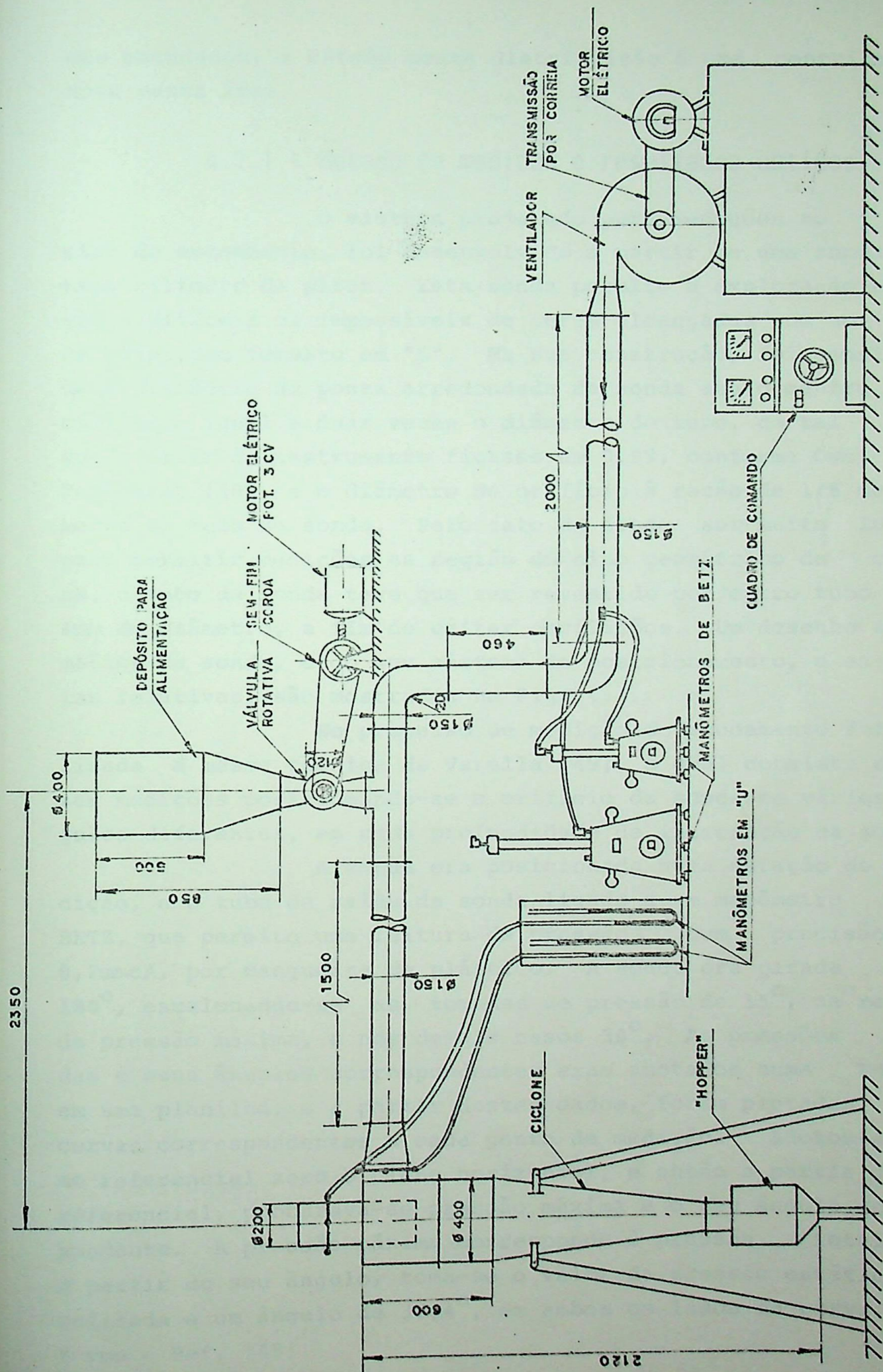


Fig. 4.3 - Esquema da instalação do Banco de Ensaios com o ciclone montado na posição normal.

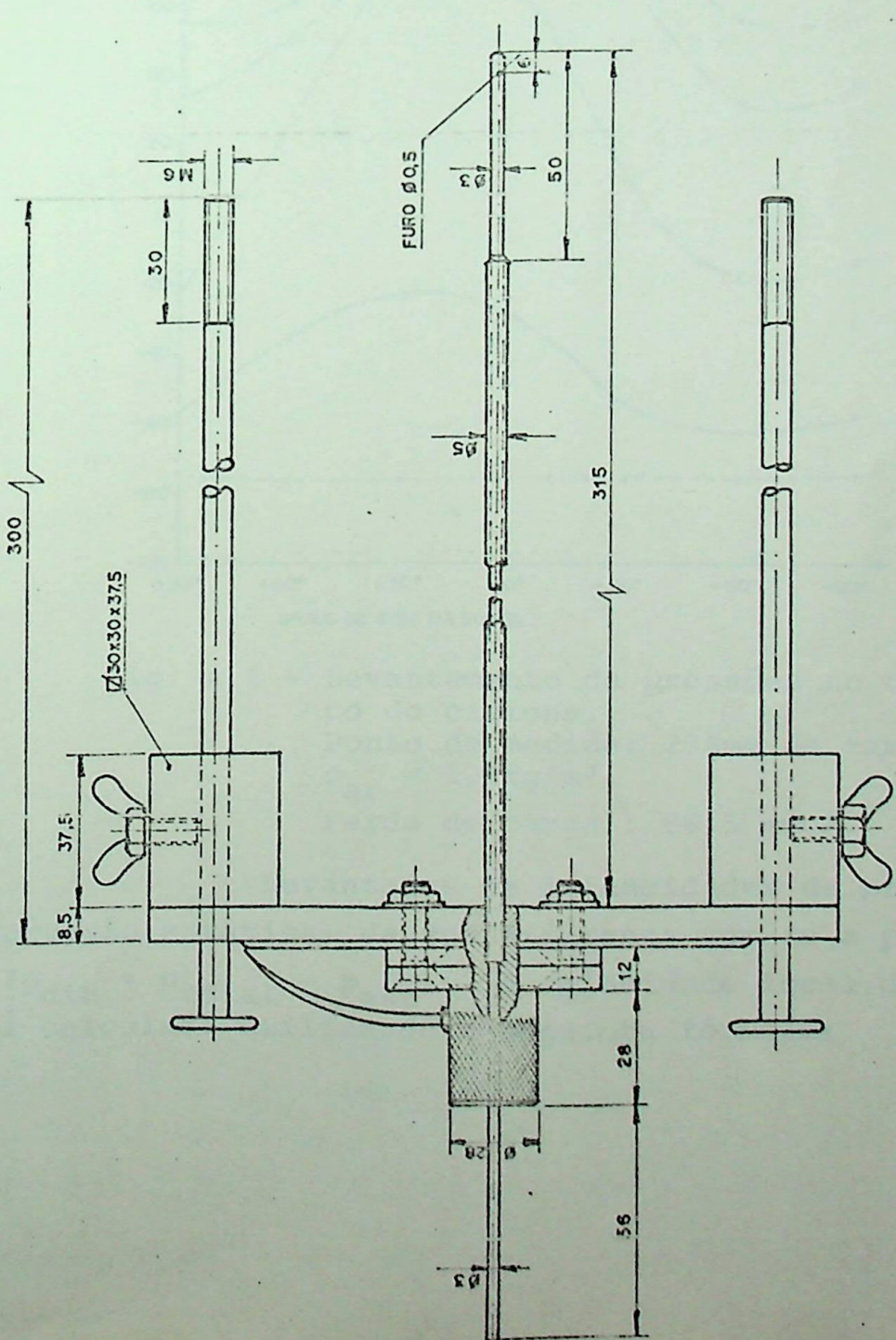
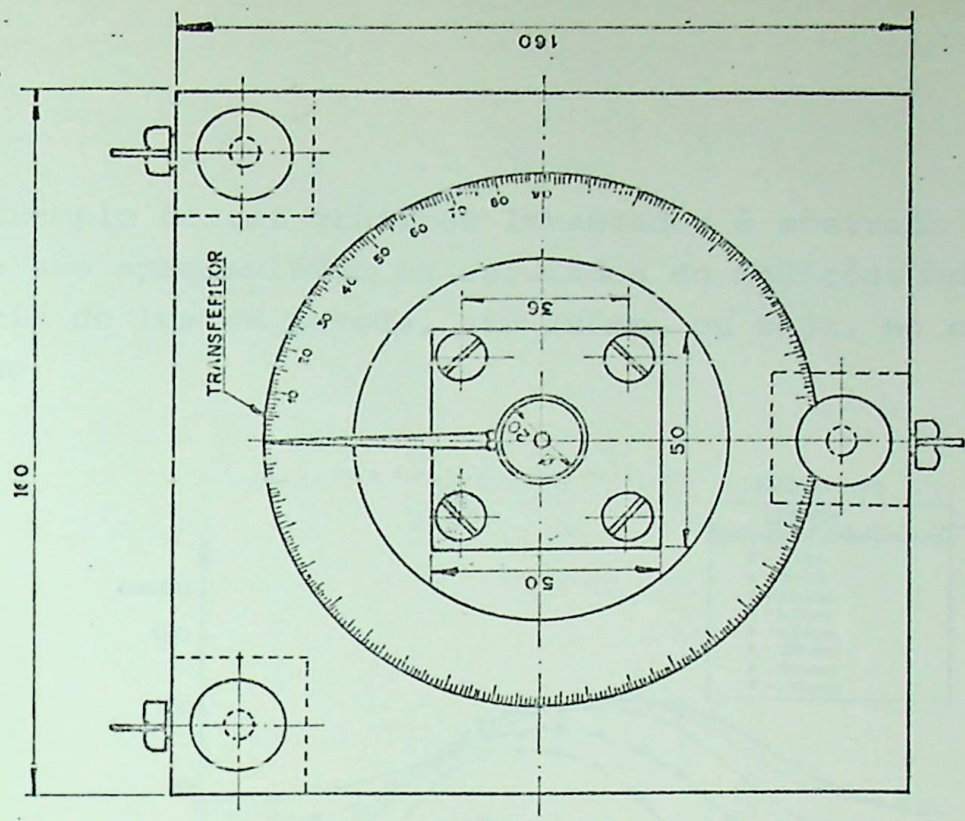
nes estudados, o estudo desta distribuição é uma contribuição nova nesta área.

4.2.1 - Método de medidas e resultados obtidos.

O sistema projetado para medições no interior do escoamento, foi desenvolvido a partir de uma sonda do tipo cilindro de pitot. Esta sonda permite a exploração em regiões difíceis ou impossíveis de serem alcançadas com um tubo de pitot, com formato em "L". Na sua construção, foi considerada a distância da ponta arredondada da sonda até o centro do orifício, igual a duas vezes o diâmetro do tubo, de tal modo que o fator do instrumento ficasse em 0,99, conforme Ower e Pankhurst [48], e o diâmetro do orifício à razão de 1/6 do diâmetro do tubo de sonda. Pelo fato da sonda ser muito longa, para permitir medições na região do eixo geométrico do ciclone, o tubo da sonda teve que ser revestido por outro tubo com 6mm de diâmetro, a fim de evitar oscilações. Um desenho esquemático da sonda, e do seu sistema de posicionamento, e as cotas relativas, são mostradas na Fig. 4.4.

No processo de medição do escoamento foi utilizada a mesma técnica de Varella [49], a qual consiste em fazer medições posicionando-se o orifício da sonda em vários ângulos diferentes, em cada profundidade de introdução da sonda.

A sonda era posicionada numa estação de medição, e o tubo de saída da sonda ligado a um manômetro de BETZ, que permite uma leitura de pressão com precisão de 0,2mmcA, por mangueira de plástico. A sonda era girada em 180° , escalonando-se as tomadas de pressão de 15° , na região da pressão máxima, e nos demais casos 30° . As pressões medidas e seus ângulos correspondentes eram anotados numa Tabela em uma planilha, e a partir destes dados, foram plotadas as curvas correspondentes a cada ponto de medição. Adotou-se como referencial zero o plano horizontal, e então a partir deste referencial, procurava-se pressão máxima e o seu ângulo correspondente. A pressão máxima corresponde à pressão total, e a partir do seu ângulo, toma-se o valor da pressão estática localizada a um ângulo de $36,4^{\circ}$, em ambos os lados da curva, conforme a Ref. [48].



SONDA CILINDRO DE PITOT

Fig. 4.4 - Esquema do sistema de medição construído.

Um exemplo destes gráficos levantados é mostrado na Fig. 4.5 , onde são apresentados os resultados de medições feitas a uma distância de 1mm da parede, até 200mm, ou seja, no centro do ciclone.

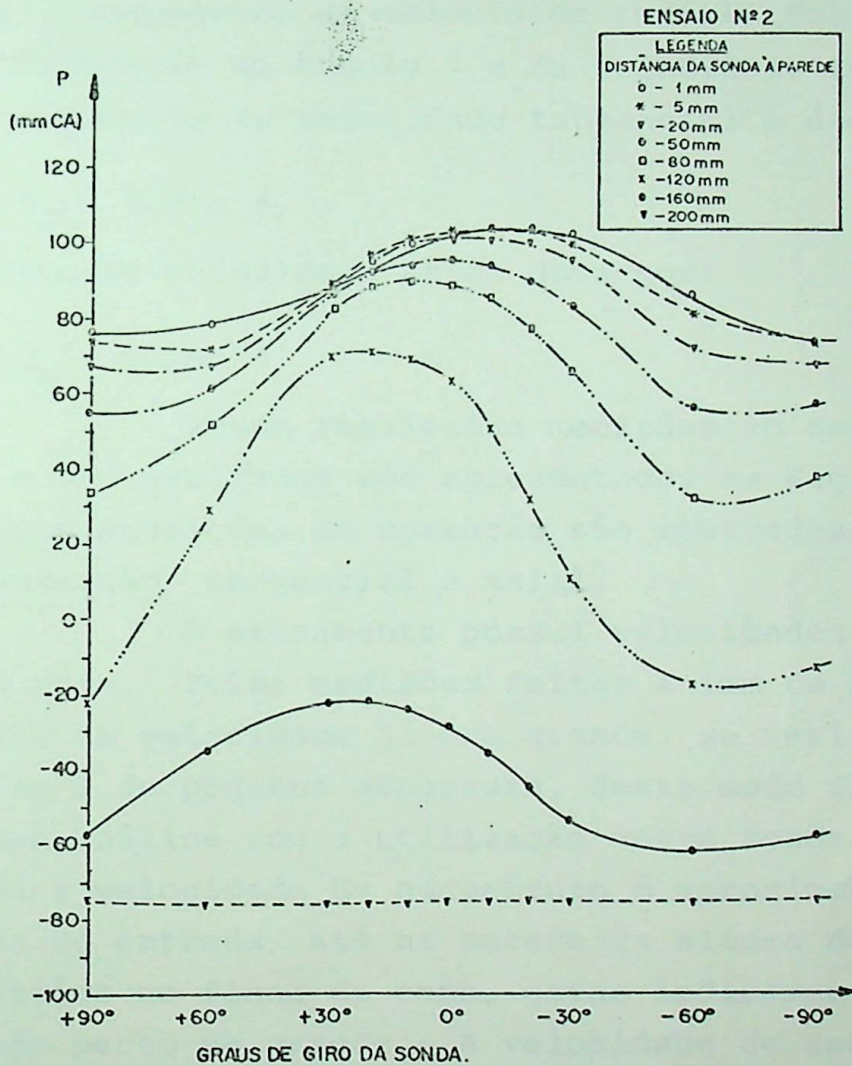


Fig. 4.5 - Levantamento de pressões no corpo cilíndrico do ciclone.
 Ponto de medida: 295mm da tampa; $V_e=15\text{m/s}$;
 $\rho_{\text{ar}} = 1,1\text{kg/m}^3$.
 Perda de carga : 66,5 mmCA.

Levantadas as intensidades da pressão total e da pressão estática, da sua diferença tem-se a pressão dinâmica ($p_{\text{din}} = p_{\text{total}} - p_{\text{est}}$). A velocidade local do escoamento foi calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$V = \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{\text{man}}}{\rho_{\text{ar}}} g \cdot \Delta h} \quad (4.1)$$

onde: $\Delta h = p_{\text{din}}$

O cálculo das componentes de velocidade, desprezando-se a componente de velocidade radial, foi feito a partir da identificação do ângulo δ e da velocidade local de escoamento. A componente de velocidade tangencial é dada por:

$$U_T = V \cdot \cos \delta, \quad (4.2)$$

e a componente de velocidade axial dada por:

$$U_a = V \cdot \sin \delta \quad (4.3)$$

Foram realizadas medições em sete estações de medida, e os resultados são apresentados na Fig. 4.6, onde para as mesmas condições de operação são mostradas as velocidades: do escoamento, tangencial e axial.

O escoamento possui velocidades diferentes ao longo do raio. Pelas medições feitas a 1mm da parede, nas quais o valor da velocidade já era grande, se verificou que a camada limite é de pequena espessura, deste modo fica impossível fazer uma análise com a utilização desta sonda. Bem próximo da parede a velocidade de escoamento é aproximadamente igual à velocidade de entrada, até na metade da altura do cone. Realizando medições no final do cone, estas indicaram uma elevação da velocidade perto da parede. A velocidade de escoamento é crescente até a região central, atingindo o seu valor máximo num diâmetro $\approx 0,77 D_e$, vindo a decrescer em seguida até zero.

A componente de velocidade tangencial conforme os resultados obtidos obedece realmente a distribuição do vórtice livre, Eq. 3, até o valor de $U_{T\text{máx}}$, porém a partir daí como U_T decresce, o escoamento seria regido por outro tipo de vórtice. Do mesmo modo que a velocidade de escoamento, a componente de velocidade tangencial é máxima num cilindro central de diâmetro também aproximadamente $0,77 D_e$. A velocidade tangencial a partir daí diminui na direção do centro, onde o seu valor é zero inclusive na região do cone. Pode-se afirmar a partir destes resultados que existem dois tipos de vórtices no esco

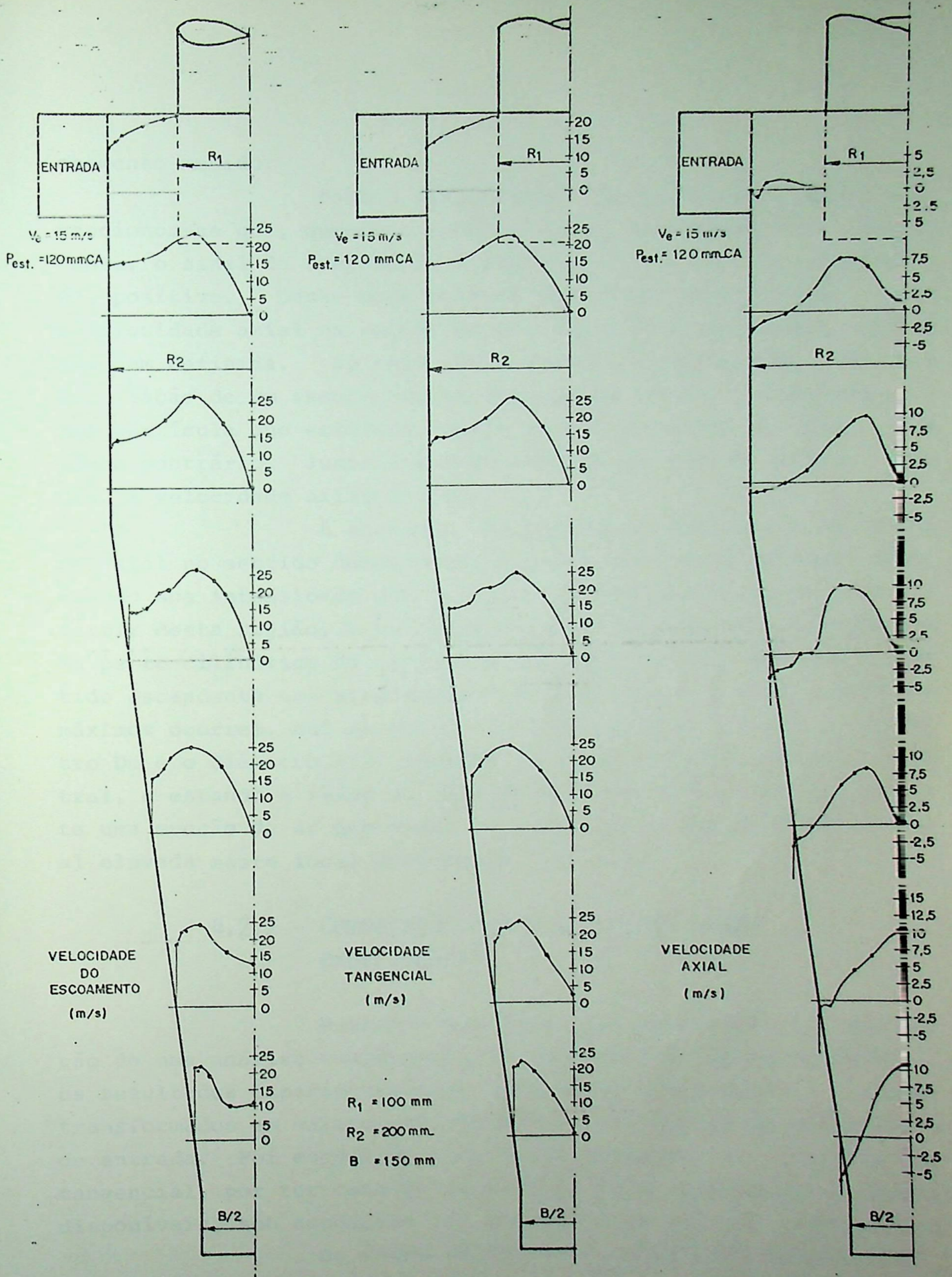


Fig. 4.6 - Distribuição de velocidades no interior do ciclone.

coamento medido.

