

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Otelo Igreja Magalhães

Sistema de Aspiração e Tratamento de Partículas



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Pedro Otelo Igreja Magalhães

Sistema de Aspiração e Tratamento de Partículas

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Especialização em Tecnologias da Manufactura

Trabalho realizado sob a orientação do
Eng. José Joaquim Carneiro Barbosa
e do
Eng. Luís Fernando Sousa Ferreira da Silva

Outubro de 2011

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

Resumo

Este trabalho foi efectuado no âmbito da conclusão do Mestrado Integrado do curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. Foi proposto pela empresa Setimep, na pessoa do Eng.º Henrique Gonçalves, o projecto de um sistema móvel de aspiração e tratamento de partículas poluentes.

O presente relatório encontra-se dividido em 9 capítulos. Nos três primeiros capítulos, de carácter introdutório, são expostas as bases do projecto. No primeiro é justificada a necessidade do equipamento aqui projectado destacando a problemática da poluição do meio ambiente e os efeitos desta sobre as pessoas, no segundo são apresentados os objectivos para o trabalho definidos pela Setimep enquanto no terceiro é exposta a pesquisa de mercado efectuada assim como uma caracterização dos equipamentos. Os capítulos quatro e cinco são dedicados ao projecto do equipamento. O primeiro dedicado à concepção do sistema com o dimensionamento de todos os seus constituintes e o segundo onde é exposta toda a mecânica da construção do equipamento. O sexto e sétimo capítulo versam sobre as conclusões sobre a execução deste projecto e sobre as propostas de trabalho futuro. Nos dois últimos capítulos estão expostos a bibliografia e referências utilizadas para a elaboração deste projecto.

Foi efectuado um estudo de enquadramento do equipamento no sector industrial, tendo como resultado o sistema apresentado neste trabalho suportado pela inexistência do equipamento abrangendo as lacunas do mercado actual e tendo em conta os constrangimentos impostos. O sistema foi dimensionado tendo em conta um caudal imposto de $1500 \text{ m}^3/\text{h}$. A velocidade de transporte escolhida foi de 20 m/s .

Dimensionou-se o sistema de captação (uma hotte), acoplado a um tubo flexível e suportado por um braço articulado de movimentação e fixação do sistema.

O conjunto filtrante é constituído por dois elementos, um filtro pré-separador e um filtro principal. Como pré-separador, foi seleccionado e dimensionado da panóplia, um sistema de multiciclones (dois), conseguindo-se captar partículas até $12 \mu\text{m}$. Como filtro principal, foi seleccionado, um filtro de cartuchos (com dois cartuchos), tendo eficiência filtrante até $0,2 \mu\text{m}$ e têm um sistema de limpeza automática de modo a aumentar a vida útil dos cartuchos e uniformizar o caudal de captação.

O ventilador seleccionado teve como principal objectivo o comprimento dos requisitos de caudal e pressão para vencer as perdas de carga do sistema calculadas (300 mmca), foi seleccionado o ventilador FV38-R2 S4 da Flakt Solyvent.

Com o sistema dimensionado, procedeu-se ao projecto de fabrico, com a preocupação de minimizar custos de fabrico, ergonomia favorável aliados a robustez e com a premissa de minimizar o espaço ocupado. Utilizou-se para a construção do equipamento preferencialmente o aço S235JR como material e a soldadura TIG como tecnologia de fabrico de modo a minimizar os custos de produção.

O resultado obtido foi um produto final cujas dimensões gerais são de 1000x800x1220 com um caudal de aspiração de 1500 m³/h e garantindo uma emissão < a 0,2 µm para a atmosfera com eficiência de 99 %. O peso do equipamento ronda os 250kg e o seu custo final estimado é de cerca de 3000€.

Abstract

The work described in this paper has been done in the context of the conclusion of the Master's Degree in Mechanical Engineering. The company Setimep, represented by Eng. Henrique Gonçalves, proposed the project of a mobile system for aspiration and treatment of solid particles.

This report is divided into nine chapters. In the first three chapters, of introductory character, there are exposed the bases of the project. The first one justified the need of the equipment by highlighting the problem of environmental pollution and its effect on people, the second shows the objectives, defined by Setimep, for the work while in the third is exposed the market research carried out and a characterization of equipments of the same family. The chapters four and five are dedicated to the design of the equipment. The first one is dedicated to the design of the system and all its constituents and in the second it is exposed the equipment building characteristics. The sixth and seventh chapter deals with the conclusions of this project and proposals for future work. In the last two chapters are exposed the bibliography and the references used in this project.

All the components of the system were study taking into account the constraints imposed by the company. A tax flow of 1500 m³/h has been imposed for the design of the system. The chosen transport speed was of 20 m/s.

For the extraction system, it was selected and designed a hood coupled to a flexible tube that connects to the filtration elements. This assembly is held by an articulated arm with springs to make it possible to move and fix the extraction system in the desired position.

The filtration system consists in two elements, a pre-filter and a main filter. As pre-filter it was selected and designed, from the range of possible solutions, a system with cyclones (two) managing to capture particles up to 12 µm. As main filter it was selected and designed a cartridge filter (two cartridges) managing to capture particles up to 0,2 µm. The cartridge filters have an automatic cleaning system (with compressed air), as recommended by the manufacturer in order to extend the filter life expectation.

The system fan was selected so that it could generate enough pressure energy to overcome the pressure drop across the system, calculated using the tables of SMACNA. For the calculated pressure drop of 300 mmH₂O the selected fan was the FV38-R2 S4 from Flakt Solyvent.

With all the system design finished, the next step was to make the manufacturing project, with the premises of minimizing the equipment space and also to ensure robustness. The preferential used material was the S235JR construction steel and the manufacturing process was the TIG welding. The purpose of this chooses was to minimize the fabrication costs to the maximum.

The final product is a equipment with overall dimensions of 1000x800x1220 that have the capacity to capture and filter particles up to 0,2 μm with an efficiency of 99%. The device weight is around 250kg and the estimated cost it is of about € 3000.

Agradecimentos

Não podia deixar de prestar um agradecimento especial a toda a minha família, em especial à minha mãe Maria, ao meu pai Luís, à minha irmã Cláudia e à minha namorada Manuela pois sem eles e sem o incentivo com que continuamente me presentearam não seria possível sequer a minha entrada na Universidade, quanto mais chegar a este ponto de epílogo desta caminhada.

Um reconhecimento é também merecido ao Eng.º Henrique Gonçalves da Setimep, não só por me ter proporcionado esta oportunidade de poder finalizar o curso já ligado à indústria mas também pelo apoio técnico prestado ao longo de todo este projecto. Não me esqueço também dos meus restantes colegas da Setimep, a Diana e o Sérgio, pois também eles me deram um bom apoio técnico e moral.

Por fim mas não menos importantes, gostaria de expressar a minha gratidão aos orientadores da minha dissertação, o professor Eng.º Joaquim Barbosa e o professor Eng.º Luís Ferreira da Silva, pela paciência e pelos sábios conselhos sem os quais não seria possível a conclusão deste trabalho.

Nomenclatura

Grandezas		Unidades	
Nomes	Símbolos	Nomes	Símbolos
Caudal	Q	metro cúbico por hora	m^3/h
Velocidade linear	U	metro por segundo	m/s
Área	A	metro quadrado	m^2
Diâmetro	D	metro	m
Energia de pressão	H	Pascal	Pa
Peso específico	ρ	quilograma por metro cúbico	kg/m^3
Distância	X	metro	m
Secção	S	metro quadrado	m^2
Taxa de trabalho	Tx	metro cúbico por hora por metro quadrado	$m^3/h/m^2$
Volume	V	metro cúbico	m^3
Tempo (pag40)	t	segundo	s
Comprimento	L	metro	m
Aceleração da gravidade	g	metro por segundo ao quadrado	m/s^2
Viscosidade dinâmica	μ	Newton vezes segundo por metro quadrado	$N.s/m^2$
Velocidade angular	w	radianos por segundo	rad/s
Força	F	Newton	N
Raio	r	metro	m
Massa	m	quilograma	kg
Largura	W	metro	m
Velocidade de rotação	N	rotações por minuto	rpm
Potência	P	Watt	W
Rendimento	η	percentagem	$\%$
Binário	B	Newton vezes metro	Nm
Frequência	f	Hertz	Hz
Aceleração	\ddot{U}	metros por segundo ao quadrado	m/s^2

Glossário

Vias respiratórias superiores¹ – São os elementos do sistema respiratório que se encarregam de levar o ar desde o ambiente até à entrada dos pulmões. São constituídas pelas fossas nasais, mucosa nasal, mucosa olfatória, faringe, laringe e traqueia.

Vias respiratórias inferiores² – São os elementos do sistema respiratórios responsáveis pelas trocas gasosas com o sangue. São constituídas pelos brônquios, os bronquíolos e os alvéolos pulmonares.

Descolmatagem³ – Consiste no processo de desobstrução de uma determinada malha, que pode ser de qualquer tipo de material, que se encontra entupida por um determinado conjunto de partículas. Partículas não deixam passar qualquer tipo de material.

Rodízios⁴ – São essencialmente elementos cujo objectivo é a movimentação de equipamentos. São constituídos por uma roda à qual se encontra acoplado um sistema que permite a fixação desta ao equipamento que se pretende movimentar.

Material atóxico⁵ – É um tipo de material que não tem qualquer tipo de intoxicação ou envenenamento na sua utilização.

Partículas hidrocópias⁶ – São partículas que absorvem com facilidade água existente em forma de vapor na atmosfera.

Limite de solubilidade⁷ - Corresponde a concentração máxima que se pode atingir de um soluto dentro de um solvente. A título de exemplo, pode se considerar o caso da dissolução de açúcar em água. Só é possível dissolver o açúcar até ser atingido o limite de solubilidade da água, a partir desse limite todo o açúcar adicionado vai precipitar no fundo.

Flamabagem⁸ – Também conhecido como encurvadura é um fenómeno que ocorre em peças esbeltas (peças onde a área de secção transversal é pequena em relação ao seu comprimento), quando submetidas a um esforço de compressão axial. A flambagem acontece quando a peça sofre flexão transversal devido à compressão axial.

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Nomenclatura.....	vi
Glossário	vii
Índice	viii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas	xiii
1. Introdução	1
2. Objectivos	5
3. Análise de mercado e de soluções	6
3.1. Concorrência.....	6
3.2. Constituição do equipamento	6
3.2.1. Conjunto de transporte e captação	7
3.2.2. Conjunto Filtrante	7
3.2.3. Conjunto Motor.....	9
3.2.4. Outros elementos	9
4. Dimensionamento do sistema de aspiração	10
4.1. Sistema de captação e transporte	12
4.1.1. Sistema de transporte	12
4.1.2. Sistema de captação	15
4.2. Filtro Principal.....	22
4.2.1. Separadores por Ultrassons.....	23
4.2.2. Filtros de Mangas.....	24
4.2.3. Colectores Húmidos.....	26
4.2.4. Filtros de Ar de Alta Eficiência (Filtros de cartuchos).....	28
4.2.5. Precipitadores Térmicos	29
4.2.6. Filtros Electroestáticos.....	30
4.2.7. Selecção do Filtro Principal	32
4.3. Filtro Pré-Separador	37

4.3.1.	Câmaras de sedimentação	38
4.3.2.	Separadores Centrífugos (ciclones)	40
4.3.3.	Separadores por impacto ou choque	42
4.3.4.	Seleção do Pré-Separador	43
4.4.	Filtro remoção de odores	53
4.5.	Ventilador	55
4.5.1.	Seleção do Ventilador	58
5.	Construção do equipamento.....	69
5.1.	Estrutura do equipamento.....	71
5.2.	Filtro Pré-Separador	76
5.3.	Filtro principal	79
5.4.	Sistema de captação e transporte	82
5.5.	Filtro carvão activo.....	86
5.6.	Acessórios do aspirador.....	87
5.7.	Características gerais do equipamento	90
6.	Conclusões	93
7.	Propostas de trabalho futuro	95
8.	Bibliografia	96
9.	Referências.....	98
	Anexos	100
	Anexo A.....	101
	Anexo B	105
	Anexo C	108
	Anexo D.....	112
	Anexo E	118
	Anexo F.....	120
	Anexo G.....	128

Índice de Figuras

Figura 1 - Evolução do nível de CO2 emitidos nos EUA [1]	1
Figura 2 - Ilustração de um aspirador móvel tipo e suas partes principais [2]	6
Figura 3 - Exemplos de cartuchos para filtros [3]	8
Figura 4 – “Heliflex pu metal”[4].....	13
Figura 5 - Gráfico de perda de carga [5].....	13
Figura 6 - Gráfico Velocidade de captação vs. Distância Captador	17
Figura 7 - Hotte envolvente [6].....	18
Figura 8 - Hotte Recebedora [6]	18
Figura 9 - Hotte capturadora [6]	18
Figura 10 - Tabela para dimensionamento de Hottes [7].....	19
Figura 11 - Gráfico comparação Tubo de saída simples vs. Com hotte e flange	20
Figura 12 - Mecanismos de captação e recolha de partículas por tamanho [8]	22
Figura 13 - Mecanismo de separação do separador por Ultrassons [9]	23
Figura 14 - Mecanismo de separação do filtro de mangas [10].....	24
Figura 15 – Modo de funcionamento de um filtro de mangas [11]	24
Figura 16 – Exemplo de colector húmido [11]	26
Figura 17 - Componentes de um colector húmido.....	27
Figura 18 - Mangas vs. Cartuchos	28
Figura 19 - Mecanismo de funcionamento de um precipitador térmico.....	29
Figura 20 - Filtro Electroestático [11]	30
Figura 21 - Esquema tipo instalação de AC para limpeza de filtros [12].....	35
Figura 22 - Mecanismos de captação e recolha de partículas por tamanho [8]	37
Figura 23 - Câmara de sedimentação [10]	38
Figura 24 - Tipos de separadores de sedimentação [10] e [13]	38
Figura 25 - Câmara de sedimentação com anteparos ou chicanas [11]	39
Figura 26 – representação de um Ciclone [11]	40
Figura 27 – Mecanismo princípio de separação do ciclone [13]	40
Figura 28 - Separador por impacto ou choque [11]	42
Figura 29 - Esquema de uma câmara de sedimentação tipo [13]	44
Figura 30 - Ilustração de um ciclone [14].....	49
Figura 31 - Carvão Activo [15].....	53
Figura 32 - Estrutura tipo do carvão activo [16].....	53

Figura 33 - Exemplo de ventiladores	55
Figura 34 - Ventiladores por tipo de construção [11].....	56
Figura 35 - Ventiladores por tipo de forma de pás [11].....	57
Figura 36 - Representação do sistema de aspiração	58
Figura 37 - Montagem tipo 4 do ventilador [17]	60
Figura 38 - Tabela de pré-selecção do ventilador [17]	61
Figura 39 - Gráfico da curva característica do ventilador FOUGAL HD 14H [17]..	63
Figura 40 - Gráfico da potência absorvida pelo Ventilador [17].....	63
Figura 41 - Curva característica do ventilador FV 38-R2 S4 [17].....	64
Figura 42 - curva da carga provocada pelo Ventilador.....	65
Figura 43 - Características do Motor DRE100M2/FL [18]	66
Figura 44 - Gráfico cruzamento carga ventilador com motor	67
Figura 45 - Gráfico cruzamento carga ventilador com motor a 3500 rpm	68
Figura 46 - Ilustração estrutura aspirador	71
Figura 47 - ilustração do canal IN/OUT filtro partilhado.....	72
Figura 48 - Carcaça e tampa do ventilador	72
Figura 49- Ligação soldada ventilador	73
Figura 50 - Fixação motor do ventilador	74
Figura 51 - Chapa suporte cartuchos	74
Figura 52 - Chapas deflectoras câmara filtro.....	75
Figura 53 - Pormenores curvas do canal de entrada na câmara do filtro.....	75
Figura 54 - Representação da entrada comum dos ciclones	76
Figura 55 - Fixação dos ciclones à base	77
Figura 56 - Curva ligação aos ciclones	77
Figura 57 - Conjunto módulo de pré-separação.....	78
Figura 58 - Vista de topo e lateral dos elementos filtrantes.....	79
Figura 59 - Pormenor entrada na câmara do filtro.....	80
Figura 60 - Sistema de limpeza por ar comprimido.....	80
Figura 61 - Ilustração do sistema de ar comprimido	81
Figura 62 - Pormenor parafusos de engate rápido	81
Figura 63 - Sistema de captação do aspirador	82
Figura 64 - Ligação rotativa do tubo flexível	83
Figura 65 - Esquema ligação rotativa	83

Figura 66 - Candeeiro de mecanismo de "barra e mola" [18].....	84
Figura 67 - Ilustração ligação do braço articulado	85
Figura 68 - ligação intermédia braço articulada	85
Figura 69 - Pormenor caixa filtro de carvão activo	86
Figura 70 - Ilustração pormenor aberturas filtro carvão activo	86
Figura 71 - Formato da gaveta de recolha de partículas	87
Figura 72 - Gavetas do aspirador	88
Figura 73 - Rodízios do aspirador.....	88
Figura 74 - Ilustração pega aspirador	89
Figura 75 - Porta de manutenção	89
Figura 76 - Ilustração geral do aspirador	90
Figura 77 - Fragmento do catálogo Heliflex para tubos flexíveis	105
Figura 78 – Pag. 1 Catálogo ALTAIR selecção de material filtrante.....	106
Figura 79 – Pag. 2 Catálogo ALTAIR selecção de material filtrante.....	107
Figura 80 - Forças actuantes sobre uma partícula num fluido [13]	108
Figura 81 - Reflexão especular vs Reflexão difusa [19].....	111
Figura 82 - Diagrama de velocidades na pá de um ventilador [11]	112
Figura 83 - Perda de carga/m de conduta linear [7].....	118
Figura 84 - Coeficiente de perda de Carga em curvas rectangulares [7]	119
Figura 85 - Coeficiente de perda de carga em transições [7].....	119
Figura 86 - Mecanismo simples de barra e mola [20]	120
Figura 87 – Mecanismo duplo de barra e mola [20].....	122
Figura 88 - Sistemas de barras braço tubo flexível.....	124
Figura 89 - Tabela de selecção de materiais para molas [21].....	125

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de efeitos de partículas contaminantes e suas consequências	2
Tabela 2 - Velocidades de transporte recomendadas por tipo de partícula	10
Tabela 3 - Coeficiente de resistência para curvas a 90°	14
Tabela 4 - Factor K para curvas $\neq 90^\circ$	14
Tabela 5 - Velocidades recomendadas de captação no ponto de emissão	16
Tabela 6 - Vantagens e Desvantagens separadores para filtro principal	32
Tabela 7 - Comparativo mangas vs. cartuchos	34
Tabela 8 - Vantagens e Desvantagens separadores para pré-filtro	43
Tabela 9 - Rendimento de uma câmara de sedimentação de 950x950mm	47
Tabela 10 - Tabela de medidas de um ciclone	49
Tabela 11 - Dimensões do Ciclone seleccionado	51
Tabela 12 - Rendimento do Ciclone	52
Tabela 13 - Elementos de ligação entre o tubo flexível e os ciclones	59
Tabela 14 - Tabela de perda de carga do sistema	60
Tabela 15 - Características gerais do aspirador	90
Tabela 16 - Mapa de custos do sistema de aspiração	92
Tabela 17 - Tabela de análise de mercado	101

1. Introdução

Nos tempos que correm há cada vez mais uma maior preocupação com o meio ambiente e com os efeitos da poluição sobre este e sobre o ser humano. De facto, e como se pode observar na Figura 1 (que demonstra o aumento das emissões de CO₂ desde o início do século passado até ao presente) o aumento exponencial da população ocorrido no século XX, auxiliado pelo crescimento acentuado da industrialização em todo o mundo, levou a um aumento da poluição do meio ambiente para níveis astronómicos impensáveis e insustentáveis que atentam até à própria existência humana.

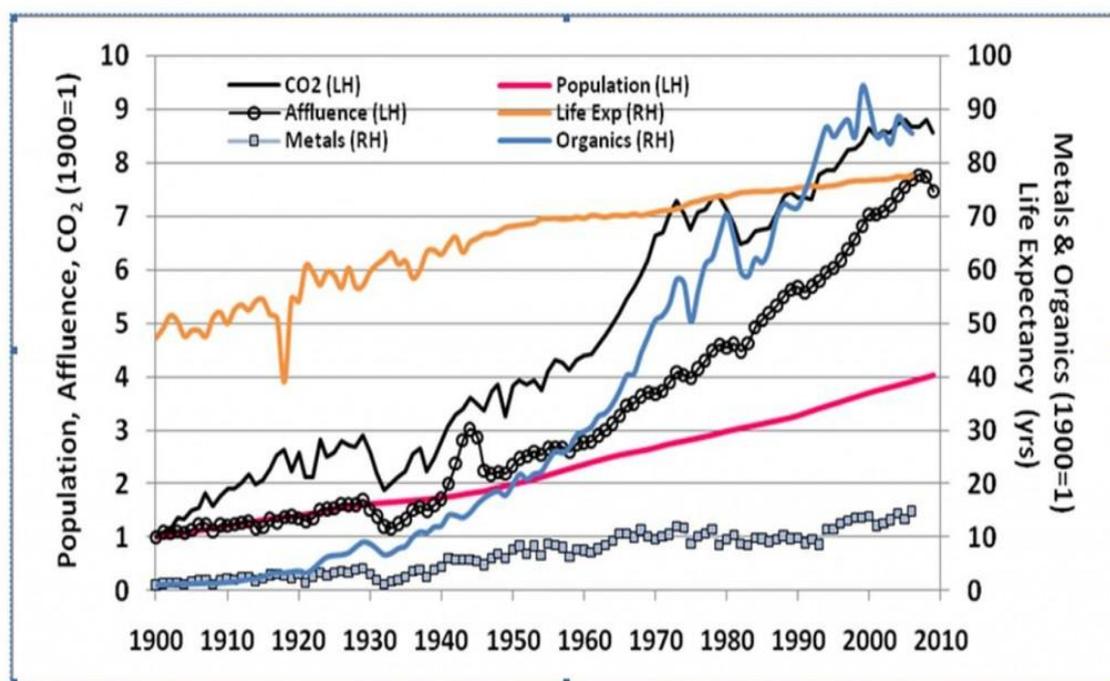


Figura 1 - Evolução do nível de CO₂ emitidos nos EUA [1]

Esta crescente preocupação com o meio ambiente levou à imposição de limites de poluição cada vez mais restritivos (especialmente na União Europeia) no que diz respeito a emissões poluentes, com incidência especial na indústria (responsável por grande parte deste problema), no sentido de diminuir o nível de poluição e minorar todos os efeitos desta nas pessoas.

Esta imposição de limites de poluição levou à necessidade da criação de equipamentos capazes de lidar com os poluentes e de os tratar de forma eficiente reduzindo os níveis de emissão poluidora para o meio ambiente.

Actualmente, uma empresa não ser “amiga” do ambiente pode ter efeitos nefastos, podendo afectar desde a saúde dos próprios trabalhadores, até à população e meio envolvente podendo ter consequências muito negativas a nível da produtividade, de publicidade, da imagem, económico e até legal.

Um dos principais problemas ambientais industriais passa pelo tratamento de efluentes gasosos decorrentes da produção de um determinado bem ou serviço. Assim, o tratamento do ar ambiente industrial surge como um aspecto importante e até decisivo para o sucesso de uma empresa pelo que o seu estudo, monitorização e controlo é imperioso. Posto isto, Importa saber os efeitos da exposição do corpo humano a produtos químicos. De uma forma geral, o efeito, que certas partículas têm, sobre o organismo pode ser sintetizado na seguinte tabela (Tabela 1):

Tabela 1- Tipos de efeitos de partículas contaminantes e suas consequências

Tipo de Efeito:	Consequências:
Sem efeito específico	Efeito de sobrecarga nas vias respiratórias, perturbando por isso as trocas gasosas.
Irritante, corrosivo Ex: Poeiras de soda cáustica.	Irritação e num estado mais avançado destruição das mucosas.
Fibrogénico Ex: Sílica livre cristalizada, amianto.	Conduz à formação de um tecido fibroso no pulmão fazendo com que este perca a elasticidade perturbando gravemente as trocas gasosas.
Tóxico Ex: Chumbo.	Ataque do organismo originando a destruição de certas funções e órgãos
Alergénico Ex: Poeiras de certas madeiras.	Após um período de sensibilização por exposições sucessivas, a inalação de uma quantidade muito baixa pode provocar reacções violentas como crise de asma, etc.
Asfixiante Ex: Azoto, Hélio, Hidrogénio.	Apesar de não ser tóxico não permite manter a vida.

Existem, no essencial, três formas de penetração de produtos químicos no organismo humano: Via percutânea (através da pele), Via digestiva (através da ingestão) ou via pulmonar (através da respiração) sendo esta última o principal veículo de contaminação.

Todas as matérias em suspensão podem penetrar nas vias respiratórias. Importa agora distinguir os vários tipos de partículas segundo os seguintes prismas:

Quanto ao seu tamanho pode-se distinguir o seguinte:

- Partículas inaláveis – São elementos de maior dimensão (na ordem dos 10 a 15 μ m), como por exemplo poeiras grossas, e que apenas penetram as vias respiratórias superiores ficando retidas aí, assim sendo a sua acção e efeitos são localizados.
- Partículas respiráveis – São partículas mais finas (dimensões inferiores a 10 μ m) e que conseguem penetrar até às vias respiratórias profundas (alvéolos pulmonares), estas têm uma acção e efeitos maiores já que podem passar para a corrente sanguínea e daí propagarem-se para o corpo e todos os seus órgãos.

No que diz respeito ao seu estado físico e comportamento pode-se destacar:

- Gases – Como o próprio nome indicia são partículas poluentes que se encontram exclusivamente sob a forma gasosa, o seu comportamento e densidade pouco diferem do ar “puro” e a gravidade não tem um papel significativo.
- Aerossóis – São um sistema constituído por um gás (geralmente ar ambiente) onde se encontram dispersas partículas sólidas e/ou líquidas. Neste caso a gravidade pode desempenhar um papel importante especialmente para baixas velocidades do ar.

Entendendo os efeitos perniciosos que determinados tipos de partículas têm no ser humano, é fácil perceber e entender a necessidade de captação de poluentes gasosos em ambiente industrial.

