

Desenvolvimento de um programa de computador para o dimensionamento de separadores ciclónicos

Miguel Alexandre Branco da Silva Mendonça Montenegro

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho, 2017

Aos meus pais e à minha irmã.

Por o autor entender não fazer sentido a consensualização da nova norma ortográfica, o presente documento não segue o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990.

Resumo

A crescente preocupação com o ambiente, especialmente com a poluição atmosférica, sobretudo devido a instalações industriais, tem sido uma consequência fundamental para a expansão das responsabilidades das comunidades técnicas e científicas. É, portanto, cada vez de maior importância, o desenvolvimento de dispositivos capazes de separar partículas em suspensão num fluido com uma maior rentabilidade e menor custo. Os separadores ciclónicos apresentam-se como um dos equipamentos mais eficazes e rentáveis na separação de partículas e mais económicos de um ponto de vista de investimento inicial, operacionalidade e manutenção. O princípio de funcionamento destes força o fluido carregado de partículas para um vórtice onde as forças de inércia e gravitacionais obrigam as partículas a separarem-se por centrifugação. Ainda que bem compreendido, este mecanismo de funcionamento é, ainda hoje, de uma extrema dificuldade de previsão a partir de modelos matemáticos, dado o número de factores e condicionantes intervenientes. Desta forma, uma série de modelos analíticos têm vindo a ser desenvolvidos ao longo dos anos, desde os mais simplificados aos mais complexos, numa tentativa de descrever o comportamento dos ciclones.

A dissertação começa por apresentar uma descrição geral do transporte pneumático e dos diferentes processos de separação de partículas mais comumente utilizados, focando-se na separação ciclónica, apresentando as proporções típicas e mais utilizadas num ciclone, descrevendo o seu mecanismo de funcionamento e expondo-se os conhecimentos teóricos necessários para se entender precisamente o seu funcionamento na previsão e cálculo de velocidades, rendimento de separação e perda de carga.

Seguidamente apresentam-se os modelos analíticos para o cálculo do rendimento de separação e perda de carga e o respectivo programa de dimensionamento onde estes se encontram inseridos, explanando-se a ferramenta utilizada no seu desenvolvimento, a forma de introdução dos dados e os erros associados, caso não siga os procedimentos indicados.

Por fim, face ao interesse das potencialidades de um programa de dimensionamento de separadores ciclónicos e ao número de modelos analíticos possibilitados por este, incluem-se exemplos de cálculo do rendimento de separação de separadores ciclónicos tipo *Stairmand* – alto rendimento de acordo com todos os modelos, explorando-se e discutindo-se.

Conseguiu-se, desta forma, a criação e desenvolvimento de um programa de computador que permite o dimensionamento de separadores ciclónicos através de nove modelos matemáticos disponíveis na literatura e explorados no presente trabalho, assim como o cálculo de perdas de carga recorrendo-se a oito modelos matemáticos, igualmente analisados na presente dissertação. O projectista fica assim com uma ferramenta de cálculo rápida, poderosa e ao mesmo tempo leve, simples e barata que lhe permite rapidamente avaliar uma grande combinação de configurações para qualquer condição de transporte gás-sólido que requeira separação ciclónica.

PALAVRAS-CHAVE: transporte pneumático, separadores ciclónicos, rendimento de separação, perda de carga, modelos analíticos, dimensionamento de ciclones

Development of a computer program for the design of cyclonic separators

Abstract

The ever growing concern for the environment, especially regarding air pollution, mainly due to industrial installations, has been a fundamental consequence of the expansion of the responsibilities of technical and scientific communities. Therefore, it is increasingly important to develop particle separation devices with greater profitability and reduced cost. Cyclonic separators are one of the most efficient and cost-effective equipment for particle separation and are more economic regarding operation and maintenance. The basic principle is forcing the particle-laden gas into a vortex where the inertial and gravitational forces promote particles separation by centrifugation. Although well understood, this mechanism is even nowadays of an extreme difficulty of prediction with mathematical models, given the number of conditioning factors involved. As a result, a series of analytical models have been developed over the years, ranging from simple to complex, in an attempt to describe the behaviour of the cyclones.

The essay begins by presenting an overview of pneumatic conveying and the different most commonly used devices in particle separation, focusing on the cyclonic separation, presenting the typical proportions used in a cyclone, describing their basic principles and exposing theoretical knowledge necessary to understand their operation in the prediction and calculation of velocities, separation efficiency and pressure drop.

Secondly, the analytical models for the calculation of the cyclone separation efficiency and pressure drop are presented, as well as the design program where these are inserted, explaining which tool was used in its development, how to introduce the input and the associated errors if the correct procedures are not followed.

Finally, given the interest in the potentialities of the software for cyclone design and the number of analytical models that can be used to do so, some examples of the calculation of the separation efficiency by all analytical models of a *Stairmand* type cyclonic separator - high efficiency are presented and discussed.

The creation and development of a computer program that allows the design of cyclonic separator through nine mathematical models available in the literature and analysed in the present essay, as well as the calculation of pressure drops using eight mathematical models also analysed in the essay was, thus possible. The engineer gets a fast, powerful and at the same time lightweight, simple and inexpensive calculation tool that allows a fast evaluation of a large combination of configurations for any given gas-solid conveying process that requires cyclonic separation.

KEYWORDS: pneumatic conveying, cyclonic separators, separation efficiency, pressure drop, analytical models, cyclone design

Agradecimentos

Gostaria de deixar expresso o meu profundo e sincero agradecimento a todas as pessoas e entidades que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho, nomeadamente:

- Ao Professor Carlos Pinho, orientador da dissertação, por todos os conhecimentos, opiniões e ensinamentos transmitidos e entusiasmo demonstrado ao longo da elaboração deste trabalho;
- Aos meus amigos Luís e Tiago pelo auxílio com as questões relacionadas com a programação, contribuindo para uma estruturação mais eficaz e mais rápida do código MATLAB;
- Aos meus amigos Amélia, Diogo, Tarina, Raquel Martins, Raquel Rocha e Zé por terem sido minha constante motivação ao longo de todo o meu percurso académico e vivências extracurriculares, por toda a amizade, apoio, companheirismo, entrega e serviço prestado em prol do meu sucesso profissional e pessoal;
- Ao resto da minha família, em especial aos meus pais, irmã, e à Joana, que sempre me incentivaram a dar o melhor de mim e me compreenderam em todas as situações de maior dificuldade e pelo constante estímulo académico.

Índice de Conteúdos

Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos.....	viii
Nomenclatura	xii
Símbolos gregos.....	xv
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xx
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Transporte pneumático	1
1.3 Separação de partículas	2
1.4 Objectivos e estrutura da dissertação	3
2 Separação ciclónica	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Transporte pneumático	5
2.2.1 Classificação do tipo de transporte	6
2.2.2 Classificação das instalações.....	6
2.2.3 Aplicações	8
2.3 Separadores ciclónicos	9
2.3.1 Princípio de funcionamento dos separadores ciclónicos	10
2.3.2 Proporções de um separador ciclónico	16
2.3.3 Saltitação	19
3 Modelos analíticos.....	21
3.1 Rendimento de separação	21
3.1.1 Rosin, Rammler e Intelmann / Lapple	24
3.1.2 Barth	24
3.1.3 Rietema	25
3.1.4 Muschelknautz.....	26
3.1.5 Koch e Licht	32
3.1.6 Dietz.....	33
3.1.7 Mothes e Löffler	36
3.1.8 Iozia e Leith	40
3.1.9 Li e Wang.....	41
3.2 Perda de carga	42
3.2.1 Miller e Lissman.....	43
3.2.2 Shepherd e Lapple	43
3.2.3 Casal e Martinez-Bennet	43
3.2.4 Ramachandran et al	44

3.2.5	Stairmand	44
3.2.6	Barth	45
3.2.7	Muschelknautz.....	45
3.2.8	Aproximação por zonas.....	46
4	Apresentação do programa.....	47
4.1	Introdução.....	47
4.2	Construção do programa.....	47
4.3	Funcionamento do programa	48
4.3.1	Parâmetros de entrada	48
4.3.2	Parâmetros de saída	52
4.3.3	Fluxograma de funcionamento	54
5	Exemplos de cálculo	55
5.1	Dados	55
5.2	Resultados.....	57
6	Conclusões.....	63
7	Perspectivas e desenvolvimentos futuros.....	65
	Referências	67

Nomenclatura

Simbologia	Descrição	Unidades
A	Área de secção da conduta	[m ²]
A_R	Área total da superfície interior do ciclone	[m ²]
A_W	Área total da superfície interior da parte cilíndrica e da parte superior cónica do ciclone	[m ²]
c_0	Concentração de partículas à entrada do ciclone	[kg/m ³]
c_1	Concentração de partículas na região 1	[kg/m ³]
c_3	Concentração de partículas na região 3	[kg/m ³]
c_4	Concentração de partículas na região 4	[kg/m ³]
C_{Ds}	Coefficiente de arrasto	[-]
d_{50}	Diâmetro de corte	[m]
d_{50in}	Diâmetro de corte na entrada do ciclone	[m]
d_{med}	Diâmetro mediano das partículas	[m]
$d_{med,in}$	Diâmetro mediano das partículas associado à entrada do ciclone	[m]
d_p, d_{pi}	Diâmetro das partículas	[m]
d_{pc}	Diâmetro crítico das partículas	[m]
$D_{núcleo}$	Diâmetro do núcleo do ciclone previsto por Iozia e Leith	[m]
D_n	Diâmetro natural do núcleo do ciclone previsto por Koch e Licht	[m]
D_p, D_{rp}	Difusividade das partículas	[-]
f	Coefficiente de atrito	[-]
f_{gas}	Coefficiente de atrito relativo ao fluido limpo de partículas em suspensão	[-]
f_l	Contribuição do coeficiente de atrito devido à parte lisa da parede do ciclone	[-]
f_r	Contribuição do coeficiente de atrito devido à rugosidade da parede do ciclone	[-]
Fr	Número de Froude	[-]
g	Aceleração gravítica	[m/s ²]
G	Factor geométrico na Equação (3.48) e factor de perda de carga na Equação (3.122)	[-]
H_z^*	Parâmetro geométrico do ciclone na Equação (3.92)	[-]
K_a	Factor geométrico na Equação (3.49)	[-]
K_b	Factor geométrico na Equação (3.50)	[-]

K_c	Factor geométrico na Equação (3.51)	[-]
l	Comprimento natural do ciclone	[m]
L^*	Altura do eixo central (núcleo) do ciclone	[m]
\dot{m}_f	Caudal mássico de sólidos transportados	[kg/s]
\dot{m}_p	Caudal mássico do fluido transportador	[kg/s]
n	Expoente da curva de rendimento nas Equações (2.11), (3.20), (3.45) e (3.98)	[-]
N	Número de ciclones	[-]
N_S	Número de espiras percorridas pela corrente gasosa e partículas em suspensão	[-]
P_{se}	Pressão estática na entrada do ciclone	[Pa]
P_{ss}	Pressão estática na saída do ciclone	[Pa]
q	Parâmetro geométrico na Equação (3.121)	[-]
r	Distância da posição da partícula ao eixo do ciclone	[m]
R_2	Radio médio da parte cónica do ciclone	[m]
R_{in}	Radio médio da entrada	[m]
R_m	Raio médio entre a parede do ciclone e a superfície da conduta de saída do fluido	[m]
Re	Número de Reynolds	[-]
Re_R	Número de Reynolds associado ao corpo do ciclone	[-]
T_f	Temperatura do fluido	[°C]
u_τ	Velocidade de fricção	[m/s]
U_f	Velocidade superficial da fase gasosa	[m/s]
U_p	Velocidade das partículas	[m/s]
U_{pp}	Velocidade das partículas junto à parede do ciclone	[m/s]
U_{pv}	Velocidade das partículas junto ao vórtice do ciclone	[m/s]
U_s	Velocidade de saltitação das partículas	[m/s]
U_t	Velocidade terminal das partículas	[m/s]
v_c	Velocidade à entrada do ciclone	[m/s]
v_e	Velocidade de escape do fluido	[m/s]
v_{in}	Velocidade do fluido na conduta de entrada no ciclone	[m/s]
v_r	Componente radial da velocidade do fluido	[m/s]
v_{rp}	Componente radial da velocidade do fluido junto à parede do ciclone	[m/s]

v_{tsi}	Velocidade terminal de deposição das partículas	[m/s]
v_{tsi}^*	Velocidade terminal de deposição das partículas com 50% de probabilidade de separação	[m/s]
v_z	Componente axial da velocidade do fluido	[m/s]
v_{zm}	Componente axial média da velocidade do fluido no corpo do ciclone	[m/s]
v_{zp}	Componente axial da velocidade do fluido junto à parede do ciclone	[m/s]
v_θ	Componente tangencial da velocidade do fluido	[m/s]
$v_{\theta 2}$	Componente tangencial da velocidade tangencial do fluido a meia altura da parede cónica do ciclone	[m/s]
$v_{\theta in}$	Componente tangencial do fluido na entrada do ciclone	[m/s]
$v_{\theta m}$	Componente tangencial da velocidade média entre a parede do ciclone e a superfície da conduta de saída do fluido	[m/s]
$v_{\theta máx}$	Componente tangencial máxima da velocidade do fluido	[m/s]
$v_{\theta p}$	Componente tangencial da velocidade do fluido junto à parede do ciclone	[m/s]
$v_{\theta p}^*$	Componente tangencial da velocidade do fluido junto à parede do ciclone no caso de não existir atrito	[m/s]
$v_{\theta v}$	Componente tangencial da velocidade do fluido junto ao vórtice do ciclone	[m/s]
$v_\theta(R_e)$	Componente tangencial da velocidade na superfície da conduta de escape	[m/s]
V_{cn}	Volume do ciclone para o comprimento natural	[m ³]
V_H	Volume do ciclone abaixo da conduta de saída dos gases limpos na Equação	[m ³]
V_S	Volume do ciclone entre o início da conduta de saída dos gases limpos até meio da conduta de entrada	[m ³]
$Vol_{ciclone}$	Volume do ciclone real	[m ³]
\dot{V}	Caudal volúmico do fluido	[m ³ /s]
$W(R_e)$	Velocidade de deposição das partículas junto à parede da conduta de saída	[m/s]
$W(R_c^*)$	Velocidade de deposição das partículas nas paredes confinadoras do ciclone	[m/s]
Y_i	Fracções mássicas das partículas	[-]

Símbolos gregos

Simbologia	Descrição	Unidades
α	Parâmetro geométrico na Equação (3.13) e coeficiente de estrangulamento na Equação (3.33)	[-]
β	Constante na Equação (3.62)	[m]
β^*	Parâmetro geométrico relativo à entrada do ciclone na Equação (3.94)	[-]
Δp	Perda de carga	[Pa]
$\Delta \dot{V}$	Caudal volúmico de fluido que escapa pela conduta de descarga das partículas	[m ³ /s]
ε	Rugosidade relativa	[-]
ζ	Parâmetro geométrico na Equação (3.34)	[-]
η	Rendimento global	[-]
η_i	Rendimento parcial	[-]
θ	Factor de carga	[-]
$\theta_{crítico}$	Factor de carga crítico no Método de Muschelknautz	[-]
λ	Valor característico na Equação (3.104)	[-]
μ_f	Viscosidade do fluido	[Pa·s]
ξ	Coefficiente de atrito	[-]
ξ_C	Coefficiente de atrito na entrada do ciclone	[-]
ξ_D	Coefficiente de atrito na parte cilíndrica do ciclone	[-]
ξ_K	Coefficiente de atrito na parte cónica do ciclone	[-]
ξ_{CASAL}	Coefficiente de perda de carga na Equação (3.116)	[-]
ξ_{LAPPLE}	Coefficiente de perda de carga na Equação (3.114)	[-]
ξ_{MILLER}	Coefficiente de perda de carga na Equação (3.112)	[-]
$\xi_{STAIRMAND}$	Coefficiente de perda de carga na Equação (3.120)	[-]
$\xi_{RACHAMANDRAN}$	Coefficiente de perda de carga na Equação (3.118)	[-]
ρ_f	Massa volúmica do fluido	[kg/m ³]
ρ_p	Massa volúmica das partículas	[kg/m ³]
ρ_p^*	Massa volúmica aparente das partículas	[kg/m ³]
τ	Tempo de relaxação dinâmica	[s]
τ_0	Tensão tangencial junto à parede do ciclone	[Pa]
φ	Ângulo entre as paredes e o eixo do ciclone na parte cónica	[rad]
ϕ	Factor de perda de carga de momento angular que caracteriza a troca de momento entre a parede e a corrente gasosa	[-]
ω	Coordenada angular na Equação (3.102)	[rad]

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Instalações a funcionar em depressão (Klinzing et al., 2010).	7
Figura 2.2 - Instalações a funcionar em sobrepressão (Klinzing, et al., 2010).....	7
Figura 2.3 - Instalações a funcionar em depressão-sobrepressão (Klinzing et al., 2010).	8
Figura 2.4 - Separadores ciclónicos (Perry e Chilton, 1973).....	10
Figura 2.5 - Escoamento no plano meridional de um ciclone (Janeiro Borges e Galvão Teles, 1983).....	10
Figura 2.6 - Perfis de velocidade e pressão no interior de um ciclone (Pinho, 2005) (a) campo de velocidade do gás; (b) velocidade tangencial; (c) velocidade axial; (d) pressão total.....	11
Figura 2.7 - Ciclone de fluxo invertido com entrada tangencial (Elsayed, 2011).....	12
Figura 2.8 - Proporções iniciais para o dimensionamento expedito de separadores ciclónicos (Pinho, 2005).	16
Figura 2.9 - Ciclones de diferentes proporções (Janeiro Borges e Galvão Teles, 1983) (a) para suspensões gradas; (b) para suspensões finas.....	17
Figura 2.10 - Dimensões típicas de um separador ciclónico (Pinho, 2005).....	18
Figura 2.11 - Gama de valores aceitáveis para a velocidade de entrada do ciclone (Pinho, 2005).	19
Figura 3.1 - Esboços que ilustram os conceitos por trás dos modelos de rendimento (Hoffmann e Stein, 2008) (a) modelo de órbita de equilíbrio; (b) modelo de tempo de voo.....	22
Figura 3.2 - Curva experimental do rendimento de separação para ciclones com as proporções da Figura 2.8 (Pinho, 2005).....	23
Figura 3.3 - Ilustração da área AW (Trefz e Muschelknautz, 1993).	29
Figura 3.4 - Regiões consideradas no Modelo de Dietz (1981). Na notação deste documento: $a = Ac$; $b = Bc$; $Rv = Re$; $H = Hc$; $h = Lc$	34
Figura 3.5 - Geometria do ciclone modificada para análise do modelo (Dietz, 1981). Na notação deste documento: $QV = V$; $Rv = Rt = Re$; $Ur = vr$	34
Figura 3.6 - Geometria do ciclone modificada para análise do modelo e respectivas regiões (Mothes e Löffler, 1988). Na notação deste documento: $ra = Rc$; $ra * = Rc *$; $ri = Re$	37
Figura 4.1 – <i>GUI Builder</i> inicial.....	48
Figura 4.2 - Interface gráfica final do programa.	49
Figura 4.3 – Mensagem de erro – Dados em falta.....	50
Figura 4.4 - Instruções de introdução de dados - diâmetro e fracções mássicas.	50
Figura 4.5 - Mensagem de erro – Dados não introduzidos como vector.....	50
Figura 4.6 - Mensagem de erro - Fracções mássicas não perfazem 100%.....	51
Figura 4.7 - Mensagem de erro - Dimensões dos vectores não coincidem.	51
Figura 4.8 - Mensagem de erro - Valores introduzidos não são números.	51
Figura 4.9 - Escolha do modelo analítico.	52
Figura 4.10 - Mensagem de aviso - Ocorre recolção de partículas.....	53
Figura 4.11 - Janela principal após dimensionamento do ciclone.....	53
Figura 4.12 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo.....	54

Figura 5.1 - Rendimento de separação - comparação entre modelos – caso 1 $d_{pi} = 0,001; 0,010$ mm; $v_c = 15$ m/s.	57
Figura 5.2 - Rendimento de separação - comparação entre modelos – caso 2 $d_{pi} = 0,001; 0,010$ mm; $v_c = 30$ m/s.	58
Figura 5.3 - Rendimento de separação - comparação entre modelos – caso 3 $d_{pi} = 0,001; 0,020$ mm; $v_c = 30$ m/s.	58
Figura 5.4 – Perda de carga – comparação de modelos.....	61

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Vantagens e desvantagens do transporte de sólidos em suspensão num fluido (Pinho, 2005)	2
Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens dos separadores ciclónicos (Hoffmann e Stein, 2008)	9
Tabela 2.2 - Dimensões <i>standard</i> de ciclones típicos (Pinho, 2005)	17
Tabela 5.1 - Propriedades do escoamento, das partículas e do ciclone – casos 1, 2 e 3.....	55
Tabela 5.2 - Distribuição de tamanhos das partículas transportadas e fracções mássicas – casos 1 e 2	56
Tabela 5.3 - Distribuição de tamanhos das partículas transportadas e fracções mássicas – caso 3	56
Tabela 5.4 – Perda de carga – comparação entre modelos – caso 1	60
Tabela 5.5 - Perda de carga – comparação entre modelos – caso 2	60
Tabela 5.6 - Perda de carga – comparação entre modelos – caso 3	60

1 Introdução

1.1 Enquadramento geral

O desenvolvimento de um sistema industrial de separação ciclónica é um processo dependente de um número elevado de variáveis e condições que se vão estudando, corrigindo e otimizando através da base do método científico, a tentativa e erro. Este processo torna-se, naturalmente iterativo, lento e aborrecido, o que pode resultar em erros por parte do operador e, consequentemente, resultados menos favoráveis. Desta forma, a minimização do esforço de cálculo torna-se imperativa, adoptando-se um sistema de programação de uma série de códigos, resultando num sistema mais eficiente e menos falível. No entanto, o programa de cálculo implica o conhecimento, compreensão e aplicabilidade dos conteúdos envolvidos, neste caso a Mecânica dos Fluidos, o Transporte Pneumático e a Separação Ciclónica.

É neste contexto que se desenvolve o presente trabalho, de forma a se conseguir obter um programa de computador capaz de dimensionar de forma relativamente rápida e com fiabilidade um separador ciclónico sendo, para tal realizado um estudo exaustivo prévio da literatura disponível e abrangível aos conceitos necessários à compreensão da matéria.

1.2 Transporte pneumático

O transporte de uma grande variedade de sólidos secos pulverulentos e granulares numa corrente gasosa é designado por transporte pneumático.

O conceito de transporte em condutas de fluidos remonta a tempos antigos, com os romanos a utilizar canos de chumbo para o abastecimento de água e esgotos e os chineses a transportar gás natural através de tubos de bambu. Já o registo de transporte de material sólido em correntes de ar é mais recente com o aparecimento de ventiladores para activar a primeira rede de transporte pneumático em 1866. A primeira aplicação em grande escala do transporte pneumático foi o transporte de grão em vácuo no final do século XIX. Em meados da década de 1920, o transporte de grão por diferenças de pressão era bastante comum (Klinzing et al., 2010).

Desde então, o transporte de materiais sólidos suspensos numa corrente de fluido tem desenvolvido um crescente interesse nas últimas décadas, comprovado pelo rápido aumento de pequenas e médias instalações de transporte pneumático e hidráulico assim como pelo aparecimento de novas linhas de grande dimensão destinadas a transporte em distâncias cada vez maiores (Pinho, 2005).

O transporte pneumático apresenta-se assim como um processo altamente sofisticado e essencial na área industrial, essencialmente no transporte, secagem e separação de finos com vantagens e desvantagens inerentes apresentadas na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Vantagens e desvantagens do transporte de sólidos em suspensão num fluido (Pinho, 2005)

Vantagens	Desvantagens
Simplicidade	Consumo de energia relativamente elevado
Adaptabilidade	Desgaste
Pequeno avançamento	Atrito / Degradação
Fácil selecção de percurso	Perigo de bloqueamento da conduta
Facilidade de implementação de ramais	Pequena flexibilidade
Facilidade de controlo	Limitações quanto aos materiais a transportar
Facilidade de automatização e integração em processos já implementados	Pode exigir tratamentos dos sólidos antes do transporte
Elevado índice de disponibilidade	Eventual dificuldade na separação de poeiras
Segurança ambiental	
Baixo custo de manutenção	

1.3 Separação de partículas

A separação de partículas suspensas em fluidos é, cada vez mais, uma realidade constante nas sociedades. A cada vez mais intensa poluição atmosférica é um dos problemas emergentes nas últimas décadas e com um impacto assustador na qualidade de vida das pessoas. As partículas em suspensão provocam o aumento na incidência de doenças nas vias respiratórias e constituem um problema ambiental sério nalgumas sociedades urbanas (Hoffmann e Stein, 2008).

No âmbito industrial, para além da segurança dos operários, uma razão para a remoção de sólidos em suspensão prende-se com a manutenção dos equipamentos, já que o impacto das partículas na maquinaria provoca erosão e desgaste, que podem levar à avaria desta.

Se, numa operação de limpeza de um fluido o objectivo passa por limitar as emissões ou filtrar o máximo de partículas possível, o procedimento passa normalmente por limitar a concentração de sólidos em suspensão no fluido. Por outro lado, se o objectivo for proteger o equipamento a jusante da conduta de transporte, então opta-se por limitar a geometria das partículas passíveis de serem transportadas na corrente gasosa. As partículas em suspensão apresentam uma variedade imensa de propriedades, como tamanho, geometria, densidade, forma, viscosidade, abrasividade, carga superficial, entre outras, que se torna impraticável existir um único tipo e um único método de separação para todo o espectro de material. Desta forma, o equipamento de separação tem de ser capaz de processar uma grande variedade de material (de péletes a pós submicrométricos, de materiais duros como areia a produtos alimentares macios) (Hoffmann e Stein, 2008).

