



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Automatização do dimensionamento de separadores ciclónicos e modelação para impressão 3D

Nuno Henrique da Silva Pais

Dissertação

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Alexandre Aibéo

dezembro de 2022



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Automatização do dimensionamento de separadores ciclónicos e modelação para impressão 3D

Nuno Henrique da Silva Pais

Dissertação

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Alexandre Aibéo

dezembro de 2022

“time is a river”

“evolve or be extinct”

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial ao Professor Alexandre Aibéo, meu orientador nesta dissertação, pelo conhecimento transmitido e todo o suporte dado para o sucesso deste trabalho.

A todas as outras pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho, o meu sincero obrigado.

RESUMO

Ciclones são equipamentos destinados à separação de partículas sólidas em suspensão num fluido. São vastamente utilizados, nos mais diversos ramos da indústria, devido ao seu baixo custo de produção, manutenção e simplicidade. O seu princípio básico de funcionamento decorre do balanço entre as forças gravitacional, de arrasto e de inércia que efetuam a separação das partículas através da formação de um vórtice ciclónico. O interesse no seu estudo foi reforçado nas últimas décadas com a crescente diligência com a emissão de partículas e consequente efeito no meio ambiente.

O presente trabalho começa por apresentar uma revisão de alguns modelos de dimensionamento de Ciclones. Esta revisão serve para introduzir os conceitos teóricos necessários ao correto dimensionamento dos separadores ciclónico e correta utilização da aplicação informática desenvolvida. A aplicação, após ser alimentada com as variáveis que descrevem o escoamento bifásico, dimensiona o Ciclone, permite a seriação e consequente comparação dos modelos através de valores de rendimento, perda de carga e números adimensionais. A aplicação admite o dimensionamento por oito modelos de configuração geométrica, o cálculo de rendimento teórico é realizado por dez modelos, e o de perda de carga por dez. São ainda calculados o número de Euler, o número de Reynolds, as razões entre o diâmetro de corte e o diâmetro central do Ciclone, e entre a massa volúmica do fluido pela do material em suspensão.

Após a avaliação dos resultados obtidos, pode ser feita a exportação da modelação 3D destes dispositivos, para posterior impressão pelo método de fabricação aditiva e/ou simulação CFD. É, também, disponibilizada a ferramenta que possibilita a criação de Ciclones com as variáveis geométricas livres, i.e., permitindo ao utilizador a possibilidade de as definir, todas, de forma independente.

Os resultados de dimensionamento são concordantes com a literatura. A modelação produzida permite a impressão dos modelos.

Palavras-chave: Transporte pneumático; Impressão 3D; Ciclone; Modelação 3D; Simulação CFD; Manufatura aditiva; Rendimento de separação; Perda de Carga; Números adimensionais.

ABSTRACT

Cyclones are devices designed to separate solid particles in suspension from fluids. They are vastly used in the most different industry branches, due to their low cost of production, maintenance, and simplicity. The basic principle of operation depends on the gravitational, drag and inertial forces. The particle separation is accomplished by these forces through the formation of a cyclone vortex.

This dissertation begins with a theoretical review of Cyclone sizing models. This revision has the purpose of presenting the theoretical concepts behind the sizing of a Cyclone separator and therefore the correct utilization of the developed informatic application in this work. After the input of the variables that describe the biphasic flow, the application computes the Cyclone sizing and allows the seriation and subsequent comparison of the models through the efficiency, pressure drop and dimensionless numbers. The application makes available eight geometrical configurations, ten different models can estimate efficiency, and nine different models can assess the pressure drop. The Euler number, the Reynolds number, the ratios between the cut-size diameter and the central diameter of the cyclone, and the density of the fluid and particles in suspension are still calculated by the application.

After the results' evaluation, the user can export the 3D models of these devices for subsequent printing by additive manufacturing and/or CFD simulation. It has also made available a tool for creating cyclones with free geometrical variables. This way, the user has the possibility to define all of them in an independent way.

The sizing results agree with the literature. The produced modulation enables a way to print the 3D models.

Keywords: Pneumatic Transportation; 3D Printing; Cyclone Separator; 3D Modulation; CFD Simulation; Addictive Manufacturing; Separation Efficiency; Pressure Drop; Dimensionless numbers.

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1.	Princípio de funcionamento dos Ciclones.....	5
2.2.	Modelos.....	11
2.2.1.	Modelos de “Órbita de Equilíbrio”	12
2.2.1.1.	Barth (1956).....	12
2.2.1.2.	Muschelknautz (1967 a 1994).....	14
2.2.1.1.	Leith & Licht (1972).....	21
2.2.1.2.	Iozia & Leith (1989)	23
2.2.2.	Modelos de “Tempo de Voo”	25
2.2.2.1.	Rosin, Rammler, Intelmann/Lapple (1949)	25
2.2.2.2.	Koch & Licht (1977).....	26
2.2.2.3.	Dietz (1981)	28
2.2.3.	Modelo Híbridos	30
2.2.3.1.	Mothes & Loffler (1984)	30
2.2.3.2.	Li & Wang (2000).....	34
2.2.3.1.	Shahraki (2003).....	36
2.3.	Modelos de Cálculo de Perda de Carga	41
2.3.1.	Shepherd & Lapple (1939).....	41
2.3.2.	Miller & Lissman (1940)	42
2.3.3.	Stairmand (1949)	42
2.3.4.	Barth (1956).....	43
2.3.5.	Muschelknautz (1980)	44
2.3.6.	Casal & Martinez-Bennet (1983).....	44
2.3.7.	Ramachandran et al., 1991.....	45
2.3.8.	Modelo de Aproximação por Zonas	45
2.3.9.	Macintyre (1988)	47

2.3.10. Shahraki (2003).....	47
2.4. Saltitação	50
2.5. Tecnologia de Impressão 3D.....	52
3. HIPÓTESE DE TRABALHO E METODOLOGIA	55
3.1. Ideia Inicial: dimensionamento automático e geração de ficheiro para impressão 3D.....	55
3.1.1. Dimensionamento	55
3.1.2. Construção de uma aplicação intuitiva e rápida	65
3.1.3. Possibilidade de seriação entre os vários modelos	67
3.1.4. Modelação automática utilizando apenas MATLAB	67
3.1.5. Modelo Livre	67
3.1.6. Simulação CFD.....	68
3.2. Impressão	70
3.3. Ideia Inicial vs Trabalho Final.....	74
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	75
4.1. A aplicação Cyc-ASApp	75
4.1.1. Fluxograma da Aplicação	87
4.1.2. Impressão 3D	88
4.2. Comparação dos Resultados de Dimensionamento Manual e Computacional	89
4.2.1. Cálculos manuais	89
4.2.1.1. Coury et al., 2004.....	90
4.2.1.1.1. Modelo de Barth	91
4.2.1.1.2. Modelo de Leith & Licht	92
4.2.1.1.3. Modelo Iozia & Leith	94
4.2.1.2. Nunes, 2002	95
4.2.1.2.1. Areia.....	96
4.2.1.2.2. Pó de Cal.....	98

4.2.1.2.3.	Cimento em Pó.....	99
4.2.1.2.4.	Serradura Seca	100
4.2.2.	Cálculos computacionais	101
4.2.2.1.	Coury et al., 2004.....	102
4.2.2.1.1.	Modelo de Barth	103
4.2.2.1.2.	Modelo de Leith & Licht	103
4.2.2.1.3.	Modelo Iozia & Leith	104
4.2.2.2.	Nunes, 2002	105
4.2.2.2.1.	Areia.....	105
4.2.2.2.2.	Pó de Cal.....	106
4.2.2.2.3.	Cimento em Pó.....	108
4.2.2.2.1.	Serradura Seca	109
5.	DISCUSSÃO	111
6.	CONCLUSÕES	113
7.	TRABALHO FUTURO.....	115
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
Anexo A	119
	Coury et al., 2004	119
	Modelo de Barth	119
	Modelo de Leith & Licht.....	120
	Modelo de Iozia & Leith	121
	Nunes, 2002.....	122
	Areia	122
	Pó de Cal.....	123
	Cimento em Pó	124
	Serradura Seca	125

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos separadores ciclônicos	2
Tabela 2 - Ciclones típicos segundo diversos autores	10
Tabela 3 - Granulometria e distribuição granulométrica para os cálculos de dimensionamento.....	90
Tabela 4 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Modelo de Barth	92
Tabela 5 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Modelo de Leith & Licht	93
Tabela 6 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Modelo de Iozia & Leith.....	95
Tabela 7 - Distribuição granulométrica - Areia.....	96
Tabela 8 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Areia.....	97
Tabela 9 - Distribuição granulométrica - Pó de Cal	98
Tabela 10 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Pó de Cal	98
Tabela 11 - Distribuição granulométrica - Cimento em pó.....	99
Tabela 12 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Cimento em Pó	99
Tabela 13 - Distribuição granulométrica - Serradura seca	100
Tabela 14 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Serradura Seca.....	101
Tabela 15 - Resultados de Perda de Carga	102
Tabela 16 - Resultados de Perda de Carga - Areia	106
Tabela 17 - Resultados de Perda de Carga - Pó de Cal	107
Tabela 18 - Resultados de Perda de Carga - Cimento em Pó.....	108
Tabela 19 - Resultados de Perda de Carga - Serradura Seca.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo esquemático de Ciclone de fluxo invertido com entrada tangencial ..	5
Figura 2 - Variação do Rendimento Total de Separação e da Perda de Carga em função do Caudal Volúmico de Gás Adaptado de: Svarovsky, 1981	7
Figura 3 - Geometria típica de um Ciclone de entrada tangencial	10
Figura 4 - Esboços dos conceitos dos modelos de separação: a) Modelo de "órbita de equilíbrio"; b) Modelo do "tempo de voo" Fonte: Hoffmann & Stein, 2008	12
Figura 5 - Componentes axial e radial da partícula na linha de corrente média através do Ciclone e definição da área A_w Adaptado de: Trefz & Muschelknautz, 1993	18
Figura 6 - Rácio do diâmetro de partículas (d_{pi}/d_{50}) vs Rendimento parcial Fonte: Theodore & de Paola, 1980	25
Figura 7 - Intervalo de valores aceitáveis para a velocidade de entrada do Ciclone Fonte: Pinho, 2005	51
Figura 8 - Exemplo de modelação utilizando o <i>software Fusion</i>	56
Figura 9 - Exemplo de modelação utilizando o <i>software AutoCAD</i>	56
Figura 10 - Exemplo de modelação utilizando o <i>software SolidWorks</i>	57
Figura 11 - Exemplo de modelação utilizando o <i>software Inventor</i> - Com tabela de parametrização	57
Figura 12 - Exemplo de ficheiro de parametrização exportado do <i>software Inventor</i> - em formato <i>html</i>	58
Figura 13 - Exemplo de disco corrompido em torno de um vértice Adaptado de: Nagy & Mátyási, 2003	59
Figura 14 - Exemplo de erros de concatenação da modelação em MATLAB	60
Figura 15 - Exemplo de superfícies geradas pela concatenação de superfícies cartesianas em MATLAB	61
Figura 16 - Erros de concatenação de superfícies circulares em MATLAB: a) Modelo inteiro; b) corte longitudinal	61
Figura 17 - Sobreposição de malhas em MATLAB	62
Figura 18 - Exemplo da sequência seguida para a construção das superfícies da secção cilíndrica do Ciclone	62
Figura 19 - Exemplo de matriz de NaN's em MATLAB	63
Figura 20 - Ambiente de entrada no <i>App Designer</i>	66

Figura 21 - Sobreposição de simulações CFD: a) Velocidade no eixo Y vs linhas de fluxo; b) Corte em Y: velocidade e linhas de fluxo	69
Figura 22 - Primeira impressão 3D.....	70
Figura 23 - Segunda iteração de impressão 3D. Painel a) peças isoladas; Painel b) Ciclone montado	71
Figura 24 - Modificação do encaixe das peças.....	71
Figura 25 - Impressão do cone e cilindros numa peça única.....	72
Figura 26 - Teste de tolerâncias de encaixes	72
Figura 27 - Impressão da modelação com implementação dos testes de tolerância.....	73
Figura 28 - Esquema de comparação entre versão original e versão apresentada.....	74
Figura 29 - Ambiente de entrada na aplicação desenvolvida	75
Figura 30 - Ambiente da aplicação desenvolvida com a opção de propriedades ativa ..	76
Figura 31 - Painel de introdução das características do escoamento bifásico	76
Figura 32 - Exemplo de um ficheiro de importação de granulometria.....	77
Figura 33 - Aviso de erro da soma da distribuição granulométrica.....	77
Figura 34 - Painel de introdução das características das partículas.....	78
Figura 35 - Alerta de dimensões do Ciclone	78
Figura 36 - Painel de introdução das condições de Impressão 3D	79
Figura 37 - Painel de introdução das Opções de dimensionamento	80
Figura 38 - Janela de definição do Diâmetro Central do Ciclone	80
Figura 39 - Introdução da variável δ_2	82
Figura 40 - Exemplo de visualização do Ciclone dimensionado na aplicação.....	83
Figura 41 - Alerta de ocorrência de Saltação	83
Figura 42 - Pop-up informativa	84
Figura 43 - Botão <i>Reset</i>	84
Figura 44 - Botões centrais.....	85
Figura 45 - Painéis de opções de: a) Modelos de Geometria de Ciclones; b) Modelos de cálculo do Rendimento	85
Figura 46 - Separador de visualização do modelo dimensionado e botão de exportação de modelo para CFD	86
Figura 47 - Separador de Desenho Livre.....	86
Figura 48 - Fluxograma da aplicação desenvolvida	87
Figura 49 - Exemplo de um Ciclone impresso	88
Figura 50 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Barth.....	103

Figura 51 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Leith & Licht.....	104
Figura 52 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Iozia & Leith.....	104
Figura 53 - Resultados dos cálculos computacionais – Areia - Rendimento	105
Figura 54 - Resultados dos cálculos computacionais - Pó de Cal - Rendimento	107
Figura 55 - Resultados dos cálculos computacionais - Cimento em Pó - Rendimento	108
Figura 56 - Resultados dos cálculos computacionais - Serradura Seca - Rendimento.	109
Figura 57 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Barth - Perda de Carga	119
Figura 58 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Barth - Números adimensionais	119
Figura 59 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Leith & Licht - Perda de Carga.....	120
Figura 60 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Leith & Licht - Números adimensionais	120
Figura 61 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Iozia & Leith - Perda de Carga.....	121
Figura 62- Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Iozia & Leith - Números adimensionais	121
Figura 63 - Resultados dos cálculos computacionais - Areia- Perda de Carga	122
Figura 64 - Resultados dos cálculos computacionais - Areia- Números adimensionais	122
Figura 65 - Resultados dos cálculos computacionais - Pó de Cal - Perda de Carga	123
Figura 66 - Resultados dos cálculos computacionais - Pó de Cal - Números adimensionais	123
Figura 67 - Resultados dos cálculos computacionais - Cimento em Pó - Perda de Carga	124
Figura 68 - Resultados dos cálculos computacionais - Cimento em Pó - Números adimensionais	124
Figura 69 - Resultados dos cálculos computacionais - Serradura Seca - Perda de Carga	125
Figura 70 - Resultados dos cálculos computacionais - Serradura Seca - Números Adimensionais	125

NOMENCLATURA

Variáveis geométricas do Ciclone		
Simbologia	Descrição	Unidade
A_c	Altura da conduta de entrada da mistura no Ciclone	[m]
B_c	Largura da conduta de entrada da mistura no Ciclone	[m]
D_c	Diâmetro central do Ciclone	[m]
D_e	Diâmetro do ducto de saída de gás limpo	[m]
D_x	Diâmetro da conduta de saída das partículas coletadas	[m]
E	Comprimento da conduta de entrada da mistura	[m]
H_c	Altura total do Ciclone	[m]
R_e	Raio do diâmetro D_e	[m]
R_x	Raio central do Ciclone	[m]
S	Comprimento da conduta de saída de gás limpo no interior do Ciclone	[m]
Z_c	Altura da componente cônica do Ciclone	[m]

Símbolos gregos

α	Constante geométrica no modelo de Barth	[-]
α_M	Coeficiente de estrangulamento à entrada	[-]
α_S	Ângulo que fluxo espirala na parede cilíndrica do Ciclone	[rad]
α''	Ângulo de subida do fluxo em direção ao ducto de saída	[rad]
β	Constante do Modelo de Iozia & Leith	[-]
β^*	Parâmetro geométrico relativo à entrada do Ciclone	[-]
γ	Ângulo entre o eixo longitudinal e a parede cônica do Ciclone	[rad]
ΔH	Parâmetro de Shahraki	[-]
Δp	Perda de carga	[Pa]
ΔP_1	Perda de carga na secção cilíndrica do Ciclone	[Pa]
ΔP_2	Perda de carga na secção cônica do Ciclone	[Pa]
ΔP_3	Perda de carga no fluxo ascendente do gás	[Pa]
Δp_{corpo}	Perda de carga no corpo do Ciclone	[Pa]
$\Delta p_{\text{vórtice}}$	Perda de carga no vórtice do Ciclone	[Pa]
ε	Rugosidade relativa	[-]
ζ	Parâmetro geométrico	[-]
η	Rendimento global	[m]
η_i	Rendimento parcial	[m]
θ	Fator de carga	[-]
θ_{lim}	Fator de carga limite	[-]
λ	Rácio da concentração de partículas	[-]
λ_i	Valor característico	[-]
ξ	Coeficiente de atrito global do Ciclone	[-]
ξ_C	Coeficiente de atrito relativo à entrada do Ciclone	[-]
ξ_{CASAL}	Coeficiente de atrito de Casal	[-]
ξ_D	Coeficiente de atrito na parte cilíndrica do Ciclone	[-]
ξ_K	Coeficiente de atrito na parte cônica do Ciclone	[-]
ξ_{LAPPLE}	Coeficiente de atrito de Lapple	[-]

ξ_{MILLER}	Coeficiente de atrito de Miller	[-]
$\xi_{\text{RAMACHANDRAN}}$	Coeficiente de atrito de Ramachandran	[-]
$\xi_{\text{STAIRMAND}}$	Coeficiente de atrito de Stairmand	[-]
ρ_f	Massa volúmica do fluido	[kg/m ³]
ρ_p	Massa volúmica das partículas	[kg/m ³]
ρ_p^*	Massa volúmica aparente	[kg/m ³]
Φ	Fator de perda de carga de momento angular	[-]
φ	Ângulo entre as paredes do Ciclone e o eixo do Ciclone na parte cónica	[rad]
Ψ	Parâmetro de inércia modificado	[-]
ω	Coordenada angular	[-]

Outras variáveis

A	Constante no modelo de Mothes & Loffler	[-]
a_{in}	Aceleração	[m/s ²]
A_R	Área total da superfície do Ciclone	[m ²]
A_w	Área interior da parte cilíndrica e da metade superior da parte cónica do Ciclone	[m ²]
B	Constante no modelo de Mothes & Loffler	[-]
C	Constante no modelo de Mothes & Loffler	[-]
C_S	Parâmetro adimensional do modelo de Shahraki	[-]
c_0	Concentração de partículas na entrada do Ciclone	[kg/m ³]
c_1	Concentração de partículas na região 1	[kg/m ³]
c_2	Concentração de partículas na região 2	[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_i	Concentração de partículas na entrada do Ciclone	[kg/m ³]
C_p	Concentração de partículas dentro do volume do Ciclone	[kg/m ³]
D	Constante no modelo de Mothes & Loffler	[-]
\bar{D}	Diâmetro cilíndrico equivalente da secção cónica	[m]
d_{50}	Diâmetro de corte	[m]
D_{50in}	Diâmetro de corte relativo à entrada do Ciclone	[m]
d_c	Diâmetro do eixo central do Ciclone	[m]
d_{med}	Diâmetro mediano	[m]
$d_{med,in}$	Diâmetro mediano associado à separação de partículas na entrada do Ciclone	[m]
d_{pi}	Diâmetro das partículas em suspensão na mistura	[m]
D_n	Diâmetro natural do núcleo do Ciclone	[m]
$D_{núcleo}$	Diâmetro do núcleo do Ciclone	[m]
D_p	Difusidade das partículas	[-]
D_{pc}	Diâmetro crítico das partículas a serem coletadas	[m]
D_{rp}	Difusidade das partículas	[-]
\vec{F}_a	Força de arrasto	[N]
\vec{F}_c	Força centrífuga	[N]
f	Coeficiente de atrito	[-]
F_{gas}	Coeficiente de atrito relativo ao fluido	[-]
f_i	Coeficiente de atrito devido à parede lisa da parede do Ciclone para separadores de corpo cónico	[-]

Fr	Número de Froude	[-]
f_r	Coefficiente de atrito devido à rugosidade da parede do Ciclone para separadores de corpo cónico	[-]
G	Parâmetro geométrico	[-]
G_f	Fator de perda de carga relacionado com a fricção na parede do Ciclone	[-]
H_z^*	Parâmetro geométrico do Ciclone	[-]
K_a	Fator geométrico no modelo de Koch & Licht	[-]
K_b	Fator geométrico no modelo de Koch & Licht	[-]
K_c	Fator geométrico no modelo de Koch & Licht	[-]
l	Comprimento natural do Ciclone	[m]
L^*	Altura do núcleo do Ciclone (eixo central)	[m]
m_1	Expoente no sistema de equações diferenciais do balanço mássico	[-]
m_2	Expoente no sistema de equações diferenciais do balanço mássico	[-]
n	Expoente do vórtice	[-]
N_1	Número de voltas que o fluido dá na parede cilíndrica do Ciclone	[-]
N_2	Número de voltas que o fluido dá na parede cónica do Ciclone	[-]
N_{clean}	Número de voltas que o gás limpo dá no interior do Ciclone	[-]
N_s	Número de espiras que a mistura percorre dentro do Ciclone	[-]
P_{se}	Pressão estática na entrada	[Pa]
P_{ss}	Pressão estática na saída	[Pa]
$Q_v(z)$	Caudal axial	[m ³ /s]
R_1	Constante da solução geral das equações diferenciais do balanço mássico	[-]
R_2	Constante da solução geral das equações diferenciais do balanço mássico	[-]
R_{2m}	Raio médio da parte cónica do Ciclone	[m]
R_c^*	Raio equivalente	[-]
Re_R	Número de Reynolds associado ao corpo do Ciclone	[-]
R_{in}	Raio médio de entrada	[m]
R_m	Raio médio entre a parede do Ciclone e a superfície da conduta de saída do fluido	[m]
T_c	Temperatura do gás	[K]
U_{pp}	Velocidade das partículas junto à parede do Ciclone	[m/s]
U_{pv}	Velocidade das partículas junto da conduta do vórtice	[m/s]
$U_r(z)$	Velocidade radial em função da cota (Z)	[m/s]
U_s	Velocidade de saltação	[m/s]
u_τ	Velocidade de fricção	[m/s]
\dot{V}	Caudal volúmico	[m ³ /s]
V_{cn}	Volume do Ciclone para o comprimento natural (Dn)	[m ³]
v_c	Velocidade à entrada do Ciclone	[m/s]
v_e	Velocidade de escape do fluido	[m/s]

V_H	Volume do Ciclone abaixo da conduta de saída dos gases limpos	[m ³]
v_i	Velocidade de entrada do fluido no Ciclone	[ft/s]
v_{in}	Velocidade do fluido na conduta de entrada do Ciclone	[m/s]
$V_{nl,H}$	Volume anelar relacionado com a penetração do vórtice dentro do Ciclone	[m ³]
Vol_{cic}	Volume do Ciclone real	[m ³]
V_s	Volume anular entre o plano central do ducto de entrada e o fundo do ducto de saída	[m ³]
v_{tsi}	Velocidade terminal de deposição de partículas	[m/s]
v_{tsi}^*	Velocidade terminal de deposição de partículas com 50% de probabilidade de separação	[m/s]
v_{zm}	Componente axial média da velocidade do fluido no corpo do Ciclone	[m/s]
v_{zp}	Componente axial da velocidade junto à parede do Ciclone	[m/s]
v_θ	Componente tangencial no vórtice do Ciclone	[m/s]
$v_\theta (Rc^*)$	Componente tangencial da velocidade do fluido junto da parede do Ciclone de raio equivalente	[m/s]
$v_\theta (Re)$	Componente tangencial da velocidade do fluido junto ao vórtice	[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 na parede do Ciclone	[m/s]
$v_{\theta p}^*$	Componente tangencial da velocidade junto à parede do Ciclone (sem atrito)	[m/s]
$v_{\theta v}$	Componente tangencial da velocidade do fluido junto ao vórtice do Ciclone	[m/s]
Y_i	Fração mássica das partículas	[-]
Z	Comprimento natural do vórtice	[m]
τ_i	Tempo de relaxação	[s]

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos Separadores ciclônicos, vulgarmente chamados de Ciclones, é consequência da necessidade de separação de partículas em suspensão num escoamento. São dispositivos compostos por um troço cilíndrico e um elemento cónico, coaxiais. Possuem, ainda, uma conduta de admissão, o ducto de entrada, segundo a direção tangencial ao troço cilíndrico; uma abertura no topo do corpo cilíndrico para exaustão de gases; e outra abertura no fundo da zona cónica para descarga de sólidos (Pinho, 2005).

A gama de materiais nos quais pode ser utilizado o transporte pneumático é extensa, virtualmente todos os pós e materiais granulares podem ser transportados pneumaticamente. Será, contudo, necessária a adequação das condições de operação: geralmente, quanto maior e mais denso o material, maior a velocidade do gás requerida para a operação e, em consequência, maior será o consumo de energia (Pinho, 2005). Na literatura são referidas algumas regras gerais: que partículas com diâmetro superior a 15 mm podem não ser adequadas, existindo apenas algumas exceções; que o diâmetro interno do tubo de transporte deve ser pelo menos três vezes maior do que o material transportado, para não existirem obstruções da conduta. As partículas melhores candidatas para o transporte pneumático são materiais de escoamento livre, ou seja, sólidos que têm características similares a fluidos; não abrasivos; e não fibrosos. Todavia, 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 e ajustados ao transporte pneumático (Klinzing et al., 2010).

Estes equipamentos são vastamente utilizados, nos mais diversos ramos da indústria, desde a indústria farmacêutica à metalúrgica, devido aos seus baixos custos de produção, manutenção e simplicidade. Apresentam, ainda, uma grande vantagem perante os seus concorrentes mais diretos – os equipamentos que utilizam filtros – estes ficam obstruídos facilmente e requerem manutenção constante com elevados custos (Altmeyer et al., 2004; Dirgo & Leith, 1985; Enliang & Yingmin, 1989; Shepherd & Lapple, 1939; Tan, 2008). Na Tabela 1 são apresentadas algumas das vantagens e desvantagens destes dispositivos.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos separadores ciclônicos

VANTAGENS	O material recolhido permanece seco e utilizável
	Capital de investimento e operações de manutenção com custo reduzido
	Muito compactos na maioria das aplicações
	Podem ser utilizados em situações extremas, com a elevadas temperaturas e pressões e ambientes quimicamente agressivos
	Inexistência de partes móveis
	Robustos
	Perda de carga constante
	Podem ser construídos com qualquer material adequado ao propósito – p.e. aço, ferro, fundido, ligas, alumínio, plásticos, cerâmicos
	Podem ser equipados com revestimentos resistentes à erosão, corrosão ou “repelente de partículas” (p.e. <i>Teflon</i>)
	As superfícies internas podem ser electropolidas para ajudar no combate a incrustações
	Podem ser fabricados a partir de chapa ou no caso de unidades mais pequenas, a partir de moldes
	Podem, em alguns casos, trabalhar com sólidos pegajosos com a irrigação adequada
	Conseguem separar partículas sólidas, líquidas ou ambas (versatilidade do dimensionamento)
DESVANTAGENS	Baixo rendimento para tamanho de partículas inferiores ao diâmetro de corte, quando trabalham com fatores de carga baixos
	Perdas de carga mais elevadas do que outro tipo de separadores (p.e. filtros, depuradores de baixa pressão e precipitadores eletroestáticos)
	Sujeitos a erosão, incrustações dependendo dos materiais processados
	Podem operar abaixo das expectativas se o seu dimensionamento não for correto

Fonte: Hoffmann & Stein, 2008

As primeiras aplicações industriais da separação ciclónica datam de 1885 e eram utilizadas para a separação de poeiras, contudo, a ideia inicial advém do trabalho de DeLaval (1789) que demonstrou a separação da nata do leite por centrifugação (Pinho, 2005).

Para a compreensão dos fenómenos de transporte pneumático associados com a ciclonação é essencial a apresentação das variáveis e conceitos referenciados ao longo desta dissertação. A concentração de partículas, a percorrer uma conduta de secção circular, presente numa mistura bifásica, fluido e partículas sólidas em suspensão, permite a classificação do escoamento mediante o seu valor. As duas classes para caracterizar esta fase do escoamento são: a fase densa e a fase diluída. Nestas fases devem ser considerados os regimes de escoamento estável, de transição e instável (Klinzing et al., 2010). Para a sua quantificação e definição deste parâmetro, para que seja definido o tipo de fase em que o escoamento se encontra, é definido o fator de carga, θ . O fator de carga é calculado pela fração do caudal mássico de sólidos transportados pelo caudal mássico de fluido transportador; ou pode ser calculado pela equação (1), na qual ρ_p^* é a massa volúmica aparente das partículas em movimento; ρ_f , é a massa volúmica do fluido; U_p , é a velocidade das partículas; U_f é a velocidade superficial da fase gasosa, i.e., a velocidade que se obteria na ausência de partículas sólidas, com o gás em escoamento monofásico; e, A , a área da secção da conduta.(Montenegro, 2017). Se θ for inferior a 10, o transporte encontra-se em fase diluída; se o valor se encontrar entre 10 e 100, o transporte está em fase densa (Pinho, 2005).

$$\theta = \frac{\rho_p^* U_p A}{\rho_f U_f A} \quad (1)$$

O número de Reynolds, Re , parâmetro adimensional, ajuda na perceção dos padrões de escoamento em diferentes situações, através da medição do rácio entre as forças inerciais e as forças viscosas. O carácter turbulento ou laminar de um escoamento depende da importância do termo de viscosidade na equação que descreve o movimento. Nestas equações, o termo advectivo e o termo da viscosidade quantificam dois efeitos contrários. O termo advectivo expressa a inércia do movimento, que tende a manter-se uma vez iniciado, enquanto o termo da viscosidade atua para resistir ao movimento. Portanto, a importância do atrito viscoso pode ser avaliada comparando a sua ordem de grandeza com a ordem de grandeza do termo da advecção. A esta razão designa-se por número de Reynolds (Lautrup, 2005). A transição do escoamento laminar para turbulento numa conduta de superfície lisa ocorre quando $Re \approx 2100$. Ou seja, um número de Reynolds é igual ou inferior a 2100 indica que o escoamento é laminar, e um valor superior a este o escoamento é turbulento (Rehm et al., 2008).

Nas últimas quatro décadas, com o crescimento da responsabilização social para os cuidados com o meio ambiente, com particular ênfase na poluição atmosférica proveniente de fontes industriais, o interesse nestes equipamentos foi renovado (Gimbun et al., 2004). Assim, o presente trabalho segue o estudo de Montenegro (2017), “*Desenvolvimento de um programa de computador para o dimensionamento de separadores ciclônicos*”. Neste trabalho será acrescentada a modelação 3D de Ciclones assim como novos parâmetros de seriação dos modelos.

Neste mesmo período, existiu um elevado crescimento tecnológico e com ele, novas formas de produção. Mais recentemente, na última década, a tecnologia 3D apresentou-se como uma ferramenta rápida e económica de produção. Inicialmente era utilizada para a construção de pequenos protótipos. Atualmente, já é possível a impressão de modelos de grandes dimensões ($2000 \times 5000 \times 1000$ mm) (Modix, 2022). Aliando o conhecimento teórico-prático associado a estes equipamentos e as novas tecnologias de produção disponíveis, a disseminação destes equipamentos tem se tornado ainda mais viável e adaptável.

A produção de um sistema industrial de separação ciclónica é um processo que depende de diversas variáveis e respetivas restrições que vão sendo estudadas, corrigidas e otimizadas. Estes processos de otimização são morosos e iterativos e assim podem levar a erros de dimensionamento que, imperativamente, terão influência na eficiência destes dispositivos. Assim, nesta dissertação será feita uma ligação entre os desenvolvimentos teóricos, ou semi-empíricos, dos modelos de cálculo de rendimento e perda de carga. Estes modelos permitem a quantificação da adequação do dispositivo às condições nas quais será inserido.

Nos capítulos seguintes, será apresentado o desenvolvimento de uma aplicação que permite o rápido dimensionamento, o cálculo do rendimento e perda de carga e a comparação entre diferentes modelos. Permite ainda, o dimensionamento livre de Ciclones e a posterior exportação de modelos para impressão 3D ou possibilidade de simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*). O mesmo programa calcula, ainda, parâmetros adimensionais que permitam a comparação rápida entre diferentes dimensionamentos de Ciclones.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1.Princípio de funcionamento dos Ciclones

A literatura existente sobre a separação ciclônica é extensa, pois estes são dispositivos eficazes, simples e económicos. Em virtude da sua versatilidade têm sido estudados há mais de um século. O seu objetivo é a separação de partículas suspensas num fluido (Charisiou et al., 2011).

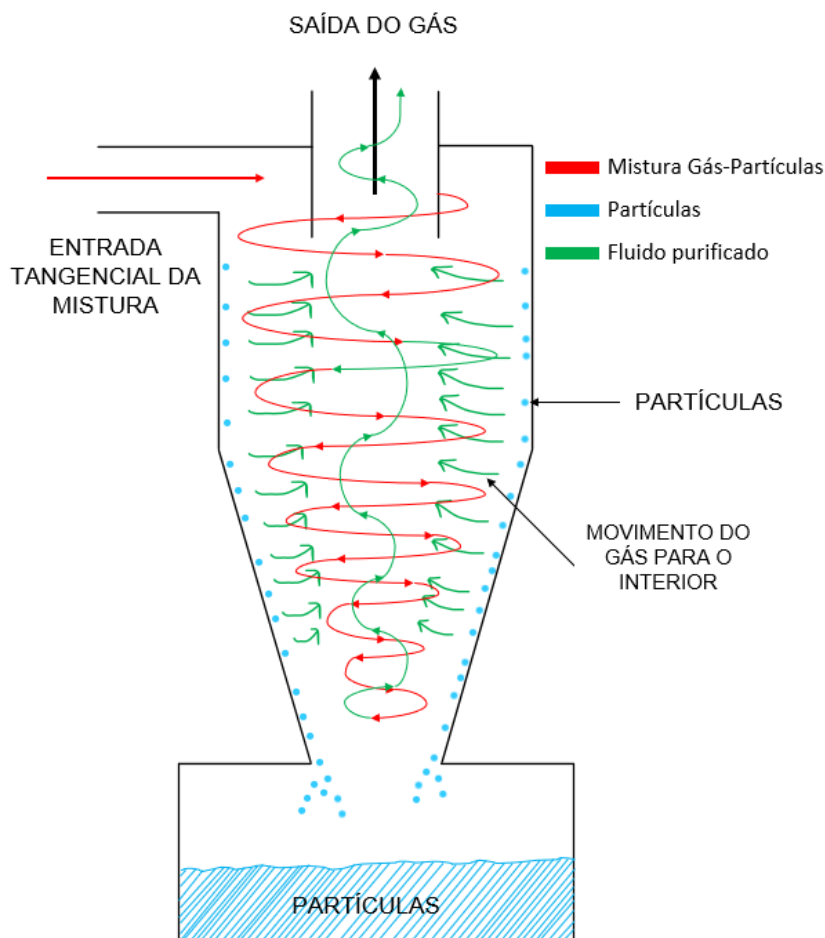


Figura 1 - Modelo esquemático de Ciclone de fluxo invertido com entrada tangencial

O princípio de separação dos Ciclones é bastante simples. A mistura de gás e sólidos entra na secção superior do Ciclone, tangencial ao eixo do corpo central (ver Figura 1), simultaneamente, o corpo cilíndrico induz um padrão de escoamento rotativo de eixo vertical descendente (linha vermelha). A força centrífuga separa os sólidos do gás, já que a fase sólida é empurrada em direção às paredes do cilindro e, a seguir, num movimento descendente provocado pela ação da gravidade, são levados em direção à zona cônica de saída dos sólidos (linha azul). O gás descreve um movimento ascendente sendo

expelido pela saída no ducto superior do Ciclone (linha verde) (Altmeyer et al., 2004). No entanto, a turbulência gerada dispersa o sólido, aumentando a probabilidade de as partículas serem arrastadas pelo escoamento de saída do gás (Elsayed & Lacor, 2016).

Para ser realizado um correto dimensionamento é necessário considerar e compreender os conceitos de rendimento de separação, perda de carga e respectivos efeitos nos custos de funcionamento. A previsão do rendimento de separação do Ciclone é de elevada importância, pois uma previsão incorreta poderá resultar num modelo ineficiente de separador ciclônico (Gimbun et al., 2004).

O rendimento de separação dos Ciclones é medido pela fração de partículas, de uma determinada gama de diâmetros, retidas, ou seja, separadas. Abaixo dos 5 μm , o seu rendimento diminui de forma drástica, sendo necessário recorrer a diferentes equipamentos como mangas, lavadores ou precipitadores eletrostáticos. Estes equipamentos têm limitações de temperaturas de funcionamento na ordem dos 700 °C. No caso dos Ciclones, o material de construção pode ser adaptado, e.g. materiais cerâmicos ou com características refratárias, e assim ser utilizados acima dos 1000 °C (Pinho, 2005).

Os Ciclones são classificados pelo diâmetro de corte, d_{50} , que se define como o valor do diâmetro de partícula para a qual o Ciclone tem um rendimento de separação de 50%. As partículas cujo diâmetro está acima do d_{50} terão um rendimento superior a 50%. As partículas com diâmetro superior ao diâmetro de corte da partícula irão atingir a parede do Ciclone, separadas do escoamento e captadas pela saída inferior do Ciclone. As partículas de dimensão inferior ao diâmetro crítico, diâmetro mínimo de separação, mover-se-ão, teoricamente, segundo órbitas de raio inferior ao do Ciclone, devido às oscilações de velocidade, e acabam, na prática, por se evadir pelo tubo de exaustão do gás (Pinho, 2005). Partículas com d_{50} são, em teoria, partículas que ficariam eternamente em suspensão, pois são mais pequenas do que as coletadas, mas maiores que aquelas que seguem o movimento do gás em direção ao ducto de saída superior, uma vez que existe um equilíbrio entre as forças de arrasto e centrífuga (Hoffmann & Stein, 2008).

Atualmente, existem vários critérios de classificação de Ciclones. No presente trabalho serão classificados pelo seu rendimento, perda de carga e por grandezas adimensionais. Estas propriedades são fundamentais para a escolha do equipamento ideal para cada realidade industrial em que poderão ser implementadas.

O rendimento de separação é definido pela razão entre a massa de partículas coletadas e a massa das partículas presentes na alimentação do Ciclone. Este cálculo é feito para gamas de tamanhos de partículas iguais, sendo o rendimento total dado pelo somatório dos rendimentos parciais: $\eta = \sum_i Y_i \eta_i$. O valor do rendimento é afetado pela geometria do Ciclone utilizada. Os aspetos relevantes para a análise comparativa entre modelos de dimensionamento realizados por vários autores foram sumariados por Pinho, em 2005, da seguinte forma:

- O aumento da velocidade tangencial das partículas melhora o rendimento de separação, η . A maior velocidade é obtida pela redução do diâmetro da conduta de entrada do Ciclone;

- Para uma altura de Ciclone constante a diminuição do rendimento de separação provocada pelo aumento do ângulo entre o eixo longitudinal e a parede cônica, γ , é muito pequena (ver Figura 3, página 10);

- Uma diminuição do diâmetro da tubagem da saída dos gases limpos resultará num aumento do rendimento de separação;

- O rendimento de separação aumenta com a concentração de partículas no escoamento gasoso de entrada.