Numa qualquer fábrica onde decorre um processo produtivo tendo em vista a elaboração de um produto ou a prestação de um serviço nem sempre o foco poluidor se encontra fixo no mesmo local. Assim sendo, é logico que exista também um equipamento móvel que possa tratar esse foco variável, pelo que a utilização de equipamentos móveis de aspiração e tratamento de partículas poluentes faz todo o sentido

Após análise das MTD (melhores técnicas disponíveis) ou BREF (junção da sigla BAT – Best Available Techniques com REF – Reference Documents), que consistem numa série de documentos emitidos regularmente pela UE onde estão sintetizadas as melhores técnicas disponíveis para os vários sectores de actividade industrial, a empresa Setimep detectou a existência de uma lacuna no que diz respeito ao tratamento de gases com partículas por via seca. A inexistência de sistemas móveis de aspiração de partículas sólidas de baixa ou média pressão. Os equipamentos existentes, estão vocacionados para o tratamento de fumos secos ou oleosos, ou são de alta pressão. No intuito de colmatar esta deficiência existente no mercado, a Setimep, decidiu investir no projecto de um aspirador móvel de captação e tratamento por via seca de gases contendo partículas sólidas.

A Setimep é uma empresa que projecta, constrói e instala equipamentos de filtração e purificação de ar industrial, nomeadamente:

- Filtros de Mangas
- Filtros Electrostáticos
- Equipamentos de armazenamento e transporte pneumático
- Cogeração
- Filtros de Cartuchos
- Circuitos de Conduitas
- Unidades de vácuo aplicadas à aspiração industrial
- etc.

Com mais de 30 anos de experiência na área do despoeiramento, tanto a nível nacional como internacional (Europa, América do Sul e África), a Setimep aposta não só no cumprimento da legislação em vigor no que respeita às emissões de partículas poluentes, como também no aumento do nível de eficiência energética e de produtividade nas empresas e na a robustez e standardização dos seus equipamentos.

2. Objectivos

As especificações definidas pela Setimep, que serviram como base de projecto formam os seguintes:

- Caudal, $Q=1500 \text{ m}^3/\text{h}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Min: $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ – Max: $2000 \text{ m}^3/\text{h}$);
- Temperatura de funcionamento máxima, $T(^\circ\text{C})_{max} = 80^\circ\text{C}$;
- Braço articulado de suporte exterior à conduta;
- Peso na ordem dos 150 kg;
- Preço máximo de produção a atingir 3000 €;
- Estudo de potenciais opcionais e variantes do produto.

Com estes parâmetros definidos foi efectuada uma análise de mercado e de estado de arte dos equipamentos dentro da família do equipamento que se pretende projectar (principalmente os de aspiração de fumos de soldadura) de forma a melhor perceber o principio de funcionamento destes e verificar o estado em que se encontra o mercado, quais os principais concorrentes e as soluções que apresentam.

3. Análise de mercado e de soluções

Após uma extensa análise de mercado foi possível não só conhecer os principais fabricantes de equipamentos móveis de extração e tratamento de gases contaminados (fumos de soldadura, partículas sólidas e/ou odores) como também compreender bastante bem a constituição e funcionamento desta família de equipamentos.

3.1. Concorrência

Em termos concorrência, e tendo como referência a tabela do Anexo A, é possível observar a existência de um grande número de fabricantes deste tipo de equipamentos com soluções diferentes no mercado, estando, no entanto, todos vocacionados, tal como os documentos MTD indicavam, para a área de tratamento de gases e/ou partícula oleosas e não para o tratamento de partículas sólidas.

3.2. Constituição do equipamento

Funcionalmente pode-se dividir este tipo de equipamentos em 3 partes principais. O conjunto de captação e transporte, o conjunto filtrante e o conjunto motor. Uma ilustração destes três conjuntos é apresentada na Figura 2.

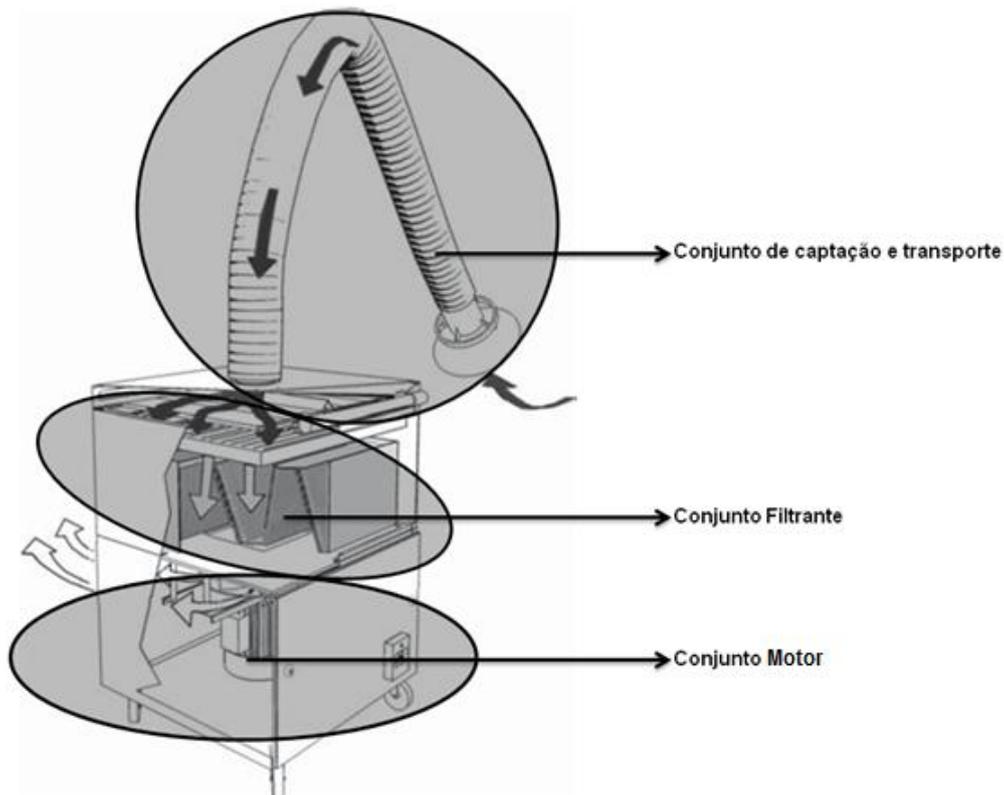


Figura 2 - Ilustração de um aspirador móvel tipo e suas partes principais [2]

3.2.1. Conjunto de transporte e captação

O conjunto de transporte e captação é constituído pela hotte e pelo braço de transporte articulado. A hotte é responsável pela captação das partículas que se pretende captar e tratar. O seu formato usual é o cónico, provavelmente pelo facto de se procurar garantir uma uniformidade de aspiração em todas as direcções. Normalmente existe, na entrada da hotte, uma rede de protecção cujo objectivo é proteger o equipamento contra partículas de grandes dimensões (tais como papeis, plásticos, luvas, bonés, etc.) que possam entupir e/ou danificar o equipamento.

O braço de transporte é o responsável pelo transporte das partículas desde o ponto de captação até ao conjunto filtrante. Tem normalmente 9 graus de liberdade permitindo ao braço movimento de rotação em torno do seu eixo na ligação à carcaça, movimento de rotação em cada uma das rótulas (duas) e dois movimentos esféricos na ligação com a campânula. Estes 9 graus de liberdade permitem um posicionamento ágil e preciso do conjunto. Para que o braço se movimente e se “fixe” na posição pretendida é necessário um sistema de movimentação e fixação do braço, este é na maioria dos casos constituído por um conjunto de barras que dividem o braço, geralmente em 2 partes, e que ligadas por um ponto rodam uma relativamente à outra, este sistema pode ser interno ou externo ao tubo de transporte. A movimentação e fixação do conjunto faz-se recorrendo a um conjunto de molas ligadas a barras. O tubo de transporte mediante o fabricante pode ser de tipos bastante diferentes, de tubo flexível em toda a sua extensão, outros com tubos rígidos intercalados com tubo flexível nos cotovelos e até com tubo rígido em toda a sua extensão. Quanto a dimensões gerais, os comprimentos mais usuais são de 2 a 3 m (embora existam alguns com comprimentos de 4) com um diâmetro varia entre os 120 e os 160 mm. Após a passagem do pó pelo conjunto de transporte este chega ao conjunto filtrante.

3.2.2. Conjunto Filtrante

O conjunto filtrante é o responsável pela retenção e tratamento do gás poluente, e é por norma constituído por três elementos filtrantes diferentes, um pré-separador, um filtro principal, e um filtro de tratamento de odores.

O pré-separador destina-se à captação de partículas de grandes dimensões, trata-se de um filtro mecânico que por interpor obstáculos à passagem do ar retém as partículas de grandes dimensões. A existência deste pré-separador serve sobretudo para evitar que

partículas de grandes de dimensões colidam com o filtro principal, situação que provocaria um desgaste e rompimento prematuro deste.

Após a passagem pelo filtro pré-separador, o ar, é encaminhado para o filtro principal geralmente de cartuchos (embora também existem alguns que funcionam segundo princípios electrostáticos, nomeadamente os de tratamento de gases oleosos), um exemplo dos cartuchos utilizados neste tipo de filtros pode ser observado na figura que se encontra abaixo (Figura 3).



Figura 3 - Exemplos de cartuchos para filtros [3]

Os cartuchos são, constituídos por uma trama de tecido que deixa passar o ar mas retêm as partículas, naturalmente a granulometria das partículas que se consegue reter depende do material de que é constituído o cartucho assim como da densidade da sua trama. Com a utilização deste tipo de filtro consegue-se uma grande área filtrante num filtro de pequena dimensão, o que trás grandes benefícios em termos de eficiência do equipamento. Quanto ao material, existem de diversos tipos, consoante o tipo de material (granulometria, abrasividade, etc.) a filtrar, a eficiência pretendida assim como a temperatura dos gases entre outros. Alguns fabricantes têm no seu equipamento um sistema de limpeza do filtro, este sistema (geralmente de ar comprimido), ao ser activado envia ar (a alta velocidade) em contra corrente com a direcção do fluxo de aspiração dos gases fazendo com que as partículas se desprendam do filtro e caiam num recipiente, este processo é normalmente conhecido por descolmatagem.

Por fim o ar já sem a maioria das partículas que o constituíam (a maioria fabricantes falam em eficiências na ordem dos 99% para partículas com uma granulometria entre os 0.2µm e os 2µm) é direccionado para o filtro de tratamento de odores, este filtro destina-se a retirar qualquer odor contido nos gases e é constituído por carvão activo.

Por fim o ar, segundo garantia de grande parte dos fabricantes, sai em condições de ser respirável.

3.2.3. Conjunto Motor

Este conjunto é constituído pelo moto-ventilador, é o conjunto que promove o funcionamento de todo o equipamento. É o elemento gerador de energia, sob a forma de pressão que vai induzir a corrente de ar que vai fazer o equipamento aspirar. Em todos os fabricantes a alimentação deste conjunto é feita electricamente (normalmente corrente trifásica).

3.2.4. Outros elementos

Para além dos elementos acima descritos, existem ainda outros importantes a considerar, desde logo a blindagem do equipamento que é a responsável pela protecção do equipamento, para além de ser o elemento estrutural de suporte de fixação de todos os componentes constituintes do sistema. Esta tem um formato tipicamente cúbico em metal, embora também haja em formatos mais aerodinâmicos e noutros materiais (como polímeros) e é executada de forma a ser possível o acesso ao interior para manutenção do equipamento.

Ligado à blindagem estão rodízios, que permitem a mobilidade do equipamento, o tipo de rodízios existente na maioria dos fabricantes é bastante amplo, tanto a nível de tamanho como a nível de material.

4. Dimensionamento do sistema de aspiração

Tomando de base as imposições definidas pela empresa Setimep no dimensionamento do equipamento em questão foram estudados os parâmetros essenciais da prática de bom funcionamento dos vários subsistemas constituintes do equipamento. O equipamento aqui em estudo e tal como foi referido no capítulo dois pode, de uma forma genérica, ser dividido em três sub-sistemas:

- Sistema de captação e transporte;
- Sistema de tratamento, constituído por um ou mais elementos filtrantes;
- Sistema de ventilação / extractor.

É de extrema importância atingir o cumprimento dos requisitos de eficiência solicitados (boa captação, tratamento e retenção de partículas $>0,2\mu\text{m}$). Um dos parâmetros mais importantes é a velocidade de transporte dos gases captados. Na Tabela 2 estão apresentadas as velocidades recomendadas de transporte em função dos gases/partículas a captar. A velocidade recomendada é apresentada como sendo resultante de testes práticos de captação e transporte segundo o princípio da não deposição dos mesmos.

Tabela 2 - Velocidades de transporte recomendadas por tipo de partícula

Velocidades de transporte recomendadas (m/s)	
Gases e Vapores	5 a 6 m/s
Fumos	7 a 10 m/s
Poeiras muito finas e leves	10 a 13 m/s
Poeiras secas e pós	13 a 18 m/s
Poeiras industriais médias	18 a 20 m/s
Poeiras pesadas	20 a 23 m/s
Poeiras pesadas e húmidas	$>23\text{m/s}$

O equipamento a projectar, é vocacionado para a indústria dita na gíria como “pesada”, sendo estas as principais indústrias clientes da empresa Setimep. Assim por análise prática, foi recolhida informação nas indústrias alvo e verificou-se que as poeiras destinadas ao equipamento de despoeiramento são normalmente secas e peso considerado médio a pesado. Assim definiu-se uma velocidade de transporte de 20 m/s como sendo o parâmetro de velocidade recomendado e suficiente para a abrangência da maioria das partículas analisadas.

Neste ponto e após ter sido analisado o estado de arte, recolhidas as imposições de projecto e definida a velocidade de transporte, é possível avançar para o dimensionamento de todo o equipamento.

O sistema aqui em estudo será constituído por um sistema de captação e transporte, um pré-separador, um filtro principal, um filtro de odores e um ventilador.

A principal inovação deste sistema em relação aos demais concorrentes da mesma família é o facto de o pré-filtro de destinar a ser um captador de partículas de maior dimensão, ao invés da concorrência que apenas utiliza este tipo de componente como protecção ao filtro principal contra partículas que acidentalmente entrem no sistema. No fundo, passa-se de um sistema com dois elementos filtrantes mais um de protecção (utilizado pela concorrência) para um sistema com três elementos filtrantes independentes que trabalharão em conjunto para a filtração de partículas solidas e gases.

Desta forma é possível a utilização sem riscos, do aspirador em ambientes mais agressivos como por exemplo na aspiração de uma rebarbagem de peças metálicas ou de corte de pedra entre outras.

De realçar que não serão abordados neste capítulo quaisquer aspectos construtivos relativos aos componentes e sistemas que vão ser dimensionados/seleccionados, ficando essa especificação para o capítulo seguinte. O estudo destes elementos é apresentado de seguida.

4.1. Sistema de captação e transporte

O sistema de captação e transporte do aspirador é constituído por um elemento responsável pela captação dos poluentes e um elemento responsável pelo transporte dos poluentes até aos elementos filtrantes.

4.1.1. Sistema de transporte

O sistema de transporte, do aspirador será constituído por um tubo flexível para que se possa movimentar de encontro ao foco poluidor. Da mecânica dos fluidos sabe-se que o caudal (Q) que escoo por uma tubagem é função da velocidade de escoamento (U) e da área de secção da tubagem (A), a equação é a seguinte:

$$Q = U \cdot A \quad (1)$$

Ora como o tubo será de secção circular é possível rescrever a função (1) de modo a calcular o diâmetro de tubagem ($D_{tubagem}$) necessário para o caudal e velocidade pretendidos resultando na seguinte expressão:

$$D_{tubagem} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{U \cdot \pi}} \quad (2)$$

Tendo como referência caudal $Q = 1500 \text{ m}^3/h$ e uma velocidade de transporte $V_{transporte} = 20 \text{ m/s}$ obtêm-se o diâmetro de tubagem seguinte:

$$D_{tubagem} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1500}{3600 \cdot 20 \cdot \pi}} \approx 0,163\text{m} = 163\text{mm}$$

Verifica-se que é necessário um tubo com um diâmetro de 163mm, é provável que não exista um tubo com este diâmetro específico pelo que será necessário normalizar este valor segundo o que existe nos fabricantes.

Assim e consultando o catálogo de um dos fornecedores da Setimep deste tipo de produtos, a Heliflex, foi seleccionado o tipo de tubo mais adequado para esta aplicação, o tubo “heliflex pu metal”(Figura 4) que, segundo o fabricante, tem excelente resistência à abrasão, a altas e baixas temperaturas (temperatura de utilização -40/80°C) sendo um tubo adequado para a aplicação em indústrias pesadas como por exemplo da indústria cerâmica (uma dos principais áreas de actuação da Setimep).



Figura 4 – “Heliflex pu metal”[4]

É um tubo atóxico, de cor transparente, com superfície interna lisa, em poliuretano reforçado com uma espiral em aço cobreado.

Quanto ao diâmetro, e como se pode ver pelo excerto do catálogo que se encontra na Figura 77 do Anexo B, não existem tubos com diâmetro de 163mm pelo que se procedeu para a normalização para o valor mais próximo que no caso é um tubo de diâmetro 160mm. A velocidade de transporte real é passará a ser de::

$$U = \frac{4 \cdot Q}{D_{tubagem}^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 1500}{3600 \cdot 0,160^2 \cdot \pi} = 20,72 \text{ m/s}$$

A perda de carga ao longo da tubagem pode ser calcula com recurso a uma sùmula de cálculo fornecida pela Heliflex. Em primeiro lugar e recorre-se ao gráfico da Figura 5 que permite determinar a perda de carga por metro linear de tubagem.

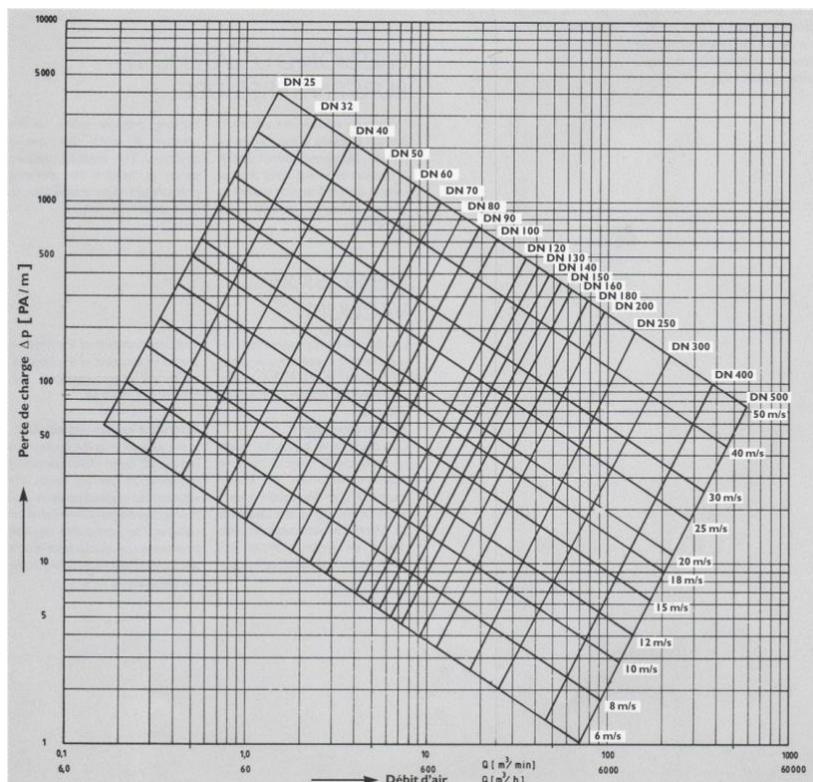


Figura 5 - Gráfico de perda de carga [5]

Tendo como entrada uma conduta com diâmetro $D = 160\text{mm}$ e o caudal de $Q = 1500\text{ m}^3/\text{h}$ obtém-se uma perda de carga ($\Delta H_{\text{tubagem}}$) de:

$$\Delta H_{\text{tubagem}} = 48\text{ Pa/m}$$

Visto que a Heliflex apenas fornece tubo em rolos de 10, 20 ou 30 metros decidiu-se que o comprimento ideal a utilizar, de forma a minimizar o desperdício de material, será um tubo com 3m de comprimento para cada aspirador. Assim sendo a perda de carga ao longo da tubagem ($\Delta H_{\text{tubagem}}$) será igual a:

$$\Delta H_{\text{tubagem}} = 48 \cdot 3 = 144\text{ Pa}$$

Obtida a perda de carga ao longo da conduta é possível calcular a perda de carga nas curvas de tubagem (ΔH_{curvas}) utilizando a função seguinte:

$$\Delta H_{\text{curvas}} = \frac{\zeta \cdot \rho \cdot U^2}{2} \quad (3)$$

Em que:

ζ = Coeficiente de resistência da curva ρ – Peso específico do ar (kg/m^3)

Projectando já um pouco como vai ser o braço, pode-se dizer que este será um braço com uma articulação a meio, e que na posição recolhida fará no máximo uma curva de 180° . Este corresponde ao pior caso de aspiração, isto é, quando a perda de carga por efeito da curva será maior.

Utilizando as tabelas (Tabela 3 e Tabela 4) do apêndice técnico do fabricante, que se encontram em baixo, é possível obter o parâmetro em falta na expressão (3):

Tabela 3 - Coeficiente de resistência para curvas a 90°

R/D	1	2	4	6	10
ζ_{90°	0.36	0.22	0.17	0.13	0.15

Tabela 4 - Factor K para curvas $\neq 90^\circ$

ζ	30°	60°	120°	150°	180°
K	0.4	0.7	1.25	1.5	1.7

$$\zeta = \zeta_{90^\circ} \cdot K \quad (4)$$

Com a referência de um ângulo de 180° e a indicação do fabricante de um Raio de curvatura mínimo igual ao diâmetro da tubagem, o coeficiente de resistência da curva (ζ) será de:

$$\zeta = 0.36 \cdot 1.7 = 0.612$$

Substituindo na equação (3), sabendo que o peso específico do ar a 20°C é $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$ a perda de carga na curva será de:

$$\Delta H_{curvas} = \frac{0.612 \cdot 1.204 \cdot 20.72^2}{2} = 158,2 \text{ Pa}$$

A perda de carga total é obtida pela soma da perda de carga ao longo da tubagem (perda de carga distribuída) com a perda de carga na curva (perda de carga local):

$$\Delta H_{Total} = \Delta H_{Tubagem} + \Delta H_{curvas} \quad (5)$$

$$\Delta H_{Total} = 144 + 158,2 = 302,2 \text{ Pa} = 30,22 \text{ mmca}$$

4.1.2. Sistema de captação

O sistema de captação, ou captador é um dispositivo através do qual, devido a um diferencial de pressões entre o ar ambiente e o existente no captador, se estabelece um fluxo de ar para o interior do mesmo (escoamento do ambiente para o interior do sistema), ou seja, é necessária uma depressão (vácuo parcial) no captador.

Importa ter em consideração duas velocidades, a velocidade de escoamento ao longo do tubo e a velocidade segundo a qual o ar, carregado de partículas, se desloca desde o foco poluidor até ao captador. Para que o contaminante entre no sistema e não se espalhe é necessário induzir a formação de uma corrente de ar para o interior.

As partículas contaminantes, de acordo com a sua natureza deverão ser induzidas a deslocarem-se em direcção ao captador com uma certa velocidade denominada por velocidade de captação ($U_{captação}$). Esta velocidade pode ser determinada pela seguinte equação:

$$U_{captação} = \frac{Q}{10 \cdot C^2 + A} \quad (6)$$

Em que:

C = Distância do captador/foco poluidor (mm)

A – Área de secção do captador (m^2)

Na Tabela 5 é possível observar as velocidades de captação recomendadas para diversos tipos formação de poluentes:

Tabela 5 - Velocidades recomendadas de captação no ponto de emissão

Condições de libertação do contaminante	$U_{\text{captação}}$ (m/s)
Libertado em ar parado Ex: Evaporação em tanques, electrodeposição, etc.	0,25 – 0,5
Libertado em ar com velocidade baixa (em relativo repouso) Ex: Cabines de pintura, tapetes transportadores, soldadura, etc.	0,5 – 1,0
Libertado em ar com movimento rápido Ex: britagem, peneiras, limpeza de peças de fundição por areia, etc.	1,0 – 10
Libertado com Velocidade elevada em ar com movimento rápido Ex: Esmerilagem, decapagem com abrasivo, etc.	2,5 – 10

A escolha da velocidade acertada depende de muitos factores, mas de uma forma geral pode-se dizer que se deve optar por um valor do lado limite inferior para:

- Locais com correntes de ar mínimas ou favoráveis à captação;
- Poluentes de baixa toxicidade ou só incomodativos;
- Poluição intermitente, baixa produção;
- Grande captador – Grandes massas de ar em movimento.

Por outro lado deve escolher-se um valor do lado do limite superior para:

- Correntes de ar perturbadoras;
- Poluentes de alta toxicidade;
- Alta produção, uso intensivo;
- Pequeno captador – somente uso local.

Como o sistema de aspiração é móvel, o captador, tem de ser forçosamente pequeno (somente para uso local), Com este pressuposto opta-se por utilizar de valores de captura perto do limite superior da gama apresentada na Tabela 5 pois desta forma fica abrangida uma maior gama de aplicações no universo dos clientes alvo.

Para o tubo previamente seleccionado de diâmetro 160mm é possível, utilizando a função (6) e as velocidades de captura recomendadas da Tabela 5, determinar a distância a que é possível captar o poluente utilizando este tubo para cada tipo de situação. Esta informação pode ser compilada sob a forma do gráfico que se encontra abaixo.