Para o levantamento da velocidade axial, mencionou-se que, quando o sentido desta velocidade for descendente, o sinal da componente é negativo, e quando for ascendente, positivo. Deste modo podemos verificar na Fig. 4.6, que a velocidade axial na região de entrada ainda não possui direção bem definida. No raio médio a direção ascendente implica na criação de um escoamento na direção da tampa. Neste caso, uma partícula que estivesse nesta região tenderia a subir, e não o contrário. Junto à parede externa do tubo de saída do gás, a velocidade axial é zero.

À excessão da região de entrada, a velocidade axial no sentido descendente é maior próximo à parede, diminuindo sua intensidade até a região de velocidade axial zero. A partir desta região, a velocidade axial toma sentido ascendente. Na parte cilíndrica do ciclone a velocidade axial adquire o sentido ascendente nas proximidades do raio médio e seus valores máximos ocorrem, até na metade superior do cone, entre o diâmetro D_e e o diâmetro $B/2$. Devido ao vácuo criado na região central, e estando a saída da fase sólida aberta à atmosfera, existe uma sucção de ar que mesmo no centro cria uma velocidade axial elevada neste local conforme a Fig. 4.6.

4.2.2 - Comparação com outros resultados experimentais

Buscando uma forma que permitisse a realização de uma análise comparativa da distribuição de velocidades, os resultados experimentais de velocidade tangenciais foram transformados em valores adimensionais, em função da velocidade de entrada. Foi escolhida para as comparações, a velocidade tangencial, por ter esta velocidade um maior número de dados disponíveis, sob condições que permitem uma análise comparativa.

Os dados relativos à velocidade tangencial, foram tomados na região situada abaixo do tubo de saída do gás. Em relação à tampa do ciclone, os pontos de medição são relativamente próximos. Porém os ciclones estudados tem relações geométricas construtivas diferentes.

Em nosso trabalho experimental, o ciclone u tilizado possui as seguintes relações geométricas construtivas:

$D_e/D_c = 0,5$; $h/D_c = 1,5$; $H/D_c = 4,0$. No trabalho de Ter Linden [23], as relações utilizadas foram:

$D_e/D_c = 0,34$; $h/D_c = 0,71$; $H/D_c = 2,0$. O trabalho de First et alii [47] foi desenvolvido em um ciclone com diametro $D_c = 570\text{mm}$.

De posse de todos os dados, transformou - se a velocidade tangencial na relação $(U_T/V_e \times 100)$, e o raio do ponto de medida em $(r_g/R_2 \times 100)$. Os valores adimensionais fo ram plotados em gráfico, conforme mostrado na Fig. 4.7. No eixo de $(r_g/R_2 \times 100)$, o ponto correspondente à parede do ciclone é representado por 0%, e o eixo geométrico do ciclone por 100%.

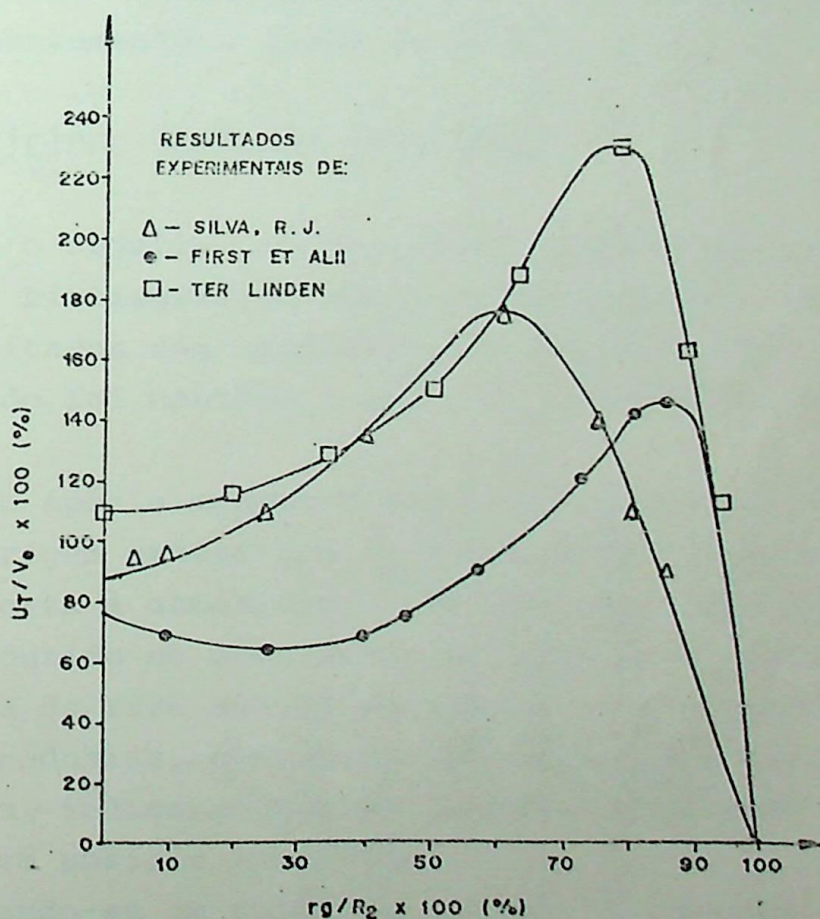


Fig. 4.7 - Comportamento da velocidade tangencial para diferentes ciclones.

Pode-se verificar claramente pela Fig. 4.7 que geometrias diferentes levam a uma distribuição de velocidade distintas, donde se pode afirmar que ciclones diferentes tem

comportamentos diferentes. Com o diâmetro D_e menor, nota-se que a localização da $U_{Tm\acute{a}x}$ tende-se a deslocar para o centro, e a distribuição de U_T ao longo do raio tende a ser mais suave. Comparando nossos resultados com os de Ter Linden [23], verificamos que, no primeiro caso $U_{Tm\acute{a}x} = 2,07 \times U_{Tparede}$, e nos resultados alcançados por ele, $U_{Tm\acute{a}x} = 2,09 \times U_{Tparede}$. Porém até 40% de distância da parede, a inclinação de nossa curva tende a ser mais acentuada.

A maior perda de carga do ciclone de Ter Linden pode ser devido ao fato da velocidade tangencial ser bem maior na região do tubo de saída do gás. Strauss [17] cita estudos de vários autores, os quais afirmam que a alta concentração de sólidos modifica os perfis de velocidade nesta região, onde ocorreriam as maiores perdas de carga no ciclone, reduzindo U_T , e conseqüentemente a perda de carga.

4.3 - O Ciclone Operando Invertido

Com o objetivo de verificar se os relatos encontrados na revisão bibliográfica sobre o funcionamento do ciclone invertido, e citados nos capítulos 2 e 3 são verdadeiros, o ciclone construído foi montado invertido, e ensaiado nesta posição.

Logo após a montagem foi feito um teste preliminar, utilizando serragem grossa com $\rho_p = 520 \text{ kg/m}^3$, com a saída da fase sólida aberta à atmosfera. Verificou-se que quase todo material introduzido no escoamento através da válvula rotativa, saía pela saída da fase sólida em espiral de raio crescente. Da quantidade introduzida, apenas uma pequena parte saiu pelo tubo de saída do gás, indicando que realmente é possível trabalhar com o ciclone em posição invertida.

Levando-se em conta que, todos os estudos anteriormente realizados por diversos pesquisadores, e também que na totalidade das montagens de ciclones industriais comumente encontrados, trabalham com o "hopper" herméticamente fechado. Optou-se então pela construção de um depósito para coleta das partículas com o ciclone invertido, também herméticamente fechado. Este depósito foi construído com fundo cônico, de modo que as partículas que deixassem o escoamento de ar, caíssem e toassem

recolhidas num saco para posterior pesagem. Convém salientar que o fato do depósito ser fechado, deverá haver variações no comportamento do ciclone. Porém para se comparar o mesmo sob iguais condições de operação, este tipo de procedimento é o ideal.

Os ensaios para verificação de eficiência foram realizados de acordo com a seguinte definição de eficiência total, η_T :

$$\eta_T = \frac{\text{quantidade de material separada no ciclone}}{\text{quantidade de material introduzida no ciclone}}$$

Com todos os componentes do banco montados, realizou-se um ensaio preliminar, utilizando Cimento Portland comum cuja distribuição granulométrica é apresentada na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Distribuição granulométrica do Cimento Tipo: Cimento Portland comum

TAMANHO DA PARTÍCULA (μm)	% EM PESO	TAMANHO DA PARTÍCULA (μm)	% EM PESO
104,0	4	15,0	14
75,0	4	10,0	10
60,0	6	7,5	12
40,0	7	5,0	14
30,0	12	2,5	8
20,0	9	TOTAL	100%

Neste ensaio ocorreram vazamentos de ar em alguns pontos da tampa do ciclone, junto ao canal de entrada, e também na tampa do depósito. Com isto o resultado obtido neste ensaio foi uma eficiência de 22,4%, para as condições de operação apresentadas na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 - Dados do Ensaio nº 1

POSIÇÃO DO CICLONE: INVERTIDA	
MATERIAL UTILIZADO: CIMENTO PORTLAND COMUM	
Alimentação: 88 g/s	P_{bar} : 686 mmHg
$P_{est.vent.}$: 163 mmCA	T_{amb} : 18°C
Q : 0,305 m ³ /s	
V_e : 16,30 m ³ /s	
ρ_p : 1700 kg/m ³	Massa de Sólidos
ρ_f : 1,12 kg/m ³	Introduzida: 4920 gramas
Co : 290 g/m ³	Separada : 1100 gramas
	η_T : 22,4%

C baixo rendimento verificado não pode ser tomado como referencial preciso do comportamento do ciclone, em função dos vazamentos verificados, e também devido ao fato de que, parte das 3920 gramas não separadas ficou retida na região de entrada do ciclone. Ao ser retirada a tampa do ciclone, verificou-se que o material depositado formou uma cunha em hélice.

Uma vez sanados todos os problemas de vedação, realizou-se novo ensaio, com uma velocidade de entrada maior, a fim de evitar o assentamento de partículas na região de entrada. Para a mesma regulagem anterior da válvula rotativa, o aumento da vazão para uma mesma alimentação, reduziu a Co . Neste caso, houve uma melhoria significativa da eficiência, conforme os resultados apresentados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 - Dados do Ensaio nº 2

POSIÇÃO DO CICLONE: INVERTIDA	
MATERIAL UTILIZADO: CIMENTO PORTLAND COMUM	
Alimentação: 88 g/s	P_{bar} : 685 mmHg
$P_{est.vent.}$: 283 mmCA	T_{amb} : 15,5°C
Q : 0,428 m ³ /s	
V_e : 22,9 m/s	
ρ_p : 1700 kg/m ³	Massa de Sólidos
ρ_f : 1,14 kg/m ³	Introduzida: 4820 gramas
Co : 212 g/m ³	Separada : 3100 gramas
	η_T : 64,3%

Novamente ocorreu a deposição de material na região de entrada, com o formato de uma cunha. A partir da ocorrência deste fato, foi estudado um modo de nos ensaios seguintes se medir esse material depositado. Isto é para se ter uma melhor idéia de qual seria a eficiência real do material arrastado pelo vórtice.

Por ser a parte do cimento não separado, composta de partículas muito finas, o filtro colocado na saída do tubo de saída do gás, permitiu a passagem de grande parte delas para a atmosfera. Com isto, resolvemos realizar apenas mais um ensaio utilizando cimento, e chegou-se aos seguintes resultados apresentados na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 - Dados do Ensaio nº 3

POSIÇÃO DO CICLONE: INVERTIDA	
MATERIAL UTILIZADO: CIMENTO PORTLAND COMUM	
Alimentação: 88 g/s	P_{bar} : 686 mmHg
$P_{est.vent}$: 313 mmCa	T_{amb} : 16°C
Q : 0,412 m ³ /s	
V_e : 22 m/s	Massa de Sólidos
ρ_p : 1700 kg/m ³	Introduzida: 4800 gramas
ρ_f : 1,14 kg/m ³	Separada : 2690 gramas
C_o : 213 g/m ³	Acumulada tampa: 1380 gramas
ΔP_{vazio} : 119 mmCA	η_T : 56%
ΔP_{carga} : 70 mmCa	η_R : 78,6%

Foi introduzido na Tabela 4.4, uma eficiência relativa η_R , a qual definiu-se como:

$$\eta_R = \frac{\text{massa de material separada}}{\text{massa Introduzida} - \text{massa acumulada}}$$

Com base nos resultados apresentados, já se pode concluir preliminarmente que, uma velocidade de entrada maior contribui para melhorar a eficiência do ciclone, operando invertido. No terceiro ensaio verificou-se o efeito da concentração na perda de carga do ciclone. A redução na perda de carga para o

ciclone operando a vazio e com uma concentração de 213 g/m^3 , foi de 41,2%. Este valor estaria de acordo com encontrados por Drijver, e de Shepherd e Lapple, citados na Ref. [1]. Estes autores afirmam que a perda de carga sofre uma redução substancial com o aumento da concentração.

Com o ciclone ainda na posição invertida realizamos uma série de quatro ensaios utilizando areia e nove ensaios utilizando serragem. Nestes ensaios variou-se a largura de entrada b , a velocidade de entrada, e verificou-se o comportamento da perda de carga com o ciclone a vazio e com carga.

Os resultados dos ensaios utilizando areia são apresentados na Tabela 4.5, e os resultados obtidos utilizando serragem na Tabela 4.6. As distribuições granulométricas da areia utilizada nos ensaios e também da serragem, são apresentadas na Tabela 4.7.

Nos ensaios com areia (Tabela 4.5), o baixo rendimento verificado pode ser explicado pelo fato da velocidade de entrada ser muito baixa. Isto implica que, no campo de velocidades no interior do ciclone a componente de velocidade axial será conseqüentemente reduzida. Como a velocidade exigida para o arraste das partículas maiores é bem maior que aquelas existentes no campo de velocidades na posição invertida, houve a deposição de partículas na tampa do ciclone.

Verificou-se nestes ensaios que, o ciclone operando invertido somente conseguiu separar a areia de granulometria mais fina. Neste caso, o ciclone funcionou como um separador de granulometria, sendo que o material grosseiro se depositou na tampa, e os finos foram separados.

A eficiência verificada no ensaio nº 1 (Tabela 4.5), mostra claramente que a granulometria influi no desempenho do ciclone. Se o material utilizado possuir maior ρ_p , para que a eficiência com o ciclone invertido seja razoável, é necessário que $d_{p_{\text{máx}}}$ seja pequeno, e a velocidade de entrada maior.

Trabalhando com serragem, verificou-se a influência da velocidade de entrada e da largura b sobre a eficiência. No ensaio nº 1, com $V_e = 18,9 \text{ m/s}$ e $b = 0,08 \text{ m}$, a eficiência encontrada foi $\eta_T = 52\%$. Variando a velocidade para $V_e = 23,9 \text{ m/s}$ e

TABELA 4.5

Resultados experimentais dos ensaios realizados com o ciclone operando na posição invertida.

MATERIAL	Ensaio nº	Tipo de granulometria	P_{bar} (mmHg)	$T_{ambiente}$ (°C)	$P_{est.ventila-}$ dor (mmCA)	P_F (kg/m ³)	P_p (kg/m ³)	Vazão mássica de sólidos (g/s)	Vazão de ar Q (m ³ /s)	V_e (m/s)	C_o (g/m ³)	Δp vazio (mmCA)	Δp carga (mmCA)	Massa de sólidos introduzidos (gramas)	Massa de sólidos separados (gramas)	Massa de sólidos acumulada (gramas)	η_R (%)	η_I (%)
A R E I A	1	Fina	685	15,5	185	1,12	1420	78	0,370	19,8	210	-	-	5000	2280	-	-	45,6
	2	Gros-seira	686	18,0	232	1,123	1420	78	0,431	23,0	180	-	-	5000	940	3980	92,2	18,8
	3	Gros-seira	686	18,0	338	1,15	1420	78	0,474	25,3	164	-	-	4180	860	3270	94,5	20,6
	4	Gros-seira	686	15,5	291	1,13	1420	92	0,369	28,4	249	180	128	2000	350	1610	89,7	17,6

(1) A areia foi peneirada de modo a trabalharmos com finos menores que 300 μm (48 mesh per in).

(2) Seção de entrada a = 0,197 m; b = 0,098 m.

(3) Seção de entrada a = 0,197 m; b = 0,077 m.

(4) Houve acúmulo de areia, porém este não foi pesado.

TABELA 4.6

Resultados experimentais dos ensaios realizados com o ciclone operando na posição invertida.

Ensaio nº	Tipo de distribuição granulométrica.	P _{bar} (mmHg)	T _{ambiente} (°C)	P _{est.ventilador} (mmCA)	P _r (kg/m ³)	P _p (kg/m ³)	Vazão Mássica de Sólidos (g/s)	Vazão de ar (Q _{m³/s})	Ve (m/s)	Co (g/m ³)	Δp vazio (mmCA)	Δp carga (mmCA)	Massa de Sólidos introduzidos (gramas)	Massa de Sólidos separados (gramas)	Massa de Sólidos acumulados (gramas)	n _R (%)	n _I (%)	largura b (m)
1	Grosseira	686	18	203	1,12	510	92	0,364	18,9	252	112	-	5800	3020	-	52,0	0,098	
2	Média ¹	686	16	225	1,13	510	92	0,363	23,9	253	143	115	1500	1160	-	77,0	0,077	
3	Média	686	18	275	1,13	510	92	0,409	27,0	224	179	135	1500	1480	-	98,0	0,077	
4	Média	686	18	287	1,13	510	92	0,386	29,7	238	185	140	1500	1490	-	99,0	0,066	
5	Média	686	18	224	1,12	510	92	0,333	25,2	276	147	106	1500	1240	-	82,7	0,066	
6	Média	686	20	280	1,12	510	92	0,398	30,6	231	190	155	2000	1940	-	97,0	0,066	
7	Grosseira	686	22	219	1,106	510	92	0,353	27,2	260	148	115	2000	1960	-	98,0	0,066	
8	Grosseira	686	21	139	1,10	510	92	0,285	21,9	322	88	36	1940	420	1140	52,5	21,6	0,066
9	Média	686	20	165	1,10	510	92	0,322	24,8	285	106	60	2940	1650	670	73,0	56,0	0,065

(1) A serragem foi peneirada de modo a se ter apenas finos menores que 100 μm.

TABELA 4.7 - Distribuição Granulometria em Peso.