Os mecanismos de separação mais comumente utilizados são:

- Filtração;
- Depuração húmida;
- Equipamentos centrifugadores/ciclónicos;
- Câmaras de decantação.

Nas secções que se seguem, a separação ciclónica será o mecanismo estudado e aprofundado.

1.4 Objectivos e estrutura da dissertação

O desenvolvimento de trabalho académico no âmbito da separação ciclónica passa, muitas das vezes pelo dimensionamento de sistemas de extrema complexidade, com pequenas variações das condições iniciais, de forma a se prever o comportamento do equipamento e respectivos resultados finais. Muitos destes trabalhos são desenvolvidos recorrendo-se à Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD), o que implica a resolução de problemas através de simulações numéricas extensas, pesadas e demoradas. No entanto, de um ponto de vista empresarial e industrial, nem sempre são os modelos mais complexos os mais indicados, já que apresentam limitações como o elevado tempo de cálculo, os elevados custos de licenças e formações de funcionários para que acompanhem as evoluções do programa, o investimento em equipamentos informáticos com os requisitos de *software* necessários para que o programa funcione, entre outras.

É precisamente neste contexto de aplicação industrial que se desenvolve o presente trabalho, dedicado à criação de um programa de computador que, recorrendo a métodos analíticos relativamente simples, directos e leves, seja possível um dimensionamento com um grau de precisão considerável e que possibilite um leque de soluções alternativas disponíveis na literatura, com possibilidade de comparação.

Este documento desenvolve-se em sete capítulos, o primeiro dos quais a presente introdução, onde se pretende fazer um enquadramento geral do tema a desenvolver e se apresentam os objectivos que se pretendem atingir.

No Capítulo 2 é feita uma abordagem introdutória ao transporte pneumático, para que se melhor se entenda a descrição dos princípios de funcionamento da separação ciclónica, bem como o aparecimento e estudo de diferentes modelos analíticos de cálculo das dimensões, do rendimento e da perda de carga. O objectivo deste capítulo é apresentar, segundo uma óptica mais teórica e de uma forma clara e assertiva, as características e potencialidades da separação ciclónica, com especial destaque para os métodos analíticos mais comumente utilizados.

No Capítulo 3 descrevem-se os diferentes modelos analíticos para o cálculo do rendimento de separadores ciclónicos, assim como os modelos de cálculo da perda de carga nestes, utilizados no programa desenvolvido.

No Capítulo 4 é feita uma apresentação ao programa de computador desenvolvido, abrangendo o *software* utilizado para a construção do programa, a forma de introdução dos dados de entrada, os respectivos erros associados a incongruências durante este procedimento, os dados de saída e o fluxograma de funcionamento do algoritmo.

No Capítulo 5 são apresentados três exemplos de cálculo e os resultados disponibilizados pelo programa, bem como uma comparação destes, de acordo com cada modelo analítico.

Por fim, no Capítulo 6, inclui-se a síntese do trabalho desenvolvido e no Capítulo 7 descrevem-se os desenvolvimentos futuros passíveis de serem realizados.

2 Separação ciclónica

2.1 Introdução

A separação ciclónica consiste num método de separação de partículas suspensas num fluido a partir da utilização de um separador ciclónico (ou ciclone), dispositivo extremamente utilizado e estudado por mais de um século, culminando numa extensa literatura existente (Charisiou et al., 2011).

O trabalho desenvolvido na área da separação ciclónica combina um tratamento de informação relativa ao princípio de funcionamento do transporte pneumático e o funcionamento de um ciclone, pelo que existem bastantes pesquisas, estudos e modelos resultantes relativos a três parâmetros fundamentais no dimensionamento de um separador ciclónico:

1. Campos de velocidade;
2. Rendimento de separação;
3. Perda de carga.

Os ciclones foram desenvolvidos nas últimas décadas do século XIX, com um grande trabalho experimental feito para que se compreendessem e explicassem as características de escoamento, um elemento indispensável ao cálculo da perda de carga e rendimento de separação. Ao mesmo tempo e com base nos dados recolhidos, os modelos teóricos foram desenvolvidos para prever as características básicas do campo de escoamento, principalmente em bases semi-empíricas. Esta estratégia genérica de modelação está, ainda hoje, em utilização. Muitas das fórmulas e métodos derivados no passado continuam a ser muito úteis para os fins de projecto hoje em dia. No entanto, como em muitos outros campos de estudo, os avanços em métodos experimentais e computacionais acrescentaram muitos detalhes e subtilezas no âmbito deste estudo (Cortés e Gil, 2007).

2.2 Transporte pneumático

Os sistemas de transporte pneumático são, em verdade, bastante simples e eminentemente adequados à condução de material granular em operações fabris, *in situ* ou até em plantações. O sistema requiere uma fonte de gás comprimido, normalmente o ar, o dispositivo de alimentação, uma conduta de transporte pneumático e um receptor para separar o material em suspensão do fluido transportador. O sistema é totalmente fechado e, se necessário, pode operar inteiramente sem partes móveis, que possam entrar em contacto com o material transportado (Mills, 2004).

O transporte de sólidos em suspensão implica o aproveitamento das forças desenvolvidas pela interacção entre o material e o fluido de transporte (Pinho, 2005). As forças envolvidas são o arrasto e as decorrentes da pressão, que podem ser altas, baixas ou negativas.

O fluido de transporte pode ser um gás inerte, como o azoto, para evitar o risco de explosão, excepto no caso de material higroscópico, onde terá de ser ar seco (Mills, 2004).

2.2.1 Classificação do tipo de transporte

Considerando uma conduta horizontal de secção circular onde escoar uma corrente gasosa com sólidos em suspensão, pode classificar-se o tipo de escoamento conforme a concentração de partículas sólidas presentes no fluido de duas categorias distintas:

1. Fase diluída;
2. Fase densa.

Em ambas as fases deve considerar-se regimes de escoamento estável, transição e instável (Klinzing et al., 2010).

Desta forma e por simplicidade, torna-se necessário definir um parâmetro que quantifique e distinga o tipo de fase em que o escoamento se encontra. Este parâmetro é definido como factor de carga, θ e define-se de acordo com a Equação

$$\theta = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_f} = \frac{\rho_p^* \cdot U_p \cdot A}{\rho_f \cdot U_f \cdot A} \quad (2.1)$$

onde,

\dot{m}_p é o caudal mássico de sólidos transportados;

\dot{m}_f é o caudal mássico do fluido transportador;

ρ_p^* é a massa volúmica aparente das partículas quando em movimento;

ρ_f é a massa volúmica do fluido;

U_p é a velocidade das partículas;

U_f é velocidade superficial da fase gasosa, ou seja a velocidade que se obteria na ausência de partículas sólidas, com o gás em escoamento monofásico;

A é a área da secção da conduta;

Desta forma, se o valor de θ for inferior a 10, o transporte diz-se em fase diluída; se estiver compreendido entre 10 e 100, o transporte diz-se em fase densa (Pinho, 2005).

2.2.2 Classificação das instalações

O funcionamento das instalações de transporte pneumático é, geralmente classificado de acordo com a sua pressão de funcionamento. Desta forma, os sistemas poderão funcionar com pressões relativas negativas (sistemas em depressão ou aspiração), positivas (sobrepessão) ou mistos.

As instalações a funcionar por depressão funcionam com a imposição de uma pressão inferior à atmosférica na zona de transporte. São preferíveis sempre que haja a necessidade de transporte de produtos de diferentes pontos para um único local de destino, já que apresentam grande versatilidade quanto à granulometria dos materiais a transportar e não dão origem a qualquer tipo de poluição junto aos pontos de alimentação e ao longo da linha de transporte. Ainda a rarefacção do ar e a ausência de peças metálicas móveis no interior das condutas reduz substancialmente qualquer risco de explosão. No entanto, neste tipo de instalações, as limitações prendem-se com a distância de transporte, já que para se vencerem as perdas de carga

é necessário uma diferença de pressão, o que implica que o comprimento máximo das condutas seja limitado por valores de depressão, de cerca de 0,5 bar (Pinho, 2005).

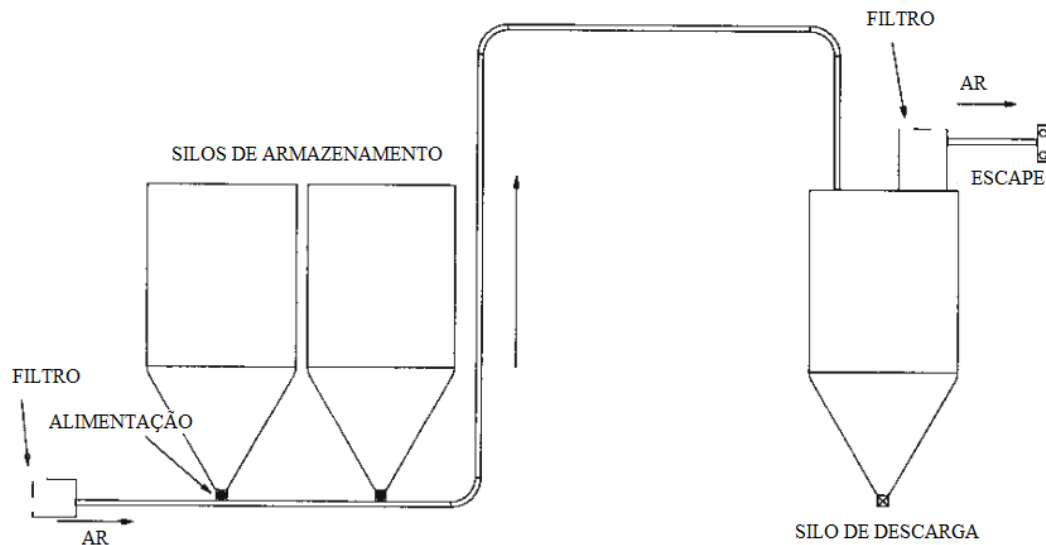


Figura 2.1 - Instalações a funcionar em depressão (Klinzing et al., 2010).

As instalações a funcionar por sobrepressão funcionam com a imposição de uma pressão superior à atmosférica na zona de transporte. São as instalações mais usuais e são aconselháveis quando se quer transportar material de um único reservatório para vários. Como todo o circuito se encontra acima da pressão atmosférica, uma das limitações passa por garantir a completa estanquicidade da conduta, para que não se contamine o ambiente. Por outro lado, é necessário também uma cuidada atenção na zona de alimentação, já que no ponto de pressão mais elevada exigem-se componentes (válvulas, dispositivos de alimentação) de construção mais cuidada, para que se evite a saída de ar e arrastamento do produto. As instalações em sobrepressão podem funcionar com pressões baixas (até 0,5 atm), médias (0,5 a 2,5 atm) ou altas (2,5 a 10 atm), sendo que os dispositivos de accionamento terão de ser seleccionados conforme a utilização (Pinho, 2005).

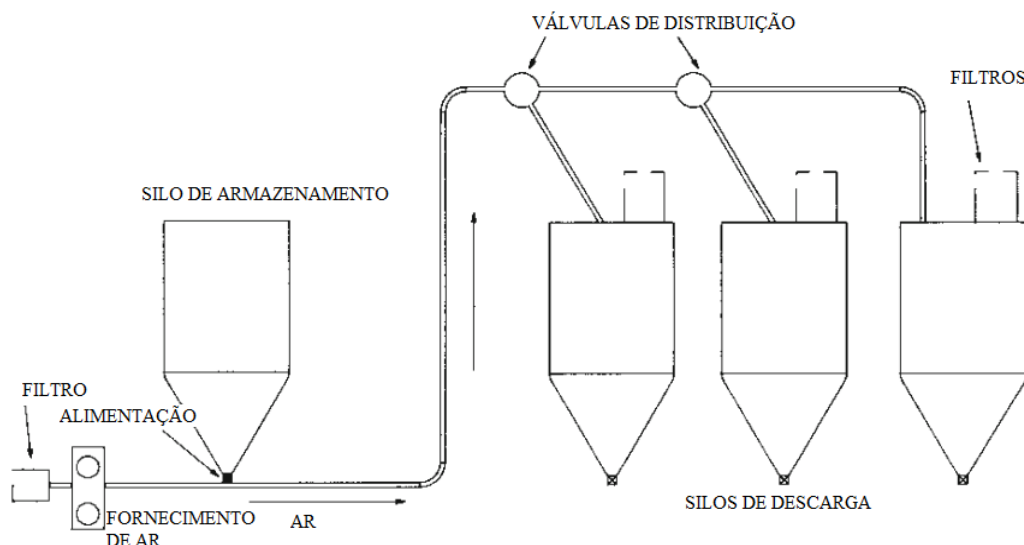


Figura 2.2 - Instalações a funcionar em sobrepressão (Klinzing, et al., 2010).

Nas instalações mistas, parte do circuito encontra-se a funcionar em depressão e outra em sobrepressão. A utilização desta configuração permite combinar as vantagens dos dois tipos de instalações, como a facilidade de recolha do material a partir de diferentes pontos, facilidade de distribuição do material por vários destinos e transporte a grandes distâncias.

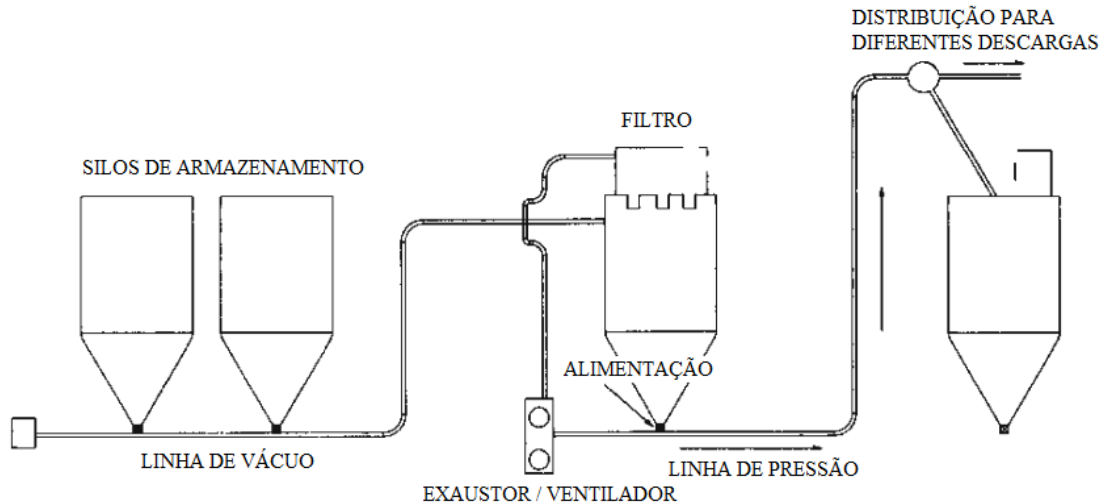


Figura 2.3 - Instalações a funcionar em depressão-sobrepressão (Klinzing et al., 2010).

2.2.3 Aplicações

A gama de materiais adequados ao transporte pneumático é bastante extensa. Virtualmente, todos os pós e materiais granulares podem ser transportados pneumaticamente. As propriedades dos materiais a transportar são determinantes para a sua utilização numa instalação de transporte pneumático. Geralmente, quanto maior e mais denso o material, maior a velocidade do gás requerida para a operação e maior o consumo de energia. É frequentemente afirmado que as partículas com um tamanho superior a 15 mm podem não ser adequadas. Existem, naturalmente exceções à regra. Outra regra geral dita que o diâmetro interno do tubo de transporte deve ser pelo menos três vezes maior que o maior tamanho de material a ser transportado para evitar o bloqueio na conduta. Os candidatos ideais para o transporte pneumático são materiais de escoamento livre, não abrasivos e não fibrosos. No entanto, com o desenvolvimento de novos tipos de transportadores que operam com o fluido a baixas velocidades, os materiais coesivos, abrasivos e friáveis tornam-se manipuláveis (Klinzing et al., 2010).

Apesar de uma aplicação histórica mais preponderante, hoje em dia ainda se podem encontrar sistemas de transporte pneumático nas seguintes aplicações:

- Operações de transporte:
 - Transporte de medicamentos, documentos e amostras entre laboratórios ou postos de enfermagem;
 - Transporte de dinheiro e documentos entre veículos e caixas de bancos;
 - Transporte de peças ou material industrial em operações fabris;
 - Transporte de amostras nas operações de análise de activação de neutrões em contexto científico;
 - Transporte de alimentos em indústrias alimentares;
- Operações de secagem:
 - Secagem de grãos em operações de indústrias alimentares, como milho, arroz, trigo, amendoins;
- Operações de separação de finos:

- Separação de material por massa e dimensões para operações de análise granulométrica.

2.3 Separadores ciclónicos

Na sequência dos processos industriais referidos anteriormente, numa rede de transporte pneumático existe com frequência a necessidade da separação das partículas sólidas suspensas num fluido. Os dispositivos mais comumente utilizados são os separadores ciclónicos, normalmente designados por ciclones por serem relativamente baratos, de fácil construção, compactos e de reduzida manutenção por não terem partes móveis (Pinho, 2005).

Na Tabela 2.1 apresentam-se as principais vantagens e desvantagens dos separadores centrífugos/ciclónicos.

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens dos separadores ciclónicos (Hoffmann e Stein, 2008)

Vantagens	O material recolhido permanece seco e utilizável
	Capital de investimento e operações de manutenção com custo relativamente baixo
	Muito compactos na maioria das aplicações
	Podem ser utilizados em situações extremas, como a temperaturas e pressões elevadas e ambientes quimicamente agressivos
	Inexistência de partes móveis
	Robustos
	Perda de carga constante
	Podem ser construídos com qualquer material adequado ao propósito, como aço, ferro fundido, ligas, alumínio, plásticos, cerâmicos, etc.
	Podem ser equipados com revestimentos resistentes à erosão ou corrosão ou “repelente de partículas”, como o Teflon. As superfícies internas podem ser electropolidas para ajudar no combate das incrustações
	Podem ser fabricados a partir de chapa ou, no caso de unidades mais pequenas, a partir de moldes
	Podem, nalguns casos, trabalhar com sólidos pegajosos com a irrigação adequada
	Conseguem separar partículas sólidas ou líquidas ou ambas, se o dimensionamento for adequado
	Desvantagens
Perdas de carga mais elevadas do que outro tipo de separadores, como filtros, depuradores de baixa pressão e precipitadores electrostáticos	
Sujeitos a erosão e incrustações se os sólidos processados forem pegajosos ou abrasivos	
Podem operar abaixo das expectativas se o seu dimensionamento não for adequado	

* Designa-se por diâmetro de corte, d_{50} o diâmetro ao qual corresponde uma probabilidade de separação de 50%.

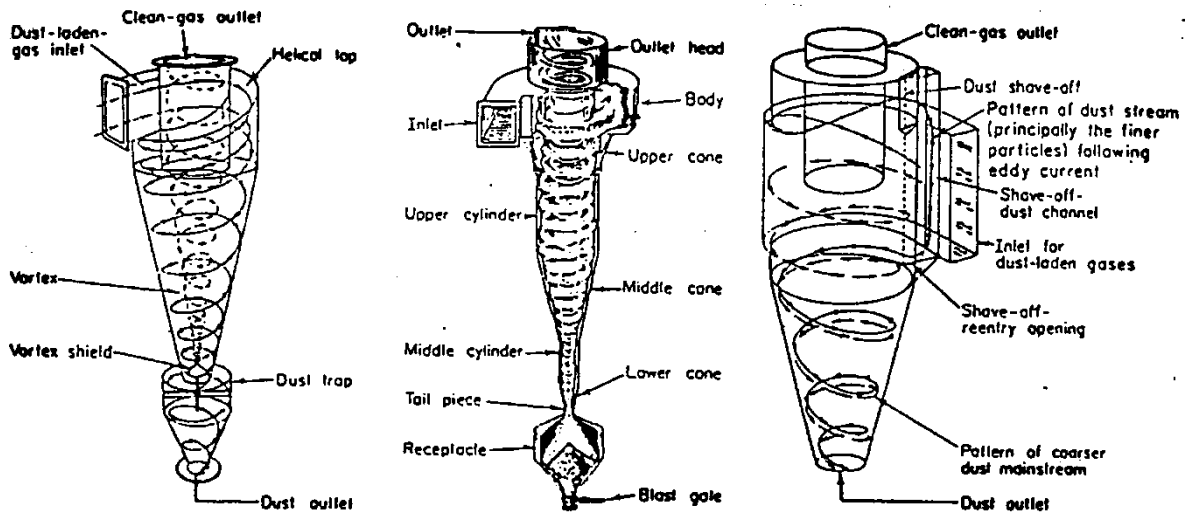


Figura 2.4 - Separadores ciclônicos (Perry e Chilton, 1973).

2.3.1 Princípio de funcionamento dos separadores ciclônicos

Nos dispositivos centrífugos, o fluido com partículas em suspensão forma no interior destes um movimento em espiral com velocidade axial que junto à parede é dirigido para o orifício de descarga e na proximidade do eixo para a conduta de escape, conforme se ilustra na Figura 2.5 (Pinho, 2005).

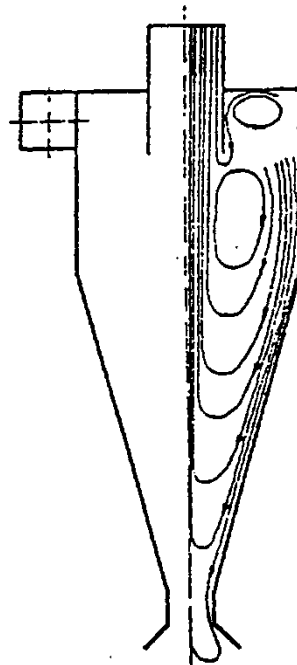


Figura 2.5 - Escoamento no plano meridional de um ciclone (Janeiro Borges e Galvão Teles, 1983).

Desta forma, de um ponto de vista dinâmico, o escoamento é caracterizado por um campo de forças centrífugas que, lançando as partículas contra as paredes do ciclone, promove a separação das mesmas do fluido de transporte, provocando um gradiente radial de pressão no

interior do mesmo (Pinho, 2005). A Figura 2.6 ilustra os perfis característicos de velocidade e pressão que se desenvolvem num separador ciclónico.

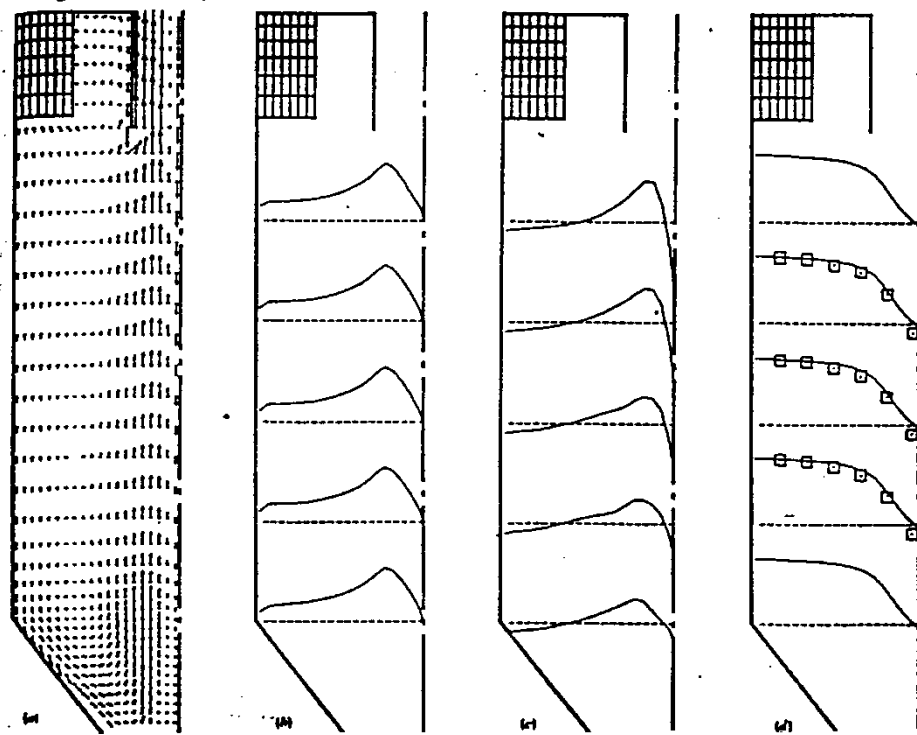


Figura 2.6 - Perfis de velocidade e pressão no interior de um ciclone (Pinho, 2005)
 (a) campo de velocidade do gás; (b) velocidade tangencial; (c) velocidade axial; (d) pressão total.

Na Figura 2.7 apresenta-se um esboço de um ciclone de fluxo invertido padrão, cilindro em cone com entrada tangencial tipo fenda. Neste tipo de ciclones, o movimento em espiral ou turbilhão é provocado projectando a conduta de entrada de tal forma que esta force o fluido a entrar no ciclone tangencialmente à superfície interna da parede deste. A conduta de entrada é, normalmente, de secção transversal rectangular. À medida que o fluido se movimenta em espiral, vai descendo axialmente na zona exterior à de separação e na parte cónica é lentamente forçado para a zona interna do ciclone (zona de separação) onde o movimento axial é invertido e faz subir o fluido. Este tipo de movimento é normalmente referido como um escoamento de duplo vórtice: um externo que dirige o escoamento para baixo e um interno que conduz o fluido para cima. O gás sai do ciclone através da conduta de saída, que se estende para baixo a partir do centro topo do ciclone. Durante este movimento do fluido, as partículas em suspensão sujeitas a uma força centrífuga são lançadas para fora contra a parede do ciclone e transportadas para o orifício de descarga pelo escoamento descendente do fluido junto à parede exterior (Elsayed, 2011).