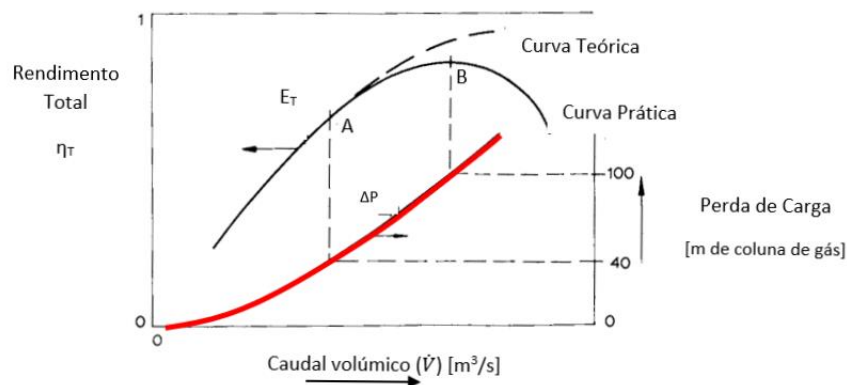


Figura 2 - Variação do Rendimento Total de Separação e da Perda de Carga em função do Caudal Volúmico de Gás Adaptado de: Svarovsky, 1981

É importante referir que para uma alimentação com a concentração de sólidos constante, o rendimento total varia com o caudal de gás, como apresentado na Figura 2. Em 1981, Svarovsky prevê que a curva teórica de rendimento deveria descrever um aumento contínuo, já que o aumento da velocidade decorrente do aumento do caudal provoca um aumento da força centrífuga. No entanto, a curva prática não demonstra este

comportamento, pois o aumento da turbulência gerado pelo maior caudal provocará a reentrada de partículas no escoamento, fazendo com que o rendimento do processo de separação diminua drasticamente. A curva prática apresenta um aumento até ao ponto B, sendo este o ponto máximo da parábola descrita pela curva (ver Figura 2). Acima de certos valores de concentrações de sólidos, as partículas são coletadas assim que entram no dispositivo, formados fios de poeira que descem helicoidalmente ao longo da parede do Ciclone. O estudo de fluxos secundários poderá ter relevância, pois estes contribuem diretamente para desviar ou para provocar uma fuga de partículas no vórtice interior, levando a uma perda de eficiência de separação (Cortés & Gil, 2007).

No que diz respeito à perda de carga do escoamento, esta depende do caudal volúmico. Com o aumento do valor de perda de carga estará associado um aumento do consumo de energia durante o funcionamento do Ciclone. Devido à turbulência e complexidade do escoamento não é possível a quantificação da perda de carga pela via analítica. A sua estimativa, por cálculos de aproximação empírica, torna-se assim essencial. A literatura recomenda que a perda de carga não ultrapasse os 250 mm de H₂O, aproximadamente 2450 Pa, no entanto, este valor já implica um custo elevado no funcionamento do Ciclone (Pinho, 2005).

Geralmente, a perda de carga total é considerada como sendo a soma da perda local e a perda por fricção. A perda de carga local inclui a perda de carga por expansão à entrada e por contração à saída do Ciclone. A perda por fricção contabiliza a perda ao longo da distância percorrida pelo gás, onde uma parte é associada à dissipação da energia cinética e outra à perda provocada pela fricção entre o gás e a parede do Ciclone. A perda no corpo cónico é, não só a perda na parede, mas também na variação da distribuição da velocidade tangencial do gás (J. Chen & Shi, 2007).

Uma maior perda de carga, significa normalmente uma maior eficiência de separação, no entanto, implica, como vimos acima, maiores custos de funcionamento do dispositivo (Charisiou et al., 2011). Para além dos custos energéticos associados à perda de carga, devem ser contabilizados os custos da matéria-prima, usados na construção, assim como custos associados à possível necessidade de manutenção devido à erosão que o Ciclone sofre com a utilização.

Devido à abundância de fatores que influenciam o funcionamento, como a temperatura, a velocidade do escoamento, o material das partículas, a distribuição

granulométrica das mesmas, o próprio fluido de transporte, entre muitas outras variáveis, o dimensionamento destes dispositivos é dificultado. Assim, a tarefa de dimensionamento é iterativa, pois requer o cálculo repetitivo das mesmas expressões para diferentes diâmetros de partícula, tal aumenta a possibilidade de erros por parte do operador que, conseqüentemente, causarão problemas ao correto dimensionamento e funcionamento do dispositivo (Montenegro & Pinho, 2017). Conseqüentemente, agilizar o processo de dimensionamento diminuirá os custos de implementação e de funcionamento.

Os três parâmetros fundamentais no dimensionamento de um separador ciclônico são: o campo de velocidades, o rendimento de separação e a perda de carga (Montenegro, 2017). Como consequência, aquando da escolha do *design* do Ciclone devem ser considerados: o tipo de geometria do Ciclone, o caudal de sólidos a transportar e a própria geometria do ducto de entrada (Kuo & Tsai, 2001).

Os conceitos adotados para o desenvolvimento dos modelos são baseados em abordagens diferentes: por um lado, a trajetória da partícula, como consequência do balanço de forças que nela atua; e, por outro lado, o tempo de residência no separador ciclônico. A derivação de números adimensionais que correlacionam a eficiência de coleção com as condições de operação permite comparar soluções desenvolvidas, este tema será aprofundado com maior detalhe abaixo.

As proporções relativas das partes de um Ciclone, apresentadas na Figura 3, não são aleatórias e as proporções apresentadas na Tabela 2, apresentam o resultado de alguns dos trabalhos teóricos e experimentais desenvolvidos ao longo dos anos pelos diferentes investigadores. As dimensões são apresentadas em função do diâmetro do corpo cilíndrico, D_c .

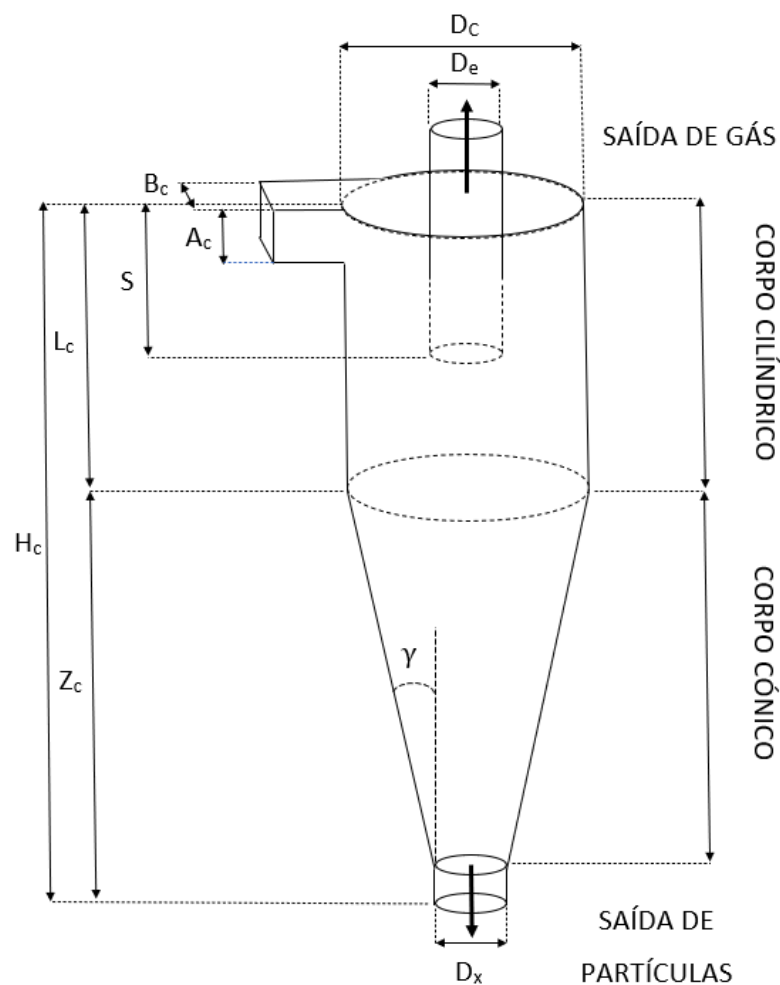


Figura 3 - Geometria típica de um Ciclone de entrada tangencial

Tabela 2 - Ciclones típicos segundo diversos autores

Modelo	A_c	B_c	S	D_e	L_c	H_c	D_x	Z_c
Expedito	$0.5 D_c$	$0.25 D_c$	$0.125 D_c$	$0.5 D_c$	$2 D_c$	$L_c + Z_c$	$0.25 D_c$	$2 D_c$
Stairmand Alto rendimento	$0.5 D_c$	$0.2 D_c$	$0.5 D_c$	$0.5 D_c$	$1.5 D_c$	$4 D_c$	$0.375 D_c$	$H_c - L_c$
Swift Alto rendimento	$0.44 D_c$	$0.21 D_c$	$0.5 D_c$	$0.4 D_c$	$1.4 D_c$	$3.9 D_c$	$0.4 D_c$	$H_c - L_c$
Lapple Utilização geral	$0.5 D_c$	$0.25 D_c$	$0.625 D_c$	$0.5 D_c$	$2 D_c$	$4 D_c$	$0.25 D_c$	$H_c - L_c$
Swift Utilização geral	$0.5 D_c$	$0.25 D_c$	$0.6 D_c$	$0.5 D_c$	$1.75 D_c$	$3.75 D_c$	$0.4 D_c$	$H_c - L_c$
Peterson & Whithy Utilização geral	$0.583 D_c$	$0.208 D_c$	$0.583 D_c$	$0.5 D_c$	$1.333 D_c$	$3.17 D_c$	$0.5 D_c$	$H_c - L_c$

Adaptado de: Pinho, 2005

As proporções apresentadas na Tabela 2, devem ser utilizadas como guia para o dimensionamento para o projeto de Ciclones. A dimensão D_x do modelo *Expedito* é arbitrário, embora apareça geralmente descrito na literatura como sendo $0.25 D_c$.

2.2. Modelos

Os modelos apresentados abaixo, são baseados em dois conceitos de modelação para o rendimento de separadores ciclônicos: os modelos de “órbita de equilíbrio” e os modelos de “tempo de voo”. Alguns modelos mais recentes são considerados híbridos, i.e., combinam os dois tipos de modelos primordiais. Certos modelos apresentados não apresentam nenhuma formulação para o cálculo de d_{50} . Contudo, o seu valor pode ser retirado através da imposição do valor do rendimento como 50%, e a substituição na equação exposta para o cálculo do rendimento, a partir desta igualdade pode ser calculado este diâmetro.

Modelos de “órbita de equilíbrio”

Os modelos de “órbita de equilíbrio” consideram uma superfície cilíndrica, identificada como “superfície da conduta de escape”, CS (ver Figura 4.a). Esta superfície é formada pela continuação do limite do ducto de saída superior até ao fundo do Ciclone. Estes modelos pressupõem um balanço de forças sobre uma partícula a rodar na CS num raio $R_x = \frac{1}{2}D_x$. Neste balanço, a força centrífuga, \vec{F}_C , que aponta no sentido radial externo (linha laranja) é contrariada pela força de sentido radial interno (linha verde) causada pelo arrasto, \vec{F}_D , provocado pelo escoamento de gás normal à superfície CS. A força centrífuga é proporcional à massa da partícula e conseqüentemente ao volume, logo proporcional a d^3 . Por outro lado, a força de arrasto é proporcional a d . Devido a esta relação com o diâmetro, partículas de maiores dimensões são centrifugadas contra a parede do Ciclone, enquanto as partículas de menores dimensões são arrastadas para dentro e escapam pelo vórtice.

Modelos de “tempo de voo”

A Figura 4.b) representa uma ilustração dos modelos de “tempo de voo”. No modelo original de “tempo de voo” (Rosin et al., 1932, citado por Hoffmann & Stein, 2008) a questão central é se uma partícula, injetada em alguma posição lateral do ducto de entrada, tem ou não tempo para atingir a parede do Ciclone e ser coletada, antes de alcançar o fundo do Ciclone (Hoffmann & Stein, 2008). Assim, a velocidade do gás em direção ao interior é negligenciada na análise da migração das partículas.

Modelos híbridos

Estes modelos são mais recentes e combinam os dois tipos de métodos apresentados anteriormente. Consideram um intercâmbio de partículas através da superfície CS, devido à dispersão turbulenta e de centrifugação, e a migração de partículas para a parede do Ciclone (Hoffmann & Stein, 2008).

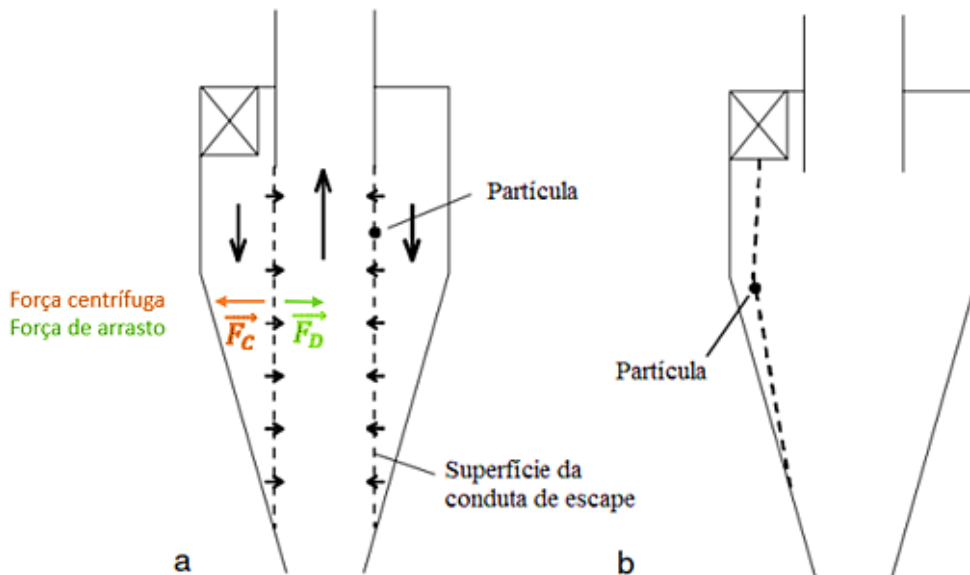


Figura 4 - Esboços dos conceitos dos modelos de separação: a) Modelo de "órbita de equilíbrio"; b) Modelo do "tempo de voo" Fonte: Hoffmann & Stein, 2008

2.2.1. Modelos de "Órbita de Equilíbrio"

2.2.1.1. Barth (1956)

É um modelo simples e representa o modelo de "órbita de equilíbrio" original. É o primeiro modelo a introduzir a fricção na modelação de Ciclones. Os perfis de velocidade de Barth foram imediatamente aplicados como uma primeira aproximação para prever a eficiência de coleção. Este modelo considera como parâmetro central, a constante geométrica α , definida como

$$\alpha = 1 - 1.2 \left(\frac{B_c}{D_c} \right) \quad (2)$$

e a razão entre o momento angular médio do gás na entrada e a rotação do gás no corpo cilíndrico do Ciclone, próximo da parede (Cortés & Gil, 2007).

O rendimento é calculado pela equação (3) (Dirgo & Leith, 1985), onde v_{tsi} é a velocidade terminal de deposição das partículas, e v_{tsi}^* é a velocidade terminal de deposição de partículas com 50% de probabilidade de separação (Charisiou et al., 2011).

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{v_{tsi}}{v_{tsi}^*}\right)^{-3.2}} \quad (3)$$

A relação $\frac{v_{tsi}}{v_{tsi}^*}$ é calculada por

$$\frac{v_{tsi}}{v_{tsi}^*} = \frac{\pi L^* v_\theta^2 \rho_p d_{pi}^2}{9 \mu_f \dot{V}} \quad (4)$$

Em que L^* é altura do núcleo do Ciclone (eixo central), calculado por

$$L^* = \begin{cases} H_c - S, & \text{se } D_e \leq D_x \\ \frac{z_c(D_c - D_e)}{D_c - D_x}, & \text{se } D_e > D_x \end{cases} \quad (5)$$

que pode ser, naturalmente, identificada como o comprimento do vórtice. Barth conduziu uma interpretação puramente geométrica deste parâmetro (Cortés & Gil, 2007).

v_θ é a componente tangencial da velocidade no vórtice do Ciclone, calculada por.

$$v_\theta = v_e \left[\frac{R_e(D_c - B_c)\pi}{2 A_c B_c \alpha + L^*(D_c - B_c)f \pi} \right] \quad (6)$$

v_e é calculada a partir da equação seguinte e quantifica a velocidade de escape do fluido, onde f é um coeficiente de atrito que Barth quantificou como sendo igual a 0.02 (Dirgo & Leith, 1985).

$$v_e = \frac{\dot{V}}{\pi R_e^2} \quad (7)$$

2.2.1.2. Muschelknautz (1967 a 1994)

É um modelo construído sob a ideia de Barth de desenvolver um modelo empírico que combine simplicidade e realismo. O conceito do coeficiente α_M foi mantido e aperfeiçoado, sendo o seu valor calculado empiricamente. O valor do coeficiente de fricção do gás, f , foi também ajustado. Além disso, o modelo foi modificado para prever e quantificar o efeito da concentração de sólidos no regime de fase densa na entrada do Ciclone. Devido à força centrífuga a que o fluido é sujeito à entrada do separador é induzida uma elevada separação. Há, também, um aumento do atrito na parede e, como consequência, um enfraquecimento do vórtice. Esta descoberta permitiu, mais tarde, a modelação dos efeitos de transferência de massa, tanto na perda de carga como no rendimento de separação (Cortés & Gil, 2007).

Devido à extensão do modelo, optou-se por não apresentar a totalidade das equações associadas. Para uma análise mais detalhada é recomendada a revisão da seguinte literatura: (Dahl & Muschelknautz, 1994; Muschelknautz, 1972; Muschelknautz et al., 1970; Muschelknautz & Brunner, 1967; Muschelknautz & Krambrock, 1970a, 1970b; Trefz & Muschelknautz, 1993). Assim, será apresentada uma versão sucinta do trabalho desenvolvido por Muschelknautz.

Este método tem em consideração a concentração de partículas suspensas no fluido na entrada do Ciclone. Foi considerada que a força centrífuga a que o fluido é sujeito na entrada do separador induz sedimentação de partículas, colaborando com a separação das partículas. A energia turbulenta do escoamento do fluido na entrada suporta um peso limitado de sólidos. Assim, o aumento da concentração de sólidos em suspensão acima do fator de carga crítico, θ_{lim} , provoca um aumento do rendimento do Ciclone, independentemente do seu diâmetro (Cortés & Gil, 2007).

Propõe, também, um novo conceito, o de fator de carga crítico, este valor é obtido através da seguinte equação

$$\theta_{lim} = \begin{cases} 0.025 \left(\frac{d_{50}}{d_{med}} \right) (10 \theta)^{0.15} , se \theta \geq 0.1 \\ 0.025 \left(\frac{d_{50}}{d_{med}} \right) (10 \theta)^{-0.11-0.10 \ln(\theta)} , se \theta < 0.1 \end{cases} \quad (8)$$

Em que d_{med} representa o diâmetro mediano, i.e., o diâmetro para o qual 50% das partículas da suspensão lhe são inferiores (Pinho, 2005). O diâmetro de corte, d_{50} , é calculado pela seguinte equação

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \mu_f (0.9 \dot{V})}{2\pi v_\theta (R_e)^2 L^* (\rho_p - \rho_f)}} \quad (9)$$

Na qual, L^* , a altura do eixo central, é calculada pela equação (5) e $v_\theta(R_e)$ é a componente tangencial da velocidade na superfície da conduta de escape. Esta componente, $v_\theta(R_e)$, é calculada através da equação (19).

Neste método de cálculo de rendimento, o cálculo está dependente da comparação entre duas grandezas, θ e $\theta_{crítico}$. Assim o rendimento é dado por

$$\eta = \begin{cases} \sum_{i=1}^n Y_i \eta_i, & \text{se } \theta < \theta_{crítico} \\ \left(1 - \frac{\theta_{lim}}{\theta}\right) + \frac{\theta_{lim}}{\theta} \sum_{i=1}^n Y_i \eta_i, & \text{se } \theta \geq \theta_{crítico} \end{cases} \quad (10)$$

O termo $\left(1 - \frac{\theta_{lim}}{\theta}\right)$ representa o rendimento de separação das partículas por “sedimentação” na entrada do Ciclone, enquanto $\frac{\theta_{lim}}{\theta} \sum_{i=1}^n Y_i \eta_i$ diz respeito ao rendimento de separação das restantes partículas em suspensão. A separação de partículas na entrada do Ciclone tem uma influência determinante no escoamento, uma vez que diminui a velocidade tangencial a partir do atrito com a parede do Ciclone. Assim, afetará o rendimento de separação, fazendo com que η_i nos casos onde o fator de carga não excede o crítico difira do caso onde o inverso acontece (Cortés & Gil, 2007).

A equação para o cálculo do valor de η_i , para os casos em que $\theta < \theta_{crítico}$ foi definida por Trefz & Muschelknautz, em 1993, e é a seguinte

$$\eta_i = \exp\left[-\left(\frac{d_{50}}{d_{pi}}\right)^{1.25}\right] \quad (11)$$

Como Montenegro & Pinho (2017) referem, a informação sobre o método de cálculo para o caso de $\theta \geq \theta_{crítico}$ é escassa e pouco clara. Como para os restantes modelos o método mais eficaz para a previsão do comportamento deste parâmetro seria através do

método experimental e a consequente adequação da curva de regressão. Não é possível a sua implementação, neste trabalho, uma vez que o objetivo passa pela automatização do processo de dimensionamento e consequentemente, tal processo não é viável. Assim, de acordo com o que Montenegro efetuou, a previsão de rendimento será prevista através da curva proposta por Hoffmann & Stein, em 2008. A equação utilizada foi

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{med,in}}{D_{pi}}\right)^n} \quad (12)$$

O expoente n , está relacionado com a forma da curva que aproxima os dados. O seu valor está compreendido entre 2 e 7. Os diferentes valores podem ser observados através da análise dos restantes modelos. Aquando da falta de dados é normalmente utilizado o valor de 3. Valores na metade superior deste intervalo, de 4 a 7, são característicos de Ciclones bem projetados que possuem uma curva de rendimento curva discretizada em patamares, tratada como curva em “passo de escada”, vulgarmente. Tal valor tende a comportar-se como um separador de partículas com tamanhos superiores a d_{50} , permitindo que os inferiores escapem pelo excesso de fluido escoado. No sentido inverso, valores mais baixos de n são representativos de características opostas e normalmente associadas a condições excessivas de mistura interna e de um *design* aerodinâmico fraco ou com má condição mecânica (paredes rugosas, danificadas/corroídas, furos, juntas de vazamento, escoamento ascendente, depressões na parede e/ou protuberância e a presença de depósitos nas paredes (Hoffmann & Stein, 2008). Neste trabalho será utilizado um valor de $n = 5$ (Montenegro, 2017).

O diâmetro mediano associado à separação de partículas na entrada do Ciclone, $d_{med,in}$, é calculado a partir da seguinte equação

$$d_{med,in} = \begin{cases} d_{50} , se \theta < \theta_{lim} \\ d_{med} - (d_{med} - d_{50in}) \left(1 - \frac{\theta_{lim}}{\theta}\right) , se 0 \leq \left(1 - \frac{\theta_{lim}}{\theta}\right) \leq 0.75 \\ d_{50in} , se \left(1 - \frac{\theta_{lim}}{\theta}\right) > 0.75 \end{cases} \quad (13)$$

O diâmetro de corte relativo à entrada do Ciclone é obtido através de

$$d_{50in} = \sqrt{\frac{18 \mu_f (0.9 \dot{V})}{2A_W (\rho_p - \rho_f) a_{in}}} \quad (14)$$

onde, A_W é a área interior da parte cilíndrica e da metade superior cônica do Ciclone, demonstrada na Figura 5 e obtida a partir da equação (15). a_{in} é a aceleração obtida a partir da equação (16)

$$A_W = \pi \left[2R_c(H_c - Z_c) + (R_c + R_x) \sqrt{\left(\frac{H_c}{2}\right)^2 + (R_c - 0.5(R_c - R_x))^2} \right] \quad (15)$$

$$a_{in} = \frac{v_{\theta in} v_{\theta 2}}{\sqrt{R_{in} R_{2m}}} \quad (16)$$

As equações para o cálculo das variáveis $v_{\theta in}$ e $v_{\theta 2}$ são as (17) e (18), respectivamente.

$$v_{\theta in} = v_{\theta p} \frac{\left(\frac{R_c}{R_{in}}\right)}{\left[1 + \frac{f A_W v_{\theta p} \sqrt{\frac{R_c}{R_{in}}}}{2\dot{V}} \right]} \quad (17)$$

$$v_{\theta 2} = v_{\theta p} \frac{\left(\frac{R_c}{R_2}\right)}{\left[1 + \frac{f A_W v_{\theta p} \sqrt{\frac{R_c}{R_{2m}}}}{2\dot{V}} \right]} \quad (18)$$

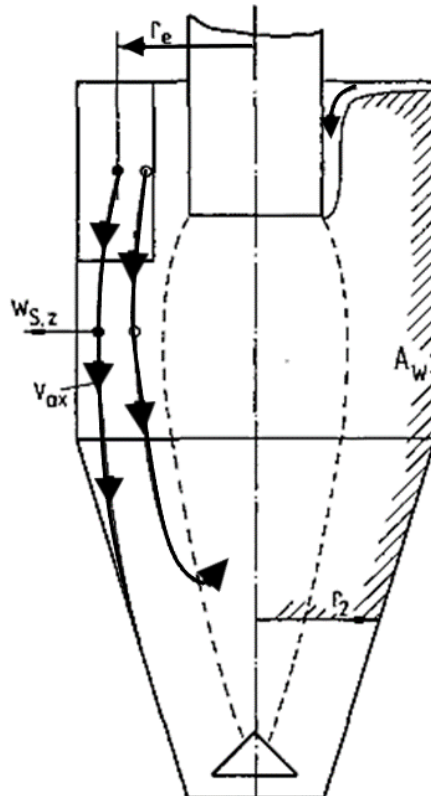


Figura 5 - Componentes axial e radial da partícula na linha de corrente média através do Ciclone e definição da área A_w Adaptado de: Trefz & Muschelknautz, 1993

A componente tangencial da velocidade na superfície da conduta de escape, $v_{\theta}(R_e)$ é dada por

$$v_{\theta}(R_e) = v_{\theta p} \frac{\left(\frac{R_c}{R_e}\right)}{\left[1 + \frac{f A_R v_{\theta p} \sqrt{\frac{R_c}{R_e}}}{2\dot{V}}\right]} \quad (19)$$

em que, A_R é a área total da superficial do Ciclone, obtida da equação (20); $v_{\theta p}$ é a componente tangencial da velocidade na parede do Ciclone, calculada a partir da equação (21); R_{in} é o raio médio de entrada, dado pela equação (23); R_{2m} é o raio médio da parte cônica do Ciclone, calculado pela equação (24); e, f é o coeficiente de atrito, dado pela equação.

$$A_R = \pi \left[R_c^2 - R_e^2 + 2R_c L_c + (R_c - R_x) \sqrt{Z_c^2 + (R_c - R_x)^2} + 2R_e S \right] \quad (20)$$

$$v_{\theta p} = \frac{v_{in} R_{in}}{R_c \alpha} \quad (21)$$

com, v_{in} a velocidade do fluido na conduta de entrada do Ciclone, obtida da equação (22); α_M um coeficiente de estrangulamento à entrada, dado pela equação (25).

$$v_{in} = \frac{\dot{V}}{A_c B_c} \quad (22)$$

$$R_{in} = R_c - \frac{B_c}{2} \quad (23)$$

$$R_{2m} = \frac{R_c + R_x}{2} \quad (24)$$

$$\alpha_M = \frac{1}{\zeta} \left\{ 1 - \sqrt{1 + 4 \left[\left(\frac{\zeta}{2} \right)^2 - \frac{\zeta}{2} \right] \sqrt{1 - \frac{(1 - \zeta^2)(2\zeta - \zeta^2)}{1 + \theta}}} \right\} \quad (25)$$

e por fim, ζ é um parâmetro geométrico definido pela equação (26); e θ é o fator de carga.

$$\zeta = \frac{B_c}{R_c} \quad (26)$$

O cálculo do coeficiente de atrito, f , é feito a partir da seguinte equação

$$f = f_{gás} + 0.25 \left(\frac{R_c}{R_e} \right)^{-0.625} \sqrt{\frac{\eta \theta Fr \rho_f}{0.4 \rho_p^*}} \quad (27)$$

que, devido à sua dependência do rendimento global do Ciclone, é realizado iterativamente.

Na equação (27), η é o rendimento global do Ciclone; Fr representa o número de Froude, uma relação adimensional entre as forças de inércia e as forças gravíticas, obtido pela equação (28).

ρ_p^* é a massa volúmica aparente, considerada no âmbito do presente trabalho como tendo o valor de $0.5 \rho_p$ (Montenegro, 2017); $f_{gás}$ é o coeficiente de atrito relativo ao fluido, considerando-o limpo de partículas em suspensão, calculado pela equação (29).

$$Fr = \frac{v_e}{\sqrt{2 R_e g}} \quad (28)$$

$$f_{gas} = f_l + f_r \quad (29)$$

com,

$$f_l = 0.323 R_{eR}^{-0.623} \quad (30)$$

e,

$$f_r = \left(\log \left(\frac{1.60}{\varepsilon - 5.999 \cdot 10^{-4}} \right)^{2.38} \right)^{-2} \left(1 + \frac{2.25 \cdot 10^5}{R_{eR}^2 (\varepsilon - 5.999 \cdot 10^{-4})^{0.213}} \right) \quad (31)$$

$$R_{eR} = \frac{R_{in} R_m v_{zp} \rho_f}{H_c \mu_f \left[1 + \left(\frac{v_{zp}}{v_{\theta m}} \right)^2 \right]} \quad (32)$$

$$R_m = \sqrt{R_e R_c} \quad (33)$$

$$v_{zp} = \frac{0.9 \dot{V}}{\pi(R_c^2 - R_m^2)} \quad (34)$$

$$v_{\theta m} = \sqrt{v_{\theta p} - v_{\theta}(R_e)} \quad (35)$$

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; R_{eR} é o número de Reynolds associado ao corpo do Ciclone (Trefz & 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 a componente axial da velocidade junto à parede do Ciclone; $v_{\theta m}$ é a componente tangencial da velocidade média entre a parede do Ciclone e a superfície da conduta de saída do fluido; e ε é a rugosidade relativa, considerada igual a 6×10^{-4} .

O termo $\left(\frac{v_{zp}}{v_{\theta m}} \right)^2$ da equação (32), na maioria das aplicações, toma valores pequenos o suficiente para serem desprezados. Esta situação é sobretudo verdadeira para unidades a operar para valores de R_{eR} superiores a 2000 (Hoffmann & Stein, 2008). Esta consideração não será tomada no presente trabalho, uma vez que se trata de uma aproximação e tratando-se de uma ferramenta de cálculo autónomo não existe a necessidade de recorrer a esta aproximação.

2.2.1.1. Leith & Licht (1972)

Este modelo é baseado na suposição de que as partículas não coletadas, num determinado ponto da posição axial, estão totalmente misturadas na direção radial devido à turbulência. Por esse motivo, o tempo de residência da partícula no dispositivo pode ser associado ao tempo que esta necessita para se mover nas direções radial e axial, de modo a atingir a parede. Este princípio é, semi-teoricamente, tratado num conjunto de equações e resulta na seguinte expressão para a eficiência de coleção de partículas:

$$\eta_i = 1 - \exp \left[-2 \left(\frac{G \tau_i Q}{D_c^3} (n + 1) \right)^{\frac{1}{2n+2}} \right] \quad (36)$$

na qual G é um parâmetro geométrico adimensional, n é o expoente do vórtice, e τ_i é o tempo de relaxação. O tempo de relaxação dinâmica, τ , é uma quantidade que representa o tempo no qual uma partícula suspensa num fluido demora a atingir 63% da sua velocidade terminal. A equação (43) admite que é válido o escoamento de Stokes.

O parâmetro geométrico G é expresso em termos das dimensões das famílias do Ciclone e pode ser escrito como:

$$G = \frac{D_c}{A_c^2 B_c^2} \left[2\pi \left(S - \frac{A_c}{2} \right) (D_c^2 - D_e^2) + 4V_{nl,H} \right] \quad (37)$$

$V_{nl,H}$ é o volume anelar relacionado com a penetração do vórtice no Ciclone. Alexander (1949) define o “comprimento natural” como sendo $Z_c - S$. Dependendo do valor de Z , o volume a ser considerado na equação (37) é V_{nl} ou V_H , do seguinte modo

Se $H-S > Z$

$$V_{nl} = \frac{\pi D_c^2}{4} (L_c - S) + \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left(\frac{Z_c + S - L_c}{3} \right) \left(1 + \frac{d_c}{D_c} + \frac{d_c^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_e^2 Z_c}{4} \quad (38)$$

Se $H-S < Z$

$$V_H = \frac{\pi D_c^2}{4} (L_c - S) + \left(\frac{\pi D_e^2}{4} \right) \left(\frac{H_c - L_c}{3} \right) \left(1 + 1 + \frac{D_x}{D_c} + \frac{D_x^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_e^2 (H_c - S)}{4} \quad (39)$$

O diâmetro do eixo central do Ciclone, d_c , é dado por

$$d_c = D_c - (D_c - D_x) \left(\frac{S + Z - L_c}{H_c - L_c} \right) \quad (40)$$

O comprimento natural do vórtice, Z , e o expoente do vórtice, n , podem ser estimados pelas seguintes expressões

$$Z = 2.3 D_e \left(\frac{D_c^2}{A_c B_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (41)$$

$$n = 1 - [1 - 0.67(D_c^{0.14})] \left(\frac{T}{283} \right)^{0.3} \quad (42)$$

A equação (41), embora habitualmente utilizada, não é totalmente satisfatória, pois não demonstra a dependência de Z_c na velocidade do gás na entrada, o que foi experimentalmente evidenciado por Hoffmann et al. (1995).

O tempo de relaxação, τ_i , para um escoamento de Stokes é dado por

$$\tau_i = \frac{\rho_p d_{pi}^2}{18 \mu_f} \quad (43)$$

Caso não se verifiquem as condições necessárias para que seja um escoamento de Stokes, τ_i é obtido por

$$\tau_i = \frac{4 \rho_p d_{pi}^2}{3 \mu_f C_{DS} Re_p} \quad (44)$$

O parâmetro G , é por vezes expresso em termos de K_a , K_b e K_c como

$$G = \frac{8 K_c}{K_a^2 K_b^2} \quad (45)$$

com,

$$K_a = \frac{A_c}{D_c}; K_b = \frac{B_c}{D_c}; e K_c = \frac{2V_s + V_{nl,H}}{D_c^3} \quad (46)$$

V_s é o volume anular entre o plano central do ducto de entrada e o fundo do ducto de saída, S , sendo dado por

$$V_s = \pi \left(S - \frac{A_c}{2} \right) \left(\frac{D_c^2 - D_e^2}{4} \right) \quad (47)$$

2.2.1.2. Iozia & Leith (1989)

Tendo como base o modelo de Barth apresenta, no entanto, novas equações para o cálculo do comprimento do eixo central e do diâmetro do Ciclone, assim como da componente tangencial máxima da velocidade do fluido. Considera que o movimento global do gás no Ciclone é formado por dois vórtices, um de movimento axial descendente e um interno de movimento ascendente sendo expelido pelo ducto de saída superior. No vórtice exterior, a velocidade tangencial do gás aumenta com a diminuição do raio, atingindo o máximo no raio do núcleo central, definido pelo prolongamento do ducto de saída do gás. No vórtice interior a velocidade tangencial do gás diminui com a diminuição do raio, como se se tratasse da rotação de um corpo sólido (Iozia & Leith, 1989). Estas alterações inferem nas dependências destas variáveis com as dimensões do Ciclone (Charisiou et al., 2011). Na equação (48) é apresentado o cálculo do rendimento parcial:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_{p_i}} \right)^n} \quad (48)$$

O valor de β foi encontrado experimentalmente, ajustando uma regressão em função das dimensões do Ciclone e do d_{50} e descrito pela seguinte equação:

$$\beta = \exp \left\{ 0.62 - 0.87 \ln(d_{50} \times 10^2) + 5.21 \ln \left(\frac{A_c B_c}{D_c^2} \right) + 1.05 \left[\ln \left(\frac{A_c B_c}{D_c^2} \right) \right]^2 \right\} \quad (49)$$

O diâmetro de corte d_{50} é calculado por:

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

em que $v_{\theta máx}$ é a componente tangencial máxima do fluido e é dada por

$$v_{\theta máx} = 6.1 v_c \left(\frac{A_c B_c}{D_c^2}\right)^{0.61} \left(\frac{D_e}{D_c}\right)^{-0.74} \left(\frac{H_c}{D_c}\right)^{-0.33} \quad (51)$$

L^* é a altura do núcleo, ou seja, o eixo central do Ciclone

$$L^* = \begin{cases} H_c - S, & D_{núcleo} \leq D_x \\ (H_c - S) - \left(\frac{Z_c}{\frac{D_c}{D_x} - 1}\right) \left(\frac{D_{núcleo}}{D_x} - 1\right), & D_{núcleo} > D_x \end{cases} \quad (52)$$

onde $D_{núcleo}$ é o diâmetro do núcleo do Ciclone previsto por este modelo, calculado por

$$D_{núcleo} = 0.47 D_c \left(\frac{A_c B_c}{D_c^2}\right)^{-0.26} \left(\frac{D_e}{D_c}\right)^{1.4} \quad (53)$$

2.2.2. Modelos de “Tempo de Voo”

2.2.2.1. Rosin, Rammler, Intelmann/Lapple (1949)

Desenvolvido inicialmente por Rosin, Rammler e Intelmann, foi aprofundado por Lapple. O rendimento é calculado pela equação (54), que se baseia na curva de rendimento generalizada, observada na Figura 6 (Theodore & de Paola, 1980).

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_{pi}}\right)^2} \quad (54)$$

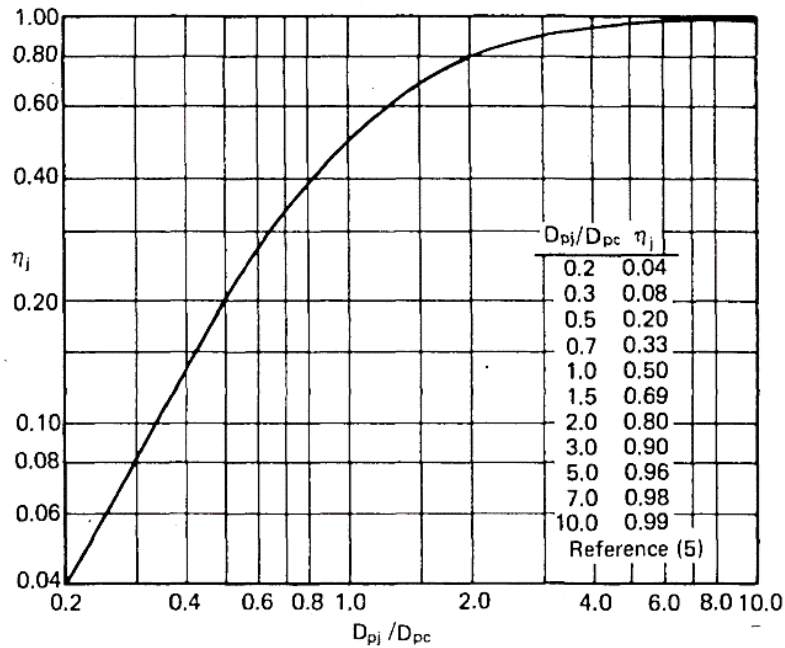


Figura 6 - Rácio do diâmetro de partículas (d_{pi}/d_{50}) vs Rendimento parcial Fonte: Theodore & de Paola, 1980

O diâmetro de corte é calculado pela equação (55), em que N_s é o número de espiras que a mistura percorre no dispositivo sendo calculado por (56) (Gimbun et al., 2004).