AREIA		SERRAGEM	
dp	% em peso	dp	% em peso
1100	6	1100	13
800	6	800	8
600	7	600	10
450	9	450	9
300	11	300	11
150	9	150	10
75	12	75	9
60*	8	60*	7
40	10	40	8
30	8	30	5
20	6	20	6
10	4	10	3
5	5	5	2
TOTAL	100%	TOTAL	100%

* Os valores abaixo de 75 μm (200 mesh per in) foram adotados a partir das distribuições granulométricas apresentadas na Ref. [29].

$b = 0,077\text{m}$, $\eta_T = 77\%$. Mantendo $b = 0,077$ e alterando $V_e = 27\text{m/s}$ chegou-se a $\eta_T = 98\%$. Deste modo a velocidade de entrada se mostrou como um parâmetro importantíssimo no aumento da eficiência do ciclone invertido, seguido da largura b .

Analisando o comportamento da perda de carga no ciclone, conforme os resultados apresentados nos ensaios (Tabela 4.6), verificou-se que a concentração de sólidos acarreta uma diminuição da perda de carga. Nota-se ainda que uma pequena variação na concentração é sentida na perda de carga. Os resultados encontrados estão próximos àqueles encontrados por Yuu et alii [44] e Sproull [45], e citados no item 3.6.11.

4.4 - O Ciclone Operando na Posição Normal

O ciclone foi montado na posição normal conforme o esquema mostrado na Fig. 4.3, e ensaiado utilizando-se areia e serragem. Os resultados experimentais dos ensaios com areia são apresentados na Tabela 4.8, e os ensaios utilizando serragem são apresentados na Tabela 4.9.

Nos ensaios de 1 a 4, utilizando-se areia, e nos quais foram mantidos constantes os parâmetros construtivos do ciclone, verificou-se que: para concentrações maiores de material, a despeito da diminuição da velocidade a eficiência aumenta; para concentrações próximas, e velocidades diferentes, a eficiência melhora para velocidades maiores. Quanto à perda de carga medida nos ensaios 2, 3 e 4, verificou-se uma redução média na Δp , em torno de 45%, para concentrações entre 285 e 420 g/m^3 .

Nos ensaios 5, 6 e 7, se verifica que uma maior profundidade do tubo de saída do gás melhora a eficiência do ciclone. A diminuição da altura da parte cilíndrica, juntamente com uma diminuição da concentração de sólidos, diminui a eficiência. De um modo geral, devido o ciclone ser de alta eficiência, e utilizar areia com um ρ_p alto, e diâmetro de partículas maiores, a eficiência neste caso, apresentou valores elevados, o que dificultou a comparação entre os resultados.

Nos ensaios utilizando serragem (Tabela 4.9), verificou-se que em condições de operação quase idênticas, a eficiência aumenta com o aumento da profundidade do tubo de saída do

TABELA 4.8

Resultados experimentais dos ensaios realizados com o ciclone operando na posição normal.

Ensaio nº	Distribuição granulométrica	P _{bar} (mmHg)	T _{ambiente} (°C)	P _{est.ventilador} (mmCA)	P _f (kg/m ³)	P _p (kg/m ³)	Vazão Mássica de sólidos (g/s)	Vazão de ar Q (m ³ /s)	V _e (m/s)	C _c (g/m ³)	Δp vazio (mmCA)	Δp carga (mmCA)	Massa de sólidos introduzidos (gramas)	Massa de sólidos separados (gramas)	η t (%)	a (m)	b (m)	h (m)	s (m)	H (m)	MATERIAL
1	Média	684	22	196	1,10	1420	78	0,308	23,7	253	-	-	4880	4810	98,6	0,197	0,066	0,6	0,24	1,6	
2	Média	680	20	154	1,10	1420	108	0,256	19,7	420	88	46	4580	4540	99,0	0,197	0,066	0,6	0,24	1,6	
3	Média	680	20	245	1,10	1420	108	0,342	26,3	315	136	76	4580	4520	98,0	0,197	0,066	0,6	0,24	1,6	
4	Média	680	20	305	1,11	1420	108	0,378	29,0	285	170	96	4620	4605	99,6	0,197	0,066	0,6	0,24	1,6	
5	Grossel _{ra}	678	24	241	1,09	1420	108	0,312	24,0	346	136	66	4620	4600	99,6	0,197	0,066	0,6	0,31	1,6	
6	Grossel _{ra}	679	24	125	1,08	1420	108	0,284	21,8	380	71	32	4500	4480	99,6	0,197	0,066	0,6	0,2	1,6	
7	Grossel _{ra}	679	24	156	1,08	1420	108	0,251	19,4	430	91	-	4500	4495	99,8	0,197	0,066	0,6	0,382	1,6	
8	Grossel _{ra}	680	24,5	133	1,078	1420	108	0,285	14,7	379	75	33	4500	4490	99,7	0,197	0,098	0,6	0,382	1,6	
9	Grossel _{ra}	681	24	116	1,079	1420	28	0,258	13,4	108	70	-	3700	3660	98,9	0,197	0,098	0,352	0,382	1,352	

TABELA 4.9

Resultados experimentais dos ensaios realizados com o ciclone operando na posição normal.

MATERIAL	Ensaio nº	Distribuição granulométrica	P _{bar} (mmHg)	T _{ambiente} (°C)	P _{est. Ventilador} (mmCA)	P _F (kg/m ³)	P _p (kg/m ³)	Vazão de alim. de sólidos. (g/s)	Vazão de ar Q (m ³ /s)	Ve (m/s)	Co (g/m ³)	Δp vazão (mmCA)	Δp carga (mmCA)	Massa de sólidos introduzidos (gramas)	Massa de sólidos separados (gramas)	ηt (%)	a (m)	b (m)	h (m)	S (m)
S E R R A G E M	1	Média	678	24	149	1,08	510	37	0,257	19,8	144	88	59	2000	1250	62,5	0,197	0,066	0,600	0,382
	2	Grosseira	678	24	145	1,08	510	37	0,248	19,1	149	92	60	2000	1990	99,5	0,197	0,066	0,600	0,310
	3	Fino	678	24	156	1,08	510	37	0,252	19,4	146	87	78	1990	800	40,2	0,197	0,066	0,600	0,200
	4	Grosseira	680	25	153	1,08	510	37	0,246	18,9	150	82	60	2100	2060	98,1	0,197	0,066	0,600	0,230
	5	Grosseira	680	25	152	1,08	510	37	0,251	19,4	147	87	75	2100	2090	99,5	0,197	0,066	0,600	0,310
	6	Média	679	24	124	1,07	510	37	0,285	14,8	130	70	48	2000	1940	97,0	0,197	0,098	0,600	0,382
	7	Média	679	24	155	1,08	510	37	0,252	19,4	147	89	78	2100	2080	99,0	0,197	0,066	0,600	0,382
	8	Média	679	24	137	1,07	510	37	0,287	18,9	128	71	50	2000	1980	99,0	0,197	0,077	0,600	0,382

gás, e também com a granulometria, conforme os ensaios de 1 a 3. Nos ensaios 4 e 5, verificando somente o comportamento da eficiência com a profundidade, o seu aumento acarreta uma melhoria da eficiência. A variação da largura b , e a conseqüente variação da Ve , para uma mesma vazão, influencia a eficiência, de modo a aumentá-la, quando diminuída a largura b .

Quanto a perda de carga, nos ensaios com serragem a redução foi de cerca de 11%, no ensaio nº 3 onde se utilizou serragem fina, e variou até uma redução de 35% no ensaio nº 2, com serragem grosseira. A concentração média utilizada nestes ensaios ficou em torno de 140 g/m³.

Nota-se que as dimensões das partículas acarretam um aumento maior na perda de carga. Este efeito cremos merccc ain da uma atenção especial, de modo a se realizar um estudo mais aprofundado nesta área.

Em geral os resultados experimentais se mostraram bastante coerentes com dados teóricos obtidos, e isto pode ser analisado mais claramente a partir dos ensaios em que se trabalhou com serragem.

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - Conclusões

Baseado nos resultados teóricos obtidos através de simulações em computador, em resultados obtidos experimentalmente em ensaios por nós realizados, e afirmações de autores encontradas na revisão bibliográfica realizada, chegou-se às seguintes conclusões.

Dos resultados teóricos e da revisão bibliográfica conclui-se o seguinte:

- A eficiência de ciclones semelhantes diminui quando se aumenta o diâmetro do ciclone D_c , para condições idênticas de operação. A perda de carga neste caso permanecerá praticamente constante.

- A forma da seção de entrada do ciclone contribui para um melhor desempenho. Ciclones com entrada em voluta externa são mais eficientes que os demais tipos, e possuem baixa perda de carga. Ciclones com entrada em voluta semi-externa possuem alta eficiência, porém possuem uma alta perda de carga. Os ciclones com entrada direta são menos eficientes e devem trabalhar com velocidades menores, pois devido a existência de vórtices secundários na entrada, estes geram altas perdas de carga.

- O diâmetro do tubo de saída do gás D_e , quando diminuído na relação D_e/D_c , acarreta uma melhoria na eficiência do ciclone, porém aumenta a sua perda de carga. A variação da perda de carga é muito mais sensível do que a variação da eficiência, para variações de D_e/D_c . Os resultados experimentais de Kreft et alii [42], comprovam esta afirmação.

- O diâmetro de saída da fase sólida B, não tem influência sobre a eficiência e a perda de carga no ciclone. Sua escolha fica basicamente condicionada a problemas de obstrução nesta saída.

- A eficiência e a perda de carga num ciclone sofrem uma redução, quando a temperatura do gás de trabalho é aumentada devido à diminuição da viscosidade do gás. O que foi comprovado experimentalmente conforme Ref. [42].

- Para velocidades de entrada do gás constantes, o aumento da altura do canal de entrada a, faz diminuir a eficiência e aumentar a perda de carga.

Com base nos resultados teóricos e resultados experimentais conseguidos no banco de ensaios, pode-se concluir o seguinte.

- Mantendo-se constante a velocidade de entrada, o aumento da largura do canal de entrada b, através do aumento da relação b/Dc , tem como consequência uma diminuição da eficiência e um aumento da perda de carga. Experimentalmente, pode-se confirmar o aumento da eficiência quando da redução de b, conforme visto na Tabela 4.6.

- Na análise da influência da profundidade do tubo de saída S, existem algumas considerações a serem observadas. A retirada do tubo em ciclones com entrada em voluta externa, ocasiona pequena diminuição na eficiência de separação, sendo porém sensível em outros tipos de ciclones. De uma maneira geral, a profundidade do tubo deverá ser maior que a altura a, a fim de evitar a ocorrência de "curto-circuito". Até a relação ensaiada de $S/Dc = 0,955$, o aumento da profundidade do tubo de saída melhorou a eficiência, sem causar alterações sensíveis na perda de carga. Isto pode ser verificado experimentalmente conforme Tabela 4.9.

- Uma variação na altura da parte cilíndrica h, ou na altutotal do ciclone H, será sentida na variação do número de voltas da espiral externa. Uma redução em h ou H acarreta um menor número de voltas, e conseqüentemente uma perda de eficiência. Variando a altura h verificou-se experimentalmente que isto ocorre.

- Devido ao fato das forças atuantes sobre as partículas serem proporcionais à velocidade de entrada, esta velocidade tem

uma influência significativa sobre a eficiência. Assim, dentro de certos limites, o aumento da velocidade melhora a eficiência do ciclone. Porém, cada ciclone terá a sua velocidade ótima em função de sua geometria construtiva, e características do material a ser separado. Quanto a perda de carga, esta é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade, verificado experimentalmente.

- Sólidos de massa específica maior, bem como, materiais com granulometria maior, contribuirão para um aumento de eficiência. Isto pode ser verificado facilmente nos ensaios com areia e serragem com o ciclone em posição normal.

Através dos resultados conseguidos experimentalmente, chegou-se às conclusões apresentadas a seguir.

- A perda de carga num ciclone, em relação ao mesmo operando a vazio, é reduzida em função da variação da concentração de sólidos. Nos ensaios com areia em uma concentração média de 350 g/m^3 , a redução média ficou em torno de 50%. No caso dos ensaios com serragem numa concentração média de 142 g/m^3 , verificou-se uma redução de 25% na perda de carga. Quanto à eficiência de separação, verificou-se nos ensaios com o ciclone operando na posição normal, que quando aumentada a concentração, a eficiência melhora. Segundo as Refs. [17,42], o efeito da diminuição da perda de carga em altas concentrações é invertido, voltando a aumentar a perda de carga.

- Através da comparação entre as distribuições de velocidades do interior de ciclones, pode-se concluir que, a geometria construtiva é a responsável pela forma desta distribuição. Como a estas velocidades estão ligadas as forças atuantes sobre as partículas, então, o desempenho do ciclone está ligado à sua forma construtiva.

- O resultado mais importante conseguido neste trabalho, é a comprovação experimental de que o ciclone pode operar na posição invertida com boa eficiência. Neste caso, três parâmetros devem ser otimizados, a massa específica das partículas, o diâmetro máximo das partículas, e a velocidade de entrada. Para

$d_{p_{m\acute{a}x}}$ fixo, a efici\ecia do ciclone invertido ser\ea maior se ρ_p for menor, ou a velocidade V_e maior. Por\em o aumento de V_e est\ea limitado pela re-entrada de part\iculas no escoamento, limitando assim o ρ_p m\aximo de opera\c\ao, em um ciclone invertido. Os resultados conseguidos v\em demonstrar que, as for\cas de arraste no interior do ciclone possuem intensidade muito superior \a for\ca da gravidade. Neste caso a opera\c\ao do ciclone, independe da posi\c\ao de montagem. A vantagem decorrente desta constata\c\ao, \e a possibilidade de se trabalhar com o ciclone invertido, de forma que as part\iculas separadas estar\ao em n\ivel mais elevado, o que permite a sua transfer\ecia para o local de uso, ou meio de transporte, por meio da gravidade. Isto elimina o uso de correias transportadoras ou outro meio de carregamento.

5.2 - Sugest\oes para Trabalhos Futuros

Com base em v\arios pontos observados durante a realiza\c\ao deste trabalho, algumas sugest\oes para desenvolvimento de trabalhos futuros s\ao a seguir apresentadas.

Uma primeira sugest\ao seria a continua\c\ao deste trabalho, utilizando-se o banco de ensaios j\aa construido, para realiza\c\ao de uma extensa investiga\c\ao experimental. Neste trabalho poderia se trabalhar com o ciclone na posi\c\ao invertida, e verificar o seu comportamento operando com outros tipos de materiais, e gr\aos. Repetindo todos os ensaios na posi\c\ao normal. E poder-se-ia tamb\em levantar os perfis de velocidades no escoamento para v\arias velocidades de entrada, verificando sua correla\c\ao.

Uma outra sugest\ao de pesquisa, \e o estudo do comportamento do ciclone, quando este opera com gases em altas temperaturas e altas press\oes. Este estudo poderia trazer grande contribui\c\ao para a aplica\c\ao espec\ifica em turbinas a g\as, que operam utilizando combust\iveis s\olidos.

Outra sugest\ao, \e a realiza\c\ao de um estudo de transfer\ecia de calor no interior de ciclones, associada com a efici\ecia de separa\c\ao. Este estudo pode ser desenvolvido na

área de preaquecedores ciclônicos, de grande interesse para a indústria cimenteira moderna. Estudo sobre o tempo de permanência das partículas no interior do ciclone, se faz necessário, buscando-se então a modelagem matemática do processo de transferência de calor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Perry, R.H. and Chilton, C.H.; "Chemical Engineers Handbook". McGraw Hill Kogakusha Ltd., 1973;
- [2] - Del Tanago, G.; "Separaciones Mecanicas". Ed. Dossat, Madrid
- [3] - Baturin, V.V.; "Fundamentos de la Ventilacion Industrial" Editorial Labor S.A., 1976;
- [4] - Gordón, G.M. y Peisájev, I.L.; "Captacion de polvos y purificacion de gases en la metalurgia de metales no ferrosos". Editorial Mir, Moscou, 1981;
- [5] - Lund, H.F.; "Industrial Pollution Control Handbook" - McGraw Hill Book Company, 1971 - USA;
- [6] - Boysan, F.; Ayres, W.H.; Swithenbank, J.; "A fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design". Transactions Institution of Chemical Engineers, Vol. 60(4), July 1982. pp. 222-230;
- [7] - Dorman, R.G., "Dust Control and Air Cleaning". Pergamon Press, Oxford, 1974;
- [8] - Mesquita, A.L.S.; Guimarães, F.A.; Nefussi, N.; "Engenharia de Ventilação Industrial". CETESB/Editora Edgard Blücher Ltda. 1977;
- [9] - Smith, J.M. and Van Ness, H.C.; "Introducion to Chemical Engineering Thermodynamics". McGraw Hill Kogakusha Ltd., 3ª Edition, 1975;
- [10] - Duda, W.H.; "Cement Data Book", Macdonald & Evans, London 1977;
- [11] - Companhia Energética de Minas Gerais, CEMIG; "Uso de Energia na Indústria de Cimento em Minas Gerais 1980 - 1983". Belo Horizonte, Junho de 1985, (146 p.);

- [12] - Sprung, S.; "Thecnological Problems in Pyroprocessing Cement Clinker: Cause and Solution". Beton-Verlag GmbH , Düsseldorf, 1985;
- [13] - Razgaitis, R. and Guenther, D.A.; "Separation Efficiency of a Cyclone Separator with a Turbulence-Suppressing Rotating - Insert". Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power; Vol. 103, July 19, p.566-571;
- [14] - Mukherjee, D.K.; "Future Fuels for Gás Turbines". Brown Boveri Review, Vol. 67, December 1980, Baden/Switzerland p. 698-704;
- [15] - Dietz, P.W.; "Collection Efficiency of Cyclone Separators" AIChE Journal, Vol. 27, nº 6 (November) 1981, p. 888-892;
- [16] - Botts, T.E., Powell, J.R.; and Fillo, J.A.; "Advanced Synfuel Production/Power Systems Utilizing Laser Particulate Control". Alternative Energy Sources II, Vol. 7 , McGraw Hill, USA, 1981, p. 2949-2953;
- [17] - Strauss, W.; "Industrial Gás Cleaning". Pergamon Press, 2nd Edition, 1975;
- [18] - Hemeon, W.C.L.; "Plant and Process Ventilation". 2nd Edition, Industrial Press Inc., New York, 1963;
- [19] - Horzela, T.I.; "Selecting, Installing and Maintaining Cyclone Dusts Collectors" Chemical Engineering, Vol.85 , nº 3, (Jan 30, 1978), Ed.McGraw Hill, pp. 84-92;
- [20] - Fox, R.W.; McDonal, A.T.; "Introdução à Mecânica dos Fluidos". Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro , 1981;
- [21] - Varella, S.; "Escoamento em ciclones e fatores que influenciam na eficiência". 3º Seminário Interno da EFEI, 1983;

- [22] - Ter Linden, A.J.; "Investigations into cyclone dust collectors". Institution of Mech. Eng.J., Vol. 160(1949) pp. 233-251;
- [23] - Svanda, J.; "Cyclone calculations and some design parameters affecting cyclone efficiency-I". International Chemical Engineering, Vol. 7, nº 2, April, 1967, pp.238-245;
- [24] - Rushton, A. and Bradley, T.W.; "Cyclone Efficiency Studies". Filtration & Separation (March(April) 1978, pp. 159-162;
- [25] - Tawari, T.D. and Zenz, F.A.; "Evaluating Cyclone efficiencies from stream compositions". Chemical Engineering, Vol. 91, nº 9 (April 30, 1984) pp. 69-73;
- [26] - Perry, R.H.; Perry, J.H.; "Manual de Ingenieria". Editorial Labor S.A., Barcelona, 1966;
- [27] - Spiegel, M.R.; "Manual de fórmulas e tabelas matemáticas" Editora McGraw Hill do Brasil Ltda., 1974;
- [28] - Neto, L.A.; "Separadores centrífugos tipo ciclone de fluxo reverso". Seminário de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Maio de 1984;
- [29] - Koch, W.H. and Licht, W.; "New design approach boosts cyclone efficiency". Chemical Engineering, Vol. 84, nº 24, (Nov 7, 1977) McGraw Hill, pp. 80-88;
- [30] - Razgaitis, R. and Guenther, D.A.; "Separation Efficiency of a Cyclone Separator with a Turbulence-Suppressing Rotating-Insert". Journal of Engineering for Power, Transactions of the ASME, Vol.103, July 1981, pp. 566-571;
- [31] - Shah, Y.M. and Price, R.T.; "Calculator program solves cyclone efficiency equations." Chemical Engineering, Vol. 85, nº 19, (August 28, 1978) pp. 99-102;