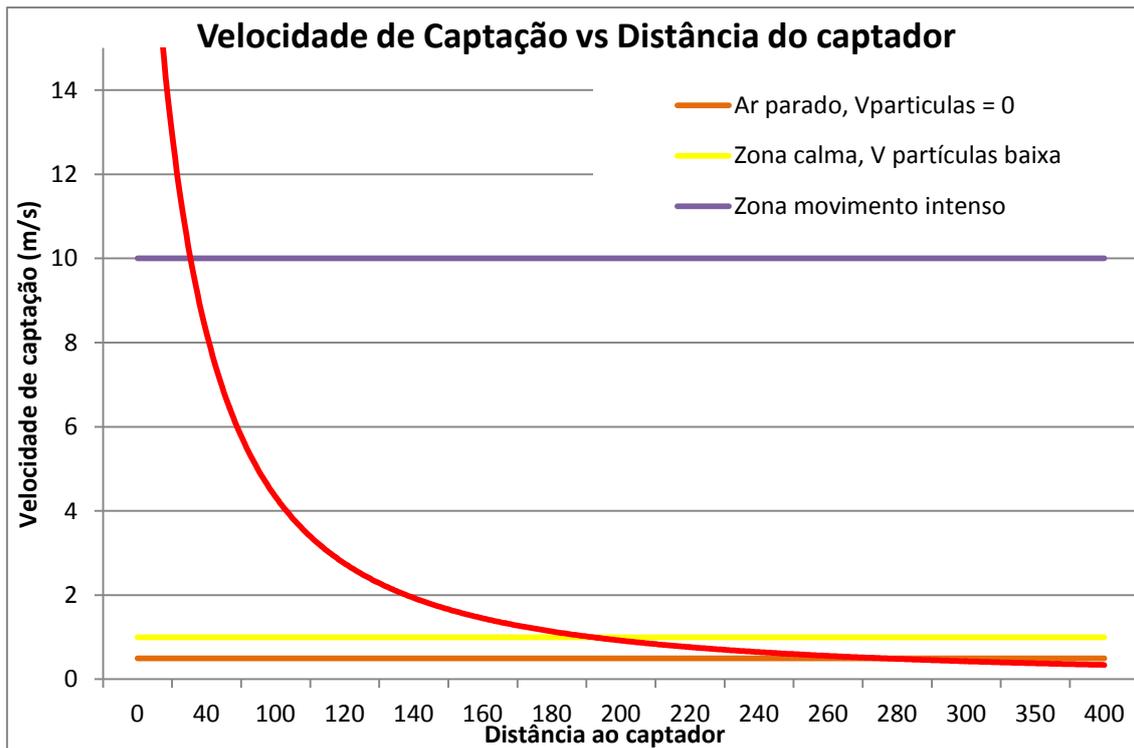


Figura 6 - Gráfico Velocidade de captação vs. Distância Captador

Como se pode verificar por observação directa do gráfico, a partir de cerca de 280mm de distância o captador deixa de conseguir capturar qualquer tipo de partícula (tendo em conta as melhores condições).

Uma forma de aumentar a distância de captação é através da indução de uma direcção preferencial para o escoamento dos gases, este efeito é conseguido pela colocação de uma hotte (ou exaustor) à entrada do tubo flexível, esta hotte corresponderá essencialmente a um cone fixo ao tubo flexível.

De forma genérica, pode dizer-se que, existem três tipos comuns de hottes, envolventes, recebedoras ou capturadoras:

Hotte Envolvente – Rodeia o foco poluidor e é fechada em pelo menos 2 dos lados. Sempre que possível deve ser utilizada, pois é o tipo de hotte mais eficaz.

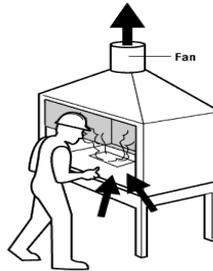


Figura 7 - Hotte envolvente [6]

Hotte Recebedora – É desenhada para captar emissões poluidoras que saem com alguma velocidade aproveitando o seu movimento natural para as captar. É o caso dos exaustores de cozinha ou para captação de poluentes em fornos de fundição.

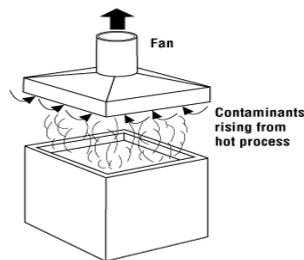


Figura 8 - Hotte Recebedora [6]

Hotte capturadora – É colocada perto do foco poluidor sem o envolver, neste caso a ar é “puxado” para dentro da hotte sendo capturado.

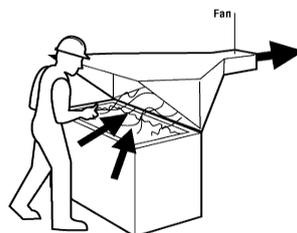


Figura 9 - Hotte capturadora [6]

Para o caso do aspirador móvel a hotte a utilizar será do tipo recebedora visto que o foco de poluição é variável.

Observando a figura abaixo (Figura 10 - tabela retirada do guia de dimensionamento de condutas do SMACNA) é possível concluir que a área de secção transversal à entrada da Hotte (A_1) deve ser, no mínimo, o dobro da área de secção da conduta (A_2).

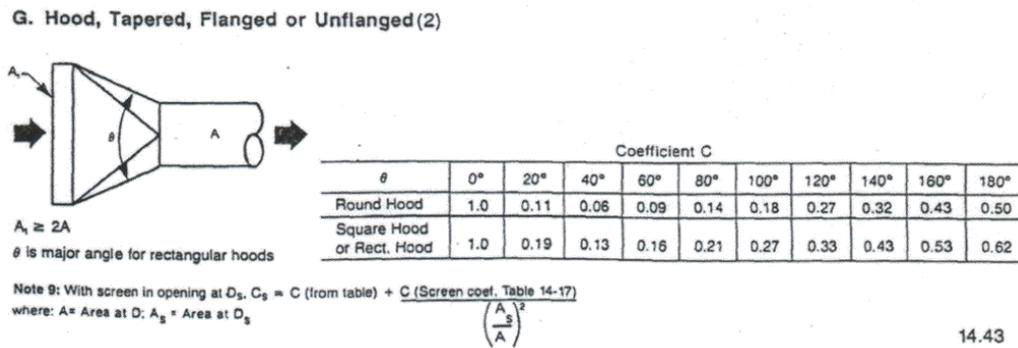


Figura 10 - Tabela para dimensionamento de Hottes [7]

Assim e impondo uma Hotte de secção circular, o diâmetro de entrada da Hotte (D_{hotte}) pode ser calculado utilizando a equação presente na figura anterior (Figura 10):

$$A_1 = 2 \cdot A_2 (=) \frac{\pi \cdot D_{hotte}^2}{4} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot D_{conduta}^2}{4} (=) D_{hotte} = \sqrt{2} \cdot D_{conduta} \quad (7)$$

Em que:

$$A_1 = \text{Área de secção da entrada da hotte (mm}^2\text{)} \quad A_2 = \text{Área de secção da conduta (mm}^2\text{)}$$

$$D_{hotte} = \sqrt{2} \cdot 160 \approx 226 \text{ mm}$$

Verifica-se que a Hotte deverá um diâmetro mínimo de entrada de 226mm a que corresponde uma velocidade de aproximadamente 10 m/s. Impondo um ângulo de abertura de 40° (Valor que minimiza a perda de carga na hotte) verifica-se que se necessita de um comprimento de cerca de 91 mm.

Resumindo, necessita-se de uma hotte com um diâmetro inicial de 226mm, um diâmetro final de 160mm e um comprimento de 91 mm.

Outra maneira de aumentar a distância de captação é através da introdução de uma flange exterior na hotte, o seu efeito pode ser verificado através da comparação da expressão (6), que permite calcular a velocidade de captação para tubos sem flange com a seguinte que permite calcular a velocidade de captação para de tubos com flange:

$$U_{\text{captação}} = \frac{Q}{0,75(10 \cdot X^2 + S)} \quad (8)$$

A comparação pode ser feita fazendo uma razão entre as duas, obtendo-se o seguinte resultado:

$$\frac{U_{\text{captação}_{C/flange}}}{U_{\text{captação}_{S/flange}}} = \frac{\frac{Q}{0,75(10 \cdot X^2 + S)}}{\frac{Q}{(10 \cdot X^2 + S)}} = \frac{1}{0,75} = 1,33 \quad (9)$$

Ou seja, com o recurso a uma flange verifica-se um aumento da velocidade de captação em 33%.

A comparação gráfica entre as duas soluções é possível utilizando um gráfico similar ao da Figura 6 obtendo-se o gráfico seguinte (Figura 11):

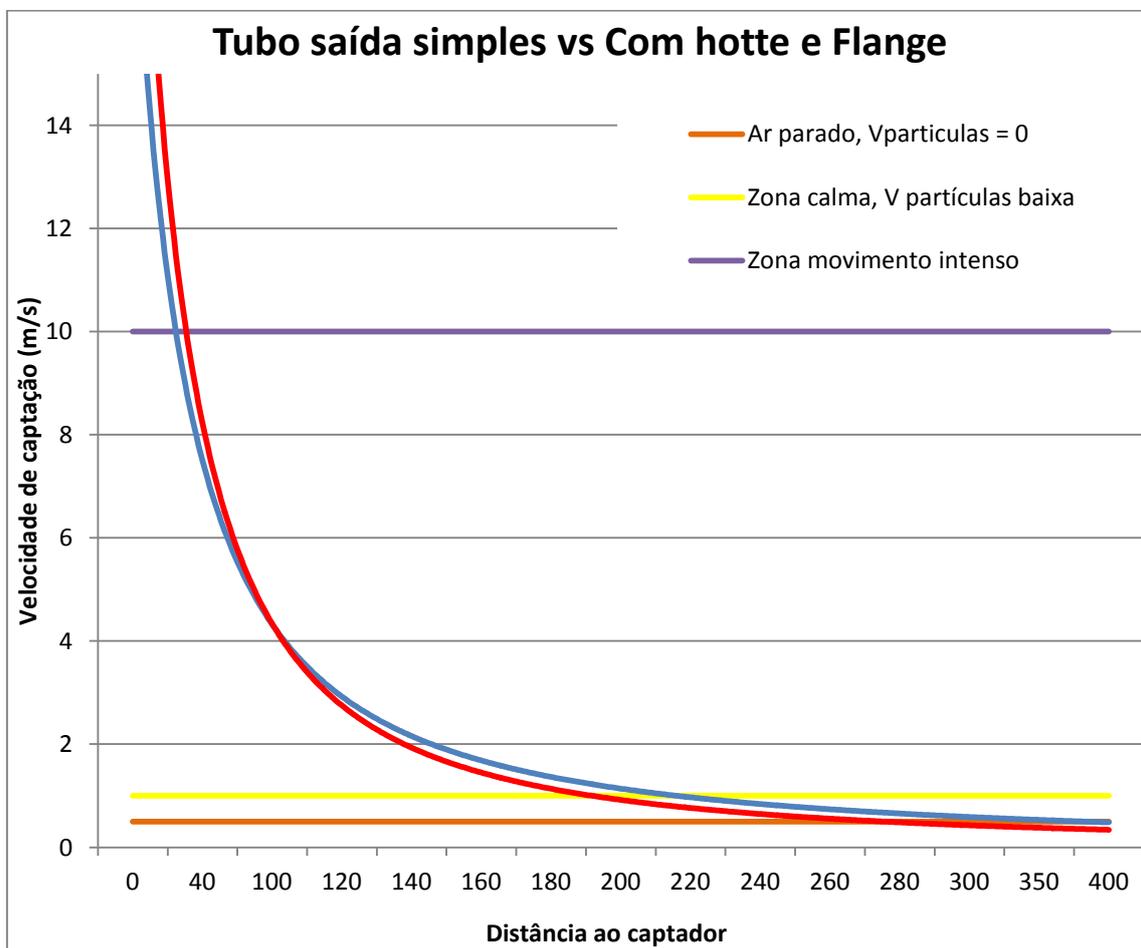


Figura 11 - Gráfico comparação Tubo de saída simples vs. Com hotte e flange

Observando o gráfico verifica-se que com o recurso a uma hotte e flange (linha azul do gráfico), consegue captar-se partículas até 350 mm, enquanto sem o uso deste (linha a vermelho) apenas se consegue captar até 280 mm o que corresponde a um aumento de 25% da distância.

A perda de carga devida à hotte (ΔH_{hotte}) pode ser calculada pela seguinte expressão retirada do Manual do SMACNA, que refere que esta é função do coeficiente de resistência da hotte (C) (que pode ser retirado da Figura 10) e a velocidade no tubo flexível ($U_{conduta}$):

$$\Delta H_{hotte} = C \cdot U_{conduta} \quad (10)$$

O que substituindo dá o seguinte resultado:

$$\Delta H_{hotte} = 0.06 \cdot 20.72 = 1,24 \text{ mmca}$$

4.2. Filtro Principal

O Filtro principal tem como principal objectivo a captação de partículas poluidoras captadas pelo aspirador. Tendo por base os dados obtidos na análise de mercado e de estado de arte efectuada sabe-se que uma grande parte dos fabricantes promete uma eficácia de 99% para partículas com dimensões entre os 0,2-2 μ m, pelo que o mínimo exigível é que o filtro consiga obter um comportamento semelhante. As principais características que se pretendem, para além da capacidade de captar as partículas com o tamanho pretendido são que o filtro principal seja:

- Compacto;
- Simples;
- Baixa Manutenção;
- Leve;
- Baixo Custo.

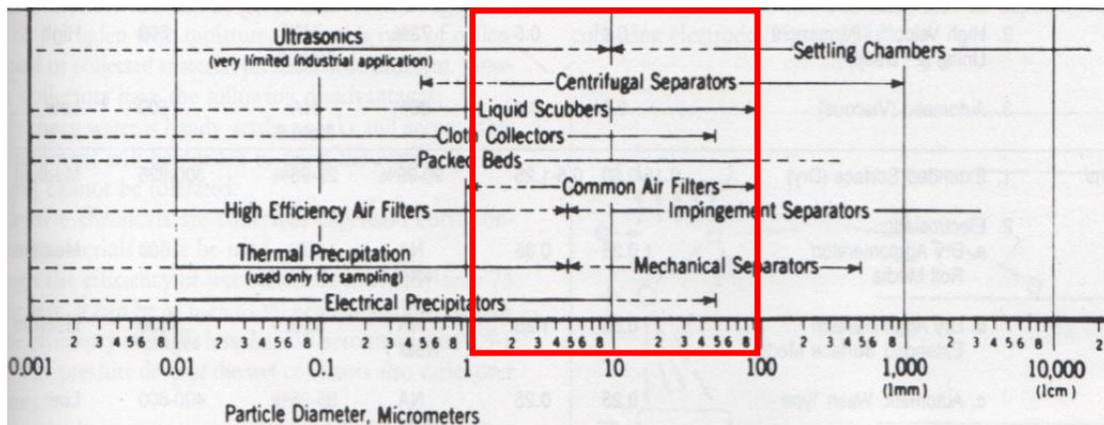


Figura 12 - Mecanismos de captação e recolha de partículas por tamanho [8]

Analisando a Figura 12 pode verificar-se a existência de vários tipos de separadores indicados para a captação pretendida, a saber: Separadores por ultrassons, filtros de mangas, colectores húmidos, filtros anaeróbios, filtros de alta eficiência (filtros de cartuchos), precipitadores térmicos e filtros electrostáticos. Em primeiro lugar é essencial perceber o modo de funcionamento de cada um destes tipos de separadores, assim como as vantagens e desvantagens da sua utilização.

4.2.1. Separadores por Ultrassons

Os separadores por ultrassons são separadores que utilizam ondas ultrassónicas como método de separação de partículas.

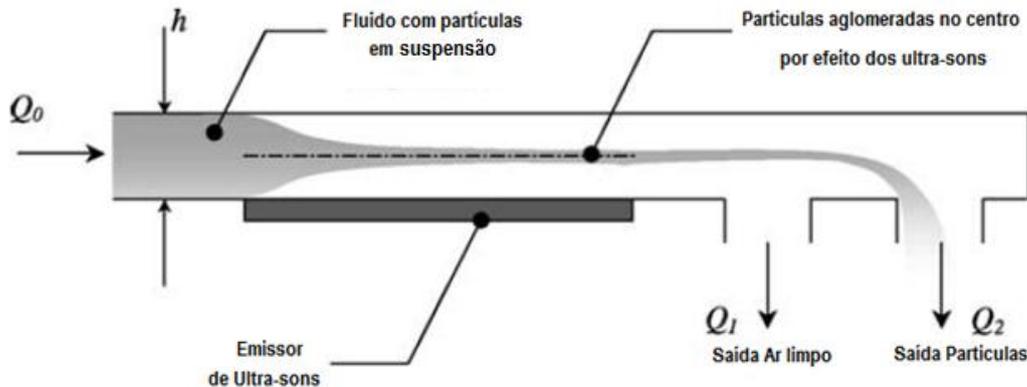


Figura 13 - Mecanismo de separação do separador por Ultrassons [9]

Por observação da Figura 13 é possível perceber o mecanismo que estes utilizam. O fluxo gasoso é obrigado a atravessar uma câmara onde um emissor de ondas ultrassónicas irradia o fluxo gasoso gerando uma força denominada de força de radiação acústica. As partículas ao serem bombardeadas com as ondas ultrassónicas são forçadas a aglomerar-se no centro da câmara separando as partículas sólidas do fluxo gasoso.

Esta tecnologia é utilizada na área da medicina, nomeadamente na separação de componentes do sangue (por exemplo glóbulos vermelhos, partículas com 6-8 μ m).

O seu potencial de implementação é elevado, contudo, a sua utilização a nível industrial é bastante reduzida, pelo que de momento não se figura como uma boa opção para um equipamento que se quer implementar no imediato e com preços competitivos, já que o custo de investimento e o tempo de investigação seriam avultados.

4.2.2. Filtros de Mangas

Os Filtros de Mangas são separadores cujo princípio de separação é a crivagem (Figura 14). É o tipo de filtro mais empregue a nível industrial pelo facto de ser simples, barato, de fácil manutenção e com uma aplicabilidade quase universal.

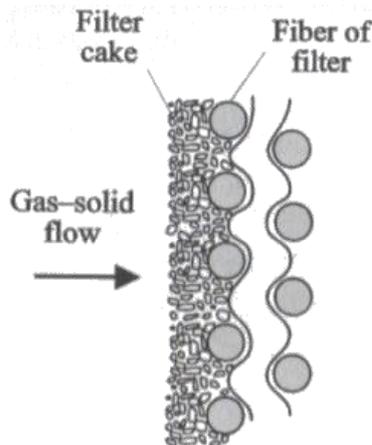


Figura 14 - Mecanismo de separação do filtro de mangas [10]

O ar com partículas (Figura 15) entra no filtro passando o fluxo gasoso por um tecido fibroso (mangas do filtro), que funciona como crivo. Como o espaço entre fibras do filtro é menor que o tamanho das partículas, estas não conseguem passar pelo tecido ficando retidas na superfície.

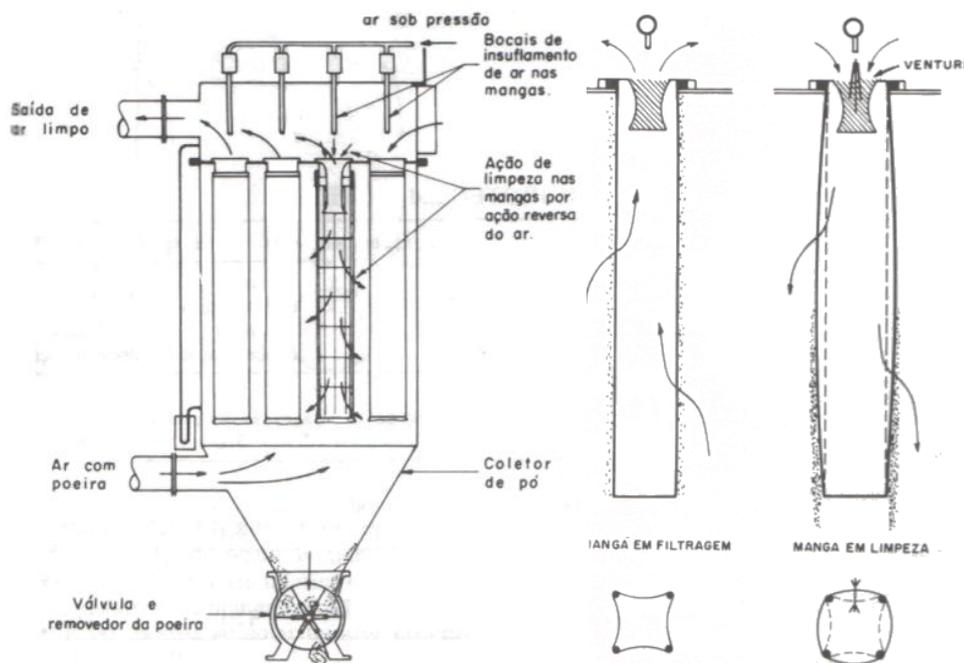


Figura 15 – Modo de funcionamento de um filtro de mangas [11]

Todo o filtro se encontra em depressão, por efeito de um ventilador que se encontra a jusante deste. Este facto leva a que as partículas fiquem presas às mangas levando a um entupimento progressivo desta e ao aumento da perda de carga do sistema. Para impedir isso é injectado, em contra corrente, ar ambiente ou ar comprimido que faz insuflar momentaneamente a manga sacudindo as partículas limpando-a e fazendo com que as partículas caiam numa tremonha que se encontra abaixo das mangas onde são recolhidas e armazenadas. Este efeito pode ser visto do lado direito da Figura 15 na qual se pode ver uma manga em filtração e em limpeza.

O material do qual pode ser constituído o elemento filtrante (as mangas) é bastante variado e a sua escolha, que tem uma influência decisiva no desempenho do equipamento, depende essencialmente das características do fluxo que vai ser tratado (abrasividade, temperatura, hidroscoopia, etc.).

Um filtro de mangas consegue, dependendo do tipo de material de que são constituídas as mangas, captar partículas com dimensões até 0,2 μm . A perda de carga típica deste tipo de equipamentos é da ordem dos 100-150 mmca.

4.2.3. Colectores Húmidos

Os colectores húmidos, geralmente denominados por vias húmidas, são equipamentos cujo mecanismo de colecta consiste em fazer contactar o fluxo de gás sujo com as gotas de um fluido, geralmente água, que é pulverizada sobre o fluxo de ar + partículas. É especialmente utilizado no tratamento de gases com grande concentração de pó ou em gases a temperaturas muito elevadas. Um exemplo deste tipo de colectores pode ser visualizado na figura abaixo (Figura 16).

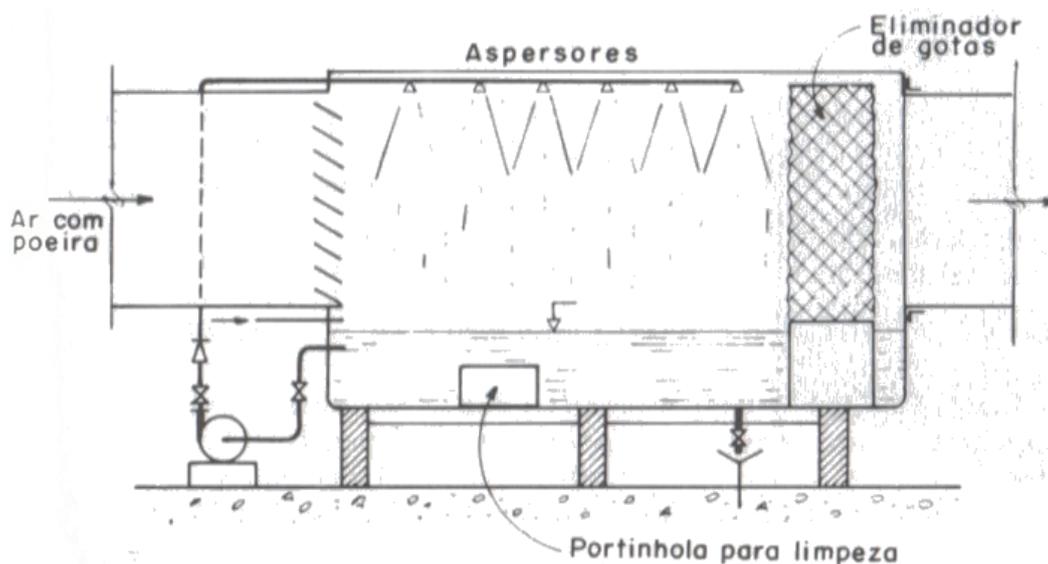


Figura 16 – Exemplo de colector húmido [11]

O funcionamento base deste tipo de equipamento é o seguinte: Introduzindo-se, no fluxo gasoso, gotas de grande dimensão ($50\mu\text{m}$) de um qualquer fluido, as partículas do gás poluído aderem às gotas do líquido se entrarem em contacto com este. O conjunto líquido + pó é posteriormente separado do fluxo gasoso.

Um separador húmido completo é constituído por várias partes, como se pode ver por observação do esquema da Figura 17.

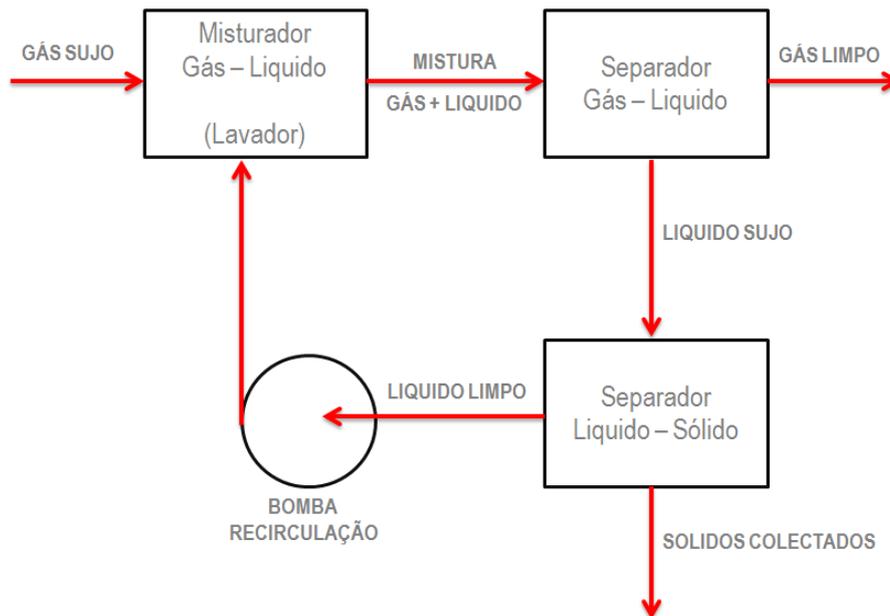


Figura 17 - Componentes de um coletor húmido

O gás carregado de partículas (gás sujo) entra no coletor húmido onde é misturado com o líquido no chamado lavador, após esta mistura, o conjunto passa para um separador gás-líquido, onde o gás é separado do líquido sujo de partículas e sai limpo do coletor.

Uma observação atenta do esquema, permite verificar um problema inerente da utilização deste tipo de captador, o tratamento do gás origina um líquido (água) poluído, isto é, passa-se de um problema de poluição atmosférica para um problema de poluição hídrica. Nesta situação e quando não se consegue reutilizar a água em algum outro ponto da unidade fabril onde está inserido o coletor, geralmente é introduzido um separador líquido sólido no sistema, fazendo-se re-circular a água pelo sistema embora nunca seja possível reutilizar a água a 100% devido ao limite de saturação da água.

Os colectores húmidos dependendo do tipo de separadores que englobam podem ter perdas de carga bastante diversas, podendo ir dos 6mmca até aos 150 mmca. Em geral, conseguem com razoável eficácia a separação de partículas até 1µm.