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9 \mu_f B_c}{2\pi N_s v_c (\rho_p - \rho_f)}} \quad (55)$$

$$N_s = \frac{1}{A_c} \left(L_c + \frac{Z_c}{2} \right) \quad (56)$$

2.2.2.2. Koch & Licht (1977)

A teoria de coleção de Koch & Licht reconheceu a inerente natureza turbulenta dos Ciclones e a distribuição dos tempos de residência do gás no Ciclone. Descreve o movimento das partículas na região de entrada e a coleção com as seguintes premissas (Gimbun et al., 2004):

- A velocidade tangencial da partícula iguala a velocidade tangencial do escoamento de gás. Ou seja, não existe escorregamento entre a partícula e o gás na direção tangencial;

- A velocidade tangencial relaciona-se com o raio do Ciclone por $uR^n = constante$

Neste modelo o cálculo do rendimento parcial de separação é calculado por

$$\eta_i = 1 - \exp \left\{ -2 \left[\frac{G \tau_i \dot{V}}{D_c^3} (n + 1) \right]^{\frac{0.5}{n+1}} \right\} \quad (57)$$

n está relacionado com o vórtice da seguinte forma:

$$n = 1 - \left[1 - \frac{(39.4 D_c)^{0.14}}{2.5} \right] \left[\frac{T_f + 273.15}{293.15} \right]^{0.3} \quad (58)$$

Em que T_f é a temperatura do fluido e τ_i é o termo de relaxação dinâmica das partículas de diâmetro d_{pi} , por isso, um parâmetro conhecido do regime de Stokes e dado por:

$$\tau_i = \frac{4}{3} \frac{\rho_p d_{pi}^2}{\mu_f C_{DS} Re_p} \quad (59)$$

G é um fator relacionado com a configuração do Ciclone, ou seja, uma relação geométrica

$$G = \frac{8 K_c}{K_a^2 K_b^2} \quad (60)$$

K_a, K_b e K_c são fatores geométricos, obtidos pelas equações (61).

$$K_a = \frac{A_c}{D_c}; K_b = \frac{B_c}{D_c}; K_c = \begin{cases} \frac{2V_s + V_H}{2D_c^3}, & l \leq (H_c - S) \\ \frac{2V_s + V_{cn}}{2D_c^3}, & l > (H_c - S) \end{cases} \quad (61)$$

l é o comprimento natural do Ciclone, calculado por:

$$l = 2.3D_e \left(\frac{D_c^2}{A_c B_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (62)$$

V_s é o volume do Ciclone entre o início da conduta de saída dos gases limpos até meio da conduta de entrada, obtido por:

$$V_s = \frac{\pi \left(S - \frac{A_c}{2} \right) (D_c^2 D_e^2)}{4} \quad (63)$$

V_H é o volume do Ciclone abaixo da conduta de saída dos gases limpos, calculado por

$$V_H = \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) (L_c - S) + \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left(\frac{Z_c}{3} \right) \left(1 + \frac{D_x}{D_c} + \frac{D_x^2}{D_c^2} \right) - \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) (H_c - S) \quad (64)$$

V_{cn} é o volume do Ciclone para o comprimento natural, D_n , calculado por

$$V_{cn} = \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) (L_c - S) + \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left(\frac{l + S - L_c}{3} \right) \left(1 + \frac{D_n}{D_c} + \frac{D_n^2}{D_c^2} \right) - \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) l \quad (65)$$

D_n é o diâmetro natural do núcleo do Ciclone, obtido por

$$D_n = D_c - (D_c - D_x) \left[\frac{l + S - L_c}{Z_c} \right] \quad (66)$$

2.2.2.3. Dietz (1981)

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

Região de entrada - espaço anelar em torno da conduta de saída do fluido;

Região descendente - correspondente ao vórtice abaixo do nível da conduta de saída do fluido;

Região do núcleo - formada pelo prolongamento da conduta de saída até ao fundo do Ciclone.

Dentro de cada região o transporte radial de partículas é assumido como sendo dominado por uma mistura turbulenta. Assim permite produzir um perfil uniforme e radial de concentração de partículas não separadas em cada região. Para aproximar a distribuição temporal da permanência de sólidos no Ciclone, o modelo tem em conta a troca de partículas entre as regiões de escoamento descendente e o núcleo (Dirgo & Leith, 1985). Para completar o modelo é necessário especificar o tipo de padrão de escoamento no Ciclone. A velocidade radial para a região do núcleo é considerada constante, apenas função de Z que é a cota desde o *terminus* do corpo cilindro até ao comprimento S , sendo neste limite definido o zero do referencial, apresentado na Figura 3:

$$U_r(z) = U_{r0} = \frac{Q v_0}{2\pi R_v l} \quad (67)$$

O caudal axial é dado por

$$Q_v(z) = Q_{v0} \left(1 - \frac{z}{l}\right) \quad (68)$$

A velocidade tangencial não varia axialmente (Stairmand, 1951 citado por Dietz, 1981). A dependência radial da velocidade tangencial é dada por uma forma modificada de um vórtice livre num fluido invíscido (Alexander, 1949 e Caplan, 1968 citados por Dietz, 1981). O raio da região do núcleo é igual ao do ducto de saída (Caplan, 1968 e Leith & Licht, citado por Dietz, 1981; ter Linden, 1949).

O cálculo do rendimento é dado por:

$$\eta_i = 1 - \frac{c_3(z=0)_i}{c_0} \quad (69)$$

Como referido acima, é definido pela relação entre o caudal mássico de sólidos transportados e o caudal mássico do fluido transportador. Se o seu valor for inferior a 10 o transporte diz-se em fase diluída, se estiver no intervalo entre 10 e 100 diz-se que o transporte está em fase densa (Pinho, 2005). Em ambas as fases, diluída ou densa, devem-se considerar regimes de escoamento estável, transição e instável (Klinzing et al., 2010).

c_0 é a concentração de partículas à entrada do Ciclone, dada por

$$c_0 = \frac{\dot{m}_p}{\dot{V}} = \theta \frac{\dot{m}_f}{\dot{V}} \quad (70)$$

c_3 é a concentração de partículas na região 3, no início da conduta de saída, obtida pelas equações (71) a (74).

$$c_3(z=0)_i = c_1(z=0)_i \left[\frac{A_i - \beta_i}{C_i} \right] \quad (71)$$

$$A_i = \frac{2\pi R_c l U_{pp}(z=0)_i}{\dot{V}} \quad (72)$$

$$c_i = \frac{2\pi R_e l U_{pv}(z=0)_i}{\dot{V}} \quad (73)$$

$$\beta_i = \frac{1}{2}[A_i - 1 - C_i] + \frac{1}{2}[(C_i - A_i - 1)^2 + 4A_i C_i]^{\frac{1}{2}} \quad (74)$$

c_1 é a concentração de partículas na região 1 e calculada por

$$c_1(z=0)_i = c_0 \exp \left[\frac{-2\pi R_c U_{pp}(z=0)_i \left(S - \frac{A_c}{2} \right)}{\dot{V}} \right] \quad (75)$$

U_{pp} é a velocidade das partículas junto da parede do Ciclone, obtida por:

$$U_{pp}(z=0)_i = \frac{2 \rho_p \left(\frac{d_{pi}}{2} \right)^2 v_{\theta p}(z=0)^2}{9 \mu_f R_c} \quad (76)$$

U_{pv} é a velocidade das partículas junto da conduta do vórtice, calculada por:

$$U_{pv}(z=0)_i = \frac{2 \rho_p \left(\frac{d_{pi}}{2}\right)^2 v_{\theta v}(z=0)^2}{9 \mu_f R_c} \quad (77)$$

onde, $v_{\theta p}$ é a componente tangencial da velocidade do fluido junto à parede do Ciclone, calculada por:

$$v_{\theta p}(z=0) = v_{\theta v} \left(\frac{R_c}{R_e}\right)^n \quad (78)$$

e $v_{\theta v}$ é a componente tangencial da velocidade do fluido junto ao vórtice do Ciclone, obtido pela seguinte equação:

$$v_{\theta v}(z=0) = v_{\theta p} \left(\frac{R_c}{R_e}\right)^n \quad (79)$$

2.2.3. Modelo Híbridos

2.2.3.1. Mothes & Löffler (1984)

Como é típico dos modelos híbridos, existe uma combinação de métodos de dimensionamento dos modelos de “órbita de equilíbrio” e de “tempo de voo”. Embora ambos os modelos apresentem respostas bastante razoáveis, o tratamento da permuta da partícula entre o interior e o exterior do vórtice, no modelo de Dietz, explanado acima, apresenta algumas dificuldades (Clift et al., 1991).

No modelo de dimensionamento de Mothes e Löffler o Ciclone é dividido em quatro regiões fundamentais, acrescentando uma ao modelo de Dietz, na entrada da conduta de saída, de fluido, do Ciclone. Para uma visualização das divisões realizadas pelos autores é recomendada a revisão do documento original (Mothes & Löffler, 1984). O rendimento é calculado por

$$\eta_i = 1 - \frac{c_4(S)}{c_0} \quad (80)$$

em que c_0 é calculado pela equação (70) e é a concentração de partículas à entrada do Ciclone.

$c_4(S)$ é a concentração de partículas na região 4, na entrada da conduta de saída do Ciclone, obtida a partir da seguinte equação

$$c_4(S) = R_1 \left(\frac{m_1 - A}{B} \right) + R_2 \left(\frac{m_2 - A}{B} \right) \quad (81)$$

R_1 e R_2 são as constantes da solução geral das equações diferenciais do balanço mássico no Ciclone que, no caso de não ocorrer a reentrada de partículas na região inferior do Ciclone, região 3, é dado por:

$$R_1 = c_1(S) ; R_2 = 0 \quad (82)$$

m_1 e m_2 são expoentes no sistema de equações diferenciais do balanço mássico nas regiões 2 e 3, sendo calculados por:

$$m_{1,2} = \frac{A + D}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A + D}{2} \right)^2 - (A D - B C)} \quad (83)$$

Para o cálculo das constantes A, B, C e D é necessário conhecer a velocidade de deslizamento vertical descendente das partículas, junto das paredes confinadoras do Ciclone. Esta velocidade, $W(R_c^*)$, é calculada por

$$W(R_c^*)_i = \frac{\rho_p d_{pi}^2 v_{\theta}(R_c^*)^2}{18 \mu_f R_c^*} \quad (84)$$

Junto à parede do tubo de saída do fluido, a velocidade é obtida por

$$W(R_e)_i = \frac{\rho_p d_{pi}^2 v_{\theta}(R_e)^2}{18 \mu_f R_e} \quad (85)$$

As restantes componentes radiais da velocidade de deposição são apresentadas nas seguintes equações

$$v_r(R_e) = \frac{\dot{V}}{2\pi R_e (H_c - L_c)} \quad (86)$$

$$v_r(R_c) = 0 \quad (87)$$

O cálculo das constantes referidas acima (A, B, C e D) dependem da comparação entre $W(R_e)_i$ e $v_r(R_e)$. Assim,

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

$$A = \frac{2\pi R_c^* W(R_c^*) Z_c}{\dot{V}} - \frac{2\pi R_e [W(R_e) - v_r(R_e)] Z_c}{\dot{V}} + \frac{2\pi R_e D_p Z_c}{\dot{V} (R_c^* - R_e)} - 1 \quad (88)$$

$$B = \frac{2\pi R_e D_p Z_c}{\dot{V} (R_c^* - R_e)} \quad (89)$$

$$C = \frac{2\pi R_e D_p Z_c}{\dot{V} (R_c^* - R_e)} - \frac{2\pi R_e [W(R_e) - v_r(R_e)] Z_c}{\dot{V}} \quad (90)$$

$$D = B - 1 \quad (91)$$

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

$$A = \frac{2\pi R_c^* W(R_c^*) Z_c}{\dot{V}} + \frac{2\pi R_e D_p Z_c}{\dot{V} (R_c^* - R_e)} - 1 \quad (92)$$

$$B = \frac{2\pi R_e D_p Z_c}{\dot{V} (R_c^* - R_e)} - \frac{2\pi R_e [W(R_e) - v_r(R_e)] Z_c}{\dot{V}} \quad (93)$$

$$C = \frac{2\pi R_e D_p Z_c}{\dot{V} (R_c^* - R_e)} \quad (94)$$

$$D = B - 1 \quad (95)$$

Nas quais D_p é a difusividade das partículas, R_c^* é o raio equivalente que é obtido da equação (96).

$$R_c^* = \sqrt{\frac{Vol_{ciclone}}{\pi H_c}} \quad (96)$$

Vol_{cic} é o volume real do Ciclone obtido por

$$Vol_{cic} = \pi R_c^2 L_c + \frac{\pi Z_c}{3} (R_c^2 + R_c R_x + R_x^2) \quad (97)$$

A componente tangencial da velocidade do fluido junto ao vórtice é obtida por

$$v_{\theta}(R_e) = \frac{v_{\theta p}}{\frac{R_e}{R_c} \left[1 + \phi \left(1 - \frac{R_e}{R_c} \right) \right]} \quad (98)$$

E a componente tangencial da velocidade do fluido junto da parede de raio equivalente por

$$v_{\theta}(R_c^*) = \frac{v_{\theta p}}{\frac{R_c^*}{R_c} \left[1 + \phi \left(1 - \frac{R_c^*}{R_c} \right) \right]} \quad (99)$$

O fator de perda de carga de momento angular, ϕ , que caracteriza a troca de momento entre a parede e a corrente gasosa é calculado pela equação (100)

$$\phi = \frac{v_{\theta p}}{v_{zm}} \left(\xi_D + \frac{\xi_K}{\sin(\varphi)} \right) \quad (100)$$

γ é o ângulo que as paredes do Ciclone na zona cônica fazem com o seu eixo.

$$\gamma = \arctan \left(\frac{R_c - R_x}{Z_c} \right) \quad (101)$$

$$0.0065 \leq \xi_D = \xi_K = \xi_C = \xi \leq 0.0075 \quad (102)$$

onde: 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 relativo na parte cilíndrica do Ciclone; e ξ_K é o coeficiente de atrito relativo na parte cônica do Ciclone.

A componente axial média da velocidade do fluido no corpo do Ciclone, v_{zm} , é calculada pela seguinte equação

$$v_{zm} = \frac{\dot{V}}{\pi R_c^2} \quad (103)$$

$$v_{\theta p} = \frac{v_{zm}}{\xi H_z^*} \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \xi H_z^* \frac{v_{\theta p}^*}{v_{zm}}} - \frac{1}{2} \right] \quad (104)$$

$v_{\theta p}^*$ é a componente tangencial da velocidade junto à parede do Ciclone no caso de não existir atrito, e H_z^* é um parâmetro geométrico do Ciclone.

$$v_{\theta p}^* = \frac{v_{zm} \pi R_c^2}{A_c B_c \beta^*} \quad (105)$$

$$H_z^* = \frac{A_c}{R_c} \left[\frac{2\pi - \arccos\left(\frac{B_c}{R_c} - 1\right)}{2\pi} - 1 \right] + \frac{L_c}{R_c} \quad (106)$$

E por fim, β^* que é um parâmetro geométrico relativo à entrada do Ciclone.

$$\beta^* = -0.204 \frac{B_c}{R_c} + 0.889 \quad (107)$$

2.2.3.2. Li & Wang (2000)

O modelo desenvolvido por Li & Wang é um modelo que inclui a saltitação, ou seja, a reentrada de partículas vindas da parede do Ciclone, que já teriam sido separadas e estariam a escorregar pela parede do Ciclone; e ainda a difusão turbulenta junto à parede. Para a distribuição de partículas no Ciclone foi obtida uma expressão analítica de duas dimensões espaciais. Os autores afirmam que comparando o seu modelo com outras teorias, o modelo de Leith & Licht está mais próximo para partículas de maiores dimensões e que para partículas de menor diâmetro assemelha-se mais aos modelos de Lapple e Dietz (Enliang & Yingmin, 1989). Para o desenvolvimento do modelo foram consideradas três premissas (Gimbun et al., 2004)

- A velocidade radial das partículas e o perfil de concentração das partículas não é constante para partículas não coletadas no Ciclone;

- As condições fronteira, considerando o coeficiente de difusão turbulenta e a reentrada de partículas por saltitação na parede do Ciclone são: para $\theta=0$, $c = c_0$; e para $r=D/2$, $D_r \frac{\partial c}{\partial r} = (1 - \alpha)\omega c$

- A velocidade tangencial é relacionada com o raio do Ciclone a partir de $uR^n = constante$

O cálculo do rendimento é feito por:

$$\eta_i = 1 - \exp(-\lambda_i \omega) \quad (108)$$

Em que ω é a coordenada angular, calculada por:

$$\omega = \frac{2\pi (S + l)}{A_c} \quad (109)$$

o comprimento natural do Ciclone, l , é definido por Alexander, em 1949 e citado por Enliang & Yingmin, (1989), que representa a maior distância de gás em rotação abaixo do ducto de saída e calculado por:

$$l = 2.3 D_e \left(\frac{D_c^2}{A_c B_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (110)$$

No entanto, se $l > H_c$, l será calculado por:

$$l = H_c - S \quad (111)$$

A variável λ_i da equação (43) 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 difusidade turbulenta. É calculado por:

$$\lambda_i = \frac{(1 - \alpha) K_i v_r(R_c)_i}{D_{rp} R_c^n} \quad (112)$$

sendo α calculado pela equação (2) e n pela equação (58). D_{rp} representa a difusidade das partículas sendo calculado pela seguinte equação:

$$D_{rp} = 0,052 R_{in} v_{\theta p} \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (113)$$

onde $f = 0.02$ (Enliang & Yingmin, 1989) sendo R_{in} calculado pela equação da teoria de Muschelknautz em que:

$$R_{in} = R_c - \frac{B_c}{2} \quad (114)$$

A componente tangencial da velocidade do fluido junto à parede do Ciclone, $v_{\theta p}$ é calculada por:

$$v_{\theta p} = \frac{(1-n) \dot{V}}{B_c (R_c^{1-n} - R_e^{1-n}) R_c^n} \quad (115)$$

$$v_r(R_c)_i = \frac{(\rho_p - \rho_f) v_{\theta p}^2 d_{pi}^2}{18 \mu_f R_c} \quad (116)$$

$$K_i = \frac{(1-n) (\rho_p - \rho_f) d_{pi}^2 \dot{V}}{18 \mu_f B_c (R_c^{1-n} - R_e^{1-n})} \quad (117)$$

2.2.3.1. Shahraki (2003)

Este modelo procura a previsão dos efeitos das dimensões geométricas de Ciclone de entrada tangencial, na sua *performance* operacional, ou seja, no seu rendimento de separação. As suas alterações foram comprovadas por ensaios experimentais. Neste estudo são analisados trabalhos anteriores de investigação para identificar os parâmetros interdependentes e, assim, conhecer melhor as suas características.

Começando pelo diâmetro crítico de partículas a serem coletadas, isto é, o tamanho menor, em teoria, a poder ser separado do fluxo de gás. O ponto de partida foi a teoria de Rosin, Rammler & Intelmann, que o definem como

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9 \mu_f B_c}{\pi N v_{in} (\rho_p - \rho_f)}} \quad (118)$$

As desvantagens apontadas a esta definição são:

- Assume uma eficiência de separação de 0% para partículas com diâmetro menor a D_{pc} e uma eficiência de separação global de 100% para partículas maiores. Na prática, a diferença na curva não é tão acentuada.

- Na equação, N é um parâmetro desconhecido. Para Ciclones proporcionais aos utilizados por Rosin-Rammler, é recomendado um N igual a 5. Para outros Ciclones permanece desconhecido.

Como apresentado acima, Lapple corrigiu estas suposições e apresentou o parâmetro D_{50} . Mais tarde, Zenz & Kallen (1974) citado por Shahraki, em 2003, verificou que N não é parâmetro fixo, mas que varia com o fluxo de fluido e com a concentração de partículas. A variação de N com as condições experimentais condiciona o valor do tamanho do D_{pc} . Foi, por isso, introduzido o fator de correção λ , inserido no numerador

na equação (118). Foi derivada uma correlação empírica de λ , que relaciona a velocidade de entrada v_i , com ρ_p e os espaços vazios no volume do Ciclone. No entanto, esta solução é de difícil implementação e impraticável, uma vez que é difícil de medir quando a concentração de partículas difere na alimentação do Ciclone.

Walas (1990), definiu o diâmetro crítico da seguinte forma

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9 \mu_f B_c}{4\pi N v_{in} (\rho_p - \rho_f)}} \quad (119)$$

Na qual N tem a seguinte expressão

$$N = v_i [0.1079 - 0.00077 v_i + 1.924 \times 10^{-6} v_i^2] \quad (120)$$

v_i é a velocidade de entrada de fluido no Ciclone em ft/s.

Chegando às alterações apresentadas por Shahraki, N terá de ter uma grande dependência das dimensões geométricas do Ciclone. Com essa ideia presente, a equação para o seu cálculo é

$$N = \left(\frac{D_c^2 L_c - D_e^2 S}{4(A_c B_c) D_c} \right) \left(\frac{Z_c D_c}{L_c \bar{D} \sin^2(\gamma)} + 1 \right) \left(\frac{C_p}{C_i} \right) \quad (121)$$

Em que: C_i é a concentração de partículas na entrada do Ciclone; C_p é a concentração de partículas no volume do Ciclone; e \bar{D} é o diâmetro cilíndrico equivalente da secção cónica e dado por

$$\bar{D} = \frac{D_c - D_x}{\ln\left(\frac{D_c}{D_x}\right)} \quad (122)$$

Analisando a equação (121), observa-se que qualquer mudança nas dimensões geométricas do Ciclone que resulte num valor de N maior, levará a um aumento da eficiência de separação. Quando a mistura, gás-partículas, é muito pobre, pode ser assumido que o gás para o Ciclone é “limpo” (*clean*), e assim, pode ser escrito

$$N_{clean} = \left(\frac{D_c^2 L_c - D_e^2 S}{4(A_c B_c) D_c} \right) \left(\frac{Z_c D_c}{L_c \bar{D} \sin^2(\gamma)} + 1 \right) \quad (123)$$

e, combinando as equações (118) e (123) obtemos

$$N = N_{clean} \left(\frac{C_p}{C_i} \right) = \lambda N_{clean} \quad (124)$$

É concluído que o fator λ é apenas um rácio da concentração de partículas na entrada e no volume livre do Ciclone. Uma análise mais detalhada mostra que este é um rácio do tempo médio de residência das partículas com o tempo médio de residência do gás limpo.

Devido à dificuldade analítica de determinar C_p , a forma mais fácil de determinar λ é contar o número de revoluções da partícula, no Ciclone, e dividindo por N_{clean} , determinado pela equação (123). Para mistura limpas, λ é aproximadamente 1 e N pode ser determinado pela equação (123), para uso na equação (118) e

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9 \mu_f B_c}{2\pi N v_{in} (\rho_p - \rho_f)}} \quad (125)$$

No que diz respeito à eficiência de coleção, η , Shahraki afirma que a teoria habitualmente utilizada é a apresentada por Leith & Licht, na qual é assumida que a aceleração radial e a velocidade radial no Ciclone podem ser desprezadas. Esse modelo considera que o fluxo de gás é turbulento assumindo que, a qualquer altura do Ciclone, as partículas não coletadas são completa e uniformemente misturadas. O tempo de residência média para o gás no Ciclone é determinado através das dimensões do Ciclone e caudal de gás. A expressão resultante é

$$\eta = 1 - \exp \left[-2(C_s \Psi)^{\frac{1}{2n+2}} \right] \quad (126)$$

n é apresentado por Alexander (1949) como sendo

$$n = 1 - \left[(1 - 0.67 D_c^{0.14}) \left(\frac{T}{283} \right)^{0.3} \right] \quad (127)$$

T é a temperatura em kelvin e o diâmetro (D_c) em metros.

Ψ é a combinação da influência das propriedades das partículas e do gás, um parâmetro de inércia modificado, dado por:

$$\Psi = \frac{\rho_p d_{pi}^2 v_{in} (n + 1)}{18 \mu_f D_c} \quad (128)$$

O parâmetro C_s , da equação (126), é um parâmetro geométrico adimensional que depende apenas dos oito rácios dimensionais do Ciclone. Para cada tipologia de *design* de Ciclone o seu valor é único. Quanto maior for este parâmetro, maior será a sua eficiência.

$$C_s = \frac{\pi D_c^2}{A_c B_c} \left\{ 2 \left[1 - \left(\frac{D_e^2}{D_c^2} \right) \right] \left(\frac{S}{D_c} - \frac{A_c}{2D_c} \right) + \left(\frac{S+l-L_c}{D_c} \right) \left(1 + \frac{d_c}{D_c} + \frac{d_c^2}{D_c^2} \right) + \left(\frac{L_c}{D_c} \right) - \left(\frac{D_e}{D_c} \right)^2 \left(\frac{l}{D_c} \right) - \left(\frac{S}{D_c} \right) \right\} \quad (129)$$

l é obtido por

$$l = 2.3 D_e \left[\frac{D_c^2}{A_c B_c} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (130)$$

no entanto, se $l > Z_c + L_c - S$ tomará o valor de $Z_c + L_c - S$.

quanto a d_c :

$$d_c = D_c - \frac{(D_c - D_x)(S+l-L_c)}{Z_c} \quad (131)$$

À semelhança do diâmetro de corte, Shahraki efetuou alterações à equação do cálculo do rendimento. Assim, este valor é obtido por

$$\eta = 1 - \exp \left[-2(\lambda C_s \Psi)^{\frac{1}{2n+2}} \right] \quad (132)$$

devido à extensão e ao processo tedioso para o cálculo de C_s , e ainda à origem pouco clara deste parâmetro, é aconselhado utilizar o parâmetro ΔH , obtido pela equação (172), invés de C_s . Sendo ΔH relacionado com a perda de carga, será abordado mais abaixo.

As razões que suportam a troca de parâmetros são as seguintes:

- ΔH , para gás limpo é uma função puramente geométrica das dimensões do Ciclone;
- Relaciona a perda de carga com a eficiência do Ciclone;
- Para um determinado *design*, um Ciclone com um valor maior de ΔH será mais eficiente do que um com um valor de ΔH menor. Na prática, tem sido observado que quando a eficiência de um Ciclone aumenta, a perda de carga também aumenta (Shahraki, 2003).

2.3. Modelos de Cálculo de Perda de Carga

O funcionamento de um Ciclone envolve o consumo de energia relacionado com a perda de carga sofrida pelo escoamento. Como referido acima, a complexidade e turbulência do escoamento não permitem uma quantificação analítica da perda de carga. Por este motivo, adotam-se soluções de natureza semi-empírica, embora não exista nenhuma expressão que possa ser utilizada na generalidade. Uma estimativa o mais precisa possível da perda de carga é importante, pois permite equacionar os custos de funcionamento do Ciclone. Geralmente a perda de carga de um separador ciclónico representa a diferença de pressão estática entre a entrada P_{se} e saída P_{ss} e pode ser descrita pela equação (J. Chen & Shi, 2007)

$$\Delta p = P_{se} - P_{ss} \quad (133)$$

Janeiro Borges & Galvão Teles, (1983) propõe a seguinte relação para a perda de carga:

$$\Delta p = \xi \frac{1}{2} \rho_f v_c^2 \quad (134)$$

Onde ξ é um coeficiente em função de Re , de θ , de $\Delta\dot{V}/\dot{V}$ e ainda da geometria do Ciclone. Re é o número de Reynolds, calculado por $Re = \frac{\rho_f u_\tau^2 D_c}{2 \rho_p v^2 d_p}$ em que ρ_f e ρ_p são a massa volúmica do fluido e da partícula, respetivamente. u_τ é a velocidade de fricção calculada por $u_\tau = (\tau_0/\rho_f)^{\frac{1}{2}}$, em que τ_0 representa a tensão tangencial junto à parede do Ciclone.

2.3.1. Shepherd & Lapple (1939)

O modelo descrito por Shepherd & Lapple (1939) foi testado por Miller & Lissman, comprovando os seus resultados para Ciclones de dimensões apresentadas na Tabela 1 como modelo *Expedito*. O desenvolvimento deste modelo foi empírico, visto que se trata de um modelo desenvolvido para corresponder aos resultados obtidos com o aparato laboratorial e correspondente procedimento bem descritos em Shepherd & Lapple, (1939). A perda de carga por fricção é independente do Ciclone e a perda total de

carga é equivalente à energia necessária para produzir uma espiral interior de alta velocidade. Assim

$$\Delta p = \xi_{LAPPLE} \frac{1}{2} \rho_f v_c^2 \quad (135)$$

$$\xi_{LAPPLE} = 16 \frac{A_c B_c}{D_c^2} \quad (136)$$

2.3.2. Miller & Lissman (1940)

O modelo de Miller & Lissman, publicado em 1940, referenciado em Schnelle & Brown, (2002) onde é descrito como mais uma tentativa de aproximação do cálculo de perda de carga pelos separadores ciclônicos, usando:

$$\Delta p = \xi_{MILLER} \frac{1}{2} \rho_f v_c^2 \quad (137)$$

em que

$$\xi_{MILLER} = 2.2 \left(\frac{D_c}{D_e} \right)^2 + 1 \quad (138)$$

2.3.3. Stairmand (1949)

O modelo de Stairmand, publicado em 1949, referenciado por Hoffmann & Stein (2008), calcula a distribuição de velocidades no Ciclone a partir de um balanço do momento angular. Com o valor obtido é estimada a perda de carga combinando a perda de carga na entrada e na saída e a pressão estática no vórtice. Na prática, apenas uma pequena parte da diminuição da pressão estática da parte exterior do vórtice para o interior pode ser recuperada, o que pode ser contabilizada como totalmente perdida.

$$\Delta p = \xi_{STAIRMAND} \frac{1}{2} \rho_f v_c^2 \quad (139)$$

em que

$$\xi_{STAIRMAND} = 1 + 2 q^2 \left(\frac{2(D_c - B_c)}{D_e} - 1 \right) + 2 \left(\frac{4A_c B_c}{\pi D_e^2} \right)^2 \quad (140)$$

com

$$q = \frac{-\left(\frac{D_e}{2(D_c - B_c)}\right)^{0.5} + \left(\frac{D_e}{2(D_c - B_c)} + \frac{4 A_R G}{A_c B_c}\right)^{0.5}}{\left(\frac{4 A_R G_f}{A_c B_c}\right)} \quad (141)$$

A_R representa a área total da superfície interior do Ciclone, apresentada por Muschelknautz, sendo calculado por

$$A_R = \pi \left[R_c^2 - R_e^2 + 2 R_c L_c + (R_c - R_x) \sqrt{Z_c^2 + (R_c - R_x)^2} + 2 R_e S \right] \quad (142)$$

G_f é um fator de perda de carga relacionado com a fricção na parede do Ciclone, sendo definido por:

$$G_f = \frac{f}{2} = 0.005 \quad (143)$$

2.3.4. Barth (1956)

A abordagem à perda de carga por Barth (1956) está referenciada em Hoffmann & Stein (2008). Barth estimou a perda de carga como a soma de duas contribuições parciais. A perda de carga do corpo do Ciclone e do vórtice, resultando em

$$\Delta p = \Delta p_{corpo} + \Delta p_{vórtice} \quad (144)$$

Barth determinou, também, que as perdas de carga na entrada podem ser minimizadas com o correto 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 até ao fundo, linha representada na Figura 4.a), ou seja, considerou a diminuição da pressão total como consequência da perda de velocidade do turbilhão nesta superfície imaginária.

O parâmetro v_e é calculado pela equação (5), desenvolvida por Barth (1956) e $v_\theta(R_e)$ é calculado pela equação desenvolvida por Muschelknautz (Hoffmann & Stein, 2008). Para cálculo das variáveis adicionais não apresentados neste artigo é aconselhada a revisão da literatura associada ao modelo de Muschelknautz, referida nos modelos do cálculo de rendimento.

$$\Delta p_{corpo} = \frac{1}{2} \rho_f v_e^2 \left(\frac{D_e}{D_c} \right) \left[\frac{1}{\left(\frac{v_e}{v_\theta(R_e)} - \frac{H_c - S}{R_e} f \right)^2} - \left(\frac{v_\theta(R_e)}{v_e} \right)^2 \right] \quad (145)$$

$$\Delta p_{vórtice} = \frac{1}{2} \rho_f v_e^2 \left(\frac{v_\theta(R_e)}{v_e} \right)^2 + k \left(\frac{v_\theta(R_e)}{v_e} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (146)$$

O valor de k é de carácter empírico e assume o valor de 3.41, no caso de as bordas do vórtice serem arredondadas e 4.4 no caso de serem em aresta viva (Hoffmann & Stein, 2008).

$$f = 0.005 (1 + 3\sqrt{c_0}) \quad (147)$$

em que c_0 é obtido da expressão (70).

2.3.5. Muschelknautz (1980)

Neste modelo, a perda de carga num separador ciclónico ocorre principalmente devido ao atrito nas paredes e irreversibilidades no núcleo do vórtice. O cálculo da perda de carga deste modelo é de novo dividido em duas parcelas, uma relativa ao corpo do Ciclone e outra ao vórtice.

As variáveis v_e , $v_\theta(R_e)$, $v_{\theta p}$, A_R e f são respetivamente calculadas a partir das equações referenciadas na literatura de Muschelknautz dos modelos de rendimento.

$$\Delta p_{corpo} = \frac{1}{2} \rho_f \frac{f A_R}{\dot{V}} [v_{\theta p} v_\theta(R_e)]^{1.5} \quad (148)$$

$$\Delta p_{vórtice} = \frac{1}{2} \rho_f v_e^2 \left[2 + \left(\frac{v_\theta(R_e)}{v_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{v_\theta(R_e)}{v_e} \right)^{\frac{4}{3}} \right] \quad (149)$$

2.3.6. Casal & Martinez-Bennet (1983)

É um modelo puramente empírico. Assume que o número de Euler é independente do número de Reynolds e que é constante entre Ciclones geometricamente semelhantes. O fator total de fricção é uma função de elevada complexidade (Eq. 6.1.11, Hoffmann & Stein, 2008) envolvendo um amplo número de variáveis de propriedades dimensionais e físicas (Hoffmann & Stein, 2008).

$$\Delta p = \xi_{CASAL} \frac{1}{2} \rho_f v_c^2 \quad (150)$$

O coeficiente de atrito de Casal depende apenas de fatores geométricos e calculado por

$$\xi_{CASAL} = 3.33 + 11.3 \left(\frac{A_c B_c}{D_e^2} \right)^2 \quad (151)$$

2.3.7. Ramachandran et al., 1991

O modelo apresentado por Ramachandran et al. em 1991 foi desenvolvido de uma forma empírica através da análise estatística de valores de perda de carga de noventa e oito configurações de separadores ciclônicos.

O autor comparou, ainda, os seus resultados com os obtidos por (Shepherd & Lapple, 1939) e os de Barth (1956) e concluiu que os seus resultados seriam mais fiáveis. Propõe que:

$$\Delta p = \xi_{RAMACHANDRAN} \frac{1}{2} \rho_f v_c^2 \quad (152)$$

O coeficiente de atrito de Ramachandran depende apenas de fatores geométricos e é calculado por:

$$\xi_{RAMACHANDRAN} = 20 \left(\frac{A_c B_c}{D_e^2} \right) \left(\frac{\frac{S}{D_c}}{\frac{H_c}{D_c} \frac{L_c}{D_c} \frac{D_x}{D_c}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (153)$$

2.3.8. Modelo de Aproximação por Zonas

Outros modelos fazem uma aproximação por zonas. Estes modelos do cálculo da perda de carga faz uma divisão do Ciclone em três zonas - entrada, vórtice e saída. Esta decomposição em zonas do corpo do Ciclone visa o cálculo parcial da perda de carga. A equação (154) representa a perda de carga na zona de entrada.

$$\Delta p_{entrada} = \frac{1}{2} \rho_f v_{\theta p}^2 \quad (154)$$

A equação (155), quantifica a perda de carga no corpo cilíndrico central do Ciclone.

$$\Delta p_{vórtice} = \rho_f v_{\theta c}^2 \left(\frac{D_c}{D_e} - 1 \right) \quad (155)$$

A terceira zona contabiliza a perda de carga referente à saída do gás transportador livre de partículas sólidas em suspensão, sendo quantificada por:

$$\Delta p_{saída} = \frac{1}{2} \rho_f v_e^2 \quad (156)$$

Admitindo que $v_{\theta c} \approx V_c$, na qual V_c é a velocidade média do escoamento gasoso na condução de admissão ao Ciclone. A adição das três parcelas (154), (155) e (156) é traduzida por:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_f \left[V_c^2 \left(2 \frac{D_c}{D_e} - 1 \right) + V_e^2 \right] \quad (157)$$

2.3.9. Macintyre (1988)

Macintyre, apresentou uma expressão muito simples para o cálculo da perda de carga onde se consideram as dimensões e forma do Ciclone:

$$\Delta p = \frac{31L_c H_c}{K D_e^2 \sqrt[3]{\frac{L_c}{D_c}} \sqrt[3]{\frac{Z_c}{D_c}}} \quad (158)$$

Tomando K os seguintes valores: 0.5, para entrada sem guia; 1, para entrada com guias retas; 2, para entrada com guias expansoras.

2.3.10. Shahraki (2003)

Como referido acima, na secção 2.2.3.1, o modelo de cálculo de rendimento de Shahraki implica o cálculo da perda de carga. Começando na equação de Darcy e modificando-a para um fluxo espiralado na secção cilíndrica do Ciclone. A equação de Darcy relaciona a perda de carga induzida pelo atrito do fluido ao longo de um determinado comprimento do tubo à velocidade média. Na equação (161), f é o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach, que para escoamento turbulento toma a seguinte forma

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (159)$$

D é o diâmetro do tubo no qual ocorre o escoamento; ε é a altura média de irregularidades na superfície do tubo; e Re é o número de Reynolds. Esta equação pode ser simplificada tomando a seguinte configuração

$$f = \frac{8 \tau}{\rho_f u^2} \quad (160)$$

Em que, τ é a tensão de corte; ρ_f é a massa volúmica; e u a velocidade média do fluxo de fluido.

$$\Delta P_1 = f \rho_f v_{in}^2 \left[\frac{2\pi R_c N_1}{(R_c - R_e) \cos^3(\alpha)} \right] \quad (161)$$

em que, N_1 é o número de voltas que o fluxo dá na parede cilíndrica do Ciclone

$$N_1 = \frac{D_c^2 L_c - D_e^2 S}{4 A_c B_c D_c} \quad (162)$$

Na equação (161), α_s é o ângulo a que o fluxo espirala na parede cilíndrica do Ciclone. E é encontrada por

$$\tan(\alpha_s) = \frac{L_c}{2\pi R_c N_1} \quad (163)$$

De forma semelhante, a perda de carga na secção cónica do Ciclone pode ser encontrada da seguinte forma

$$\Delta P_2 = f' \rho_f v_{in}^2 \left(\frac{2\pi \bar{R} N_2}{(R_c - R_e) \cos^3(\alpha')} \right) \quad (164)$$

em que \bar{R} , α' e N_2 podem ser calculados da seguinte forma

$$\bar{R} = \frac{1}{2} \bar{D} \quad (165)$$

\bar{D} é obtido pela equação (122).

$$\tan(\alpha') = \tan(\alpha_s) \sin(\gamma) \quad (166)$$

$$N_2 = \frac{Z_c}{2\pi \bar{R} \tan(\alpha') \sin(\gamma)} \quad (167)$$

Na parte central do Ciclone, o fluxo de gás é ascendente e a perda de carga é determinada por

$$\Delta P_3 = f'' \rho_f v_{in}^2 \left[\frac{2\pi R_e (N_1 + N_2)}{R_e \cos^3(\alpha'')} \right] \quad (168)$$

α'' é o ângulo a que o fluxo de gás sobe em direção ao ducto de saída.

$$\tan(\alpha'') = \frac{H_c}{2\pi R_e (N_1 + N_2)} \quad (169)$$

Foi assumido que a perda de carga total, dentro do corpo do Ciclone, como o somatório de ΔP_1 , ΔP_2 e ΔP_3 e que f , f' e f'' têm o mesmo valor para o escoamento turbulento no interior do Ciclone. A perda de carga total pode ser equacionada da seguinte forma

$$\Delta P = \left(\frac{2\pi f}{0.003} \right) (0.003 \rho_f v_c^2) \left[\frac{R_c N_1}{(R_c - R_e) \cos^3(\alpha)} + \frac{\bar{R} N_2}{(R_c - R_e) \cos^3(\alpha')} + \frac{N_1 + N_2}{\cos^3(\alpha'')} \right] \quad (170)$$

ou equivalentemente

$$\Delta P = K(0.003 \rho_f v_c^2) (\Delta H) \quad (171)$$

Aplicando as medições experimentais, condições operacionais e dimensões geométricas na equação (169), levando a determinar que K é aproximadamente 1.0, para todos os ensaios. Esta descoberta permite definir uma nova equação para o ΔH :

$$\Delta H = \frac{R_c N_1}{(R_c - R_e) \cos^3(\alpha)} + \frac{\bar{R} N_2}{(R_c - R_e) \cos^3(\alpha')} + \frac{N_1 + N_2}{\cos^3(\alpha'')} \quad (172)$$

2.4. Saltitação

Saltitação ou saltação pode ocorrer quando partículas são transportadas por fluidos. É um fenómeno específico do transporte em que o material solto, em repouso, é recolhido pelo escoamento e transportado em suspensão neste, em intervalos espaciais e temporais curtos. O seu estudo tem especial interesse no transporte pneumático logo também no dimensionamento de Ciclones é importante. O conceito de velocidade de saltação tem uma importância fulcral para a compreensão dos fenómenos físicos resultantes do processo. Pode ser definida como:

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

No que diz respeito à separação ciclónica, o último conceito é mais relevante, uma vez que é importante garantir que as partículas já separadas do escoamento e que foram depositadas nas paredes do Ciclone não voltem a ser recolhidas pelo fluido e arrastadas para a saída dos gases limpos. Contudo, as duas definições permitem limitar a velocidade do fluido na entrada do Ciclone, para se evitarem tanto a deposição excessiva de partículas na entrada do separador como a recolção das mesmas no interior do Ciclone. Esta limitação é visível na Figura 7 (Pinho, 2005), onde é ilustrada a dependência entre a velocidade à entrada do Ciclone, v_c , obtida pela equação (173) e o quociente entre esta velocidade e a velocidade de saltação, U_s , equacionada na equação (174).