- [32] - Casal, J. and Martinez-Benet, J.M.; "A better way to calculate cyclone pressure drop." *Chemical Engineering*, Vol. 90, nº2, (jan 24, 1983), pp. 99-100;
- [33] - Stepanoff, A.J.; "Pump and Blowers. Two-phase Flow". John Wiley & Sons, Inc., USA, 1965;
- [34] - Browne, J.M. and Strauss, W.; "Pressure Drop Reduction in Cyclone"; *Atmospheric Environment*; Pergamon Press Ltd. Vol. 12 (5) 1978, pp. 1213-1221;
- [35] - Martinez-Benet, J.M. and Casal, J.; "Optimization of Parallel Cyclones". *Powder Technology*, Vol. 38, (1984), pp. 217-221;
- [36] - Constantinescu, S.; "Sizing gas Cyclones". *Chemical Engineering*, Vol. 91, nº 9 (Feb 20, 1984), pp. 97-98;
- [37] - Valdez, M.G.; Garcia, I.; Beato, B.; "Sizing gas cyclones for efficiency". *Chemical Engineering*, (April 14, 1986), pp. 119-120;
- [38] - Zens, F.A.; "Conveyability of Material of Mixed Particle Size". *Industrial and Eng. Chemistry Fundamental*, Vol. 3, nº 1, (Feb 1964), pp. 65-75;
- [39] - Zanker, A.; "Determining air inlet-velocity for cyclones". *Chemical Engineering*, Vol. 91, nº 6, (March 19, 1984), pp. 159-160;
- [40] - Baumeister and Marks; "Standard Handbook for Mechanical Engineers." McGraw Hill, 7ª Edition, 1966;
- [41] - Stairmand, C.J.; "The Design and Performance of Cyclone Separators". *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, Vol. 29 (1951), pp. 356-383;
- [42] - Kreft, W.; Thiemeyer, H.W.; and Beyer, B.R.; "Further de

- velopment of the cyclone preheater on the basis of model investigations". [Weiterentwicklung des Zyklonwärmetauschers auf der Basis von Modelluntersuchungen]; Krupp Polysius; ZKG International, 38 (1985);
- [43] - Silva, R.M.; "Ventilação". Ed. do Grêmio Politecnico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1967;
- [44] - Yuu, S.; Jotaki, T.; Tomita, Y. and Yoshida, K.; "The reduction of pressure drop due to dust loading in a conventional cyclone". Chemical Engineering Science, Pergamon Press Ltd. Vol. 33 (1978). pp.1573-1580;
- [45] - Sproull, W.T.; "Effect of Dust Concentration Upon the gas-Flow Capacity of a Cyclonic Collector". Journal of the Air Pollution Control Association; Vol. 16, nº 8 (Aug. 1966), pp. 439-441;
- [46] - Jorgensen, R.; "Fan Engineering". Buffalo Forge Company, 7^a Edition, New York, 1970;
- [47] - Cheng, S. and Teller, A.J.; "Analog Simulation of Particle Trajectories in a Cyclone Separator"; Simulation, Vol. 17, Nº 5, November 1971, pp. 187-195;
- [48] - Ower, E. and Pankhust, R.C.; "The Measurement of Air Flow" Pergamon Press; 5th Edition, 1977;
- [49] - Varella, S.: "A Theoretical and Experimental of Regenerative Blowers". (Tese de Doutorado), University of Southampton, March 1981.

APÊNDICE

LISTAGEM DO PROGRAMA UTILIZADO PARA A ANÁLISE DE
PARÂMETROS INFLUENTES NO DESEMPENHO DE CICLONES.

O programa cuja listagem é aqui apresentada, é um programa conversacional e auto-explicativo. Para a sua execução, se utilizam as seguintes equações de arquivo, em um computador HP-3000.

: FILE FTNØ6; DEV = nº do terminal utilizado; CCTL

: FILE FTNØ4; DEV = LP ; CCTL

: FORTGO CICLON16

Ao final o programa emite três tipos de relatórios, conforme exemplos apresentados após a listagem do mesmo.

```

00001000 C#CONTROL BOUNDS,NOI 1ST
00002000 #CONTROL SEGMENT=SEG1
00003000 C   PROGRAMA CICLONE7
00004000 C
00005000 C   AUTOR: ROGERIO JOSE DA SILVA
00006000 C
00007000 C   FINALIDADE: A PARTIR DOS DADOS INICIAIS REQUERIDOS PARA
00008000 C   PROJETO, O PROGRAMA CALCULA E OTIMIZA TODAS AS
00009000 C   DIMENSÕES DE PROJETO DE UM CICLONE, CALCULANDO
00010000 C   A EFICIENCIA TOTAL E QUEDA DE PRESSAO.
00011000 C
00012000 C
00013000 C
00014000 C.....DECLARACAO DE VARIAVEIS
00015000 C
00016000 C   INPLICIT LOGICAL(A-Z)
00017000 C
00018000 C   REAL VIS,DEP,DEF,TE,QT,VISC,DENP,DENF,TEC,OTM,VE,VEC,DCM,DCC,
00019000 C   * K1,K2,K3,K4,K5,K6,K7,AC,BC,ST,DEG,HC,HTC,DSP,ACM,BCM,STM,HCM,
00020000 C   * VS,K,HH,DPR,EFTR,HTM,DEGM,DSM,DTP(15),PER(15),EFTM(15)
00021000 C   REAL DCM1,DCM2,INC,INC1,FKM,DCC2,K1A,K1B,K2A,K2B,K3A,K3B,K4A,
00022000 C   * K4B,K5A,K5B,K6A,K6B,K7A,K7B,TEC1,TEC2,TEC3,VISC1,TER1,TER2,
00023000 C   * EFTO,VIS1,VIS2,PBA,PEST,OTM1,OTM2,QT2,DENP1,DENP2
00024000 C   REAL K6C,K6D,QT1,DEP1,DCC1,TE1,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,QPR1,
00025000 C   * QPR2,QPR3,QPR4,QTG,QTG,VE1,VEC1,QPR11,QPR31,VISM1,VISM2,
00026000 C   * VISM3,VISM4,DENF1,DEF1
00027000 C
00028000 C   INTEGER J,J1,L,M,N
00029000 C
00030000 C.....INICIO DA ENTRADA DE DADOS
00031000 C
00032000 C   WRITE(6,10) 'DEFINA A EFICIENCIA REQUERIDA PARA O CICLONE, ',
00033000 C   * 'DENTRO DO INTERVALO DE "0.0 [%]" ATE "100.0[%]" '
00034000 C 10 FORMAT(1X,S/,1X,S,5X)
00035000 C   READ(5,*) EFTR
00036000 C
00037000 C..... TABELA DE DISTRIBUICAO DAS PARTICULAS POR TAMANHO E PERCENTAGEM
00038000 C EM MASSA CONTIDO EM UMA AMOSTRA DO PRODUTO A SER SEPARADO.
00039000 C
00040000 C   DISPLAY ' DISTRIB. DO TAMANHO DE PARTICULA SEG. STAIRMAND '
00041000 C   DISPLAY '
00042000 C   DISPLAY ' TAMANHO DE PART.          PERCENT. POR TAMANHO
00043000 C   DISPLAY ' (MICRONS)          SUPERFINO   FINO   GROSSEIRO   EX '
00044000 C   DISPLAY '
00045000 C   DISPLAY '          150.0          -          100          -          - '
00046000 C   DISPLAY '          104.0          -          97          -          4% '
00047000 C   DISPLAY '          75.0          100          90          46          4% '
00048000 C   DISPLAY '          60.0          95          80          40          6% '
00049000 C   DISPLAY '          40.0          97          65          32          7% '
00050000 C   DISPLAY '          30.0          96          55          27          12% '
00051000 C   DISPLAY '          20.0          95          45          21          9% '
00052000 C   DISPLAY '          15.0          94          38          16          14% '
00053000 C   DISPLAY '          10.0          90          30          12          10% '
00054000 C   DISPLAY '          7.5          85          26          9          12% '
00055000 C   DISPLAY '          5.0          75          20          6          14% '
00056000 C   DISPLAY '          2.5          56          12          3          8% '
00057000 C   DISPLAY '

```

```

00058000      DISPLAY''
00059000      C
00060000      C
00061000      C.... CALCULO DO DIAMETRO MEDIO DAS PARTICULAS
00062000      C
00063000      DISPLAY 'DE O NUMERO DE FAIXAS DE TAMANHO DISPONIVEIS
00064000      READ(5,*) N
00065000      DO 14 J1=1,15
00066000      DTP(J1)=0.00
00067000      PER(J1)=0.00
00068000      EFTM(J1)=0.00
00069000      14 CONTINUE
00070000      DO 24 J=1,N
00071000      DISPLAY 'DE A FAIXA EM MICRONS E A PERCENTAGEM EM MASSA'
00072000      READ(5,*) DTP(J),PER(J)
00073000      24 CONTINUE
00074000      C
00075000      735 CONTINUE
00076000      C
00077000      C.... INICIO DAS CHAMADAS DAS SUB-ROTINAS
00078000      C
00079000      C.... CHAMADA DA SBCIDAT PARA RECEBER E CALCULAR DADOS INICIAIS
00080000      C      DO PROGRAMA
00081000      C
00082000      CALL SBCIDAT(VIS,DEP,DEF,TE,QT,VISC,DENP,DENF,TEC,QTN)
00083000      C
00084000      C.... CHAMADA DA SUB-ROTINA SBCIDA5, PARA CALCULAR A VELOCIDADE
00085000      C      DE ARRASTE VERTICAL E POSSIBILITAR A ESCOLHA DA VEL.DE ENT.
00086000      C
00087000      CALL SBCIDA5(DEP,DEF,VE,VEC)
00088000      C
00089000      C.... CHAMADA DA SUB-ROTINA SBCIDA2, ESTA CALCULA INICIALMENTE O
00090000      C      DIAMETRO DO CICLONE, A PARTIR DOS DADOS INICIAIS DISPONIVEIS
00091000      C
00092000      CALL SBCIDA2(DENP,DENF,QTN,VISC,VEC,DCM,DCC,K1,K2)
00093000      C
00094000      C.... CHAMADA DA SUB-ROTINA SBCIDA6, PARA CALCULAR A "SALTATION
00095000      C      VELOCITY" E A RELACAO "VE/VS".
00096000      C
00097000      CALL SBCIDA6(DEP,DEF,VIS,VS,K1,K2,DCC,DCM,VE,VEC,QT)
00098000      C
00099000      C.... IMPRESSAO DOS RESULTADOS EM FOLHA SEPARADA
00100000      C
00101000      CALL SBCIDA11(VISC,DENF,DENP,TEC,QTN)
00102000      C
00103000      720 CONTINUE
00104000      C.... CHAMADA DA SUB-ROTINA SBCIDA7, PARA CALCULAR A GEOMETRIA DO
00105000      C      CICLONE E IMPRIMIR OS DADOS CALCULADOS.
00106000      C
00107000      CALL SBCIDA7(DCC,K1,K2,K3,K4,K5,K6,K7,AC,BC,ST,DEG,HC,HTC,DSP,
00108000      * DCM,ACH,BCN,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM)
00109000      C
00110000      C.... CHAMADA DA SUB-ROTINA SBCIDA9, PARA CALCULAR A EFICIENCIA DO
00111000      C      CICLONE PARA CADA TAMANHO DE PARTICULA E A EFICIENCIA TOTAL
00112000      C
00113000      CALL SBCIDA9(AC,BC,DCC,DEG,DSP,DEP,HC,HTC,QT,ST,TE,VIS,PER,
00114000      * DTP,N,EFTO,EFTM)

```

```

00115000 C
00116000 C....IMPRESSAO PARA COMPARACAO DA EFICIENCIA REQUERIDA
00117000 C
00118000 40 FORMAT(7,1X,40X,S,2X,F8.4,2X,'[X]')
00119000 WRITE(4,40)'A EFICIENCIA REQUERIDA DO CICLONE =',EFTR
00120000 C
00121000 CALL SBCIDAYS<QT,DEP,DEF,VIS,K1,K2,DCC,VE>
00122000 C
00123000 C.... CHAMADA DA SUB-ROTINA SBCIDA12 PARA O CALCULO DA QUEDA
00124000 C DE PRESSAO
00125000 C
00126000 CALL SBCIDA12<DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM,DENF,DENP,
00127000 *QPR1,QPR2,QPR3,QPR4,VEC,QPR11,QPR31>
00128000 C
00129000 C....CHAMAMOS AGORA AS SUB-ROTINAS QUE IRAO CALCULAR O DIAMETRO
00130000 C CRITICO DAS PARTICULAS SEGUNDO ALGUNS MODELOS PROPOSTOS.
00131000 C
00132000 CALL SBCIDA1<DCM,VEC,VISC,DEHP,DENF,QTM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,
00133000 * HTM,DSM,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4>
00134000 C
00135000 CALL SBCIDA3<VISC,DEGM,VEC,DENP,DCM,BCM,DCR5>
00136000 C
00137000 CALL SBCIDA4<VISC,DEGM,DCM,DENP,DENF,VEC,ACM,BCM>
00138000 C
00139000 CALL SBCIDA15<VISC,DENF,DENP,TEC,QTM,VEC,DCM,ACM,BCM,STM,
00140000 *HCM,HTM,DSM,DTP,PER,EFTM,EFTO,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,QPR1,
00141000 *QPR2,QPR3,QPR4,DEGM,QPR11,QPR31>
00142000 C
00143000 725 CONTINUE
00144000 DISPLAY''
00145000 DISPLAY' *** MENU *** '
00146000 DISPLAY''
00147000 DISPLAY'ESCOLHA QUAL PARAMETRO A SER ALTERADO NA SIMULACAO'
00148000 DISPLAY' 1 - DIAMETRO DO CICLONE - DCC '
00149000 DISPLAY' 2 - ALTURA DA ENTRADA - AC '
00150000 DISPLAY' 3 - LARGURA DA ENTRADA - BC '
00151000 DISPLAY' 4 - PROFUNDIDADE DE TUBO DE SAIDA - ST '
00152000 DISPLAY' 5 - DIAMETRO DO TUBO DE SAIDA - DEG '
00153000 DISPLAY' 6 - ALTURA DA PARTE CILINDRICA - HC '
00154000 DISPLAY' 7 - ALTURA TOTAL DO CICLONE - HTC '
00155000 DISPLAY' 8 - DIAMETRO DE SAIDA DO PD - DSP '
00156000 DISPLAY' 9 - TEMPERATURA DE TRABALHO - TE '
00157000 DISPLAY' 10 - VAZAO DE GAS - QT '
00158000 DISPLAY' 11 - DENSIDADE DA PARTICULA - DEP '
00159000 DISPLAY' 12 - REINICIAR A SIMULACAO MUDANDO A GEOMETRIA'
00160000 DISPLAY' 13 - SAIR DO PROGRAMA '
00161000 DISPLAY''
00162000 DISPLAY'ESCREVA AGORA O NUMERO ESCOLHIDO => '
00163000 READ(5,*) L
00164000 GO TO (610,620,630,640,650,660,670,680,690,700,710,720,730),L
00165000 610 CONTINUE
00166000 DISPLAY'DE O MENOR DIAMETRO, O MAIOR, E O INCREMENTO [METROS]'
00167000 READ(5,*) DCM1,DCM2,INC.
00168000 FKM=0.3048
00169000 DCC2=DCM2/FKM
00170000 DCC1=DCM1/FKM
00171000 INC1=INC/FKM

```

```

00172000      615 CONTINUE
00173000      CALL SBCIDA11(VISC, DENF, DENP, TEC, QTM)
00174000      CALL SBCIDA10(DCC1, K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, AC, BC, ST, DEG, HC, HTC, DSP,
00175000      * DCM1, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM, HTM, DSM)
00176000      QTMC=VEC*ACM*BCM
00177000      QTC=QTMC/2.83169E-02
00178000      CALL SBCIDA13(AC, BC, DCC1, DEG, DSP, DEP, HC, HTC, QTC, ST, TE, VIS, PER,
00179000      * DEF, DTP, N, EFTO, EFTM)
00180000      CALL SBCIDA12(DCM1, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM, HTM, DSM, DENF, DENP,
00181000      * QPR1, QPR2, QPR3, QPR4, VEC, QPR11, QPR31)
00182000      CALL SBCIDAVS(QT, DEP, DEF, VIS, K1, K2, DCC1, VE)
00183000      CALL SBCIDA1(DCM1, VEC, VISC, DENP, DENF, QTMC, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM,
00184000      * HTM, DSM, DCR1, DCR2, DCR3, DCR4)
00185000      CALL SBCIDA3(VISC, DEGM, VEC, DENP, DCM1, BCM, DCR5)
00186000      CALL SBCIDA4(VISC, DEGM, DCM1, DENP, DENF, VEC, ACM, BCM)
00187000      CALL SBCIDA15(VISC, DENF, DENP, TEC, QTMC, VEC, DCM1, ACM, BCM, STM,
00188000      * HCM, HTM, DSM, DTP, PER, EFTM, EFTO, DCR1, DCR2, DCR3, DCR4, DCR5, QPR1,
00189000      * QPR2, QPR3, QPR4, DEGM, QPR11, QPR31)
00190000      DCC1=DCC1+INC1
00191000      DCM1=DCM1+INC
00192000      IF(DCC1.GT.DCC2) GO TO 800
00193000      CO TO 615
00194000      620 CONTINUE
00195000      DISPLAY'DE O VALOR INICIAL, FINAL E O INCREMENTO DE K1'
00196000      READ(5,*) K1A, K1B, INC
00197000      625 CONTINUE
00198000      CALL SBCIDA11(VISC, DENF, DENP, TEC, QTM)
00199000      CALL SBCIDA10(DCC, K1A, K2, K3, K4, K5, K6, K7, AC, BC, ST, DEG, HC, HTC, DSP,
00200000      * DCM, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM, HTM, DSM)
00201000      QTMC=VEC*ACM*BCM
00202000      QTC=QTMC/2.83169E-02
00203000      CALL SBCIDA13(AC, BC, DCC, DEG, DSP, DEP, HC, HTC, QTC, ST, TE, VIS, PER,
00204000      * DEF, DTP, N, EFTO, EFTM)
00205000      CALL SBCIDA12(DCM, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM, HTM, DSM, DENF, DENP,
00206000      * QPR1, QPR2, QPR3, QPR4, VEC, QPR11, QPR31)
00207000      CALL SBCIDAVS(QTC, DEP, DEF, VIS, K1A, K2, DCC, VE)
00208000      CALL SBCIDA1(DCM, VEC, VISC, DENP, DENF, QTMC, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM,
00209000      * HTM, DSM, DCR1, DCR2, DCR3, DCR4)
00210000      CALL SBCIDA3(VISC, DEGM, VEC, DENP, DCM, BCM, DCR5)
00211000      CALL SBCIDA4(VISC, DEGM, DCM, DENP, DENF, VEC, ACM, BCM)
00212000      CALL SBCIDA15(VISC, DENF, DENP, TEC, QTMC, VEC, DCM, ACM, BCM, STM,
00213000      * HCM, HTM, DSM, DTP, PER, EFTM, EFTO, DCR1, DCR2, DCR3, DCR4, DCR5, QPR1,
00214000      * QPR2, QPR3, QPR4, DEGM, QPR11, QPR31)
00215000      K1A=K1A+INC
00216000      IF(K1A.GT.K1B) GO TO 800
00217000      GO TO 625
00218000      630 CONTINUE
00219000      DISPLAY'DE O VALOR INICIAL, FINAL, E O INCREMENTO DE K2'
00220000      READ(5,*) K2A, K2B, INC
00221000      635 CONTINUE
00222000      CALL SBCIDA11(VISC, DENF, DENP, TEC, QTM)
00223000      CALL SBCIDA10(DCC, K1, K2A, K3, K4, K5, K6, K7, AC, BC, ST, DEG, HC, HTC, DSP,
00224000      * DCM, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM, HTM, DSM)
00225000      QTMC=VEC*ACM*BCM
00226000      QTC=QTMC/2.83169E-02
00227000      CALL SBCIDA13(AC, BC, DCC, DEG, DSP, DEP, HC, HTC, QTC, ST, TE, VIS, PER,
00228000      * DEF, DTP, N, EFTO, EFTM)