4.2.4. Filtros de Ar de Alta Eficiência (Filtros de cartuchos)

Os filtros de ar de alta eficiência, denominados comercialmente por filtros de cartuchos, são filtros bastante similares aos filtros de mangas, visto que têm o mesmo mecanismo de captação e separação de pó (crivagem). A diferença entre os dois, consiste no modo como o meio filtrante está disposto. Enquanto nos filtros de mangas tem-se um corpo cilíndrico (as mangas), nos casos dos filtros de cartuchos tem-se um corpo, também de forma cilíndrica, mas que é formado por pregas formando um espécie de fole. A diferença, entre os dois é facilmente perceptível por observação da Figura 18.



Figura 18 - Mangas vs. Cartuchos

Facilmente se entende que este formato dos cartuchos provoca um grande aumento da área filtrante do elemento com a mesma ocupação de espaço, daí o nome de filtros de ar de alta eficiência. No entanto, este formato torna o filtro mais propenso à colmatagem, isto é, a ficar com os poros obstruídos especialmente quando se lida com gases carregados com partículas hidrosscópicas. Para além disso, tem uma perda de carga característica ligeiramente superior aos filtros de mangas. Em termos de capacidade de filtração, consegue, tal como no caso dos filtros de mangas, filtrar partículas com dimensões até $0,2\mu\text{m}$.

4.2.5. Precipitadores Térmicos

Os separadores por precipitação térmica, têm como mecanismo de separação a temperatura. O princípio é o de que quando um corpo, pelo qual passa uma corrente de ar poluído, é aquecido é produzida uma zona livre de partículas à volta deste. O tamanho desta zona é directamente proporcional ao gradiente de temperatura entre o corpo e o fluxo gasoso. Assim, a aplicação de um corpo quente num fluxo de ar carregado com partículas faz com que as partículas se desviem da sua trajectória podendo ser captadas. Este princípio pode ser observado na Figura 19.

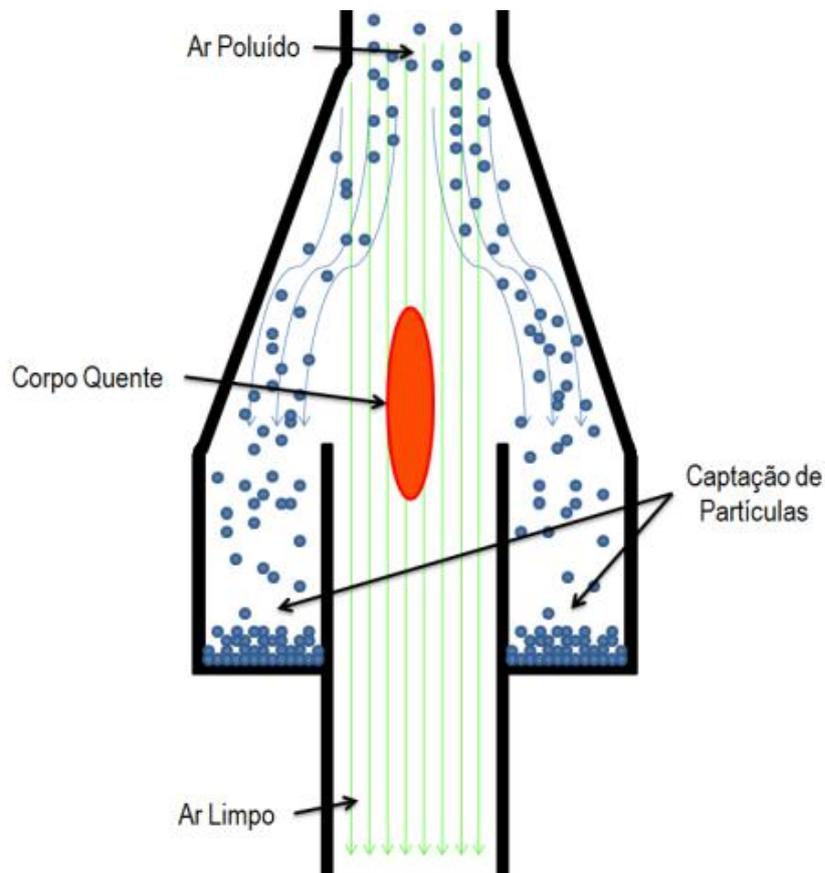


Figura 19 - Mecanismo de funcionamento de um precipitador térmico

A eficiência deste tipo de separadores aumenta com a diminuição do tamanho das partículas (menos inércia para vencer) e tem uma perda de carga mínima. Contudo, este tipo de separador apenas é utilizado para a recolha de pequenas amostras, ou seja, em pequena escala, visto que o aquecimento e manutenção de um corpo de dimensões consideráveis a uma temperatura elevada têm custos demasiado elevados para que possa ser aplicado a nível industrial.

4.2.6. Filtros Electroestáticos

São separadores que utilizam o princípio da precipitação eléctrica como método de separação de partículas. A precipitação eléctrica é um processo físico segundo o qual uma partícula contida num fluxo gasoso é carregada electricamente e sob a influência de um corpo eléctrico é separada da corrente gasosa.

O sistema é bastante simples, tal como se pode ver na Figura 20, consiste numa superfície carregada positivamente (ligada à terra), que vai funcionar como colector. Próximo desta é colocado um eléctrodo emissor carregado negativamente.

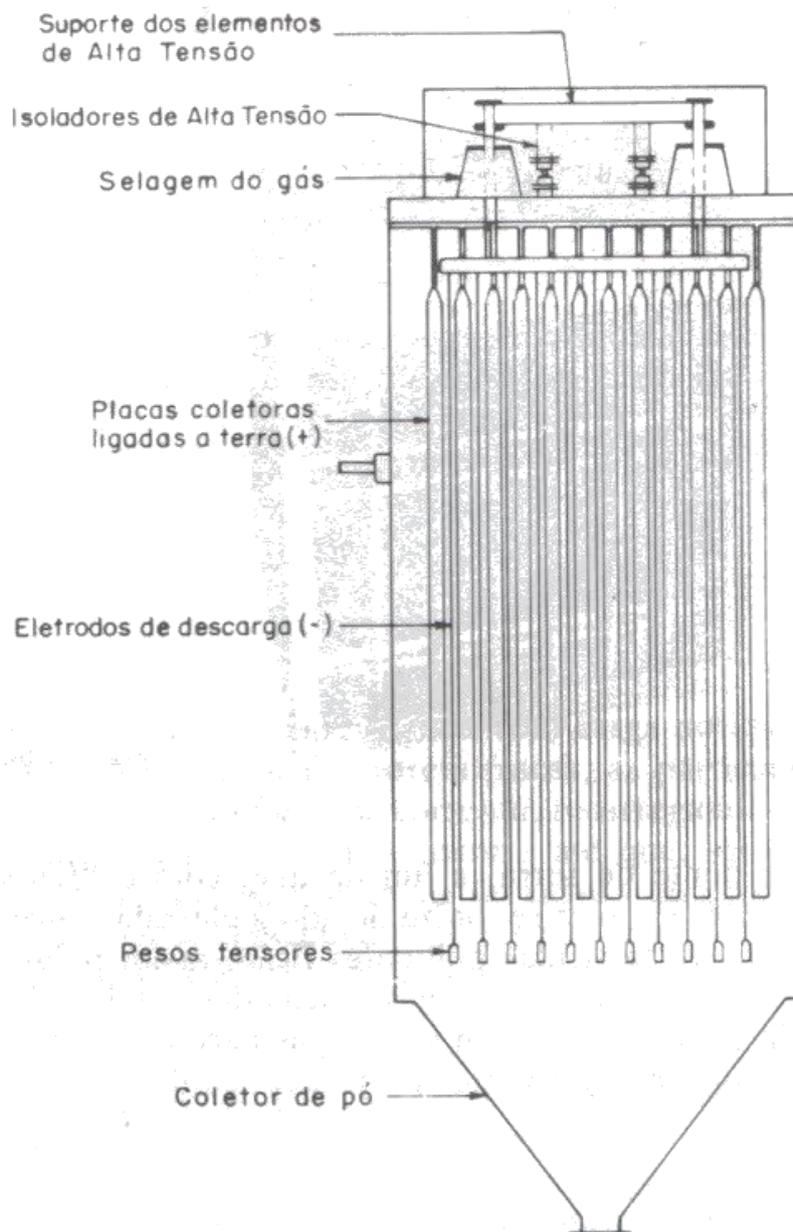


Figura 20 - Filtro Electroestático [11]

Quando em funcionamento, devido à elevada tensão, uma imensa quantidade de electrões saem do eléctrodo e bombardeiam as moléculas do gás próximas do mesmo. A potência deste bombardeamento faz com que se formem iões gasosos positivos e negativos que se deslocam para os eléctrodos de carga oposta por efeito do intenso campo eléctrico existente. Os iões positivos retornam ao eléctrodo negativo e recuperam os electrões perdidos, os iões gasosos negativos dirigem-se para a placa colectora ligada à terra (e por isso positiva em relação a estes). Este facto faz com que a passagem de gás fique “inundada” de iões gasosos negativos formando-se uma corrente de iões gasosos negativos entre os eléctrodos e a placa.

Inevitavelmente, devido ao número imenso de partículas gasosas, irá dar-se o choque das partículas, existentes no fluxo de ar poluído, com os iões gasosos negativos. Esse choque faz com que estas fiquem carregadas negativamente e sejam rapidamente atraídas em direcção às placas colectoras ficando aí presas e retidas por intensas forças electrostáticas. A camada de partículas que se vai acumulando na placa é, por efeito do seu peso, de vibradores ou outros, encaminhada para uma tremonha onde é acumulada e recolhida. Este tipo de separadores consegue a captação de partículas com dimensões até $0,1\mu\text{m}$ e têm uma perda de carga bastante baixa (2 a 13 mmca). É especialmente eficaz para o tratamento de partículas oleosas com boa condutividade eléctrica.

4.2.7. Selecção do Filtro Principal

Um estudo comparativo primário de todas as soluções possíveis, permite a elaboração da Tabela 6 onde estão expostas as principais vantagens e desvantagens do uso dos vários tipos de separadores.

Tabela 6 - Vantagens e Desvantagens separadores para filtro principal

Tipo de separador	Vantagens:	Desvantagens
Separador por Ultrassons	Boa eficiência de colecta (6µm) Permite colecta de materiais hidrocópicos	Falta de estudo em aplicações industriais correntes Projecto, construção e instalação difícil e caro Custos de instalação e de manutenção elevados
Filtros de Mangas	Boa eficiência p/ pequenas partículas (até 0,2µm) Projecto, construção e instalação simples Relativamente Compacto Baixo nível de manutenção	Necessita limpeza periódica Possibilidade de entupimento com grandes concentrações de pó e em pós hidrocópicos Perda de carga relativamente elevada
Colector Húmido	Boa eficiência p/ pequenas partículas (1µm) Projecto, construção e instalação relativamente simples Utilização em Elevadas concentrações de poluente Utilização em altas temperaturas	Sistema relativamente caro Transformação de um problema de tratamento de ar para um de tratamento de água
Filtro de Cartuchos	Alta eficiência p/ pequenas partículas (até 0,2µm) Projecto, construção e instalação simples Muito compacto Baixo nível de manutenção Equipamento económico	Entupimento com grandes concentrações de pó e em pós hidrocópicos Elemento filtrante mais frágil Necessita limpeza periódica Perda de carga relativamente elevada
Precipitadores Térmicos	Alta eficiência p/ pequenas partículas (melhora com a diminuição do tamanho das partículas) Perda de carga muito reduzida	Necessidade de materiais que aguentem altas temperaturas Custo de fabrico elevado Custo de operação e manutenção elevado
Filtros electroestáticos	Alta eficiência para partículas oleosas Alta eficiência p/ pequenas partículas (até 0,1µm) Baixo nível de operação e manutenção Perda de carga muito baixa Grandes caudais e elevadas temperaturas	Custo inicial elevado Pouco eficiente para fumos e partículas sólidas Espaço grande necessário

Tendo por base a tabela resumo supra exposta (Tabela 6) é possível desde logo colocar de parte quatro dos candidatos em análise, os separadores por ultrassons, os colectores húmidos, os precipitadores térmicos e os filtros electroestáticos.

Os separadores por ultrassons não se afiguram como uma boa solução, para esta aplicação, porque sendo uma solução com aplicação quase inexistente a nível industrial, os custos e o tempo de desenvolvimento de uma solução utilizando este mecanismo seriam bastante elevados, o que iria inflacionar o preço final do produto para números proibitivos. Já os colectores húmidos não se enquadram nesta aplicação por transformarem um problema de ar poluído num problema de águas residuais, o que não é o que se pretende de um produto, que se quer versátil e portátil. Quanto aos precipitadores térmicos são equipamentos com um custo inicial e de operação elevados, pelo que apenas se adequam para aplicações laboratoriais e de amostragem. No que diz respeito aos filtros electroestáticos, não são uma opção viável, porque, não têm a melhor eficiência para partículas sólidas secas que são o principal contaminante que se pretende captar.

Restam então duas possibilidades, os filtros de mangas e os filtros de cartuchos que importa comparar de forma a escolher a melhor opção. Tal como já foi referido, na descrição de cada tipo de equipamento, os filtros de mangas e de cartuchos funcionam segundo o mesmo princípio de separação, a crivagem, a grande diferença entre estes dois tipos de filtros reside na forma como o elemento filtrante (tecido) está disposto.

De uma forma geral sabe-se que um filtro de cartuchos, para a mesma área filtrante é muito mais compacto do que um filtro de mangas, porém, não permite taxas de trabalho tão elevadas. Dados indicativos facultados por fornecedores da Setimep referem que num filtro de mangas pode ser aplicada uma taxa de trabalho até $150 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ enquanto num filtro de cartuchos a taxa de trabalho não deve ir além dos $80 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$. Tal diferença, é explicável pelo facto de um filtro de cartuchos ter uma forma alhetada, é mais frágil do que o de mangas e tem tendência a colmatar com maior facilidade e por esse motivo é necessária uma maior área filtrante para o mesmo caudal. Para se perceber melhor a real diferença um simples cálculo pode ser feito.

Considerando o caudal pretendido para esta aplicação ($Q = 1500 \text{ m}^3/\text{h}$) a área filtrante ($A_{\text{filtrante}}$) mínima para cada tipo de filtro pode ser aferida através da expressão da taxa de trabalho (Tx):

$$Tx = \frac{Q}{A_{filtrante}} \quad (11)$$

Rearranjando-se a equação anterior para que fique em ordem da área filtrante é possível calcular a área filtrante mínima necessária para o caudal definido consoante se está a utilizar filtros de mangas ou de cartuchos obtendo-se os seguintes resultados:

$$A_{filtrante}(mangas) = \frac{Q}{Tx_{mangas}} = \frac{1500}{150} = 10m^2$$

$$A_{filtrante}(cartuchos) = \frac{1500}{80} \approx 18,8 m^2$$

Verifica-se que para não ultrapassar a taxa de trabalho (Tx) máxima permitida para cada caso a área filtrante mínima para os cartuchos é cerca do dobro da necessária para o caso das mangas.

Vendo as coisas apenas por este prisma, parece ser mais viável a utilização de um filtro de mangas do que de um filtro de cartuchos. No entanto, falta observar um aspecto de grande importância, a relação área filtrante/espço ocupado.

Consultando catálogos de fornecedores da Setimep tanto de mangas como de cartuchos é possível fazer um estudo de “Área filtrante Vs. Área ocupada” para o mesmo diâmetro do elemento filtrante, assim e tendo como base o estudo da melhor solução para esta aplicação foi feito uma análise comparativa que se encontra sumariado na tabela seguinte (Tabela 7).

Tabela 7 - Comparativo mangas vs. cartuchos

Tipo de filtro	Área filtrante necessária (m^2)	Área filtrante por elemento (m^2)	N.º de elementos necessário	Espço ocupado (m^3)
Mangas	10	0,61	6,1 → 7	0,74
Cartuchos	18,8	10	1,88 → 2	0,21

Conclui-se pois, que apesar de uma solução com filtros de cartuchos necessitar de cerca do dobro da área filtrante, a solução ocupa cerca de 4 vezes menos espaço. Para além disso, o volume ocupado (quase $1 m^3$) pela solução por filtro de mangas é sem dúvida inviável para utilização em equipamentos onde a mobilidade é um requisito essencial.

Assim sendo, e apesar dos filtros de cartuchos serem mais frágeis que os filtros de mangas, ocupam muito menos espaço e considerando que este sistema de aspiração é para uma utilização normal, isto é, para a colecta de partículas secas. A escolha entre filtros de mangas e filtros de cartuchos fica facilitada, pendendo claramente para os filtros de cartuchos.

O equipamento a utilizar como filtro principal será então um filtro de cartuchos, com a utilização de 2 cartuchos da marca Altair (fornecedor Setimep).

Na análise do catálogo (Anexo B, Figura 78 e Figura 79) decidiu-se que o melhor tecido filtrante para esta aplicação seria o tecido COL 270B TF que consiste num tecido de 100% poliéster com um revestimento em Teflon, a escolha deste tipo de tecido deve-se ao facto de ser o indicado para pós de cerâmica, de pedra, entre outros, o que faz deste tecido com mais abrangência de uso.

Visto que os filtros de cartuchos são um tipo de filtro que pode colmatar com alguma regularidade, torna-se necessário fazer a sua limpeza periódica, visto que quanto mais colmatado estiver o filtro, maior será a perda de carga, e perdendo-se consequentemente capacidade de captação. Segundo recomendação do fabricante, a melhor opção é a utilização de um circuito de ar comprimido tal como o exemplo que se encontra na figura abaixo (Figura 21).

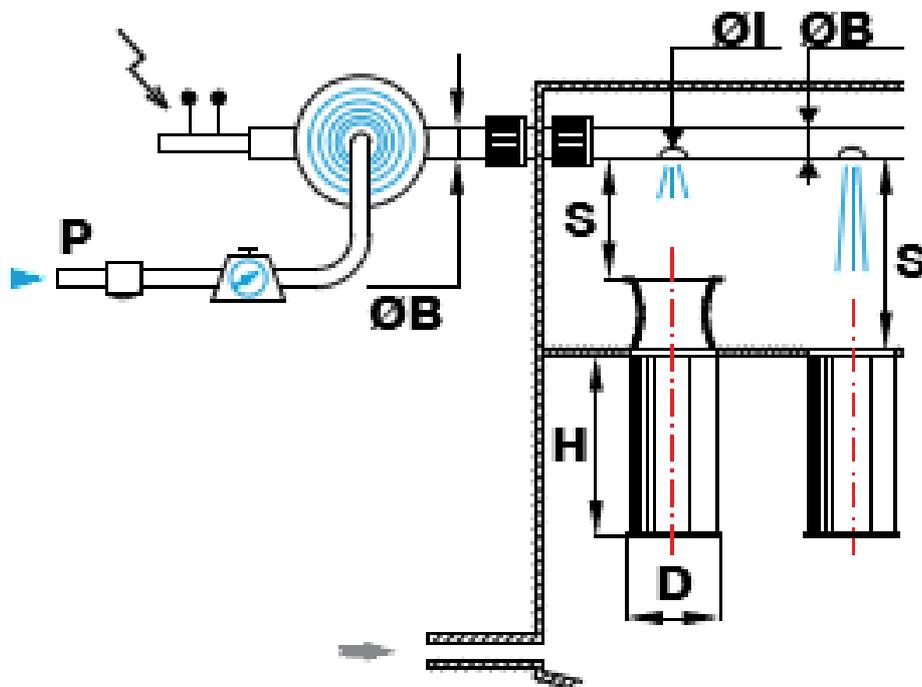


Figura 21 - Esquema tipo instalação de AC para limpeza de filtros [12]

O ar comprimido virá da rede da fábrica para um reservatório, que será incluído no sistema. O dimensionamento deste reservatório está relacionado com o ar necessário para criar a contra-pressão necessária para a descolmatagem do sistema. Segundo o fabricante, para que a limpeza dos dois filtros se efectue com eficácia são necessários 70 litros de ar à pressão atmosférica (1 bar). As redes de ar comprimido corrente são, regra geral, de pressão igual a 6bar. Pela lei dos gases ideais de Boyle-Mariote (transformação isotérmica) o volume ocupado pelo ar necessário à limpeza do filtro à pressão da rede pode ser dado pela seguinte expressão:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (12)$$

Tendo como entrada o volume de ar (V_1) à pressão ambiente (P_1) necessário para a limpeza do filtro, o volume ocupado por esta massa de ar (V_2) á pressão da rede (P_2) será de:

$$1 \cdot 87 = 6 \cdot V_2 (=) V_2 = \frac{70}{6} = 11,7 L$$

Com o intuito de fazer com que o equipamento não perca a sua mobilidade, decidiu-se aumentar o reservatório para o dobro da capacidade, permitindo desta forma (utilizando electroválvulas comandadas por um PLC) que sejam feitas duas limpezas em cada elemento filtrante sem necessidade de recorrer à rede. Por recomendação da ALTAIR (fabricante), o filtro não deve trabalhar com uma diferença de pressão superior a 200 mmca, pelo que será instalado um temporizador com um sensor que vai medir o diferencial de pressão entre as duas zonas do filtro e comandará a necessidade de limpeza do filtro (o que significa que o PLC será programado para disparar quando a diferença de pressão for superior à máxima recomendada pelo fabricante).

O período entre limpezas dependerá assim da utilização que se der ao equipamento.

4.3. Filtro Pré-Separador

O filtro pré-separador tem como principal objectivo a captação de partículas de maior dimensão ($> 100\mu\text{m}$). Desta forma o filtro principal fica protegido contra este tipo de partículas, que de outra forma o poderiam danificar diminuindo, de modo significativo, o seu tempo útil de vida. Ter. Para além de conseguir captar as partículas com o tamanho pretendido, o pré-separador deve ser:

- Compacto;
- Manutenção mínima;
- Sem consumíveis;
- Leve;
- Baixo custo.

Recorrendo, à Figura 22 e tendo como referência a necessidade de separação de pelo menos $100\mu\text{m}$, é possível fazer uma pré-selecção dos tipos de separadores de partículas adequados para servir de pré-separador.

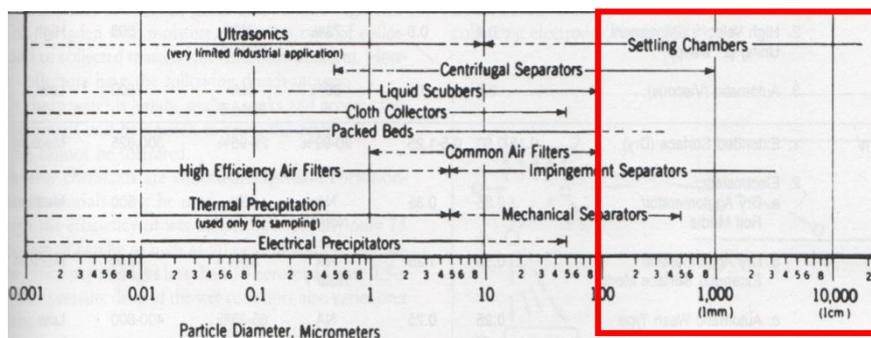


Figura 22 - Mecanismos de captação e recolha de partículas por tamanho [8]

Verifica-se a existência de 3 tipos de separadores indicados para a captação pretendida, as câmaras de sedimentação, separadores centrífugos (ciclones) e separadores por impacto ou choque.

Em primeira instância é importante perceber o modo de funcionamento de cada um destes tipos de separadores.

4.3.1. Câmaras de sedimentação

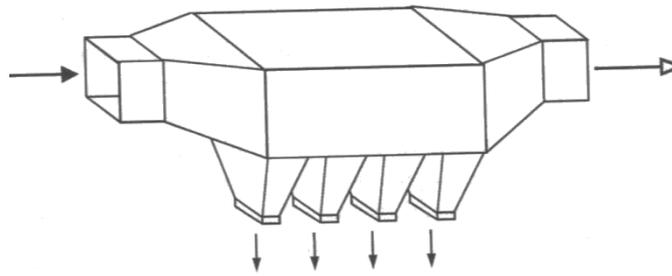


Figura 23 - Câmara de sedimentação [10]

Câmaras de sedimentação (Figura 23) são um tipo de separadores que utiliza a gravidade como método de separação das partículas do ar. De forma básica são constituídos por uma câmara longa que promove a desaceleração dos gases dando tempo às partículas de assentar no fundo. Na Figura 24 podem ser vistos alguns dos tipos mais comuns de câmaras de sedimentação, em a) está representado o Separador com câmara simples enquanto em b) o separador de câmara com gavetas e em c) o separador de câmara vertical.

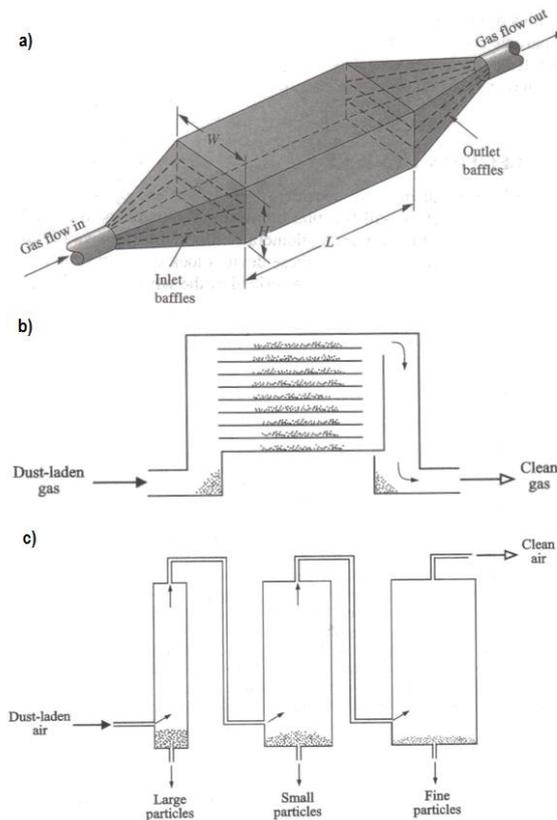


Figura 24 - Tipos de separadores de sedimentação [10] e [13]

O rendimento de uma câmara de sedimentação é função da superfície e independente, numa primeira aproximação, da sua altura. A velocidade na câmara está limitada para que, a velocidade do gás não alcance valores maiores que 3 m/s e seja evitada a reentrada das partículas colectadas no fluxo gasoso.

O rendimento de uma câmara de sedimentação aumenta com a diminuição da velocidade do gás, o que significa que é necessário uma câmara de sedimentação de dimensões consideráveis para se conseguir colectar partículas de pequenas dimensões.

Uma forma de aumentar a eficiência de uma câmara de sedimentação é através da adição de chicanas ou anteparos (Figura 25). Desta forma, a separação das partículas é feita, não só por gravidade, como também por impacto e inércia.