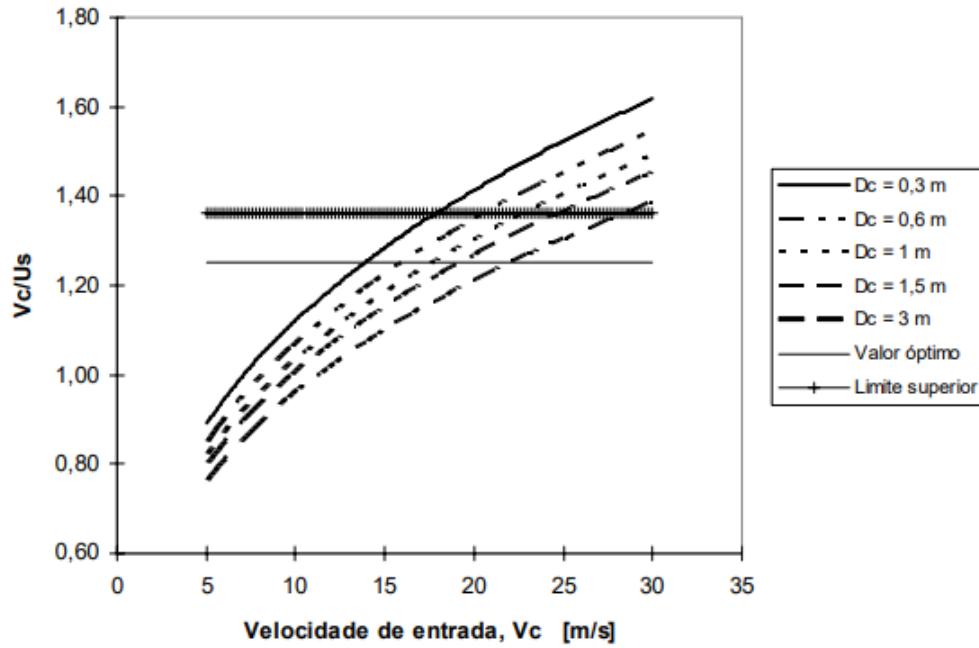


Figura 7 - Intervalo de valores aceitáveis para a velocidade de entrada do Ciclone Fonte: Pinho, 2005

$$v_c = \frac{2 \dot{V}}{R_c^2} \quad (173)$$

$$U_s = 11.58 \left[\frac{\mu_f (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f^2} \right]^{\frac{1}{3}} \left\{ \frac{\left(\frac{B_c}{D_c} \right)^{0.4}}{\left[1 - \frac{B_c}{D_c} \right]^{\frac{1}{3}}} \right\} D_c^{0.067} v_c^{\frac{2}{3}} \quad (174)$$

O quociente entre v_c e U_s resulta na seguinte equação

$$\frac{v_c}{U_s} = \frac{1}{11.58} \left[\frac{\rho_f^2}{\mu_f (\rho_p - \rho_f)} \right]^{\frac{1}{3}} \left\{ \frac{\left[1 - \frac{B_c}{D_c} \right]^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{B_c}{D_c} \right)^{0.4}} \right\} D_c^{0.067} v_c^{\frac{1}{3}} \quad (175)$$

Assim, verifica-se que a velocidade de saltação é função das propriedades das partículas ρ_p , do fluido ρ_f e μ_f , e das dimensões do Ciclone B_c e D_c . Na literatura, os valores experimentalmente obtidos, relacionados com o melhor rendimento são com $v_c / U_s = 1.25$ e que a recolção das partículas ocorre para $v_c / U_s \geq 1.36$ (Pinho, 2005).

2.5. Tecnologia de Impressão 3D

A impressão tridimensional, usualmente conhecida como Impressão 3D, é um método aditivo, camada a camada, que produz objetos 3D através de um ficheiro criado em formato digital (Schuldt et al., 2021). Esta revolucionária tecnologia permite a produção de diversos modelos de forma automática e digitalmente controlada. É, também, altamente aplicável à produção de protótipos devido à sua versatilidade.

Atualmente, no que diz respeito à extrusão de filamento, as tecnologias mais utilizadas são: o derretimento de termoplásticos, *Fused Deposition Modeling* (FDM); na fusão de pós de polímeros/metais, *Selective Laser Sintering* (SLS); no derretimento seletivo a laser, *Selective Laser Melting* (SLM), e polimerização de resinas líquidas foto curáveis, *Laser-Assisted Stereolithography* (SLA); processamento digital de luz, *Digital Light Processing* (DPL); impressão a jato de foto polímeros, *Photopolymer Inkjet Printing* (PIP, assim chamados sistemas *PolyJet* e *MultiJet*) (Su, 2021).

Em termos de aplicação prática, a variedade de materiais foi sendo limitada a Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Ácido Polilático (PLA), polímeros de base acrílica e alguns metais, devido às tecnologias disponíveis e custo de produção. Embora a introdução de novos materiais permaneça crítica e essencial para o desenvolvimento da tecnologia, nos últimos anos, têm sido efetuados mais esforços de modo a alterar as propriedades dos materiais através da modificação das propriedades químico-físicas das matérias-primas, expandindo assim as utilizações possíveis desta tecnologia. Estas alterações podem ser feitas por: i) tratamento e modificação das partes impressas e/ou imobilização de substâncias reativas nas faces dos componentes produzidos – *post-printing modifications*; ii) incorporação das substâncias pretendidas nas matérias-primas, i.e., nos materiais antes da impressão – *pre-printing incorporation*; iii) combinação das duas estratégias, incorporação antes da impressão para facilitar a funcionalização após a impressão (Su, 2021).

Nesta dissertação, foi utilizada a tecnologia de filamento termoplástico, PLA, devido ao acesso fácil e generalizado deste material, assim como dos dispositivos de impressão. Este material é derretido e a seguir extrudido através do bico de metal aquecido da impressora, tipicamente a 200°C de uma forma controlada para construir o modelo camada a camada. Para este tipo de tecnologia, embora a modificação das características de reatividade química e funcionalidade deste material pudesse ser

interessante, através da incorporação de substâncias reativas de interesse diretamente nos termoplásticos, o aquecimento e consequente derretimento do material, pode levar à inativação das substâncias adicionadas. Assim, faz sentido que as alterações a este material sejam feitas após a impressão.

O PLA, *Polylactic Acid*, difere da maioria dos polímeros de termoplásticos uma vez que é derivado de recursos renováveis, como cana-de-açúcar e o amido de milho, sendo também biodegradável. Tem, ainda, como vantagem o baixo custo, uma boa rigidez e dureza.

A rugosidade é tida como prejudicial para a *performance* do componente. Vulgarmente, em tribologia, superfícies rugosas têm um coeficiente de fricção maior do que superfícies lisas e têm um desgaste mais rápido. Contudo, Kovan et al. (2017) indicou que a força da ligação adesiva entre as partes impressas utilizando esta tecnologia é afetada pela rugosidade da superfície. Foi determinado que a espessura da camada e orientação da impressão têm efeitos significativos na força de adesão. Ko & Lee (2017) desenvolveu uma ferramenta de cinco eixos para melhorar a baixa qualidade da superfície da impressão 3D, obtendo resultados positivos. É também possível o polimento das faces interiores com gases, como demonstrado por Dewey & Ulutan, em 2017. Neste estudo foi utilizado CO₂ para efetuar o polimento a laser como um tratamento da superfície após a impressão. Maidin et al. (2015), tentaram melhorar as características da superfície de modelos de impressão 3D através da aplicação de vibração ultrassônica. Neste estudo foi descoberto que os melhores resultados são obtidos utilizando uma frequência de 21 kHz aplicada durante a produção FDM. Dimitrios et al., em 2016, reportaram que a rugosidade da superfície pode ser reduzida com o aumento da temperatura de derretimento do material. Estes exemplos servem para mostrar como este problema de rugosidade podem ser contornados.

No que diz respeito à modificação após impressão, o revestimento é uma solução relativamente pouco sofisticada, baseada na adsorção de uma ou múltiplas camadas da substância reativa nas superfícies da peça impressa através de reações hidrofóbicas, hidrofílicas ou interações iônicas. Este método tem como desvantagem a possibilidade de contaminação, pelas substâncias adsorvidas, do material em contacto com as superfícies alteradas, especialmente com a alteração das condições de operação, temperatura, pH, etc. Comparativamente, os métodos de imobilização das substâncias reativas nas paredes

dependem da formação de ligações covalentes, ficando assim mais resistentes às diferentes condições de operação (Su, 2021).

Como prova dos avanços desta tecnologia existem projetos nas mais diversas áreas da engenharia. A NASA e a ESA têm um projeto de colaboração para estudar a viabilidade de construção de uma base lunar impressa com a tecnologia 3D (Soderman/NLSI staff, 2022). A *Pinarello*, uma marca italiana de bicicletas, produziu uma bicicleta aerodinâmica para a tentativa, bem-sucedida, de bater o recorde da hora, prova na qual o objetivo passa por percorrer a maior distância possível de bicicleta em 60 minutos. Esta tentativa foi realizada em outubro de 2022, utilizando uma nova tecnologia de liga de escândio-alumínio-magnésio. Este equipamento passou no teste de segurança ISO4210, demonstrando a robustez desta tecnologia de construção (Farrand, 2022).

3. HIPÓTESE DE TRABALHO E METODOLOGIA

3.1. Ideia Inicial: dimensionamento automático e geração de ficheiro para impressão 3D

O trabalho de cálculo para o dimensionamento de Separadores Ciclónicos, também conhecidos como Ciclones Industriais, é iterativo e, por isso, lento, moroso e propício à ocorrência de erros. A hipótese de trabalho foi criar uma aplicação, de raiz, que permitisse um dimensionamento automático, confiável, intuitivo para o utilizador e que possibilitasse uma ligação direta aos meios de produção de protótipos, através da tecnologia de impressão 3D.

A criação rápida de protótipos de Ciclone permitirá a avaliação, em contexto laboratorial, dos seus parâmetros de funcionamento, comparando-os com os valores previamente calculados através dos modelos teóricos usados no seu dimensionamento. Na escolha do projeto também foi tido em conta o contexto em que o trabalho viria a ser desenvolvido: a Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, onde decorrem diversos trabalhos ligados à combustão de biomassa e consequente emissão de gases e partículas de exaustão. Departamentos como o de Engenharia do Ambiente e de Engenharia de Madeiras também desenvolvem trabalhos onde a separação ciclónica tem um papel central quer na remoção de partículas poluentes, quer na separação de resíduos industriais. Acresce ainda o facto de, na mesma instituição, existir o núcleo de impressão 3D, *TripleSpace*. Neste espaço foi possível adquirir o conhecimento necessário, experiência com a impressão 3D e utilizar o equipamento que permitiu a realização de modelos teste.

3.1.1. Dimensionamento

A ideia original passava pelo desenvolvimento de uma ferramenta que permitisse o dimensionamento e geração automáticos de um ficheiro que parametrizasse a impressão de um protótipo 3D. Numa primeira abordagem foi estudada a hipótese da utilização das aplicações de desenho assistido, *Autodesk Inventor Professional 2022*, *Solidworks 2021*, *Autodesk Fusion 360*, *AutoCAD 2022* juntamente com a linguagem *MATLAB*, versão *R2022b*. Nas Figura 8, Figura 9, Figura 10 e Figura 11 é apresentado o estudo de viabilidade de utilização das ferramentas anteriormente mencionadas para o teste de

desenho assistido. Apenas em *Autodesk Inventor* é possível parametrizar o desenho de um modelo previamente realizado, de acordo com uma série de parâmetros, aquilo que era pretendido (ver Figura 11).

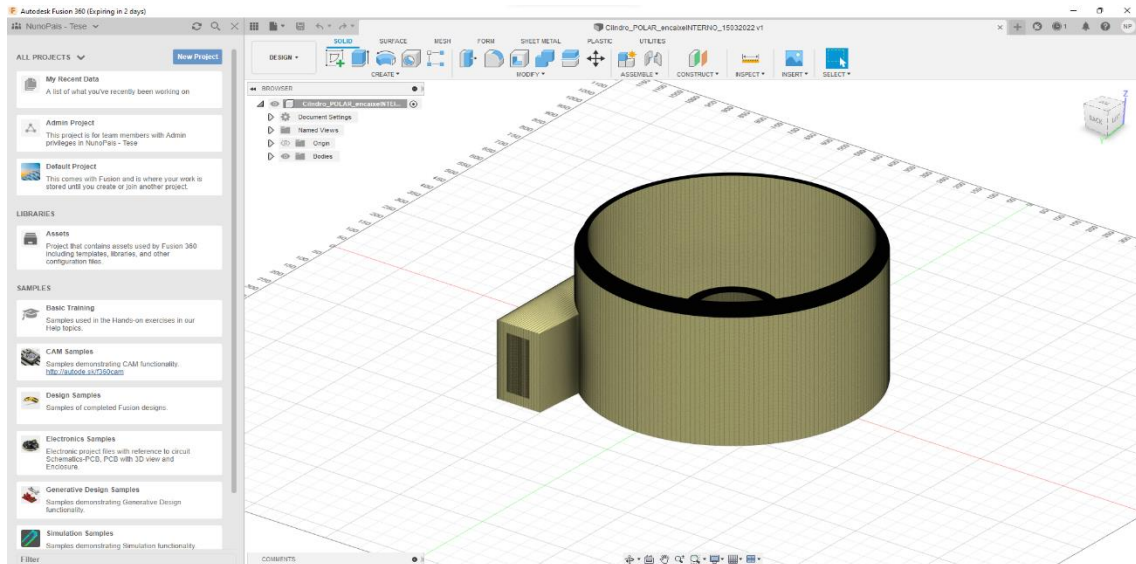


Figura 8 - Exemplo de modelação utilizando o *software Fusion*

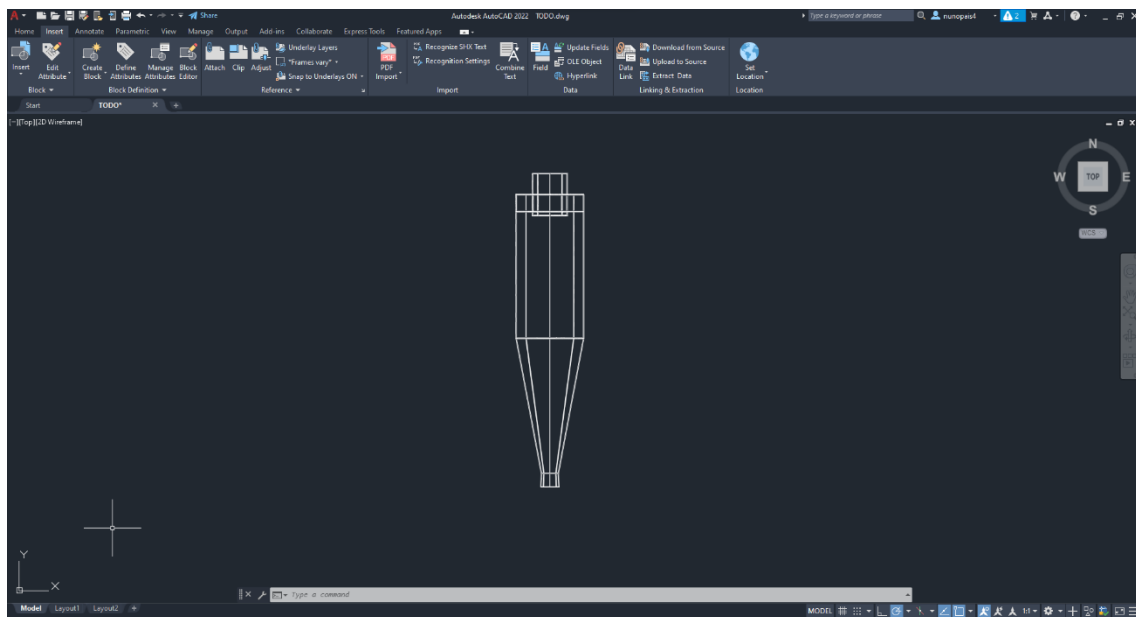


Figura 9 - Exemplo de modelação utilizando o *software AutoCAD*

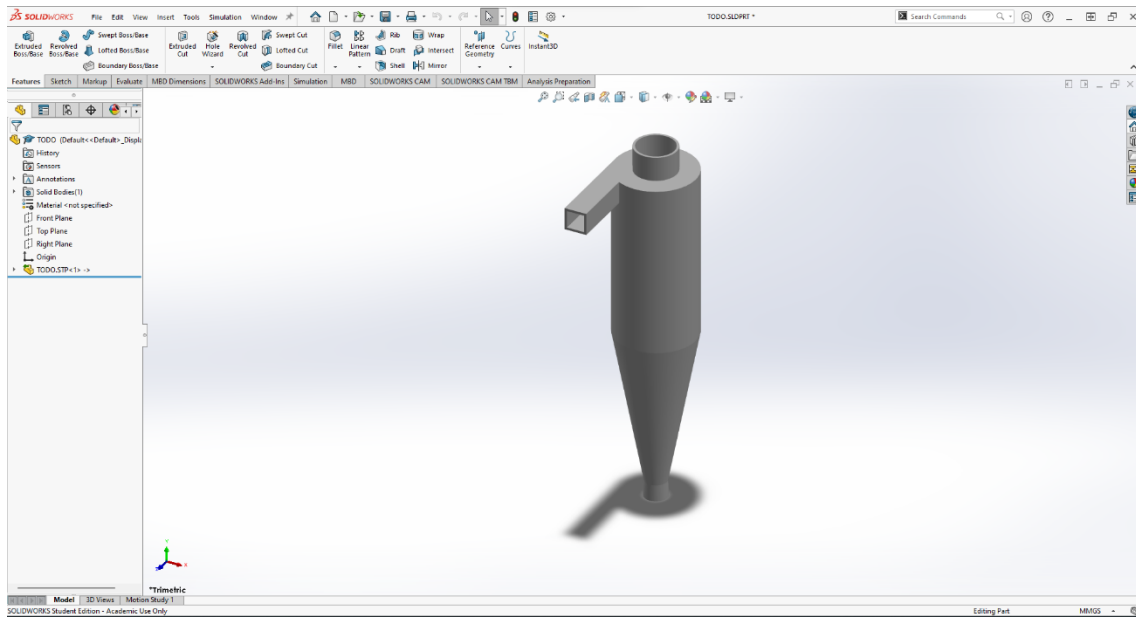


Figura 10 - Exemplo de modelação utilizando o *software SolidWorks*

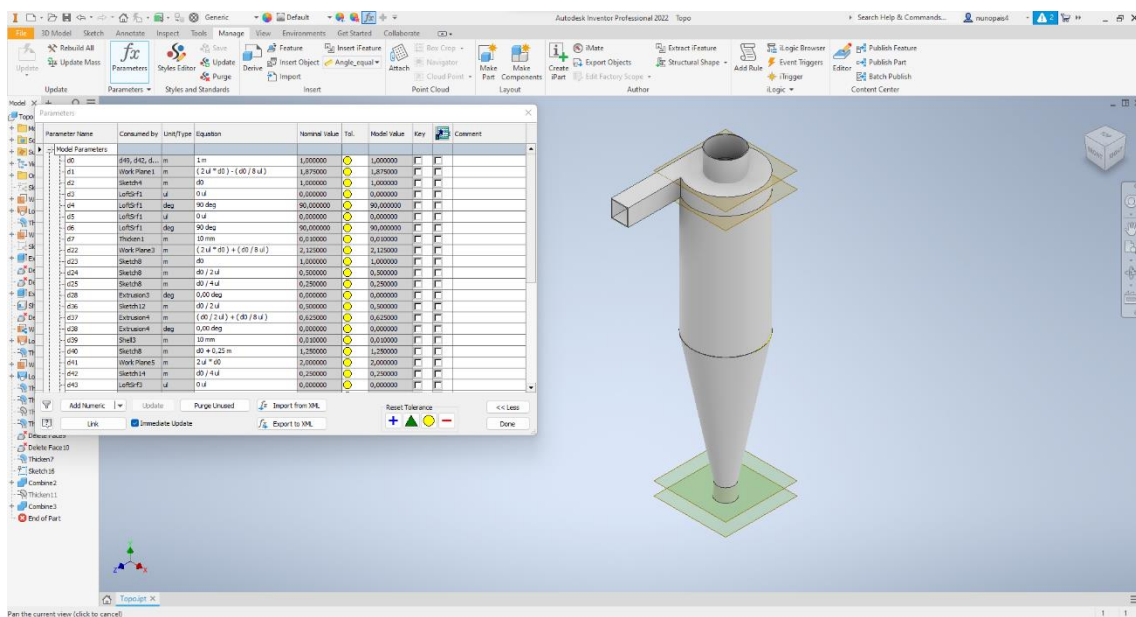
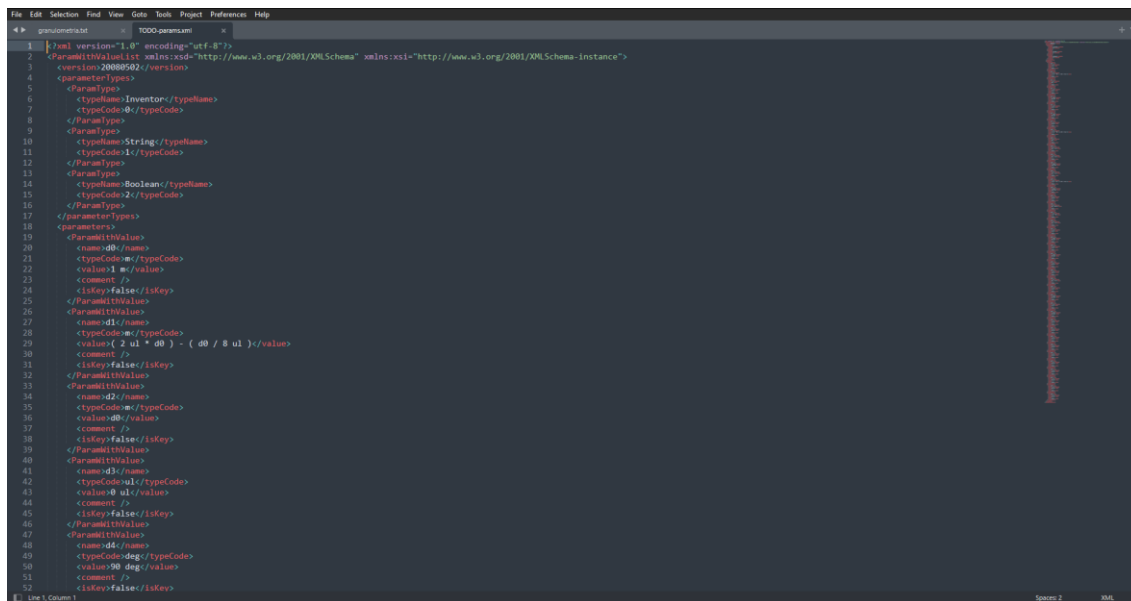


Figura 11 - Exemplo de modelação utilizando o *software Inventor* - Com tabela de parametrização



```
1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2 <ParameterList xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" xmlns:xsl="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
3 <version:20080502 />
4 <parameterTypes>
5 <ParamType>
6 <typeName>Inventor</typeName>
7 <typeCode>0</typeCode>
8 </ParamType>
9 <ParamType>
10 <typeName>String</typeName>
11 <typeCode>1</typeCode>
12 </ParamType>
13 <ParamType>
14 <typeName>Boolean</typeName>
15 <typeCode>2</typeCode>
16 </ParamType>
17 </parameterTypes>
18 <parameters>
19 <ParamWithValue>
20 <name>db</name>
21 <typeCode>0</typeCode>
22 <value>1 m</value>
23 <comment />
24 <isKey>false</isKey>
25 </ParamWithValue>
26 <ParamWithValue>
27 <name>d1</name>
28 <typeCode>0</typeCode>
29 <value>( 2 ul * d0 ) - ( db / 8 ul )</value>
30 <comment />
31 <isKey>false</isKey>
32 </ParamWithValue>
33 <ParamWithValue>
34 <name>d2</name>
35 <typeCode>0</typeCode>
36 <value>db</value>
37 <comment />
38 <isKey>false</isKey>
39 </ParamWithValue>
40 <ParamWithValue>
41 <name>d3</name>
42 <typeCode>1</typeCode>
43 <value>0 ul</value>
44 <comment />
45 <isKey>false</isKey>
46 </ParamWithValue>
47 <ParamWithValue>
48 <name>d4</name>
49 <typeCode>deg</typeCode>
50 <value>90 deg</value>
51 <comment />
52 <isKey>false</isKey>

```

Figura 12 - Exemplo de ficheiro de parametrização exportado do *software Inventor* - em formato *html*

Uma vez que para os Ciclones, o Diâmetro Central, Dc, é o parâmetro a partir do qual todos os outros são calculados, um valor obtido por um dimensionamento prévio seria suficiente para a obtenção do modelo total. No entanto, esta abordagem exigiria ao utilizador o domínio de pelo menos três programas informáticos: a aplicação desenvolvida em *MATLAB* para os cálculos de dimensionamento; o *Autodesk Inventor* para a geração do modelo, começando pela importação do ficheiro, alteração da parametrização pré-determinada e terminando com a exportação do ficheiro em formato STL; e ainda *Ultimaker Cura*, ou análogo, para estabelecer a ponte entre o terminal do utilizador e a impressora. A necessidade de conhecer bem três programas introduziria uma curva de aprendizagem um pouco mais longa, o que certamente inibiria a utilização desta ferramenta. Revelaria ainda a necessidade da compatibilidade de ficheiros entre os três programas. Assim, fez-se a escolha de saltar o passo intermédio e gerar todo o desenho 3D usando a mesma linguagem que a ferramenta de dimensionamento: o *MATLAB*.

Fazer a ponte entre a aplicação *MATLAB* e o software de impressão 3D implica necessariamente a criação de um ficheiro de formato STL, 3MF, AMF, BMP, COLLADA ou outros. Contudo, o formato mais utilizado nos últimos 30 anos é o STL, Standard Triangulation Language. (A. Chen, 2019) Este tipo de ficheiro descreve a superfície da geometria tridimensional sem nenhuma representação de cor, textura ou quaisquer outros atributos habituais aos ficheiros CAD. O formato de ficheiro STL (.stl) é uma matriz de

pontos triangulados que definem uma ou mais superfícies tendo como fim a geração de um volume (Qu & Stucker, 2003). A malha triangular é gerada pela tesselação ou tecelagem da superfície de fronteira do sólido 3D. Para aplicações de engenharia, a malha deverá conter a informação de qual dos lados do triângulo contém o interior do sólido. O ficheiro não tem nenhuma informação topológica como ligações, indicadores para outros elementos, ou proximidade. Cada vértice é escrito no ficheiro o mesmo número vezes que ocorre na matriz de geração da superfície, i.e. mesmo que um ponto se repita duas vezes ou mais vezes ele será escrito o mesmo número de vezes no ficheiro STL. O ficheiro STL não mostra se a matriz é o resultado de uma correta triangulação. A superfície de triangulação é conectada, por uma triangulação ponto-a-ponto se for definida por um conjunto finito de pontos que seguem as seguintes condições (Nagy & Mátyási, 2003):

- Cada borda da triangulação é partilhada, no máximo, por dois triângulos;
- Um vértice pode ser partilhado por qualquer número de triângulos;
- Cada triângulo tem pelo menos um ponto em comum com outro triângulo (conectividade; requer pelo menos dois triângulos);
- Se um vértice de um triângulo é partilhado com um segundo triângulo, então este ponto é também um vértice do segundo triângulo (propriedade ponto-a-ponto);
- Nenhum triângulo tem uma interseção com o interior de outro triângulo (sem penetrações, nem sobreposições).

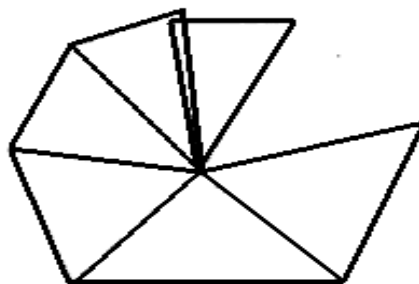


Figura 13 – Exemplo de disco corrompido em torno de um vértice Adaptado de: Nagy & Mátyási, 2003

A Figura 13, mostra um exemplo teórico dos erros encontrados durante o desenvolvimento experimental da modelação, revelados na Figura 16.

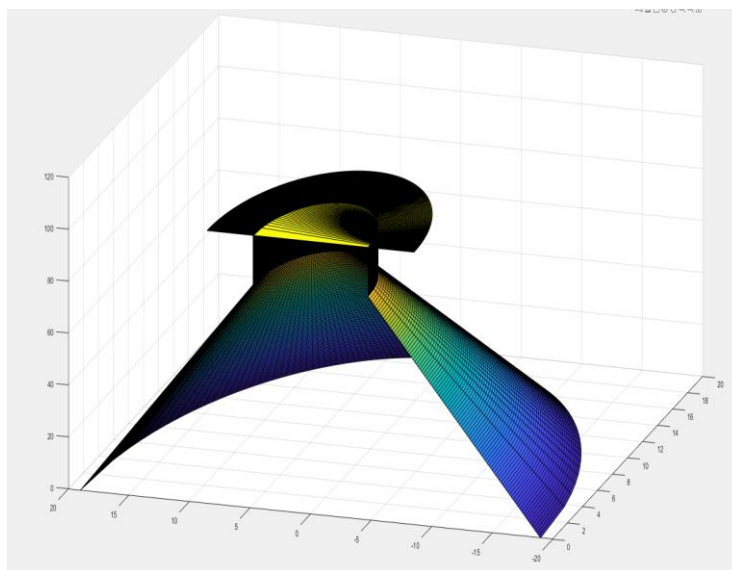


Figura 14 - Exemplo de erros de concatenação da modelação em MATLAB

Para o desenvolvimento da modelação, foi inicialmente tentada uma aproximação cartesiana. Isto significa que as superfícies cilíndricas e cónicas iriam ser descritas com equações matemáticas usando o sistema de eixos coordenados X, Y e Z (XY para a secção transversal e XZ para a secção longitudinal). Tal implicava definir separadamente duas faces simétricas do Ciclone separadas pela direcção longitudinal, as geometrias para valores de Y menor que zero e as geometrias para valores de Y maiores que zero. Obtendo as duas metades, estas eram concatenadas, numa tentativa de gerar a totalidade do corpo modelado. A concatenação de duas superfícies nada mais é do que a justaposição dos pontos finais da primeira com os pontos iniciais da segunda. Para a geração da primeira metade foi feita uma concatenação vertical, juntando o corpo cilíndrico com uma superfície horizontal, de modo haver uma conexão entre as superfícies dos sólidos. Nesta fase, foram encontrados inúmeros problemas. A concatenação das faces obriga ao reordenamento da nuvem de pontos criados. Com esta justaposição era gerado um plano que criava uma obstrução no interior do Ciclone quando esta junção era feita entre um plano vertical e um horizontal.

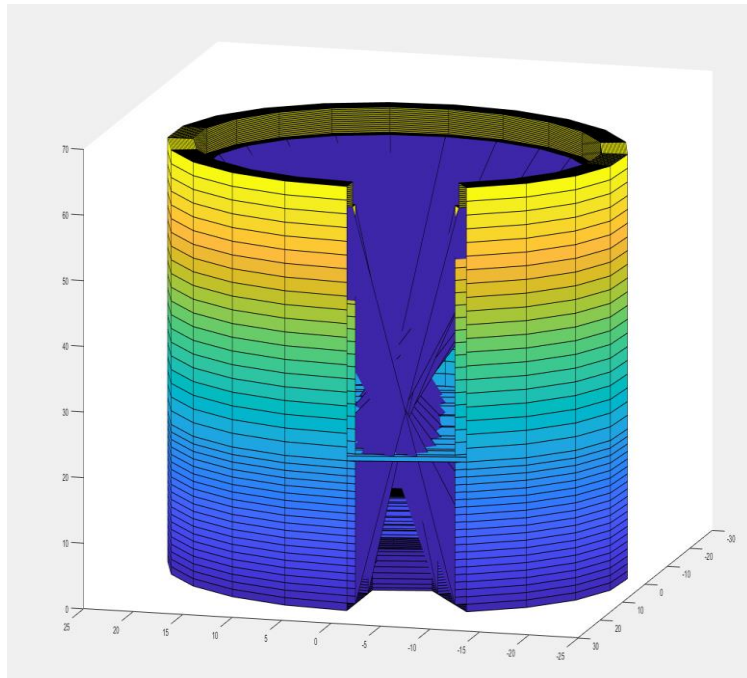


Figura 15 - Exemplo de superfícies geradas pela concatenação de superfícies cartesianas em MATLAB

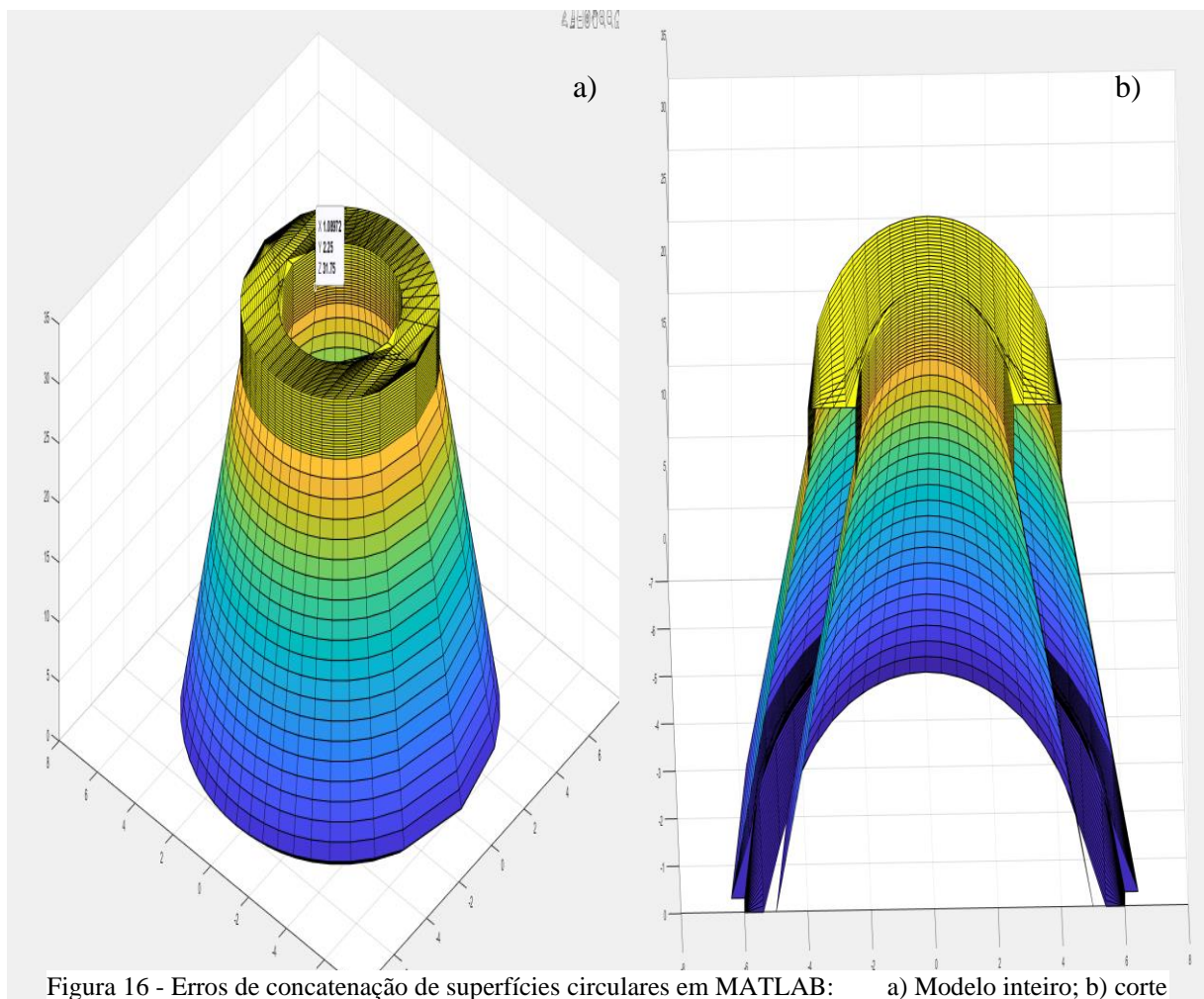


Figura 16 - Erros de concatenação de superfícies circulares em MATLAB: a) Modelo inteiro; b) corte longitudinal

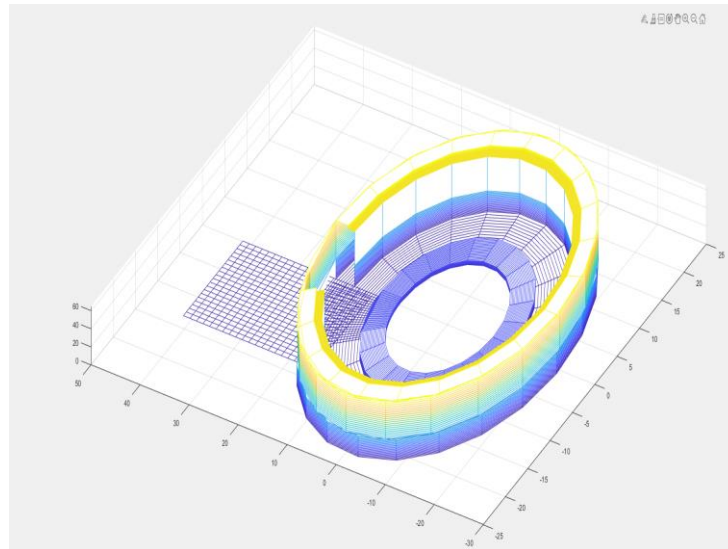


Figura 17 - Sobreposição de malhas em MATLAB

Quando a concatenação ocorria entre superfícies verticais e horizontais, originava artefactos, novamente provocados pela necessidade de ligação da totalidade dos pontos fronteiros da face, necessitando reorganização. A constante reordenação de vetores é exigente em recursos computacionais, confusa e por isso propícia à ocorrência de erros. Para evitar estes erros de concatenação foi desenvolvida uma técnica de construção, que cria e une superfícies sempre da face mais interior para a face mais exterior, como apresentado na Figura 18, em que a ordem de união é apresentada pela numeração crescente.

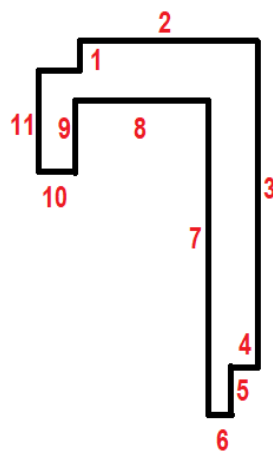


Figura 18 - Exemplo da sequência seguida para a construção das superfícies da secção cilíndrica do Ciclone

Uma vez que se tratava de uma aproximação cartesiana das superfícies, estas eram originadas através de curvas geradas por uma malha de pontos de igual intervalo segundo X e Y. Esta situação produz uma sobreposição imperfeita entre superfícies, uma vez que a malha é regular em X e Y, mas não ao longo da curva. Sempre que era pretendido unir superfícies com intervalos de malha diferentes, tal originava falha nas ligações, fosse entre superfície vertical-horizontal, ou fosse entre superfície vertical-vertical. Apesar de o aumento da resolução da malha minimizar as imperfeições, elas mantinham-se.

Para contornar o aparecimento destes problemas e tornar a solução mais robusta, do ponto de vista da fiabilidade, mais simples e menos exigente ao nível de cálculo computacional, foi utilizada uma abordagem radial usando coordenadas cilíndricas.

Nesta aproximação foram inicialmente gerados dois vetores para o sistema de coordenadas. Uma coordenada radial, para definição da distância do eixo à superfície. E a outra para a definição da rotação de 0 a 360°, a coordenada azimutal. Nas superfícies horizontais a cota é gerada por uma matriz unitária multiplicada pelo raio máximo, nas superfícies verticais o procedimento é semelhante, no entanto, a definição da cota é realizada através de uma grelha de pontos onde é definida a cota inicial e final da superfície. Esta abordagem revelou-se bem-sucedida em todas as superfícies com simetria axial. O problema surgiu na criação do orifício necessário para o ducto de entrada, objeto que se apresenta com uma geometria quadrangular.