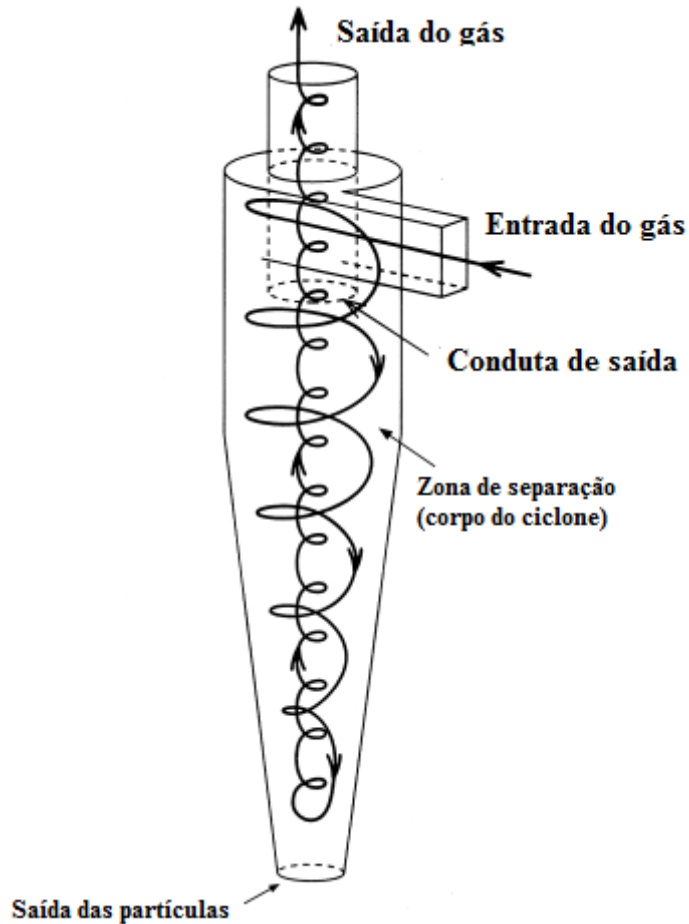


Figura 2.7 - Ciclone de fluxo invertido com entrada tangencial (Elsayed, 2011).

O efeito de separação das partículas é, conseqüentemente, devido ao equilíbrio entre a força centrífuga e a resistência aerodinâmica resultante do seu movimento relativo na direção radial. Desta forma, recorrendo-se à equação da conservação da quantidade de movimento de uma partícula esférica de diâmetro d_p e massa volúmica ρ_p obtém-se a Equação (2.2).

$$\frac{\pi}{6} \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d_p^3 \cdot \frac{v_\theta^2}{r} = C_{Ds} \cdot \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot U_p^2 \quad (2.2)$$

onde,

v_θ é a componente tangencial da velocidade do fluido;

r é a distância da posição da partícula ao eixo do separador;

C_{Ds} é o coeficiente de arrasto, calculado a partir da Equação (2.3), admitindo que o escoamento relativo partículas/gás se encontra em regime de Stokes[†]

$$C_{Ds} = \frac{24}{\rho_f \cdot d_p \cdot U_p} \quad (2.3)$$

[†] Considera-se válida a lei de Stokes para valores de Reynolds muito baixos, ou seja, em regime laminar: $Re_p < 2$, com $Re_p = (\rho_f \cdot d_p \cdot |U_f - U_p|) / \mu_f$.

Numa qualquer posição a uma distância r ao eixo do ciclone, a velocidade do fluido terá uma componente tangencial, v_θ e uma componente radial, v_r . Considerando que o tempo de relaxação dinâmica[‡] das partículas é bastante inferior ao tempo de permanência destas no interior do ciclone, a velocidade tangencial será v_θ e a aceleração radial a que está sujeita $\frac{v_\theta^2}{r}$. Para que ocorra equilíbrio e a partícula se mantenha na órbita, a aceleração terá de ser imposta por uma força radial exercida pelo escoamento do fluido (Pinho, 2005). Desta forma, obtém-se a Equação (2.4), que traduz o equilíbrio mencionado.

$$\frac{\pi}{6} \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d_p^3 \cdot \frac{v_\theta^2}{r} = 3 \cdot \pi \cdot d_p \cdot \mu_f \cdot v_r \quad (2.4)$$

onde,

v_r é a componente radial da velocidade do fluido.

Resolvendo-se a equação em ordem a v_r , obtém-se a Equação (2.5).

$$v_r = \frac{d_p}{18} \cdot \frac{\rho_p - \rho_f}{\mu_f} \cdot \frac{v_\theta^2}{r} \quad (2.5)$$

ou a Equação (2.6)

$$v_r = U_t \cdot \frac{v_\theta^2}{r \cdot g} \quad (2.6)$$

onde,

g é a aceleração gravítica;

U_t é a velocidade terminal da partícula para o regime de Stokes, calculada a partir da Equação (2.7).

$$U_t = \frac{d_p^2}{18} \cdot \frac{\rho_p - \rho_f}{\mu_f} \cdot g \quad (2.7)$$

A partir da Equação (2.6) é possível obter uma igualdade que permite calcular o diâmetro das partículas que, nas condições apresentadas, permanecem em órbita a uma distância r do eixo de rotação. Tal expressão é dada pela Equação (2.8).

$$d_p = \sqrt{18 \cdot \frac{\mu_f}{\rho_p - \rho_f} \cdot \frac{r \cdot v_r}{v_\theta^2}} \quad (2.8)$$

[‡] O tempo de relaxação dinâmica, designado por τ é uma quantidade que representa o tempo que uma partícula em suspensão num fluido demora a atingir uma velocidade cerca de 63% da sua velocidade terminal, mais concretamente $[1 - (1/e)] \cdot U_t$. Admitindo válido o regime de Stokes, o tempo de relaxação dinâmica calcula-se a partir da expressão $(\rho_p \cdot d_p^2)/(18 \cdot \mu_f)$.

Considerando que a componente radial da velocidade do fluido em qualquer ponto de coordenada r pode ser obtida pela Equação (2.9),

$$v_r = \frac{\dot{V}}{2 \cdot \pi \cdot L_c \cdot r} \quad (2.9)$$

onde,

\dot{V} é o caudal volúmico;

L_c é o comprimento da parte cilíndrica do ciclone.

pode obter-se a Equação (2.10).

$$\frac{v_r}{v_{rp}} = \frac{R_c}{r} \quad (2.10)$$

onde,

v_{rp} é a componente radial da velocidade junto à parede do ciclone, ou seja, à distância R_c ;

R_c é o raio do ciclone.

A velocidade tangencial no interior do ciclone sofre um incremento acentuado até um valor de r entre 0,2 e 0,4 vezes o diâmetro da conduta de saída do fluido, segundo uma lei do tipo apresentado na Equação (2.11) (Pinho, 2005).

$$v_\theta \cdot r^n = \text{constante} \quad (2.11)$$

onde,

Experimentalmente demonstra-se que $0,5 \leq n \leq 0,9$.

A influência da viscosidade junto ao eixo do ciclone é muito elevada e o escoamento tangencial assemelha-se ao movimento de rotação de um sólido ($n = -1$). A escolha do expoente n é um dos factores que distingue alguns dos métodos de dimensionamento de separadores ciclônicos. No interesse de se prosseguir a análise do mecanismo de separação escolher-se-á o valor $n = 0,5$, resultando na Equação (2.12) (Kay e Nedderman, 1974).

$$v_\theta \cdot r^{1/2} = v_{\theta p} \cdot R_c^{1/2} = \text{constante} \quad (2.12)$$

onde,

$v_{\theta p}$ é a componente tangencial da velocidade junto à parede do ciclone, ou seja, à distância R_c ;

Retomando a Equação (2.8) e combinando com a (2.10), obtém-se a (2.13).

$$d_p = \sqrt{18 \cdot \frac{\mu_f}{\rho_p - \rho_f} \cdot \frac{R_c \cdot v_{rp}}{v_\theta^2}} \quad (2.13)$$

Introduzindo nesta Equação a (2.12), chega-se à (2.14).

$$d_p = \sqrt{18 \cdot \frac{\mu_f}{\rho_p - \rho_f} \cdot \frac{v_{rp}}{v_\theta^2} \cdot r} \quad (2.14)$$

Por fim, considerando $r = R_c$ obter-se-á o diâmetro crítico da partícula, traduzido pela Equação (2.15).

$$d_{pc} = \sqrt{18 \cdot \frac{\mu_f}{\rho_p - \rho_f} \cdot \frac{v_{rp}}{v_\theta^2} \cdot R_c} \quad (2.15)$$

As partículas cujo diâmetro for superior a d_{pc} atingirão a parede do ciclone e serão separadas do fluido enquanto que as que tiverem um diâmetro inferior ao crítico mover-se-ão teoricamente em órbitas de raio r (inferior a R_c) e, devido às flutuações da velocidade, acabam por escapar pela conduta de escape do fluido (Pinho, 2005).

O mecanismo descrito representa uma tentativa de exemplificar o que acontece no interior de um separador ciclônico, a partir de aproximações de diversa natureza, que servem de base aos modelos designados de órbita crítica. Em verdade, os fenómenos existentes são muito mais complexos do que os descritos, dada a tridimensionalidade do escoamento (entrada tangencial da suspensão e saída axial da corrente gasosa), que implica que as componentes radial e tangencial da velocidade sejam função da coordenada axial, z , medida segundo o eixo do separador (Janeiro Borges e Galvão Teles, 1983). O surgimento dos programas de simulação numérica e o aumento das capacidades dos computadores a preços mais acessíveis têm permitido às equipas de investigação o desenvolvimento de métodos de simulação mais precisos de escoamentos no interior de ciclones. No entanto, tal abordagem conduz a uma análise bastante extensa do mecanismo de separação, tornando-se pouco atractiva no contexto do presente documento, em que se pretende explorar, apresentar e aplicar diversos modelos analíticos simplificados de dimensionamento de separadores ciclônicos.

2.3.2 Proporções de um separador ciclônico

Conforme já descrito, um dos parâmetros que influenciam e caracterizam os escoamentos de um ciclone são as suas dimensões, comumente chamadas de proporções de um separador ciclônico, obtidas a partir de ensaios experimentais e que constituem um ponto de partida para o dimensionamento destes. Na Figura 2.8 apresentam-se algumas dessas medidas (Pinho, 2005).

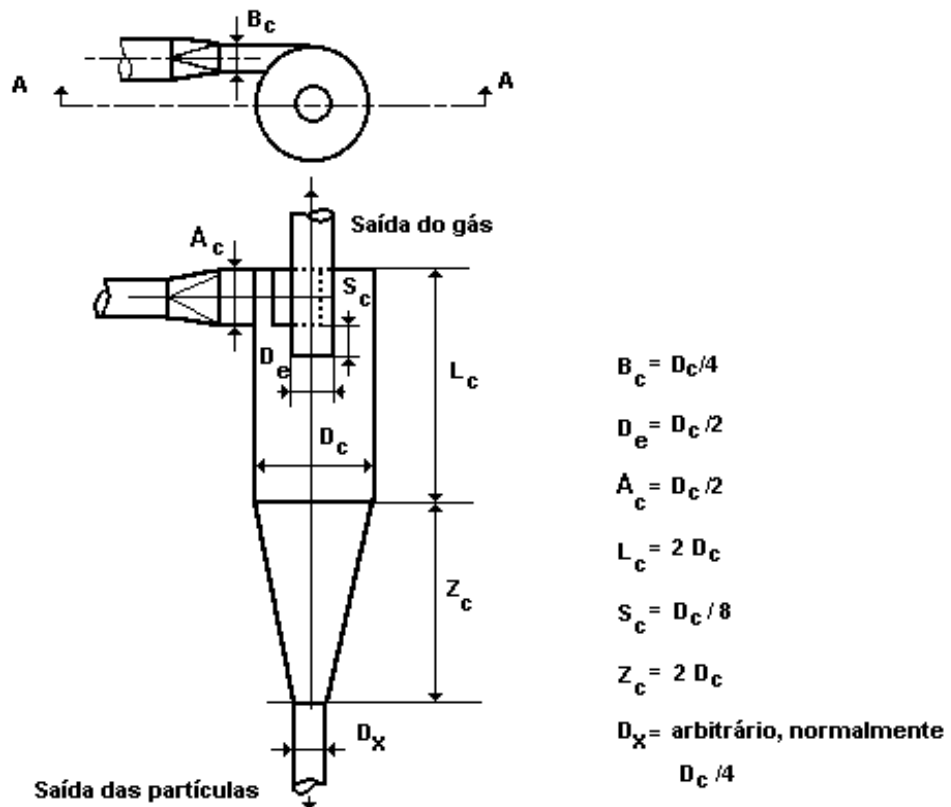


Figura 2.8 - Proporções iniciais para o dimensionamento expedito de separadores ciclônicos (Pinho, 2005).

Nalgumas aplicações de separadores ciclônicos, os requisitos de eficiência energética e a garantia de não entupimento implicam a adoção de dimensões que diferem das apresentadas na Figura 2.8. Nestes casos utilizam-se, geralmente, ciclones mais bojudos. Na Figura 2.9 apresentam-se dois separadores ciclônicos igualmente bem proporcionados, sendo o da direita recomendado para separação com alta eficiência de suspensões finas e o da esquerda aconselhável para a retenção de partículas mais gradas com maior rendimento energético (Janeiro Borges e Galvão Teles, 1983).

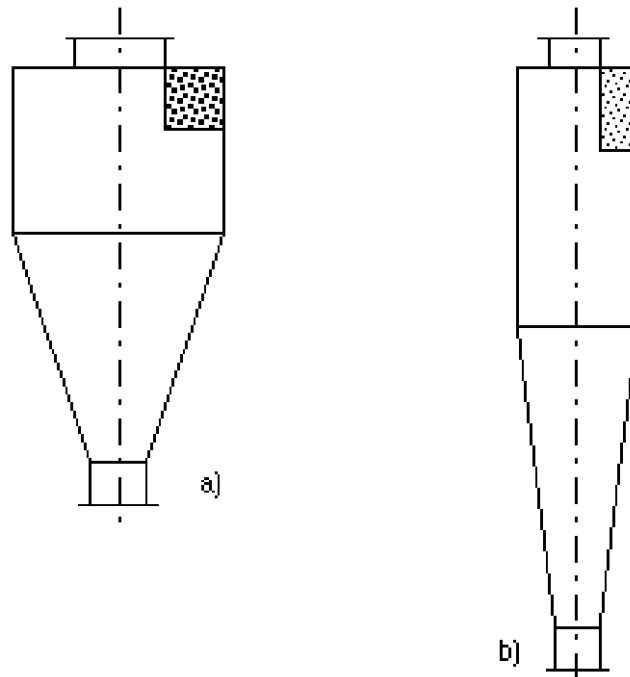


Figura 2.9 - Ciclones de diferentes proporções (Janeiro Borges e Galvão Teles, 1983)
(a) para suspensões gradas; (b) para suspensões finas.

O estudo desta situação levou a inúmeras experiências ao longo dos anos que permitiram a definição de proporções mais convenientes entre as diversas cotas. Surgem, desta forma, dimensões *standard* de separadores ciclônicos, apresentadas na Tabela 2.2 como relações entre cada medida e o diâmetro do ciclone, D_c .

Tabela 2.2 - Dimensões *standard* de ciclones típicos (Pinho, 2005)

-	Definições	I	II	III	IV	V
D_c/D_c	Diâmetro do corpo cilíndrico	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
A_c/D_c	Altura da conduta de entrada	0,5	0,44	0,5	0,5	0,583
B_c/D_c	Largura da conduta de entrada	0,2	0,21	0,25	0,25	0,208
S/D_c	Comprimento interior da saída	0,5	0,5	0,625	0,6	0,583
D_e/D_c	Diâmetro da conduta de saída do gás	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5
L_c/D_c	Altura da parte cilíndrica	1,5	1,4	2,0	1,75	1,333
H_c/D_c	Altura total do ciclone	4,0	3,9	4,0	3,75	3,17
D_x/D_c	Diâmetro da conduta de saída dos sólidos	0,375	0,4	0,25	0,4	0,5

As proporções apresentadas na Figura 2.10 foram propostas por diversos autores conforme os requisitos da sua capacidade de separação de partículas:

- I. *Stairmand* - ciclone de alto rendimento;
- II. *Swift* - ciclone de alto rendimento;
- III. *Lapple* - ciclone de utilização geral;

- IV. *Swift* - ciclone de utilização geral;
- V. *Peterson e Whithy* - ciclone de utilização geral.

Tais medidas devem ser utilizadas como guia para o dimensionamento e projecto de ciclones (Pinho, 2005).

A nomenclatura utilizada tanto na Tabela 2.2 como no seguimento do presente documento apresenta-se no esquiço ilustrado na Figura 2.10. As designações são coerentes com as da Figura 2.8, apenas com a introdução de uma cota nova, S , que passa a representar o comprimento total da conduta de escape do fluido no interior do ciclone.

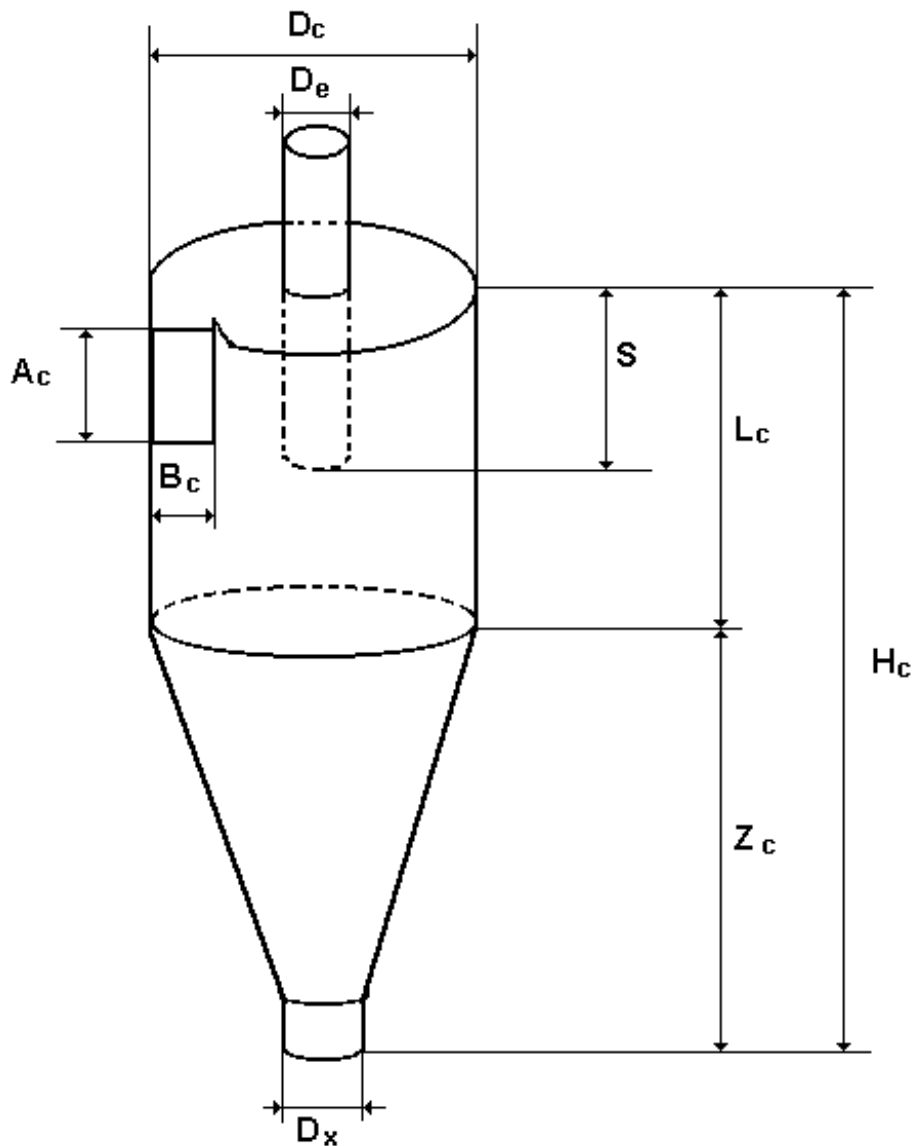


Figura 2.10 - Dimensões típicas de um separador ciclónico (Pinho, 2005).

2.3.3 Saltitação

A saltitação ou saltação é um fenómeno caracterizado por um típico específico de transporte de partículas por fluidos, quando o material solto em repouso é recolhido pelo escoamento e transportado em suspensão neste, por períodos de tempo e espaço curtos. É um fenómeno bastante evidente e presente no transporte pneumático e, como tal, é importante o seu estudo no dimensionamento deste tipo de sistemas e dos respectivos separadores. O conceito de velocidade de saltitação é fundamental para a compreensão dos fenómenos físicos decorrentes do processo. Pode, portanto, ser definida das seguintes formas:

- Velocidade mínima necessária para que se evite a deposição das partículas transportadas ao longo da geratriz inferior da conduta;
- Velocidade necessária para se recolectar as partículas depositadas e transportá-las em suspensão num fluido.

No âmbito da separação ciclónica o segundo conceito é mais importante, uma vez que importa garantir que as partículas que já se separaram do escoamento e se depositaram nas paredes no separador ciclónico não sejam de novo recolhidas pelo fluido e arrastada para a saída dos gases limpos. No entanto, ambas as definições permitem limitar a velocidade do fluido na entrada do ciclone, para que se evitem tanto a deposição excessiva de partículas na entrada do separador como a recolecção das mesmas no interior do ciclone, conforme se ilustra na Figura 2.11 (Pinho, 2005).

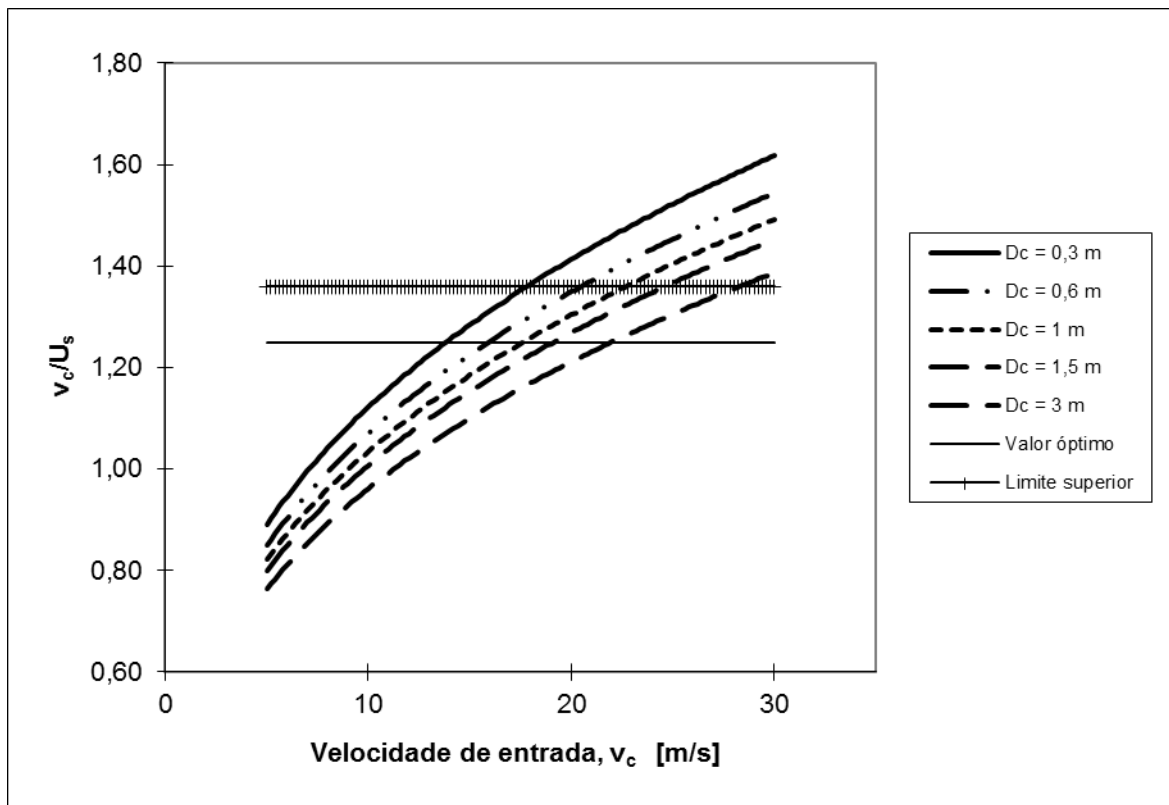


Figura 2.11 - Gama de valores aceitáveis para a velocidade de entrada do ciclone (Pinho, 2005).