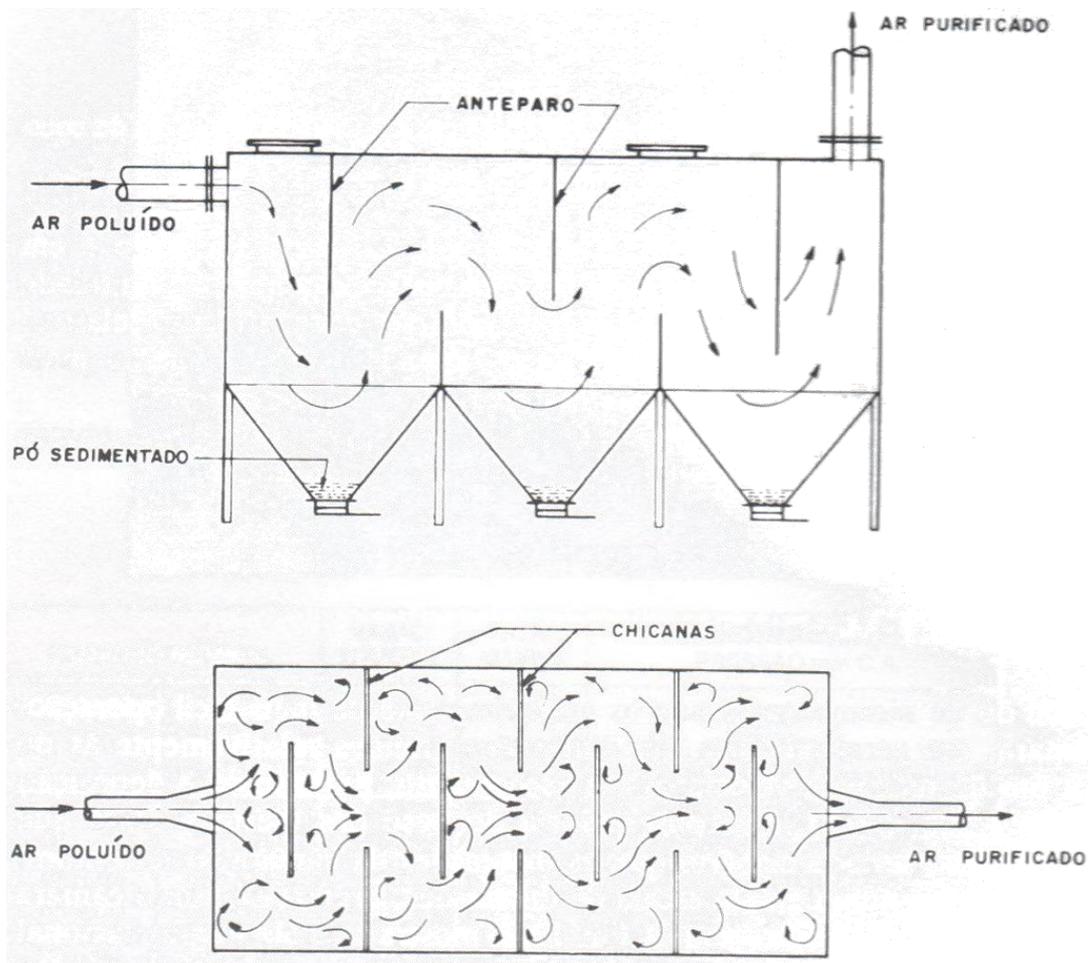


Figura 25 - Câmara de sedimentação com anteparos ou chicanas [11]

4.3.2. Separadores Centrífugos (ciclones)

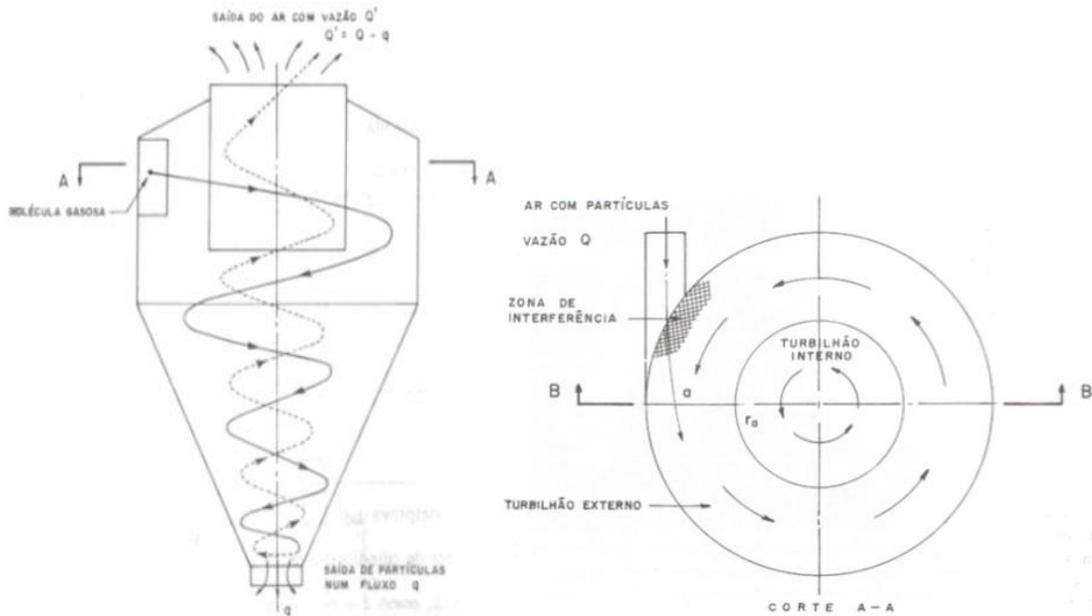


Figura 26 – representação de um Ciclone [11]

Os ciclones (Figura 26) são separadores que utilizam movimento rotativo como mecanismo de separação de partículas.

São constituídos por um cilindro onde a entrada do ar é feita tangencialmente em relação ao raio. Na parte inferior desse cilindro encontra-se um cone que promove a inversão do fluxo de gás de descendente para ascendente, saindo o gás por um cone interno existente na parte superior do ciclone.

O princípio de funcionamento é o seguinte: O fluxo gasoso, que entra tangencialmente no ciclone é forçado a descrever um movimento helicoidal de maneira a que a força centrífuga aplicada às partículas que viajam com o gás seja superior às forças de coesão e da gravidade (Figura 27).

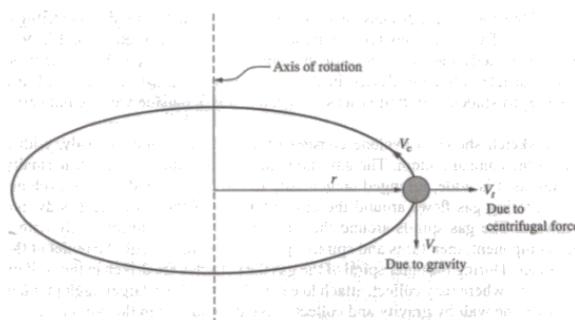


Figura 27 – Mecanismo princípio de separação do ciclone [13]

Assim que esta condição é atingida, as partículas são “arrastadas” (pela sua própria inércia) de encontro às paredes do ciclone, como o ar assume uma trajetória espiral descendente, as partículas sólidas são encaminhadas para a parte inferior do cone onde são captadas. O fluxo gasoso ao atingir o inferior do cone inicia um movimento helicoidal ascendente, chegando ao cilindro onde iniciou o escoamento e saindo pela boca superior do ciclone.

O factor fundamental para o bom funcionamento de um ciclone é o seu diâmetro, uma vez que a sua eficiência cresce inversamente deste. Como a perda de carga cresce com o quadrado da velocidade, existe um compromisso entre ambos os factores, que impede a diminuição do valor do diâmetro para valores que levariam a perdas de cargas proibitivas. Por esse motivo a velocidade de entrada no ciclone é geralmente na ordem dos 18-22 m/s. No entanto, o factor mais importante nas características da retenção de um ciclone são as propriedades do resíduo a separar sendo a mais importante o diâmetro da partícula. Em geral, pode-se afirmar que a eficiência de um ciclone aumenta com o diâmetro e a densidade da partícula; a velocidade dos gases; o comprimento do cone e o diâmetro de saída; diminuindo em função do aumento da viscosidade do gás e o diâmetro do corpo do ciclone. Um tipo de ciclone muito utilizado na prática são os multiciclones, estes são constituídos por um agrupamento de pequenos ciclones que trabalham em paralelo.

Apresentam algumas vantagens em relação aos ciclones convencionais: menor perda de carga para eficiências equivalentes, maior eficiência, menor custo, menor espaço necessário e melhor resistência à erosão. Os multiciclones apresentam eficiência muito alta e uma excelente qualidade de separação, devido aos pequenos diâmetros, perda de carga aceitável, conseguidos pelo elevado número de unidades que os compõem. Contudo, apresentam um problema sério que é o aumento da probabilidade de entupimento.

4.3.3. Separadores por impacto ou choque

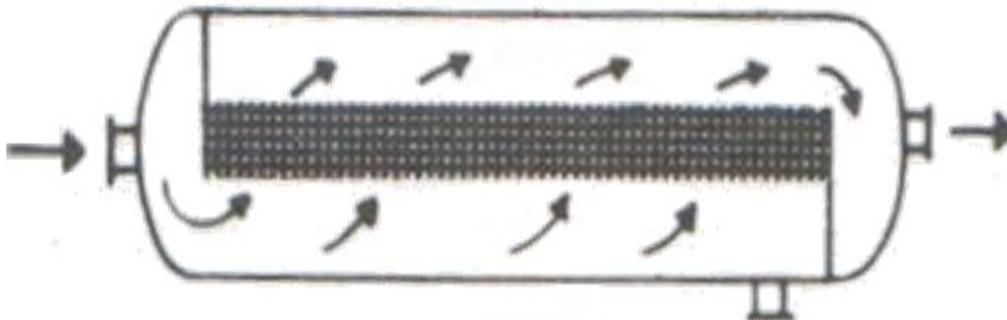


Figura 28 - Separador por impacto ou choque [11]

Os separadores por impacto (Figura 28) são separadores que usam o choque como mecanismo de separação. São constituídos por uma malha de fibras metálicas (como por exemplo malha de aço) com uma espessura de 100-150mm pela qual o ar é obrigado a passar e atravessar. Devido à aleatoriedade de distribuição das fibras metálicas o ar é submetido a inúmeras mudanças de direção, o que provoca o choque das partículas com as fibras metálicas levando à aglomeração das partículas. Assim, as partículas ficam retidas no filtro, o que implica que este tem de ser lavado ou substituído para manter a sua eficácia. Este tipo de separadores são maioritariamente utilizados na captura de partículas e fluidos oleosos. A sua utilização é desaconselhada para gases com grandes concentrações de poluentes, já que há risco de um entupimento rápido do separador.

4.3.4. Selecção do Pré-Separador

Um estudo comparativo primário de todas as soluções possíveis permite a elaboração da Tabela 8 onde estão expostas as principais vantagens e desvantagens do uso dos vários tipos de separadores que podem servir como pré-separador:

Tabela 8 - Vantagens e Desvantagens separadores para pré-filtro

Tipo de separador	Vantagens:	Desvantagens
Câmara de Sedimentação	Baixa perda de carga (10 a 25 mmca) Projecto, construção e instalação simples Baixo custo de instalação e de manutenção Limitação de temperatura apenas pelo material de construção Colecta a seco: permite recuperação mais fácil	Requer espaço grande para instalação Baixa eficiência p/ pequenas partículas (<40 µm)
Separadores Centrifugos (Ciclones)	Perda de carga média (80 a 180 mmca) Projecto, construção e instalação relativamente simples Limitação de temperatura apenas pelo material de construção Baixo custo de instalação e de manutenção Espaço relativamente pequeno para instalação	Baixa eficiência p/ pequenas partículas (<5 µm) Possibilidade de entupimento no caso de partículas adesivas ou higroscópicas Possibilidade de abrasão para determinadas partículas e determinada velocidade
Separadores por impacto ou choque	Boa eficiência p/ pequenas partículas (até 4µm) Projecto, construção e instalação relativamente simples Excelente para a captura de partículas oleosas Espaço relativamente pequeno para instalação	Necessita limpeza e lavagem periódicas Possibilidade de entupimento com grandes concentrações de pó Necessita de substituição periódica da malha

Numa primeira análise é possível, logo à partida, eliminar um dos tipos de separadores de partículas anteriormente descritos, o separador por impacto ou choque. Os motivos que levam a esta decisão são essencialmente o facto de este ser um tipo de separador que necessita de limpeza regular ou substituição, para além de ser mais adequado para partículas oleosas e haver um risco substancial de entupimento do sistema pelo que, este separador não é certamente o mais adequado para este tipo de aplicação.

Restam então as câmaras de sedimentação e os ciclones.

Câmara de Sedimentação

Existem dois modelos distintos para o dimensionamento de Câmaras de Sedimentação (Figura 29). Um que assume que as partículas viajam com o fluxo gasoso como um bloco (denominado de fluxo em bloco) e outro que assume que as partículas viajam totalmente misturadas no fluxo gasoso (denominado fluxo em mistura).

Quer considerando um ou outro modelo, sabe-se que a velocidade média horizontal ($U_{média}$) do gás na câmara por ser obtida utilizando a equação (1), ou seja, em função do caudal Q e da Área de secção da câmara (dimensões L e H da Figura 29):

$$U_{média} = \frac{Q}{L \cdot H}$$

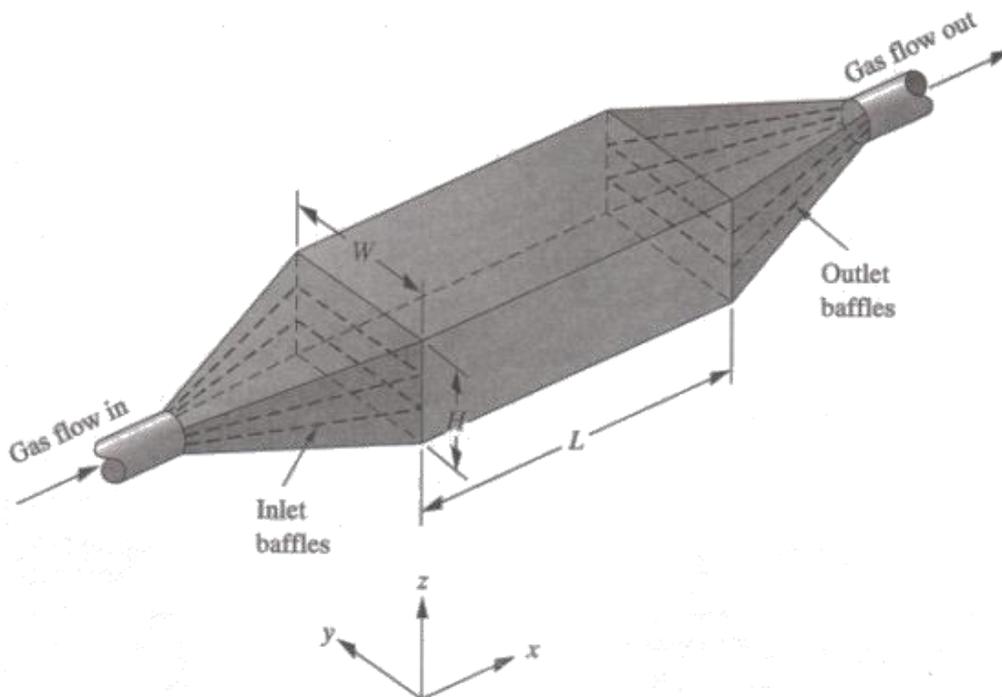


Figura 29 - Esquema de uma câmara de sedimentação tipo [13]

No caso do modelo de fluxo em bloco deve-se assumir que:

1. A velocidade horizontal na câmara é igual à $U_{média}$ em toda a câmara;
2. A componente horizontal da velocidade das partículas é sempre igual à $U_{média}$;
3. A componente vertical da velocidade das partículas é sempre igual à sua velocidade terminal de assentamento devida à gravidade (U_t);
4. Se a partícula assentar no fundo, não torna a reentrar no fluxo.

Com estas condições é possível prever o comportamento de uma câmara de sedimentação de acordo com o modelo de fluxo em bloco.

Considere-se que uma dada partícula entra na câmara a uma determinada distância (h) do fundo, o período de tempo (t) que o gás demora a atravessar a câmara na direcção do fluxo (dimensão L da Figura 29) pode ser dado pela seguinte função:

$$t = \frac{L}{U_{média}} \quad (13)$$

Durante esse período de tempo a partícula descerá uma distância vertical (distância vertical de assentamento) de:

$$\text{Distância Vertical de assentamento} = t \cdot U_t = U_t \cdot \frac{L}{U_{média}} \quad (14)$$

Se a distância for maior ou igual a h (distância inicial ao solo), a partícula vai chegar ao fundo e vai ser captada. Se todas as partículas forem do mesmo tamanho, o que significaria terem todas a mesma U_t , existe uma distância ao solo (h) à entrada da câmara abaixo da qual todas as partículas desse tamanho são capturadas na câmara e acima da qual nenhuma é capturada.

Se for assumido que todas as partículas são do mesmo tamanho, que a sua distribuição é uniforme ao longo de toda a entrada da câmara e que as partículas não interagem umas com as outras, então é possível dizer que a fracção de partículas colectadas (η), ou seja, o rendimento da câmara, é dado por:

$$\text{Fracção capturada} = \eta = \frac{L \cdot U_t}{H \cdot U_{média}} \quad (15)$$

Considerando que o escoamento se considera como sendo um escoamento segundo a Lei de Stokes (Anexo C) e para que se tenha em consideração a influência do tamanho da partícula a velocidade terminal de assentamento (U_t) é substituída pela relação de assentamento por gravidade da Lei de Stokes, o que substituindo na equação (15) dá:

$$\eta = \frac{L \cdot g \cdot D_{part}^2 \cdot \rho_{part}}{H \cdot U_{média} \cdot 18 \cdot \mu_{ar}} \quad (16)$$

Em que:

g = Aceleração da gravidade (m/s^2)

ρ_{part} = Peso específico da partícula (kg/m^3)

D_{part} = Diâmetro da partícula (m)

μ_{ar} = Viscosidade dinâmica do ar ($N.s/m^2$)

Considerando agora o modelo de fluxo em mistura, assume-se que o fluxo de gás está totalmente misturado no eixo z e não misturado no eixo x (ver Figura 29). Isto porque a mistura na direcção x tem um efeito quase nulo na eficiência de captação.

Considera-se agora uma secção da câmara de sedimentação com um comprimento dx . Nesta secção a fracção de partículas (η) que passam e que chegam ao solo será igual à distância vertical que a partícula cai por efeito da gravidade dividida pela altura da secção, o que pode ser escrito como:

$$\text{Fracção colectada} = \eta = \frac{U_t \cdot dx}{H} \quad (17)$$

A alteração da concentração (c) de partículas que passa pela secção (d_c) é:

$$d_c = -c \cdot \eta = -\frac{c \cdot U_t \cdot dx}{H} \quad (18)$$

O tempo (d_t) que em média a partícula passa nesta secção é de:

$$d_t = \frac{dx}{U_{média}} \quad (19)$$

Pela combinação das duas equações anteriores obtém-se:

$$\frac{d_c}{c} = -\frac{U_t}{H \cdot U_{média}} \cdot dx \quad (20)$$

O que pode ser integrado desde a entrada ($x = 0$) até à saída ($x = L$) da câmara, o que resulta em:

$$\ln \frac{c_{out}}{c_{in}} = -\frac{U_t \cdot L}{H \cdot U_{média}} \quad (21)$$

Ou,

$$\eta = 1 - \left(\frac{c_{out}}{c_{in}} \right) = 1 - e^{-\left(\frac{U_t \cdot L}{H \cdot U_{média}} \right)} \quad (22)$$

Finalmente e considerando mais uma vez que se trata de um escoamento segundo a lei de Stokes obtém-se:

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{L \cdot g \cdot D^2 \cdot \rho_{particula}}{H \cdot U_{média} \cdot 18 \cdot \mu_{fluido}} \right)} \quad (23)$$

Comparando o resultado obtido com o obtido na assunção de fluxo em bloco, verifica-se que a equação anterior se pode reescrever como:

$$\eta_{fluxo\ em\ mistura} = 1 - e^{-(\eta_{fluxo\ em\ bloco})} \quad (24)$$

No caso partículas de pequena dimensão (<10µm) os dois modelos dão respostas similares em termos de eficiência. Já para partículas de maior dimensão as diferenças tornam-se maiores e os dois modelos dão respostas diferentes.

Imaginando por hipótese a separação de partículas pó de pedra com uma densidade 1600 kg/ m³ e um diâmetro típico de 100µm e aplicando, com o auxílio do Excel, as equações acima descritas para o cálculo, das dimensões necessárias para a câmara separar as partículas do ar verificou-se que, para a obtenção de uma percentagem de 100% de captação (segundo o modelo fluxo em bloco) será necessária uma câmara de 950mm de comprimento por 950mm de largura (Tabela 9). De ressaltar que a câmara poderá ter outra proporção que não um cubo mas o comprimento e a largura fazem variar na mesma proporção o diâmetro de partículas que é possível colectar.

Tabela 9 - Rendimento de uma câmara de sedimentação de 950x950mm

Ø Partículas (µm)	η Fluxo em bloco	η Fluxo em mistura
1	0%	0%
10	1%	1%
20	4%	4%
30	9%	9%
40	17%	15%
50	26%	23%
60	38%	31%
70	51%	40%
80	67%	49%
90	85%	57%
100	100%	65%
120	-	78%
140	-	87%
150	-	91%

Este facto permite concluir que está solução não é viável, já que as dimensões necessárias para que a câmara possa cumprir o seu serviço são demasiado elevadas para um equipamento que se quer móvel e compacto. Esta situação seria ainda mais agravada para o caso de partículas com densidades e/ou diâmetros menores.

Ciclone

No dimensionamento de ciclones podem ser considerados, tal como no caso das câmaras de sedimentação, dois modelos, fluxo em bloco e fluxo em mistura.

Como se referiu acima, os ciclones utilizam o movimento rotativo, isto é a força centrífuga, como método de separação das partículas. Esta pseudo-força não é mais do que o resultado da inércia do corpo que faz com que a partícula queira seguir em frente ao mesmo tempo que outras forças a fazem mover numa trajectória curva.

Se um corpo se move numa trajectória circular de raio r com uma velocidade linear U_c , então a sua velocidade angular w será:

$$w = \frac{U_c}{r} \quad (25)$$

E a força centrífuga (F_c) pode ser dada pela seguinte equação:

$$F_c = \frac{m \cdot U_c^2}{r} = m \cdot w^2 \cdot r \quad (26)$$

Para a formulação do problema é necessário usar a equivalente centrífuga da Lei de Stokes. A Lei de Stokes pode ser obtida formulando a força de arrasto que é igual à força gravitacional menos a força de flutuação. Normalmente, esta força de flutuação, pode ser desprezada por ser muito pequena. Para se obter a equivalente centrífuga é apenas necessário substituir a força gravitacional pela centrífuga (ou a aceleração gravitacional pela centrífuga, já que a massa é a mesma).

Efectuar isto, causa um problema, porque passa a haver duas velocidades diferentes na equação. A melhor forma de evitar confusões, é designar a velocidade de assentamento de U_t e a velocidade ao longo da trajectória circular de U_c .

Observando a Figura 27 é possível ver as forças que estão em jogo quando um corpo descreve uma trajectória curva. Como se vê pela figura, existem duas velocidades de assentamento, uma devida à força centrífuga e outra devida à força gravitacional. No entanto, e como a força centrífuga é cerca de 100x superior à gravitacional, a velocidade de assentamento devida à força gravítica pode ser ignorada.

A velocidade de assentamento U_t vai ser então a velocidade na direcção radial do movimento da partícula. Substituindo os elementos referidos acima na Lei de Stokes obtém-se a seguinte equação:

$$U_t = \frac{U_c^2 \cdot D^2 \cdot \rho_{particula}}{18 \cdot \mu_{fluido} \cdot r} \quad (27)$$

Na Figura 30 é possível ver um exemplo de um ciclone com as suas medidas tipo:

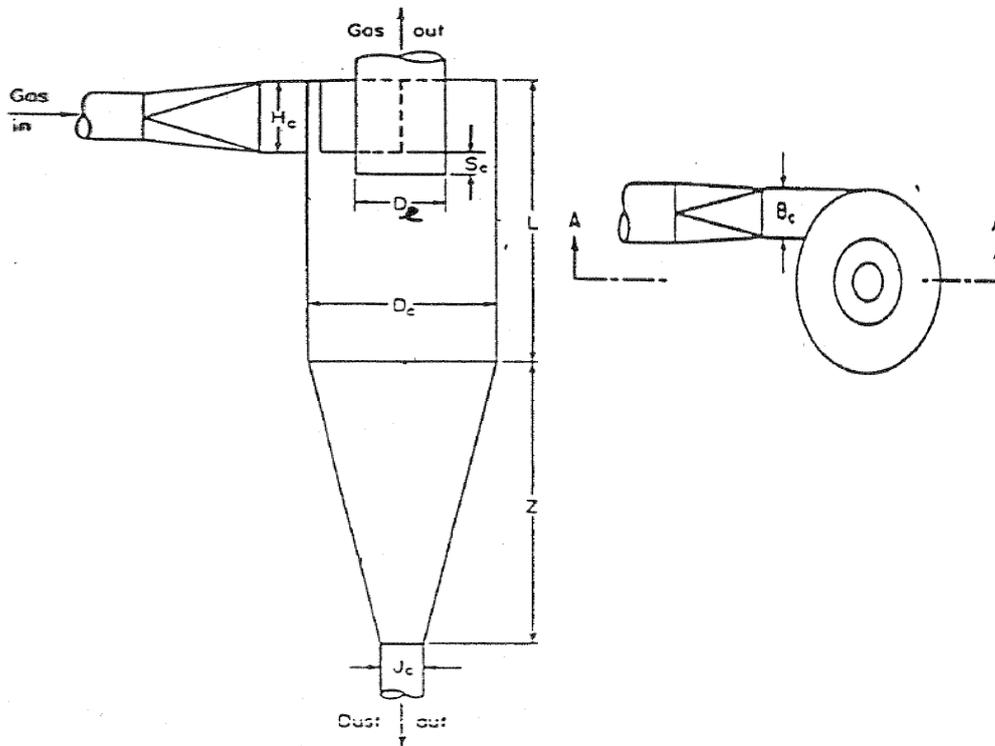


Figura 30 - Ilustração de um ciclone [14]

Os ciclones já foram objecto de inúmeros estudos sobre a sua geometria e proporção das suas medidas de forma a aumentar ao máximo a sua eficiência. Destes estudos resultaram as proporções que melhoram a eficiência dos ciclones, tendo como ponto de partida o seu diâmetro (D_c) apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Tabela de medidas de um ciclone

Dimensões (Figura 30)	Ciclones de Eficiência Padrão	Ciclones de Alta Eficiência
D_c	1	1
B_c	$D_c \cdot 0,375$	$D_c/4$
D_e	$D_c \cdot 0,75$	$D_c/2$
H_c	$D_c \cdot 0,75$	$D_c/2$
L_c	$D_c \cdot 2$	$D_c \cdot 2$
S_c	$D_c/8$	$D_c/8$
Z_c	$D_c \cdot 2$	$D_c \cdot 2$
J_c	$D_c/4$	$D_c/4$

De realçar que apesar de os ciclones de alta eficiência terem uma melhor eficácia de separação também induzem uma maior perda de carga, pelo que não é de descartar a utilização de um ciclone de eficiência padrão ao invés de um de alta eficiência.