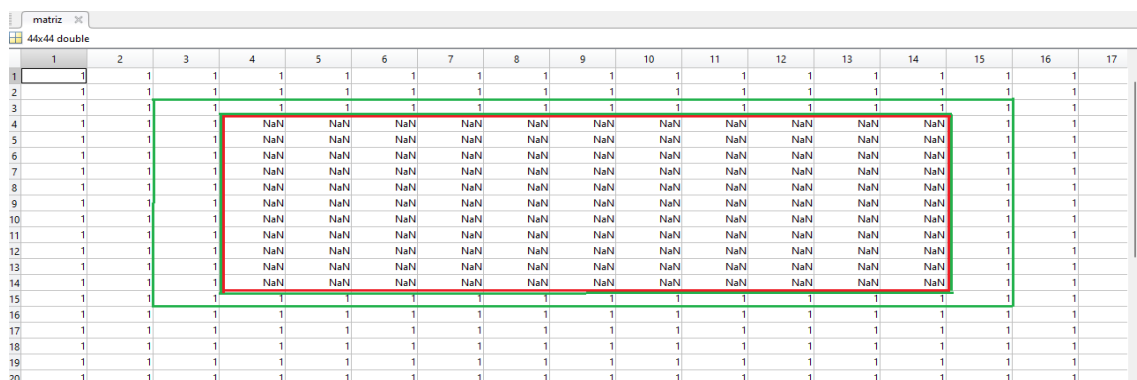


Figura 19 - Exemplo de matriz de NaN's em MATLAB

Numa primeira abordagem foi tentada a geração do braço de entrada do ar como um objeto independente, definido à parte, e mais tarde concatenado à superfície do cilindro. Todavia foram encontrados os mesmos problemas de concatenação referidos anteriormente. Surgiu ainda uma nova questão: como criar um orifício na superfície cilíndrica onde o ducto se iria ligar. Uma das formas para resolver este problema foi a

troca dos valores dos pontos da malha da superfície cilíndrica onde pretendemos o orifício por NaN's. NaN, provém do inglês, Not a Number, o que significa que não é um número. É, de facto, um escalar que não apresenta valor, podendo ser comparado às indeterminações $0/0$ ou $0 \times \infty$ (Hunt et al., 2001; MathWorks, 2022). Assim, o ponto imediatamente anterior ao primeiro NaN não teria onde se ligar, tornando-se um ponto fronteira. Para um desenho com lápis, seria o equivalente a levantar o lápis e recomeçar o desenho do outro lado do orifício da superfície cilíndrica. Na Figura 19, o orifício na matriz está delimitado pela linha vermelha e todos os pontos fronteira delimitados pela linha verde.

Apesar de ter sido encontrada esta solução para a necessidade da criação de orifícios quer na superfície interior, quer na superfície exterior do cilindro, ainda se mantinham os problemas de concatenação. Foi por isso abandonada esta opção em detrimento da seguinte: é gerada a totalidade da superfície do cilindro inteiro como se a parede não tivesse nenhum orifício, de seguida, na zona da malha onde se pretende o orifício os pontos são deslocados, desde o raio interior da superfície cilíndrica até ao comprimento máximo do ducto, E , algo próximo a um processo de extrusão de material. O mesmo processo é realizado para a superfície exterior do cilindro.

Tendo em conta o tamanho dos pórticos das impressoras 3D disponíveis e da maior parte das impressoras 3D comerciais, optou-se por permitir o desenho do Ciclone em três partes separadas: o cone; o cilindro principal e ducto; e a parte superior da conduta de exaustão de gás. Para permitir a junção posterior das peças, o desenho destas contempla encaixes.

O tamanho do encaixe de cada peça varia segundo o tamanho global do Ciclone, uma vez que a robustez do encaixe dependerá do peso de cada uma das partes. Foi criado um critério geral para a altura do encaixe usando como referência o peso que um dado encaixe terá de suportar. Utilizou-se como critério empírico 3% da altura do cone, Z_c .

Todo o dimensionamento é feito em unidades do Sistema Internacional, no entanto, uma vez que o milímetro é a unidade habitualmente utilizado para a impressão 3D, o ficheiro de saída é apresentado nesta unidade.

3.1.2. Construção de uma aplicação intuitiva e rápida

Para o dimensionamento automático foi desenvolvida uma aplicação integrada em linguagem MATLAB que usa interfaces visuais intuitivas (*user friendly*). Estas interfaces, GUI's - *Graphical User Interfaces*, providenciam a possibilidade de *point and click*, isto é, eliminam a necessidade, por parte do utilizador, de desenvolver código para executar a ação pretendida. Estas aplicações podem ainda ser partilhadas como *plug-in* para o MATLAB, numa versão independente de ambiente de trabalho, como ficheiro executável ou numa versão online (MathWorks, 2021). Em versões anteriores do MATLAB a codificação das interfaces visuais era feita através de código. Na versão utilizada neste trabalho foi usado o *App Designer*, inovação introduzida em 2016, o que agilizou todo o processo (MathWorks, sem data).

A ferramenta *Design App*, pode ser encontrada na aba *APPS*, presente no módulo *Toolstrip*. É então aberta uma nova janela de MATLAB. Nesta janela é permitida a escolha de diferentes *templates*. Na Figura 20 é possível visualizar um *template* em branco, permitindo ao utilizador uma formatação livre. Após a abertura de um novo projeto, podem ser escolhidos os diversos componentes necessários e inseridos na aplicação. Estes são introduzidos através de um sistema de *drag and drop*. A posição destes componentes não é definitiva, sendo possível a sua alteração a qualquer momento. Após a adição ao *Canvas*, deverá ser feita uma atribuição de um *callback*, local onde é definido o nome da variável associado ao elemento adicionado. Como no ambiente de script de MATLAB, as variáveis podem apresentar um carácter local ou global. Uma variável de cariz local apenas está definida dentro de um determinado ponto do código desenvolvido, sendo que fora deste não terá nenhum valor associado. Uma variável global terá o valor definido em todo o código/aplicação. No ambiente de *App Designer*, para que uma variável seja global, nas propriedades, esta deverá ser declarada com um acesso

público (*public*) e a partir daí terá de ser acrescentado o prefixo *app*. quando esta é chamada.

A aplicação desenvolvida tem como objetivo fundamental permitir ao utilizador dimensionar o(s) Ciclone(s) de acordo com vários modelos e respetivos parâmetros, desde aqueles que caracterizam o tipo de escoamento aos que definem os limites do pórtico de impressão. Para tal pretendeu-se criar uma interface de fácil interpretação e utilização.

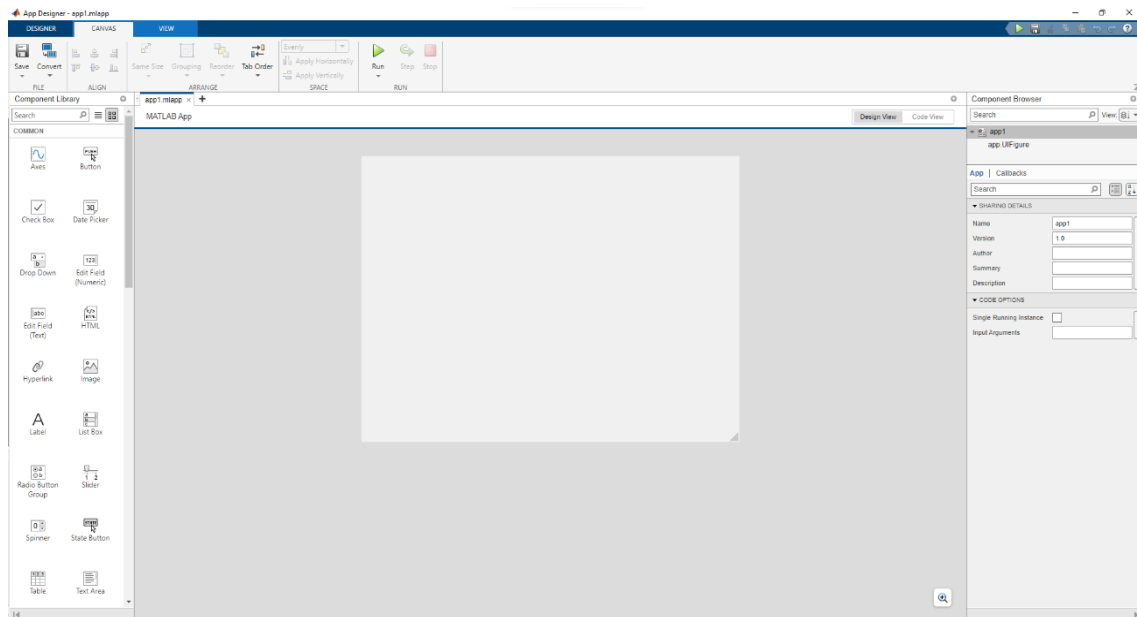


Figura 20 - Ambiente de entrada no *App Designer*

Para a definição dos parâmetros de escoamento é impreterível que o utilizador defina o tipo de fluido, a sua pressão e temperatura e o respetivo caudal a transportar. É necessário ainda definir a velocidade superficial e o fator de carga. A inserção destes dados permite que seja calculada a massa volúmica do fluido e o respetivo o fator de compressibilidade. Em relação à fase sólida a ser transportada é necessário definir o material e a distribuição ponderada de diâmetros de partículas.

Como parâmetros de impressão, o utilizador pode definir os limites verticais e horizontais da impressora que irá utilizar de modo a garantir a exequibilidade do modelo dimensionado. É ainda permitido definir a espessura da parede do Ciclone.

3.1.3. Possibilidade de seriação entre os vários modelos

Com a possibilidade de realizar cálculos de dimensionamento, rendimento e perda de carga de forma ágil, optou-se por alargar este cálculo a vários modelos em simultâneo. Assim o utilizador, em vez de obter resultados para apenas um modelo, poderá ter resultados para todos os modelos seleccionados, permitindo-lhe de forma rápida comparar os resultados.

Dada a multiplicidade de opções que a ferramenta passou a oferecer, tornou-se necessário apresentar vários critérios de escolha ao utilizador. Nestas é possível escolher calcular por apenas um modelo ou por todos os modelos implementados. Foi para isso criada uma forma de seriação automática.

É de salientar que alguns modelos teóricos, devidamente assinalados, não foram desenvolvidos para o tipo de material tipicamente utilizado para a impressão 3D comum, o filamento de PLA, que certamente apresentará valores de rugosidade distintos.

3.1.4. Modelação automática utilizando apenas MATLAB

Terminado o dimensionamento, a ferramenta gera os ficheiros necessários de saída no formato STL. Estes ficheiros podem ser armazenados em formato ASCII ou binário. Por uma questão de tamanho de ficheiro foi optado pela gravação em formato binário, uma vez que são ficheiros mais compactos.

3.1.5. Modelo Livre

As possibilidades que a ferramenta foi oferecendo, à medida que foi sendo desenvolvida, permitiram apresentar a modelação livre. Aqui o utilizador pode definir todas as dimensões do Ciclone de forma independente, ou seja, não ficando constrangido às relações entre dimensões propostas pelos vários modelos teóricos, incluindo a definição da espessura da parede do Ciclone. Na literatura revista, não foi encontrada qualquer referência a esta variável, mas tal torna-se relevante para Ciclones de dimensão reduzida, uma vez que quanto maior for o valor da espessura menor será o espaço disponível no interior da zona cilíndrica, já que esta compete diretamente com o volume disponível no corpo central do Ciclone:

$$\text{Comprimento de escoamento} = \frac{D_c}{2} - \frac{D_e}{2} - \delta_2 \quad (176)$$

Quanto maior for δ_2 menor será a comprimento de escoamento livre.

Este modo livre permitirá a testagem de forma rápida da viabilidade de novos modelos de dimensionamento.

3.1.6. Simulação CFD

Chegados a esta fase do desenvolvimento da aplicação e tendo presente a importância do ensaio de novos modelos de Ciclone, não é possível esquecermos a simulação CFD, *Computational Fluid Dynamics*. Estas ferramentas de simulação estão bastante desenvolvidas e tornaram-se, nos últimos anos, mais acessíveis a nível computacional e têm mostrado resultados progressivamente mais fiáveis. É uma forma ágil e confiável no estudo de escoamentos, inclusive bifásicos. Uma vez que a aplicação gera ficheiros STL, foi implementada a possibilidade de exportar uma versão do modelo de Ciclone preparada para a simulação CFD. Embora com o mesmo formato, o ficheiro gerado tem de diferir, uma vez que deve criar uma figura geométrica correspondente ao volume interior do Ciclone. A este volume corresponderá o volume controlo analisado pela ferramenta numérica, nomeadamente pelo plug-in *FEATool MATLAB* (Precise Simulation, 2022). Este programa permite a importação do ficheiro em formato STL, tornando a ligação entre os dois direta. O simulador importa a geometria e só posteriormente gera a malha de integração para a simulação CFD. A título exemplificativo apresenta-se uma simulação de escoamento gasoso, para uma geometria gerada pela aplicação desenvolvida (ver Figura 21). Não aspira ser uma simulação exata, uma vez que este não é o propósito deste trabalho. No modelo exportado para CFD é introduzido um novo parâmetro, o comprimento do ducto de entrada, E_{DES} , para a definição do comprimento do ducto de entrada, prevendo a necessidade de garantir um escoamento completamente desenvolvido à entrada do Ciclone.

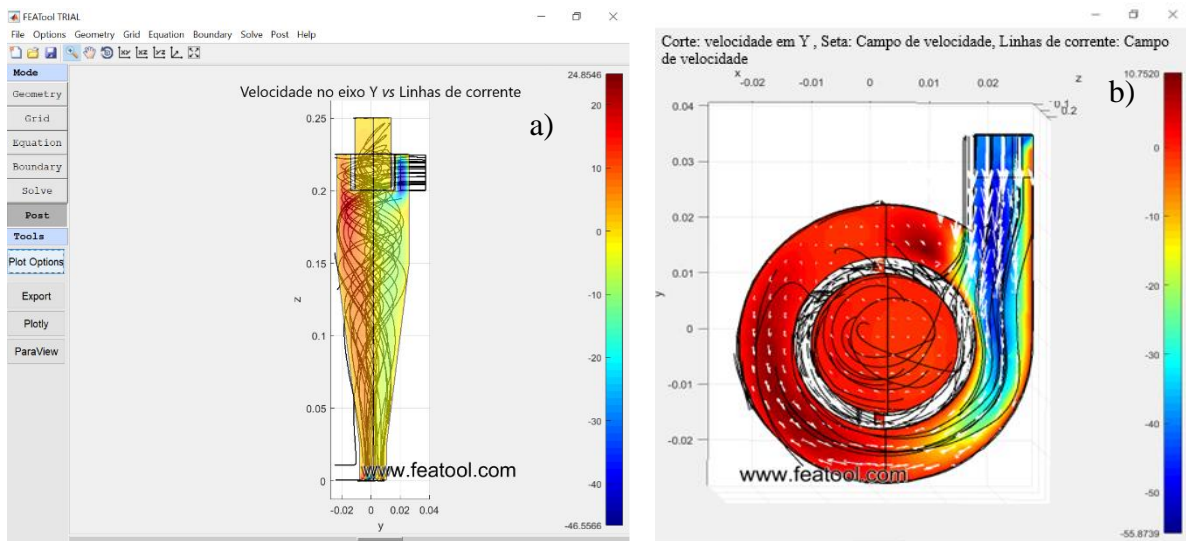


Figura 21 - Sobreposição de simulações CFD: a) Velocidade no eixo Y vs linhas de fluxo; b) Corte em Y: velocidade e linhas de fluxo

Na simulação CFD, para a aplicação usada a unidade de medida é o metro, assim os modelos exportados pela aplicação cumprem com esta necessidade.

3.2. Impressão

Para um primeiro teste de impressão 3D foi necessário usar o ficheiro STL proveniente da aplicação e importá-lo para o *Ultimaker Cura*, e assim enviar a informação para a impressão 3D. Por uma questão de economia de material e tempo despendido, foi, numa primeira fase, apenas impresso o cone do Ciclone. O resultado é apresentado na Figura 22.



Figura 22 - Primeira impressão 3D

Nesta primeira iteração, notou-se que a espessura da parede era exagerada, levando a um desperdício de material e aumentando o tempo total de impressão. Nesta impressão foi também introduzida uma primeira versão do encaixe do cone. Na segunda iteração, a espessura foi reduzida, sendo encontrado um equilíbrio entre a robustez da parede e a eficiência da impressão, em termos de tempo e material.

Na iteração seguinte, foi impressa a totalidade do Ciclone. Nesta, foram encontrados problemas com o encaixe das peças. O modelo de encaixes modelado até então não contemplava a diferente inclinação dos extremos encaixantes das diferentes peças. O extremo do cilindro é vertical enquanto o extremo do cone faz um ângulo com o eixo axial. Esta impressão pode ser vista na Figura 23.



Figura 23 - Segunda iteração de impressão 3D. Painel a) peças isoladas; Painel b) Ciclone montado

Para corrigir o problema decorrente da modelação dos encaixes, optou-se por prolongar a modelação da peça do cone acoplado um cilindro de pouca altura a esta peça. Assim, na impressão da peça do cone, ao invés de terminar no fim do cone, termina num pequeno cilindro no qual está presente o encaixe.

Na Figura 24, na peça da esquerda, com o número 1, está um exemplo de um cone da modelação apresentada até aqui e na peça da direita, com o número 2, é apresentada a nova modelação corrigida.



Figura 24 - Modificação do encaixe das peças

Foi, também, impressa uma nova versão do Ciclone em que o cone e o cilindro são modelados juntamente, como uma peça única, sendo o único encaixe necessário aquele que o une ao ducto de saída do gás (peça a vermelho na Figura 25).

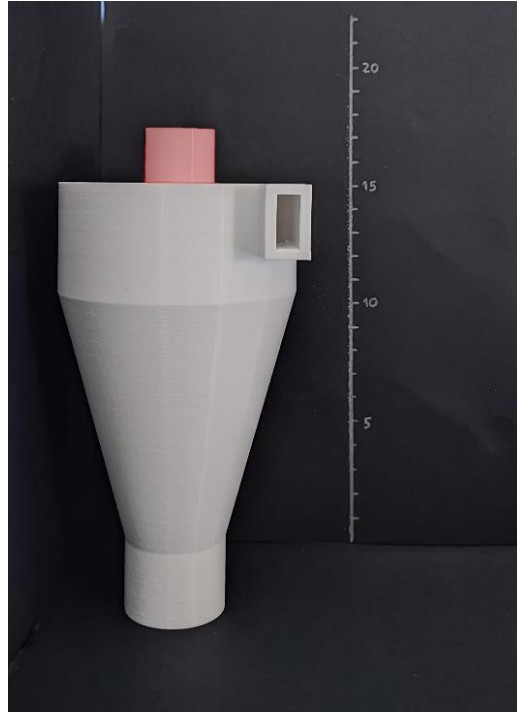


Figura 25 - Impressão do cone e cilindros numa peça única

Para testar a viabilidade das alterações foram de novo impressas as partes do cone e cilindros do Ciclone. Nesta fase da modelação, foi encontrado um novo problema: a dimensão do encaixe do corpo cilíndrico com o corpo cónico não permitia que as peças encaixem de forma estável. Para corrigir este problema foi implementada uma altura maior neste encaixe e aplicado este conhecimento aos restantes encaixes da modelação.

Para satisfazer estas necessidades foram efetuados testes de tolerância exemplificados pelos modelos na Figura 26. Notou-se, também, que quando as alturas do encaixe eram inferiores a 1.5 mm, certamente relacionado com a precisão do injetor da



Figura 26 - Teste de tolerâncias de encaixes

impressora, eram geradas imperfeições nas peças que dificultavam ou até mesmo impediam o encaixe sem recurso a polimento. Com o aumento da altura do encaixe estes problemas foram resolvidos.

Uma vez estabelecidas as necessidades para um correto encaixe de todas as peças, foi impressa a totalidade do Ciclone. Com a realização deste teste surgiu a ideia de tornar o ducto de saída de partículas e de gás adaptável às necessidades do utilizador. Assim foi estabelecida a possibilidade de imprimir um qualquer número destes acessórios, sendo possível encaixá-los uns nos outros. Para tal, a mesma peça apresentará um encaixe macho de um lado fêmea do outro. Estas mudanças podem ser visualizadas na Figura 27.

Todas as impressões foram efetuadas com filamento PLA de diâmetro 1.75mm da *smart materials 3D*. A temperatura da base de impressão utilizada foi de 60°C e 200°C para o bico de extrusão. As impressoras utilizadas foram: uma Creality Ender 3 PRO e uma Creality Ender 3 S1.



Figura 27 - Impressão da modelação com implementação dos testes de tolerância

3.3. Ideia Inicial vs Trabalho Final

O progressivo desenvolvimento da ferramenta levou-a a novos patamares. Para uma comparação entre a ideia inicial e a versão final do trabalho são apresentados os seguintes diagramas (ver Figura 28). Eles comparam a ideia original do trabalho com a implementação final. A premissa original era atingir uma forma de dimensionamento automático e modelação 3D de Ciclones. Na aplicação final, contudo, foi possível ir mais além, permitindo a seriação dos modelos por rendimento, perda de carga e fatores adimensionais, a opção para um desenho livre e a exportação para posterior simulação CFD.

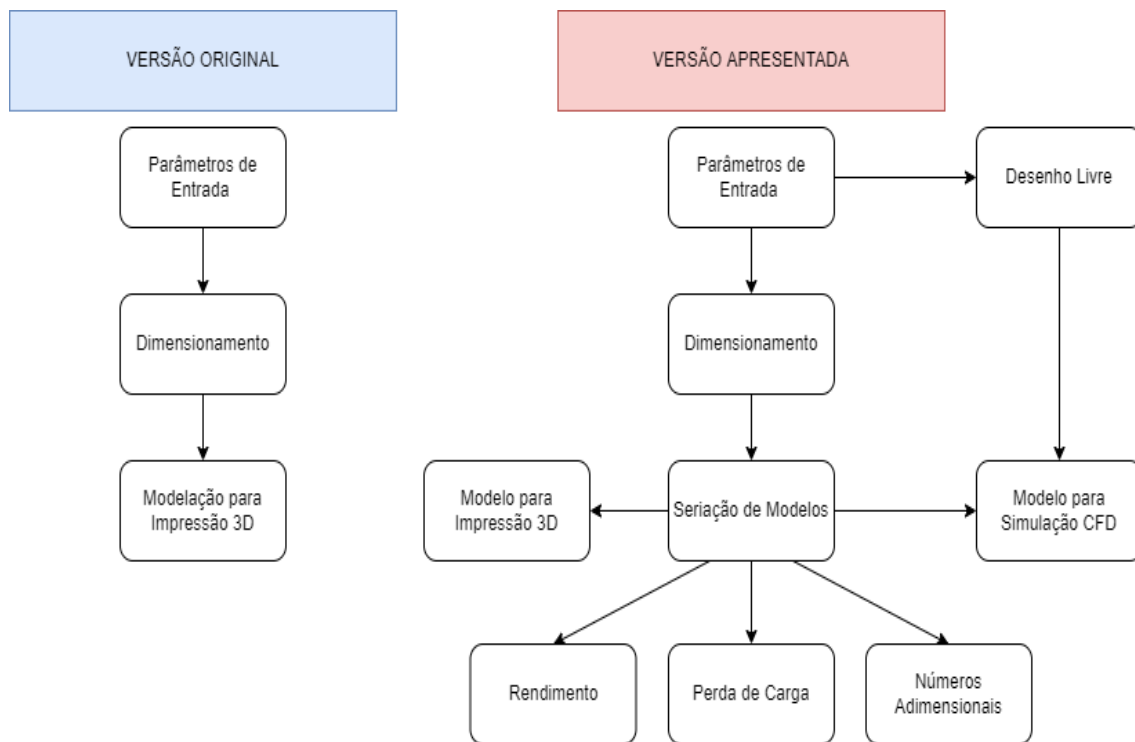


Figura 28 - Esquema de comparação entre versão original e versão apresentada

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão expostos os resultados obtido e realizada a discussão dos mesmos.

4.1.A aplicação Cyc-ASApp

Recorrendo à ferramenta *App designer* foi desenvolvida a aplicação Cyc-ASApp. Cyc – do inglês, Cyclone, que referencia o objeto de estudo e o acrônimo ASAPp com um triplo significado: *Automatic Sizing and Printing*, que se traduz para dimensionamento e impressão automática; *Automatic Sizing App*, o que significa aplicação de dimensionamento automático; e ainda *As Soon as Possible*, novamente do inglês, com a tradução de *logo que possível*, apontando para a rapidez do processo. Como resultado foi criada a seguinte aplicação, apresentada nas Figura 29 e Figura 30.

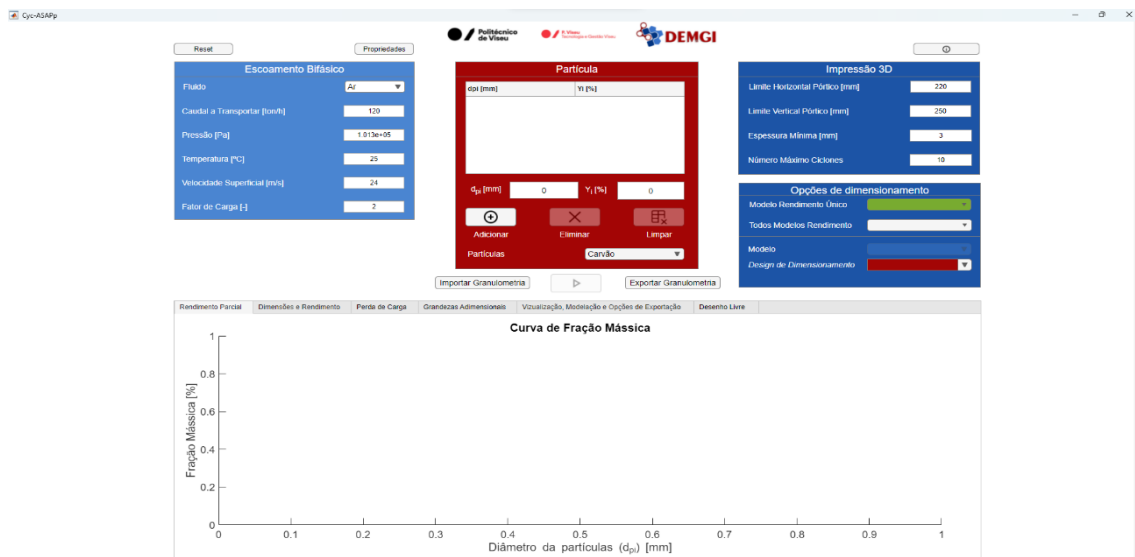


Figura 29 - Ambiente de entrada na aplicação desenvolvida

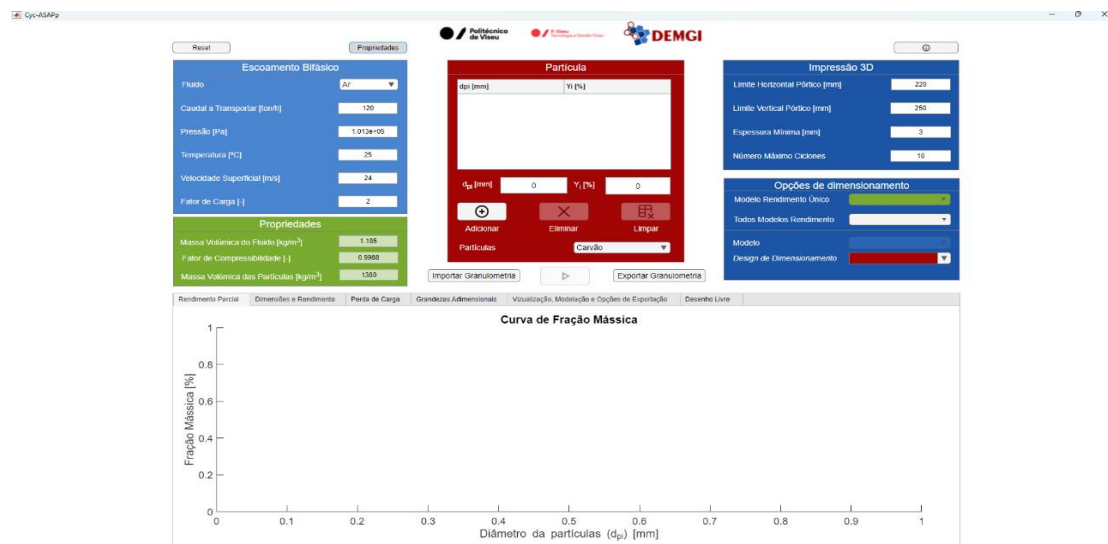


Figura 30 - Ambiente da aplicação desenvolvida com a opção de propriedades ativa

O *GUI* apresenta quatro zonas, cada uma dedicada a diferentes parâmetros de entrada: caracterização do fluido, caracterização das partículas, caracterização do pórtico e variáveis de impressão 3D, e opções para dimensionamento.

Na primeira zona, visível na Figura 31, é necessária a introdução das propriedades do escoamento bifásico, i.e., fluido e partículas. A caracterização do fluido necessita de parâmetros como: a definição do próprio fluido, o caudal de fluido de transporte, \dot{V} , a pressão, P_f e temperatura do fluido, T_f , velocidade superficial, v_c e ainda o fator de carga, θ . Com a seleção do fluido, temperatura e pressão a massa volúmica, ρ_f , e o fator de compressibilidade, Z são automaticamente calculados.

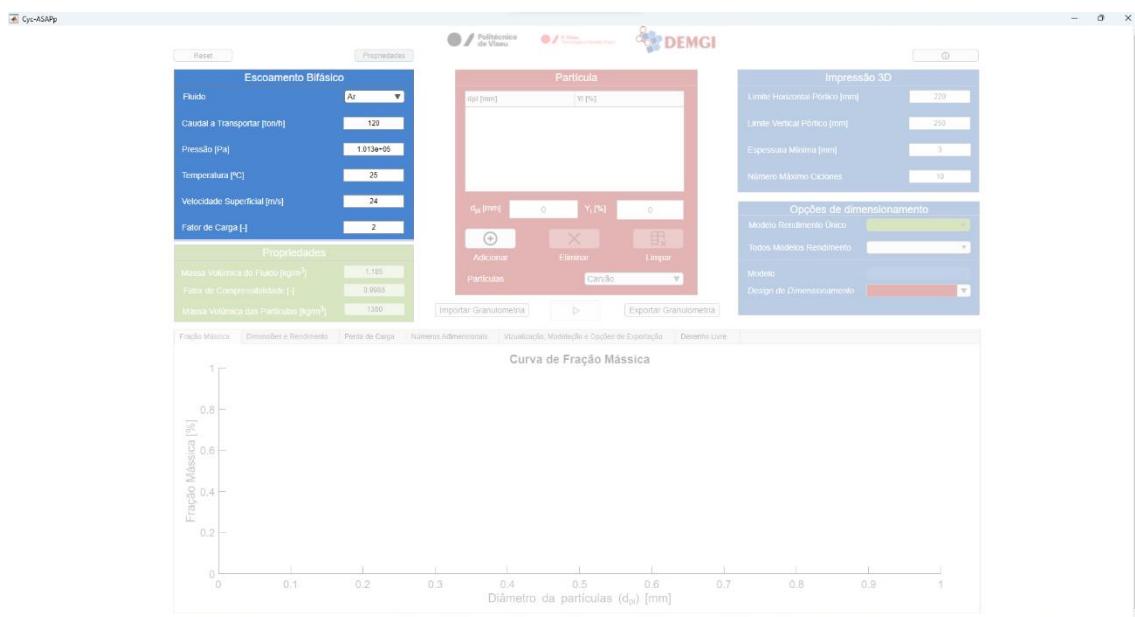
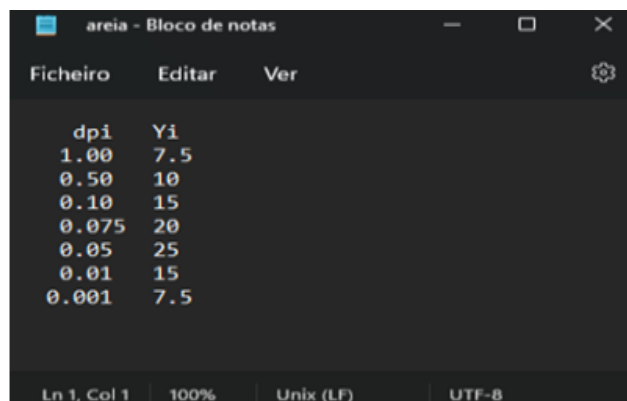


Figura 31 - Painel de introdução das características do escoamento bifásico

A caracterização das partículas, visível na Figura 34, depende da distribuição granulométrica, Y_i , onde a cada intervalo de diâmetro de partículas, d_{pi} , em milímetros,



d_{pi}	Y_i
1.00	7.5
0.50	10
0.10	15
0.075	20
0.05	25
0.01	15
0.001	7.5

Figura 32 - Exemplo de um ficheiro de importação de granulometria

corresponde uma fração mássica em percentagem. Neste campo, a introdução do binómio diâmetro da partícula/fração mássica pode, para além de ser inserido manualmente, ser importado no formato TXT ou XLSX. Na Figura 32 pode ser consultado um exemplo de um ficheiro de importação e exportação. Estes tipos de ficheiros podem ser gerados no Bloco de Notas e Excel, respetivamente. O utilizador poderá também exportar os dados de fração mássica e diâmetros de partículas anteriormente introduzidos. Esta exportação será executada no formato TXT. A formatação do ficheiro de importação e exportação é igual. Quer na importação como na exportação, o diâmetro da partícula, será apresentado, em milímetros, na primeira coluna do ficheiro.

De referir, também, que, à medida que os valores são adicionados à tabela, estes são adicionados ao gráfico de distribuição granulométrica. Será, igualmente, necessário escolher qual o material das partículas para que, similarmente ao fluido, seja calculada a

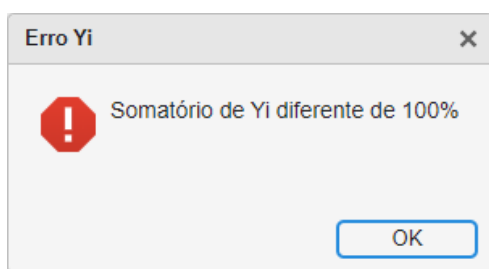


Figura 33 - Aviso de erro da soma da distribuição granulométrica

sua massa volúmica. Caso o material das partículas não esteja definido na lista, o utilizador deverá seleccionar a opção “Outro” e inserir o respetivo valor de massa volúmica, manualmente. Na segunda coluna será apresentada a fração mássica na forma de percentagem. Caso a soma da distribuição granulométrica das partículas não corresponda a 100%, a aplicação apresentará um aviso de erro, apresentado na Figura 33.

Passando à terceira zona da aplicação, o utilizador é remetido para a definição de restrições aos cálculos a serem realizados. Nesta zona, o utilizador definirá a opção de dimensionamento que condicionará o restante preenchimento de dados e os restantes cálculos realizados.



Figura 34 - Painel de introdução das características das partículas

Se o diâmetro do Ciclone obtido do dimensionamento superar os limites introduzidos para o tamanho dos pórtricos, surgirá uma janela *pop-up* (ver Figura 35), alertando para este facto.

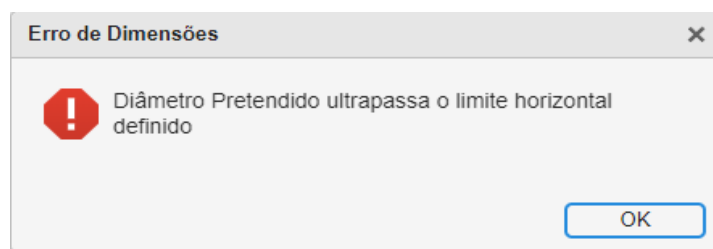


Figura 35 - Alerta de dimensões do Ciclone



Figura 36 - Painel de introdução das condições de Impressão 3D

No painel com o título “Opções de dimensionamento”, visível na seguinte figura são apresentadas seis possibilidades. Na lista descendente (*drop-down*) com a etiqueta “Modelo Rendimento Único”, todas as possibilidades de escolha permitem o dimensionamento e decorrentes cálculos para apenas um modelo. Em todas as opções disponíveis nesta lista, o utilizador poderá definir a espessura mínima para a parede do Ciclone, em milímetros. Aquando da seleção da “Opção 1”, deverá ser definido o número máximo de Ciclones, fazendo com que a aplicação afete o dimensionamento de modo que o número total de Ciclones seja sempre inferior ou igual ao número definido. Com a escolha da “Opção 2”, é pedido ao utilizador que defina os limites vertical e horizontal do pórtico da impressora. Assim, é dada primazia ao hardware disponível, sendo garantida a viabilidade de impressão do projeto. Na “Opção 3”, para além dos limites dos pórticos da impressora, será pedido ao utilizador que introduza o diâmetro de Ciclone pretendido, através de uma janela pop-up, demonstrada na Figura 35. A aplicação avaliará se o projeto é executável com o equipamento disponível, comparando as dimensões do pórtico com as dimensões de largura máxima do Ciclone, uma vez que, para além do diâmetro central do Ciclone, terá de ser somado o comprimento do ducto de entrada. Na lista descendente “Todos Modelos Rendimento”, as condições definidas pela seleção 1, 2 e 3 são iguais às do “Modelo Rendimento Único”, no entanto, serão apresentados os resultados para todos os modelos implementados na aplicação.

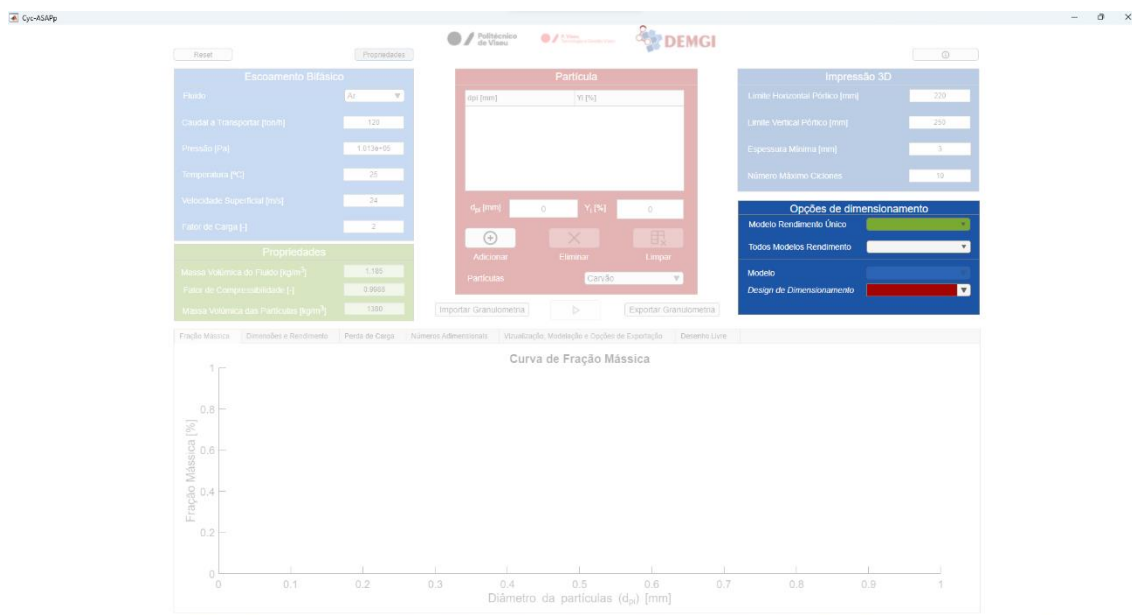


Figura 37 - Painel de introdução das Opções de dimensionamento

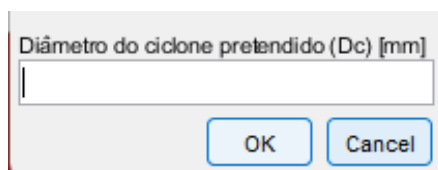


Figura 38 - Janela de definição do Diâmetro Central do Ciclone

Os modelos implementados são: o modelo de Barth; o modelo de Muschelknautz, o modelo de Iozia & Leith que por uma questão de simplicidade de referência na aplicação aparece denominado como simplesmente Iozia; o modelo de Rosin, Rammler, Intelmann/Lapple, que pelo mesmo motivo, aparece definido como Lapple; o modelo de Dietz; e o modelo de Li & Wang, referido como Li; o modelo de Leith & Licht, aludido como Leith; o modelo de Shahraki.

Na aba presente na parte inferior da aplicação são apresentados seis separadores: Rendimento Parcial; Dimensões e Rendimento; Perda de Carga; Fatores Adimensionais; Visualização, Modelação e Opções de Exportação; e Desenho Livre.

O separador de *Rendimento Parcial* apresenta um gráfico fração mássica (%) vs diâmetro de partículas (mm). No segundo separador, *Dimensões e Rendimento*, é apresentada uma tabela no qual figura o nome do modelo de dimensionamento usado e respetivas dimensões (e.g. D_c) para a definição da geometria do Ciclone. Na porção

inferior é apresentado um gráfico onde é mostrada a curva de rendimento e o diâmetro de corte (d_{50}), o valor que corresponde ao tamanho de partícula com uma taxa de eficiência de separação de 50%, obtido a partir do balanço de forças a atuar numa única de partícula, como mencionado acima, página 5 (Morin et al., 2021).