```

```

00229000      CALL SBCIDA12(DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM,DENF,DENP,
00230000      *QPR1,QPR2,QPR3,QPR4,VEC,QPR11,QPR31)
00231000      CALL SBCIDAYS(QTC,DEP,DEF,VIS,K1,K2A,DCC,VE)
00232000      CALL SBCIDA1(DCM,VEC,VISC,DENP,DENF,QTMC,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,
00233000      * HTM,DSM,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4)
00234000      CALL SBCIDA3(VISC,DEGM,VEC,DENP,DCM,BCM,DCR5)
00235000      CALL SBCIDA4(VISC,DEGM,DCM,DENP,DENF,VEC,ACM,BCM)
00236000      CALL SBCIDA15(VISC,DENF,DENP,TEC,QTMC,VEC,DCM,ACM,BCM,STM,
00237000      *HCM,HTM,DSM,DTP,PER,EFTM,EFTO,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,QPR1,
00238000      *QPR2,QPR3,QPR4,DEGM,QPR11,QPR31)
00239000      K2A=K2A+INC
00240000      IF(K2A.GT.K2B) GO TO 800
00241000      GO TO 635
00242000      640 CONTINUE
00243000      DISPLAY 'DE O VALOR INICIAL, FINAL E O INCREMENTO DE K3'
00244000      READ(5,*) K3A,K3B,INC
00245000      645 CONTINUE
00246000      CALL SBCIDA11(VISC,DENF,DENP,TEC,QTM)
00247000      CALL SBCIDA10(DCC,K1,K2,K3A,K4,K5,K6,K7,AC,BC,ST,DEG,HC,HTC,DSP,
00248000      * DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM)
00249000      CALL SBCIDA13(AC,BC,DCC,DEG,DSP,DEP,HC,HTC,QT,ST,TE,VIS,PER,
00250000      * DEF,DTP,N,EFTO,EFTM)
00251000      CALL SBCIDA12(DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM,DENF,DENP,
00252000      *QPR1,QPR2,QPR3,QPR4,VEC,QPR11,QPR31)
00253000      CALL SBCIDAYS(QT,DEP,DEF,VIS,K1,K2,DCC,VE)
00254000      CALL SBCIDA1(DCM,VEC,VISC,DENP,DENF,QTM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,
00255000      * HTM,DSM,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4)
00256000      CALL SBCIDA3(VISC,DEGM,VEC,DENP,DCM,BCM,DCR5)
00257000      CALL SBCIDA4(VISC,DEGM,DCM,DENP,DENF,VEC,ACM,BCM)
00258000      CALL SBCIDA15(VISC,DENF,DENP,TEC,QTM,VEC,DCM,ACM,BCM,STM,
00259000      *HCM,HTM,DSM,DTP,PER,EFTM,EFTO,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,QPR1,
00260000      *QPR2,QPR3,QPR4,DEGM,QPR11,QPR31)
00261000      K3A =K3A+INC
00262000      IF(K3A.GT.K3B) GO TO 800
00263000      GO TO 645
00264000      650 CONTINUE
00265000      DISPLAY 'DE O VALOR INICIAL, FINAL E O INCREMENTO DE K4'
00266000      READ(5,*) K4A,K4B,INC
00267000      655 CONTINUE
00268000      CALL SBCIDA11(VISC,DENF,DENP,TEC,QTM)
00269000      CALL SBCIDA10(DCC,K1,K2,K3,K4A,K5,K6,K7,AC,BC,ST,DEG,HC,HTC,DSP,
00270000      * DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM)
00271000      CALL SBCIDA13(AC,BC,DCC,DEG,DSP,DEP,HC,HTC,QT,ST,TE,VIS,PER,
00272000      * DEF,DTP,N,EFTO,EFTM)
00273000      CALL SBCIDA12(DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM,DENF,DENP,
00274000      *QPR1,QPR2,QPR3,QPR4,VEC,QPR11,QPR31)
00275000      CALL SBCIDAYS(QT,DEP,DEF,VIS,K1,K2,DCC,VE)
00276000      CALL SBCIDA1(DCM,VEC,VISC,DENP,DENF,QTM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,
00277000      * HTM,DSM,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4)
00278000      CALL SBCIDA3(VISC,DEGM,VEC,DENP,DCM,BCM,DCR5)
00279000      CALL SBCIDA4(VISC,DEGM,DCM,DENP,DENF,VEC,ACM,BCM)
00280000      CALL SBCIDA15(VISC,DENF,DENP,TEC,QTM,VEC,DCM,ACM,BCM,STM,
00281000      *HCM,HTM,DSM,DTP,PER,EFTM,EFTO,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,QPR1,
00282000      *QPR2,QPR3,QPR4,DEGM,QPR11,QPR31)
00283000      K4A=K4A+INC
00284000      IF(K4A.GT.K4B) GO TO 800
00285000      GO TO 655

```

```

00286000 660 CONTINUE
00287000 K6C=(K6-K5)
00288000 DISPLAY 'DE O VALOR INICIAL, FINAL E O INCREMENTO DE K5'
00289000 READ(5,*) K5A,K5B,INC
00290000 K5=K5A
00291000 665 CONTINUE
00292000 K6D=(K6C+K5A)
00293000 CALL SBCIDA11(VISC,DENF,DENP,TEC,OTM)
00294000 CALL SBCIDA10(DCC,K1,K2,K3,K4,K5A,K6D,K7,AC,BC,ST,DEG,HC,HTC,DSP,
00295000 * DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM)
00296000 CALL SBCIDA13(AC,BC,DCC,DEG,DSP,DEP,HC,HTC,QT,ST,TE,VIS,PER,
00297000 * DEF,DTP,N,EFTO,EFTM)
00298000 CALL SBCIDA12(DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM,DENF,DENP,
00299000 *QPR1,QPR2,QPR3,QPR4,VEC,QPR11,QPR31)
00300000 CALL SBCIDAVS(QT,DEP,DEF,VIS,K1,K2,DCC,VE)
00301000 CALL SBCIDA1(DCM,VEC,VISC,DENP,DENF,OTM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,
00302000 * HTM,DSM,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4)
00303000 CALL SBCIDA3(VISC,DEGM,VEC,DENP,DCM,BCM,DCR5)
00304000 CALL SBCIDA4(VISC,DEGM,DCM,DENP,DENF,VEC,ACM,BCM)
00305000 CALL SBCIDA15(VISC,DENF,DENP,TEC,OTM,VEC,DCM,ACM,BCM,STM,
00306000 *HCM,HTM,DSM,DTP,PER,EFTM,EFTO,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,QPR1,
00307000 *QPR2,QPR3,QPR4,DEGM,QPR11,QPR31)
00308000 K5A=K5A+INC
00309000 IF(K5A.GT.K5B) GO TO 800
00310000 GO TO 665
00311000 670 CONTINUE
00312000 DISPLAY 'DE O VALOR INICIAL, FINAL E O INCREMENTO DE K6'
00313000 READ(5,*) K6A,K6B,INC
00314000 675 CONTINUE
00315000 CALL SBCIDA11(VISC,DENF,DENP,TEC,OTM)
00316000 CALL SBCIDA10(DCC,K1,K2,K3,K4,K5,K6A,K7,AC,BC,ST,DEG,HC,HTC,DSP,
00317000 * DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM)
00318000 CALL SBCIDA13(AC,BC,DCC,DEG,DSP,DEP,HC,HTC,QT,ST,TE,VIS,PER,
00319000 * DEF,DTP,N,EFTO,EFTM)
00320000 CALL SBCIDA12(DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM,DENF,DENP,
00321000 *QPR1,QPR2,QPR3,QPR4,VEC,QPR11,QPR31)
00322000 CALL SBCIDAVS(QT,DEP,DEF,VIS,K1,K2,DCC,VE)
00323000 CALL SBCIDA1(DCM,VEC,VISC,DENP,DENF,OTM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,
00324000 * HTM,DSM,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4)
00325000 CALL SBCIDA3(VISC,DEGM,VEC,DENP,DCM,BCM,DCR5)
00326000 CALL SBCIDA4(VISC,DEGM,DCM,DENP,DENF,VEC,ACM,BCM)
00327000 CALL SBCIDA15(VISC,DENF,DENP,TEC,OTM,VEC,DCM,ACM,BCM,STM,
00328000 *HCM,HTM,DSM,DTP,PER,EFTM,EFTO,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,QPR1,
00329000 *QPR2,QPR3,QPR4,DEGM,QPR11,QPR31)
00330000 K6A=K6A+INC
00331000 IF(K6A.GT.K6B) GO TO 800
00332000 GO TO 675
00333000 680 CONTINUE
00334000 DISPLAY 'DE O VALOR INICIAL, FINAL E O INCREMENTO DE K7'
00335000 READ(5,*) K7A,K7B,INC
00336000 685 CONTINUE
00337000 CALL SBCIDA11(VISC,DENF,DENP,TEC,OTM)
00338000 CALL SBCIDA10(DCC,K1,K2,K3,K4,K5,K6,K7A,AC,BC,ST,DEG,HC,HTC,DSP,
00339000 * DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM)
00340000 CALL SBCIDA13(AC,BC,DCC,DEG,DSP,DEP,HC,HTC,QT,ST,TE,VIS,PER,
00341000 * DEF,DTP,N,EFTO,EFTM)
00342000 CALL SBCIDA12(DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM,DENF,DENP,

```

```

00343000 *QPR1,QPR2,QPR3,QPR4,VEC,QPR11,QPR31)
00344000 CALL SBCIDA5(QT,DEP,DEF,VIS,K1,K2,DCC,VE)
00345000 CALL SBCIDA1(DCM,VEC,VISC,DENP,DENF,QTM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,
00346000 * HTM,DSM,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4)
00347000 CALL SBCIDA3(VISC,DEGM,VEC,DENP,DCM,BCM,DCR5)
00348000 CALL SBCIDA4(VISC,DEGM,DCM,DENP,DENF,VEC,ACM,BCM)
00349000 CALL SBCIDA15(VISC,DENF,DENP,TEC,QTM,VEC,DCM,ACM,BCM,STM,
00350000 *HCM,HTM,DSM,DTP,PER,EFTM,EFTO,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,QPR1,
00351000 *QPR2,QPR3,QPR4,DEGM,QPR11,QPR31)
00352000 K7A=K7A+INC
00353000 IF(K7A.GT.K7B) GO TO 800
00354000 GO TO 685
00355000 690 CONTINUE
00356000 DISPLAY'DE O VALOR MIN E MAX DA TEMPERATURA DE TRAB. E O INCREM.'
00357000 READ(5,*) TEC1,TEC2,INC
00358000 VISC1=VISC
00359000 DISPLAY'DE O VALOR DA PRESSAO BAROMETRICA LOCAL [MM DE HG]'
00360000 READ(5,*)PBA
00361000 DISPLAY'DE O VALOR DA PRESSAO ESTATICA NA ENT. CICLONE [MMCA]'
00362000 READ(5,*)PEST
00363000 695 CONTINUE
00364000 TER2=TEC*9./5.*491.67
00365000 TER1=TEC1*9./5.*491.67
00366000 VIS1=VISC1*2.0884E-02
00367000 VIS2=VIS1*((TER2/TER1)**0.76)
00368000 VISM3=VIS2*6.72E-04/2.09E-05
00369000 VISM4=VISC1/0.6715
00370000 WRITE(6,*)'A TEMPERATURA AQUI E ',TEC1,' [GRAUS C]'
00371000 CALL SBCIDA8(TEC1,VISM2,VISM1)
00372000 WRITE(6,*)'VISM1=',VISM1,'VISM2=',VISM2,'VISM3=',VISM3,
00373000 *'VISM4=',VISM4
00374000 DENF1=(13.6*9.81*PBA+9.81*PEST)/(287.*(273.+TEC1))
00375000 DEF1=DENF1/16.0185
00376000 CALL SBCIDA11(VISM2,DENF1,DENP,TEC1,QTM)
00377000 CALL SBCIDA10(DCC,K1,K2,K3,K4,K5,K6,K7,AC,BC,ST,DEG,HC,HTC,DSP,
00378000 * DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM)
00379000 TE1=(TEC1*9./5.)+32.
00380000 CALL SBCIDA13(AC,BC,DCC,DEG,DSP,DEP,HC,HTC,QT,ST,TE1,VISM1,PER,
00381000 * DEF1,DTP,N,EFTO,EFTM)
00382000 CALL SBCIDA12(DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM,DENF1,DENP,
00383000 *QPR1,QPR2,QPR3,QPR4,VEC,QPR11,QPR31)
00384000 CALL SBCIDA5(QT,DEP,DEF1,VISM1,K1,K2,DCC,VE)
00385000 CALL SBCIDA1(DCM,VEC,VISM2,DENP,DENF1,QTM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,
00386000 * HTM,DSM,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4)
00387000 CALL SBCIDA3(VISM2,DEGM,VEC,DENP,DCM,BCM,DCR5)
00388000 CALL SBCIDA4(VISM2,DEGM,DCM,DENP,DENF1,VEC,ACM,BCM)
00389000 CALL SBCIDA15(VISM2,DENF1,DENP,TEC1,QTM,VEC,DCM,ACM,BCM,STM,
00390000 *HCM,HTM,DSM,DTP,PER,EFTM,EFTO,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,QPR1,
00391000 *QPR2,QPR3,QPR4,DEGM,QPR11,QPR31)
00392000 TEC1=TEC1+INC
00393000 IF(TEC1.GT.TEC2) GO TO 800
00394000 GO TO 695
00395000 700 CONTINUE
00396000 DISPLAY'DE A VAZAO DE GAS: MINIMA, MAXIMA E O INCREMENTO'
00397000 READ(5,*) QTM1,QTM2,INC
00398000 QT1=QTM1/2.83169E-02
00399000 INC1=INC/2.83169E-02

```

```

00400000      QT2=QTM2/2.83169E-02
00401000 705 CONTINUE
00402000      CALL SBCIDA11(VISC, DENF, DENP, TEC, QTM1)
00403000      CALL SBCIDA10(DCC, K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, AC, BC, ST, DEG, HC, HTC, DSP,
00404000 * DCM, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM, HTM, DSM)
00405000      CALL SBCIDA13(AC, BC, DCC, DEG, DSP, DEP, HC, HTC, QT1, ST, TE, VIS, PER,
00406000 * DEF, DTP, N, EFTO, EFTM)
00407000      VEC1=QTM1/(ACM+BCM)
00408000      VE1=VEC1/0.3048
00409000      CALL SBCIDA12(DCM, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM, HTM, DSM, DENF, DENP,
00410000 *QPR1, QPR2, QPR3, QPR4, VEC1, QPR11, QPR31)
00411000      CALL SBCIDAVS(QT1, DEP, DEF, VIS, K1, K2, DCC, VE1)
00412000      CALL SBCIDA14(DCM, VEC1, VISC, DENP, DENF, QTM1, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM,
00413000 * HTM, DSM, DCR1, DCR2, DCR3, DCR4)
00414000      CALL SBCIDA3(VISC, DEGM, VEC1, DENP, DCM, BCM, DCR5)
00415000      CALL SBCIDA4(VISC, DEGM, DCM, DENP, DENF, VEC1, ACM, BCM)
00416000      CALL SBCIDA15(VISC, DENF, DENP, TEC, QTM1, VEC1, DCM, ACM, BCM, STM,
00417000 *HCM, HTM, DSM, DTP, PER, EFTM, EFTO, DCR1, DCR2, DCR3, DCR4, DCR5, QPR1,
00418000 *QPR2, QPR3, QPR4, DEGM, QPR11, QPR31)
00419000      QT1=QT1+INC1
00420000      QTM1=QTM1+INC
00421000      IF(QT1.GT.QT2) GO TO 800
00422000      GO TO 705
00423000 710 CONTINUE
00424000      DISPLAY 'DE O VALOR MIN, MAX E O INCR. DA DENSIDADE DA PARTICULA'
00425000      READ(5,*) DENP1, DENP2, INC
00426000      DEP1=DENP1/16.0185
00427000      INC1=INC/16.0185
00428000 715 CONTINUE
00429000      CALL SBCIDA11(VISC, DENF, DENP1, TEC, QTM)
00430000      CALL SBCIDA10(DCC, K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, AC, BC, ST, DEG, HC, HTC, DSP,
00431000 * DCM, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM, HTM, DSM)
00432000      CALL SBCIDA13(AC, BC, DCC, DEG, DSP, DEP1, HC, HTC, QT, ST, TE, VIS, PER,
00433000 * DEF, DTP, N, EFTO, EFTM)
00434000      CALL SBCIDA12(DCM, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM, HTM, DSM, DENF, DENP1,
00435000 *QPR1, QPR2, QPR3, QPR4, VEC, QPR11, QPR31)
00436000      CALL SBCIDAVS(QT, DEP1, DEF, VIS, K1, K2, DCC, VE)
00437000      CALL SBCIDA14(DCM, VEC, VISC, DENP1, DENF, QTM, ACM, BCM, STM, DEGM, HCM,
00438000 * HTM, DSM, DCR1, DCR2, DCR3, DCR4)
00439000      CALL SBCIDA3(VISC, DEGM, VEC, DENP1, DCM, BCM, DCR5)
00440000      CALL SBCIDA4(VISC, DEGM, DCM, DENP1, DENF, VEC, ACM, BCM)
00441000      CALL SBCIDA15(VISC, DENF, DENP1, TEC, QTM, VEC, DCM, ACM, BCM, STM,
00442000 *HCM, HTM, DSM, DTP, PER, EFTM, EFTO, DCR1, DCR2, DCR3, DCR4, DCR5, QPR1,
00443000 *QPR2, QPR3, QPR4, DEGM, QPR11, QPR31)
00444000      DEP1=DEP1+INC1
00445000      DENP1=DENP1+INC
00446000      IF(DENP1.GT.DENP2) GO TO 800
00447000      GO TO 715
00448000 800 CONTINUE
00449000      DISPLAY 'REINICIAR A SIMULACAO VIA "MENU"'
00450000      GO TO 725
00451000 730 CONTINUE
00452000      DISPLAY 'ESCOLHA: '
00453000      DISPLAY '          VOLTAR AO INICIO PARA NOVOS DADOS => SIM =1'
00454000      DISPLAY '          TERMINAR O PROGRAMA DE VEZ => QUALQUER NUMERO'
00455000      READ(5,*) M1
00456000      IF(M1.EQ.1) GO TO 735

```

PAGE 0009

00457000 STOP
00458000 END

PROGRAM UNIT MAIN' COMPILED

```

00459000 C
00460000 #CONTROL SEGMENT=SEG2
00461000 C
00462000 SUBROUTINE SBCIDAT(VIS,DEP,DEF,TE,QT,VISC,DENP,DENF,TEC,OTM)
00463000 C
00464000 C FINALIDADE: RECEBER OS DADOS INICIAIS DE PROJETO, NO SISTEMA
00465000 C METRICO E TRANSFORMA-LUS PARA U SISTEMA INGLES.
00466000 C
00467000 C ROGERIO JOSE DA SILVA - PPG - EFEI - 1986
00468000 C
00469000 C.....DECLARACAO DE VARIAVEIS
00470000 C
00471000 IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
00472000 REAL VIS,DEP,DEF,TE,QT,VISC,DENP,DENF,TEC,OTM
00473000 C
00474000 C.....ENTRADA DOS DADOS
00475000 C
00476000 DISPLAY'DE A TEMPERATURA DE TRABALHO [GRAU CENT] =>
00477000 READ(5,*) TEC
00478000 CALL SBCIDA9(TEC,VISC,VIS)
00479000 DISPLAY'DE A DENSIDADE DA PARTICULA [KG/M3] =>
00480000 READ(5,*) DENP
00481000 CALL SBCIDA14(DENF,TEC)
00482000 DISPLAY'DE A VAZAO DO GAS [M3/S] =>
00483000 READ(5,*) QTM
00484000 C
00485000 C.....TRANSFORMACAO DOS RESULTADOS
00486000 C
00487000 DEP=DENP/16.0185
00488000 DEF=DENF/16.0185
00489000 TE=(9.*TEC/5.)+32.
00490000 QT=QTM/2.83169E-02
00491000 C
00492000 C.....IMPRESSAO DOS DADOS
00493000 C
00494000 10 FORMAT(1H1)
00495000 20 FORMAT(3/,1X,40X,S//,1X,35X,S,E15.7,2X,S/)
00496000 30 FORMAT(1X,35X,S,E15.7,2X,S//,1X,35X,S,S,E15.7,2X,S/)
00497000 40 FORMAT(1X,35X,S,F10.3,4X,S//,1X,35X,S,F10.3,4X,S/)
00498000 C
00499000 WRITE(4,10)
00500000 WRITE(4,20)'DADOS INICIAIS DE PROJETO', 'VISCOSIDADE DO GAS',
00501000 * VISC, ' [M/S.M2]'
00502000 WRITE(4,30)'DENSIDADE DO GAS',DENF, '[KG/M3]', 'DENSIDADE DA',
00503000 * ' PARTICULA',DENP, '[KG/M3]'
00504000 WRITE(4,40)'TEMPERATURA DE TRABALHO',TEC, '[GRAUS CENT]',
00505000 * 'VAZAO DE GAS',QTM, '[M3/S]'
00506000 WRITE(6,*)'LEITURA E TRANSFORMACAO COMPLETADA'
00507000 RETURN
00508000 END