A largura da conduta (B_c) à entrada do ciclone será a distância máxima que uma qualquer partícula terá de percorrer até chegar à parede (equivalente a H nas equações da câmara de sedimentação). O comprimento de fluxo gasoso (L) que atravessa o ciclone é dado pela seguinte equação:

$$L = N \cdot \pi \cdot D_c \quad (28)$$

Em que N é o numero de voltas que o gás dá antes de chegar à zona do cone e é um valor empírico. Experimentalmente foi determinado que o gás dá entre 5 a 10 voltas antes de entrar na zona cónica.

Este comprimento L é o equivalente do L das equações da câmara de sedimentação. Substituindo-se directamente das equações da câmara de sedimentação obtém-se as seguintes expressões:

Para fluxo em bloco temos:

$$\eta = \frac{N \cdot \pi \cdot D_c \cdot U_t}{B_c \cdot U_c} \quad (29)$$

Para fluxo em mistura temos:

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{N \cdot \pi \cdot D_c \cdot U_t}{B_c \cdot U_c}\right)} \quad (30)$$

O que substituindo na Lei de Stokes Centrifuga dá que:

Para fluxo em bloco:

$$\eta = \frac{N \cdot \pi \cdot U_c \cdot D^2 \cdot \rho_{particula}}{9 \cdot B_c \cdot \mu_{fluido}} \quad (31)$$

Para fluxo em mistura:

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{N \cdot \pi \cdot U_c \cdot D^2 \cdot \rho_{particula}}{9 \cdot B_c \cdot \mu_{fluido}}\right)} \quad (32)$$

Uma estimativa da perda de carga no ciclone pode ser calculada com recurso à seguinte expressão:

$$\Delta H_{ciclone} = \rho_{gás} \cdot U_c^2 \cdot \left(2 \cdot \frac{D_c}{D_e} - 1 \right) + \rho_{gás} \cdot U_e^2 \quad (33)$$

Em que:

g = Aceleração da gravidade (m/s^2)

D_{part} = Diâmetro da partícula (m)

ρ_{part} = Peso específico da partícula (kg/m^3)

μ_{ar} = Viscosidade dinâmica do ar ($N.s/m^2$)

Tal como já foi referido acima, a velocidade de entrada no ciclone (U_i), para que este tenha uma boa eficiência, tem de ser na ordem dos 18-22 m/s e a perda de carga característica para ciclones é de 80-150 mmca. Procedeu-se então ao cálculo do ciclone ideal para esta aplicação tendo presente não só o objectivo do tamanho mínimo de partículas a separar ($100\mu m$) como também uma grande preocupação com a ocupação do menor espaço possível. Para tal utilizou-se a ferramenta de cálculo Excel, sendo dimensionado o ciclone com as dimensões ideais para esta aplicação em particular.

Verificou-se que a melhor solução seria a utilização não de um, mas sim de dois ciclones de eficiência padrão em paralelo, visto ser esta a solução que melhor se adequa a esta aplicação.

A velocidade de entrada no ciclone (U_i) é de 19 m/s e a perda de carga no ciclone ($\Delta H_{ciclone}$) é de 140.5 mmca.

Na tabela abaixo (Tabela 11) estão resumidas as características geométricas do ciclone.

Tabela 11 - Dimensões do Ciclone seleccionado

Dimensões Ciclone (mm)	
D_c	200
B_c	75
D_e	150
H_c	150
L_c	400
S_c	25
Z_c	400
J_c	50

Já na Tabela 12, está demonstrado o rendimento esperado com a utilização de dois ciclones em paralelo com as dimensões indicadas na tabela acima (Tabela 11).

Tabela 12 - Rendimento do Ciclone

Dpart (μm)	η bloco	η mistura
2	15%	14%
4	61%	46%
6	100%	75%
8	100%	91%
10	100%	98%
12	100%	100%
14	100%	100%
16	100%	100%
18	100%	100%
20	100%	100%
40	100%	100%
60	100%	100%
80	100%	100%
100	100%	100%

Como se pode verificar com dois ciclones em paralelo, é possível obter uma solução compacta (o conjunto tem dimensões aproximadas de 400x200x800mm) com uma eficiência de cerca de 10x melhor que o necessário já que, em termos teóricos este conjunto conseguirá, com um rendimento de 100% captar partículas a partir de 12 μm , quando o mínimo seria de 100 μm . Desta forma, obtém-se uma protecção mais eficiente ao filtro principal, levando a uma maior durabilidade deste, isto tudo com uma perda de carga aceitável tendo em conta o tipo de equipamento.

4.4. Filtro remoção de odores

O filtro de remoção de odores destina-se, tal como o seu nome evidencia, a remover os odores do ar retirando-lhe os produtos químicos gasosos nocivos.

O tipo de filtro de remoção de odores mais utilizado é o de carvão activo (Figura 31), pela sua eficácia, versatilidade, disponibilidade e preço bastante competitivo.



Figura 31 - Carvão Activo [15]

O carvão activo tem essencialmente dois constituintes, o carvão vegetal e carbono activo, o seu processo de fabrico consiste em duas fases, carbonização e activação, na primeira (carbonização), materiais ricos em carbono, tais como a casca de coco, cascas de frutos secos, madeira, etc. são secos e carbonizados de forma a separar o carbono dos restantes tipos de materiais, a carbonização ocorre a uma temperatura 400-600 °C numa atmosfera pobre em oxigénio de forma a restringir a combustão.

Depois desta fase, as partículas são activadas. Esta activação ocorre pela exposição das partículas carbonizadas a um agente activador tal como vapor a alta temperatura. O vapor faz com que a estrutura destas passe para uma estrutura tipo grafite tridimensional altamente porosa (Figura 32).

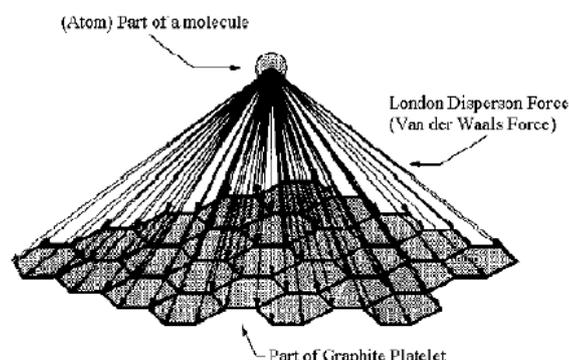


Figura 32 - Estrutura tipo do carvão activo [16]

O tamanho dos poros é função do tempo que as partículas são expostas ao vapor, longos tempos de exposição resultam em poros maiores.

Os filtros de carvão activo funcionam por adsorção que é um fenómeno de adesão, da qual resulta a acumulação de uma substância gasosa ou dissolvida na superfície de um corpo, tipicamente uma superfície constituída por um material poroso, neste caso, carvão activo. Quando as moléculas da substância são fixadas, libertam energia, ou seja, a adsorção é um processo exotérmico. A diferença entre absorção e adsorção reside no facto de que na absorção as impurezas misturam-se com o absorvente formando uma solução enquanto na adsorção as impurezas ficam retidas na superfície do absorvente, neste caso, do carvão activo.

O uso do carvão activo é muito amplo, quase universal, são exemplos de utilização de carvão activo os seguintes: Fornos rotativos; recuperação de gases; recuperação de solventes; purificação do ar; respiradores industriais; descoloração de produtos químicos industriais de incineração; tratamento de gases de combustão; H₂S; dioxinas; odor dos cigarros; tratamento de águas residuais; tratamento de água potável; entre outros.

Após consulta de fornecedores de carvão activo, verificou-se, visto não se saber o tipo de partículas que se pretende tratar, que a melhor opção seria a utilização de uma mistura contendo não só carvão activo como também BI-ON (Constituído por permanganato de potássio), a utilização desta mistura tem, segundo o fornecedor, as seguintes vantagens:

- O carvão activo é muito eficiente a adsorver componentes com elevado peso molecular;
- O BI-ON+ é bastante eficaz para componentes com baixo peso molecular;
- Perda de carga muito reduzida;
- BI-ON+ tem um largo espectro de acção;
- Como a densidade do BI-ON+ é muito maior do que a do carvão activo, necessita de menos volume, ou seja, é mais compacto.

Tenda em conta o caudal Q definido de projecto o fornecedor recomenda a utilização de um mínimo 5 kg deste produto.

4.5. Ventilador

Um ventilador (Figura 33) é uma turbomáquina que se destina a produzir o deslocamento de gases. Consiste num rotor dotado de pás adequadas que é accionado por um motor (regra geral eléctrico). A rotação do conjunto rotor + pás promove a transformação da energia mecânica, proveniente do motor nas formas de energia que um fluido é capaz de assumir, isto é, em energia potencial de pressão e energia cinética.



Figura 33 - Exemplo de ventiladores

Graças à energia adquirida, o fluido torna-se capaz de escoar em condutas, vencendo as resistências ao seu deslocamento (perdas de carga), proporcionando o caudal desejado para a finalidade que se tem em vista. Um ventilador é estudado como uma máquina de fluido incompressível, visto que o grau de compressão que se verifica neste é tão reduzido que pode ser desprezado. Os ventiladores podem ser classificados de várias formas, sendo as mais correntes:

- a) Segundo o nível energético de pressão que produzem, podem ser de:
- Baixa pressão – Pressão efectiva até 200 mmca;
 - Média pressão – Pressão efectiva de 200 a 800mmca;
 - Alta pressão – Pressão efectiva de 800 a 2500mmca;
 - Muito alta pressão – Pressão efectiva de 2500 a 10000mmca.

b) Segundo a modalidade construtiva, podem ser:

- Centrífugos – As partículas gasosas descrevem uma trajetória normal ao eixo do ventilador, isto é, em espiral. (Figura 34 a)). Fornecem pressão estática em função do caudal movimentado;
- Hélico-Centrífugos – As partículas gasosas descrevem uma trajetória helicoidal. (Figura 34 b) e c)).
- Axiais – As partículas gasosas descrevem uma trajetória paralela ao eixo do ventilador. (Figura 34 d)). Trabalham com diferenças de pressão nulas ou baixas;

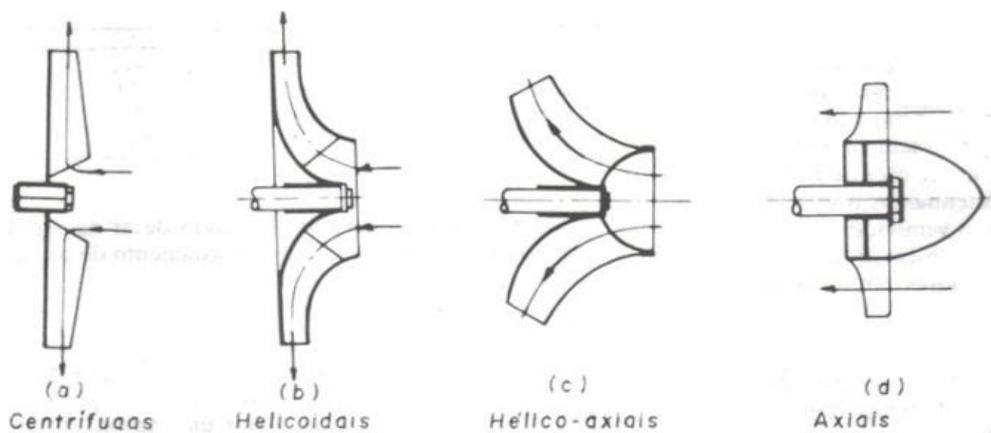


Figura 34 - Ventiladores por tipo de construção [11]

c) Segundo a forma das pás:

- Pás radiais rectas – É Robusto, movimenta grandes cargas de partículas, ideal para trabalho pesado e tem rendimento baixo. (Figura 35 a));
- Pás inclinadas para trás, curvas – É usado para gases limpos, silencioso, potência autolimitada, consegue altas pressões e tem bom rendimento. (Figura 35 b));
- Pás inclinadas para a frente, curvas – Consegue altas pressões e tem bom rendimento. (Figura 35 c));
- Pás curvas de saída radial – Consegue altas pressões e caudais elevados. (Figura 35 d));
- Pás inclinadas para trás, planas – É usado para gases limpos ou com baixa concentração de partículas, consegue médias pressões. (Figura 35 e)).



Figura 35 - Ventiladores por tipo de forma de pás [11]

- d) Segundo o n.º de entradas de aspiração no rotor:
- Entrada unilateral ou simples aspiração;
 - Entrada bilateral ou dupla aspiração.
- e) Segundo o n.º de rotores:
- De estágio simples – Com um rotor apenas (É o caso mais usual);
 - De estágio duplo – com dois rotores montados no mesmo eixo (O ar entra no 2.º estágio com a energia recebida no 1.º rotor e recebe a do 2.º conseguindo-se assim pressões mais elevadas.

Existem certas grandezas no funcionamento e comportamento de ventiladores que são de grande importância, pois é da combinação adequada das mesmas que se consegue escolher adequadamente o tipo de ventilador certo para o serviço pretendido.

Estas grandezas, cujo estudo teórico se encontra no Anexo D, por caracterizarem as condições de funcionamento, são denominadas por *características* e são as seguintes:

- a) Velocidade de rotação do ventilador, n (rpm ou rad/s);
- b) Diâmetro de saída do rotor, d_2 ;
- c) Caudal, Q ;
- d) Altura de elevação (energia de pressão), H (útil, manométrica e motriz);
- e) Potências; P (útil, total de elevação e motriz);
- f) Rendimentos, η (hidráulico, mecânico e total).

As equações disponíveis para estudar a interdependência entre estas grandezas não permitem a realização de um estudo baseado em considerações puramente teóricas. No estudo de ventiladores o usual é recorrer a ensaios laboratoriais que permitem estatisticamente exprimir a variação de uma grandeza em função de outra.

Com os valores obtidos experimentalmente os fabricantes elaboram tabelas e gráficos com o comportamento dos ventiladores em função da variação das grandezas representadas.

As curvas que traduzem a dependência entre duas das grandezas, uma vez fixadas as demais, denominam-se por *curvas características*.

As mais importantes são:

- Para um valor constante de n : Variação de H , P_m e η em função de Q ;
- Variação de H , Q , P_m em função de n ;
- Curvas de igual rendimento no campo das grandezas Q e H .

4.5.1. Seleção do Ventilador

No que diz respeito ao dimensionamento do ventilador, e visto que já se encontra definido o caudal ($Q = 1500 \text{ m}^3/h$) é necessário calcular a perda de carga ao longo do sistema, ou seja, a energia que o ventilador precisa transferir ao ar para que este vença todos os “acidentes” ao longo do sistema. Foram previamente calculadas as perdas de carga nos principais elementos que compõem sistema (hotte de entrada, ao longo do tubo flexível, nos ciclones e no filtro principal), pelo que resta então calcular as perdas nas condutas de ligação entre os vários elementos.

Por observação da figura abaixo (Figura 36), que é uma representação simples do sistema de aspiração que se quer implementar é possível fazer o levantamento dos elementos cuja perda de carga se pretende calcular.



Figura 36 - Representação do sistema de aspiração

Calculando passo a passo a perda de carga e começando por fazer um levantamento de todos os elementos de conduta utilizados e expondo-os sob a forma de tabela (Tabela 13) temos:

Tabela 13 - Elementos de ligação entre o tubo flexível e os ciclones

N.º	Elemento:	Dimensões:
Tubo Flexível → Ciclones		
1	Troço recto redondo	Ø=160mm e ≈L100mm
2	Entrada curva	Ø=160mm para 170x170mm
3	Curva a 90º redonda conduta quadrada	Raio de curvatura=170mm e L=170mm
4	Redução quadrangular	170x170mm para 100x100mm e L=50mm
Ciclones → Filtro de cartuchos		
5	Troço recto rectangular	460x60mm e L=203mm
6	Troço recto rectangular	460x60mm e L=100mm
7	Troço recto rectangular	460x60mm p e L=779mm
8	Entrada câmara do filtro	4xAberturas de 460x50mm
Filtro de cartuchos → Ventilador		
9	Troço recto rectangular	1200x100mm e L≈650mm

No cálculo de todos os elementos de condutas foram utilizados os gráficos e tabelas de perda de carga do manual de dimensionamento de condutas de ventilação do SMACNA que se encontram no Anexo E.

Utilizando a tabela 14.6 que mostra a perda de carga por metro de conduta é possível calcular a perda de carga no elemento 1 (ΔH_1) tendo como entradas da tabela o Caudal ($Q=1500 \text{ m}^3/\text{h}$), a velocidade do escoamento ($U=20,72 \text{ m/s}$) e o diâmetro da conduta (160mm). O valor obtido é o seguinte:

$$\Delta H_1 = 29 \text{ Pa/m}$$

Tendo a conduta um comprimento de 100mm obtém-se uma perda de carga no elemento n.º1 de:

$$\Delta H_1 = 29 \cdot 0,100 = 2,9 \text{ Pa} = 0,29 \text{ mmca}$$

Recorrendo às tabelas respectivas e por métodos análogos ao agora apresentado foram calculas as respectivas perdas de cargas dos restantes elementos.

Com as perdas de cargas dos elementos calculadas é apenas necessário proceder à soma destas para se conhecer a perda de carga no sistema (ΔH_{total}). O resultado dos vários cálculos de perda de carga assim como a perda de carga total encontram-se expostos na Tabela 14.

Tabela 14 - Tabela de perda de carga do sistema

Perda de carga nos elementos principais		
N.º	Elemento:	Perda de Carga
1	Hotte de entrada	1,24 mmca
2	Tubo Flexível	30,2 mmca
3	Ciclones	140,5mmca
4	Filtro de cartuchos	120 mmca
Perda de carga nos elementos de ligação		
N.º	Elemento:	Perda de Carga
Tubo Flexível → Ciclones		
1	Troço recto redondo	0,29 mmca
2	Entrada curva	0,62 mmca
3	Curva a 90º redonda conduta quadrada	0,44 mmca
4	Redução quadrangular	1,13 mmca
Ciclones → Filtro de cartuchos		
5	Troço recto rectangular	0,81 mmca
6	Troço recto rectangular	0,53 mmca
7	Troço recto rectangular	3,12 mmca
8	Entrada câmara do filtro	0,003 mmca
Filtro de cartuchos → Ventilador		
9	Troço recto rectangular	0,002 mmca
Perda de Carga TOTAL		298.9 mmca

Ora, visto que a perda de carga total (ΔH_{total}) é de 289,9 mmca podemos afirmar que o ventilador necessário para esta aplicação é um de média pressão.

Segundo recomendação do fabricante (FlaktWoods) o tipo de ventilador recomendado para a nossa aplicação é um ventilador centrífugo.

Após análise dos vários tipos de montagem existentes, verificou-se que a mais adequada seria a do tipo 4, que consiste num acoplamento directo da turbina ao motor permitindo desta forma, um nível de manutenção mínimo e dimensões gerais do ventilador reduzidas ao máximo. Um esquema deste tipo de montagem pode ser observado na Figura 37.

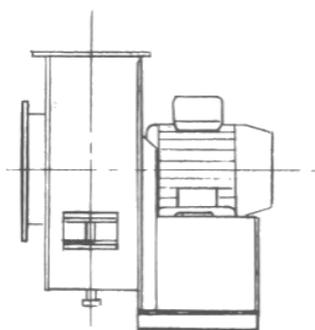


Figura 37 - Montagem tipo 4 do ventilador [17]

Pela análise do catálogo entendeu-se que o ventilador ideal é a o FOUGAL HD com pás curvadas para trás.

Na figura abaixo (Figura 38) é possível observar a tabela de pré-selecção do ventilador gentilmente cedida pela Flakt Portugal, com ela e tendo como entrada o caudal (Q) em m³/s (1500 m³/h = 0,42 m³/s) e a pressão necessária em mmca (≈300 mmca) verificou-se que o FOUGAL HD 14H é a melhor opção para esta aplicação.

**ABACO DE PRESELECCION
MONTAJES 4 y 8**

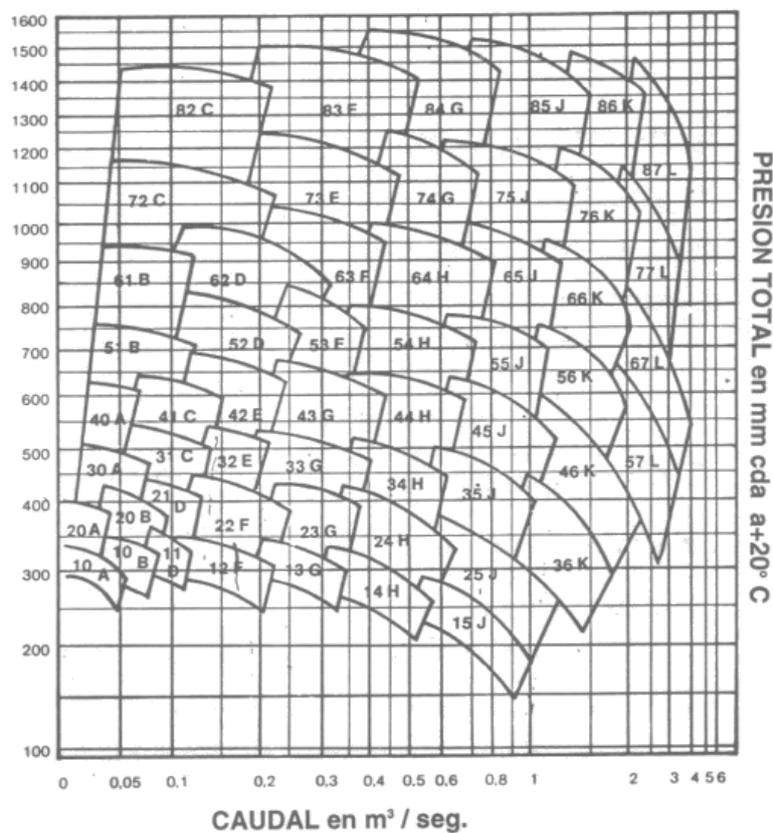


Figura 38 - Tabela de pré-selecção do ventilador [17]

Efectuada a pré-selecção, foi requerida ao fabricante a curva característica do ventilador. Após observação da curva característica do ventilador verificou-se que esta foi retirada com ar à temperatura de 20°C à pressão atmosférica pelo que se torna necessária a rectificação da pressão necessária, o que se consegue com a sùmula de cálculo seguinte fornecida pelo fornecedor:

$$\rho_{funcionamento} = \rho_{0^{\circ}\text{C}} \cdot \frac{273,15}{273,15 + \Delta T} \cdot \frac{P_{atm} \pm P_{funcionamento}}{P_{atm}} \cdot \frac{16 - \text{altitude}}{16 + \text{altitude}} \quad (34)$$

O sinal \pm , será usado consoante se trate de um caso de aspiração (ventilador no fim do sistema, neste caso utiliza-se o sinal -) ou de insuflação (ventilador no início do sistema, neste caso utiliza-se o sinal +). Ora como neste caso temos aspiração, o sinal a utilizar será o sinal de -.

Como não se sabe a que altitude o aspirador vai funcionar e sabendo por informação do fornecedor que essa diferença não é relevante para pequenos ventiladores e baixos caudais, como é o caso, não será considerado esse parâmetro. Procedendo à substituição obtemos o seguinte:

$$\rho_{funcionamento} = 1,293 \cdot \frac{273,15}{273,15 + 20} \cdot \frac{10329 - 300}{10329} = 1,169 \text{ kg/m}^3$$

Este valor permite obter a pressão necessária corrigida, com recurso à seguinte expressão:

$$\Delta H_{corrigido} = \Delta H \cdot \frac{\rho_{preferência}}{\rho_{real}} = 300 \cdot \frac{1,2}{1,169} \approx 308 \text{ mmca} \quad (35)$$

Com este passo concluído é possível calcular a curva da carga, através da seguinte equação:

$$\Delta H = k \cdot Q^2 \quad (36)$$

Sendo a pressão (ΔH) e o caudal (Q) conhecidos, está-se em condições de calcular o valor da constante da equação (k):

$$\Delta H = k \cdot Q^2 (=) k = \frac{\Delta H}{Q^2} = \frac{308}{0,42^2} \approx 1771$$

Deste modo a equação da carga é a seguinte:

$$\Delta H = 1771 \cdot Q^2$$

Traçando a equação da carga (a azul) sobre o gráfico da curva característica do ventilador (Figura 39) verifica-se que um ventilador do tipo R0 na zona de utilização 13 consegue cumprir com a função necessária.