Para uma melhor visualização das dimensões calculadas é, ainda, apresentado um esquema da geometria e respetiva nomenclatura associada aos Ciclones. No separador seguinte, *Perda de Carga*, pode ser consultada uma tabela em que na primeira coluna aparece o nome do modelo de dimensionamento associado aos valores de rendimento global, η (%), e os valores de perda de carga calculados pelos seguintes modelos, Lapple, Miller, Aproximação por Zonas, Barth, Casal e Shahraki. Todos os valores de perda de carga são apresentados em unidades do Sistema Internacional. No quarto separador são apresentados os parâmetros adimensionais. Como referido anteriormente, estes fatores assumem relevância na comparação entre diferentes modelos e geometrias de dimensionamento e respetivas condições de operação. Aqui, são apresentados o rendimento; a razão entre o diâmetro de corte e o diâmetro central do Ciclone; a razão das massas volúmicas do fluido e das partículas; o número de Reynolds; e o número de Euler. Estes parâmetros adimensionais permitem estudar experimentalmente um escoamento e efetuar extrapolações para escoamentos semelhantes. Ou seja, permite o estudo de um modelo a escala reduzida e extrapolar os resultados obtidos para um protótipo de tamanho real, desde que seja assegurada a manutenção dos parâmetros estudados (Xie et al., 2021). São números de importância chave na análise paramétrica, pois permitem perceber a similaridade entre problemas pertencentes à mesma grande classe de problemas.

No separador *Visualização, Modelação e Opções de Exportação* é possível visualizar o modelo 3D do Ciclone gerado através do modelo escolhido, através no *drop down Modelo de Dimensionamento a Visualizar* onde é escolhido o modelo de dimensionamento a visualizar. São, também, apresentadas as seguintes opções de exportação para modelos de impressão 3D: *Ducto de Saída de gás, Cilindro Principal, Cone, Ducto de Saída de Partículas, Todos* e *Exportar Modelo de Simulação CFD*. Na última opção, *Todos*, todos serão exportados. Nas restantes apenas o modelo equivalente ao título do botão pressionado. O botão com rótulo *Exportar Modelo de Simulação CFD* irá exportar o modelo para a simulação. Após a seleção deste botão será ainda permitido definir um novo comprimento do ducto de entrada da mistura (E_{Des}), numa janela *pop-up*,

de modo que possa ser assegurado o total desenvolvimento do escoamento, como referido acima.

No separador de *Desenho Livre* podem ser desenvolvidas novas geometrias. Aqui é permitido ao utilizador introduzir todos os parâmetros geométricos de um Ciclone, de forma independente. É ainda introduzida uma nova variável que contempla a espessura do ducto de saída do gás, δ_2 , como demonstrada na Figura 39.

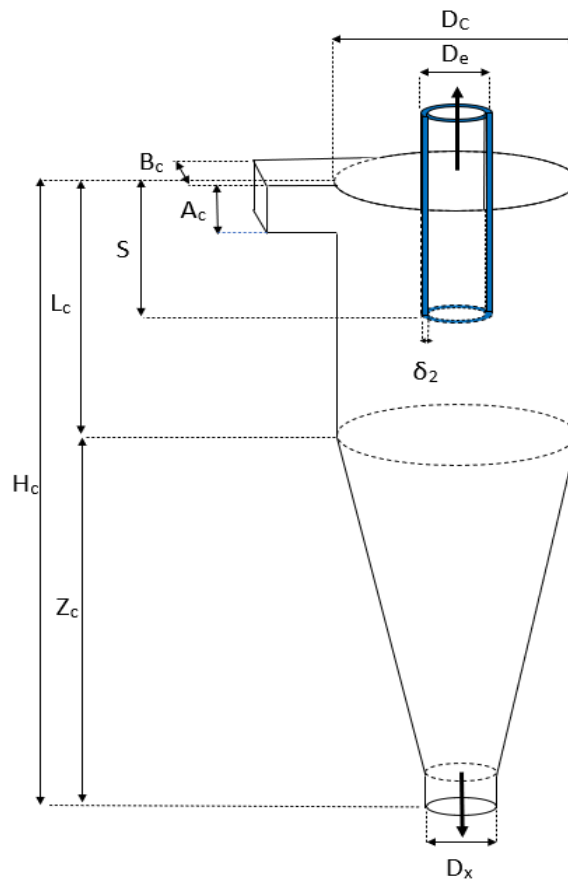


Figura 39 - Introdução da variável δ_2

No mesmo separador, pode ser feita uma visualização do Ciclone projetado e exportar o respetivo modelo.

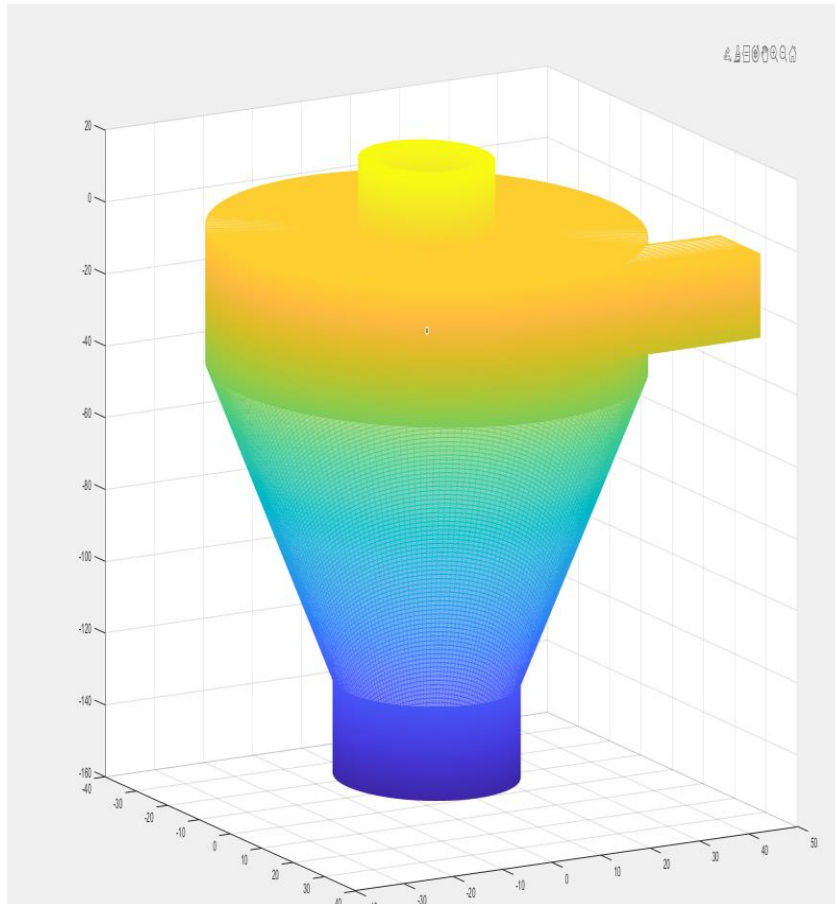


Figura 40 - Exemplo de visualização do Ciclone dimensionado na aplicação

Caso exista recoleção surgirá no ecrã do utilizador um *pop-up* igual ao da Figura 41, conforme a condição discutida acima ($v_c / U_s \geq 1.36$).

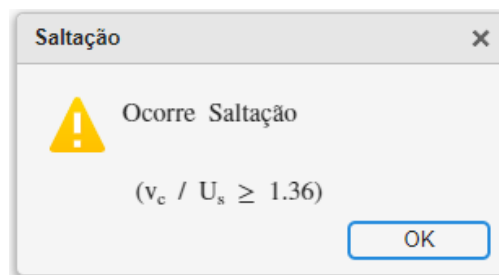


Figura 41 - Alerta de ocorrência de Saltação

No topo superior direito da aplicação foi colocado um botão com o ícone ⓘ, ver Figura 42. Após a sua seleção é aberta uma janela *pop-up*, na qual são explicadas as funcionalidades da aplicação, uma explicação breve de cada variável necessária ao funcionamento da aplicação. E também, algumas notas sobre os modelos teóricos apresentados, tanto de dimensionamento, como rendimento e perda de carga.

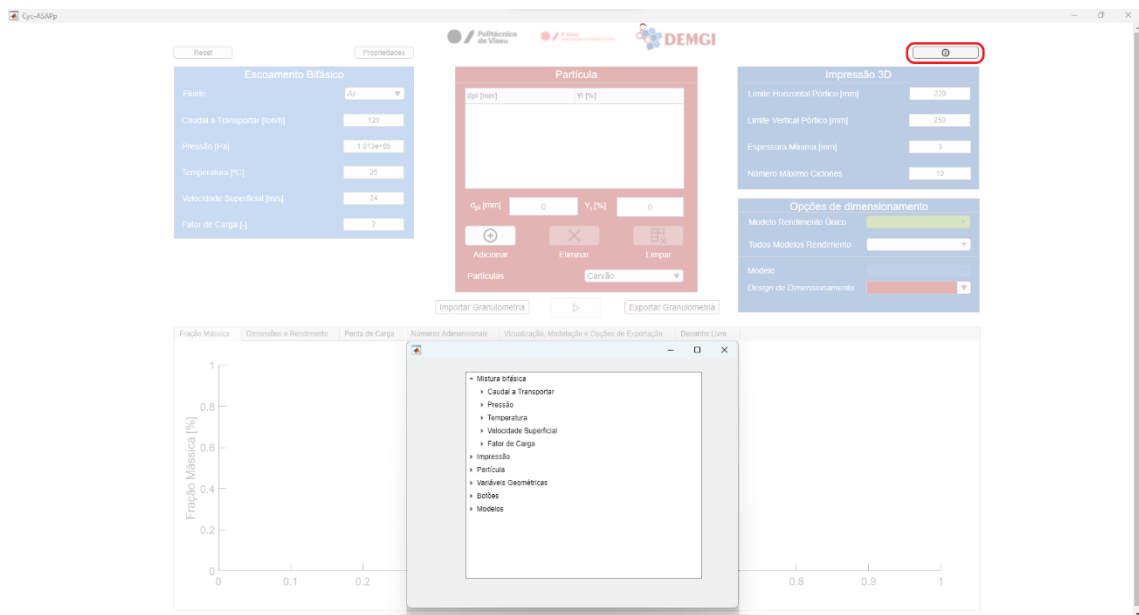


Figura 42 - Pop-up informativa

O botão *Reset*, assinalado na Figura 43, serve para devolver a aplicação à sua configuração original, eliminando todas as variáveis inseridas e calculadas da aplicação.

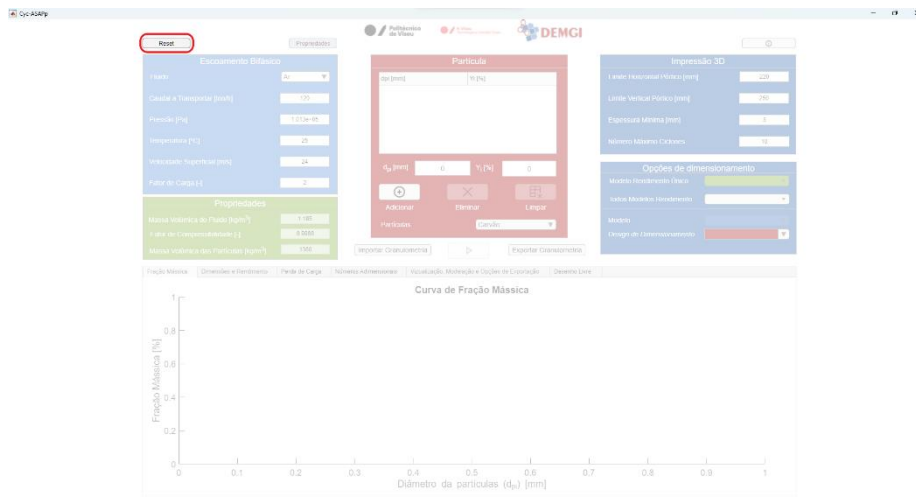


Figura 43 - Botão *Reset*

Na Figura 44, são apresentados os botões centrais da aplicação. Com o número 1, o botão *Importar Granulometria*, que serve para a importação dos dados de granulometria; com o número 2, o botão executar, este serve para que a aplicação corra e efetue o dimensionamento; o botão *Exportar Granulometria*, tem a função de exportar os dados de granulometria inseridos na aplicação.

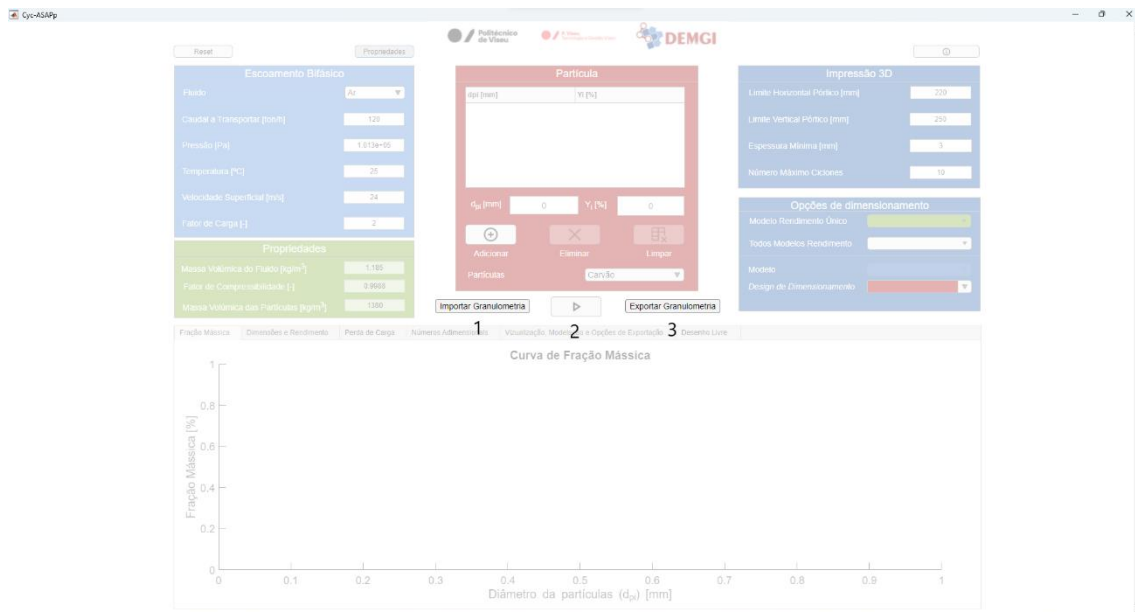


Figura 44 - Botões centrais

Os painéis dos modelos de cálculo de rendimento e geometrias disponíveis na aplicação, à data, são apresentados na Figura 45.

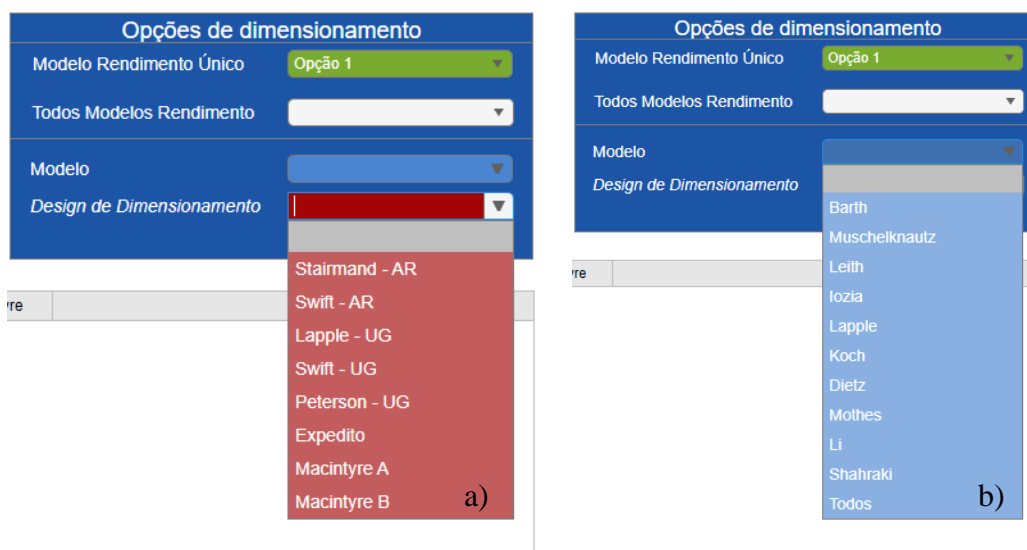


Figura 45 - Painéis de opções de: a) Modelos de Geometria de Ciclones; b) Modelos de cálculo do Rendimento

A aplicação possui, ainda um separador que permite a visualização do modelo dimensionado. Este separador tem embutido o botão para exportação do modelo para CFD e para impressão 3D (ver Figura 46). As cores dos botões de exportação coincidem com a parte do Ciclone no esquisso do Ciclone apresentado neste separador.

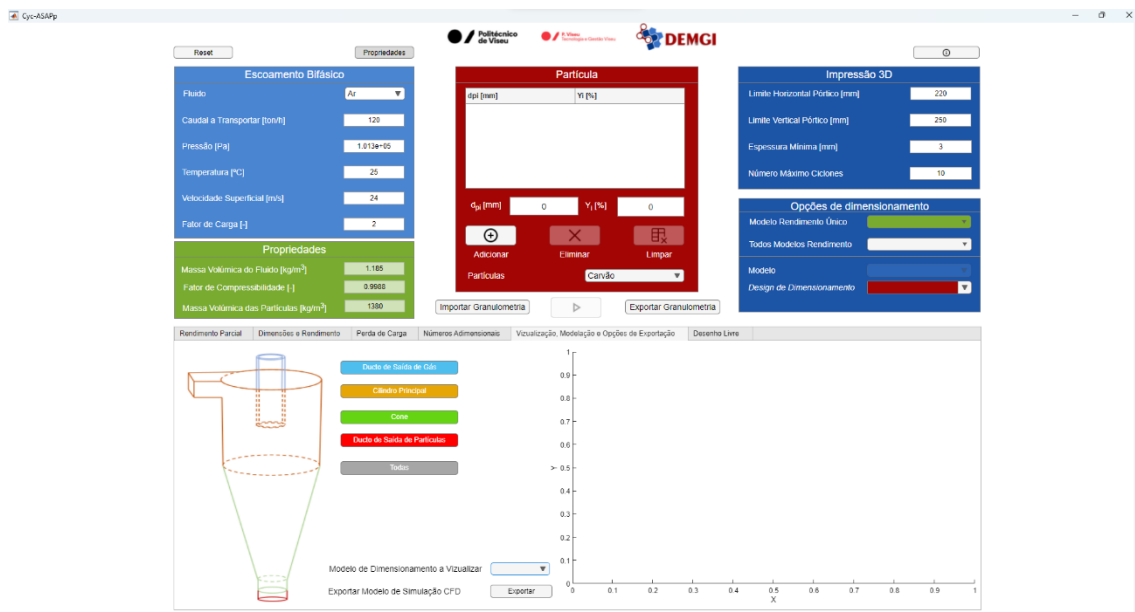


Figura 46 - Separador de visualização do modelo dimensionado e botão de exportação de modelo para CFD

O separador de *Desenho Livre* é composto pelos campos de atribuição de todas as variáveis geométricas e por dois botões. Estes botões servem para visualizar e exportar o modelo livre.



Figura 47 - Separador de Desenho Livre

4.1.2. Impressão 3D

Como referido acima, um dos objetivos deste trabalho passa pela modelação e subsequente impressão 3D da mesma. Na Figura 49 é apresentado um exemplo de um Ciclone completo.

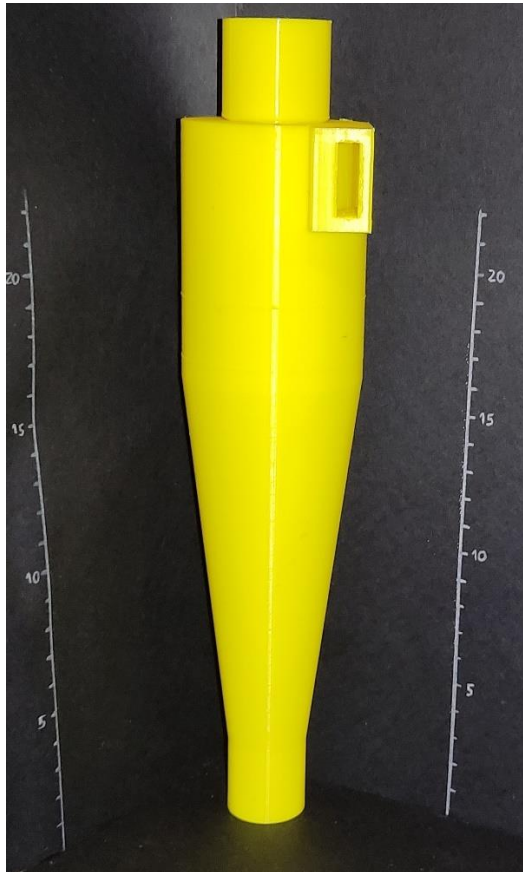


Figura 49 - Exemplo de um Ciclone impresso

4.2.Comparação dos Resultados de Dimensionamento Manual e Computacional

4.2.1. Cálculos manuais

Para além de garantir um rápido processamento dos dados, é necessário garantir a fiabilidade dos resultados obtidos. Para isso, foram efetuados cálculos manuais e os resultados comparados com aqueles alcançados com a utilização da aplicação. Garantindo a obtenção dos mesmos resultados, nos dois métodos de cálculo, é assegurada a funcionalidade real da aplicação.

Como referido acima, outra das vantagens da ferramenta desenvolvida é o ganho de tempo no dimensionamento dos Ciclones. Para uma fácil comparação foi medido o tempo gasto na realização dos cálculos manuais, excetuando o tempo de introdução de valores na calculadora. O tempo de cálculo manual é influenciado pela familiaridade do utilizador com o modelo utilizado, sendo o tempo obtido apenas uma referência. O tempo de cálculo da aplicação foi obtido utilizando um computador com as seguintes especificações, utilizadas em exclusividade: um processador AMD Ryzen 7 5800H com Radeon Graphics 3.20 GHz e 16 GB de RAM com um sistema operativo Windows 11 Home (x64), versão 22H2. O tempo de processamento é influenciado pelas capacidades da máquina utilizada.

Os valores utilizados para dimensionamento e posterior cálculo de valores de análise do rendimento do Ciclone, tiveram como base o “Projecto de um Aspirador Autónomo” (Nunes, 2002) fundamentados nos dados apresentados em “Transporte Pneumático” por Pinho (2005). Foram, também, utilizados os exemplos de dimensionamentos publicados por Coury et al., em 2004.

Os resultados apresentados nesta secção, 4.2.1, são os apresentados pelos autores dos trabalhos referenciados.

4.2.1.1. Coury et al., 2004

Neste exemplo, publicado por Coury et al., em 2004, o design escolhido para o dimensionamento foi o de Stairmand de alto rendimento. Um caudal volúmico de entrada de 500.4 m³/h e autor calculou os rendimentos para três velocidades de entrada diferentes 10, 15 e 20 m/s. Os resultados que serão apresentados abaixo serão unicamente para a velocidade de 10 m/s. A massa volúmica é 860 kg/m³, a concentração de partículas de pó é 0.02 kg/m³ e a temperatura 27 °C. A massa volúmica e viscosidade do ar para esta temperatura é 1.18 kg/m³ e 1.8x10⁻⁵ kg/m·s, respetivamente. Consequentemente, as dimensões de Ciclone obtidas são: D_c = 0.302 m; A_c = 0.151 m; B_c = 0.060 m; H_c = 1.208 m; L_c = 0.453 m; D_e = 0.151m; D_x = 0.113m; S = 0.151m.

Assim, o caudal volúmico de gás será dado por

$$\dot{V} = v_c A_c B_c 3600 = 326.2\text{m}^3/\text{h} \quad (177)$$

O restante caudal será separado numa segunda unidade ciclónica.

A granulometria de distribuição mássica dos diferentes diâmetros a serem transportados, para este dimensionamento são apresentados na Tabela 3

Tabela 3 - Granulometria e distribuição granulométrica para os cálculos de dimensionamento

d _{pi} [μm]	x _i [%]
0.50	1.00
1.50	2.00
3.00	4.00
5.00	6.00
7.00	8.00
9.00	10.00
15.00	13.00
25.00	15.00
35.00	12.00
45.00	10.00
55.00	7.00
65.00	5.00
75.00	4.00
85.00	2.00
95.00	1.00
	$\sum_i x_i = 100.00\%$

4.2.1.1.1. Modelo de Barth

Seguindo a formulação do modelo apresentada acima, o cálculo do rendimento do Ciclone segue os passos descritos de seguida.

A velocidade de saída do gás é calculada pela equação (7)

$$v_e = 5.1 \text{ m/s} \quad (178)$$

O parâmetro α , é obtido pela equação (2).

$$\alpha = 0.76 \quad (179)$$

Como $D_e > D_x$, a altura do eixo central do Ciclone é obtida na equação (5).

$$L^* = 0.905 \text{ m} \quad (180)$$

A velocidade tangencial máxima é apurada na equação (6) e toma o valor de

$$v_\theta = 10.6 \text{ m/s} \quad (181)$$

f , é o coeficiente de atrito toma o valor recomendado de 0.02

Desta forma, o quociente v_{ts}/v_{ts}^m pode ser calculado em função do diâmetro das partículas (ver equação (4)).

$$\frac{v_{tsi}}{v_{tsi}^*} = 1.8718 \times 10^{10} d_{pi}^2 \quad (182)$$

Logo, a eficiência de coleção pode ser calculada através da seguinte expressão

$$\eta_i = \frac{1}{\left[1 + (1.8718 \times 10^{10} d_{pi}^2)^{-3.2}\right]} \quad (183)$$

Os cálculos de rendimento parcial e total, para os diferentes diâmetros de partícula, são apresentados na Tabela 4. O rendimento global teórico tem um valor de 80.72%, apresentado na mesma tabela.

Tabela 4 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Modelo de Barth

d_{pi} [m]	x_i [%]	η_i [-]	$\eta_i x_i$ [-]
5.00×10^{-07}	1.00	$3.5046000 \times 10^{-08}$	$3.5046000 \times 10^{-10}$
1.50×10^{-06}	2.00	$3.9646000 \times 10^{-05}$	$7.9292000 \times 10^{-07}$
3.00×10^{-06}	4.00	$3.3369900 \times 10^{-03}$	$1.3348000 \times 10^{-04}$
5.00×10^{-06}	6.00	$8.0908990 \times 10^{-02}$	$4.8545400 \times 10^{-03}$
7.00×10^{-06}	8.00	$4.3127822 \times 10^{-01}$	$3.4502260 \times 10^{-02}$
9.00×10^{-06}	10.00	$7.9113399 \times 10^{-01}$	$7.9113400 \times 10^{-02}$
1.50×10^{-05}	13.00	$9.9005862 \times 10^{-01}$	$1.2870762 \times 10^{-01}$
2.50×10^{-05}	15.00	$9.9961824 \times 10^{-01}$	$1.4994274 \times 10^{-01}$
3.50×10^{-05}	12.00	$9.9995567 \times 10^{-01}$	$1.1999468 \times 10^{-01}$
4.50×10^{-05}	10.00	$9.9999112 \times 10^{-01}$	$9.9999110 \times 10^{-02}$
5.50×10^{-05}	7.00	$9.9999754 \times 10^{-01}$	$6.9999830 \times 10^{-02}$
6.50×10^{-05}	5.00	$9.9999916 \times 10^{-01}$	$4.9999960 \times 10^{-02}$
7.50×10^{-05}	4.00	$9.9999966 \times 10^{-01}$	$3.9999990 \times 10^{-02}$
8.50×10^{-05}	2.00	$9.9999985 \times 10^{-01}$	$2.0000000 \times 10^{-02}$
9.50×10^{-05}	1.00	$9.9999993 \times 10^{-01}$	$1.0000000 \times 10^{-02}$
	$\sum_i x_i = 100.00\%$		$\sum_i \eta_i x_i = 80.72\%$

Os cálculos manuais demoraram cerca de 15 minutos a realizar.

4.2.1.1.2. Modelo de Leith & Licht

O comprimento e diâmetro do vórtice são calculados pelas equações (41) e (40), respetivamente:

$$Z = 0.750 \text{ m} \quad (184)$$

$$d_c = 0.190 \text{ m} \quad (185)$$

Como $H_c - S = 1.208 \text{ m} - 0.151 \text{ m} = 1.057 \text{ m} > Z_c$, o volume de vórtice do Ciclone é dado pela equação (38).

$$V_{nl} = 0.0299 \text{ m}^3 \quad (186)$$

Uma vez calculado o V_{nl} , o parâmetro geométrico adimensional, G , pode ser apurado na equação (45).

$$G = 559.4 \quad (187)$$

O expoente do vórtice é obtido a partir da equação (42) e toma o seguinte valor:

$$n = 0.56 \quad (188)$$

O tempo de relaxação pode ser calculado na equação (43), como função do diâmetro das partículas

$$\tau_i = 2654321 d_{pi}^2 \quad (189)$$

Portanto, a eficiência de coleção parcial é dada pela equação (36)

$$\eta_i = 1 - \exp(-2905.6 d_{pi}^{0.64}) \quad (190)$$

Os cálculos para os diferentes diâmetros de partículas e globais são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Modelo de Leith & Licht

d_{pi} [m]	x_i [%]	η_i [-]	$\eta_i x_i$ [-]
5.0×10^{-07}	1.00	$2.3624719 \times 10^{-01}$	$2.3620000 \times 10^{-03}$
1.5×10^{-06}	2.00	$4.1982193 \times 10^{-01}$	$8.3960000 \times 10^{-03}$
3.0×10^{-06}	4.00	$5.7189461 \times 10^{-01}$	$2.2876000 \times 10^{-02}$
5.0×10^{-06}	6.00	$6.9163112 \times 10^{-01}$	$4.1498000 \times 10^{-02}$
7.0×10^{-06}	8.00	$7.6756517 \times 10^{-01}$	$6.1405000 \times 10^{-02}$
9.0×10^{-06}	10.00	$8.1981372 \times 10^{-01}$	$8.1981000 \times 10^{-02}$
1.5×10^{-05}	13.00	$9.0712311 \times 10^{-01}$	$1.1792600 \times 10^{-01}$
2.5×10^{-05}	15.00	$9.6294939 \times 10^{-01}$	$1.4444200 \times 10^{-01}$
3.5×10^{-05}	12.00	$9.8321596 \times 10^{-01}$	$1.1798600 \times 10^{-01}$
4.5×10^{-05}	10.00	$9.9177485 \times 10^{-01}$	$9.9177000 \times 10^{-02}$
5.5×10^{-05}	7.00	$9.9573977 \times 10^{-01}$	$6.9702000 \times 10^{-02}$
6.5×10^{-05}	5.00	$9.9769888 \times 10^{-01}$	$4.9885000 \times 10^{-02}$
7.5×10^{-05}	4.00	$9.9871494 \times 10^{-01}$	$3.9949000 \times 10^{-02}$
8.5×10^{-05}	2.00	$9.9926242 \times 10^{-01}$	$1.9985000 \times 10^{-02}$
9.5×10^{-05}	1.00	$9.9956677 \times 10^{-01}$	$9.9960000 \times 10^{-03}$
	$\sum_i x_i = 100.00\%$		$\sum_i \eta_i x_i = 88.76 \%$

Para este modelo, o de Leith & Licht, os cálculos manuais demoraram aproximadamente 25 minutos a realizar.

4.2.1.1.3. Modelo Iozia & Leith

O modelo de Iozia e Leith começa por calcular o diâmetro do núcleo do Ciclone, através da equação (53).

$$D_{n\u00facleo} = 0.096 m \quad (191)$$

E como $d_c < B_c$, Z_c toma o seguinte valor, obtido da equação (52)

$$L^* = 1.057 m \quad (192)$$

De seguida foi calculada a velocidade tangencial m\u00e1xima a partir da equa\u00e7\u00e3o (51)

$$v_{\theta max} = 15.8 m/s \quad (193)$$

Sabendo Q , $D_{n\u00facleo}$, $v_{\theta max}$ e as propriedades do g\u00e1s e part\u00edculas, o di\u00e2metro de corte (d_{50}) \u00e9 calculado pela equa\u00e7\u00e3o (50).

$$d_{50} = 4.5 \cdot 10^{-6} m = 4.5 \mu m \quad (194)$$

O expoente β \u00e9 fun\u00e7\u00e3o do di\u00e2metro de corte, em cent\u00edmetros, e das dimens\u00f5es do Ciclone, e por isso \u00e9 implicitamente dependente da velocidade de entrada do g\u00e1s (equa\u00e7\u00e3o (49).

$$\beta = 2.44 \quad (195)$$

Por fim, a efici\u00eancia parcial pode ser escrita da seguinte forma, partindo da equa\u00e7\u00e3o (48).

$$\eta_i = \frac{1}{\left[1 + (4.5/d_{pi})^{2.44} \right]} \quad (196)$$

com d_{pi} em micr\u00f3metros (μm).

Podem assim ser calculadas o rendimento parcial e global, te\u00f3rico do modelo de Iozia e Leith, que ser\u00e3o apresentados na tabela abaixo.

Tabela 6 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Modelo de Iozia & Leith

d_{pi} [m]	x_i [%]	η_i [-]	$\eta_i x_i$ [-]
5.0×10^{-07}	1.00	$4.6731958 \times 10^{-03}$	$4.6731958 \times 10^{-05}$
1.5×10^{-06}	2.00	$6.4127018 \times 10^{-02}$	$1.2825404 \times 10^{-03}$
3.0×10^{-06}	4.00	$2.7104347 \times 10^{-01}$	$1.0841739 \times 10^{-02}$
5.0×10^{-06}	6.00	$5.6391827 \times 10^{-01}$	$3.3835096 \times 10^{-02}$
7.0×10^{-06}	8.00	$7.4612894 \times 10^{-01}$	$5.9690315 \times 10^{-02}$
9.0×10^{-06}	10.00	$8.4439230 \times 10^{-01}$	$8.4439230 \times 10^{-02}$
1.5×10^{-05}	13.00	$9.4967862 \times 10^{-01}$	$1.2345822 \times 10^{-01}$
2.5×10^{-05}	15.00	$9.8499286 \times 10^{-01}$	$1.4774893 \times 10^{-01}$
3.5×10^{-05}	12.00	$9.9334097 \times 10^{-01}$	$1.1920092 \times 10^{-01}$
4.5×10^{-05}	10.00	$9.9638235 \times 10^{-01}$	$9.9638235 \times 10^{-02}$
5.5×10^{-05}	7.00	$9.9777982 \times 10^{-01}$	$6.9844587 \times 10^{-02}$
6.5×10^{-05}	5.00	$9.9852196 \times 10^{-01}$	$4.9926098 \times 10^{-02}$
7.5×10^{-05}	4.00	$9.9895712 \times 10^{-01}$	$3.9958285 \times 10^{-02}$
8.5×10^{-05}	2.00	$9.9923136 \times 10^{-01}$	$1.9984627 \times 10^{-02}$
9.5×10^{-05}	1.00	$9.9941395 \times 10^{-01}$	$9.9941395 \times 10^{-03}$
	$\sum_i x_i = 100.00$		$\sum_i \eta_i x_i = 86.99\%$

Os cálculos de dimensionamento e rendimento teórico deste modelo demorou sensivelmente 20 minutos.

4.2.1.2. Nunes, 2002

Nos exemplos de dimensionamento, executados segundo o modelo de experimental de Rosin, Rammler & Intelmann/Lapple, o material particulado a ser transportado varia. Os Ciclones foram dimensionados para o transporte de areia, pó de cal, cimento em pó e serradura seca. Os dados tidos como constantes pelo autor para todos os dimensionamentos são:

- Caudal volúmico de ar, $\dot{V} = 31.7$ l/s
- Temperatura do ar, $T_f = 15^\circ\text{C}$
- Pressão atmosférica, $P = 1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5$ Pa

O objetivo deste trabalho passava pelo dimensionamento de um aspirador ciclónico, surgindo, por este motivo, restrições geométricas para que os Ciclones possam ser aplicados no interior da cápsula do aspirador. Foram efetuados dimensionamentos para diferentes materiais devido à incerteza do tipo de partículas com que estes aparelhos trabalham.

Os cálculos realizados para estes dimensionamentos, demoraram cerca de 10 minutos, para cada material.

4.2.1.2.1. Areia

A massa específica para este material é de 1760 kg/m³, e a velocidade para transportar este material é de 35 m/s.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica - Areia

d_{pi} [μm]	x_i [%]
1	7.5
0.5	10
0.1	15
0.075	20
0.05	25
0.01	15
0.001	7.5
	$\sum_i x_i = 100\%$

Conhecendo as variáveis que condicionam o dimensionamento, podemos começar a efetuar os cálculos.

Começando pela massa volúmica do ar, ρ_f

$$\rho_f = \frac{P}{R \cdot T_f} = \frac{1.013 \cdot 10^5}{287 (273.15 + 15)} = 1.225 \text{ kg/m}^3 \quad (197)$$

$R = 287 \text{ J/kg K}$, é a constante dos gases, para o ar.

O raio do Ciclone, R_c , pode ser calculado através da seguinte equação.

$$R_c = \sqrt{\frac{2 \dot{V}}{v_c}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.0317}{35}} = 0.0425 \text{ m} \quad (198)$$

Devido às restrições impostas pelo projeto, referidas acima, a altura máxima do Ciclone a ser implementado, deve ser de 195 mm, logo o dimensionamento será adaptado para um $R_c = 0.025 \text{ m}$. O caudal volúmico por separador ciclónico, \dot{V}_{uni} é apurado por

$$\dot{V}_{uni} = \frac{v_c \cdot R_c^2}{2} = \frac{35 \cdot 0.025^2}{2} = 0.0109 \text{ m}^3/\text{s} \quad (199)$$

Calculando o número de Ciclones necessários, concluímos que

$$N = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{uni}} = \frac{0.0317}{0.0109} = 2.9 \text{ Ciclones} \quad (200)$$

Serão, assim necessários 3 Ciclones. De seguida procede-se ao cálculo do rendimento de separação, admitindo que a distribuição da fase sólida na admissão é uniforme, as partículas mais finas terão uma probabilidade de separação igual ao quociente entre a distância a que se apresentam da parede e B_c , largura do ducto de entrada. Assim o diâmetro d_{50} das partículas, a que corresponde a probabilidade de separação de 50%, será dado pela equação (55):

$$d_{50} = 1.343 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (201)$$

Calculando o quociente D_{pi}/d_{50} e consultando a Figura 6 (página 25), é obtido o valor do rendimento de separação para cada diâmetro de partícula.

Tabela 8 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Areia

d_{pi} [mm]	x_i [%]	d_{pi} / d_{50} [-]	η_i [-]	$\eta_i x_i$ [-]
1.000	7.5	744.66	1.00	0.075
0.500	10	372.33	1.00	0.100
0.100	15	74.47	1.00	0.150
0.075	20	55.85	1.00	0.200
0.050	25	37.23	1.00	0.250
0.010	15	7.45	1.00	0.150
0.001	7.5	0.74	0.36	0.027
	$\sum_i x_i = 100.0\%$			$\sum_i \eta_i x_i = 95.2\%$

$$\eta_i = \sum_{i=1}^n \eta_i x_i = 0.952 = 95.2\% \quad (202)$$

4.2.1.2.2. Pó de Cal

O pó de cal, com características semelhantes ao pó de giz, tem uma massa volúmica de 320 kg/m^3 , e a velocidade do escoamento, é de 24 m/s . As dimensões do Ciclone serão mantidas, assim $D_c=0.05\text{m}$.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica - Pó de Cal

$d_{pi} [\mu\text{m}]$	$x_i [\%]$
0.250	10.0
0.100	25.0
0.075	20.0
0.050	17.5
0.025	12.5
0.010	10.0
0.001	5.0
$\sum_i x_i = 100.0\%$	

Adaptando o método apresentado para o dimensionamento para a areia, são obtidos os seguintes resultados para o Pó de Cal:

- Valor calculado de $R_c = 0.0514 \text{ m}$
- Valor arbitrado para $R_c = 0.025 \text{ m}$
- Caudal volúmico por Ciclone, $\dot{V}_{uni} = 0.0075 \text{ m}^3/\text{s}$
- Número de Ciclone, $N = 4$
- Diâmetro de Corte, $d_{50} = 3.299 \times 10^{-6} \text{ m}$

Tabela 10 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Pó de Cal

$d_{pi} [\text{mm}]$	$x_i [\%]$	$d_{pi}/d_{50} [-]$	$\eta_i [-]$	$\eta_i \cdot x_i [-]$
0.250	10.0	75.78	1.00	0.100
0.100	25.0	30.31	1.00	0.250
0.075	20.0	22.74	1.00	0.200
0.050	17.5	15.16	1.00	0.175
0.025	12.5	7.58	1.00	0.125
0.010	10.0	3.03	0.91	0.091
0.001	5.0	0.30	0.11	0.0055
$\sum_i x_i = 100\%$				$\sum_i \eta_i \cdot x_i = 94.7\%$

Assim, o rendimento global do Ciclone será

$$\eta_i = \sum_{i=1}^n \eta_i \cdot x_i = 0.947 = 94.7\% \quad (203)$$

4.2.1.2.3. Cimento em Pó

O cimento em pó tem uma granulometria muito fina (ver Tabela 11). A massa volúmica deste material é 1600 kg/m^3 . Neste exemplo, as dimensões serão, também, mantidas ($D_c=0.05\text{m}$). A velocidade recomendada para o transporte deste material é de 37 m/s .