A Figura 2.11 ilustra uma dependência entre a velocidade à entrada do ciclone, v_c , definida pela Equação (2.16) e o quociente entre esta e a velocidade de saltitação, U_s , definida pelos autores conforme apresentada na Equação (2.17), expresso na Equação (2.18).

$$v_c = \frac{2 \cdot \dot{V}}{R_c^2} \quad (2.16)$$

$$U_s = 11,58 \cdot \left[\frac{\mu_f \cdot (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f^2} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{B_c}{D_c} \right)^{0,4}}{\left[1 - \left(\frac{B_c}{D_c} \right) \right]^{\frac{1}{3}}} \right\} \cdot D_c^{0,067} \cdot v_c^{\frac{2}{3}} \quad (2.17)$$

$$\frac{v_c}{U_s} = \frac{1}{11,58} \cdot \left[\frac{\rho_f^2}{\mu_f \cdot (\rho_p - \rho_f)} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{B_c}{D_c} \right) \right]^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{B_c}{D_c} \right)^{0,4}} \right\} \cdot \frac{v_c^{\frac{1}{3}}}{D_c^{0,067}} \quad (2.18)$$

Desta forma, verifica-se que a velocidade de saltitação é função das propriedades das partículas (ρ_p), do fluido (ρ_f e μ_f) e das dimensões do ciclone (B_c/D_c). Os autores deste estudo apresentam na literatura valores obtidos experimentalmente que permitem verificar que o máximo rendimento de separação do separador ciclónico se obtinha para valores de $v_c/U_s = 1,25$ e que a recolocção das partículas ocorre para $v_c/U_s = 1,36$ (Pinho, 2005).

O gráfico da Figura 2.11 foi construído para ciclones de alto rendimento *Stairmand*, considerando o ar como fluido transportador a 20°C e 1 atm e partículas com massa volúmica igual a 2500 kg/m³. Com esta análise pode verificar-se, com facilidade a razão pela qual a velocidade do fluido à entrada de um separador ciclónico deverá encontrar-se entre 15 e 30 m/s para que se consiga satisfazer os critérios da saltitação e maximizar o rendimento da separação ciclónica (Pinho, 2005).

3 Modelos analíticos

3.1 Rendimento de separação

Um dos parâmetros caracterizadores dos separadores ciclônicos é o seu rendimento de separação, que traduz a capacidade de um ciclone separar as partículas em suspensão de diferentes tamanhos.

Existem, descritos na literatura, dois conceitos de modelação para o rendimento de separadores ciclônicos:

- Modelos de “órbita de equilíbrio”;
- Modelos de “tempo de voo”.

Na Figura 3.1 (a) ilustra-se o conceito por trás dos modelos de órbita de equilíbrio. Este tipo de modelos considera uma superfície imaginária formada pela parede da conduta de escape do fluido até ao fundo do separador. São modelos baseados num balanço de forças numa partícula que está a girar nessa superfície, com raio $R_e = 1/2 \cdot D_e$. Neste balanço, a força centrífuga direccionada para a parede do ciclone é equilibrada com força de arrasto provocada pelo escoamento através da e normal à superfície da conduta de escape. A força centrífuga é proporcional à massa da partícula e, conseqüentemente a d^3 enquanto a força de arrasto é proporcional a d . As partículas de maiores dimensões são, desta forma, centrifugadas para a parede do ciclone enquanto as partículas menores são arrastadas pelo fluido, escapando pela conduta de saída. O tamanho de partícula para o qual ambas as forças se anulam, o tamanho que provoca uma órbita de equilíbrio em torno da superfície imaginária, é designado como d_{50} , ou diâmetro de corte. Representa, portanto, o tamanho de uma partícula que tem uma probabilidade de separação de 50%. Este tamanho de partícula é de fundamental importância e uma medida intrínseca da capacidade de separação dos separadores ciclônicos. Na aplicação destes modelos, todas as componentes da velocidade do fluido são consideradas constantes ao longo da superfície imaginária da conduta de saída. Na Figura 3.1(b) apresenta-se um esboço representativo do outro tipo de modelo, o modelo de tempo de voo. Neste método, é considerado o movimento da partícula para a parede, desprezando-se a velocidade do fluido no sentido interior. No modelo de tempo de voo original a questão que se colocava era se uma partícula inserida numa qualquer posição lateral na entrada teria tempo para alcançar a parede do ciclone e ser recolectada antes de atingir o fundo deste. Alguns modelos posteriores combinaram dois conceitos, considerando tanto uma permuta de partículas na superfície imaginária da conduta de saída, devido à centrifugação e dispersão turbulenta, como um movimento destas para a parede do ciclone (Hoffmann e Stein, 2008).

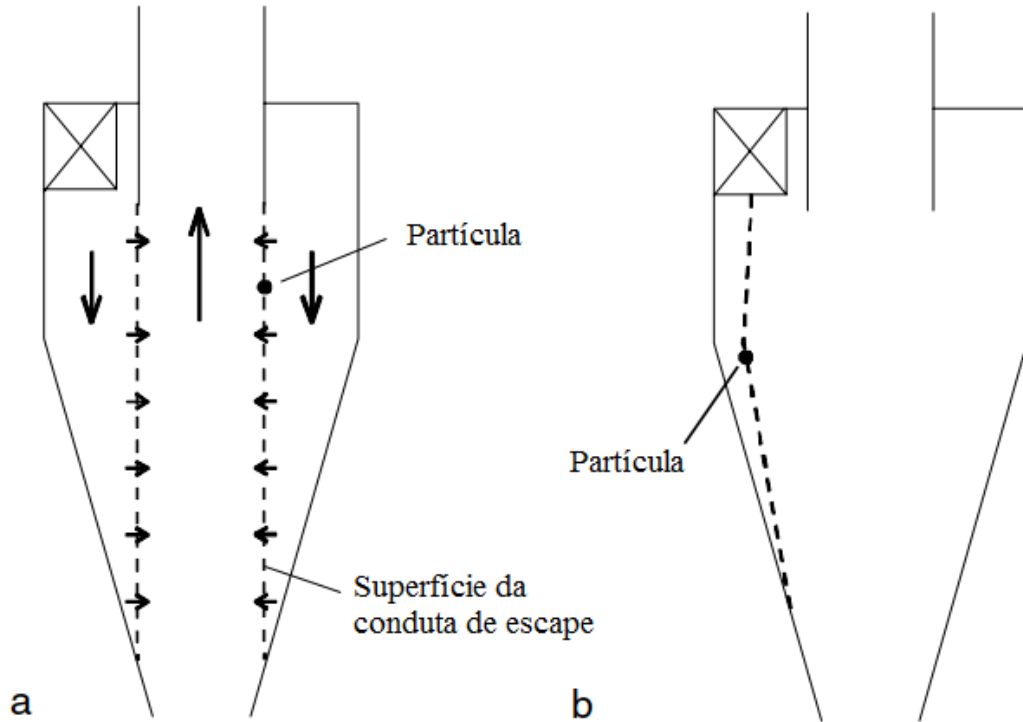


Figura 3.1 - Esboços que ilustram os conceitos por trás dos modelos de rendimento (Hoffmann e Stein, 2008)
 (a) modelo de órbita de equilíbrio; (b) modelo de tempo de voo.

Na maior parte dos casos de aplicação de separadores ciclónicos, a suspensão de partículas é composta por sólidos de diferentes diâmetros, de acordo com uma granulometria geralmente conhecida. O cálculo do rendimento global de separação é, desta forma, dado pela Equação (3.1).

$$\eta = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \eta_i \quad (3.1)$$

onde Y_i é a fracção mássica das partículas com diâmetro d_{pi} , a que corresponde o rendimento η_i calculado nos subcapítulos seguintes e n o número de diâmetros considerados, respeitando-se a Equação (3.2).

$$\sum_{i=1}^n Y_i = 1 \quad (3.2)$$

Nestas condições é de grande interesse prático conhecer o comportamento do rendimento de separação de um separador ciclónico para partículas de diferentes diâmetros. Na Figura 3.2 apresenta-se um gráfico resultante de medidas experimentais do rendimento de separação, η em função da relação entre o diâmetro da partícula e o diâmetro de corte, d_{pi}/d_{50} para um ciclone com as proporções apresentadas na Figura 2.8.

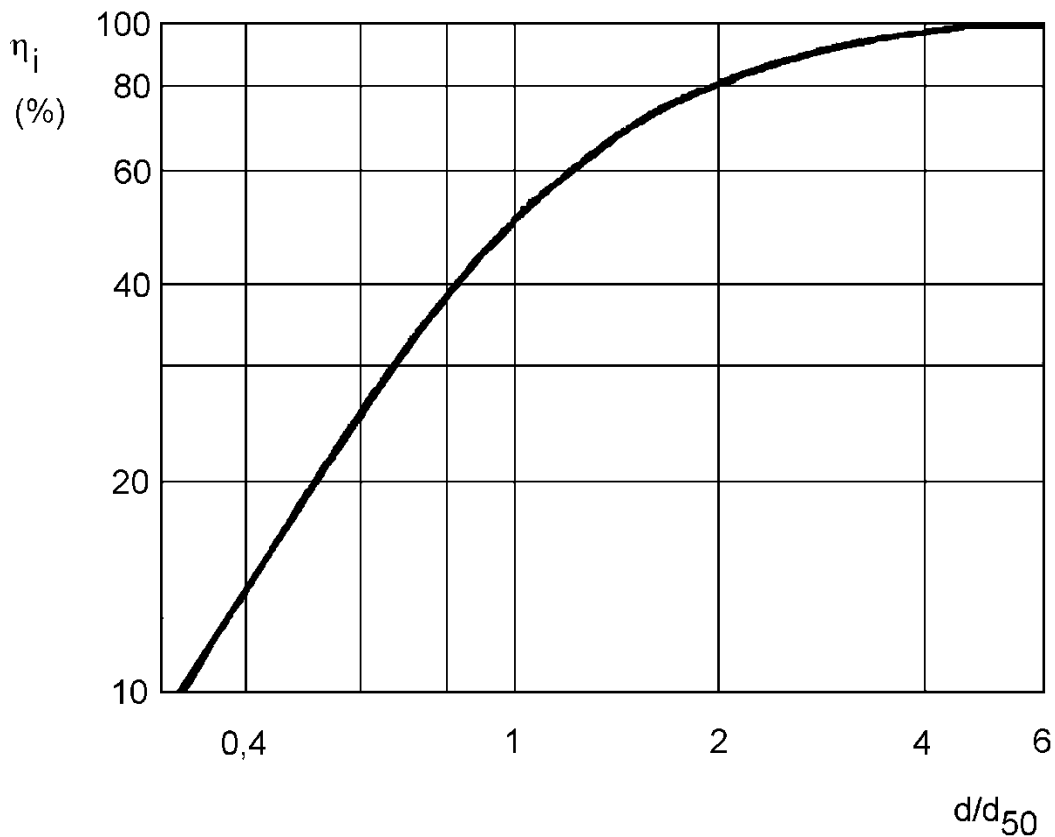


Figura 3.2 - Curva experimental do rendimento de separação para ciclones com as proporções da Figura 2.8 (Pinho, 2005).

O rendimento de separação é função não só da relação d_{pi}/d_{50} , mas também de outras variáveis adimensionais integrantes no funcionamento do ciclone, como o número de Reynolds[§], , do factor de carga, θ , de $\Delta\dot{V}/\dot{V}$, onde $\Delta\dot{V}$ representa o caudal de fluido que escapa pela conduta de descarga das partículas e u_τ a velocidade de fricção calculada a partir de $u_\tau = (\tau_0 \cdot \rho_f)^{\frac{1}{2}}$, onde τ_0 representa a tensão tangencial junto à parede do ciclone. No entanto, dada a complexidade da análise da influência relativa de cada um destes parâmetros, tal situação não será abordada no presente trabalho (Janeiro Borges e Galvão Teles, 1983).

Nas secções seguintes serão apresentados diversos modelos, tanto do tipo órbita de equilíbrio como do tipo tempo de voo, para cálculo do rendimento de separação de separadores ciclônicos e que serão inseridos no programa de computador desenvolvido no âmbito do presente trabalho.

[§] $Re = (\rho_f \cdot u_\tau^2 \cdot D_c) / (2 \cdot \rho_p)$

3.1.1 Rosin, Rammler e Intelmann / Lapple

O modelo desenvolvido por Rosin, Rammler e Intelmann e aprofundado por Lapple baseia-se no método do tempo de voo e o cálculo do diâmetro de corte é feito a partir da Equação (3.4). A previsão do rendimento parcial baseia-se numa curva de rendimento generalizada, obtida a partir da Equação (3.3) (Theodore e De Paola, 1980).

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_{pi}}\right)^2} \quad (3.3)$$

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu_f \cdot B_c}{2 \cdot \pi \cdot N_S \cdot v_c \cdot (\rho_p - \rho_f)}} \quad (3.4)$$

onde, N_S é o número de espiras percorrido pela corrente gasosa e partículas em suspensão, calculado a partir das Equações (3.5) (Gimbun et al., 2004), (3.6) (Pinho, 2005) ou (3.7) (Hoffmann e Stein, 2008);

$$N_S = \frac{1}{A_c} \cdot \left(L_c + \frac{Z_c}{2}\right) \quad (3.5)$$

$$N_S = v_c \cdot (0,3540 - 8,288 \cdot 10^{-3} \cdot v_c + 6,795 \cdot 10^{-5} \cdot v_c^2) \quad (3.6)$$

$$N_S = 6,1 \cdot (1 - e^{-0,066 \cdot v_c}) \quad (3.7)$$

No presente trabalho a expressão adoptada no desenvolvimento do programa foi a (3.5).

3.1.2 Barth

O modelo desenvolvido por Barth representa o modelo de “órbita de equilíbrio” original (Hoffmann e Stein, 2008). O cálculo do rendimento é feito a partir da Equação (3.8) (Dirgo e Leith, 1985).

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{v_{tsi}}{v_{tsi}^*}\right)^{-3,2}} \quad (3.8)$$

onde,

v_{tsi} é a velocidade terminal de deposição das partículas;

v_{tsi}^* é a velocidade terminal de deposição das partículas com 50% de probabilidade de separação (Charisiou et al., 2011).

A relação v_{tsi}/v_{tsi}^* é calculada a partir da Equação (3.9).

$$\frac{v_{tsi}}{v_{tsi}^*} = \frac{\pi \cdot L^* \cdot v_{\theta}^2 \cdot \rho_p \cdot d_{pi}^2}{9 \cdot \mu_f \cdot \dot{V}} \quad (3.9)$$

onde,

L^* é a altura do eixo central (núcleo) do ciclone, calculada a partir da Equação (3.10);

v_{θ} é a componente tangencial da velocidade no vórtice do ciclone, obtida a partir da Equação (3.11).

$$L^* = \begin{cases} H_c - S, & D_e \leq D_x \\ \frac{Z_c \cdot (D_c - D_e)}{D_c - D_x} + (L_c - S), & D_e > D_x \end{cases} \quad (3.10)$$

$$v_{\theta} = v_e \cdot \left[\frac{\frac{D_e}{2} \cdot (D_c - B_c) \cdot \pi}{2 \cdot A_c \cdot B_c \cdot \alpha + L^* \cdot (D_c - B_c) \cdot f \cdot \pi} \right] \quad (3.11)$$

em que,

v_e é a velocidade de escape do fluido, calculada a partir da Equação (3.12);

α é um parâmetro geométrico, obtida a partir da Equação (3.13);

f é um coeficiente de atrito que Barth assumiu igual a 0,02 (Dirgo e Leith, 1985).

$$v_e = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot R_e^2} \quad (3.12)$$

$$\alpha = 1 - 1,2 \cdot \left(\frac{B_c}{D_c} \right) \quad (3.13)$$

3.1.3 Rietema

Outro modelo baseado no método do tempo de voo é o modelo de Rietema. Neste, o rendimento parcial é calculado a partir da Equação (3.14), enquanto o diâmetro de corte é obtido a partir da Equação (3.15) (Elsayed, 2011).

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_{pi}} \right)^{6,4}} \quad (3.14)$$

$$d_{50} = \sqrt{\frac{\mu_f \cdot \rho_f \cdot \dot{V}}{\Delta p \cdot H_c \cdot (\rho_p - \rho_f)}} \quad (3.15)$$

onde, Δp é a perda de carga no interior do ciclone. Um bom modelo de cálculo da perda de carga neste caso é o de Shepherd e Lapple, apresentado na Equação (3.113) (Hoffmann e Stein, 2008).

3.1.4 Muschelknautz

O método de Muschelknautz foi desenvolvido, ao longo de mais 30 anos pelo Professor Edgar Muschelknautz com a ajuda dos seus alunos e colegas (Muschelknautz e Brunner, 1967; Muschelknautz e Krambrock, 1970; Muschelknautz et al., 1970; Muschelknautz, 1972; Trefz e Muschelknautz, 1993; Dahl e Muschelknautz, 1994) maioritariamente na Universidade de Estugarda, resultando num dos mais práticos métodos de dimensionamento de separadores ciclónicos da actualidade (Hoffmann e Stein, 2008).

O cálculo do rendimento total no Método de Muschelknautz tem em consideração a concentração de partículas suspensas no fluido à entrada do ciclone, propondo o conceito de factor de carga crítico, calculado a partir da Equação (3.16). Muschelknautz considerou que a força centrífuga a que o fluido é sujeito à entrada do separador induz uma sedimentação de partículas, contribuindo para a separação destas. A energia turbulenta do escoamento do fluido na entrada suporta um peso limitado de sólidos, pelo que o aumento da concentração de sólidos em suspensão acima do factor de carga crítico, θ_{lim} , provoca um aumento do rendimento do ciclone, independentemente do diâmetro destes (Cortés e Gil, 2007).

$$\theta_{lim} = \begin{cases} 0,025 \cdot \left(\frac{d_{50}}{d_{med}}\right) \cdot (10 \cdot \theta)^{0,15}, & \theta \geq 0,1 \\ 0,025 \cdot \left(\frac{d_{50}}{d_{med}}\right) \cdot (10 \cdot \theta)^{-0,11-0,10 \cdot \ln \theta}, & \theta < 0,1 \end{cases} \quad (3.16)$$

Na Equação anterior o parâmetro d_{med} representa o diâmetro mediano, ou seja, o diâmetro para o qual 50% das partículas da suspensão lhe são inferiores (Pinho, 2005), enquanto que o diâmetro de corte, d_{50} é calculado a partir da Equação (3.17).

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu_f \cdot (0,9 \cdot \dot{V})}{2 \cdot \pi \cdot v_\theta(R_e)^2 \cdot L^* \cdot (\rho_p - \rho_f)}} \quad (3.17)$$

onde,

$v_\theta(R_e)$ é componente tangencial da velocidade na superfície da conduta de escape, calculada a partir da Equação (3.27);

L^* é a altura do eixo central (núcleo) do ciclone, calculada a partir da Equação (3.10).

O rendimento global é, desta forma, calculado de uma de duas formas, conforme se expõe na Equação (3.18).

$$\eta = \begin{cases} \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \eta_i, & \theta < \theta_{crítico} \\ \left(1 - \frac{\theta_{lim}}{\theta}\right) + \frac{\theta_{lim}}{\theta} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \eta_i, & \theta \geq \theta_{crítico} \end{cases} \quad (3.18)$$

Na Equação anterior, o termo $\left(1 - \frac{\theta_{lim}}{\theta}\right)$ representa o rendimento de separação das partículas por “sedimentação” na entrada do ciclone, enquanto que o segundo diz respeito ao rendimento de separação da restante carga suspensa no escoamento no interior do ciclone. Em princípio, η_i é igual, tanto para elevados factores de carga, como para baixos. No entanto, a separação de partículas na entrada do separador tem uma influência determinante no escoamento, já que diminui a velocidade tangencial desta através do aumento do atrito na parede do ciclone. Assim, o rendimento de separação no interior do ciclone será, naturalmente afectado, fazendo com que η_i nos casos em que o factor de carga não excede o crítico seja diferente do caso em que o inverso acontece (Cortés e Gil, 2007).

Trefz e Muschelknautz (1993) definem o cálculo do rendimento de separação das partículas no interior do ciclone para condições de carga inferiores ao factor de carga crítico a partir da Equação (3.19).

$$\eta_i = \exp \left[- \left(\frac{d_{50}}{d_{pi}} \right)^{1,25} \right] \quad (3.19)$$

Nos trabalhos de Muschelknautz pouco ou nada é referido sobre o cálculo de η_i nos casos em que o factor de carga excede o crítico. Na verdade, a forma mais eficaz de se conseguir prever o comportamento deste parâmetro é, como em todos os modelos, a partir de resultados experimentais, ajustando-se-lhes uma regressão. Como tal situação é impraticável, no presente trabalho optou-se por se aproximar uma curva genérica de natureza empírica como demonstrativa do rendimento de separação das partículas na entrada do ciclone. Faz-se, desde já a ressalva para que os resultados produzidos por esta possam não representar com rigor a realidade.

Hoffmann e Stein (2008) apontam a Equação (3.20) como uma das curvas de rendimento mais simples e práticas e será a adoptada no presente trabalho.

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{med,in}}{d_{pi}} \right)^n} \quad (3.20)$$

O expoente n relaciona-se com a inclinação da curva que aproxima os dados. Normalmente este valor encontra-se entre 2 e 7 (conforme pode ser observado nas relações doutros modelos), dependendo da configuração e proporções do separador a utilizar. Quando existe falta de informação, é usual adoptar-se 3 como o valor “típico” de n . Valores elevados (entre 4 e 7) de n são característicos de ciclones bem projectados que possui uma curva de rendimento em “passo de escada”. Tal valor tende a comportar-se como um separador de partículas com tamanhos superiores a d_{50} (ou $d_{50,Ai}$), permitindo que as inferiores escapem pelo excesso de fluido escoado. No sentido inverso, valores mais baixos de n são representativos de

características opostas e normalmente associados condições de quantidade excessiva de mistura interna decorrente de um *design* aerodinâmico fraco ou uma má condição mecânica (paredes ásperas, rugosas ou corroídas, furos, juntas de vazamento, escoamento ascendente, depressões na parede e/ou protuberância e a presença de depósitos de paredes (Hoffmann e Stein, 2008). No presente trabalho foi adoptado um valor de $n = 5$.

O diâmetro mediano associado à separação de partículas na entrada do ciclone, d_{50in} calcula-se a partir da Equação (3.21).

$$d_{med,in} = \begin{cases} d_{50}, & \theta < \theta_{lim} \\ d_{med} - (d_{med} - d_{50in}) \cdot \left(1 - \frac{\theta_{lim}}{\theta}\right), & 0 \leq \left(1 - \frac{\theta_{lim}}{\theta}\right) \leq 0,75 \\ d_{50in}, & \left(1 - \frac{\theta_{lim}}{\theta}\right) > 0,75 \end{cases} \quad (3.21)$$

e,

d_{50in} é o diâmetro de corte relativo à entrada do ciclone, calculado pela Equação (3.22).

$$d_{50in} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu_f \cdot (0,9 \cdot \dot{V})}{2 \cdot A_W \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot a_{in}}} \quad (3.22)$$

onde,

A_W é a área interior da parte cilíndrica e da metade superior cônica do ciclone, ilustrada na Figura 3.3 e calculada pela Equação (3.23);

a_{in} é a aceleração obtida a partir da Equação (3.24).

$$A_W = \pi \cdot \left\{ 2 \cdot R_c \cdot (H_c - Z_c) + (R_c + R_x) \cdot \sqrt{\left(\frac{H_c}{2}\right)^2 + [R_c - 0,5 \cdot (R_c - R_x)]^2} \right\} \quad (3.23)$$

$$a_{in} = \frac{v_{\theta in} \cdot v_{\theta 2}}{\sqrt{R_{in} \cdot R_2}} \quad (3.24)$$

As restantes Equações necessárias aos cálculos correspondentes ao modelo apresentam-se de seguida.

$$v_{\theta in} = v_{\theta p} \cdot \frac{\left(\frac{R_c}{R_{in}}\right)}{\left[1 + \frac{f \cdot A_W \cdot v_{\theta p} \cdot \sqrt{\frac{R_c}{R_{in}}}}{2 \cdot \dot{V}}\right]} \quad (3.25)$$

$$v_{\theta 2} = v_{\theta p} \cdot \frac{\left(\frac{R_c}{R_2}\right)}{\left[1 + \frac{f \cdot A_w \cdot v_{\theta p} \cdot \sqrt{\frac{R_c}{R_2}}}{2 \cdot \dot{V}}\right]} \quad (3.26)$$

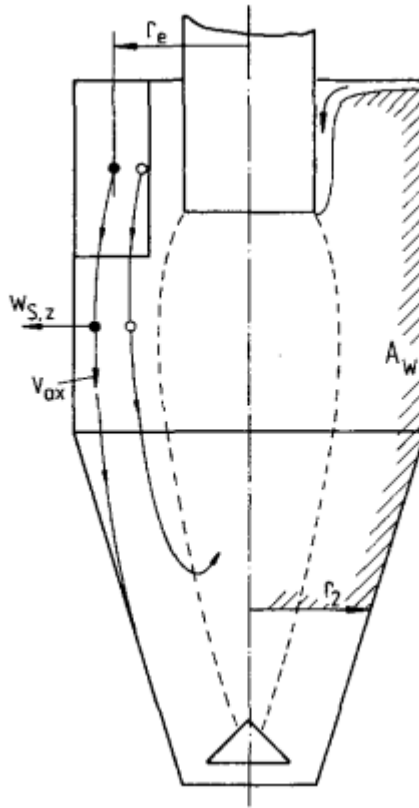


Figura 3.3 - Ilustração da área A_w (Trefz e Muschelknautz, 1993).

$$v_{\theta}(R_e) = v_{\theta p} \cdot \frac{\left(\frac{R_c}{R_e}\right)}{\left[1 + \frac{f \cdot A_R \cdot v_{\theta p} \cdot \sqrt{\frac{R_c}{R_e}}}{2 \cdot \dot{V}}\right]} \quad (3.27)$$

em que,

A_R é a área total da superfície interior do ciclone, calculada a partir da Equação (3.28).