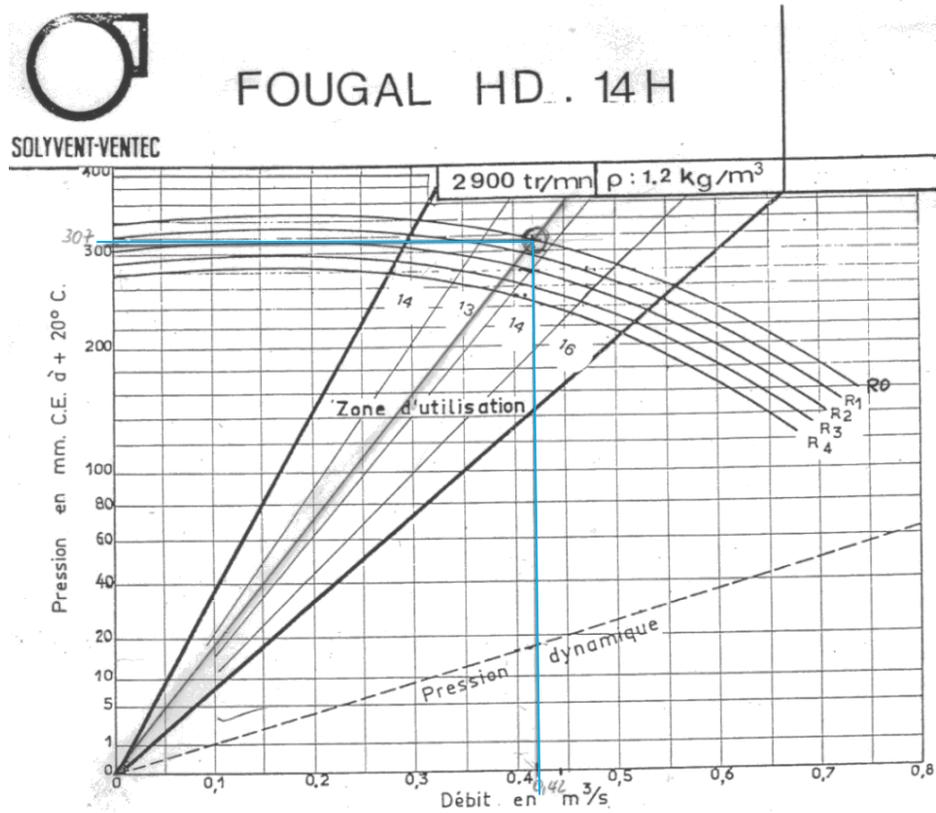


Figura 39 - Gráfico da curva característica do ventilador FOU GAL HD 14H [17]

A potência absorvida pelo ventilador será de cerca de 2,3 kW conforme se pode ver no gráfico seguinte (Figura 40)

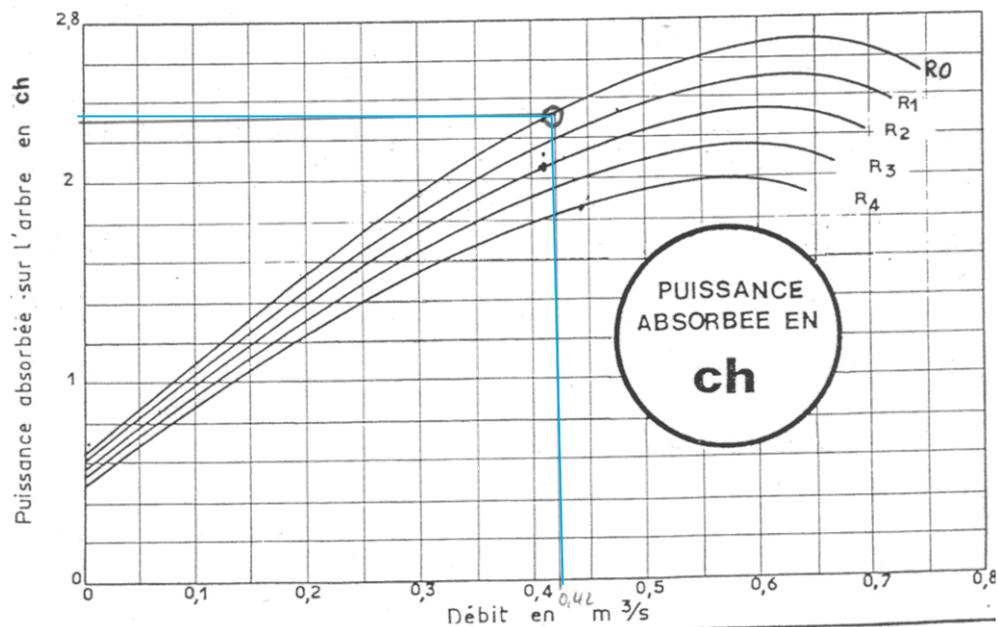


Figura 40 - Gráfico da potência absorvida pelo Ventilador [17]

Após esta selecção entrou-se em contacto com o fornecedor, que sugeriu a utilização de um ventilador especial com dimensões mais reduzidas, funcionando com um variador de frequência para se conseguir atingir as condições de caudal e pressão. Assim consegue-se uma optimização do espaço pelo custo de um variador de frequência (que para pequenos ventiladores não é elevado). Acresce que a utilização de um variador de frequência permitirá na fase de testes do produto testar o ventilador sobre várias velocidades e ver os efeitos dessas variações.

O estudo feito pela Flakt (fornecedor) revelou que a melhor opção seria a utilização do ventilador com a referência “FV 38-R2 S4”.

As principais características deste ventilador são as seguintes:

- Pressão alcançada: 308 mmca;
- Potência Absorvida ($P_{Ventilador}$): 1,6 kW;
- Rendimento do Ventilador: 76,7%;
- Velocidade de rotação (N): 3500 rpm.

A curva característica do ventilador é a seguinte:

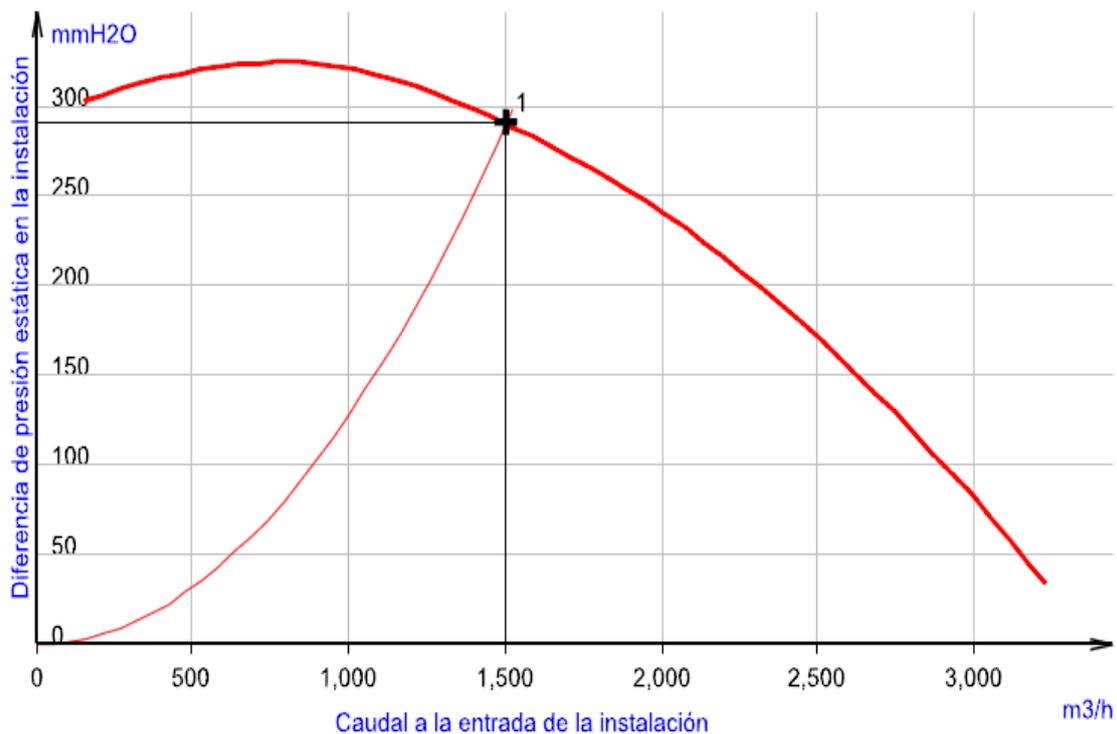


Figura 41 - Curva característica do ventilador FV 38-R2 S4 [17]

A seleção do motor adequado para este ventilador, deve ter em conta que a potência, binário e velocidade do motor devem ser suficientes para movimentar a carga (ventilador).

Em primeiro lugar é necessário calcular a curva da carga (binário (B) vs. velocidade de rotação (N)) de modo a poder cruzar com a curva do motor e daí retirar o ponto de funcionamento.

Pelas Leis de semelhança dos ventiladores, sabe-se que a potência absorvida (P) varia com o cubo da razão da velocidade de rotação do ventilador (N), ou seja:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{P_2}{P_1}^3 \quad (37)$$

O binário resistente do ventilador, para cada valor de rotação, pode ser calculado ($B_{Ventilador}$) através do uso de a seguinte equação:

$$P_{Ventilador} = B_{Ventilador} \cdot 2\pi \cdot \frac{N}{60} \quad (38)$$

Com estas duas equações e com o auxílio do Excel determinou-se a curva da carga que tem a forma apresentada na figura abaixo (Figura 42).

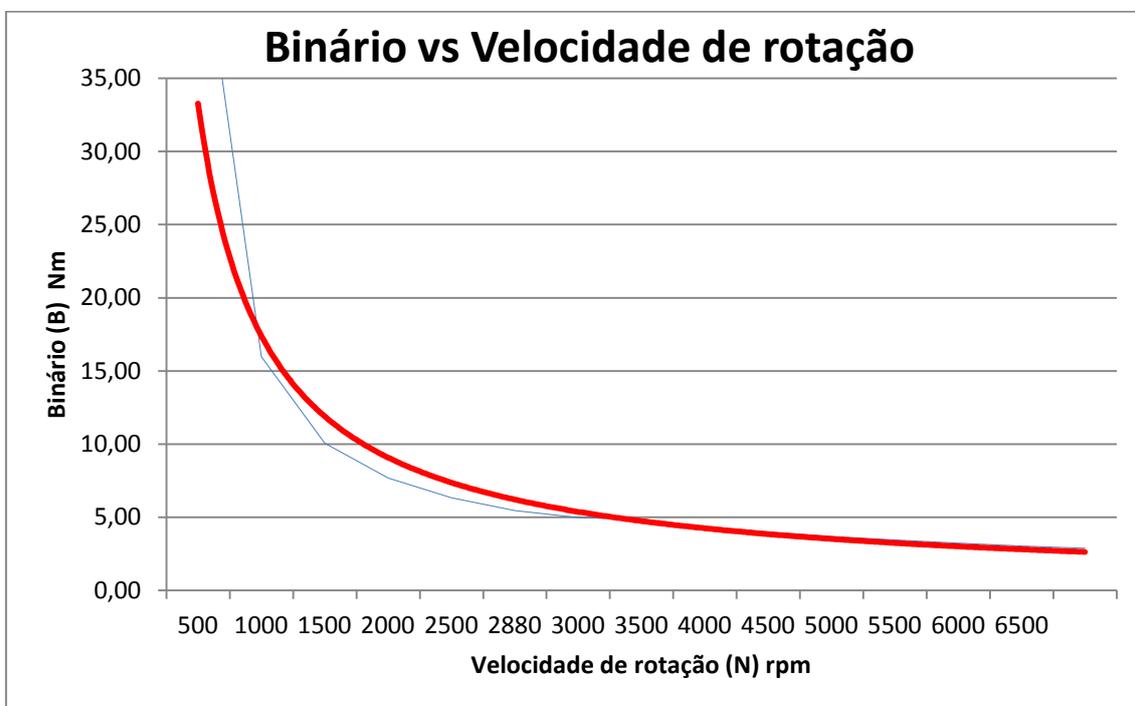


Figura 42 - curva da carga provocada pelo Ventilador

Fazendo uma pesquisa dos motores possíveis no catálogo de um dos fornecedores Setimep, a SEW, verifica-se que o motor que mais se aproxima do pretendido é o DRE100M2/FL, cujas características se podem ver na figura abaixo (Figura 43).

DRE100M2/FL

Velocidade nominal do motor	[1/min] : 2880
Entrada posição de montagem	: B5
Posição da caixa de terminais	: 0
Posição da entrada de cabos/conector	: X
Eixo de saída	[mm] : 28x60
Diâmetro do flange	[mm] : 200
Potência do motor	[kW] : 2,20
Classe de eficiência	: IE2
Fator de duração	: S1-100%
Tensão do motor	[V] : 230/400
Esquema de ligações	: R13
Frequência	[Hz] : 50
Corrente nominal	[A] : 7,2 / 4,15
Cos Phi	: 0,91
Classe de temperatura	: 130(B)
Tipo de protecção	: IP54
Requer Design	: IEC
Peso Líquido	[kg] : 26,00

Figura 43 - Características do Motor DRE100M2/FL [18]

A curva do ventilador pode ser traçada com recurso a dois pontos, o ponto nominal e o ponto de sincronismo, visto que na região de funcionamento (que deve ser entre a velocidade nominal e a de sincronismo nominal) o seu comportamento é linear. No ponto nominal, sabe-se que $N=2880$ rpm e uma potência de 2,2kW. O binário pode ser calculado utilizando-se para o efeito a equação (40) mas aplicando as características do motor, ficando:

$$P_{motor} = B_{motor} \cdot 2\pi \cdot \frac{N}{60} (=) B_{motor} = \frac{2,2 \cdot 10^3 \cdot 60}{2\pi \cdot 3500} = 7,29 \text{ Nm}$$

No ponto de sincronismo do motor sabe-se que o binário é nulo. A velocidade de sincronismo nominal pode ser calculada utilizando a expressão que se encontra em baixo que dá a velocidade de sincronismo nominal (N_{sN}) em função do n.º de pares polos do motor (p) (um par de polos neste caso) e da frequência de alimentação nominal (f_N) (que em regime normal será a da rede eléctrica ($f=50$ Hz)).

$$N_{sN} = \frac{f_N}{p} \cdot 60 = \frac{50}{1} \cdot 60 = 3000 \text{ rpm} \quad (39)$$

Com estes dados, consegue-se traçar a curva do motor e fazer o cruzamento da curva de carga do ventilador com a do motor obtendo-se o seguinte gráfico (Figura 44):

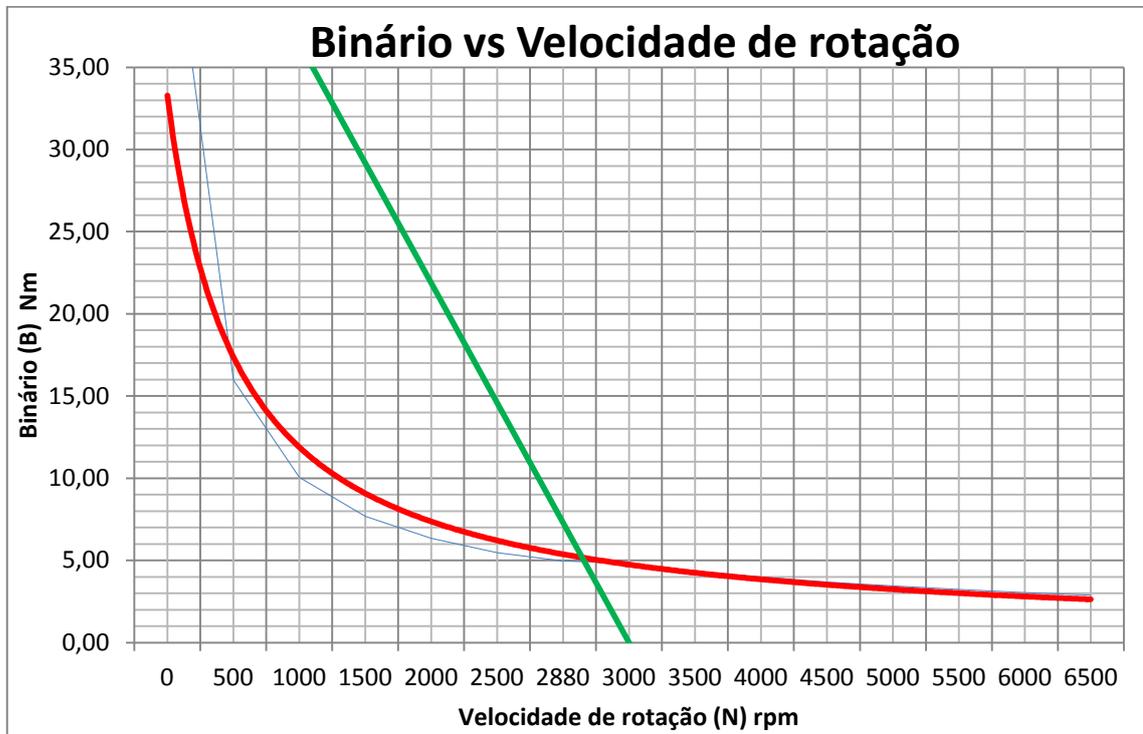


Figura 44 - Gráfico cruzamento carga ventilador com motor

Como se pode verificar, pelo gráfico, as duas linhas cruzam-se no ponto de 2916 rpm e binário 5,17 N.m, este é o ponto em que o motor vai accionar o ventilador e é denominado de ponto de funcionamento. Neste ponto de funcionamento a velocidade não corresponde à necessária (3500 rpm), existem duas formas de contornar o problema, através do uso de uma desmultiplicação (geralmente correias e polias) ou através do uso de um variador de frequência. Visto que o uso de uma transmissão irá aumentar em muito o espaço ocupado pelo sistema, optou-se pelo uso de um variador de frequência.

Assim sendo é necessário calcular qual a frequência de acionamento para que o motor rode a 3500 rpm.

Traçando uma perpendicular passando pela velocidade a que se pretende acionar o ventilador (3500 rpm), verifica-se que a nova velocidade de sincronismo do motor (N_s) é de 3796 rpm tal como se vê na Figura 45.

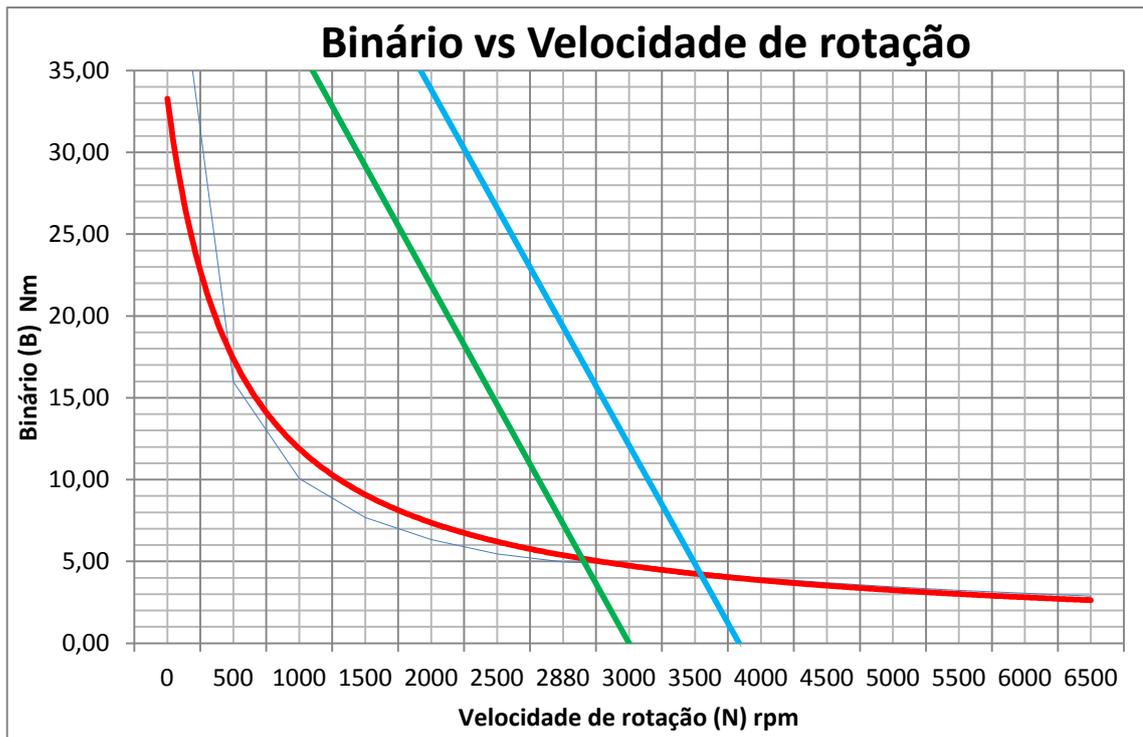


Figura 45 - Gráfico cruzamento carga ventilador com motor a 3500 rpm

A variação da velocidade de rotação em função da variação da frequência pode ser retirada utilizando a seguinte expressão:

$$\frac{f_N}{N_{sN}} = \frac{f}{N_s} \quad (40)$$

Assim é possível calcular a nova frequência (f), que é de:

$$\frac{50}{3000} = \frac{f}{3796} \quad (=) f = 63,27 \text{ Hz}$$

Funcionando a esta frequência o motor terá as seguintes características:

Potência (P_{motor}): 1,8 kW

Binário (B_{motor}): 4,85 N.m

Velocidade de rotação (N_{motor}): 3500 rpm

Por esse motivo verifica-se que este motor se adequa a esta aplicação.

5. Construção do equipamento

Após ter sido feito o dimensionamento do sistema é necessário estudar o seu fabrico. Neste capítulo vão ser destacados e descritos os pormenores de construção mais importantes assim como os seus propósitos.

Os princípios que foram tidos em consideração para o dimensionamento do equipamento foram os seguintes:

- Desgaste/Aerodinâmica do sistema – Visto que o aspirador vai trabalhar, potencialmente, com partículas que podem ser bastante abrasivas, é importante a redução ao máximo de “quinas vivas” ao longo do sistema já que serão os pontos onde esse problema mais se vai reflectir.
- Espaço – Como o aspirador é um equipamento que se pretende que tenha mobilidade, a componente espaço assume uma grande importância. Uma arrumação cuidada e criteriosa de todos os componentes do sistema será vital para a ocupação do menor espaço possível.
- Fabrico/Custo – É essencial que a produção seja o mais simples possível, de forma a minimizar o custo de produção, deve estar também facilitado o acesso a todos os componentes e consumíveis para se obter um equipamento de fácil manutenção e “amigo” do utilizador.
- Estética – A estética do equipamento é outro ponto a ter em consideração, visto que este se destina à comercialização.

Considerando que nesta fase, o nível de produção deste equipamento será unitário, serão desde logo excluídas tecnologias de fabrico que necessitem a compra de equipamentos específicos. Assim pode afirmar-se, que os processos de fabrico preferenciais serão a soldadura e o corte, dobragem e quinagem de chapa pois são processos que, regra geral, utilizam equipamentos bastante flexíveis e que permitem a fabricação de componentes com todo o tipo de geometria.

O tipo de soldadura será TIG ou MIG consoante o existente nos eventuais fornecedores consultados, no entanto, será privilegiado o uso da soldadura TIG visto que com esta se obtêm soldaduras de melhor qualidade especialmente quando se trata de chapas de baixa espessura.

O material privilegiado será o S235JR, segundo a norma europeia (S37-2, segundo norma DIN), que é um aço de construção de baixo teor de carbono. A escolha deste material deve-se essencialmente ao facto de ser um material bastante barato e ter muito boa disponibilidade. Por isso e tendo em conta que o aspirador, não irá à partida trabalhar em ambientes corrosivos, nem estará sujeito a grandes reforços, este foi o material seleccionado como material de constituição do aspirador.

Todas as ligações entre componentes em que não esteja garantida a estanquicidade, nomeadamente, ligações flangeadas levarão uma junta de espuma entre os dois elementos a ligar de forma a garantir uma boa estanquicidade do sistema, permitindo um correcto desempenho do sistema.

No Anexo G encontram-se os desenhos técnicos individuais e de conjunto de todos os constituintes que é necessário fabricar na construção do equipamento.

O software utilizado para a elaboração dos desenhos técnicos, o *SolidWorks*, insere de forma automática alguma informação sobre o método de fabrico de alguns componentes, nomeadamente os que provém da moldação de chapa. Para um melhor entendimento dos desenhos importa fazer uma pequena explicação do formato utilizado pelo software. A expressão tipo que aparece nos desenhos técnicos é a seguinte:

DOWN 20.00° SHARP

O primeiro termo da expressão indica o sentido da dobragem da chapa em relação ao plano da chapa no seu estado planificado (“*DOWN*” se a dobragem for para baixo e “*UP*” se forma para cima).

O segundo termo (20.00^a) indica qual o ângulo de dobragem a aplicar, sendo a linha a tracejado que aparece no desenho planificado o eixo de dobragem da chapa.

Terceiro membro indica o raio a aplicar na dobragem (o termo “*SHARP*” aparecerá se o raio de dobragem for igual a zero, para os outros casos aparecerá a letra R seguida do valor do raio de dobragem (por exemplo “*R 100*”

5.1. Estrutura do equipamento

A estrutura do equipamento (Figura 46) será totalmente executada em chapa de 1mm para as chapas exteriores e de 2 mm para as chapas interiores que façam parte do sistema de aspiração.

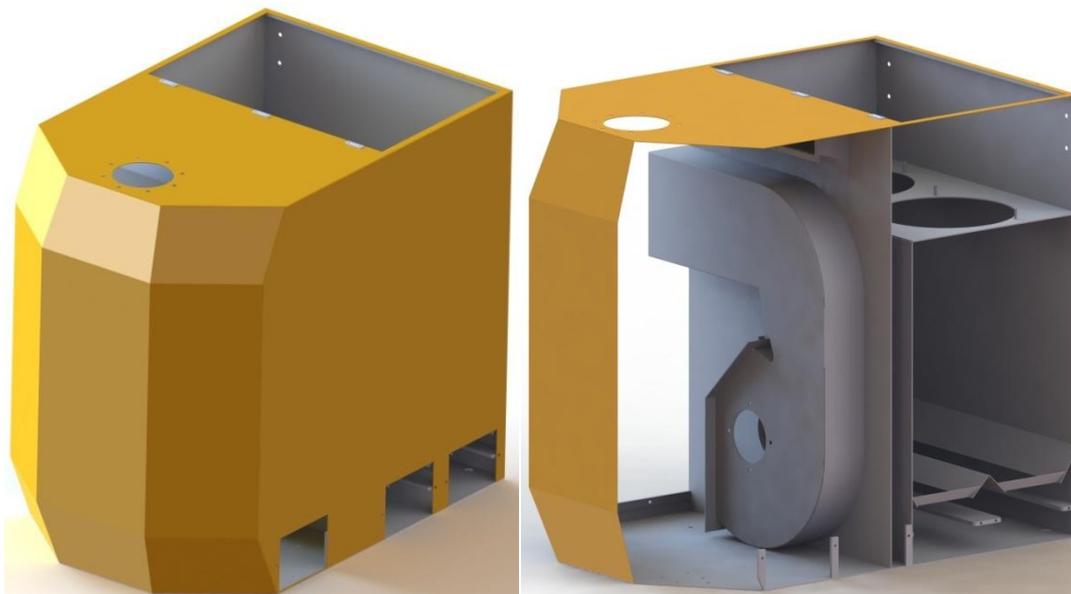


Figura 46 - Ilustração estrutura aspirador

A estrutura exterior foi projectada de forma a conjugar a funcionalidade com a estética e o preço, assim optou-se por uma forma paralelepípedica (como que se pode ver na Figura 46) em que uma das faces, no caso a frontal, não é constituída por uma chapa plana, mas sim três chapas quinadas. Desta forma obtém-se um produto esteticamente mais atraente, sem um aumento significativo de custo do equipamento.

No que diz respeito à estrutura interna do aspirador à que ressaltar alguns pormenores de construção relevantes a nível de custo e espaço ocupado pelo equipamento, um deles é o facto de se ter colocado o canal de entrada na câmara dos filtros (setas a vermelho da Figura 47) paredes meias com o canal de entrada de ar no ventilador (setas a verde da Figura 47) e de ambos fazerem parte da estrutura do aspirador.