Tabela 11 - Distribuição granulométrica - Cimento em pó

$d_{pi} [\mu\text{m}]$	$x_i [\%]$
0.100	5.0
0.050	10.0
0.020	12.5
0.010	30.0
0.025	20.0
0.010	12.5
0.001	10.0
	$\sum_i x_i = 100\%$

Por sua vez, para o cimento em pó os resultados obtidos são

- Valor calculado de $R_c = 0.041 \text{ m}$
- Valor arbitrado para $R_c = 0.025 \text{ m}$
- Caudal volúmico por Ciclone, $\dot{V}_{uni} = 0.01156 \text{ m}^3/\text{s}$
- Número de Ciclone, $N= 3$
- Diâmetro de Corte, $d_{50} = 1.370 \times 10^{-6} \text{ m}$

E, portanto

Tabela 12 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Cimento em Pó

$d_{pi} [\text{mm}]$	$x_i [\%]$	$d_{pi} / d_{50} [-]$	$\eta_i [-]$	$\eta_i \cdot x_i [-]$
0.1	5	73.00	1	0.05
0.05	10	36.50	1	0.1
0.02	12.5	14.60	1	0.125
0.01	30	7.30	1	0.3
0.025	20	18.25	1	0.2
0.01	12.5	7.30	1	0.125
0.001	10	0.73	0.33	0.033
	$\sum_i x_i = 100\%$			$\sum_i \eta_i \cdot x_i = 93.3\%$

Obtemos assim um rendimento global de

$$\eta_i = \sum_{i=1}^n \eta_i \cdot x_i = 0.933 = 93.3\% \quad (204)$$

4.2.1.2.4. Serradura Seca

No caso da Serradura Seca, as dimensões do Ciclone serão, mais uma vez, mantidas, assim $D_c=0.05\text{m}$. A massa volúmica é de 140 kg/m^3 . A velocidade recomendada para o transporte da serradura seca é de 12 m/s . A distribuição granulométrica é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 - Distribuição granulométrica - Serradura seca

$d_{pi} [\mu\text{m}]$	$x_i [\%]$
2.50	7.5.0
2.00	15.0
1.50	35.0
1.00	20.0
0.75	10.0
0.50	7.5
0.25	5.0
	$\sum_i x_i = 100.0\%$

E, para a Serradura Seca os resultados teóricos obtidos para este modelo foram

- Valor calculado de $R_c = 0.072 \text{ m}$
- Valor arbitrado para $R_c = 0.025 \text{ m}$
- Caudal volúmico por Ciclone, $\dot{V}_{uni} = 0.0375 \text{ m}^3/\text{s}$
- Número de Ciclone, $N =$ o valor obtido seriam 9 Ciclones (8.45), o que seria de difícil implementação. Por esta razão, o autor optou por apenas 4 Ciclones
- Diâmetro de Corte, $d_{50} = 7.071 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

Podemos assim proceder aos restantes cálculos

Tabela 14 - Granulometria, distribuição granulométrica e resultados de rendimento para os cálculos de dimensionamento - Serradura Seca

d_{pi} [mm]	x_i [%]	d_{pi} / d_{50} [-]	η_i [-]	$\eta_i \cdot x_i$ [-]
2.50	7.5	353.57	1.0	0.075
2.00	15.0	282.85	1.0	0.150
1.50	35.0	212.14	1.0	0.350
1.00	20.0	141.43	1.0	0.200
0.75	10.0	106.07	1.0	0.100
0.50	7.5	70.71	1.0	0.075
0.25	5.0	35.36	1.0	0.050
	$\sum_i x_i = 100\%$			$\sum_i \eta_i x_i = 100.0\%$

Assim, obtemos um rendimento global de

$$\eta_i = \sum_{i=1}^n \eta_i x_i = 1.0 = 100\% \quad (205)$$

Embora sejam calculados os rendimentos globais para cada tipo de material, o rendimento global do aspirador dependerá da fração mássica de cada tipo de pó a ser coletado.

4.2.2. Cálculos computacionais

Garantir a fiabilidade e rigor dos resultados obtidos é fundamental para validar a aplicação e a sua utilização. Partindo desta ideia, nesta secção será feita a comparação dos resultados obtidos com os da secção anterior. Os dados para a obtenção dos dimensionamentos serão os mesmos da secção 4.2.1.

Nesta secção são apresentados recortes do ecrã apresentado pela aplicação após o término dos cálculos de dimensionamento efetuados. Devido ao não arredondamento dos resultados dos cálculos intermédios existe uma variação de 0.25% entre os valores dos cálculos manuais e os valores devolvidos pela aplicação. Serão, também, apresentados valores para a perda de carga e números adimensionais (ver Anexo A). Estes carecem de posterior validação. Para o cálculo do número de Euler é utilizada a média dos valores de perda de carga apresentados.

4.2.2.1. Coury et al., 2004

Sendo que neste exemplo de dimensionamento as condições do escoamento e as variáveis geométricas não variam, muda apenas o método de cálculo de rendimento, os valores de perda de carga e números adimensionais são iguais durante a secção 4.2.2.1 e são apresentados, para a perda de carga, na Tabela 15. Os números adimensionais, além do rendimento apresentado anteriormente, tomam os valores de 2.7065×10^{-5} para o rácio de d_{50} por D_c ; 0.0014 para o rácio das massas volúmicas; o número de Reynolds tem o valor de 2185.7000; e o número de Euler 19219.0000.

Tabela 15 - Resultados de Perda de Carga

Modelo	Valor [Pa]
Shepherd & Lapple	94.20
Miller & Lissman	576.95
Stairmand	199.65
Barth	160.62
Muschelknautz	67.72
Casal & Martinez-Bennet	202.70
Ramachandran et al.	71.32
Aproximação por zonas	200.48
Macintyre	478.88
Shahraki	886.78

4.2.2.1.1. Modelo de Barth

No modelo de Barth, calculado pela aplicação, foi previsto um rendimento de 80.17%, enquanto nos cálculos realizados manualmente o rendimento obtido na realização dos cálculos manuais havia sido 80.72%. Esta diferença surge dos arredondamentos efetuados nos cálculos manuais. O tempo de execução dos cálculos pela aplicação é inferior a 1 segundo.

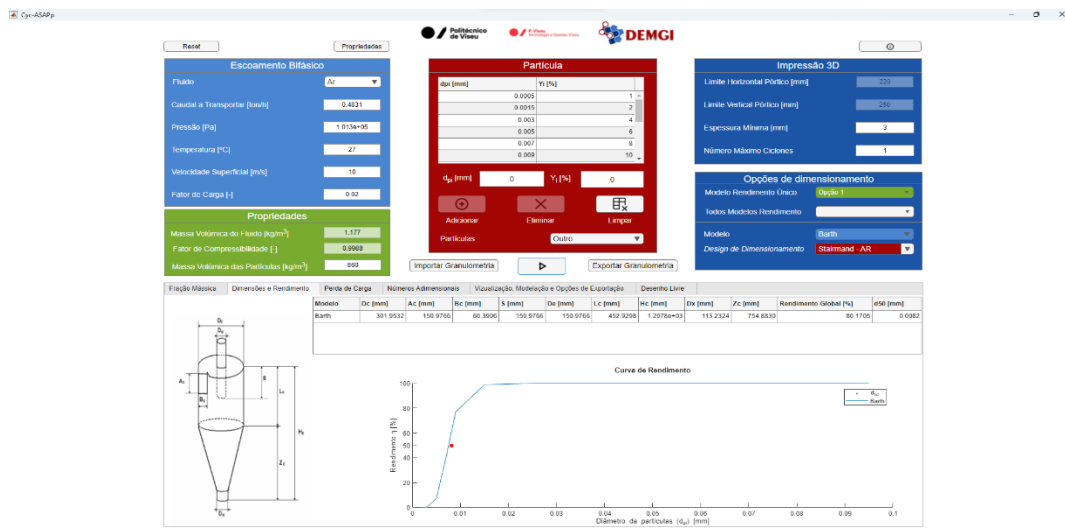


Figura 50 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Barth

4.2.2.1.2. Modelo de Leith & Licht

Neste dimensionamento, o tempo de cálculo foi, também, inferior a 1 segundo e os resultados obtidos são apresentados na Figura 51. Nos cálculos manuais, o valor para o rendimento global do Ciclone foi de 88.76%. O valor devolvido pela aplicação foi de 88.55%.



Figura 51 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Leith & Licht

4.2.2.1.3. Modelo Iozia & Leith

Os resultados obtidos com a utilização da aplicação desenvolvida são apresentados na Figura 52. O tempo de execução dos cálculos foi inferior a 1 segundo.

O rendimento global obtido nos cálculos manuais foi de 86.99%, enquanto a aplicação prevê este valor como sendo de 86.49%.

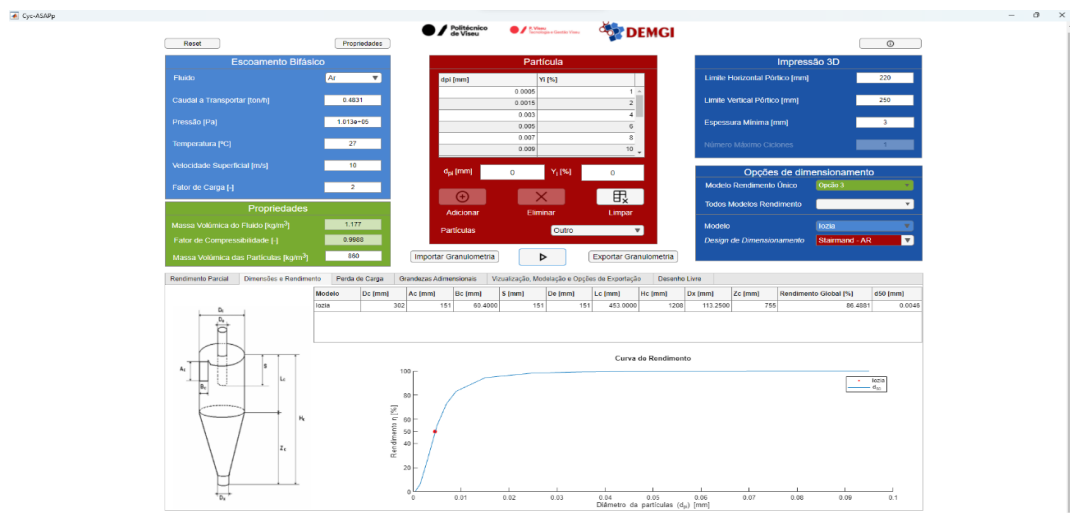


Figura 52 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Iozia & Leith

4.2.2.2. Nunes, 2002

4.2.2.2.1. Areia

O rendimento global previsto pelos cálculos realizados pela forma tradicional, o método manual foi de 95.2%. A aplicação exibiu um valor final de 94.95%. O valor do diâmetro de corte é igualmente concordante, sendo o valor dos cálculos manuais 1.343×10^{-6} m e a aplicação 1.3×10^{-6} m. A aplicação executou a rotina de cálculo em cerca de 1 segundo.



Figura 53 - Resultados dos cálculos computacionais – Areia - Rendimento

Na Tabela 16, são apresentados os valores de perda de carga calculados pela aplicação segundo os 10 modelos implementados. Os valores estimados pelo modelo de Barth e de Shahraki estimam valores de perda de carga uma ordem de grandeza superior aos restantes modelos, devendo ser investigada, posteriormente o porquê desta diferença e a respetiva adequabilidade dos modelos a estes dimensionamentos. Esta diferença irá influenciar o cálculo do número de Euler que, como foi referido acima, é calculado com a média dos valores de perda de carga.

Tabela 16 - Resultados de Perda de Carga - Areia

Modelo	Valor [Pa]
Shepherd & Lapple	1502.80
Miller & Lissman	7363.50
Stairmand	1675.30
Barth	712030.00
Muschelknautz	598.13
Casal & Martinez-Bennet	2634.70
Ramachandran et al.	939.22
Aproximação por zonas	2534.30
Macintyre	248.00
Shahraki	31859.00

O rácio dos diâmetros, diâmetro de corte e diâmetro central, tem um valor de 2.64×10^{-5} . E o das massas volúmicas 6.97×10^{-4} . Os números de Reynolds e Euler são 35.82 e 5.64×10^8 .

4.2.2.2.2. Pó de Cal

No caso do Pó de Cal, o valor de N, o número de Ciclones, apresentado por Nunes (2002) é de 4 Ciclones, contudo o caudal volumétrico apresentado a transportar são 31.7 l/s, ou seja, $0.0317 \text{ m}^3/\text{s}$. Seguindo o processo de cálculo apresentado nos *Cálculos Manuais*

$$\dot{V}_{uni} = \frac{24 \times 0.025^2}{2} = 0.0075 \text{ m}^3/\text{s} \quad (206)$$

O número de Ciclones é obtido através da divisão do caudal total pelo caudal de cada Ciclone, assim

$$N = \frac{0.0317}{0.0075} = 4.23 \text{ Ciclones} \quad (207)$$

Implicando a necessidade de utilização de 5 Ciclones ao invés dos 4 dimensionados. Para os 5 Ciclones, o rendimento global calculado foi de 95.25%.

Os resultados obtidos pela aplicação são apresentados na Figura 54. O valor que esta, a aplicação, mostra para o cálculo teórico do rendimento foi de 94.48%. O d_{50} , proveniente dos cálculos manuais é de 3.00×10^{-6} m e o obtido da aplicação 2.9×10^{-6} m. À semelhança dos outros cálculos computacionais, o cálculo foi executado em aproximadamente 1 segundo.

Os valores de perda de carga são apresentados na Tabela 17.



Figura 54 - Resultados dos cálculos computacionais - Pó de Cal - Rendimento

O número de Reynolds, neste dimensionamento toma o valor de 21.4911. O rácio das massas volúmicas é 0.0038 e d_{50}/D_c é 5.7998×10^{-5} . O número de Euler é 2.0980×10^8 .

Tabela 17 - Resultados de Perda de Carga - Pó de Cal

Modelo	Valor [Pa]
Shepherd & Lapple	706.60
Miller & Lissman	3462.30
Stairmand	787.74
Barth	78741.00
Muschelknautz	220.04
Casal & Martinez-Bennet	1238.90
Ramachandran et al.	441.63
Aproximação por zonas	1160.80
Macintyre	248.00
Shahraki	14980.00

4.2.2.2.3. Cimento em Pó

Nunes (2002), dimensionou a necessidade da produção de 3 Ciclonas, com um rendimento global de 93.3%. A aplicação calculou a mesma necessidade de separadores ciclônicos e prevê um rendimento global de 92.68% e um valor para o diâmetro de corte de 1.3×10^{-6} m. Nos cálculos manuais a previsão do d_{50} foi de 1.370×10^{-6} m. O tempo de cálculo foi de, sensivelmente, 1 segundo.



Figura 55 - Resultados dos cálculos computacionais - Cimento em Pó - Rendimento

A Tabela 18 mostra os valores dos cálculos de perda de carga.

Tabela 18 - Resultados de Perda de Carga - Cimento em Pó

Modelo	Valor [Pa]
Shepherd & Lapple	1679.40
Miller & Lissman	8229.10
Stairmand	1872.30
Barth	647830.00
Muschelknautz	599.04
Casal & Martinez-Bennet	2944.50
Ramachandran et al.	1049.60
Aproximação por zonas	2799.30
Macintyre	248.00
Shahraki	356054.00

4.2.2.2.1. Serradura Seca

Para a Serradura Seca foram utilizados os 9 Ciclonos do dimensionamento original ao invés dos 4 apresentados por Nunes. Os resultados deste dimensionamento são apresentados de seguida. Para os 9 Ciclonos, o rendimento global previsto é de 100%. A aplicação prevê um rendimento de aproximadamente 100%. Foi alterado o dimensionamento realizado por Nunes (2002), uma vez que a aplicação não permite, na presente data, a possibilidade de ser definido o diâmetro pretendido e o número de Ciclonos pretendidos simultaneamente. Refazendo o cálculo do diâmetro de corte para os 9 Ciclonos é obtido o valor de 5.0×10^{-6} m. A aplicação prevê um d_{50} de 4.5×10^{-6} m. Como em todos os outros exemplos de cálculos computacional, a aplicação necessitou de cerca de 1 segundo para apresentar os valores de dimensionamento.

Na Tabela 19 são demonstrados os valores de perda de carga para o dimensionamento da Serradura Seca. No que diz respeito aos valores adimensionais, o número de Euler é 1.6816×10^8 ; o rácio d_{50}/D_c é 9.2657×10^{-5} ; o outro rácio calculado, o das massas volúmicas é 0.0088; e, por fim, o número de Reynolds é 11.9395.

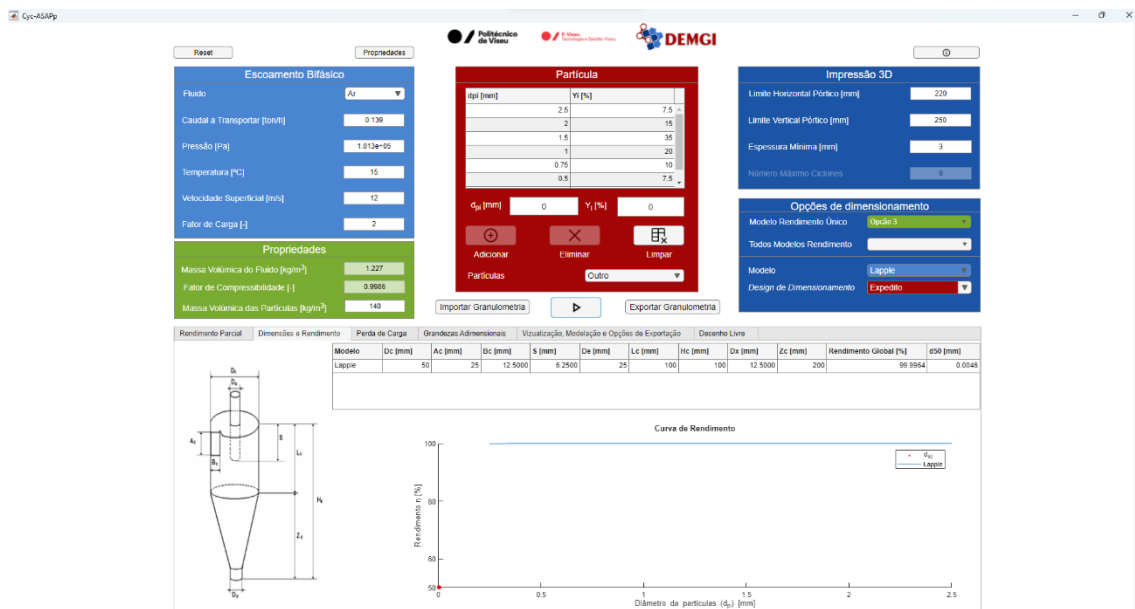


Figura 56 - Resultados dos cálculos computacionais - Serradura Seca - Rendimento

Tabela 19 - Resultados de Perda de Carga - Serradura Seca

Modelo	Valor [Pa]
Shepherd & Lapple	176.65
Miller & Lissman	865.59
Stairmand	196.94
Barth	19212.00
Muschelknautz	68.25
Casal & Martinez-Bennet	309.72
Ramachandran et al.	110.41
Aproximação por zonas	296.11
Macintyre	248.00
Shahraki	3745.10

5. DISCUSSÃO

A aplicação funciona e apresenta resultados concordantes com a literatura. Os parâmetros de dimensionamento calculados pela aplicação apresentam uma ligeira diferença relativamente aos calculados por métodos tradicionais. As causas das diferenças apontadas entre os resultados manuais e da aplicação podem ser apontadas a diversos fatores. No método manual, os cálculos manuais estão sujeitos a arredondamentos nos seus cálculos intermédios, enquanto na aplicação este arredondamento não acontece. Na comparação com os resultados de Nunes (2002), o modelo utilizado foi o de Rosin, Rammler/Lapple, este no modelo, no cálculo do rendimento parcial, depende da utilização de uma curva. A aplicação calcula este valor através de uma regressão, com base no método dos mínimos desvios quadrados. No método manual, é necessária uma aproximação manual deste valor, estando associada a ocorrência de diferenças nos resultados. O valor das constantes utilizadas pela aplicação, calculadas por si, à semelhança dos cálculos intermédios, não são aproximados. A aplicação trabalha sempre com dupla precisão. Na comparação, por exemplo, dos dimensionamentos de Coury et al. (2004), o diâmetro do ciclone é arredondado pelos autores para 302 mm, enquanto a aplicação utiliza o valor de 301.95 mm. Uma vez que, o cálculo das restantes dimensões geométricas é dependente deste valor ocorre a propagação da diferença.

Como esperado, quanto mais pequenas forem as partículas a separar, maiores serão as dificuldades para este sistema de separação ciclónica e, por isso, menor será o rendimento destes dispositivos. A massa volúmica tem, também, efeitos no rendimento de separação. Observando o caso do cimento em pó, o número de Ciclones será maior e a velocidade intersticial necessária ao transporte será mais elevada do que para os restantes materiais estudados. Para este dimensionamento, em que os materiais a transportar são variáveis, o dimensionamento deverá ser efetuado para o caso mais crítico.

Os objetivos da aplicação foram alcançados e ultrapassou-se a ideia inicial. Originalmente estava prevista a obtenção de uma aplicação que, sendo alimentada pelos parâmetros de entrada, o separador ciclónico fosse dimensionado e, de seguida, gerada uma modelação para impressão 3D. Na versão apresentada, a aplicação dimensiona os Ciclones, faz a seriação dos modelos pelo rendimento, perda de carga e ainda números adimensionais. Na modelação 3D dos Ciclones foi conseguida a articulação entre o dimensionamento e a respetiva geração do modelo. A aplicação mostra-se robusta e

intuitiva do ponto de vista do utilizador. Esta modelação foi conseguida integralmente em MATLAB, dispensando a utilização de qualquer outro *software*, além do essencial para a comunicação com os dispositivos de impressão. Com a geração dos ficheiros em formato *.stl* torna-se possível, para além da impressão rápida dos modelos gerados, também, a simulação CFD, permitindo o estudo do escoamento de forma computadorizada. Esta simulação foi executada usando o *plug-in FEATool MATLAB*. Sendo a modelação parametrizada em todas as suas variáveis geométricas, a hipótese para uma modelação livre, na qual todas estas variáveis são definidas pelo utilizador de forma independente, será uma ferramenta que permitirá a testagem de novas teorias de dimensionamento.

Os tempos de cálculo conseguidos implicam um decréscimo no tempo de dimensionamento na ordem de 1/1000, sendo alcançado o objetivo de agilização deste processo. Tornando o cálculo automatizado, os erros de cálculos são excluídos, sendo removido o erro humano dos cálculos.

6. CONCLUSÕES

Foi desenvolvida uma aplicação robusta e fiável que permite o dimensionamento e comparação entre dez modelos de rendimento e dez de perda de carga. A fiabilidade dos resultados obtidos através da sua utilização foi comprovada através da comparação com publicações anteriores, para diferentes condições de utilização, assim como para diferentes tipos de partículas.

Para além desta comparação, foi introduzida na aplicação um método de modelação 3D que permite uma rápida impressão através da tecnologia de fabricação aditiva e ainda a exportação para uma aplicação que possibilite uma simulação CFD. Como referido, esta aplicação permite um dimensionamento livre em que todas as variáveis geométricas são independentes. Tal funcionalidade poderá ser utilizada no desenvolvimento de novos modelos, uma vez que permite uma rápida modelação, tanto para teste em laboratório, através da impressão dos modelos, como para um estudo computacional, utilizando a metodologia CFD.

A primeira etapa deste trabalho, de modo a permitir o desenvolvimento desta aplicação, foi a realização de uma revisão bibliográfica. Esta revisão foi essencial para adquirir conhecimentos teóricos sobre os conceitos relacionados com o transporte pneumático e com os modelos apresentados na literatura para o dimensionamento dos Ciclones. A utilização destes conhecimentos permitiu que fosse desenvolvida uma ferramenta capaz e eficiente. Para a correta compreensão dos resultados apresentados é fundamental a compreensão dos fenómenos associados e, por isso, imprescindível a consulta da revisão teórica apresentada.

Para o funcionamento da aplicação é necessária a introdução de variáveis que caracterizam o escoamento, tanto do fluido como das partículas. A inserção dos valores para as partículas pode ser feita de forma manual ou através da importação de um ficheiro de bloco de notas (.txt) ou Excel (.xlsx). Aquando desta introdução, da distribuição granulométrica, é apresentada um gráfico com a mesma, permitindo uma verificação visual dos dados.

Após ser dada entrada das restantes restrições necessárias, i.e., condicionantes da impressão, que irão afetar os cálculos de rendimento, seja pela limitação do espaço disponível para impressão (pórticos de impressão) ou pelo modelo ou modelos pelos quais

serão realizados os cálculos, a aplicação realiza dimensionamento e cálculos que permitem a seriação dos modelos.

A exportação da modelação pode ser feita de duas formas: ou a exportação de peças independentes, ou de todas as modelações em conjunto. As peças disponíveis são: o ducto de saída dos gases; a zona cilíndrica do Ciclone e respetivo ducto de entrada; a zona cónica; a extensão à saída de partículas; e ainda a modelação das zonas cilíndrica e cónica juntas.

7. TRABALHO FUTURO

Como trabalho futuro imediato pretende-se a adição de outros modelos teóricos existentes, tanto de rendimento como de perda de carga, e respetiva confirmação dos resultados da aplicação. Para esta validação deverão ser utilizados dimensionamentos confirmados tanto teórica como experimentalmente previamente publicados. A geração e impressão de modelos deverá ser utilizada, também, para a validação dos resultados quer pela vertente de estudo de CFD, quer pela vertente experimental. O cruzamento de todos os resultados obtidos dará robustez e confiança à utilização da aplicação.

Num futuro próximo, será necessária a testagem da aplicação com uma maior amostra de utilizadores, os *beta testers*.

A adição da possibilidade de impressão de outras peças, como adaptadores de entrada retangular para circular, facilitando as ligações comuns; a adição de flanges para acoplação das diferentes peças; o desenvolvimento de peças que permitam a ligação em paralelo e/ou em série dos Ciclones, e a implementação de cálculos de rendimento para o dimensionamento desses casos. Deverá, também, ser estudada a influência deste novo material, o PLA, utilizado para a produção, uma vez que o coeficiente de atrito será certamente diferente do dos materiais para os quais tais modelos foram desenvolvidos.

Uma vez que a aplicação permite um dimensionamento livre em que todas as variáveis geométricas são independentes, poderá ser utilizada, num futuro próximo, utilizada no desenvolvimento de novos modelos e geometrias, já que permite uma rápida modelação.

Será necessário, também, testar com diferente *hardware* utilizado para a impressão, uma vez que tal irá influenciar a rugosidade da parede e assim as condições do escoamento e conseqüentemente os parâmetros do Ciclone, nomeadamente, a perda de carga.

Para tornar a utilização da aplicação mais abrangente e generalizada, propõe-se como trabalho futuro, num horizonte temporal mais alargado, a conversão desta aplicação para uma versão independente disponível em *smartphones* e computadores.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, R. M. (1949). *Fundamentals of Cyclone Design and Operation*. 203–228. <https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/the-ausimm-proceedings-1949/fundamentals-of-cyclone-design-and-operation/>
- Altmeyer, S., Mathieu, V., Jullemier, S., Contal, P., Midoux, N., Rode, S., & Leclerc, J. P. (2004). Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(4), 511–522. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(03\)00079-5](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(03)00079-5)
- Charisiou, N. D., Goula, M. A., Charisiou, N. D., Tsevrenis, G. J., & Goula, M. A. (2011). *Software development for the design of control equipment for particulate pollutants*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1480.2084>
- Chen, A. (2019, Maio 17). *4 common types of 3D printer file formats and when to use it*. <https://www.cmac.com.au/blog/4-common-types-3d-printer-file-formats-when-to-use>
- Chen, J., & Shi, M. (2007). A universal model to calculate cyclone pressure drop. *Powder Technology*, 171(3), 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.09.014>
- Clift, R., Ghadiri, M., & Hoffman, A. C. (1991). A Critique of Two Models for Cyclone Performance. Em *AIChE Journal February* (Vol. 37, Issue 2).
- Cortés, C., & Gil, A. (2007). Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. Em *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 33, Issue 5, pp. 409–452). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.001>
- Coury, J. R., Pisani Jr., R., & Hung, Y.-T. (2004). *Air Pollution Control Engineering* (L. K. Wang, N. C. Pereira, Y.-T. Hung, & K. Hung, Eds.; 1.^a ed., Vol. 1). Humana Press.
- Dahl, H. D., & Muschelknautz, E. (1994). Zyklone als Tropfenabscheider. *Chemie Ingenieur Technik*, 66.
- Dewey, M. P., & Ulutan, D. (2017). *Development of Laser Polishing as an Auxiliary Post-Process to Improve Surface Quality In Fused Deposition Modelling Parts*. <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- Dietz, P. W. (1981). Collection Efficiency of Cyclone Separators. *AIChE Journal*, 27, 888–892.
- Dimitrios, C., Mastorakis, N., & Kechagias, J. (2016). *The Impact of Temperature Changing on Dimensional Accuracy of FFF process*. <http://www.iaras.org/iaras/journals/ijap>
- Dirgo, J., & Leith, D. (1985). Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions. *Aerosol Science and Technology*, 4(4), 401–415. <https://doi.org/10.1080/02786828508959066>
- Elsayed, K., & Lacor, C. (2016). Analysis and optimisation of cyclone separators geometry using RANS and LES methodologies. Em *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design* (Vol. 125, pp. 65–74). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-662-43489-5_8
- Enliang, L., & Yingmin, W. (1989). *A New Collection Theory of Cyclone Separators* (Vol. 35, Issue 4).
- Farrand, S. (2022). *Pinarello creates 3D-printed aero-bike for Ganna's Hour Record attempt | Cyclingnews*. <https://www.cyclingnews.com/news/pinarello-creates-3d-printed-aero-bike-for-gannas-hour-record-attempt/>
- Gimbun, J., Choong, T. S. Y., Fakhru'l-Razi, A., & Chuah, T. G. (2004). Prediction Of The Effect Of Dimension, Particle Density, Temperature, And Inlet Velocity On Cyclone Collection Efficiency. Em *Jurnal Teknologi* (Vol. 40).
- Hoffmann, A. C., de Jonge, R., Arends, H., & Hanrats, C. (1995). *CYCLONE SEPARATIONS - Evidence of the «Natural Vortex Length» and its Effect on the Separation Efficiency of Gas Cyclones*.
- Hoffmann, A. C., & Stein, L. E. (2008). *Gas cyclones and swirl tubes: principles, design, and operation*. Springer.

- Hunt, B. R., Lipsman, R. L., & Rosenberg, J. M. (2001). *A Guide to MATLAB*.
- Iozia, D. L., & Leith, D. (1989). Effect of cyclone dimensions on gas flow pattern and collection efficiency. *Aerosol Science and Technology*, 10(3), 491–500. <https://doi.org/10.1080/02786828908959289>
- Klinzing, G., Rizk, F., Marcus, R., & Leung, L. (2010). *Pneumatic Conveying of Solids: A theoretical and practical approach, Third Edition (Particle Technology Series, 8)*. <http://www.springer.com/series/6433>
- Ko, S., & Lee, D. (2017). Stiffness optimization of 5-axis machine tool for improving surface roughness of 3D printed products. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(7), 3355–3369. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0625-z>
- Kovan, V., Altan, G., & Topal, E. S. (2017). Effect of layer thickness and print orientation on strength of 3D printed and adhesively bonded single lap joints. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(5), 2197–2201. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0415-7>
- Kuo, K.-Y., & Tsai, C.-J. (2001). On the Theory of Particle Cutoff Diameter and Collection Efficiency of Cyclones. *Aerosol and Air Quality Research*, 1, 47–56.
- Lautrup, Benny. (2005). *Physics of Continuous Matter: Exotic and everyday Phenomena in the Macroscopic World*. Institute of Physics.
- Maidin, S., Muhamad, M. K., & Pei. (2015). Feasibility Study of Ultrasonic Frequency Application on Fdm to Improve Parts Surface Finish. *Jurnal Teknologi*, 77, 2180–3722. www.jurnalteknologi.utm.my
- MathWorks. (sem data). *Comparing GUIDE and App Designer - MATLAB & Simulink*. Obtido 10 de Outubro de 2022, de <https://www.mathworks.com/products/matlab/app-designer/comparing-guide-and-app-designer.html>
- MathWorks. (2021). *MATLAB® App Building R2021b*. www.mathworks.com
- MathWorks. (2022). *NaN values*. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/nan.html>
- Modix. (2022). *Modix MAMA review - large format industrial 3D printer*. <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/modix-mama/>
- Montenegro, M. A. B. da Si. M. (2017). *Desenvolvimento de um programa de computador para o dimensionamento de separadores ciclônicos* [Dissertação de Mestrado]. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- Morin, M., Raynal, L., Karri, S. B. R., & Cocco, R. (2021). Effect of solid loading and inlet aspect ratio on cyclone efficiency and pressure drop: Experimental study and CFD simulations. *Powder Technology*, 377, 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.052>
- Mothes, H., & Löffler, F. (1984). Zur Berechnung der Partikelabscheidung in Zyklonen. Em *Chem Eng. Process* (Vol. 18).
- Muschelknautz, E. (1972). Die Berechnung von Zyklonabscheidern für Gase. *Chemie-Ing.-Tech*, 44.
- Muschelknautz, E., & Brunner, K. (1967). Untersuchungen an Zyklonen. *Chemie-Ing.-Techn*, 39.
- Muschelknautz, E., Giersiepen, G., Rink, N., Bayer, F. A., & Iferrn Hansen Z I L, L. K. (1970). Stromungsvorgänge bei der Zerkleinerung D a s Strahlmahlen in Strahlmiihlen. *Chrmie-Ing.-Tech*, 12.
- Muschelknautz, E., & Krambrock, W. (1970a). Aerodynamische Beiwerte des Zyklonabscheiders aufgrund neuer und verbesserter Messungen. *Chemie-Ing.-Techn*, 42.
- Muschelknautz, E., & Krambrock, W. (1970b). Aerodynamische Beiwerte des Zyklonabscheiders aufgrund neuer und verbesserter Messungen. *Chemie. Ing. Techn*, 42(5), 247–255.
- Nagy, M. S., & Mátyási, GY. (2003). Analysis of STL Files. *MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING*, 38, 945–960. www.elsevier.com/locate/mcm
- Nunes, N. M. M. (2002). *Projecto, Desenvolvimento e Implementação de um Aspirador Autónomo* [Projeto]. ESTGV.

- Pinho, C. M. C. T. de. (2005). *Transporte Pneumático*.
- Precise Simulation. (2022). *FEATool Multiphysics - MATLAB FEA Physics Simulation Toolbox*. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/63144-featool-multiphysics-matlab-fea-physics-simulation-toolbox>
- Qu, X., & Stucker, B. (2003). A 3D surface offset method for STL-format models. *Rapid Prototyping Journal*, 9(3), 133–141. <https://doi.org/10.1108/13552540310477436>
- Ramachandran, G., Leith, D., Dirgo, J., & Feldman, H. (1991). Cyclone optimization based on a new empirical model for pressure drop. *Aerosol Science and Technology*, 15(2), 135–148. <https://doi.org/10.1080/02786829108959520>
- Rehm, B., Schubert, J., Haghshenas, A., Paknejad, A. S., & Hughes, J. (2008). *Managed Pressure Drilling*. Gulf Publishing Company.
- Schnelle, K. B., & Brown, C. A. (2002). *Air Pollution Control Technology Handbook* (F. Kreith, Ed.).
- Schuldt, S. J., Jagoda, J. A., Hoisington, A. J., & Delorit, J. D. (2021). A systematic review and analysis of the viability of 3D-printed construction. *ELSEVIER*.
- Shahraki, B. H. (2003). Development and Validation of New Equations for Prediction of The Performance of Tangential Cyclones. *IJE Transactions A: Basics*, 16(2), 109–124.
- Shepherd, C. B., & Lapple, C. E. (1939). Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors. *INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY*, 31(8).
- Soderman/ NLSI staff. (2022). *Building a Lunar Base with 3D Printing | Solar System Exploration Research Virtual Institute*. <https://sservi.nasa.gov/articles/building-a-lunar-base-with-3d-printing/>
- Su, C.-K. (2021). Review of 3D-Printed functionalized devices for chemical and. *ELSEVIER*.
- Svarovsky, L. (1981). *HANDBOOK OF POWDER TECHNOLOGY - Solid-Gas Separation* (J. C. Williams & T. Allen, Eds.; Vol. 3).
- Tan, Z. (2008). An analytical model for the fractional efficiency of a uniflow cyclone with a tangential inlet. *Powder Technology*, 183(2), 147–151. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.06.021>
- ter Linden, A. J. (1949). Investigations into Cyclone Dust Collectors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 160(1), 233–251. https://doi.org/10.1243/pime_proc_1949_160_025_02
- Theodore, L., & de Paola, V. (1980). Predicting Cyclone Efficiency. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 30(10), 1134–1134. <https://doi.org/10.1080/00022470.1980.10465160>
- Trefz, M., & Muschelknautz, E. (1993). Extended Cyclone Theory for Gas Flows with High Solids Concentrations. *Chem. Eng. Technol*, 16, 153–160.
- Walas, S. M. (1990). *Chemical Process Equipment Selection and Design* (H. Brenner, Ed.).
- Xie, X., Liu, W. K., & Gan, Z. (2021). *Data-Driven Discovery of Dimensionless Numbers Andscaling Laws From Experimental Measurements*.