$v_{\theta p}$ é componente tangencial da velocidade na parede do ciclone, obtida a partir da Equação (3.29);

R_{in} é o raio médio de entrada, obtido a partir da Equação (3.31);

R_2 é o raio médio da parte cônica do ciclone, obtido a partir da Equação (3.32);

f é o coeficiente de atrito calculado na Equação (3.35).

$$A_R = \pi \cdot \left[R_c^2 - R_e^2 + 2 \cdot R_c \cdot L_c + (R_c - R_x) \cdot \sqrt{Z_c^2 + (R_c - R_x)^2 + 2 \cdot R_e \cdot S} \right] \quad (3.28)$$

$$v_{\theta p} = \frac{v_{in} \cdot R_{in}}{R_c \cdot \alpha} \quad (3.29)$$

com,

v_{in} a velocidade do fluido na conduta de entrada no ciclone, calculada a partir da Equação (3.30);

α um coeficiente de estrangulamento à entrada, dado pela Equação (3.33).

$$v_{in} = \frac{\dot{V}}{A_c \cdot B_c} \quad (3.30)$$

$$R_{in} = R_c - \frac{B_c}{2} \quad (3.31)$$

$$R_2 = \frac{R_c + R_x}{2} \quad (3.32)$$

$$\alpha = \frac{1}{\zeta} \cdot \left\{ 1 - \sqrt{1 + 4 \cdot \left[\left(\frac{\zeta}{2} \right)^2 - \frac{\zeta}{2} \right] \cdot \sqrt{1 - \frac{(1 - \zeta^2) \cdot (2 \cdot \zeta - \zeta^2)}{1 + \theta}}} \right\} \quad (3.33)$$

e finalmente,

ζ é um parâmetro geométrico definido pela Equação (3.34);

θ é o factor de carga, obtido a partir da Equação (2.1).

$$\zeta = \frac{B_c}{R_c} \quad (3.34)$$

O cálculo do coeficiente de atrito é feito a partir da Equação (3.35) e, conforme se verifica, por ser função do rendimento global do ciclone, é obtido de forma iterativa.

$$f = f_{gas} + 0,25 \cdot \left(\frac{R_c}{R_e} \right)^{-0,625} \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot \theta \cdot Fr \cdot \rho_f}{0,4 \cdot \rho_p^*}} \quad (3.35)$$

onde,

η é o rendimento global do separador ciclónico;

Fr é o numero de Froude, uma relação adimensional entre as forças de inércia e as forças gravíticas, traduzido pela Equação (3.36);

ρ_p^* é a massa volúmica aparente, considerada no âmbito do presente trabalho $\rho_p^* \approx 0,5 \cdot \rho_p$, por se carecer de informação mais detalhada;

f_{gas} é o coeficiente de atrito relativo ao fluido, considerando-o limpo de partículas em suspensão e calculado pelas Equações (3.37) a (3.43).

$$Fr = \frac{v_e}{\sqrt{2 \cdot R_e \cdot g}} \quad (3.36)$$

$$f_{gas} = f_l + f_r \quad (3.37)$$

$$f_l = 0,323 \cdot Re_R^{-0,623} \quad (3.38)$$

$$f_r = \left(\log \left(\frac{1,60}{\varepsilon - 0,0005999} \right)^{2,38} \right)^{-2} \cdot \left(1 + \frac{2,25 \cdot 10^5}{Re_R^2 \cdot (\varepsilon - 0,000599)^{0,213}} \right) \quad (3.39)$$

$$Re_R = \frac{R_{in} \cdot R_m \cdot v_{zp} \cdot \rho_f}{H_c \cdot \mu_f \cdot \left[1 + \left(\frac{v_{zp}}{v_{\theta m}} \right)^2 \right]} \quad (3.40)$$

$$R_m = \sqrt{R_e \cdot R_c} \quad (3.41)$$

$$v_{zp} = \frac{0,9 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot (R_c^2 - R_m^2)} \quad (3.42)$$

$$v_{\theta m} = \sqrt{v_{\theta p} - v_{\theta}(R_e)} \quad (3.43)$$

em que,

f_l é a contribuição do coeficiente de atrito devido à parte lisa da parede do ciclone para separadores de corpo cónico;

f_r é a contribuição do coeficiente de atrito devido à rugosidade da parede do ciclone para separadores de corpo cónico;

Re_R é o número de Reynolds associado ao corpo do ciclone (Trefz e Muschelknautz, 1993);

R_m é o raio médio entre a parede do ciclone e a superfície da conduta de saída do fluido;

v_{zp} é componente axial da velocidade junto à parede do ciclone;

$v_{\theta m}$ é componente tangencial da velocidade média entre a parede do ciclone e a superfície da conduta de saída do fluido;

ε é a rugosidade relativa, considerada igual a $\varepsilon = 6 \cdot 10^{-4}$.

Na maior parte das aplicações, o termo da Equação (3.40), $\left(v_{zp}/v_{\theta m}\right)^2$ é suficientemente pequeno para poder ser desprezado. Esta situação é especialmente verdadeira em unidades comerciais que operam a valores de Re_R acima de 2000 (Hoffmann e Stein, 2008) e será tomada em consideração no presente trabalho.

3.1.5 Koch e Licht

O modelo de Koch e Licht congrega um modelo teórico de separação definido por Leith e Licht com uma correlação que define a velocidade de saltitação de acordo com a aconselhada a separadores ciclônicos, desenvolvida por Zenz e Kalen (Pinho, 2005). Este modelo tem em consideração a temperatura do fluido, devolvendo a partir de relações empíricas, o rendimento do separador (Altmeyer et al., 2004).

O cálculo do rendimento parcial de separação é feito a partir da Equação (3.44).

$$\eta_i = 1 - \exp \left\{ -2 \cdot \left[\frac{G \cdot \tau_i \cdot \dot{V}}{D_c^3} \cdot (n + 1) \right]^{0,5} \right\} \quad (3.44)$$

onde,

n é o expoente relacionado com o vórtice (Leith e Mehta, 1973), calculado pela Equação (3.45);

τ_i é o tempo de relaxação dinâmica obtido a partir da Equação (3.46), para qualquer regime de escoamento e pela Equação (3.47) para o regime de Stokes;

G é um factor geométrico calculado pelas Equações (3.48) a (3.56).

$$n = 1 - \left[1 - \frac{(39,4 \cdot D_c)^{0,14}}{2,5} \right] \cdot \left[\frac{T_f + 273,15}{293,15} \right]^{0,3} \quad (3.45)$$

$$\tau_i = \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_p \cdot d_{pi}^2}{\mu_f \cdot C_{DS} \cdot Re_p} \quad (3.46)$$

$$\tau_i = \frac{\rho_p \cdot d_{pi}^2}{18 \cdot \mu_f} \quad (3.47)$$

$$G = \frac{8 \cdot K_c}{K_a^2 \cdot K_b^2} \quad (3.48)$$

$$K_a = \frac{A_c}{D_c} \quad (3.49)$$

$$K_b = \frac{B_c}{D_c} \quad (3.50)$$

$$K_c = \begin{cases} \frac{(2 \cdot V_S + V_H)}{(2 \cdot D_c^3)}, & l \leq (H_c - S) \\ \frac{(2 \cdot V_S + V_{cn})}{(2 \cdot D_c^3)}, & l > (H_c - S) \end{cases} \quad (3.51)$$

$$l = 2,3 \cdot D_e \cdot \left(\frac{D_c^2}{A_c \cdot B_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.52)$$

$$V_S = \frac{\pi \cdot \left(S - \frac{A_c}{2} \right) \cdot (D_c^2 - D_e^2)}{4} \quad (3.53)$$

$$V_H = \left(\frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \right) \cdot (L_c - S) + \left(\frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{Z_c}{3} \right) \cdot \left(1 + \frac{D_x}{D_c} + \frac{D_x^2}{D_c^2} \right) - \left(\frac{\pi \cdot D_e^2}{4} \right) \cdot (H_c - S) \quad (3.54)$$

$$V_{cn} = \left(\frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \right) \cdot (L_c - S) + \left(\frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{l + S - L_c}{3} \right) \cdot \left(1 + \frac{D_n}{D_c} + \frac{D_n^2}{D_c^2} \right) - \left(\frac{\pi \cdot D_e^2 \cdot l}{4} \right) \quad (3.55)$$

$$D_n = D_c - (D_c - D_x) \cdot \left[\frac{(S + l - L_c)}{Z_c} \right] \quad (3.56)$$

3.1.6 Dietz

O modelo de Dietz (1981) representa um aperfeiçoamento do modelo desenvolvido por Leith e Licht. Este método divide o ciclone em três zonas:

1. Região de entrada, o espaço anelar em torno da conduta de saída do fluido;
2. Região descendente, correspondente ao vórtice abaixo do nível da conduta de saída do fluido;
3. Região do núcleo, formada pelo prolongamento da conduta de saída até ao fim do ciclone.

É considerada a existência de turbulência, que permite produzir um perfil uniforme e radial de concentração de partículas não separadas em cada região. Para aproximar a distribuição temporal de permanência de sólidos no ciclone, o modelo tem em conta a troca de partículas entre as regiões de escoamento descendente e o núcleo (Dirgo e Leith, 1985).

A Figura 3.4 ilustra as regiões consideradas no Modelo de Dietz e na Figura 3.5 ilustra-se a geometria modificada utilizada para a análise.

O cálculo do rendimento é feito a partir da Equação (3.57).

$$\eta_i = 1 - \frac{c_3(z=0)_i}{c_0} \quad (3.57)$$

onde,

c_0 é a concentração de partículas à entrada do ciclone, calculada a partir da Equação (3.58);

c_3 é a concentração de partículas na região 3, no início da conduta de saída (Figura 3.5), obtida pelas Equações (3.59) a (3.67).

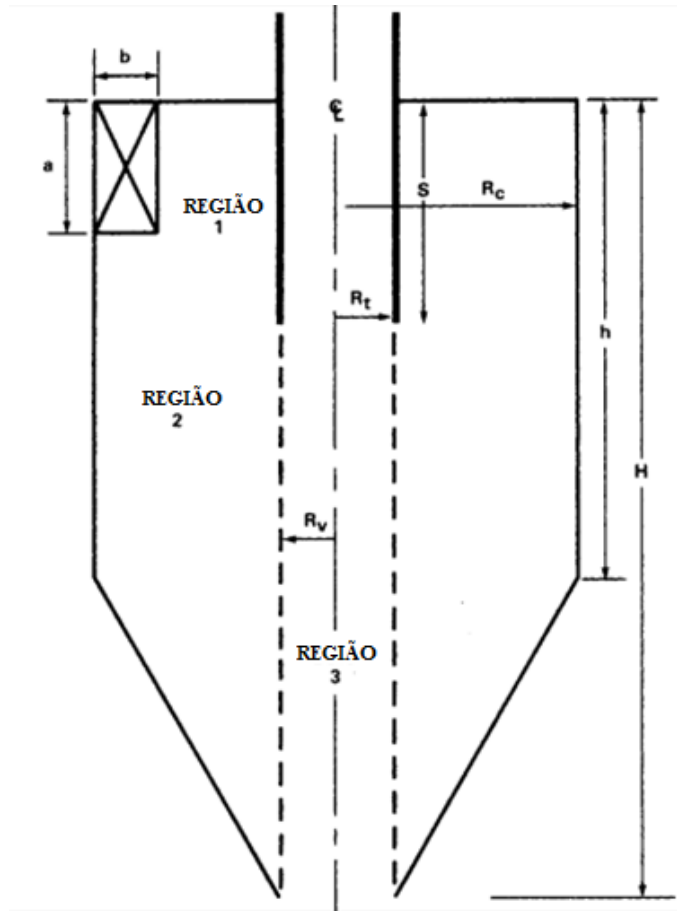


Figura 3.4 - Regiões consideradas no Modelo de Dietz (1981).
Na notação deste documento: $a = A_c$; $b = B_c$; $R_v = R_e$; $H = H_c$; $h = L_c$.

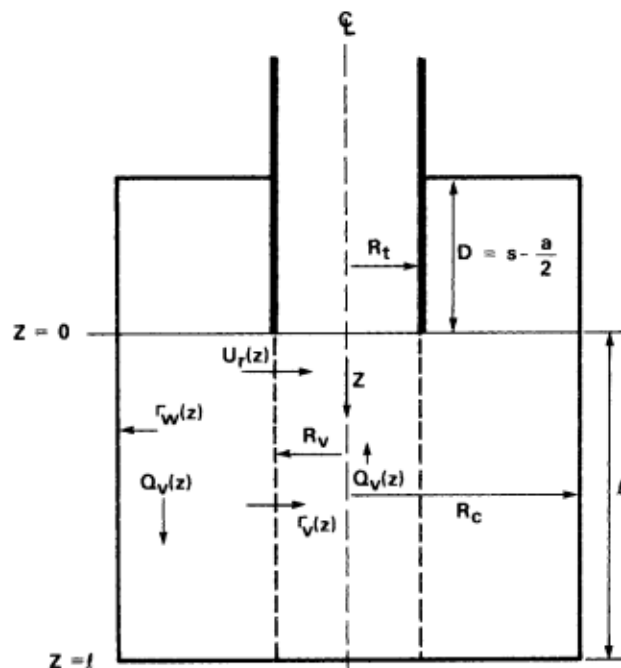


Figura 3.5 - Geometria do ciclone modificada para análise do modelo (Dietz, 1981).
Na notação deste documento: $Q_v = \dot{V}$; $R_v = R_t = R_e$; $U_r = v_r$.

$$c_0 = \frac{\dot{m}_p}{\dot{V}} = \theta \cdot \frac{\dot{m}_f}{\dot{V}} \quad (3.58)$$

$$c_3(z=0)_i = c_1(z=0)_i \cdot \left[\frac{A_i - \beta_i}{C_i} \right] \quad (3.59)$$

$$A_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_c \cdot l \cdot U_{pp}(z=0)_i}{\dot{V}} \quad (3.60)$$

$$C_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot l \cdot U_{pv}(z=0)_i}{\dot{V}} \quad (3.61)$$

$$\beta_i = \frac{1}{2} \cdot [A_i - 1 - C_i] + \frac{1}{2} \cdot [(C_i - A_i - 1)^2 + 4 \cdot A_i \cdot C_i]^{\frac{1}{2}} \quad (3.62)$$

$$c_1(z=0)_i = c_0 \cdot \exp \left[\frac{-2 \cdot \pi \cdot R_c \cdot U_{pp}(z=0)_i \cdot \left(S - \frac{A_c}{2} \right)}{\dot{V}} \right] \quad (3.63)$$

$$U_{pp}(z=0)_i = \frac{2 \cdot \rho_p \cdot \left(\frac{d_{pi}}{2} \right)^2 \cdot v_{\theta p}(z=0)^2}{9 \cdot \mu_f \cdot R_c} \quad (3.64)$$

$$U_{pv}(z=0)_i = \frac{2 \cdot \rho_p \cdot \left(\frac{d_{pi}}{2} \right)^2 \cdot v_{\theta v}(z=0)^2}{9 \cdot \mu_f \cdot R_c} \quad (3.65)$$

$$v_{\theta p}(z=0) = v_{\theta p} \cdot \left(\frac{R_c}{R_e} \right)^n \quad (3.66)$$

$$v_{\theta v}(z=0) = v_{\theta v} \cdot \left(\frac{R_c}{R_e} \right)^n \quad (3.67)$$

e,

$v_{\theta p}$ é obtido a partir da Equação (3.29);

n é calculado a partir da Equação (3.45);

c_1 é a concentração das partículas na região 1;

U_{pp} é a velocidade das partículas junto da parede do ciclone;

U_{pv} é a velocidade das partículas junto da conduta do vórtice, conduta de saída do fluido;

$v_{\theta v}$ é a componente tangencial da velocidade do fluido junto da conduta do vórtice, conduta de saída do fluido.

3.1.7 Mothes e Löffler

O modelo de Mothes e Löffler (1988), à semelhança do modelo de Dietz (1981) pode considerar-se um modelo híbrido, já que ambos combinam os métodos de dimensionamento de órbita de equilíbrio com o tempo de voo. No entanto, apesar de ambos os modelos apresentarem respostas bastante razoáveis, o tratamento da permuta da partícula entre o interior e o exterior do vórtice no modelo de Dietz apresenta-se com algumas dificuldades (Clift et al., 1991). Desta forma, Mothes e Löffler desenvolveram modelo de dimensionamento em que, tal como o de Dietz, divide o ciclone em regiões fundamentais, no entanto acrescentando mais uma para contornar as referidas dificuldades. Na Figura 3.6 apresentam-se as regiões consideradas no modelo, assim como a geometria simplificada do ciclone para a sua respectiva análise.

O cálculo do rendimento é, portanto, feito de acordo com a Equação (3.68).

$$\eta_i = 1 - \frac{c_4(S)}{c_0} \quad (3.68)$$

onde,

c_0 é calculado pela Equação (3.58);

$c_4(S)$ é a concentração de partículas na região 4 na entrada da conduta de saída do fluido, obtida a partir da Equação (3.69).

$$c_4(S) = R_1 \cdot \left(\frac{m_1 - A}{B} \right) + R_2 \cdot \left(\frac{m_2 - A}{B} \right) \quad (3.69)$$

enquanto,

R_1 e R_2 são as constantes da solução geral das equações diferenciais do balanço mássico no ciclone que, no caso de não existir reentrada de partículas na região inferior do ciclone (3) são dadas pela Equação (3.70);

m_1 e m_2 são expoentes no sistema de equações diferenciais do balanço mássico nas regiões 2 e 3 obtidos a partir da Equação (3.71);

A e B são constantes do problema calculadas pelas Equações (3.75) a (3.82).

$$\begin{cases} R_1 = c_1(S) \\ R_2 = 0 \end{cases} \quad (3.70)$$

$$m_{1,2} = \frac{A + D}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A + D}{2} \right)^2 - (A \cdot D - B \cdot C)} \quad (3.71)$$

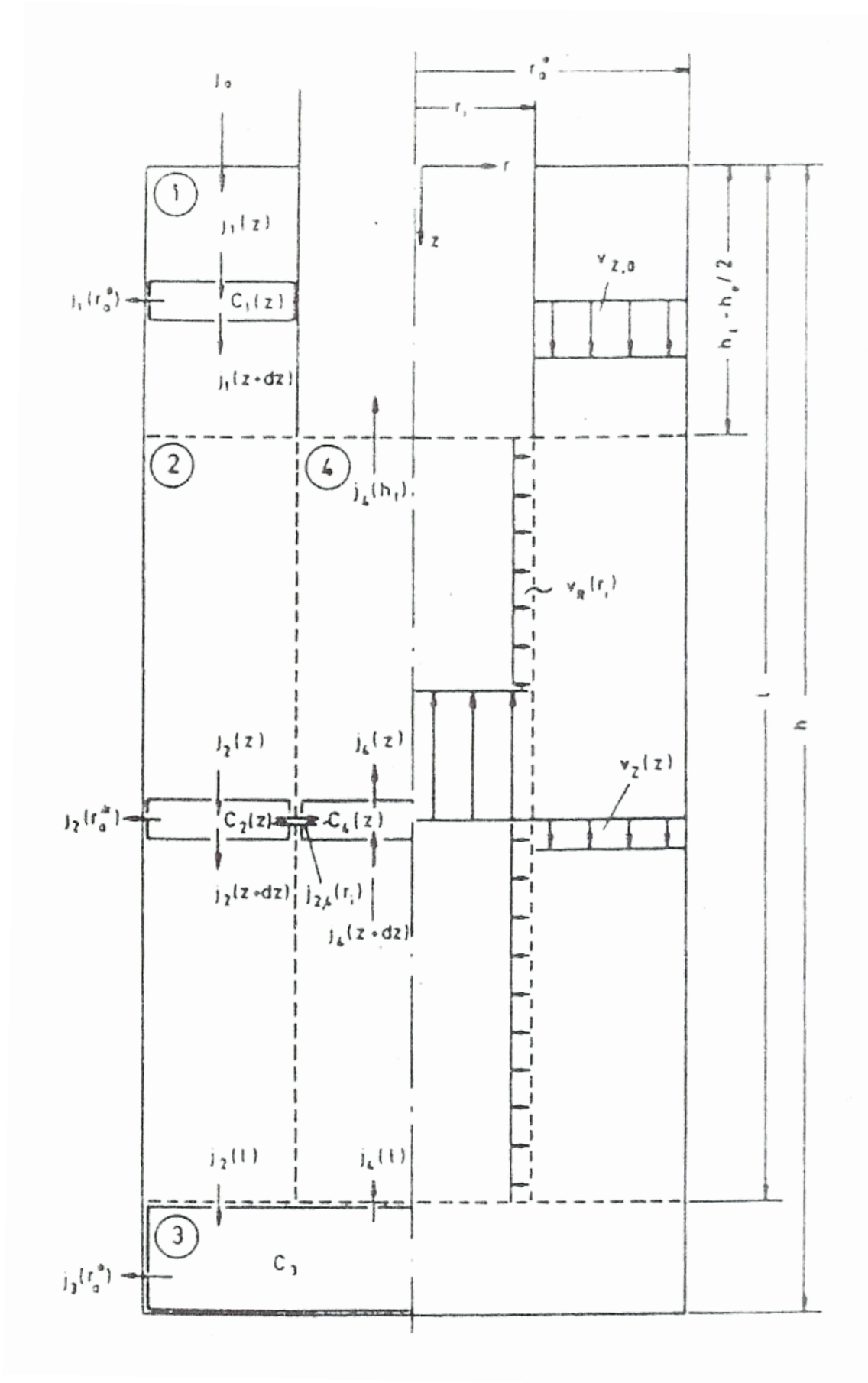


Figura 3.6 - Geometria do ciclone modificada para análise do modelo e respectivas regiões (Mothes e Löffler, 1988). Na notação deste documento: $r_a = R_c$; $r_a^* = R_c^*$; $r_i = R_e$.

Para se calcular as constantes A , B , C e D é necessário conhecer a velocidade de deposição das partículas nas paredes confinadoras do ciclone, $W(R_c^*)$ e junto à parede do tubo de saída do fluido, $W(R_e)$, assim como as respectivas componentes radiais da velocidade do fluido. Tais velocidades podem ser obtidas a partir das Equações (3.72), (3.73) e (3.74).

$$\begin{cases} v_r(R_c) = 0 \\ v_r(R_e) = \frac{\dot{V}}{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot (H_c - L_c)} \end{cases} \quad (3.72)$$

$$W(R_c^*)_i = \frac{\rho_p \cdot d_{pi}^2 \cdot v_\theta(R_c^*)^2}{18 \cdot \mu_f \cdot R_c^*} \quad (3.73)$$

$$W(R_e)_i = \frac{\rho_p \cdot d_{pi}^2 \cdot v_\theta(R_e)^2}{18 \cdot \mu_f \cdot R_e} \quad (3.74)$$

Se $W(R_e)_i \leq v_r(R_e)$

$$A = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_c^* \cdot W(R_c^*) \cdot Z_c}{\dot{V}} - \frac{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot [W(R_e) - v_r(R_e)] \cdot Z_c}{\dot{V}} + \frac{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot D_p \cdot Z_c}{\dot{V} \cdot (R_c^* - R_e)} - 1 \quad (3.75)$$

$$B = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot D_p \cdot Z_c}{\dot{V} \cdot (R_c^* - R_e)} \quad (3.76)$$

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot D_p \cdot Z_c}{\dot{V} \cdot (R_c^* - R_e)} - \frac{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot [W(R_e) - v_r(R_e)] \cdot Z_c}{\dot{V}} \quad (3.77)$$

$$D = B - 1 \quad (3.78)$$

Se $W(R_e)_i > v_r(R_e)$

$$A = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_c^* \cdot W(R_c^*) \cdot Z_c}{\dot{V}} + \frac{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot D_p \cdot Z_c}{\dot{V} \cdot (R_c^* - R_e)} - 1 \quad (3.79)$$

$$B = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot D_p \cdot Z_c}{\dot{V} \cdot (R_c^* - R_e)} - \frac{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot [W(R_e) - v_r(R_e)] \cdot Z_c}{\dot{V}} \quad (3.80)$$

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot D_p \cdot Z_c}{\dot{V} \cdot (R_c^* - R_e)} \quad (3.81)$$

$$D = B - 1 \quad (3.82)$$

onde,

D_p é a difusividade das partículas;

R_c^* é o raio equivalente, correspondente à simplificação da geometria do ciclone (Figura 3.6), de forma não afectar a componente radial da velocidade do fluido. É definido pela Equação (3.83);

$Vol_{ciclone}$ é o volume do ciclone real, dado pela Equação (3.84).

$$R_c^* = \sqrt{\frac{Vol_{ciclone}}{\pi \cdot H_c}} \quad (3.83)$$

$$Vol_{ciclone} = \pi \cdot R_c^2 \cdot L_c + \frac{\pi \cdot Z_c}{3} \cdot (R_c^2 + R_c \cdot R_x + R_x^2) \quad (3.84)$$

As componentes tangenciais da velocidade do fluido junto ao vórtice, $v_\theta(R_e)$ e junto da parede do ciclone de raio equivalente, $v_\theta(R_c^*)$ podem ser calculadas pelas Equações (3.85) a (3.94).

$$v_\theta(R_e) = \frac{v_{\theta p}}{\frac{R_e}{R_c} \cdot \left[1 + \phi \cdot \left(1 - \frac{R_e}{R_c}\right)\right]} \quad (3.85)$$

$$v_\theta(R_c^*) = \frac{v_{\theta p}}{\frac{R_c^*}{R_c} \cdot \left[1 + \phi \cdot \left(1 - \frac{R_c^*}{R_c}\right)\right]} \quad (3.86)$$

$$\phi = \frac{v_{\theta p}}{v_{zm}} \cdot \left(\xi_D + \frac{\xi_K}{\sin \varphi}\right) \quad (3.87)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{R_c - R_x}{Z_c}\right) \quad (3.88)$$

$$0,0065 \leq \xi_D = \xi_K = \xi_C = \xi \leq 0,0075 \quad (3.89)$$

$$v_{zm} = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot R_c^2} \quad (3.90)$$

$$v_{\theta p} = \frac{v_{zm}}{\xi \cdot H_z^*} \cdot \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \xi \cdot H_z^* \cdot \frac{v_{\theta p}^*}{v_{zm}} - \frac{1}{2}} \right] \quad (3.91)$$

$$H_z^* = \frac{A_c}{R_c} \cdot \left[\frac{2 \cdot \pi - \cos^{-1} \left(\frac{B_c}{R_c} - 1 \right)}{2 \cdot \pi} - 1 \right] + \frac{L_c}{R_c} \quad (3.92)$$

$$v_{\theta p}^* = \frac{v_{zm} \cdot \pi \cdot R_c^2}{A_c \cdot B_c \cdot \beta^*} \quad (3.93)$$

$$\beta^* = -0,204 \cdot \frac{B_c}{R_c} + 0,889 \quad (3.94)$$

onde,

ϕ é o factor de perda de carga de momento angular que caracteriza a troca de momento entre a aprede e a corrente gasosa;

φ é o ângulo que as paredes do ciclone na zona cónica fazem com o eixo deste;

ξ é o coeficiente de atrito global do ciclone;

ξ_C é o coeficiente de atrito relativo à entrada do ciclone;

ξ_D é o coeficiente de atrito na parte cilíndrica do ciclone;

ξ_K é o coeficiente de atrito na parte cónica do ciclone;

v_{zm} é a componente axial média da velocidade do fluido no corpo do ciclone;

$v_{\theta p}^*$ é a componente tangencial da velocidade junto à parede do ciclone no caso de não existir atrito;

H_z^* é um parâmetro geométrico do ciclone;

β^* é um parâmetro geométrico relativo à entrada do ciclone.