```

PROGRAM UNIT SBCIDAT COMPILED

```

00509000 C
00510000 #CONTROL SEGMENT=SEG3
00511000 C
00512000 SUBROUTINE SBCIDAS(TEC,VISC,VIS)
00513000 C
00514000 C FINALIDADE: CALCULAR A VISCOSIDADE DO AR, DADA A TEMPERATURA,
00515000 C OU AINDA, CALCULAR A VISCOSIDADE DE UM GAS, SENDO
00516000 C CONHECIDA A SUA VISCOSIDADE EM UMA DADA TEMPERATURA.
00517000 C
00518000 C ROGERIO JOSE DA SILVA - PPG - EFEI - 1986
00519000 C
00520000 C....DECLARACAO DE VARIAVEIS
00521000 C
00522000 C IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
00523000 C
00524000 C INTEGER N,M
00525000 C
00526000 C REAL VIS,VISC,VIS1,VIS2,VISC1,TEF,TER,TER1,TER2,TE1,TEC
00527000 C
00528000 C....ESCOLHA DO MODO DE CALCULO DA VISCOSIDADE
00529000 C
00530000 C DISPLAY'PARA CALCULAR A VISCOSIDADE ESCOLHA DOIS DOS ITENS ABAIXO'
00531000 C DISPLAY''
00532000 C DISPLAY'CALCULO NO SISTEMA INGLES (GRAUS F. E LBF.S/FT2) => 1'
00533000 C DISPLAY'CALCULO NO SISTEMA S. INT (GRAUS CENT, E N.S/M2) => 2'
00534000 C DISPLAY'VOCE TEM A VISCOSIDADE NA TEMPERATURA DE TRABALHO? => 1'
00535000 C DISPLAY'PROCURA A VISCOSIDADE DO AR A UMA DADA TEMPERATURA?=> 2'
00536000 C DISPLAY'TEM TEMP E VISC,POREM QUER A VISC. EM OUTRA TEMP.? => 3'
00537000 C DISPLAY''
00538000 C DISPLAY'DE O SISTEMA (N) E DE O NUMERO DA RESPOSTA (M)'
00539000 C READ(5,*) N,M
00540000 C GO TO (100,200),N
00541000 100 CONTINUE
00542000 C GO TO (300,400,500),M
00543000 300 CONTINUE
00544000 C DISPLAY'DE O VALOR DA VISCOSIDADE [LBF.S/FT2]'
00545000 C READ(5,*) VIS1
00546000 C VIS=VIS1*6.72E-04/2.09E-05
00547000 C VISC=VIS/0.6715
00548000 C GO TO 900
00549000 400 CONTINUE
00550000 C DISPLAY'DE A TEMPERATURA DA AR [GRAUS FAR.] '
00551000 C READ(5,*) TEF
00552000 C TER=TEF+459.67
00553000 C VIS1=2.270E-08*((TER**1.5)/(TER+198.6))
00554000 C VIS=VIS1*6.72E-04/2.09E-05
00555000 C VISC=VIS/0.6715
00556000 C GO TO 900
00557000 500 CONTINUE
00558000 C DISPLAY'DE A TEMPERATURA E A VISCOSIDADE NO SISTEMA INGLES'
00559000 C READ(5,*) TEF,VIS1
00560000 C TER1=TEF+459.67
00561000 C TER2=9.*TEC/5.+491.67
00562000 C VIS2=VIS1*((TER2/TER1)**0.76)
00563000 C VIS=VIS2*6.72E-04/2.09E-05
00564000 C VISC=VIS/0.6715
00565000 C GO TO 900

```

$dp_{\text{máx}}$ fixo, a eficiência do ciclone invertido será maior se ρ_p for menor, ou a velocidade V_c maior. Porém o aumento de V_c está limitado pela re-entrada de partículas no escoamento, limitando assim o ρ_p máximo de operação, em um ciclone invertido. Os resultados conseguidos vêm demonstrar que, as forças de arraste no interior do ciclone possuem intensidade muito superior à força da gravidade. Neste caso a operação do ciclone, independe da posição de montagem. A vantagem decorrente desta constatação, é a possibilidade de se trabalhar com o ciclone invertido, de forma que as partículas separadas estarão em nível mais elevado, o que permite a sua transferência para o local de uso, ou meio de transporte, por meio da gravidade. Isto elimina o uso de correias transportadoras ou outro meio de carregamento.

5.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base em vários pontos observados durante a realização deste trabalho, algumas sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros são a seguir apresentadas.

Uma primeira sugestão seria a continuação deste trabalho, utilizando-se o banco de ensaios já construído, para realização de uma extensa investigação experimental. Neste trabalho poderia se trabalhar com o ciclone na posição invertida, e verificar o seu comportamento operando com outros tipos de materiais, e grãos. Repetindo todos os ensaios na posição normal. E poder-se-ia também levantar os perfis de velocidades no escoamento para várias velocidades de entrada, verificando sua correlação.

Uma outra sugestão de pesquisa, é o estudo do comportamento do ciclone, quando este opera com gases em altas temperaturas e altas pressões. Este estudo poderia trazer grande contribuição para a aplicação específica em turbinas a gás, que operam utilizando combustíveis sólidos.

Outra sugestão, é a realização de um estudo de transferência de calor no interior de ciclones, associada com a eficiência de separação. Este estudo pode ser desenvolvido na

```

00597000 C
00598000 $CONTROL SEGMENT=SEG4
00599000 C
00600000 SUBROUTINE SBCIDA5(DEP,DEF,VE,VEC)
00601000 C
00602000 C FINALIDADE: CALCULAR A VELOCIDADE DE ARRASTE VERTICAL, E
00603000 C POSSIBILITAR A ESCOLHA DA VELOCIDADE DE ENTRADA.
00604000 C
00605000 C ROGERIO JOSE DA SILVA - PPG - EFEI - 1986
00606000 C
00607000 10 FORMAT(/,1X,4X,S,2X,F6.3,2X,S,2X,S,F7.2,S)
00608000 C
00609000 IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
00610000 REAL VSV,TPI,DEP,DEF,VE,TP,VSV1,VEC
00611000 INTEGER N
00612000 C
00613000 100 CONTINUE
00614000 DISPLAY 'DE O DIAMETRO EM MICRONS DA MAIOR PARTICULA NO ESCOAMENTO'
00615000 READ(5,*)TP
00616000 TPI=TP*3.937E-05
00617000 VSV=1200.*((TPI*DEP/DEF)**0.5)
00618000 VSV1=VSV/60.*0.3048
00619000 WRITE(6,*) 'A VELOCIDADE DE ARRASTE VERTICAL E= ',VSV1,' [M/S]'
00620000 WRITE(4,10) 'A VELOCIDADE DE ARRASTE VERTICAL E= ',VSV1,' [M/S]',
00621000 * ' PARA DIAM. DE PART.= ',TP,' [MICRONS]'
00622000 DISPLAY 'QUER VERIFICAR PARA OUTRO TAMANHO? SIM=1 '
00623000 READ(5,*) N
00624000 IF(N.EQ.1) GO TO 100
00625000 DISPLAY 'DE AGORA UM VALOR PARA A VELOCIDADE DE ENTRADA [M/S]'
00626000 READ(5,*) VEC
00627000 VE=VEC/0.3048
00628000 WRITE(6,*) ' A VELOCIDADE ADOTADA E= ',VEC,' [M/S]'
00629000 RETURN
00630000 END

```

PROGRAM UNIT SBCIDA5 COMPILED

```

00631000 C
00632000 #CONTROL SEGMENT=SEG5
00633000 C
00634000 SUBROUTINE SBCIDA2(DEP,DEF,QT,VIS,VE,DCM,DCC,K1,K2)
00635000 C
00636000 C FINALIDADE: VERIFICAR O DIAMETRO DA PARTE CILINDRICA DO
00637000 C CICLONE, EM FUNCAO DE VARIAVEIS CONHECIDAS.
00638000 C
00639000 C ROGERIO JOSE DA SILVA - EFEI - 1986
00640000 C
00641000 C.....DECLARACAO DE VARIAVEIS
00642000 C
00643000 C IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
00644000 C
00645000 C REAL TP,TP1,DEP,DEF,NUV,QT,K1,K2,VIS,DCC,NO,SQRT,TPM,DCC1,VE,
00646000 C * DCM
00647000 C
00648000 C DISPLAY 'DE O NUMERO DE VOLTAS DA ESPIRAL GASOSA (USUAL=3)'
00649000 C READ(5,*) NUV
00650000 C DISPLAY 'DE O NUMERO DE CICLONES EM PARALELO'
00651000 C READ(5,*) NO
00652000 C DISPLAY 'DE OS VALORES DOS FATORES DE PROJETO: K1 E K2 '
00653000 C READ(5,*) K1, K2
00654000 C DISPLAY 'DE O DIAMETRO CRITICO DA PARTICULA EM MICRONS '
00655000 C READ(5,*) TPM
00656000 C
00657000 C TP=TPM*1E-06
00658000 C TP1=(TP/5.)*3.4
00659000 C
00660000 C 10 FORMAT(/,1X,4X,S,2X,F10.5,2X,S/)
00661000 C 20 FORMAT(1X,4X,S,2X,F10.5,2X,S/)
00662000 C
00663000 C.....IMPRESSAO DOS RESULTADOS
00664000 C
00665000 C DCC=((((DEP-DEF)*TP1)**2*3.1416*NUV*QT/(9.*K2**2*K1*VIS*
00666000 C *NO))**(1./3.))
00667000 C WRITE(6,*)'O DIAM. DCC SEGUNDO MARTINEZ-CASAL E = ',DCC,' [M]'
00668000 C WRITE(4,10)'O DIAM. DCC SEGUNDO MARTINEZ-CASAL E = ',DCC,' [M]'
00669000 C
00670000 C DCC1=2.2*(TP**2)*DEP*VE*NUV/VIS
00671000 C WRITE(6,*)'O DIAMETRO DO CICLONE SEGUNDO ROSIN E= ',DCC1,' [M]'
00672000 C WRITE(4,10)'O DIAMETRO DO CICLONE SEGUNDO ROSIN E= ',DCC1,' [M]'
00673000 C DISPLAY 'ADOTE UM VALOR PROXIMO PARA O DIAMETRO DCC [METROS]'
00674000 C READ(5,*) DCM
00675000 C DCC=DCM/0.3048
00676000 C RETURN
00677000 C END

```

PROGRAM UNIT SBCIDA2 COMPILED

```

00678000 C
00679000 #CONTROL SEGMENT=SEG6
00680000 C
00681000 SUBROUTINE SBCIDA6<DEP,DEF,VIS,VS,K1,K2,DCC,DCM,VE,VEC,QT>
00682000 C
00683000 C FINALIDADE: CALCULAR A "SALTATION VELOCITY", E ENCONTRAR
00684000 C A VELOCIDADE DE ENTRADA QUE MELHOR SE AJUSTE
00685000 C A RELACAO DE: VALOR OTIMO "VE/VS= 1.25"
00686000 C VALOR MAXIMO "VE/VS= 1.35"
00687000 C
00688000 C ROGERIO JOSE DA SILVA - PPG - EFEI - 1986
00689000 C
00690000 C.....DECLARACAO DE VARIAVEIS
00691000 C
00692000 C IMPLICIT LOGICAL<A-Z>
00693000 C REAL DCM,QT,VE,OMG,DEP,DEF,VIS,GR,VS,K1,K2,DCC,VEVS,VSC,VEC
00694000 C INTEGER NF
00695000 C
00696000 C VE=QT/(K1*K2*DCC**2)
00697000 C GR=32.2
00698000 C GO TO 500
00699000 C
00700000 C 100 CONTINUE
00701000 C DCM=DCC*0.3048
00702000 C WRITE<6,*>'O DIAMETRO ATUAL DO CICLONE E= ',DCM,' [M]'
00703000 C WRITE<6,*>'DE O NOVO DIAMETRO [M] => '
00704000 C READ<5,*> DCM
00705000 C DCC=DCM/0.3048
00706000 C VE=QT/(K1*K2*DCC**2)
00707000 C GO TO 500
00708000 C
00709000 C 200 CONTINUE
00710000 C WRITE<6,*>'A VELOCIDADE ATUAL VE= ',VEC,' [M]'
00711000 C DISPLAY'DE A NOVA VELOCIDADE [M/S] => '
00712000 C READ<5,*> VEC
00713000 C VE=VEC/0.3048
00714000 C GO TO 500
00715000 C
00716000 C 300 CONTINUE
00717000 C WRITE<6,*>'O FATOR K2 ATUAL E= ', K2
00718000 C DISPLAY'DE O NOVO FATOR DE PROJETO => '
00719000 C READ<5,*> K2
00720000 C VE=QT/(K1*K2*DCC**2)
00721000 C GO TO 500
00722000 C
00723000 C 500 CONTINUE
00724000 C OMG=(((DEP-DEF)*(VIS*GR*4.)/(3.*DEF**2))**(1./3.))
00725000 C
00726000 C VS=(((K2/(1.-K2))**(1./3.))*OMG*2.055*((K2*DCC)**0.067))*
00727000 C * (VE**(2./3.))
00728000 C
00729000 C VEC=VE*0.3048
00730000 C VSC=VS*0.3048
00731000 C VEVS=VE/VS
00732000 C WRITE<6,*>'VELOCIDADE DE ENTRADA = ',VEC,' [M/S]'
00733000 C WRITE<6,*>'SALTATION VELOCITY = ',VSC,' [M/S]'
00734000 C WRITE<6,*>'A RELACAO VE/VS E= ',VEVS

```

```
00735000      10 FORMAT(7,1X,4X,S,2X,F8.4,2X,S)
00736000      15 FORMAT(1X,4X,S,2X,F8.4,2X,S)
00737000      DCM=DCC*0.3048
00738000      WRITE(4,10)'DIAMETRO DO CICLONE =',DCM,'[M]'
00739000      WRITE(4,15)'VELOCIDADE DE ENTRADA=',VEC,'[M/S]'
00740000      WRITE(4,15)'SALTATION VELOCITY" =',VSC,'[M/S]'
00741000      WRITE(4,15)'A RELACAO DE "VE/VSC" =',VEVS
00742000      C
00743000      DISPLAY'QUER MODIFICAR O DIAMETRO DO CICLONE? - ESCREVA=>1'
00744000      DISPLAY'QUER MODIFICAR A VELOCIDADE DE ENTRADA?-ESCREVA=>2'
00745000      DISPLAY'QUER MODIFICAR O FATOR DE PROJETO K2? - ESCREVA=>3'
00746000      DISPLAY'PARA SAIR DO CICLO DO PROGRAMA ? - ESCREVA=>4'
00747000      READ(5,*) NF
00748000      GO TO (100,200,300,400),NF
00749000      400 CONTINUE
00750000      WRITE(4,20)'A NOVA VELOCIDADE DE ENTRADA VE= ',VEC,'[M/S]'
00751000      20 FORMAT(1X,5X,S,3X,F7.3,2X,S)
00752000      DCC=DCM/0.3048
00753000      RETURN
00754000      END
```

PROGRAM UNIT SBCIDA6 COMPILED

```
00887000      WRITE(4,10)'TP [MICRONS]', 'EFICIENCIA [%]'
00888000      WRITE(4,50)
00889000      WRITE(6,30)'TP [MICRONS]', 'EFICIENCIA [%]'
00890000      DO 24 N2=1,M
00891000      WRITE(6,40) DTP(N2),EFTM(N2)
00892000      WRITE(4,20) DTP(N2),EFTM(N2)
00893000      24 CONTINUE
00894000      C
00895000      C.....CALCULO DA EFICIENCIA TOTAL DO CICLONE
00896000      C
00897000      SOMA=0.00
00898000      DO 34 N3=1,M
00899000      XPE(N3)=PER(N3)*EFT(N3)
00900000      SOMA=SOMA+XPE(N3)
00901000      EFTO=SOMA
00902000      34 CONTINUE
00903000      DCM=DCC*0.3048
00904000      WRITE(6,*)'A EFICIENCIA TOTAL DO CICLONE E= ',EFTO
00905000      WRITE(4,60)'A EFICIENCIA TOTAL DO CICLONE EFTO= ',EFTO
00906000      60 FORMAT(7,1X,40X,S,2X,F8.4,2X,'[%]')
00907000      C
00908000      RETURN
00909000      END
```

PROGRAM UNIT SBCIDA9 COMPILED

```

00910000 C
00911000 *CONTROL SEGMENT=SEG9
00912000 C
00913000 SUBROUTINE SBCIDA1(DCC,VE,VIS,DEP,DEF,QT,AC,BC,ST,DEG,HC,
00914000 * HTC,DSP,DCR1,DCR3,DCR4,DCR5)
00915000 C
00916000 C FINALIDADE: CALCULAR SEGUNDO METODOS LEVANTADOS POR ALGUNS
00917000 C AUTORES O DIAMETRO CRITICO DE PARTICULA PARA AS
00918000 C DIMENSOES DE UM CICLONE ANTERIORMENTE PROJETADO.
00919000 C
00920000 C ROGERIO JOSE DA SILVA - EFEI - 1986
00921000 C
00922000 C.....DECLARACOES DE VARIAVEIS
00923000 C
00924000 C IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
00925000 C
00926000 C REAL AC,BC,DCC,DSP,DEG,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,DCR6,DCR7,DEP,
00927000 C * DEF,HTC,HC,NUV,QT,RAIO,ST,TEM,VOL,VE,VIS,XD,XN,SQRT
00928000 C
00929000 C
00930000 C.....CALCULO DO DIAMETRO CRITICO SEGUNDO VARIOS AUTORES
00931000 C
00932000 C VOL=(3.1416/4.)*(((HTC-HC)/(DCC-DSP))*((DCC**3-DSP**3)/3.))+
00933000 C *(DCC**2*HC)-(DEG**2*ST))
00934000 C RAIO=DCC/2.-BC/2.
00935000 C TEM=VOL/QT
00936000 C NUV=TEM*VE/(3.1416*DCC)
00937000 C
00938000 C.....CALCULO SEGUNDO: ROSIN, RAMMLER E INTELMAAN
00939000 C
00940000 C DCR1=3.*(SQRT(2.*VIS*RAIO*(1.-(2.*RAIO/DCC)))/(3.1416*DEP*VE*
00941000 C * NUV)))
00942000 C
00943000 C DCR2=3.*(SQRT(2.*VIS*RAIO*(1.-(2.*RAIO/DCC)))/(3.1416*DEP*VE*3.)))
00944000 C DCR3=SQRT(9.*VIS*BC/(2.*3.1416*VE*(DEP-DEF)))
00945000 C
00946000 C.....CALCULO SEGUNDO DAVIES
00947000 C
00948000 C DCR4=(3./2.)*(SQRT((DCC**2*VIS/(2.*HTC*(DEP-DEF)*VE))*
00949000 C * (1.-(DEG/DCC)**4))))
00950000 C
00951000 C.....CALCULO SEGUNDO FEIFEL
00952000 C
00953000 C XD=(((HTC-HC)/(DCC-DSP))*((DCC**3-DSP**3)/DCC**2)+HC-ST*((DEG/
00954000 C * DCC)**2))
00955000 C XN=1.-(2.*DEG/(3.*DCC))**4)
00956000 C DCR5=3.*(SQRT(QT*VIS*XN/(2.*3.1416*(VE**2)*(DEP-DEF)*XD)))
00957000 C
00958000 C.....TRANSFORMACAO DOS RESULTADOS
00959000 C
00960000 C DCR1=DCR1/1E-06
00961000 C DCR2=DCR2/1E-06
00962000 C DCR3=DCR3/1E-06
00963000 C DCR4=DCR4/1E-06
00964000 C DCR5=DCR5/1E-06
00965000 C
00966000 C.....SAIDA DOS RESULTADOS