Anexo A

Coury et al., 2004

Modelo de Barth

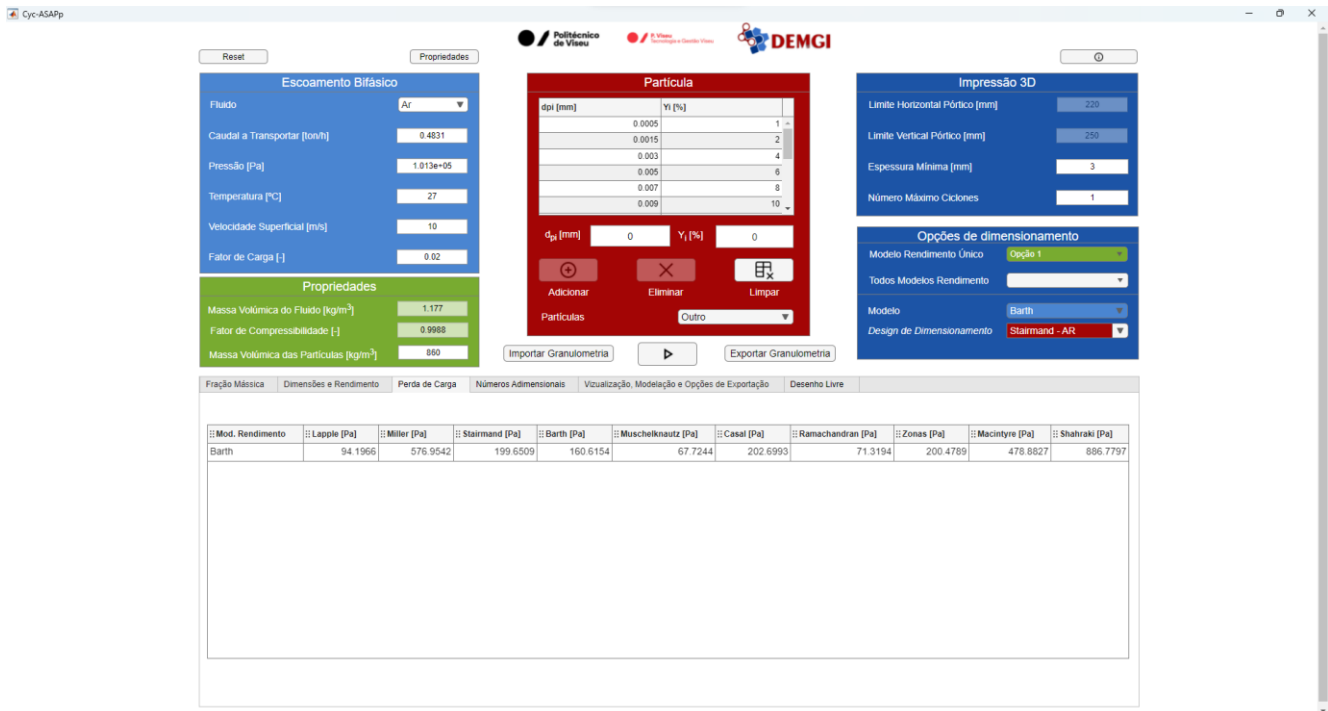


Figura 57 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Barth - Perda de Carga

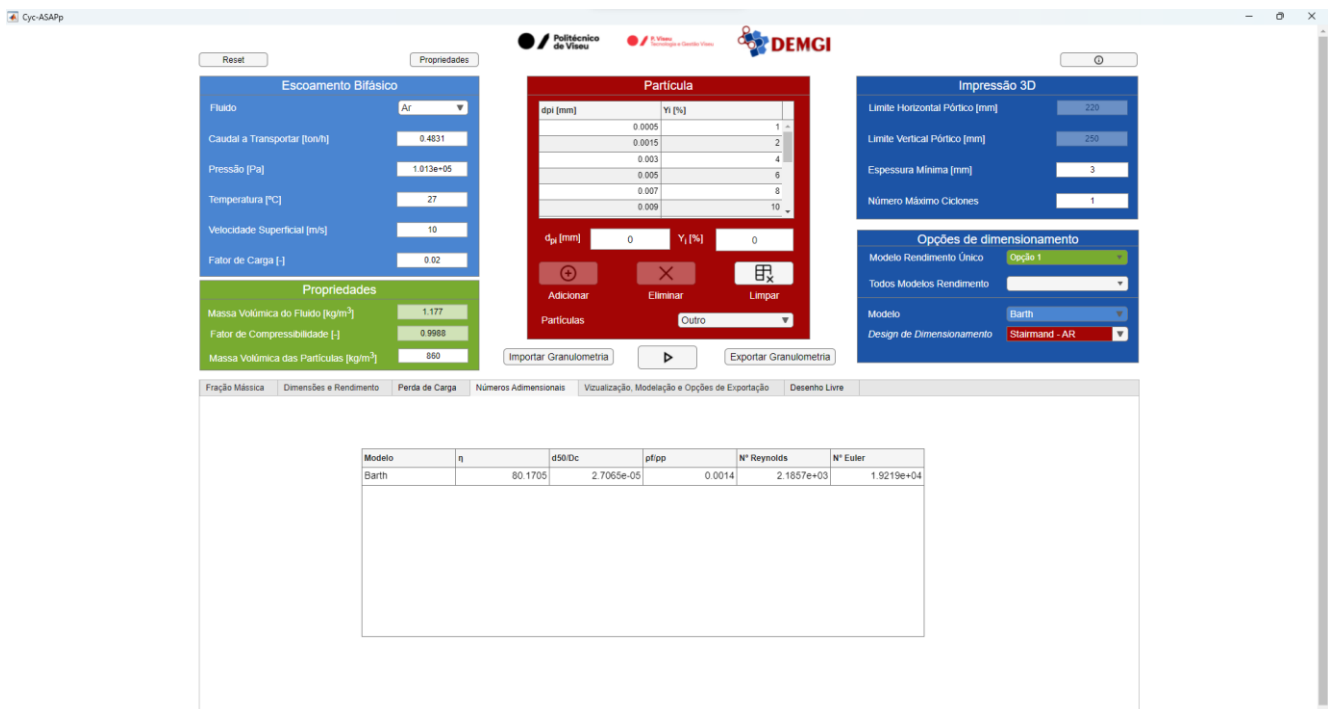


Figura 58 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Barth - Números adimensionais

Modelo de Leith & Licht

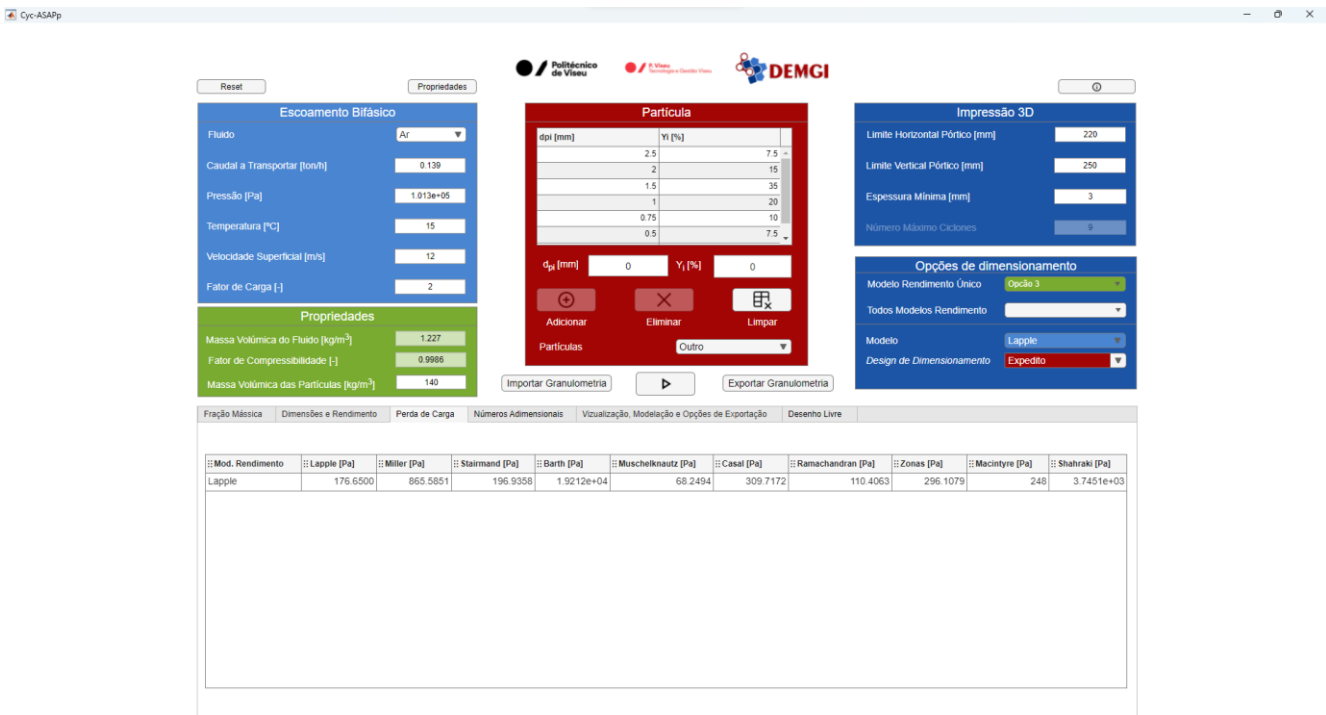


Figura 59 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Leith & Licht - Perda de Carga

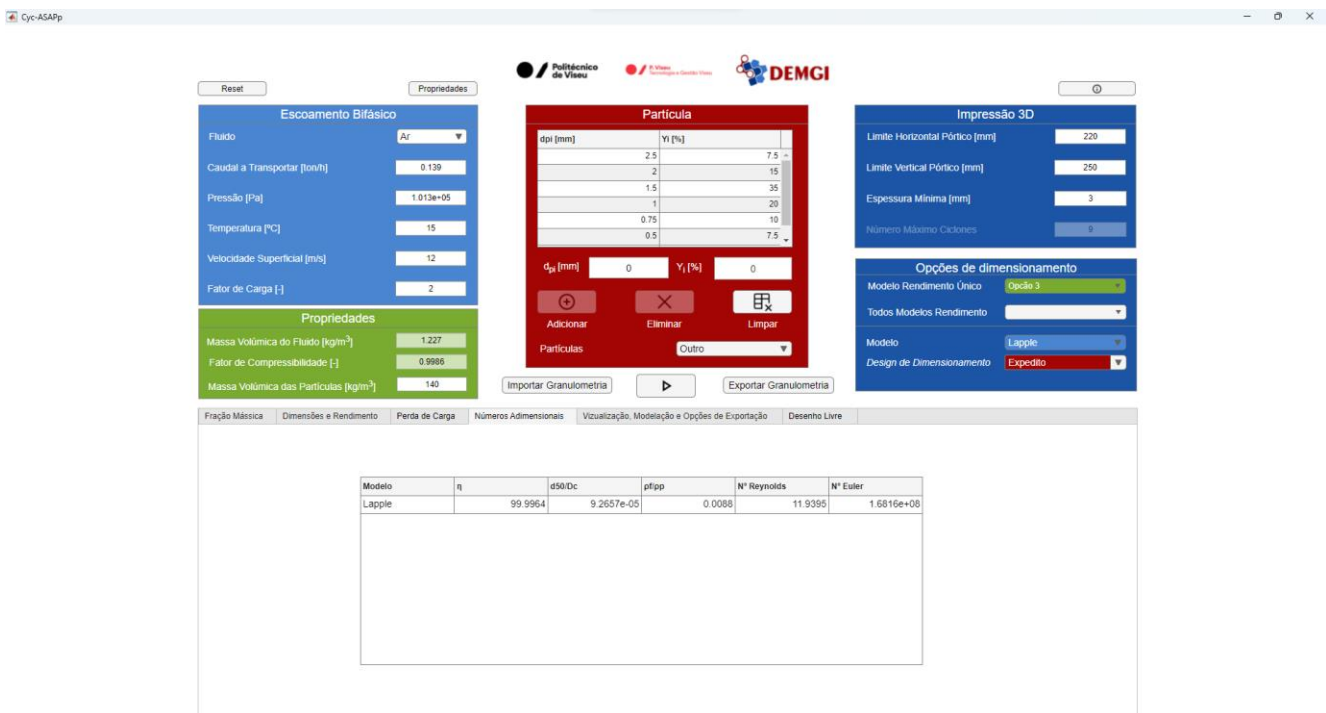


Figura 60 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Leith & Licht - Números adimensionais

Modelo de Iozia & Leith

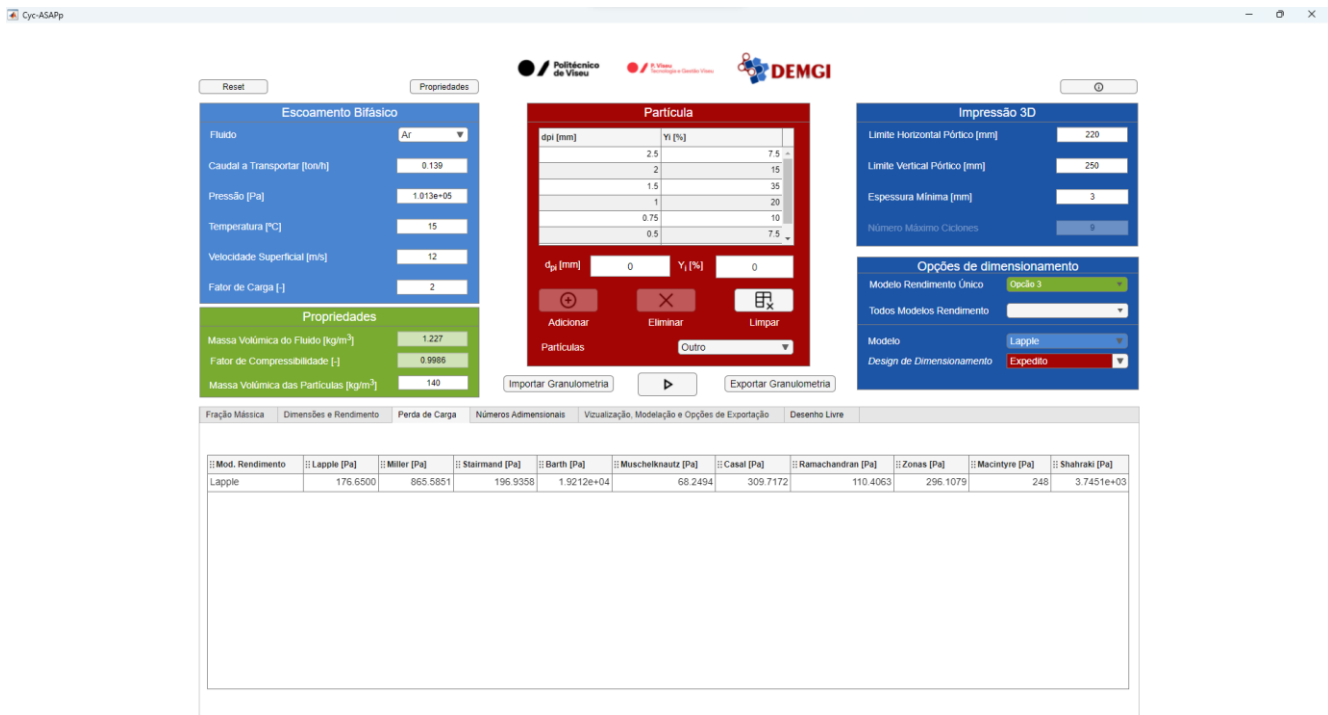


Figura 61 - Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Iozia & Leith - Perda de Carga

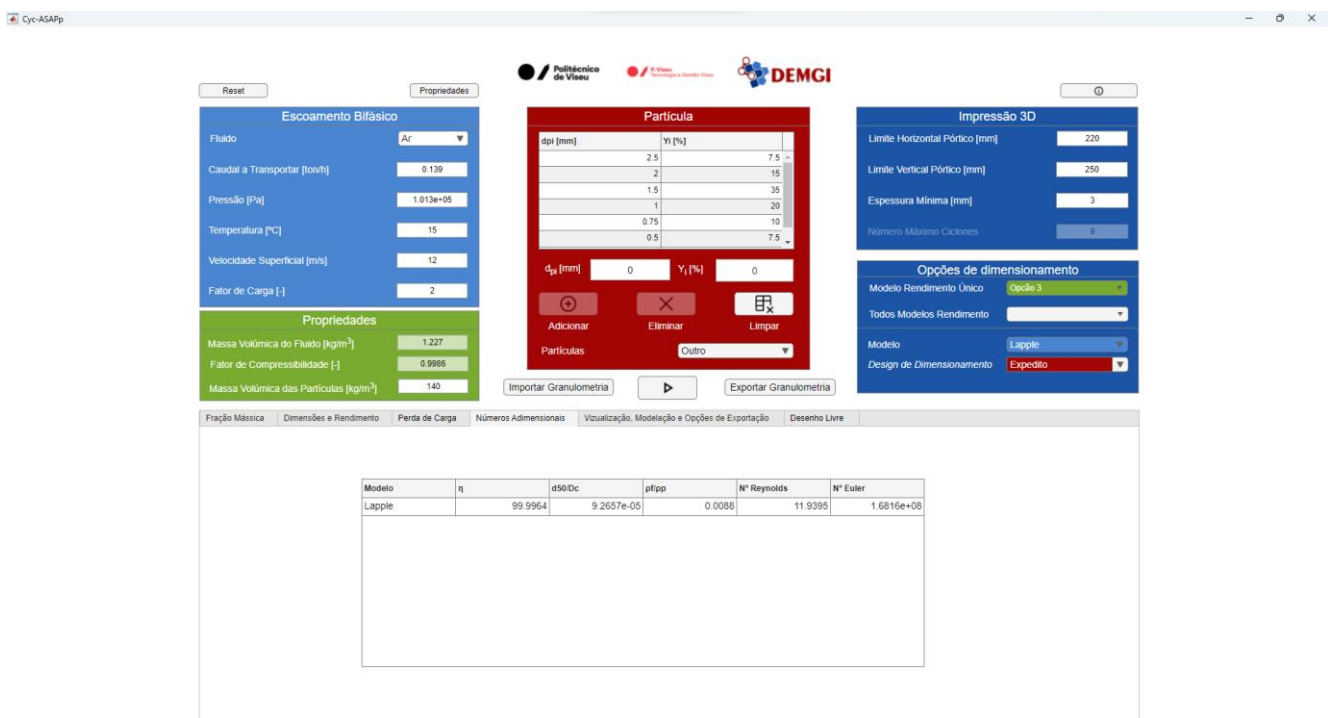


Figura 62- Resultados dos cálculos computacionais - Modelo de Iozia & Leith - Números adimensionais

Nunes, 2002

Areia

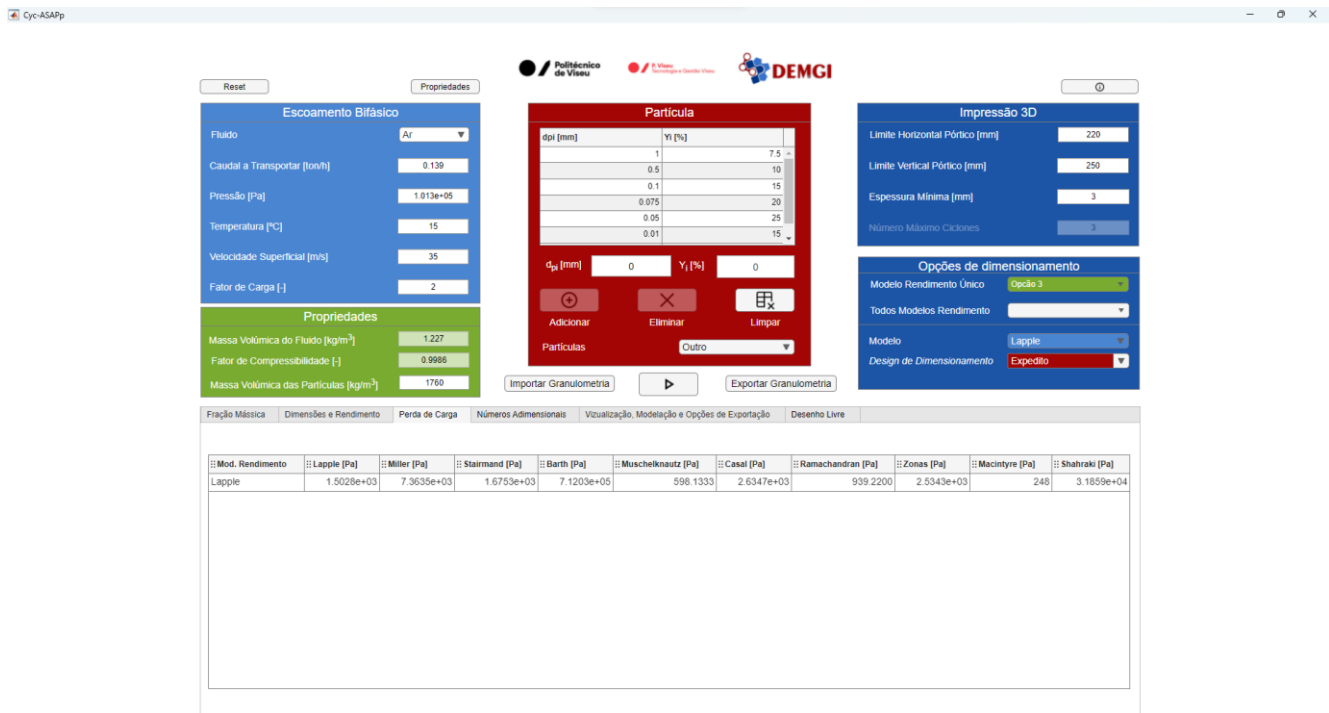


Figura 63 - Resultados dos cálculos computacionais - Areia- Perda de Carga

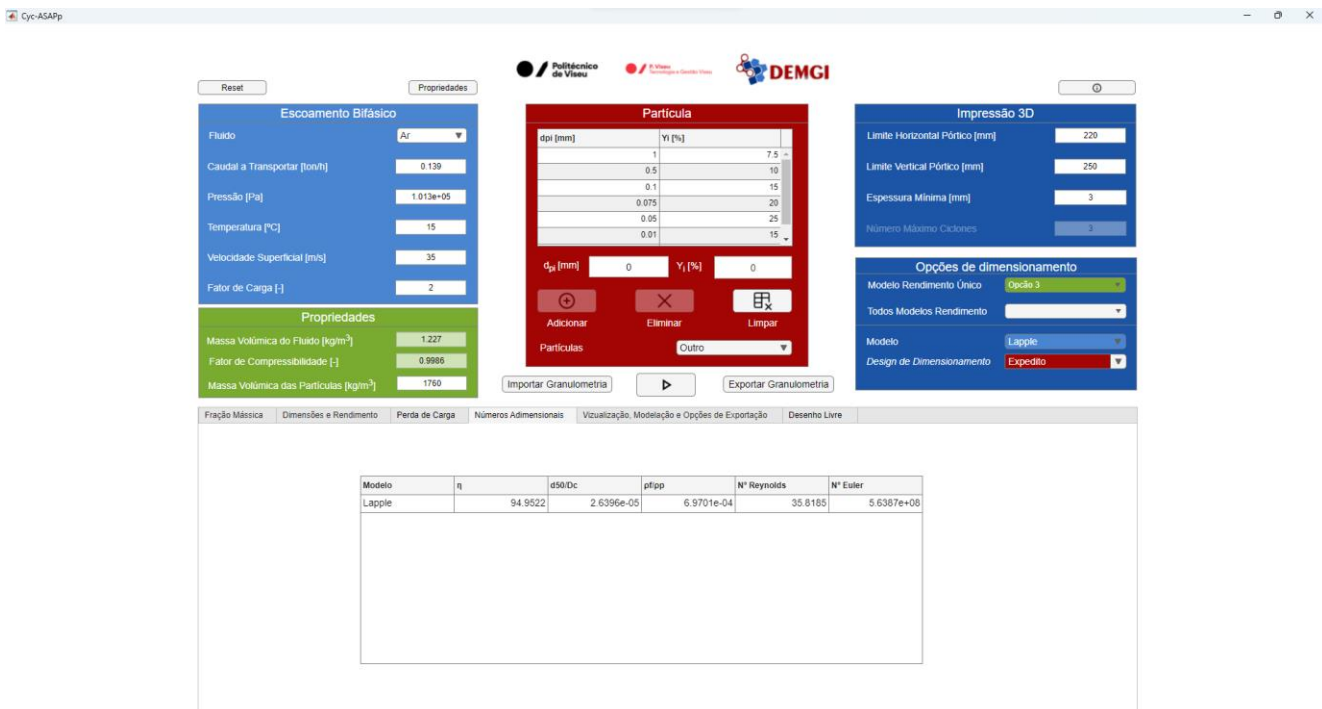


Figura 64 - Resultados dos cálculos computacionais - Areia- Números adimensionais

Pó de Cal

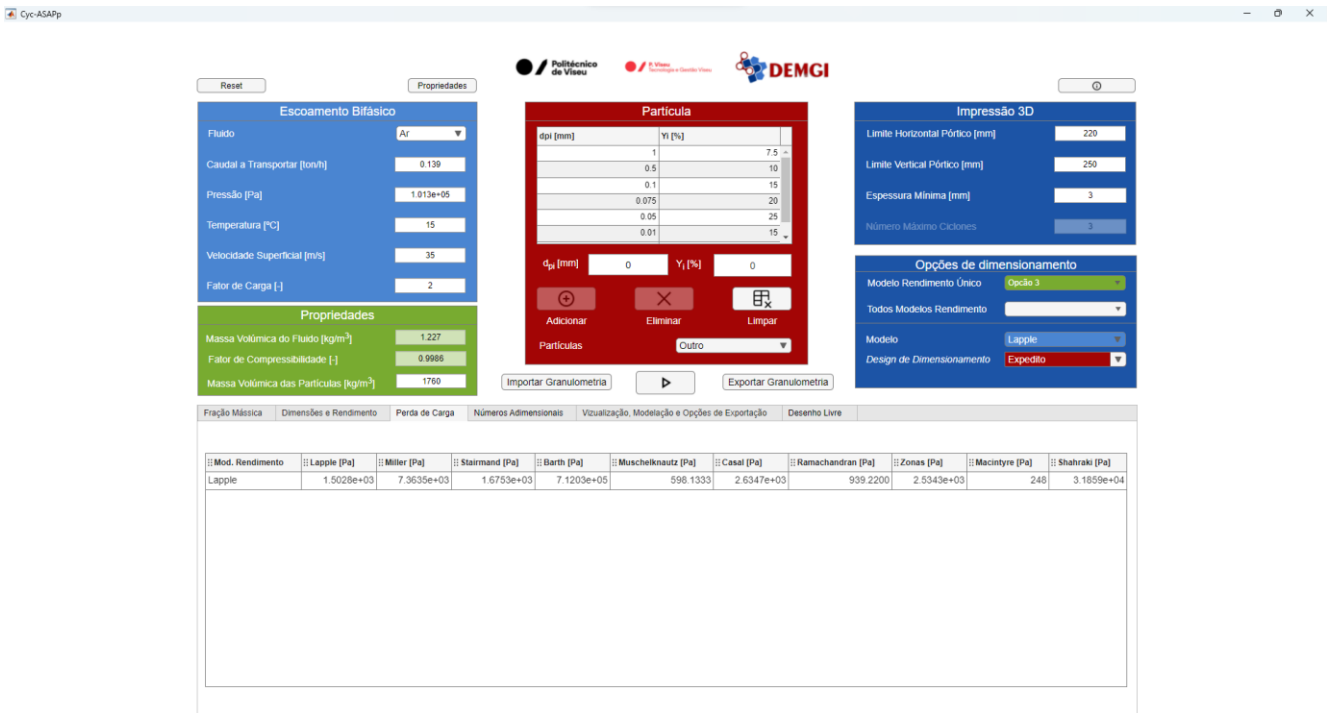


Figura 65 - Resultados dos cálculos computacionais - Pó de Cal - Perda de Carga

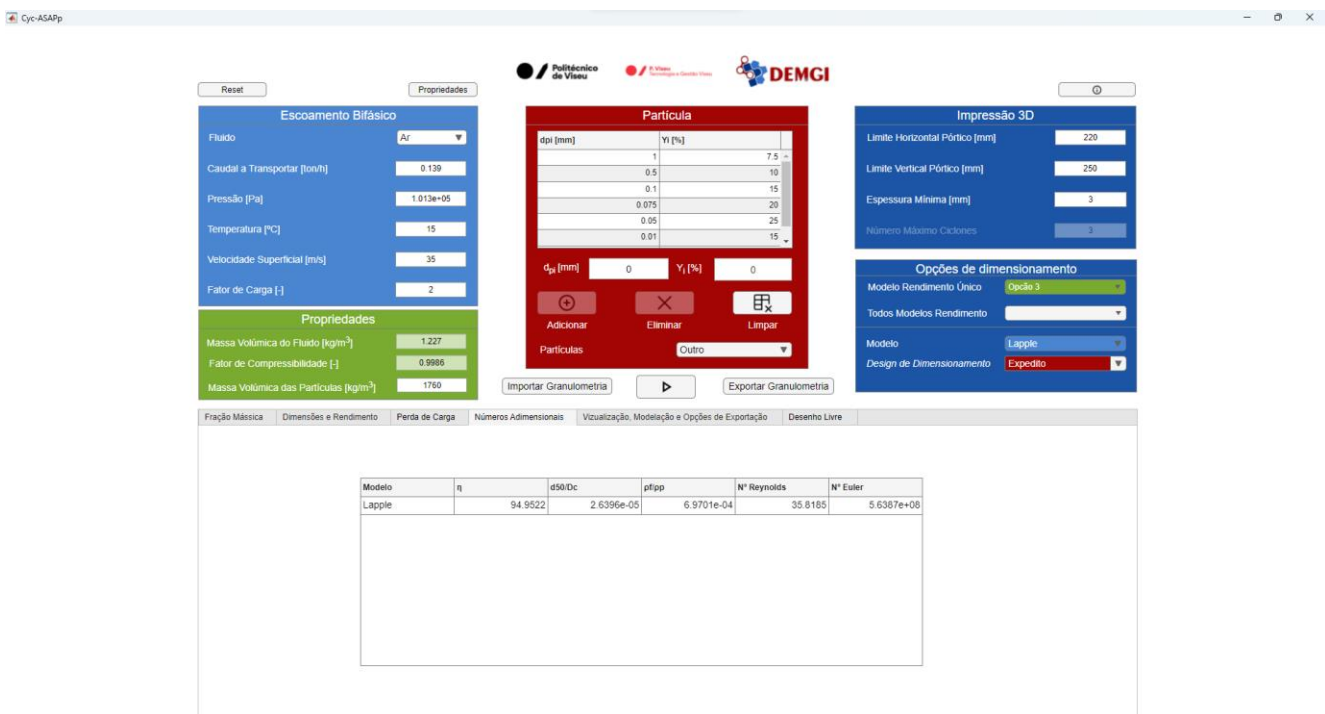


Figura 66 - Resultados dos cálculos computacionais - Pó de Cal - Números adimensionais

Cimento em Pó

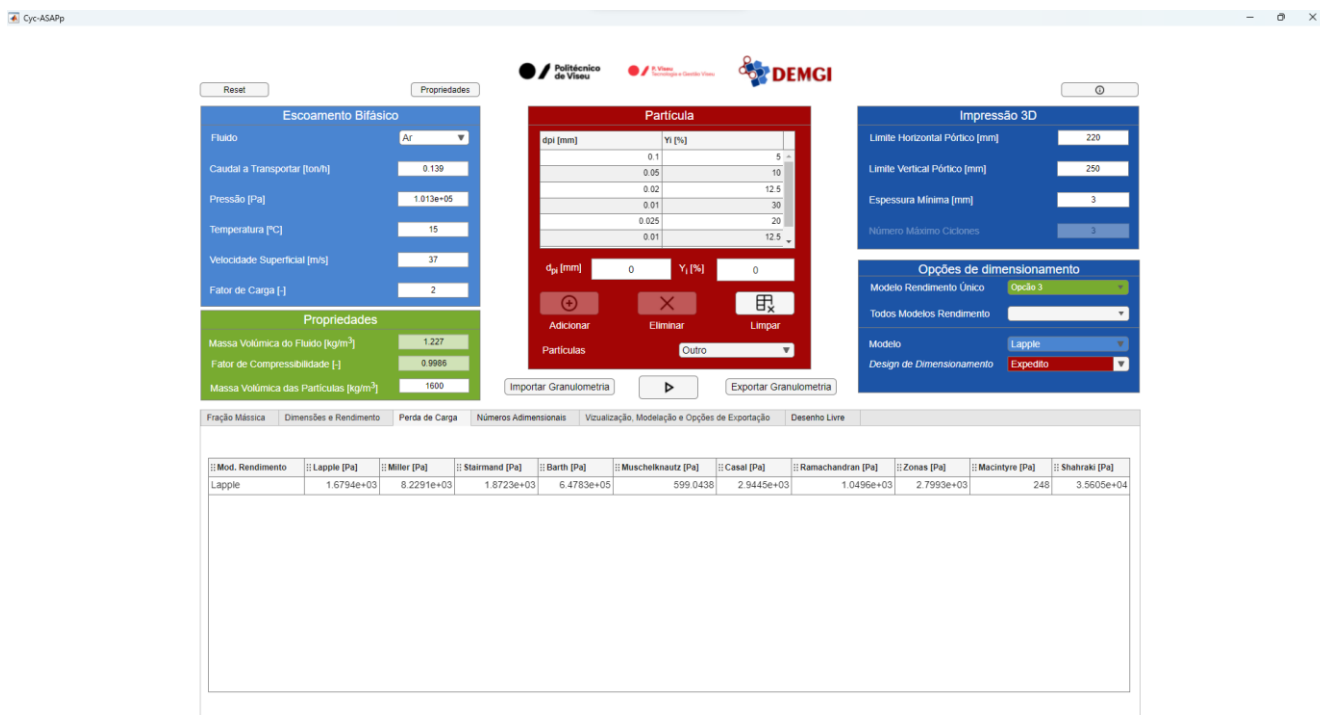


Figura 67 - Resultados dos cálculos computacionais - Cimento em Pó - Perda de Carga

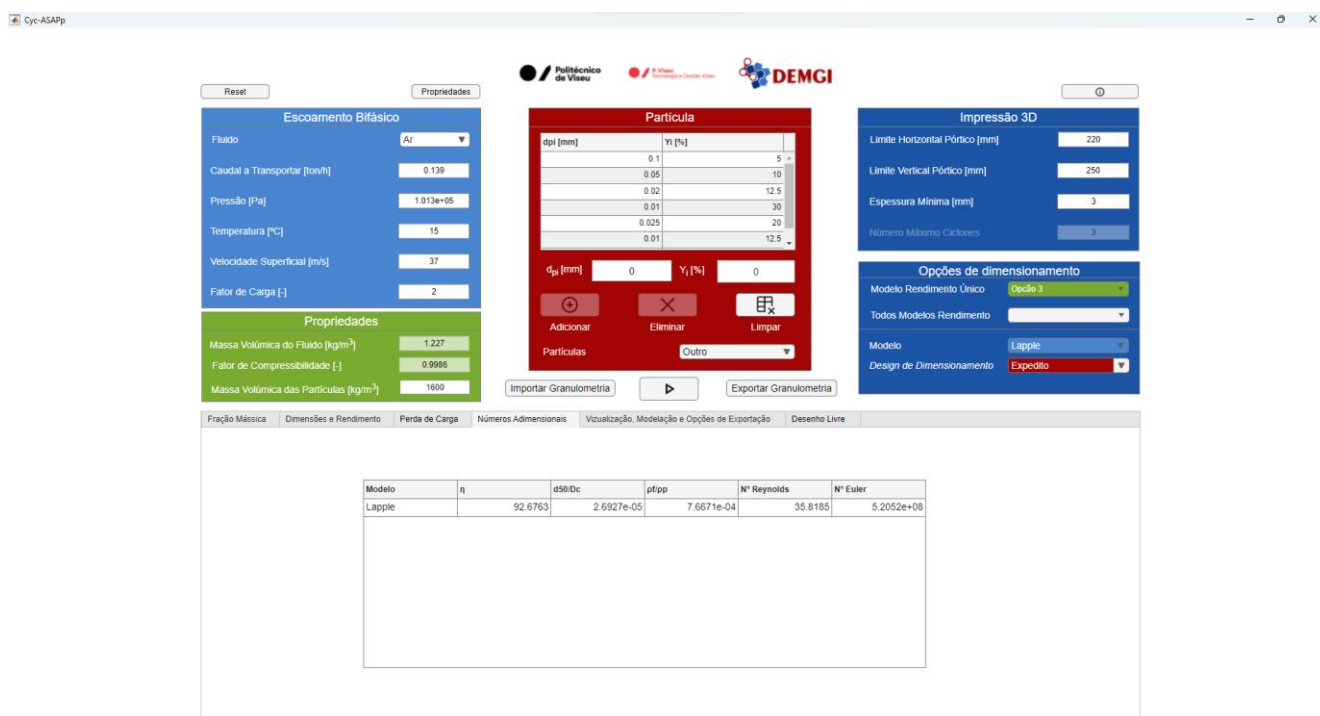


Figura 68 - Resultados dos cálculos computacionais - Cimento em Pó - Números adimensionais

Serradura Seca

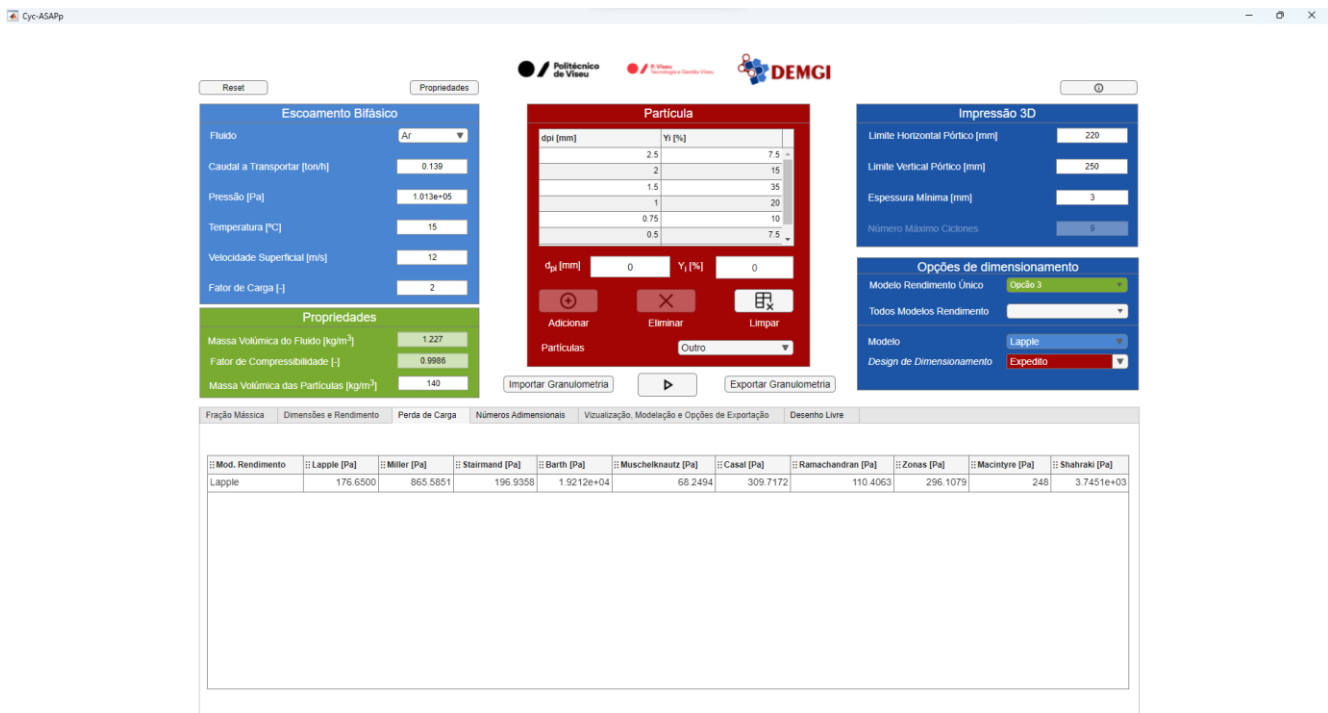


Figura 69 - Resultados dos cálculos computacionais - Serradura Seca - Perda de Carga

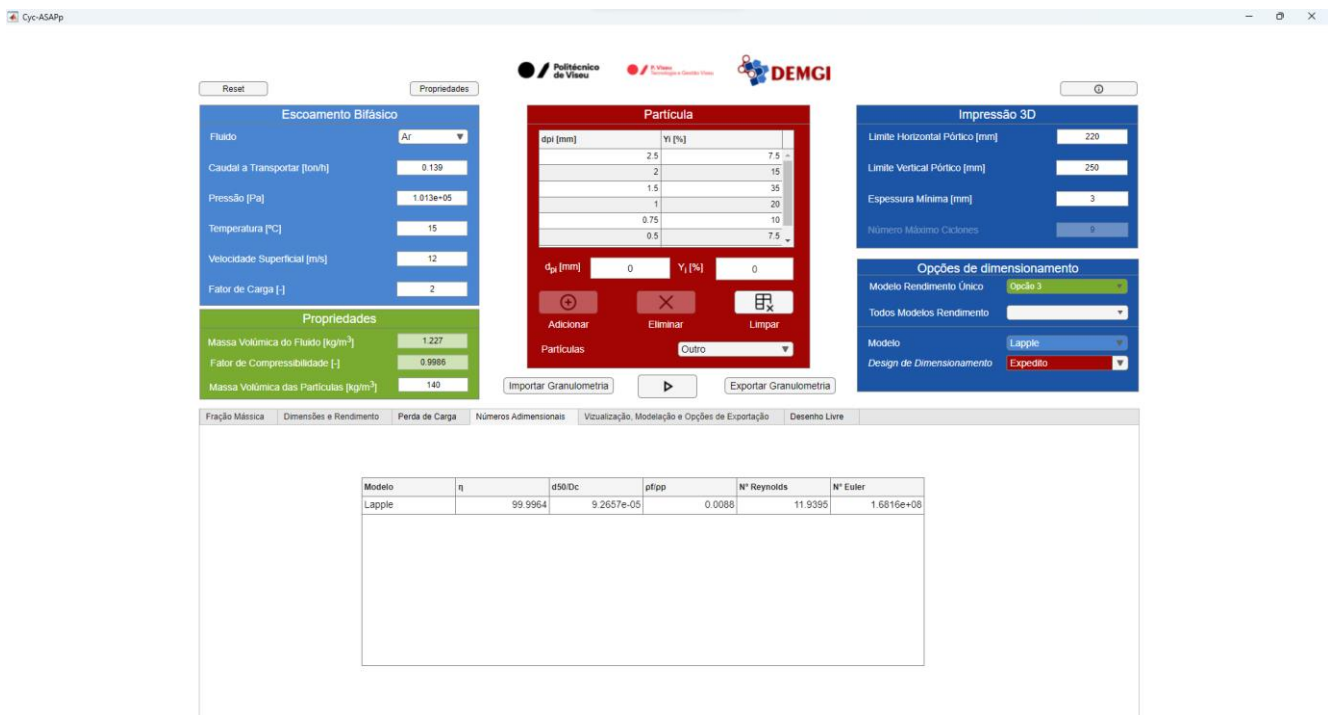


Figura 70 - Resultados dos cálculos computacionais - Serradura Seca - Números Adimensionais