3.1.8 Iozia e Leith

O modelo de Iozia e Leith (1989, 1990) utiliza como base o modelo de Barth, propondo novas equações para o cálculo do diâmetro e do comprimento do eixo central do ciclone, da componente tangencial máxima da velocidade do fluido e da dependência destas variáveis com as dimensões do separador (Charisiou et al., 2011). O cálculo do rendimento por via deste modelo é feito recorrendo-se à Equação (3.95) e o diâmetro de corte a partir da Equação (3.96).

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_{pi}} \right)^m} \quad (3.95)$$

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu_f \cdot \dot{V}}{\pi \cdot \rho_p \cdot L^* \cdot v_{\theta máx}^2}} \quad (3.96)$$

onde,

$v_{\theta máx}$ é a componente tangencial máxima da velocidade do fluido, calculada pela Equação (3.97);

m é o expoente na Equação (3.95), encontrado experimentalmente e estabelecida uma regressão a partir de d_{50} e as dimensões do ciclone, descrita pela Equação (3.98);

L^* é altura do eixo central (núcleo) do ciclone, calculada a partir das Equações (3.99) e (3.100).

$$v_{\theta máx} = 6,1 \cdot v_c \cdot \left(\frac{A_c \cdot B_c}{D_c^2} \right)^{0,61} \cdot \left(\frac{D_e}{D_c} \right)^{-0,74} \cdot \left(\frac{H_c}{D_c} \right)^{-0,33} \quad (3.97)$$

$$n = \exp \left\{ 0,62 - 0,87 \cdot \ln(d_{50} \cdot 10^2) + 5,21 \cdot \ln \left(\frac{A_c \cdot B_c}{D_c^2} \right) + 1,05 \cdot \left[\ln \left(\frac{A_c \cdot B_c}{D_c^2} \right) \right]^2 \right\} \quad (3.98)$$

$$L^* = \begin{cases} H_c - S, & D_{núcleo} \leq D_x \\ (H_c - S) - \left(\frac{Z_c}{\frac{D_c}{D_x} - 1} \right) \cdot \left(\frac{D_{núcleo}}{D_x} - 1 \right), & D_{núcleo} > D_x \end{cases} \quad (3.99)$$

$$D_{núcleo} = 0,47 \cdot D_c \cdot \left(\frac{A_c \cdot B_c}{D_c^2} \right)^{-0,26} \cdot \left(\frac{D_e}{D_c} \right)^{1,4} \quad (3.100)$$

3.1.9 Li e Wang

Li e Wang (1989) desenvolveram um novo modelo analítico que descreve a interação das partículas no interior de ciclones, desprezando a difusividade turbulenta através do fluido no ciclone, assim como a velocidade de deposição das partículas na direção axial, z . Já a difusividade turbulenta das partículas e o re-arrastamento destas pelas paredes do ciclone foram tomadas em conta (Kuo e Tsai, 2001). O rendimento calcula-se de acordo com a Equação (3.101).

$$\eta_i = 1 - \exp(-\lambda_i \cdot \omega) \quad (3.101)$$

onde,

ω é a coordenada angular definida pela Equação (3.102);

λ é um valor característico que relaciona as dimensões do ciclone, as componentes tangencial e radial da velocidade do fluido, o tamanho das partículas e a difusividade turbulenta destas. É calculado recorrendo-se às Equações (3.104) a (3.108).

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot (S + l)}{A_c} \quad (3.102)$$

O parâmetro l é obtido através da Equação (3.52). Caso se verifique a condição $l > H_c$, deverá aplicar-se a Equação (3.103).

$$l = H_c - S \quad (3.103)$$

$$\lambda_i = \frac{(1 - \alpha) \cdot K_i \cdot v_r(R_c)_i}{D_{rp} \cdot R_c^n} \quad (3.104)$$

sendo α e n obtidos a partir das Equações (3.13) e (3.45), respectivamente. D_{rp} obtém-se da equação seguinte,

$$D_{rp} = 0,052 \cdot R_{in} \cdot v_{\theta p} \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (3.105)$$

onde $f = 0,02$ (Li e Wang, 1989) e R_{in} é obtido a partir da Equação (3.31).

$$v_{\theta p} = \frac{(1 - n) \cdot \dot{V}}{B_c \cdot (R_c^{1-n} - R_e^{1-n}) \cdot R_c^n} \quad (3.106)$$

$$v_r(R_c)_i = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot v_{\theta p}^2 \cdot d_{pi}^2}{18 \cdot \mu_f \cdot R_c} \quad (3.107)$$

$$K_i = \frac{(1 - n) \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d_{pi}^2 \cdot \dot{V}}{18 \cdot \mu_f \cdot B_c \cdot (R_c^{1-n} - R_e^{1-n})} \quad (3.108)$$

3.2 Perda de carga

O segundo parâmetro fundamental no dimensionamento de separadores ciclônicos é a perda de carga. O procedimento comum na avaliação da perda de carga em processos industriais consiste na medição da pressão estática numa conduta a montante a jusante de um escoamento. No entanto, tal exercício torna-se complicado quando aplicado a ciclones, dada a turbulência existente no fluido à saída do separador.

De uma forma geral, a perda de carga num separador ciclónico representa a diferença de pressão estática entre a entrada e a saída, que pode ser descrita pela Equação (3.109) (Chen e Shi, 2007).

$$\Delta p = P_{se} - P_{ss} \quad (3.109)$$

onde, P_{se} e P_{ss} representam respectivamente as pressões estáticas à entrada e à saída do ciclone.

No entanto, o turbilhão faz com que a pressão estática na parede seja mais elevada que a média na secção transversal do ciclone e, para além disso, surge o problema de se armazenar pressão dinâmica durante o movimento em espiral (Hoffmann e Stein, 2008). Desta forma, dada complexidade do escoamento, a quantificação da perda de carga por via analítica torna-se impraticável, pelo que muitos dos procedimentos adoptados baseiam-se em relações empíricas, sem que se possa aceitar uma única expressão geral. No entanto, é aconselhável garantir-se uma estimativa do valor da perda de carga o mais precisa possível, para que se consigam avaliar

convenientemente os custos de funcionamento nas instalações de separação ciclónica. A experiência recomenda que não se excedam os 250 mmH₂O, ainda que este valor já obrigue a um gasto de energia significativamente elevado (Pinho, 2005).

De uma forma mais corrente, verifica-se que a perda de carga no interior de um ciclone é dada pela Equação (3.110) (Janeiro Borges e Galvão Teles, 1983).

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_c^2 \quad (3.110)$$

ξ é um coeficiente de perda de carga que depende de Re , θ e $\frac{\Delta V}{V}$. No entanto, em aplicações industriais de aerociclones, visto que o número de Reynolds é suficientemente elevado e o caudal de fugas desprezável quando comparado com o total, ξ é praticamente unicamente dependente do factor de carga (Janeiro Borges e Galvão Teles, 1983).

Seguidamente serão abordados alguns dos modelos mais comuns adoptados no cálculo da perda de carga em separadores ciclónicos.

3.2.1 Miller e Lissman

$$\Delta p = \xi_{MILLER} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_c^2 \quad (3.111)$$

$$\xi_{MILLER} = 2,2 \cdot \left(\frac{D_c}{D_e}\right)^2 + 1 \quad (3.112)$$

3.2.2 Shepherd e Lapple

A par com o modelo de Miller e Lissman, o modelo de Shepherd e Lapple (1939) produz bons resultados quando aplicada a ciclones com as proporções referidas na Figura 2.8.

$$\Delta p = \xi_{LAPPLE} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_c^2 \quad (3.113)$$

$$\xi_{LAPPLE} = 16 \cdot \frac{A_c \cdot B_c}{D_c^2} \quad (3.114)$$

3.2.3 Casal e Martinez-Bennet

$$\Delta p = \xi_{CASAL} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_c^2 \quad (3.115)$$

$$\xi_{CASAL} = 3,33 + 11,3 \cdot \left(\frac{A_c \cdot B_c}{D_e^2}\right)^2 \quad (3.116)$$

3.2.4 Ramachandran et al

O modelo de Ramachandran, et al. (1991) foi desenvolvido através de uma análise estatística de valores de perda de carga em 98 configurações de separadores ciclónicos. O método apresenta resultados, quando comparados com os dados experimentais, mais fiáveis que os modelos de Shepherd e Lapple (1939) e Barth.

$$\Delta p = \xi_{RAMACHANDRAN} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_c^2 \quad (3.117)$$

$$\xi_{RAMACHANDRAN} = 20 \cdot \left(\frac{A_c \cdot B_c}{D_e^2} \right) \cdot \left(\frac{\frac{S}{D_c}}{\frac{H_c}{D_c} \cdot \frac{L_c}{D_c} \cdot \frac{D_x}{D_c}} \right)^{1/3} \quad (3.118)$$

3.2.5 Stairmand

Stairmand calculou a distribuição de velocidades no ciclone a partir de um balanço do momento angular estimando, de seguida, a perda de carga como uma combinação entre as perdas na entrada e na saída e a pressão estática no turbilhão. Stairmand afirmou ainda que, na prática, apenas uma pequena parte da queda da pressão estática da parte exterior do vórtice para o interior consegue ser recuperada, o que pode ser contabilizada como totalmente perdida (Hoffmann e Stein, 2008).

$$\Delta p = \xi_{STAIRMAND} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_c^2 \quad (3.119)$$

$$\xi_{STAIRMAND} = 1 + 2 \cdot q^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot (D_c - B_c)}{D_e} - 1 \right) + 2 \cdot \left(\frac{4 \cdot A_c \cdot B_c}{\pi \cdot D_e^2} \right)^2 \quad (3.120)$$

$$q = \frac{- \left(\frac{D_e}{2 \cdot (D_c - B_c)} \right)^{0,5} + \left(\frac{D_e}{2 \cdot (D_c - B_c)} + \frac{4 \cdot A_R \cdot G}{A_c \cdot B_c} \right)^{0,5}}{\left(\frac{2 \cdot A_R \cdot G}{A_c \cdot B_c} \right)} \quad (3.121)$$

Nas equações anteriores A_R é calculada a partir da Equação (3.28) e G é um factor de perda de carga relacionado com a fricção na parede do ciclone e definido pela Equação (3.122).

$$G = \frac{f}{2} = 0,005 \quad (3.122)$$

3.2.6 Barth

Barth estimou a perda de carga como a soma de duas contribuições distintas:

- Corpo do ciclone;
- Vórtice.

Barth constatou que as perdas de carga na entrada poderiam ser evitadas através do dimensionamento. Estimou ainda a perda de carga no corpo do ciclone como a diminuição da pressão dinâmica ao longo da superfície imaginária formada pela parede da conduta de escape do fluido até ao fundo do separador [Figura 3.1(a)], ou seja, considerou a diminuição da pressão total como consequência da perda de velocidade do turbilhão nesta superfície de atrito imaginária (Hoffmann e Stein, 2008).

$$\Delta p = \Delta p_{\text{corpo}} + \Delta p_{\text{vórtice}} \quad (3.123)$$

$$\Delta p_{\text{corpo}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_e^2 \cdot \left(\frac{D_e}{D_c} \right) \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{v_e}{v_\theta(R_e)} - \frac{H_c - S}{R_e} \cdot f \right)^2} - \left(\frac{v_\theta(R_e)}{v_e} \right)^2 \right] \quad (3.124)$$

$$\Delta p_{\text{vórtice}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_e^2 \cdot \left(\frac{v_\theta(R_e)}{v_e} \right)^2 + k \cdot \left(\frac{v_\theta(R_e)}{v_e} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (3.125)$$

Os parâmetros v_e e $v_\theta(R_e)$ são calculados pelas Equações (3.12) e (3.27), respectivamente enquanto f é obtido a partir da Equação (3.126). Já k é um parâmetro empírico que assume o valor de 3,41 no caso das bordas do vórtice serem arredondadas e 4,4 no caso de serem em aresta viva (Hoffmann e Stein, 2008). No presente trabalho considerou-se o pior caso e, como tal, adotou-se o valor 4,4.

$$f = 0,005 \cdot (1 + 3 \cdot \sqrt{c_0}) \quad (3.126)$$

3.2.7 Muschelknautz

De acordo com o modelo de Muschelknautz, a perda de carga num ciclone ocorre principalmente devido ao atrito nas paredes e às irreversibilidades no núcleo do vórtice, sendo que o último é, muitas das vezes, determinante na perda de carga global (Hoffmann e Stein, 2008). Desta forma, o cálculo da perda de carga segundo este modelo divide-se em duas parcelas, uma relativa ao corpo do ciclone e outra relativa ao vórtice.

$$\Delta p = \Delta p_{\text{corpo}} + \Delta p_{\text{vórtice}} \quad (3.127)$$

$$\Delta p_{\text{corpo}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot \frac{f \cdot A_R}{\dot{V}} \cdot [v_{\theta p} \cdot v_\theta(R_e)]^{1,5} \quad (3.128)$$

$$\Delta p_{v\acute{o}rtice} = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_e^2 \cdot \left[2 + \left(\frac{v_{\theta}(R_e)}{v_e} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{v_{\theta}(R_e)}{v_e} \right)^{\frac{4}{3}} \right] \quad (3.129)$$

v_e , $v_{\theta}(R_e)$, $v_{\theta p}$, A_R e f são calculados respectivamente a partir das Equações (3.12), (3.27), (3.29), (3.28) e (3.35).

3.2.8 Aproximação por zonas

À semelhança dos modelos de Barth e Muschelknautz, decompondo a contribuição da perda de carga no ciclone em três parcelas distintas, pode chegar-se a uma aproximação de natureza empírica que permite calcular a perda de carga total (Pinho, 2005).

A primeira parcela contabiliza, desta forma, a perda de carga na entrada do ciclone e é dada pela Equação (3.130).

$$\Delta p_{entrada} = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_{\theta p}^2 \quad (3.130)$$

A segunda parcela contabiliza a perda de carga no corpo cilíndrico central do ciclone e pode ser calculada pela Equação (3.131).

$$\Delta p_{v\acute{o}rtice} = \rho_f \cdot v_{\theta p}^2 \cdot \left(\frac{D_c}{D_e} - 1 \right) \quad (3.131)$$

Finalmente, a terceira parcela contabiliza a perda de carga referente à saída do fluido e pode ser obtida a partir da Equação (3.132).

$$\Delta p_{saída} = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_e^2 \quad (3.132)$$

A velocidade v_e é calculada pela Equação (3.12). Admitindo que $v_{\theta p} \approx v_c$, a soma das três parcelas resulta na Equação (3.133).

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot \left[v_c^2 \cdot \left(2 \cdot \frac{D_c}{D_e} - 1 \right) + v_e^2 \right] \quad (3.133)$$

4 Apresentação do programa

4.1 Introdução

De forma a se aplicar os modelos numéricos explorados na secção anterior, foi desenvolvido um programa de dimensionamento de separadores ciclónicos. A ferramenta informática usada para o desenvolvimento do programa, por decisão do autor, foi o MATLAB. O MATLAB (*Matrix Laboratory*) é uma linguagem de programação de quarta geração, permitindo operações entre matrizes, o traçado de funções e de dados, a implementação de algoritmos, a criação de interfaces gráficas de usuário e interfaces com programas escritos em códigos diferentes, como C, C++, C#, Java, Fortran e Phyton (Wikipedia, sem data).

Quando iniciado, o MATLAB exhibe duas janelas fundamentais ao desenvolvimento de qualquer programa: uma janela de comando (*Command Window*) e uma janela gráfica (*Graphic Window*) (Hunt et al., 2001).

Na janela de comando, o MATLAB permite a criação de ficheiros de código designados M-código (ou *M-file*), sendo estes a estrutura base do programa desenvolvido neste projecto. Para que a utilização do programa se tornasse facilitada por parte do utilizador, foram desenvolvidas interfaces gráficas simples e apelativas, evitando que este consiga efectuar o pretendido sem ter contacto com a linguagem de programação.

4.2 Construção do programa

Com o MATLAB é possível criar uma interface gráfica de usuário (*GUI*) recorrendo-se à ferramenta *GUIDE – Gui Builder*. Esta interface consiste numa janela de figura preenchida com botões, menus, texto ou gráficos que permite que o utilizador manipule interactivamente através do rato e do teclado. Existem duas etapas principais na criação de um *GUI*: projectar a disposição do programa e escrever as funções de retorno de chamada que executam as operações desejadas (Hunt et al., 2001).

Recorrendo-se a esta ferramenta (Figura 4.1) foi concebido o programa “CICLONES”.

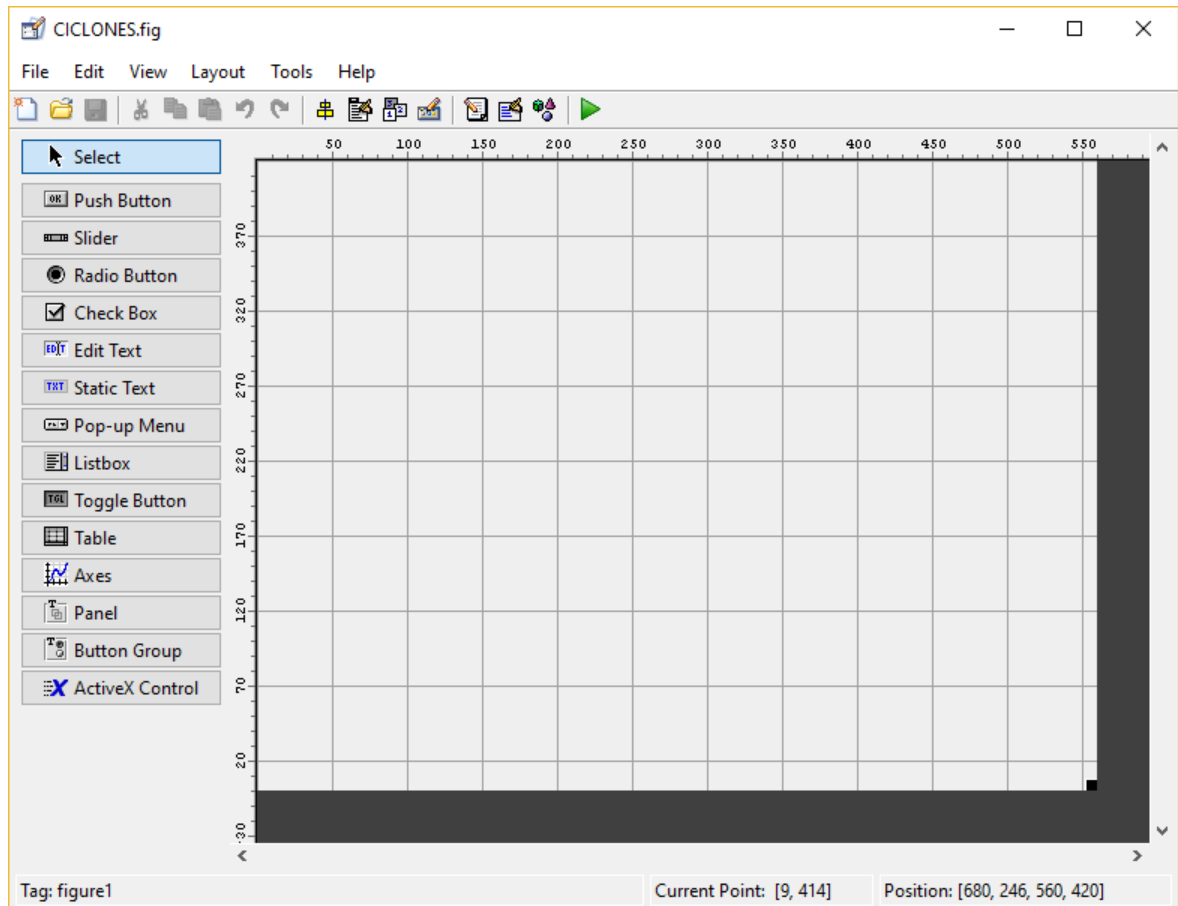


Figura 4.1 – GUI Builder inicial.

4.3 Funcionamento do programa

4.3.1 Parâmetros de entrada

Se o utilizador tiver o MATLAB instalado no seu computador, basta clicar no executável (ficheiro “CICLONE”) para abrir a interface principal. Caso contrário, é necessário descarregar e instalar um compilador (ficheiro “MCRInstaller”). Após a sua instalação o programa estará pronto a funcionar. É recomendável a leitura prévia do ficheiro “Leia-me CICLONES” presente na pasta do programa. A Figura 4.2 apresenta a interface gráfica de utilização.

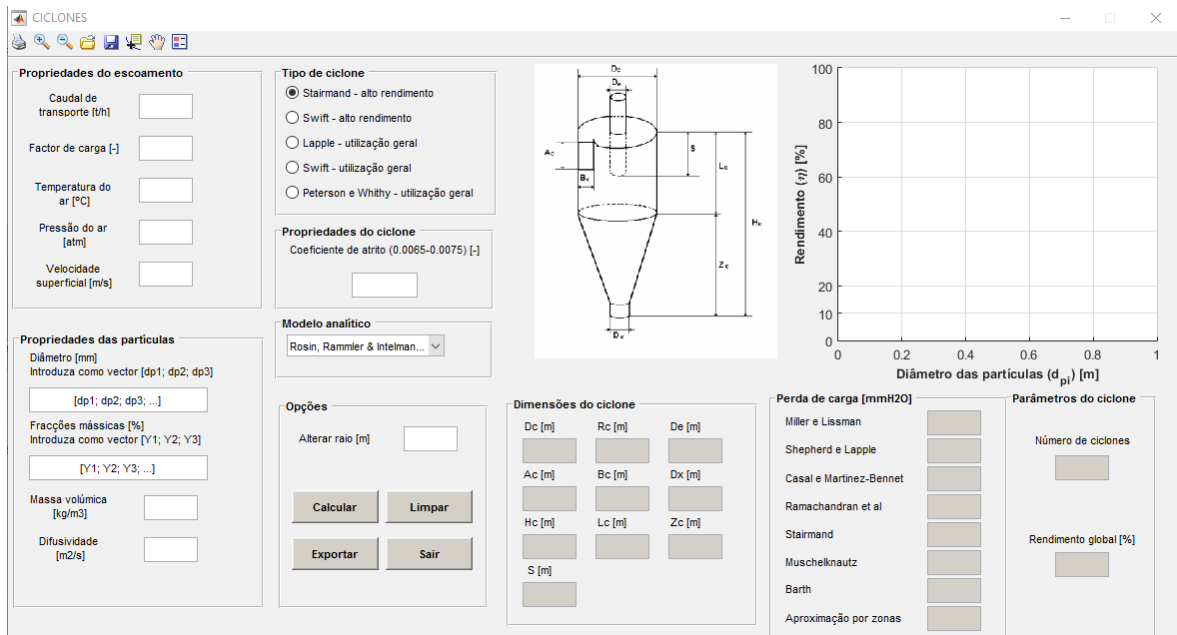


Figura 4.2 - Interface gráfica final do programa.

No lado esquerdo da janela apresentam-se os painéis de introdução dos dados onde o utilizador terá de preencher as seguintes categorias:

- Propriedades do escoamento:
 - Caudal de ar de transporte [t/h];
 - Factor de carga [-];
 - Temperatura do ar [°C];
 - Pressão do ar [atm];
 - Velocidade superficial [m/s];
- Propriedades das partículas:
 - Diâmetro [mm];
 - Fracções mássicas [%];
 - Massa volúmica [kg/m³];
 - Difusividade [m²/s];
- Propriedades do ciclone:
 - Coeficiente de atrito [-] – valores recomendados: [0.0065; 0.0075].