```

```
00967000 C
00968000 10 FORMAT(4/,1X,20X,S,S,3/,1X,44X,S,2/)
00969000 20 FORMAT(1X,7X,S,12X,F6.3,/)
00970000 30 FORMAT(1X,7X,S,14X,F6.3,/)
00971000 40 FORMAT(/,1X,7X,S,22X,F6.3,/)
00972000 50 FORMAT(1X,7X,S,12X,F6.3,/)
00973000 60 FORMAT(1H1)
00974000 C
00975000 WRITE(4,60)
00976000 WRITE(4,10)'RESULTADOS DOS CALCULOS DE DIAMETRO CRITICO',
00977000 * ' DAS PARTICULAS', 'DIAMETRO CRITICO [MICRONS]'
00978000 WRITE(4,20)'SEGUNDO ROSIN, RAMMLER E INTELMAN ',DCR1
00979000 WRITE(4,30)'ROSIN, P/ NUV SENDO IGUAL A 03 ',DCR2
00980000 WRITE(4,20)'ROSIN, SEGUNDO MODELO SIMPLIFICADO',DCR3
00981000 WRITE(4,40)'SEGUNDO MODELO DE DAVIES',DCR4
00982000 WRITE(4,40)'SEGUNDO MODELO DE FEIFEL',DCR5
00983000 C
00984000 RETURN
00985000 END
```

PROGRAM UNIT SBCIDA1 COMPILED

```

00986000 C
00987000 #CONTROL SEGMENT=SEG10
00988000 C
00989000 SUBROUTINE SBCIDA3(VIS,DEG,VE,DEP,DCC,BC,DCR8)
00990000 C
00991000 C FINALIDADE: CALCULAR O DIAMETRO CRITICO DAS PARTICULAS
00992000 C SEGUNDO EQUACAO DE DALLA VALLE.
00993000 C
00994000 C ROGERIO JOSE DA SILVA - EFEI - 1986
00995000 C
00996000 C DECLARACAO DE VARIAVEIS
00997000 C
00998000 C IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
00999000 C
01000000 REAL VIS,DEG,VE,DEP,DCC,BC,DCR7(18),SQRT,ZV(6),MV(3),DCR(18),
01001000 * DCR8,DCR81,ZV1
01002000 C
01003000 C INTEGER J1,J2,J3,N
01004000 C
01005000 C PREENCHIMENTO DE VARIAVEIS
01006000 C
01007000 C DATA ZV/0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0/
01008000 C DATA MV/0.5,0.6,0.7/
01009000 C
01010000 C.....PARTE EXECUTAVEL
01011000 C
01012000 C N=0
01013000 C DO 14 J1=1,3
01014000 C DO 24 J2=1,6
01015000 C N=1+N
01016000 C DCR(N)=3.*(SQRT(VIS*DEG/(2.*3.1416*ZV(J2))*VE*DEP*((4*
01017000 * (DCC-2.*BC)/0.32)**MV(J1))))
01018000 C DCR7(N)=DCR(N)/1.E-06
01019000 C 24 CONTINUE
01020000 C 14 CONTINUE
01021000 C
01022000 C ZV1=2.3
01023000 C DCR81=3.*(SQRT(VIS*DEG/(2.*3.1416*ZV1*VE*DEP*
01024000 *((4.*(DCC-2.*BC)/0.32)**0.6))))
01025000 C DCR8=DCR81/1.E-06
01026000 C
01027000 C.....SAIDA DOS RESULTADOS
01028000 C
01029000 C WRITE(6,*) 'DIAMETRO CRITICO SEGUNDO DALLA VALLE'
01030000 C WRITE(4,10)'SEGUNDO MODELO DE DALLA VALLE'
01031000 C 10 FORMAT(/,1X,7X,S,17X,'MV=0.5',6X,'MV=0.6',6X,'MV=0.7',/)
01032000 C 20 FORMAT(1X,43X,S,F3.1,4X,F6.3,6X,F6.3,6X,F6.3)
01033000 C DO 34 J3=1,6
01034000 C WRITE(6,*) DCR7(J3),', ',DCR7(J3+6),', ',DCR7(J3+12)
01035000 C WRITE(4,20) 'ZV=',ZV(J3),DCR7(J3),DCR7(J3+6),DCR7(J3+12)
01036000 C 34 CONTINUE
01037000 C RETURN
01038000 C END

```

PROGRAM UNIT SBCIDA3 COMPILED

```

01039000 C
01040000 $CONTROL SEGMENT=SEG11
01041000 C
01042000 SUBROUTINE SBCIDA4(VIS,DEG,DCC,DEP,DEF,VE,AC,BC)
01043000 C
01044000 C FINALIDADE: CALCULA O DIAMETRO CRITICO SEGUNDO FEIFEL
01045000 C
01046000 C ROGERIO JOSE DA SILVA - EFEI - 1986
01047000 C
01048000 C.....DECLARACAO DE VARIAVEIS
01049000 C
01050000 IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
01051000 C
01052000 REAL RRI(4),YC(4),DCR(4),DCR6(4),SQRT,ALOG,R1,R2,VIS,DEG,DCC,
01053000 * DEP,DEF,VE,AC,BC
01054000 C
01055000 INTEGER L1
01056000 C
01057000 C.....PREENCHIMENTO DE VARIAVEIS
01058000 C
01059000 DATA RRI/1.2,1.3,1.4,1.5/
01060000 C
01061000 WRITE(6,*)'DIAMETRO CRITICO SEGUNDO FEIFEL','DIAM.[MICRONS]'
01062000 WRITE(4,10)'SEGUNDO MODELO DE FEIFEL PARA A RELACAO DO DIAMETRO',
01063000 * ' DO NUCLEO DO VORTICE'
01064000 10 FORMAT(77,1X,7X,S,S,7)
01065000 20 FORMAT(1X,42X,S,1X,F3.1,2X,F6.3)
01066000 C
01067000 DO 44 L1=1,4
01068000 YC(L1)=(SQRT(1.-(1./RRI(L1))**2))-((1./RRI(L1))**2)*
01069000 * ALOG(RRI(L1)+(SQRT((RRI(L1)**2)-1.)))
01070000 R1=DCC
01071000 R2=DCC-2.*BC
01072000 WRITE(6,*) ' YC = ',YC(L1)
01073000 DCR(L1)=3.*(SQRT(VIS*YC(L1)*(-1.)*DEG**3*(DCC/2.))*ALOG
01074000 * (R2/R1))/4.*(DEP-DEF)*VE*AC*BC*((DCC/2.)/RRI(L1)))
01075000 DCR6(L1)=DCR(L1)/1.E-06
01076000 WRITE(6,*) DCR6(L1)
01077000 WRITE(4,20) 'R/RI=',RRI(L1),DCR6(L1)
01078000 44 CONTINUE
01079000 RETURN
01080000 END

```

PROGRAM UNIT SBCIDA4 COMPILED

```

01081000 C
01082000 C
01083000 *CONTROL SEGMENT-SEC12
01084000 C
01085000 SUBROUTINE SBCIDA10(DCC,K1,K2,K3,K4,K5,K6,K7,AC,BC,ST,DEG,HC,
01086000 * HTC,DSP,DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM)
01087000 C
01088000 C FINALIDADE: CALCULA E IMPRIME OS VALORES DAS DIMENSOES DE
01089000 C PROJETO DO CICLONE, SEGUNDO UMA DADA CONFIGURACAO.
01090000 C
01091000 C ROGERIO JOSE DA SILVA - PPG - EFEI - 1986
01092000 C
01093000 C.....DECLARACAO DE VARIAVEIS
01094000 C
01095000 C IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
01096000 C
01097000 C REAL DCC,K1,K2,K3,K4,K5,K6,K7,AC,BC,ST,DEG,HC,HTC,DSP,DCM,ACM,
01098000 * BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM,FKM
01099000 C
01100000 C.....CALCULO DAS DIMENSOES
01101000 C
01102000 FKM=0.3048
01103000 AC=K1*DCC
01104000 ACM=AC*FKM
01105000 BC=K2*DCC
01106000 BCM=BC*FKM
01107000 ST=K3*DCC
01108000 STM=ST*FKM
01109000 DEG=K4*DCC
01110000 DEGM=DEG*FKM
01111000 HC=K5*DCC
01112000 HCM=HC*FKM
01113000 HTC=K6*DCC
01114000 HTM=HTC*FKM
01115000 DSP=K7*DCC
01116000 DSM=DSP*FKM
01117000 DCM=DCC*FKM
01118000 C
01119000 C.....SAIDA DOS RESULTADOS
01120000 C
01121000 10 FORMAT(2/,1X,48X,27(' '),/,1X,48X,'*',1X,S,1X,'*',/,
01122000 * 1X,48X,27(' '),/)
01123000 20 FORMAT(1X,38X,S,/,1X,42X,,S,1X,F8.3,2X,S,)
01124000 30 FORMAT(1X,51X,S,1X,F8.3,2X,S)
01125000 C
01126000 WRITE(4,10)'RESULTADOS DOS CALCULOS'
01127000 WRITE(4,20)'CONFIGURACAO DE PROJETO DO CICLONE',
01128000 * 'DIAMETRO DCC =',DCM,'[M]'
01129000 WRITE(4,30)'AC =',ACM,'[M]'
01130000 WRITE(4,30)'BC =',BCM,'[M]'
01131000 WRITE(4,30)'ST =',STM,'[M]'
01132000 WRITE(4,30)'DEG =',DEGM,'[M]'
01133000 WRITE(4,30)'HC =',HCM,'[M]'
01134000 WRITE(4,30)'HTC =',HTM,'[M]'
01135000 WRITE(4,30)'DSP =',DSM,'[M]'
01136000 RETURN
01137000 END

```

```

01138000 C
01139000 #CONTROL SEGMENT-SEG17
01140000 C
01141000 SUBROUTINE SBCIDA11(VISC, DENF, DENP, TEC, QTM)
01142000 C
01143000 C FINALIDADE: IMPRIMIR OS DADOS INICIAIS DE PROJETO
01144000 C
01145000 REAL VISC, DENF, DENP, TEC, QTM
01146000 C
01147000 C
01148000 110 FORMAT(1H1)
01149000 120 FORMAT(3I, 1X, 34X, '|', 5I(' '), '|')
01150000 130 FORMAT(1X, 34X, '|', 12X, S, 14X, '|')
01151000 140 FORMAT(1X, 34X, '|', 23(' '), '+', 16(' '), '+', 10(' '), '|')
01152000 150 FORMAT(1X, 34X, '|', S, '|', E15.7, 1X, '|', S, '|')
01153000 160 FORMAT(1X, 34X, '|', S, '|', 3X, F10.3, 3X, '|', S, '|')
01154000 C
01155000 WRITE(4, 110)
01156000 WRITE(4, 120)
01157000 WRITE(4, 130) 'DADOS INICIAIS DE PROJETO'
01158000 WRITE(4, 140)
01159000 WRITE(4, 150) 'VISCOSIDADE DO GAS', VISC, ' [N.S/M2]'
01160000 WRITE(4, 140)
01161000 WRITE(4, 150) 'DENSIDADE DO GAS', DENF, ' [KG/M3]'
01162000 WRITE(4, 140)
01163000 WRITE(4, 150) 'DENSIDADE DA PARTICULA', DENP, ' [KG/M3]'
01164000 WRITE(4, 140)
01165000 WRITE(4, 160) 'TEMPERATURA DE TRABALHO', TEC, ' [GRAUS C]'
01166000 WRITE(4, 140)
01167000 WRITE(4, 160) 'VAZAO DE GAS NO CICLONE', QTM, ' [M3/S]'
01168000 WRITE(4, 140)
01169000 RETURN
01170000 END

```

PROGRAM UNIT SBCIDA11 COMPILED

```

01171000 C
01172000 #CONTROL SEGMENT=SEGI4
01173000 C
01174000 SUBROUTINE SBCIDA12(DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM,DENF,DENP,
01175000 *QPR1,QPR2,QPR3,QPR4,VEC,QPR11,QPR31)
01176000 C
01177000 C
01178000 C FINALIDADE: CALCULAR A QUEDA DE PRESSAO NOS CICLONES, SEGUNDO
01179000 C MODELOS EMPIRICOS DE ALGUNS AUTORES.
01180000 C
01181000 IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
01182000 C
01183000 INTEGER JV, JON
01184000 C
01185000 REAL SQRT,DCM,ACM,BCM,STM,DEGM,HCM,HTM,DSM,DENF,DENP,QPR1,QPR2,
01186000 *QPR3,QPR4,VEC,GFC,AREA,FVOL,FFP,VSA,FLP,VTMVS,ALFA,KPL,NPRS,
01187000 *NPRE,NPER,PFL,CONC,QTM,QCONC,QCON,F1,QPR11,QPR31
01188000 C
01189000 C INICIO DOS CALCULOS
01190000 C
01191000 C AREA DA SUPERFICIE INTERNA DO CICLONE
01192000 C
01193000 AREA=(3.1416*DCM*HCM)+(2.*3.1416*DEGM*STM)+(3.1416*DSM/2.+DCM/
01194000 *2.)*(SQRT((HTM-HCM)**2)+(DCM/2.+DSM/2. )**2))+(3.1416/4.)*
01195000 *(DCM**2-DEGM**2)
01196000 C
01197000 100 CONTINUE
01198000 WRITE(6,*)'DE O VALOR DA FRACAO VOLUMETRICA DAS PARTICULAS'
01199000 WRITE(6,*)' VALVULA ROTATIVA PREPARADA PARA FVOL=1.614E-5'
01200000 READ(5,*) FVOL
01201000 CONC=FVOL*DENP*8000.
01202000 QTM=VEC*ACM*BCM
01203000 QCONC=CONC*QTM
01204000 WRITE(6,*)'O VALOR DA CONCENTRACAO E =',QCONC,' [GRAMAS/M3]'
01205000 WRITE(6,*)'VALOR DE QCON ESTA CONFIRMADO? SIM=1 ==>'
01206000 READ(5,*) JON
01207000 IF(JON.EQ.1)GO TO 200
01208000 GO TO 100
01209000 200 CONTINUE
01210000 C
01211000 C CALCULO DA QUEDA DE PRESSAO SEGUNDO STAIRMAND
01212000 C
01213000 GFC=0.005
01214000 QCON=QCONC/1000.
01215000 VSA=QTM/(3.1416*(DEGM**2)/4.)
01216000 FFP=(-(SQRT(DEGM/2.*(DCM-BCM)))+(SQRT((DEGM/(2.*(DCM-BCM)))+
01217000 *(4.*GFC*AREA/(ACM*BCM)))/(2.*GFC*AREA/(ACM*BCM))
01218000 C
01219000 C
01220000 QPR1=((DENF+QCON)/(2.*9.81))*(VEC**2*(1.+(2.*FFP**2*((2.*(DCM
01221000 *-BCM)/DEGM)-1)))+(2.*VSA**2)
01222000 QPR11=QPR1*DENF/(DENF+QCON)
01223000 WRITE(6,*)'O VALOR DE QPR11 E =',QPR11,' [MMCA]'
01224000 C
01225000 C CALCULO SEGUNDO MARTINEZ E CASAL
01226000 C
01227000 QPR2=0.0343*DENF*(VEC**2)*(11.3*((ACM*BCM/DEGM**2)**2)+3.33)

```

```

01228000 C
01229000 C   CALCULO SEGUNDO BARTH
01230000 C
01231000      F1=2.*(1.-2.*(DCM/2.-BCM/2.)/DCM)
01232000      WRITE(6,*)'O VALOR DE 2(1-2RE/D) = ',F1,'DE O VALOR DE ALFA'
01233000      READ(5,*) ALFA
01234000      FLP=0.02
01235000      VTMVS=3.1416*DEGM*(DCM-BCM)/(2.*ACM*BCM*ALFA+(3.1416*(HTM-STM
01236000 *)*(DCM-BCM)*FLP))
01237000      WRITE(6,*)'A BORDA DO TUBO DE SAIDA TEM CANTOS VIVOS? SIM=1'
01238000      READ(5,*) JV
01239000      IF(JV.EQ.1) GO TO 300
01240000      KPL=3.41
01241000      GO TO 400
01242000 300 CONTINUE
01243000      KPL=4.40
01244000 400 CONTINUE
01245000      NPRS=(KPL/(VTMVS**(2./3.)))+1.
01246000      NPRES=(DEGM/DCM)*(1./((1.-2.*VTMVS*(HTM-STM)*FLP/DEGM)**2+1.))
01247000      NPER=NPRS+NPRES
01248000      PFL=NPER*((ACM*BCM/(3.1416*DEGM**2/4.))**2)*VTMVS**2
01249000 C
01250000      QPR3=PFL*VEC**2*(DENF+QCON)/(2.*9.81)
01251000      QPR31=QPR3*DENF/(DENF+QCON)
01252000      WRITE(6,*)'VALOR DE QPR31= ',QPR31,' ENMCAJ'
01253000 C
01254000 C   CALCULO SEGUNDO SHEPHERD E LAPPLE
01255000 C
01256000      QPR4=0.82042*DENF*(VEC**2)*(ACM*BCM/DEGM**2)
01257000 C
01258000      RETURN
01259000      END

```

PROGRAM UNIT SBCIDA12 COMPILED

```

01260000 C
01261000 #CONTROL SEGMENT-SEG15
01262000 C
01263000 SUBROUTINE SBCIDA13(AC,BC,DCC,DEG,DSP,DEP,HC,HTC,QT,ST,TE,VIS,
01264000 * PER,DEF,DTP,N,EFTO,EFTM)
01265000 C
01266000 C FINALIDADE: CALCULAR A EFICIENCIA DO CICLONE PARA CADA TAMANHO
01267000 C DE PARTICULA ENCONTRADO NA DISTRIBUICAO POR FAIXAS.
01268000 C
01269000 C ROGERIO JOSE DA SILVA - PPG - EFEI - 1986
01270000 C
01271000 C.....DECLARACAO DE VARIAVEIS
01272000 C
01273000 C IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
01274000 C
01275000 C INTEGER M,N1,N2,N3
01276000 C
01277000 C REAL AC,BC,DEG,DCC,DN,DSP,DEP,DTP(15),EXP,EFTM(15),EFT(15),GC,
01278000 * HC,HTC,LC,NV,SOMA,QT,RT,ST,TE,TP(15),VIS,VNL,VH,VALOR,XPE(15),
01279000 * PER(15),EFTO,DCM,DENF,DENP,QT,TEC,DEF
01280000 C
01281000 C.....INICIO DOS CALCULOS
01282000 C
01283000 C LC=2.3*DEG*((DCC**2)/(AC*BC))*((1./3.))
01284000 C DN=DCC-(DCC-DSP)*((ST+LC-HC)/(HTC-HC))
01285000 C IF((ST+LC).GT.HTC) GO TO 100
01286000 C VNL=(3.1416*(DCC**2)*(HC-ST)/4.)+(3.1416*DCC**2)/4.*
01287000 *((LC+ST-HC)/3.)*(1.+(DN/DCC)+((DN**2)/DCC**2))-3.1416*
01288000 *(DEG**2)*LC/4.)
01289000 C WRITE(6,*) ' VNL = ',VNL
01290000 C VALOR=VNL
01291000 C GO TO 200
01292000 C 100 CONTINUE
01293000 C VH=(3.1416*(DCC**2)*(HC-ST)/4.)+(3.1416*(DCC**2)/4.)*((HTC-HC)/
01294000 * 3.)*(1.+(DSP/DCC)+((DSP**2)/DCC**2))-3.1416*(DEG**2)*
01295000 * (HTC-ST)/4.)
01296000 C WRITE(6,*) ' VH = ',VH
01297000 C VALOR=VH
01298000 C 200 CONTINUE
01299000 C GC=(2.*(3.1416*(ST-(AC/2.))*((DCC**2)-(DEG**2)))+4.*VALOR)*
01300000 *(DCC/((AC**2)*(BC**2)))
01301000 C
01302000 C 10 FORMAT(3/,1X,38X,S,4X,'!',4X,S)
01303000 C 20 FORMAT(1X,40X,F8.4,6X,'!',6X,F8.4)
01304000 C 30 FORMAT(3/,1X,3X,S,8X,S/)
01305000 C 40 FORMAT(1X,4X,F8.4,12X,F8.4)
01306000 C 50 FORMAT(1X,38X,16(' '),'+',18(' '))
01307000 C
01308000 C.....O PROGRAMA CALCULA AQUI A EFICIENCIA FRACIONADA
01309000 C
01310000 C DO 14 N1=1,N
01311000 C TP(N1)=DTP(N1)*3.28094E-06
01312000 C RT=DEP*(TP(N1)**2)/(18.*VIS)
01313000 C NV=1.-(1.-((12.*DCC)**0.14)/2.5)*(((TE+450)/530.)**0.3)
01314000 C EFT(N1)=1.-EXP((-2.)*((GC*RT*QT*(NV+1.))/DCC**3))*((0.5/(NV+1.)))
01315000 C EFTM(N1)=EFT(N1)*100.
01316000 C 14 CONTINUE