Todos estes campos são de preenchimento obrigatório para o código funcionar. Caso se verifique algum campo por preencher, o programa devolverá um erro ao utilizador a pedir para introduzir os valores em falta, conforme se ilustra na Figura 4.3.

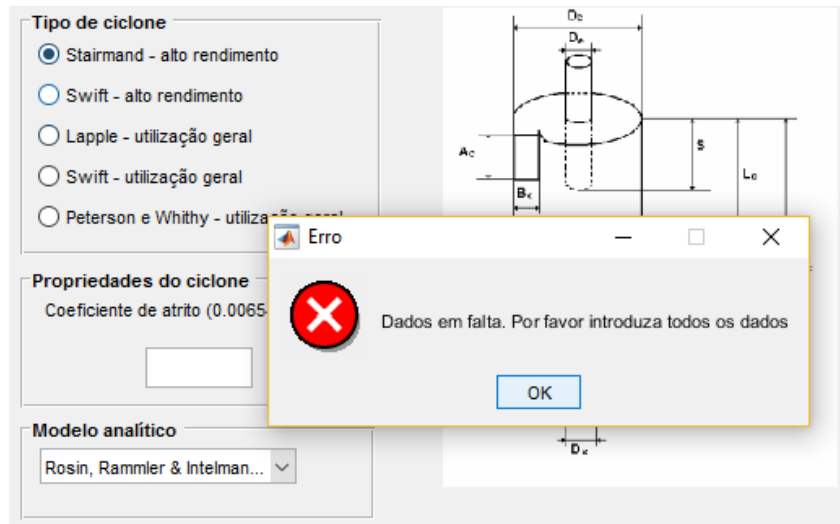


Figura 4.3 – Mensagem de erro – Dados em falta.

O preenchimento dos diâmetros das partículas e das suas respectivas fracções mássicas terá de ser introduzido em forma de vector, conforme indicado nas instruções iniciais do programa (Figura 4.4).

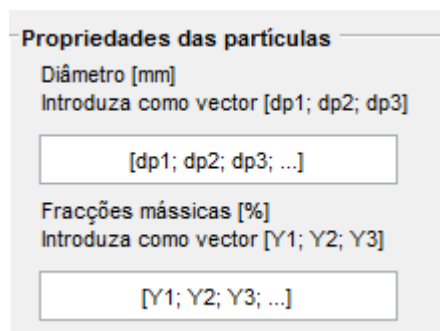


Figura 4.4 - Instruções de introdução de dados - diâmetro e fracções mássicas.

O programa efectua a verificação da conformidade entre os dados introduzidos e as indicações iniciais, devolvendo mensagens de erro respectivas caso existam inconsistências, conforme ilustrado na Figura 4.5. O programa verifica ainda se as percentagens mássicas perfazem 100% e se os dois vectores têm a mesma dimensão (Figura 4.6 e Figura 4.7).

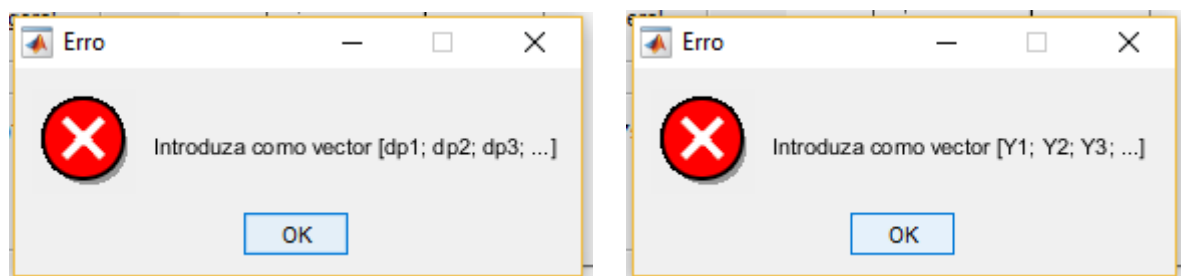


Figura 4.5 - Mensagem de erro – Dados não introduzidos como vector.

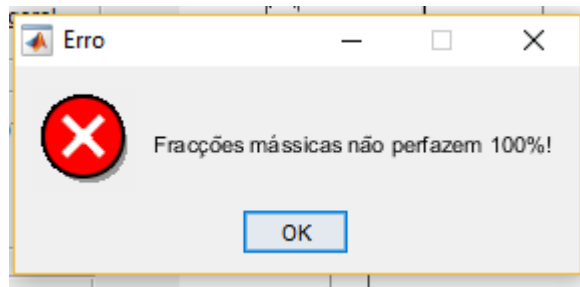


Figura 4.6 - Mensagem de erro - Fracções mássicas não perfazem 100%.

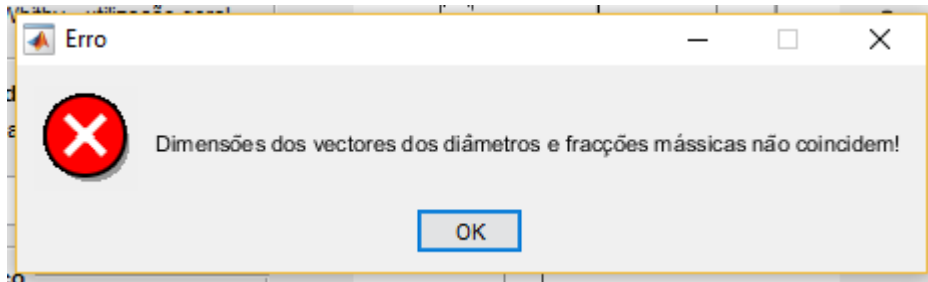


Figura 4.7 - Mensagem de erro - Dimensões dos vectores não coincidem.

Para que se evitem erros durante a utilização, caso ocorra alguma falha na introdução dos dados (como a introdução de um carácter alfabético), o programa analisa os valores introduzidos nas caixas de texto e, caso algum não seja numérico, devolve a mensagem de erro ilustrado na Figura 4.8.

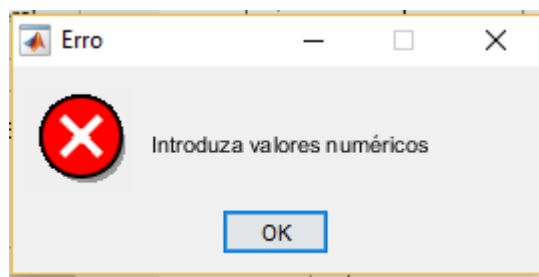


Figura 4.8 - Mensagem de erro - Valores introduzidos não são números.

No painel “Tipo de ciclone” o utilizador tem a possibilidade de escolher as dimensões desejadas de acordo com os tamanhos convencionais dos ciclones tipo, apresentados na Tabela 2.2. No painel “Modelo analítico” o utilizador escolhe o tipo modelo de cálculo para o rendimento que pretende utilizar, de acordo com as definições apresentadas na Secção 3.1. Só poderá utilizar um dos modelos disponíveis por cada operação. A Figura 4.9 apresenta o menu de selecção do modelo de cálculo.

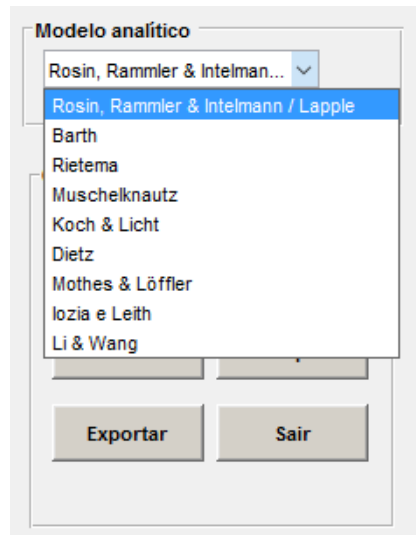


Figura 4.9 - Escolha do modelo analítico.

No painel “Opções” verifica-se a existência de uma janela de introdução de dados com a opção “Alterar raio [m]” onde o utilizador deverá introduzir o valor do raio do ciclone desejado. Por defeito, caso este campo se encontre vazio, o programa pré-dimensiona o raio do ciclone a partir da Equação (2.16), limitando-o a um valor máximo de 0,5 m. Por outro lado, se o utilizador definir o raio do ciclone para um valor à sua escolha, o programa adoptará o valor introduzido na janela correspondente e prosseguirá com o restante dimensionamento. Desta forma, esta janela de introdução de dados é a única que poderá encontrar-se vazia, não obstante que caso seja preenchida, deverá conter valores numéricos sob pena de se incorrer no erro apresentado na Figura 4.8.

Neste painel existem ainda quatro botões com as opções “Calcular”, “Limpar”, “Exportar” e “Sair”. A opção “Calcular” inicia o cálculo do programa e, caso existam, despoleta os erros apresentados anteriormente. O botão “Limpar” apaga todos os dados introduzidos e/ou calculados, devolvendo ao utilizador a janela de interface inicial. A opção “Exportar” permite ao utilizador a criação de um ficheiro *Excel* com os valores dos diâmetros das partículas, d_{pi} e correspondentes rendimentos, η_i (exporta os valores do gráfico apresentado no canto superior direito). O separador decimal no MATLAB é o ponto, o que implica que após a exportação, dependendo do separador decimal adoptado no *Excel* do utilizador, possa haver necessidade de se converter o ponto em vírgula ou em ponto e vírgula. Por fim, a opção “Sair”, naturalmente encerrará o programa.

4.3.2 Parâmetros de saída

Do lado direito da janela de interface principal aparecem os campos que fornecem ao utilizador os parâmetros de saída. Na parte superior observa-se a legenda do ciclone de acordo com a Figura 2.10 e um gráfico logarítmico que aparecerá preenchido com os valores dos diâmetros das partículas fornecidos, d_{pi} e os correspondentes rendimentos parciais, η_i obtidos de acordo com o modelo analítico selecionado. Conforme já referido, os valores deste gráfico poderão ser exportados para um ficheiro *Excel* a partir da opção “Exportar”. Na parte inferior verifica-se a existência de 3 painéis:

- “Dimensões do ciclone” – são apresentadas as dimensões do ciclone de acordo com o tipo de ciclone escolhido e as relações apresentadas na Tabela 2.2;
- “Perda de carga [mmH₂O]” – são devolvidos os valores da perda de carga por ciclone calculados de acordo com as expressões apresentadas na secção 3.2 do presente trabalho;

- “Parâmetros do ciclone” – o programa devolve o número de ciclones necessários, de acordo com as condições iniciais e com a Equação (4.1) e o rendimento global, η calculado de acordo com o modelo analítico seleccionado.

$$N = \frac{2 \cdot \dot{V}}{v_c \cdot R_c^2} \quad (4.1)$$

Para além destes parâmetros de saída o programa verifica ainda se ocorre recolecção de partículas, verificando se o cálculo feito a partir da Equação (2.18) ultrapassa 1,36. Desta forma, caso se verifique a recolecção de partículas, o programa devolve o aviso ilustrado na Figura 4.10 e, apenas após se confirmar a leitura desta mensagem pressionando “OK” é que o cálculo é continuado e os resultados apresentados.

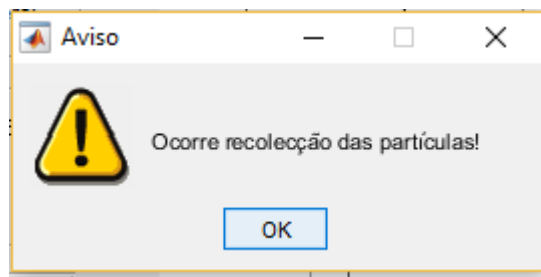


Figura 4.10 - Mensagem de aviso - Ocorre recolecção de partículas.

Desta forma, o utilizador continua a ter a possibilidade de verificar o cálculo, ainda que ocorra recolecção de partículas no escoamento. A Figura 4.11 ilustra a janela final do programa após um dimensionamento de separadores ciclónicos.

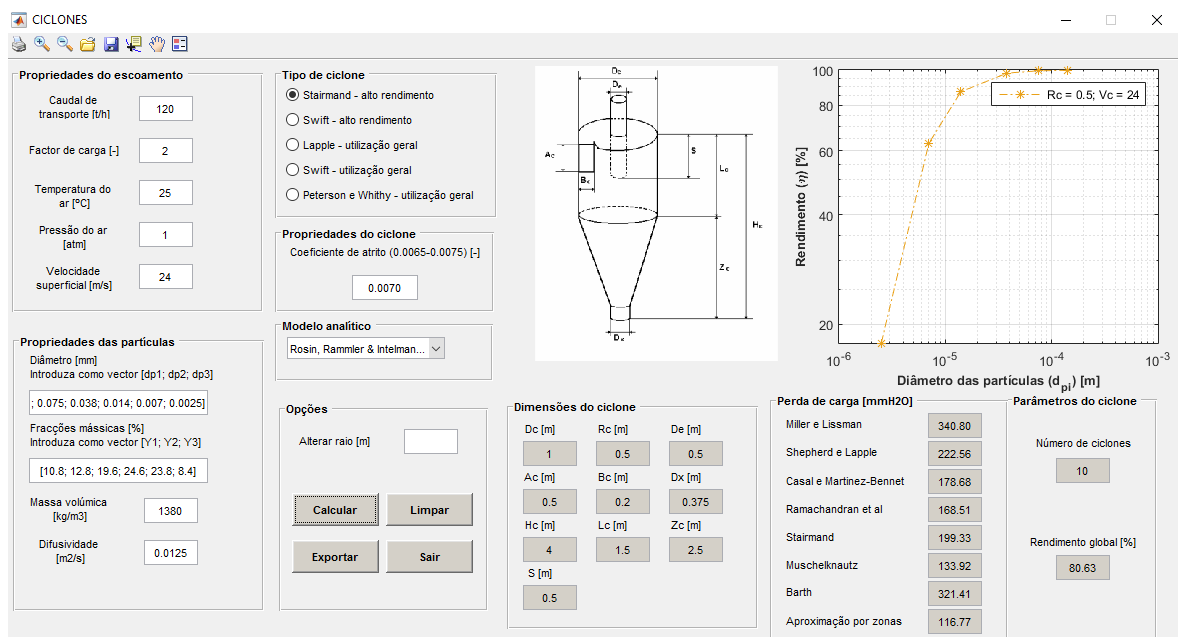


Figura 4.11 - Janela principal após dimensionamento do ciclone.

4.3.3 Fluxograma de funcionamento

A Figura 4.12 ilustra o funcionamento do algoritmo do programa através de um fluxograma de funcionamento do mesmo.

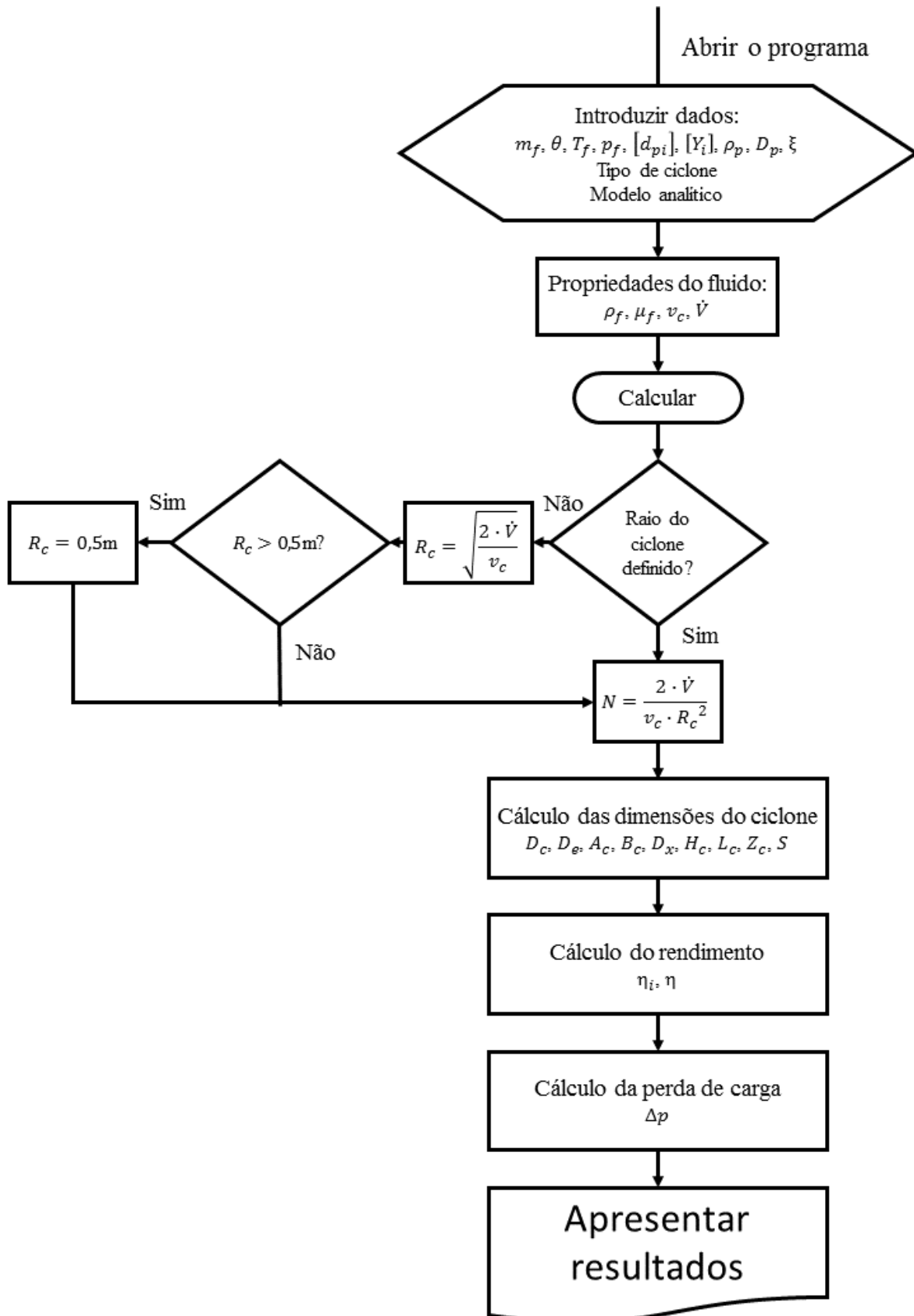


Figura 4.12 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo.

5 Exemplos de cálculo

No presente capítulo foi feito o dimensionamento de separadores ciclónicos para cada modelo analítico, com o objectivo de melhor se compreender as diferenças entre eles. Foram simuladas três situações distintas.

5.1 Dados

Como referido foram considerados 3 casos. Do primeiro para o segundo caso fez-se variar a velocidade de entrada do fluido no separador ciclónico, U_f e do segundo para o terceiro caso aumentaram-se os diâmetros das partículas, d_{pi} .

Foi então considerada uma instalação de transporte pneumático de carvão pulverizado com os seguintes dados:

Tabela 5.1 - Propriedades do escoamento, das partículas e do ciclone – casos 1, 2 e 3

Caso	1	2	3
Velocidade superficial, U_f [m/s]	15	30	30
Caudal de ar de transporte, \dot{m}_f [t/h]	150		
Factor de carga, θ	2		
Temperatura do ar, T_f [°C]	25		
Pressão do ar, p_f [atm]	1		
Massa volúmica das partículas, ρ_p [kg/m ³]	1400		
Difusividade das partículas, D_p	0,0125		
Coefficiente de atrito, ξ	0,007		
Raio do ciclone, R_c [m]	0,2		

Na selecção das fracções mássicas considerou-se que estas seguiram uma distribuição normal (gaussiana) limitada pelos valores considerados em cada caso. Nas tabelas seguintes apresentam-se os respectivos valores.

Tabela 5.2 - Distribuição de tamanhos das partículas transportadas e frações mássicas – casos 1 e 2

Diâmetro das partículas, d_{pi} [mm]	Fracções mássicas, Y_i [%]
0,001	5
0,002	7
0,003	10
0,004	13
0,005	15
0,006	15
0,007	13
0,008	10
0,009	7
0,010	5

Tabela 5.3 - Distribuição de tamanhos das partículas transportadas e frações mássicas – caso 3

Diâmetro das partículas, d_{pi} [mm]	Fracções mássicas, Y_i [%]
0,001	1
0,002	2
0,003	3
0,004	4
0,005	5
0,006	6
0,007	6
0,008	7
0,009	7
0,010	9
0,011	9
0,012	7
0,013	7
0,014	6
0,015	6
0,016	5
0,017	4
0,018	3
0,019	2
0,020	1

Em todos os casos foi considerado um separador ciclônico do tipo *Stairmand* – alto rendimento.

5.2 Resultados

Os resultados obtidos apresentam-se nas Figuras seguintes de forma gráfica. Observando os gráficos gerados, constata-se que a gama de resultados dos diferentes modelos é relativamente reduzida e com uma configuração semelhante à curva de valores experimentais ilustrada na Figura 3.2, ainda que se exponham três modelos de cada tipo de método de dimensionamento:

- Órbita de equilíbrio - Barth, Muschelknautz e Iozia e Leith;
- Tempo de voo - Rosin, Rammler e Intelmann / Lapple, Rietema e Koch e Licht;
- Híbridos - Dietz, Mothes e Löffler e Li e Wang.

Pode, desta forma, constatar-se que os resultados obtidos correspondem às previsões.

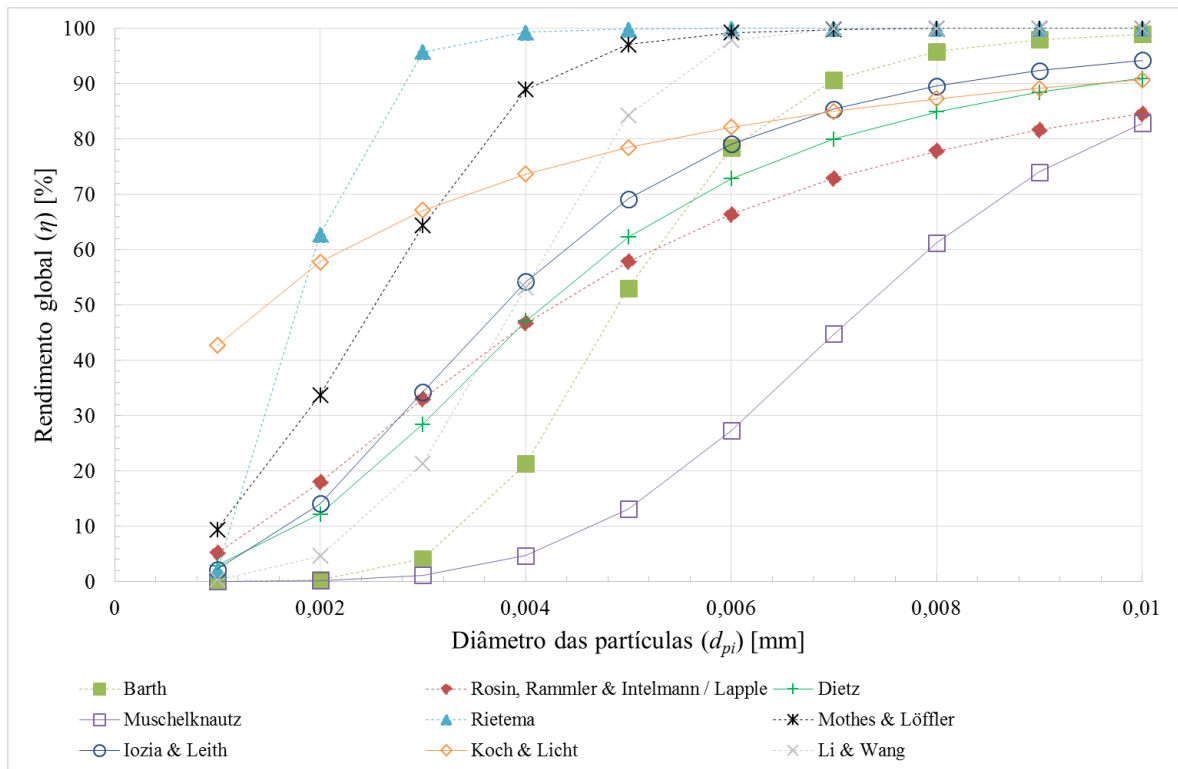
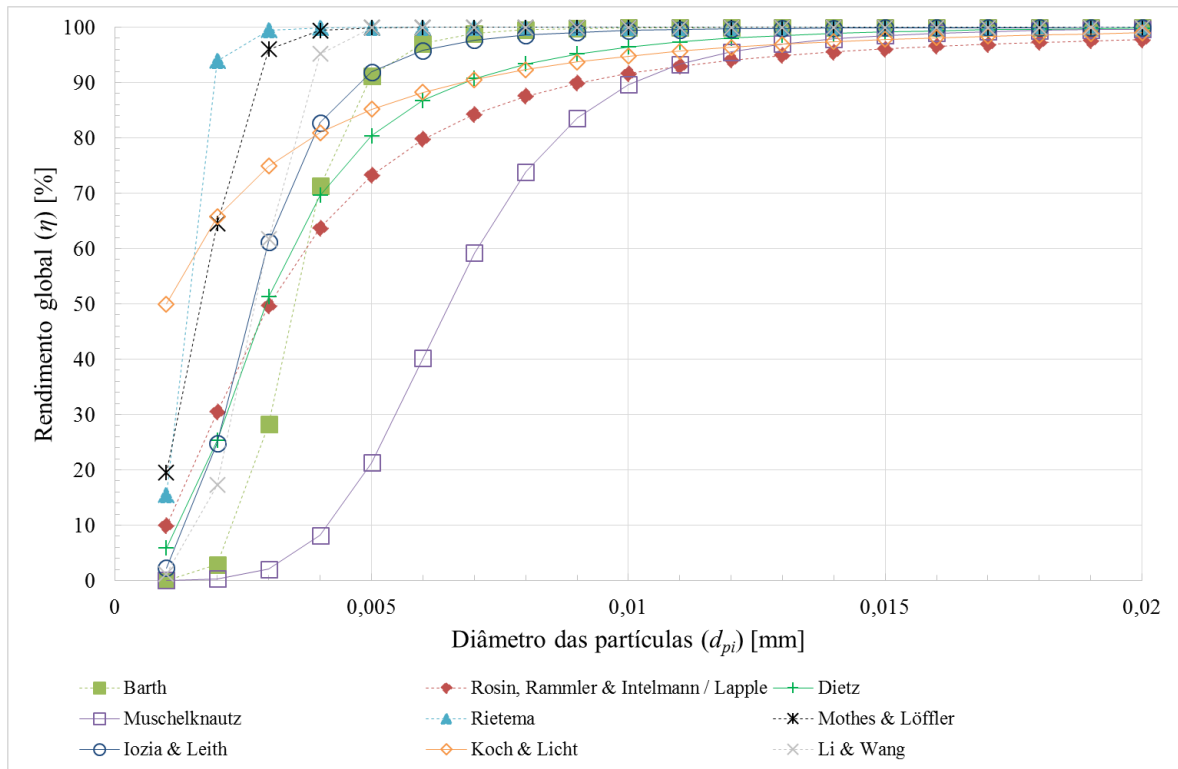
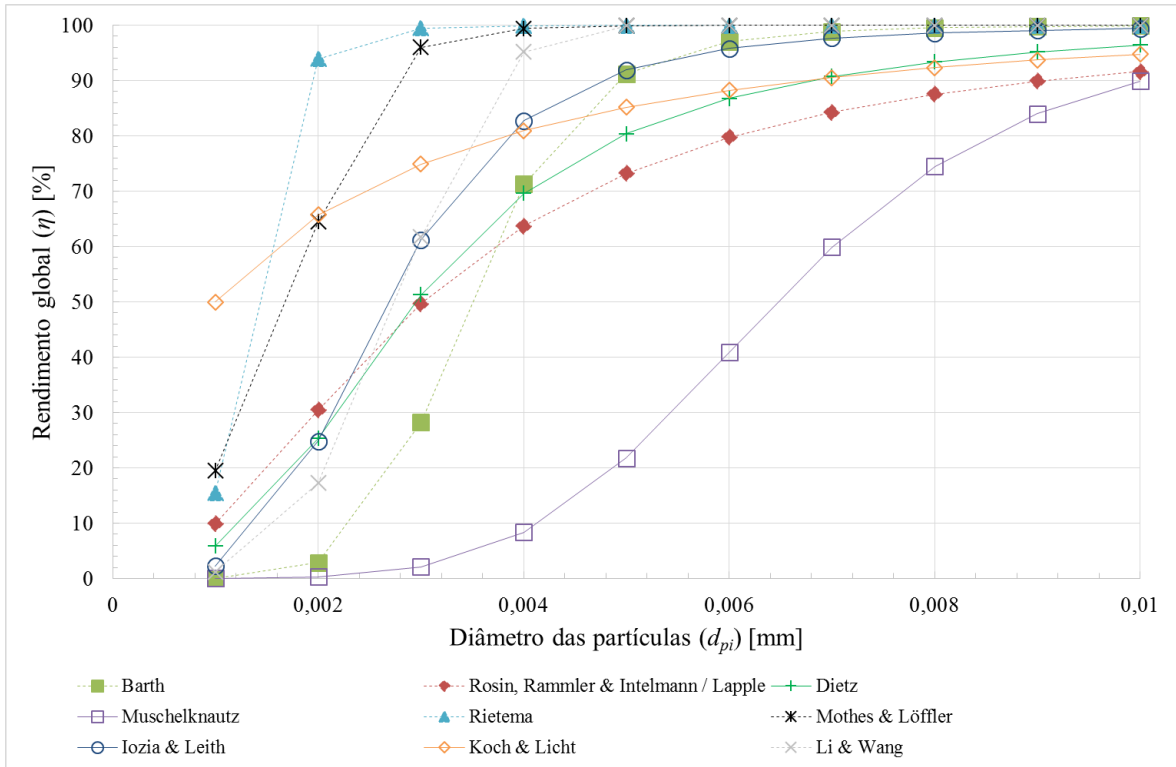


Figura 5.1 - Rendimento de separação - comparação entre modelos – caso 1
 $d_{pi} = [0,001; 0,010]$ mm; $v_c = 15$ m/s.



Conforme referido na Secção 2.3.3, para se maximizar o rendimento de separação, satisfazendo os critérios da saltitação, a velocidade de entrada do fluido no ciclone deverá andar entre os 15 e os 30 m/s. Nos casos 1 e 2 fez-se variar precisamente este parâmetro e, analisando a Figura 5.1 e a Figura 5.2 é perceptível o aumento do rendimento de separação com o aumento da velocidade do fluido, situação que se encontra em conformidade com a literatura.

Em todos os modelos, excepto no de Muschelknautz, se constata que para partículas abaixo dos 5 micrómetros o rendimento sofre uma queda drástica, pelo que se recorre muitas vezes a outro tipo de dispositivos de separação como os filtros de mangas, os lavadores e os precipitadores electrostáticos em aplicações com partículas de diâmetro abaixo destes valores (Pinho, 2005). No sentido inverso, o rendimento de separação de cada modelo aumenta com o aumento do diâmetro das partículas, conforme se observa comparando a Figura 5.2 com a Figura 5.3 e os resultados dos modelos convergem, garantindo todos eles um rendimento superior a 90% para partículas de diâmetros superiores a aproximadamente 13 micrómetros de diâmetro.

Em todos os casos analisados observa-se um decréscimo na curva do rendimento de separação calculado a partir do modelo de Muschelknautz. Conforme exposto na Secção 3.1.4, a literatura relativa a este modelo peca por falta de informação no que diz respeito ao cálculo do rendimento nos casos em que o factor de carga excede o crítico. Desta forma, foi adoptada uma curva genérica simples e bastante comum a diferentes modelos para que se conseguisse uma aproximação do rendimento de separação das partículas que não são recolhidas imediatamente à entrada do ciclone. Dadas as discrepâncias em relação aos outros modelos, recomenda-se precaução de cada vez que se utiliza este modelo.

Na ausência de resultados experimentais comparativos, a fiabilidade dos modelos não pode ser comprovada. No entanto, todos os cálculos seguiram os pressupostos teóricos apresentados no presente trabalho e existentes na literatura. De qualquer modo relembra-se que os modelos matemáticos foram desenvolvidos pelos seus diversos autores tendo como objectivo uma representação mais ou menos fidedigna de uma realidade física, sendo que aqui foram simplesmente utilizados para o desenvolvimento de um programa de dimensionamento de ciclones.

Nas tabelas seguintes apresentam os resultados obtidos para perda de carga nos três casos simulados.

Tabela 5.4 – Perda de carga – comparação entre modelos – caso 1

Perda de carga [mmH₂O]	
Miller e Lissman	133,12
Shepherd e Lapple	86,94
Casal e Martinez-Bennet	69,80
Ramachandran et al	65,82
Stairmand	77,86
Muschelknautz	58,99**
Barth	140,89
Aproximação por zonas	46,22

Tabela 5.5 - Perda de carga – comparação entre modelos – caso 2

Perda de carga [mmH₂O]	
Miller e Lissman	532,50
Shepherd e Lapple	347,75
Casal e Martinez-Bennet	279,18
Ramachandran et al	263,30
Stairmand	311,45
Muschelknautz	199,74**
Barth	563,56
Aproximação por zonas	184,80

Tabela 5.6 - Perda de carga – comparação entre modelos – caso 3

Perda de carga [mmH₂O]	
Miller e Lissman	532,50
Shepherd e Lapple	347,75
Casal e Martinez-Bennet	279,18
Ramachandran et al	263,30
Stairmand	311,45
Muschelknautz	194,63**
Barth	563,56
Aproximação por zonas	184,80

** Média dos valores da perda de carga obtidos pelos 9 modelos de rendimento.

Como no modelo de perda de carga de Muschelknautz o coeficiente de atrito, f depende do rendimento global do ciclone, conforme se verifica na Equação (3.35), o resultado apresentado para a perda de carga diz respeito à média dos valores obtidos com os 9 modelos do cálculo do rendimento (Rosin, Rammler e Intelmann / Lapple, Barth, Rietema, Muschelknautz, Koch e Licht, Dietz, Mothes e Löffler, Iozia e Leith e Li e Wang. Os resultados ilustram-se de forma gráfica na Figura 5.4.

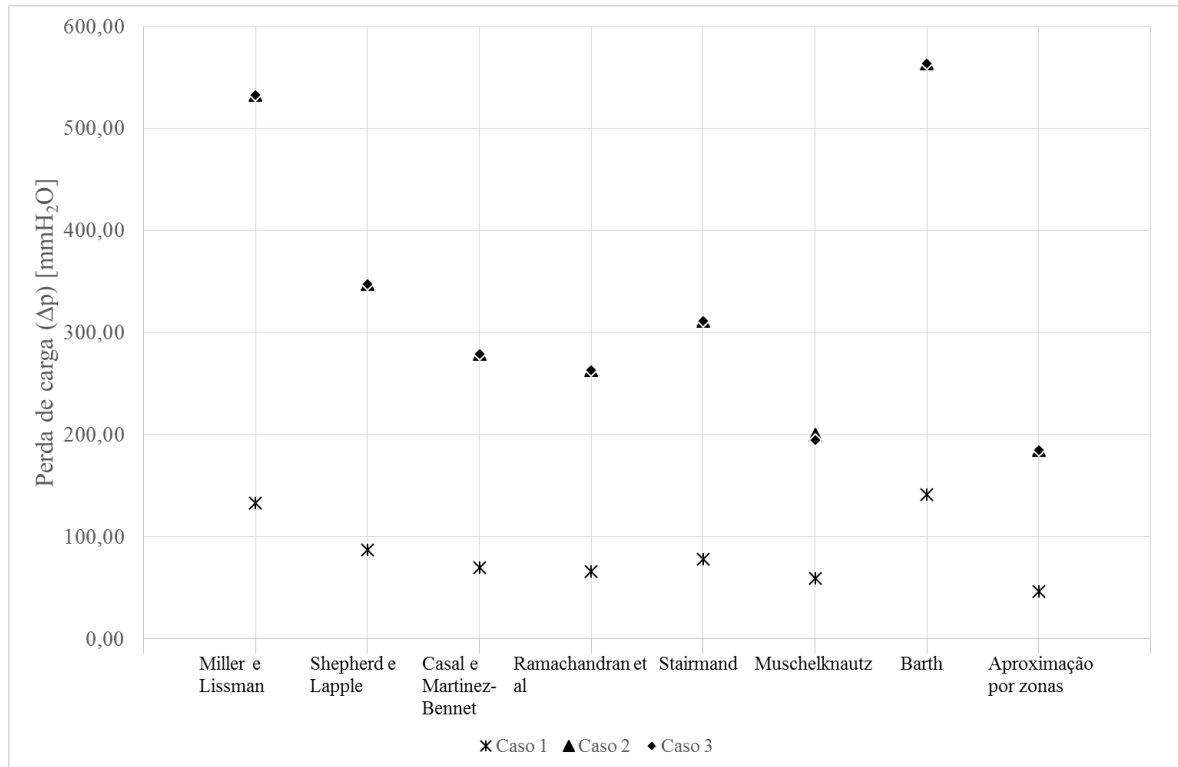


Figura 5.4 – Perda de carga – comparação de modelos

Conforme se verifica, os modelos apresentam valores na mesma ordem de grandeza, ainda que os modelos de Miller e Lissman e Barth devolvam resultados mais elevados que os restantes, especialmente nos casos 2 e 3. Em relação ao primeiro, relembra-se que se trata de uma correlação empírica, em que não se têm em consideração todos os factores intervenientes no processo. No que diz respeito ao modelo de Barth, Hoffmann e Stein (2008) também se registaram valores mais elevados para a perda de carga com este modelo. Ainda assim, recorda-se que neste projecto se considerou o pior caso, adoptando-se um valor de 4,4 para o parâmetro empírico k , conforme exposto no Capítulo 3.2.6, o que pode contribuir para um valor excessivo.

É evidente, através da análise dos resultados, a relação da perda de carga com o dobro da velocidade do ciclone, conforme evidenciado pela Equação (3.110). Assim, um aumento da velocidade de entrada do fluido no ciclone para o dobro provoca um aumento para o quádruplo da perda de carga no interior do ciclone. Conforme seria de esperar, os resultados entre os casos 2 e 3 são os mesmos, já que a disposição dos ciclones em paralelo não faz aumentar a perda de carga com o aumento do número de separadores. No entanto, existe uma ligeira diferença de valor da perda de carga entre os dois casos no modelo de Muschelknautz, que pode ser confirmada comparando o valor apresentado na Tabela 5.5 com o exibido na Tabela 5.6. Tal situação acontece por duas razões fundamentais:

1. O modelo de Muschelknautz é um processo iterativo e entra com o valor do rendimento global do separador ciclónico no cálculo do factor de perda de carga, conforme evidenciado na Equação (3.35);

2. O rendimento global do ciclone é condicionado pelas fracções mássicas de cada diâmetro de partículas, de acordo com a Equação (3.1).

6 Conclusões

O presente trabalho, desenvolvido num enquadramento de necessidade colaboração e constante melhoria do trabalho industrial, com o objectivo de se conceber um programa capaz de responder às necessidades dos projectistas de instalações de transporte pneumático e respectiva separação de partículas, constitui uma contribuição para o conhecimento das potencialidades dos separadores ciclónicos, do seu funcionamento, comportamento e desempenho. A importância do tema prende-se também com as dificuldades actuais no que diz respeito à selecção do modelo analítico de cálculo a utilizar em cada aplicação de separação ciclónica. Hoje em dia recorre-se a programas sofisticados, com um grau de detalhe e requisitos informáticos e computacionais de uma ordem de grandeza elevada, que tal esforço se reflecte no tempo e custos de investimento. É, portanto, num contexto académico, mas com premissas industriais, que se desenvolve o programa apresentado, evidenciando a importância da interacção entre os dois ambientes.

O principal objectivo deste trabalho consistiu no estudo do método de funcionamento de separadores ciclónicos e no desenvolvimento de um programa de dimensionamento dos mesmos.

Numa primeira fase, recorreu-se a um prévio estudo bibliográfico, que se mostrou indispensável para a criação e desenvolvimento do programa. A extensão de conteúdos, teorias, estudos, testes, aplicações e experiências práticas citadas na literatura mostrou-se um contributo fundamental para o progresso do programa desenvolvido e o apresentado neste relatório. Os recursos teóricos aqui usados são uma ínfima parte dos conceitos teóricos base existentes, mas os essenciais à compreensão do funcionamento do programa desenvolvido. É, portanto, imprescindível, o recurso à literatura existente na construção, aperfeiçoamento e manuseio de um programa deste género.

O programa desenvolvido apresenta-se como uma ferramenta capaz de facilmente e rapidamente pré dimensionar o número de ciclones, calcular as suas dimensões, o seu rendimento e a perda de carga, sem que seja necessário suporte informático de exigências elevadas em equipamento e tempo. Na base de funcionamento do programa, englobam-se os principais conceitos teóricos existentes na literatura sobre o dimensionamento e princípio de funcionamento de separadores ciclónicos. A base de programação da aplicação desenvolvida foi a ferramenta MATLAB, que se mostrou bastante acessível, de fácil utilização para o programador, com elevada capacidade de cálculo e um leque alargado de potencialidades programativas.

O programa de computador criado no presente trabalho apresenta uma interface gráfica, amigável ao utilizador, que possibilita apenas a introdução dos dados iniciais relativos às condições de entrada no separador ciclónico, devolvendo ao utilizador o número de ciclones necessários, as geometrias de cada um e os seus respectivos rendimentos de separação, assim como a análise da perda de carga através de outros métodos distintos, para que o utilizador tenha a possibilidade de adoptar o mais apropriado a cada caso. A apresentação dos resultados é simples e directa, com os valores a aparecerem na própria janela de dados, assim como a legenda das proporções do ciclone para auxílio ao utilizador. Os resultados do rendimento de separação apresentam-se

de forma gráfica e função dos diâmetros das partículas introduzidos, para que tal parâmetro se torne mais perceptível para o projectista. Existe ainda a possibilidade de exportar os resultados deste gráfico para um ficheiro Excel o que permite, posteriormente, uma análise mais detalhada e comparativa, conforme exemplificada na Secção 5.

Os resultados obtidos em três casos de estudo analisados não mostraram diferenças significativas nos resultados de oito modelos matemáticos utilizados no programa. No entanto, evidenciam-se discrepâncias quando se adopta o modelo de Muschelknautz nos escoamentos com factores de carga superiores aos críticos, dada a lacuna de informação da literatura no estudo da expressão a aplicar para o cálculo do rendimento nestes casos.

Os valores da perda de carga obtidos apresentam uma estimativa da mesma, não podendo ser tomados como definitivos, dada a complexidade do processo do escoamento no interior do ciclone e a impossibilidade da descrição da variação da perda de carga no interior deste através de um modelo analítico, conforme se explica na Secção 3.2. No entanto, tais valores apresentam-se na mesma ordem de grandeza e no caso de velocidade do fluido mais baixa, bastante aproximados. Evidencia-se ainda a dependência da perda de carga com a velocidade do escoamento, sendo perceptível que a primeira varia com o quadrado da segunda.

Em suma, o estudo dos pressupostos teóricos e dos princípios de funcionamento da Mecânica dos Fluidos, a compreensão da necessidade de evolução e melhoria constante das operações industriais e a criação, desenvolvimento e aplicação de sistemas informáticos simples, leves, directos e de baixos custos nestas consistem uma interacção e interajuda preponderante e fundamental entre os ambientes empresarial e académico fulcral e determinante no processo de aprendizagem constante e futuro numa área de elevada importância e significado no seio da Engenharia Mecânica.

7 Perspectivas e desenvolvimentos futuros

O trabalho desenvolvido até então é, naturalmente, apenas uma plataforma de lançamento a tratamentos muito mais sofisticados e elaborados no âmbito do dimensionamento de separadores ciclónicos. Sem se querer enveredar por estudos exaustivos, lentos, dispendiosos e pesados, como é o caso dos exercícios no campo da Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD), sugere-se que o programa desenvolvido no seguimento deste trabalho seja submetido a subsequente pesquisa bibliográfica, de forma a possibilitar a integração de ainda mais modelos analíticos de cálculo do rendimento de separação como da perda de carga do separador. No decorrer do trabalho não foram abordados modelos como o de Macintyre (1990), Chen e Shi (2007) ou Tan (2008), entre outros, cuja inserção no programa de dimensionamento seria interessante e uma mais-valia para o mesmo.

Sugere-se ainda a possibilidade de alargamento do leque de opções no que diz respeito às proporções do ciclone. Sem se descurar das medidas convencionais, seria de especial interesse analisar o efeito de cada dimensão na prestação do separador. Para isso, a possibilidade de introdução das medidas do separador ciclónico de forma independente e autónomo por parte do utilizador possibilitaria novos casos de estudo e, porventura, optimizações de rendimentos de separação e perdas de carga.

Abraçando um ponto de vista da engenharia, o estudo e implementação de um cálculo de custos associados ao separador ciclónico e modelo escolhidos, dadas as condições de entrada seria uma medida atraente e a desenvolver, já que permitiria ao projectista um dimensionamento mais eficaz e menos dispendioso.

Finalmente é de referir que sem aplicação prática, o trabalho desenvolvido até então terá pouco impacto nas operações industriais e no mundo empresarial, restringindo-se a um mero exercício académico. É portanto de especial interesse a possibilidade de validar os resultados dos modelos inseridos no programa, através de uma comparação com ensaios experimentais, culminando na implementação do programa em instalações de transporte pneumático que recorram a mecanismos de separação ciclónica.

Referências

- Altmeyer, S., Mathieu, V., Jullemier, S., Contal, P., Midoux, N., Rode, S. e Leclerc, J.-P. 2004. «Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software». *Chemical Engineering and Processing* 43: 511–522.
- Charisiou, N. D., Tsevrenis, G. J. e Goula, M. A. 2011. «Software development for the design of control equipment for particulate pollutants». Em *12th International Conference on Environment Science and Technology*, 295–302. Rhodes, Grécia.
- Chen, Ji. e Shi, M. 2007. «A universal model to calculate cyclone pressure drop». *Powder Technology* 171 (3): 184–191.
- Clift, R., Ghadiri, M. e Hoffman, A. C. 1991. «A critique of two models for cyclone performance». *AIChE Journal* 37 (2): 285–289.
- Cortés, C. e Gil, A. 2007. «Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators». *Progress in Energy and Combustion Science*.
- Dahl, H. D. e Muschelknautz, E. 1994. «Zyklone als Tropfenabscheider». *Chemie Ingenieur Technik* 66 (2): 223–29.
- Dietz, P. W. 1981. «Collection efficiency of cyclone separators». *AIChE Journal* 27 (6): 888–892.
- Dirgo, J. e Leith, D. 1985. «Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions». *Aerosol Science and Technology* 4 (4): 401–415.
- Elsayed, K. 2011. «Analysis and optimisation of cyclone separators geometry using RANS and LES methodologies». *Tese de Doutorado*.
- Gimbut, J., Choong, T. S. Y., Fakhru’l-Razi, A. e Chuah, T. G. 2004. «Prediction of the Effect of Dimension, Particle Density, Temperature, and Inlet Velocity on Cyclone Collection Efficiency». *Jurnal Teknologi* 40 (1): 37–50.
- Hoffmann, A. C. e Stein, L. E. 2008. *Gas Cyclones and Swirl Tubes. Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hunt, B. R., Lipsman, R. L. e Rosenberg, J. M. 2001. *A Guide to MATLAB for Beginners and Experienced Users*. Editado por Cambridge University Press.
- Iozia, D. L. e Leith, D. 1989. «Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern and Collection Efficiency». *Aerosol Science and Technology* 10 (3): 491–500.
- . 1990. «The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency». *Aerosol Science and Technology* 12 (3): 598–606.
- Janeiro Borges, A. R. e Galvão Teles, J. C. 1983. «Separação Ciclônica». *Boletim de Ciência e Tecnologia* 10: 24–34.
- Kay, J. M. e Nedderman, R. M. 1974. *An Introduction to Fluid Mechanics and Heat Transfer, 3rd edition*. Nova Iorque: Cambridge University Press.
- Klinzing, G.E., Rizk, F., Marcus, R. e Leung, L.S. 2010. *Pneumatic Conveying of Solids*. Vol.

8. Particle Technology Series. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Kuo, K. Y. e Tsai, C. J. 2001. «On the Theory of Particle Cutoff Diameter and Collection Efficiency of Cyclones». *Aerosol and Air Quality Research* 1 (1): 47–56.
- Leith, D. e Mehta, D. 1973. «Cyclone performance and design». *Atmospheric Environment* (1967) 7 (5): 527–549.
- Li, E. e Wang, Y. 1989. «A New Collection Theory of Cyclone Separators». *AIChE Journal* 35 (4): 666–669.
- Macintyre, A. J. 1990. *Ventilação Industrial e Controle da Poluição - 2ª edição*. Rio de Janeiro, Brasil: Editora Guanabara.
- Mills, D. 2004. *Pneumatic Conveying Design Guide. Pneumatic Conveying Design Guide*.
- Mothes, H e Löffler, F. 1988. «Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators.» *AMICHe International Chemical Engineering* 28: 231–240.
- Muschelknautz, E. 1972. «Die Berechnung von Zyklonabscheidern für Gase». *Chemie Ingenieur Technik* 44 (1–2): 63–71.
- Muschelknautz, E. e Brunner, K. 1967. «Untersuchungen an Zyklonen». *Chemie Ingenieur Technik* 39 (9–10): 531–538.
- Muschelknautz, E., Giersiepen, G. e Rink, N. 1970. «Strömungsvorgänge bei der Zerkleinerung in Strahlmühlen». *Chemie Ingenieur Technik* 42 (1): 6–15.
- Muschelknautz, E. e Krambrock, W. 1970. «Aerodynamische Beiwerte des Zyklonabscheiders aufgrund neuer und verbesserter Messungen». *Chemie Ingenieur Technik* 42 (5): 247–255.
- Perry, R. H. e Chilton, C. H. 1973. *Chemical Engineers' Handbook - Fifth Edition*. Mcgraw-Hill Book Company.
- Pinho, C. M. C. T. 2005. *Transporte Pneumático*. Porto: DEMEGI.
- Ramachandran, G., Leith, D., Dirgo, J. e Feldman, H. 1991. «Cyclone Optimization Based on a New Empirical Model for Pressure Drop». *Aerosol Science and Technology* 15 (2): 135–148.
- Shepherd, C. B. e Lapple, C. E. 1939. «Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors». *Industrial & Engineering Chemistry* 31 (8): 972–984.
- Tan, Z. 2008. «An analytical model for the fractional efficiency of a uniflow cyclone with a tangential inlet». *Powder Technology* 183: 147–151.
- Theodore, L. e Paola, V. De. 1980. «Predicting Cyclone Efficiency». *Journal of the Air Pollution Control Association* 30 (10): 1132–1133.
- Trefz, M. e Muschelknautz, E. 1993. «Extended Cyclone Theory for Gas Flows with High Solids Concentrations». *Chemical Engineering & Technology* 16: 153–160.
- Wikipedia. sem data. «MATLAB». <https://en.wikipedia.org/wiki/MATLAB> (Acedido Maio 2017).