```

```

01317000      WRITE(4,10)'TP [MICRONS]', 'EFICIENCIA [%]'
01318000      WRITE(4,50)
01319000      WRITE(6,30)'TP [MICRONS]', 'EFICIENCIA [%]'
01320000      DO 24 N2=1,M
01321000      WRITE(6,40) DTP(N2),EFTM(N2)
01322000      WRITE(4,20) DTP(N2),EFTM(N2)
01323000      24 CONTINUE
01324000      C
01325000      C.....CALCULO DA EFICIENCIA TOTAL DO CICLONE
01326000      C
01327000      SOMA=0.00
01328000      DO 34 N3=1,M
01329000      XPE(N3)=PER(N3)*EFT(N3)
01330000      SOMA=SOMA+XPE(N3)
01331000      EFTO=SOMA
01332000      34 CONTINUE
01333000      DCM=DCC*0.3048
01334000      WRITE(6,*)'A EFICIENCIA TOTAL DO CICLONE E= ',EFTO
01335000      WRITE(4,60)'A EFICIENCIA TOTAL DO CICLONE EFTO= ',EFTO
01336000      60 FORMAT(/,1X,40X,S,2X,F8.4,2X,'[%]')
01337000      DENP=DEP*16.0185
01338000      DENF=DEF*16.0185
01339000      TEC=5.*TEC/9.-32.
01340000      QTM=QT*2.83169E-02
01341000      WRITE(2,*)DCM,EFTO
01342000      WRITE(7,*)EFTO,DENF,DENP,TEC,QTM
01343000      C
01344000      RETURN
01345000      END

```

```

01346000 C
01347000 #CONTROL SEGMENT=SEG16
01348000 C
01349000 SUBROUTINE SBCIDAVS(QT,DEP,DEF,VIS,K1,K2,DCC,VE)
01350000 C
01351000 IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
01352000 REAL OMG,DEP,DEF,VIS,GR,VS,K1,K2,DCC,VE,VEC,VSC,VEVS,DCM,
01353000 * QT,QTM
01354000 C
01355000 GR=32.2
01356000 C
01357000 VE=QT/(K1*K2*DCC**2)
01358000 VEC=VE*0.3048
01359000 WRITE(6,*) 'VALOR DA VELOCIDADE AQUI E= ', VEC, ' [M/S]'
01360000 OMG=(((DEP-DEF)*(VIS*GR*4.)/(3.*DEF**2))**(1./3.))
01361000 C
01362000 VS=(((K2/(1.-K2))**(1./3.))*OMG*2.055*((K2*DCC)**0.067))*
01363000 * (VE**(2./3.))
01364000 C
01365000 VEC=VE*0.3048
01366000 VSC=VS*0.3048
01367000 WRITE(6,*) 'VELOCIDADE DE ENTRADA = ', VEC, ' [M/S]'
01368000 WRITE(6,*) 'SALTATION VELOCITY = ', VSC, ' [M/S]'
01369000 VEVS=VE/VS
01370000 WRITE(6,*) 'A RELACAO VE/VS E= ', VEVS
01371000 RETURN
01372000 END

```

PROGRAM UNIT SBCIDAVS COMPILED

```

01373000 C
01374000 $CONTROL SEGMENT=SEG17
01375000 C
01376000        SUBROUTINE SBCIDA14(DENF,TEC)
01377000 C
01378000 C        FINALIDADE: CALCULAR A MASSA ESPECIFICA DO AR OU
01379000 C                    DAR A MASSA DO GAS CARREADOR
01380000 C
01381000        IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
01382000        INTEGER N
01383000        REAL DENF,PBA,PEST,TEC
01384000 C
01385000        WRITE(6,*)'SE TIVER O VALOR DA MASSA ESPECIFICA DO ',
01386000        *'GAS: SIM=1'
01387000        READ(5,*)N
01388000        IF(N.EQ.1) GO TO 100
01389000        WRITE(6,*)'DE A PRESSAO BAROMETRICA LOCAL E A PRESSAO ',
01390000        *'ESTATICA NA ENTRADA DO CICLONE'
01391000        READ(5,*)PBA, PEST
01392000        DENF=(9.81*13.6*PBA+9.81*PEST)/(287 *(273.+TEC))
01393000        GO TO 200
01394000        100 CONTINUE
01395000        WRITE(6,*)'DA A MASSA ESPECIFICA DO GAS [ KG/M3 ]'
01396000        READ(5,*)DENF
01397000        200 CONTINUE
01398000        RETURN
01399000        END

```

PROGRAM UNIT SBCIDA14 COMPILED

```

01400000 C
01401000 #CONTROL SEGMENT=SEG18
01402000 C
01403000 SUBROUTINE SBCIDA15(VISC,DENF,DENP,TEC,OTM,VEC,DCM,ACM,BCM,
01404000 *STM,HCM,HTM,DSM,DTP,PER,EFTM,EFTD,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,
01405000 *QPR1,QPR2,QPR3,QPR4,DEGM,QPR11,QPR31)
01406000 C
01407000 C FINALIDADE : IMPRIMIR TABELA DOS RESULTADOS DO CALCULO
01408000 C
01409000 C AUTOR : ROGERIO JOSE DA SILVA
01410000 C
01411000 IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
01412000 REAL VISC,DENF,DENP,TEC,OTM,VEC,DCM,ACM,BCM,STM,HCM,HTM,
01413000 *DSM,DTP(15),PER(15),EFTM(15),EFTD,DCR1,DCR2,DCR3,DCR4,DCR5,
01414000 *QPR1,QPR2,QPR3,QPR4,DEGM,QPR11,QPR31
01415000 C
01416000 CHARACTER MATERIAL*13,GAST*13
01417000 C
01418000 C
01419000 WRITE(6,*)"ESCREVA O NOME DO MATERIAL(MAX.13 CARACT.)"
01420000 READ(5,*) MATERIAL
01421000 WRITE(6,*)"ESCREVA O NOME DO GAS DE TRABALHO(MAX.13 CARACT.)"
01422000 READ(5,*) GAST
01423000 C
01424000 C
01425000 C INICIO DA FORMATAÇÃO
01426000 C
01427000 10 FORMAT(1H1)
01428000 20 FORMAT(2,1X,'|',118(' '),'|')
01429000 30 FORMAT(1X,'|',39X,S,54X,'|')
01430000 40 FORMAT(1X,'|',118(' '),'|')
01431000 50 FORMAT(1X,'|',1X,'VISCOSIDADE',2X,'|',2X,"DENSIDADE",2X,'|',
01432000 *1X,'DENSIDADE DA',1X,'|',2X,'TEMPERATURA',1X,'|',1X,'VAZAO DE',
01433000 *' GAS',1X,'|',2X,'VELOCIDADE',2X,'|',1X,S,2X,'|',5X,'GAS',6X,'|')
01434000 60 FORMAT(1X,'|',1X,S,2X,'|',2X,S,3X,'|',1X,' PARTICULA ',
01435000 *1X,'|',2X,'DE TRABALHO',1X,'|',2X,'NO CICLONE',2X,
01436000 *'|',2X,'DE ENTRADA',2X,'|',1X,'SER SEPARADO',1X,'|',2X,S,2X,'|')
01437000 70 FORMAT(1X,'|',118(' '),'|')
01438000 80 FORMAT(1X,'|',3X,S,5X,'|',3X,S,3X,'|',3X,S,4X,'|',S,1X,'|',
01439000 *4X,S,4X,'|',5X,S,4X,'|',2(14X,'|'))
01440000 90 FORMAT(1X,'|',E14.7,'|',E13.7,'|',4(E14.7,'|'),1X,S,'|',
01441000 *1X,S,'|')
01442000 100 FORMAT(2/,1X,74X,'|',44(' '),',','|')
01443000 110 FORMAT(1X,21X,'|'-DEG-'|',46X,'|',5X,S,7X,'|')
01444000 120 FORMAT(1X,15X,'+BC+',1X,7(' '),46X,'|',44(' '),'|')
01445000 130 FORMAT(1X,15X,'|',1X,'*',5X,'*',17X,'+',23(' '),'+',4X,
01446000 *'|',3X,S,1X,'|',2X,S,1X,'|',1X,S,1X,'|')
01447000 140 FORMAT(1X,12X,3(' '),7(' '),5X,7(' '),5(' '),6X,'|',S,'|',
01448000 *4X,'|',44(' '),'|')
01449000 150 FORMAT(1X,12X,'|',2X,'**** *',5X,'* | * | '|',6X,',','|',
01450000 *23(' '),'|',4X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|')
01451000 160 FORMAT(1X,11X,'AC',2X,'****',2X,'*',5X,'* ST * HC '|',6X,
01452000 *'|',3X,'DCC=',F8.3,' [M]',4X,'|',4X,'|',F15.3,'|',F12.3,
01453000 *'|',F15.3,'|')
01454000 170 FORMAT(1X,12X,'-----',2X,'*****-',3X,'* | '|',6X,'|',
01455000 *3X,'AC =',F8.3,' [M]',4X,'|',4X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|')
01456000 180 FORMAT(1X,15X,'*',17X,'* |',2X,'|',6X,'|',3X,'BC =',F8.3,

```

```

01457000      *' [MJ',4X,'|',4X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|')
01458000      190 FORMAT(1X,15X,'*-----DCC-----*-- |',6X,'|',3X,'ST =',
01459000      *F8.3,' [MJ',4X,'|',4X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|')
01460000      200 FORMAT(1X,16X,'*',15X,'*',4X,'HTC',5X,'|',3X,'HC =',F8.3,'
01461000      *' [MJ',4X,'|',4X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|')
01462000      210 FORMAT(1X,17X,'*',13X,'*',6X,'|',6X,'|' HTC=',F8.3,' [MJ',
01463000      *4X,'|',4X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|')
01464000      220 FORMAT(1X,18X,'*',11X,'*',7X,'|',6X,'|',3X,'DSP=',F8.3,'
01465000      *' [MJ',4X,'|',4X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|')
01466000      230 FORMAT(1X,19X,'*',9X,'*',8X,'|',6X,'|',3X,'DEG=',F8.3,'
01467000      *' [MJ',4X,'|',4X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|')
01468000      240 FORMAT(1X,20X,'*',7X,'*',9X,'|',6X,'|',23(' - '),'|',4X
01469000      *'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|')
01470000      250 FORMAT(1X,21X,'*',5X,'*',10X,'|',35X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',
01471000      *F15.3,'|')
01472000      260 FORMAT(1X,22X,5(' * '),11(' - '),'|',35X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',
01473000      *F15.3,'|')
01474000      270 FORMAT(1X,22X,'|' |',47X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|')
01475000      280 FORMAT(1X,22X,'|DSP|',47X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|')
01476000      290 FORMAT(1X,74X,'|',F15.3,'|',F12.3,'|',F15.3,'|',)
01477000      300 FORMAT(1X,10X,'|',47(' - '),'|',15X,'|',44(' - '),'|')
01478000      310 FORMAT(1X,10X,'|' |',2X,S,2X,S,1X,'|',15X,'|',1X,S,'|',F15.3,'|',)
01479000      320 FORMAT(1X,10X,'|' |',1X,S,7X,'|',2X,F6.1,4X,'|')
01480000      330 FORMAT(1X,10X,'|S|',32X,'|',12X,'|')
01481000      340 FORMAT(1X,10X,'|E|',1X,S,6X,'|',2X,F6.1,4X,'|',15X,'|',
01482000      *44(' - '),'|')
01483000      350 FORMAT(1X,10X,'|G|',32X,'|',12X,'|',15X,'|',2X,S,5X,S,4X,
01484000      *'|')
01485000      360 FORMAT(1X,10X,'|U|',1X,S,25X,'|',2X,F6.1,4X,'|',15X,'|',
01486000      *44(' - '),'|')
01487000      370 FORMAT(1X,10X,'|N|',32X,'|',12X,'|',15X,'|',1X,S,7X,'AP =',
01488000      *3X,F8.2,4X,'|')
01489000      380 FORMAT(1X,10X,'|D|',1X,S,25X,'|',2X,F6.1,4X,'|',15X,'|',
01490000      *32X,F8.2,4X,'|')
01491000      390 FORMAT(1X,10X,'|O|',32X,'|',12X,'|',15X,'|',1X,S,8X,'AP =',
01492000      *3X,F8.2,4X,'|')
01493000      400 FORMAT(1X,10X,'|' |',1X,S,20X,'|',2X,F6.1,4X,'|',15X,'|',
01494000      *44X,'|')
01495000      410 FORMAT(1X,10X,'|-|',45(' - '),'|',15X,'|',1X,S,14X,'AP =',
01496000      *3X,F8.2,4X,'|')
01497000      420 FORMAT(1X,74X,'|',32X,F8.2,4X,'|')
01498000      430 FORMAT(1X,74X,'|',1X,S,2X,'AP =',3X,F8.2,4X,'|')
01499000      440 FORMAT(1X,74X,'|',44(' - '),'|')
01500000      C
01501000      C
01502000      WRITE(4,10)
01503000      WRITE(4,20)
01504000      WRITE(4,30)'DADOS INICIAIS DO PROJETO'
01505000      WRITE(4,40)
01506000      WRITE(4,50)'MATERIAL A '
01507000      WRITE(4,60)' DO GAS ', ' DO GAS ', 'CARREGADOR'
01508000      WRITE(4,70)
01509000      WRITE(4,80)'[PA.S]', '[KG/M3]', '[KG/M3]', '[GRAUS CENT.]',
01510000      *'[M3/S]', '[M/S]'
01511000      WRITE(4,90) VISC, DENF, DENP, TEC, QTM, VEC, MATERIAL, GAST
01512000      WRITE(4,70)
01513000      WRITE(4,100)

```

```

01514000 WRITE(4,110)'EFICIENCIA FRACIONADA NO CICLONE'
01515000 WRITE(4,120)'TP[MICRONS]', 'QUANT[2]', 'EFICIENCIA[2]'
01516000 WRITE(4,130)'TP[MICRONS]', '% EM PESO', 'EFICIENCIA[2]'
01517000 WRITE(4,140)'CONFIGURACAO DO PROJETO'
01518000 WRITE(4,150)DTP(1),PER(1),EFTM(1)
01519000 WRITE(4,160)DCM,DTP(2),PER(2),EFTM(2)
01520000 WRITE(4,170)ACM,DTP(3),PER(3),EFTM(3)
01521000 WRITE(4,180)BCM,DTP(4),PER(4),EFTM(4)
01522000 WRITE(4,190)STM,DTP(5),PER(5),EFTM(5)
01523000 WRITE(4,200)HCM,DTP(6),PER(6),EFTM(6)
01524000 WRITE(4,210)HTM,DTP(7),PER(7),EFTM(7)
01525000 WRITE(4,220)DSM,DTP(8),PER(8),EFTM(8)
01526000 WRITE(4,230)DEGM,DTP(9),PER(9),EFTM(9)
01527000 WRITE(4,240)DTP(10),PER(10),EFTM(10)
01528000 WRITE(4,250)DTP(11),PER(11),EFTM(11)
01529000 WRITE(4,260)DTP(12),PER(12),EFTM(12)
01530000 WRITE(4,270)DTP(13),PER(13),EFTM(13)
01531000 WRITE(4,280)DTP(14),PER(14),EFTM(14)
01532000 WRITE(4,290)DTP(15),PER(15),EFTM(15)
01533000 WRITE(4,300)
01534000 WRITE(4,310)'DIAMETRO CRITICO DAS PARTICULAS', '[MICRONS]',
01535000 *'EFICIENCIA TOTAL DO CICLONE', EFTO
01536000 WRITE(4,300)
01537000 WRITE(4,320)'ROSIN RAMMLER E INTELMAN', DCR1
01538000 WRITE(4,330)
01539000 WRITE(4,340)'ROSIN (MOD. SIMPLIFICADO)', DCR2
01540000 WRITE(4,350)'CALCULO DA QUEDA DE PRESSAO', 'TMMCA1'
01541000 WRITE(4,360)'DAVIES', DCR3
01542000 WRITE(4,370)'SEGUNDO STAIRMAND', QPR1
01543000 WRITE(4,380)'FEIFEL', DCR4, QPR11
01544000 WRITE(4,390)'MARTINEZ E CASAL', QPR2
01545000 WRITE(4,400)'DALLA VALLE', DCR5
01546000 WRITE(4,410)'SEG. BARTH', QPR3
01547000 WRITE(4,420)QPR31
01548000 WRITE(4,430)'SEG. SHEPHERD E LAPPLE', QPR4
01549000 WRITE(4,440)
01550000 C
01551000 RETURN
01552000 END

```

DADOS INICIAIS DE PROJETO		
VISCOSIDADE DO GAS	.1814045E-04	[N.S/M2]
DENSIDADE DO GAS	.1111717E+01	[KG/M3]
DENSIDADE DA PARTICULA	.1400000E+04	[KG/M3]
TEMPERATURA DE TRABALHO	20.000	[GRAUS C]
VAZAO DE GAS NO CICLONE	.340	[M3/S]

 * RESULTADOS DOS CALCULOS *

CONFIGURACAO DE PROJETO DO CICLONE

DIAMETRO DCC = .400 [M]
 AC = .200 [M]
 BC = .100 [M]
 ST = .240 [M]
 DEG = .200 [M]
 HC = .600 [M]
 HTC = 1.600 [M]
 DSP = .150 [M]

TP [MICRONS]	!	EFICIENCIA [%]
600.0000	!	100.0000
450.0000	!	100.0000
300.0000	!	100.0000
200.0000	!	99.9999
150.0000	!	99.9994
104.0000	!	99.9927
75.0000	!	99.9570
60.0000	!	99.8814
40.0000	!	99.4602
30.0000	!	98.7197
20.0000	!	96.5877
10.0000	!	88.7520
5.0000	!	75.6686

A EFICIENCIA TOTAL DO CICLONE EFTO= 99.9570 [%]

A EFICIENCIA REQUERIDA DO CICLONE = 90.0000 [%]

RESULTADOS DOS CALCULOS DE DIAMETRO CRITICO DAS PARTICULAS

DIAMETRO CRITICO (MICRONS)

SEGUNDO ROSIN, RAMMLER E INTELMAN	5.598
ROSIN, P/ NUV SENDO IGUAL A 03	7.388
ROSIN, SEGUNDO MODELO SIMPLIFICADO	10.453
SEGUNDO MODELO DE DAVIES	8.970
SEGUNDO MODELO DE FEIFEL	3.240

SEGUNDO MODELO DE DALLA VALLE	MV=0.5	MV=0.6	MV=0.7
ZV= .5	16.619	15.875	15.164
ZV=1.0	11.752	11.225	10.723
ZV=1.5	9.595	9.165	8.755
ZV=2.0	8.310	7.938	7.582
ZV=2.5	7.432	7.100	6.782
ZV=3.0	6.785	6.481	6.191

SEGUNDO MODELO DE FEIFEL PARA A RELACAO DO DIAMETRO DO NUCLEO DO VORTICE

R/RI= 1.2	8.298
R/RI= 1.3	10.881
R/RI= 1.4	13.098
R/RI= 1.5	15.057