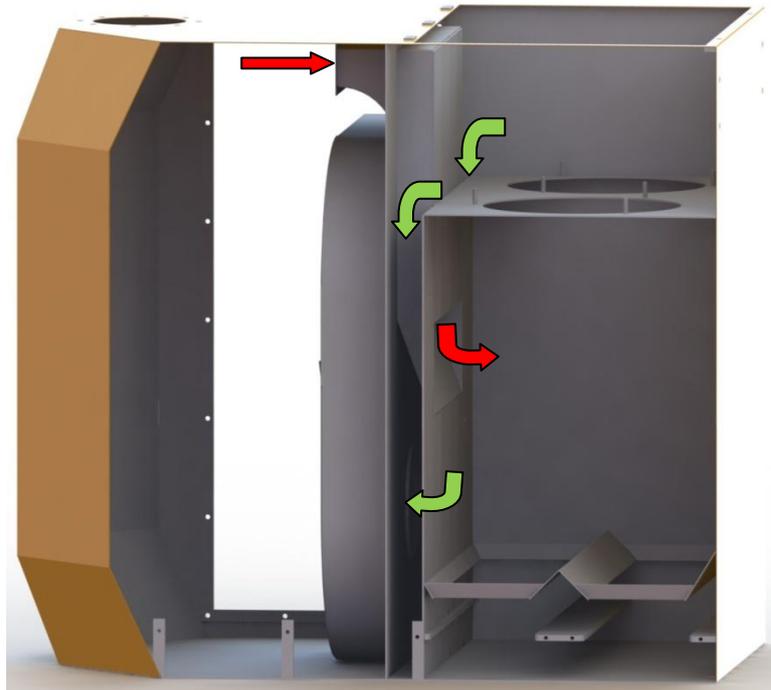


Figura 47 - ilustração do canal IN/OUT filtro partilhado

A colocação dos canais desta forma promove uma redução a nível de espaço, ao mesmo tempo que actua como reforço estrutural do equipamento, tudo isto, sem sacrifícios de performance e sem aumento de custo ou peso geral do equipamento.

Outra característica deste equipamento é o facto de a carcaça exterior do ventilador, assim como todo o sistema de condutas de saída do aspirador, estarem incorporados na estrutura. Por acordo com o fornecedor foi fornecido à Setimep o esquema da carcaça do ventilador, ficando o fabrico da mesma a cargo da Setimep. O fornecedor (Flakt Solivent) fornecerá apenas a turbina e o Venturi do Ventilador. Na Figura 48 é possível ver a forma como a carcaça do ventilador foi incorporada na estrutura do aspirador.

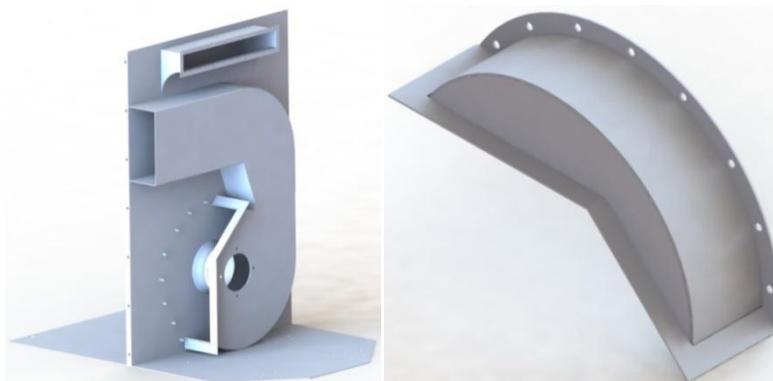


Figura 48 - Carcaça e tampa do ventilador

Optou-se por soldar toda a carcaça do ventilador, assim como de todo o sistema de condutas de saída à chapa que faz o canal de entrada na câmara nos filtro e o canal de entrada no ventilador. Como se vê por observação da Figura 48, foi feita a separação da carcaça do ventilador em duas partes. Esta separação tem como objectivo permitir o acesso ao interior do ventilador, permitindo a instalação, manutenção e substituição tanto da turbina como do venturi deste. A ligação entre as duas partes (Figura 49) é efectuada por parafusos e varões roscados intermediados por uma junta de esponja que vai promover a estanquicidade do sistema garantindo desta forma a eficiência do ventilador em funcionamento.

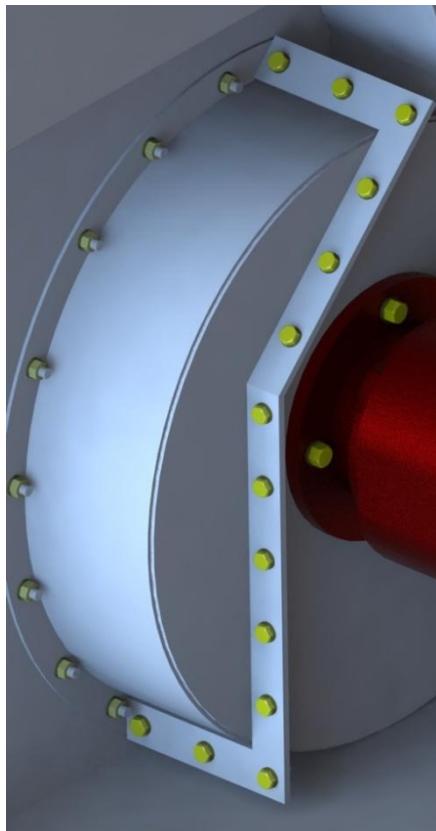


Figura 49- Ligação soldada ventilador

O motor do ventilador encontra-se directamente ligado à carcaça do ventilador utilizando parafusos para fixação (Figura 50), tal como está referido no capítulo que se refere ao dimensionamento do ventilador. O motor, que tem uma flange de 200mm (a mais pequena disponível), ficará colocado entre os dois ciclones (Figura 50) conseguindo-se desta forma uma grande redução do espaço necessário.

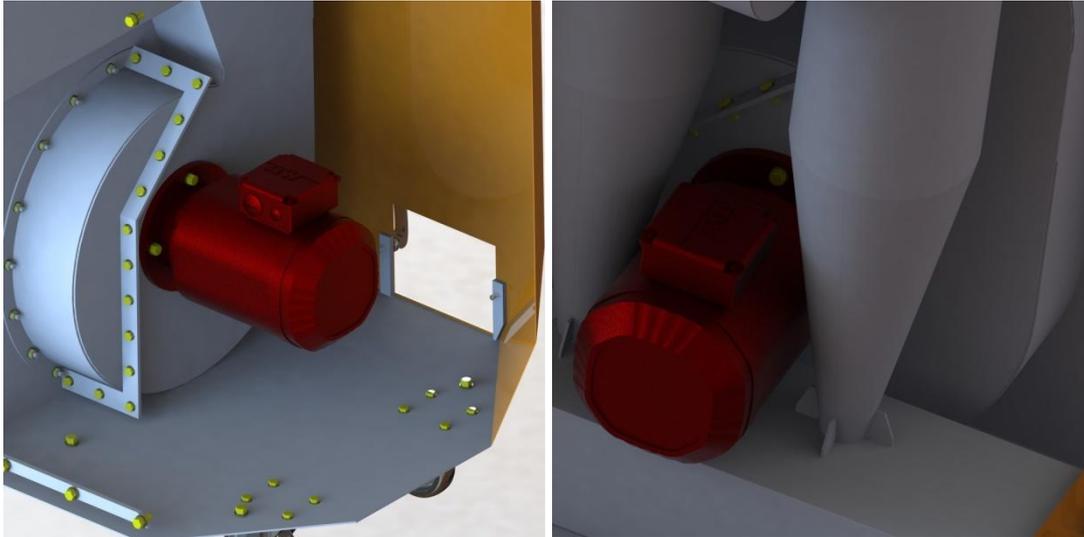


Figura 50 - Fixação motor do ventilador

A chapa de suporte dos cartuchos (Figura 51) é de 3mm uma vez que terá de suportar o peso dos cartuchos assim com a constante pressão e contra pressão originada pelo funcionamento do sistema de aspiração. A fixação dos cartuchos à chapa é feita por intermédio de varões roscados M10 (tal como é recomendado pelo fabricante) que estão soldados à chapa de suporte.



Figura 51 - Chapa suporte cartuchos

Na parte inferior da câmara dos filtros foram colocadas chapas inclinadas (destaque a vermelho da Figura 52), a função destas é servir de deflector direccionando todo o pó que seja colectado pelos filtros para o interior das gavetas.

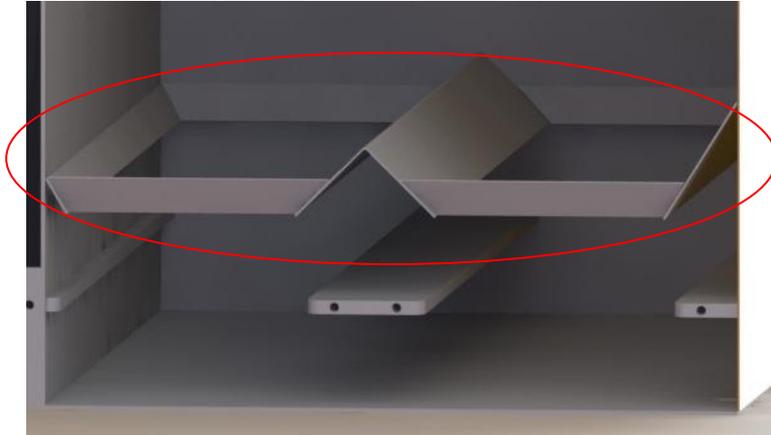


Figura 52 - Chapas deflectoras câmara filtro

Na figura em baixo estão expostos mais dois pormenores importantes, que são as curvas do canal de acesso à câmara dos filtros, com o objectivo de minimizar o desgaste nas condutas do sistema, optou-se por curvas suaves para as zonas de mudança de direcção do fluxo (que são as zonas de desgaste mais crítico), a opção por este tipo de soluções permite então uma maior longevidade do equipamento sem aumento substancial do custo.

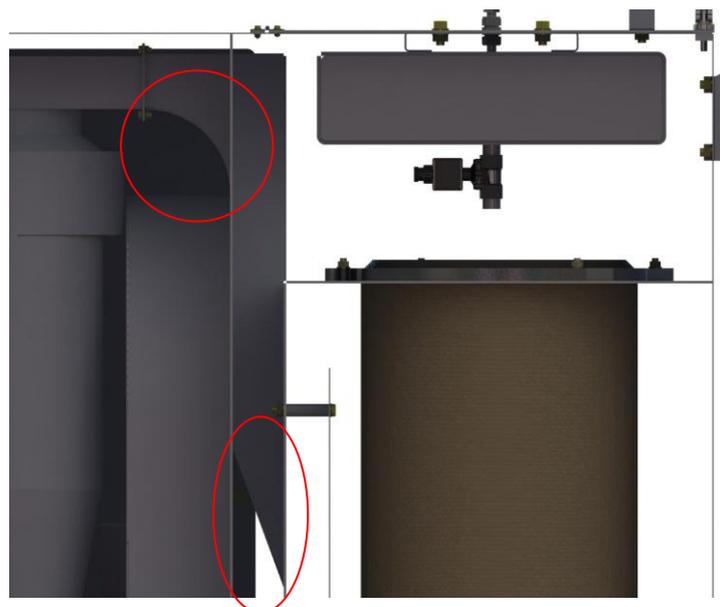


Figura 53 - Pormenores curvas do canal de entrada na câmara do filtro

5.2. Filtro Pré-Separador

Este módulo é, tal como foi referido aquando do seu dimensionamento, é constituído por dois ciclones. O principal aspecto a ter em conta é o posicionamento dos ciclones de forma a minimizar o espaço ocupado e o material necessário. Após uma análise das melhores soluções verificou-se que a solução que permitiria uma maior poupança de espaço e de material seria colocando os dois ciclones lado a lado com a entrada comum aos dois tal como se pode ver por observação da Figura 54.

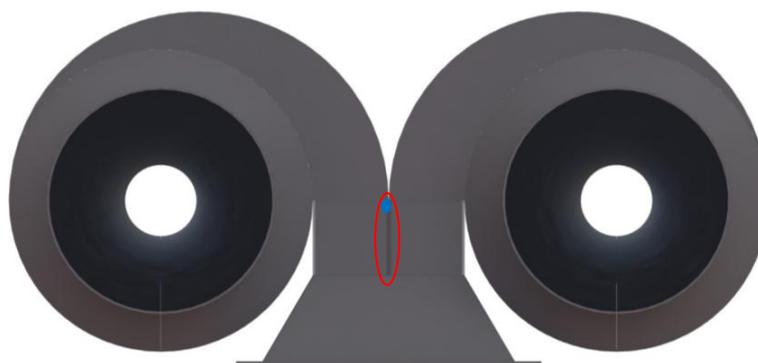


Figura 54 - Representação da entrada comum dos ciclones

Na entrada dos ciclones, logo a seguir à redução quadrangular procedeu-se à colocação de uma chapa (visível no destaque a vermelho da mesma figura). O objectivo da colocação desta chapa é promover a separação do caudal mais cedo de modo a evitar que o ar circule preferencialmente por um dos ciclones, provocando um desgaste não uniforme do sistema. Além disso, serve como ponto de reforço do local onde ocorre a separação das chapas (ponto azul da mesma figura), sem a existência da chapa este seria o ponto onde iria ocorrer embate das partículas (por ser o ponto de separação) e que iria sofrer maior desgaste, rompendo e abrindo rapidamente um ponto de fuga de ar no sistema, comprometendo-o. Com a aplicação desta chapa as partículas terão de “ir comendo a chapa” até chegar a esse ponto. A construção soldada dos ciclones será em chapa de 2mm, pelo facto de se tratar de um elemento que estará sujeito a desgaste (devido à passagem de partículas), é importante que este seja reforçado. Os ciclones terão na sua base quatro reforços (comumente denominados de cachorros, Figura 55), o objectivo da colocação destes elementos é proporcionar uma protecção contra a flambagem dos ciclones devido a choques acidentais e/ou ao próprio peso do conjunto dando-lhes quatro pontos de apoio adicionais.

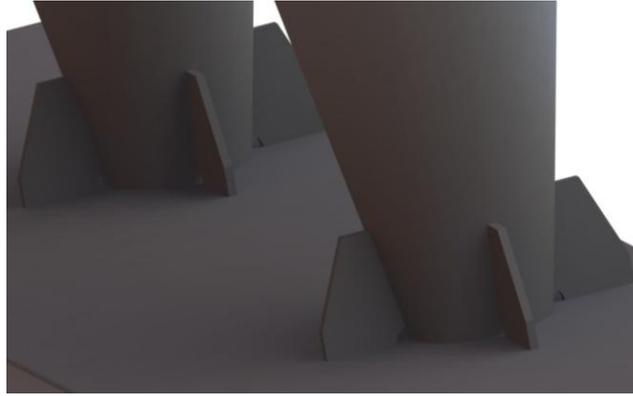


Figura 55 - Fixação dos ciclones à base

A ligação entre o tubo de entrada do sistema e os ciclones será feita por meio de uma curva, sendo as curvas em instalações de despoeiramento um ponto crítico dos sistemas, isto é, pontos onde o desgaste é maior, pelo que o seu dimensionamento será mais cuidado, assim optando-se assim pelo formato que se encontra exposto na Figura 56.



Figura 56 - Curva ligação aos ciclones

A adopção deste formato vai permitir um menor desgaste, uma vez que a entrada de ar não será tangencial à curva. O ar carregado de partículas vai embater directamente na zona curva, ficando aí parte dele depositado. Assim as partículas que vêm atrás, ao invés de embaterem na chapa, colidem com as que estão lá depositadas, ou seja, na prática utiliza-se o próprio material contaminante como protecção do sistema.

À saída do ciclone, e visto que o ar já se encontra desprovido das partículas de maior dimensão, não é necessária um velocidade de transporte tão elevada.

Consultando a Tabela 2 que se encontra no início deste documento pode ver-se que uma velocidade de 13 a 18 m/s será suficiente, pelo que se optou por uma velocidade intermédia de 15m/s, esta redução de velocidade irá permitir uma redução do desgaste no resto do sistema.

Uma imagem geral do sistema de pré-separação de particulados pode ser vista na Figura 57. Optou-se por uma saída directa dos ciclones (destaque a vermelho da mesma figura) de maneira a ocupar o mínimo de espaço. A ligação do módulo de pré-separação do aspirador ao resto do sistema é feita através de uma ligação flangeada com a entrada do canal de entrada na câmara dos filtros (intermediada por uma junta de espuma de forma a promover a estanquicidade). Este módulo fica também ligado por parafusos à base da blindagem do equipamento.

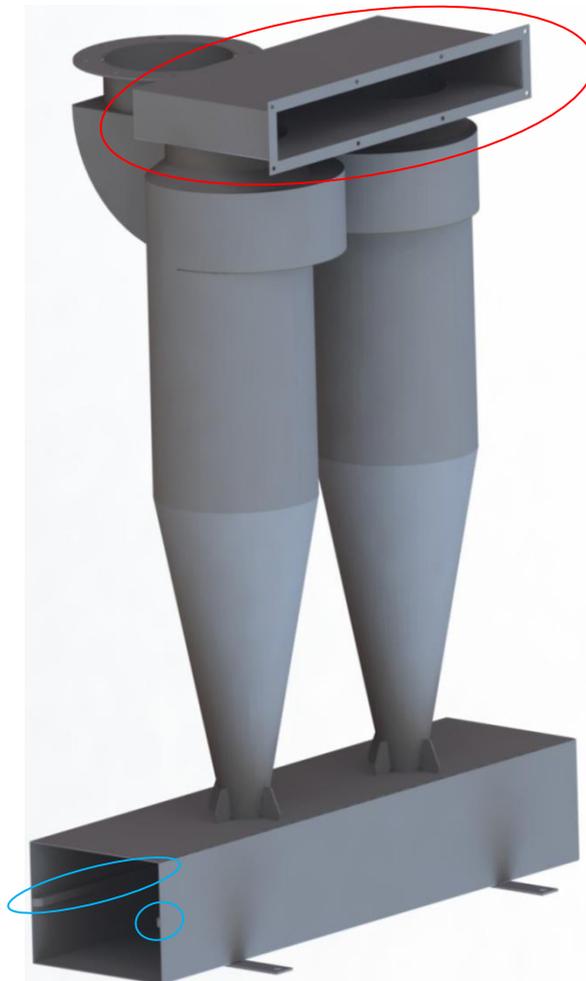


Figura 57 - Conjunto módulo de pré-separação

O módulo de pré-separação tem na parte inferior uma câmara onde está instalada uma gaveta que recebe todo o pó colectado pelos ciclones. Nesta câmara existem duas barras que servem como guia e suporte da gaveta (destaque azul da Figura 57).

5.3. Filtro principal

Este módulo é constituído por dois elementos filtrantes, os filtros de cartuchos. Estes estão dispostos na vertical lado a lado, tal como se vê na Figura 58 de modo a minimizar o espaço ocupado.



Figura 58 - Vista de topo e lateral dos elementos filtrantes

Um dos aspectos com o qual é necessária maior atenção é a protecção dos elementos filtrantes, esta protecção faz-se, regra geral através da redução da velocidade do fluxo e impedindo-se que o fluxo de ar carregado de partículas contacte directamente com os filtros.

Com o objectivo de promover os dois efeitos, colocou-se à entrada da câmara dos filtros uma placa que vai fazer com que o fluxo gasoso, proveniente do sistema de condutas, não “ataque” logo o filtro visto que não o consegue “ver” de imediato.

Além disso, a placa está a uma distância tal da conduta de entrada que faz com que a velocidade desça para os 4 m/s. Assim, é aumentada a longevidade do filtro sem se necessitar de um aumento de peso significativo e sem aumentar significativamente as dimensões do equipamento. Este pormenor pode ser visto com mais detalhe na Figura 59 que se encontra abaixo.



Figura 59 - Pormenor entrada na câmara do filtro

O sistema de limpeza dos filtros por ar comprimido, encontra-se ligado à porta de acesso ao filtro por intermédio de parafusos (Figura 60). Desta forma, consegue-se ter acesso fácil, aos filtros, para instalação, manutenção e substituição, assim como a todo o sistema de limpeza.

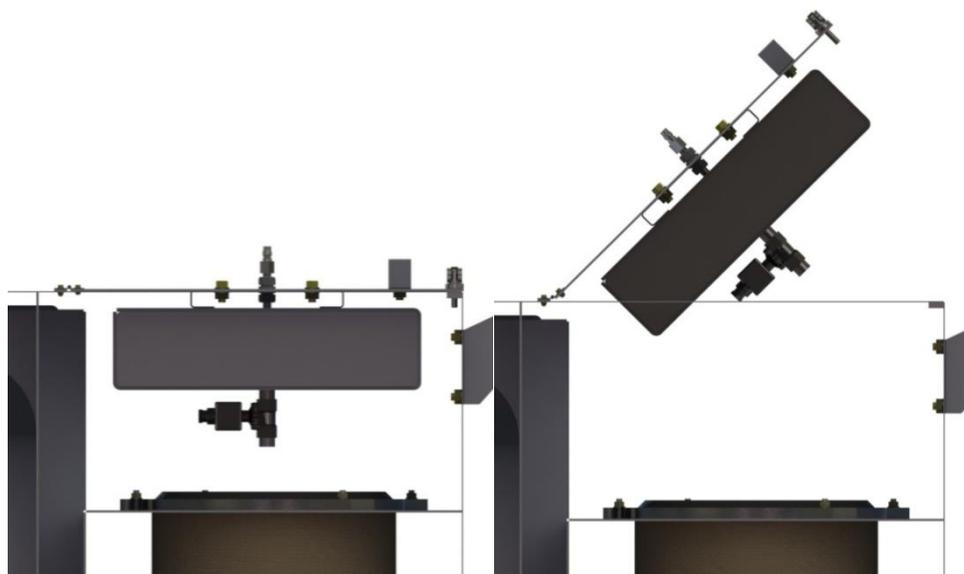


Figura 60 - Sistema de limpeza por ar comprimido

O enchimento do reservatório de ar comprimido é feito através de um acoplamento rápido de ar comprimido que permite a ligação directa à rede e o rápido enchimento do reservatório quando necessário. A ligação entre o acoplamento rápido e o reservatório é efectuada por intermédio de um sistema que inclui uma válvula anti-retorno (e garantirá a estanquicidade do reservatório), uma válvula passamuros (para se fazer a passagem do

interior para o exterior do equipamento) e o respectivo sistema de condutas. Na figura abaixo (Figura 61) encontra-se uma ilustração do sistema agora descrito.

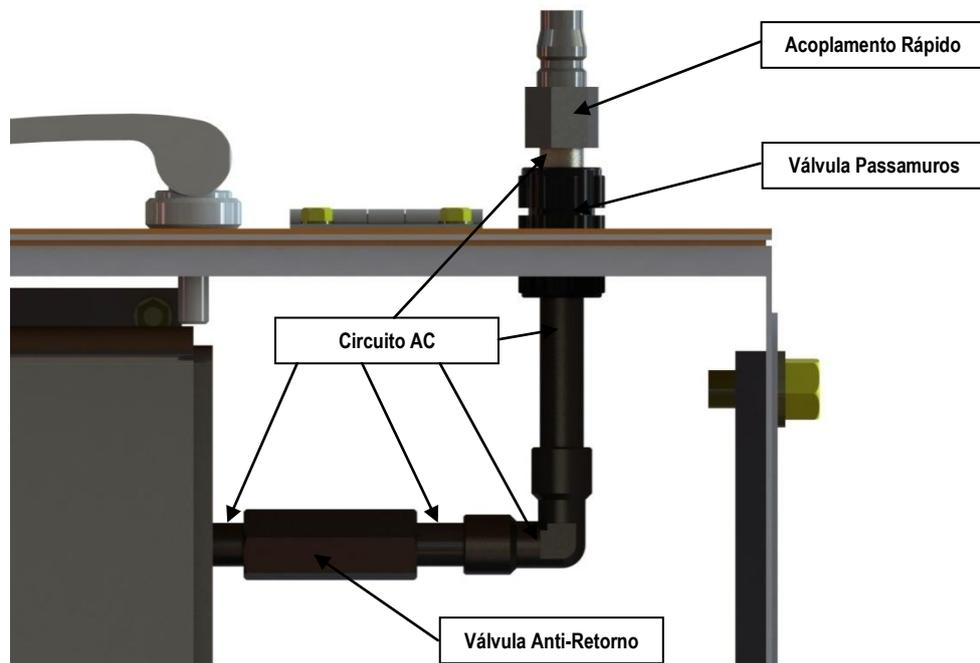


Figura 61 - Ilustração do sistema de ar comprimido

O reservatório terá ainda na sua parte inferior uma válvula de segurança que será activada no caso de ser ultrapassada uma pressão máxima de 10 bar.

Tal como nos casos anteriores a ligação entre a porta e a estrutura do aspirador tem uma junta para que o sistema seja o mais estanque possível.

Os parafusos de ligação da porta são de engate rápido para que a inspecção à câmara dos filtros se faça de forma rápida e sem necessidade de ferramentas. Um pormenor desses parafusos de engate rápido está representado na figura abaixo. (Figura 62, destaque a vermelho)

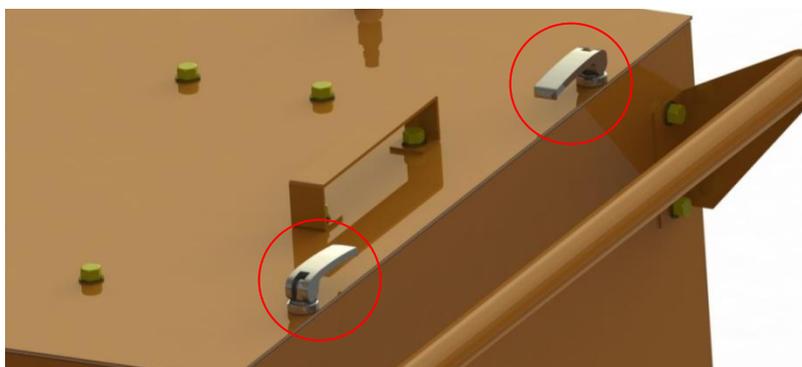


Figura 62 - Pormenor parafusos de engate rápido

5.4. Sistema de captação e transporte

O sistema de captação e transporte é constituído por dois elementos, o captador e o tubo flexível. A ligação entre os dois será feita pela ligação do tubo à entrada da hote (que têm uma entrada rebaixada para o efeito) sendo depois apertado com uma abraçadeira.

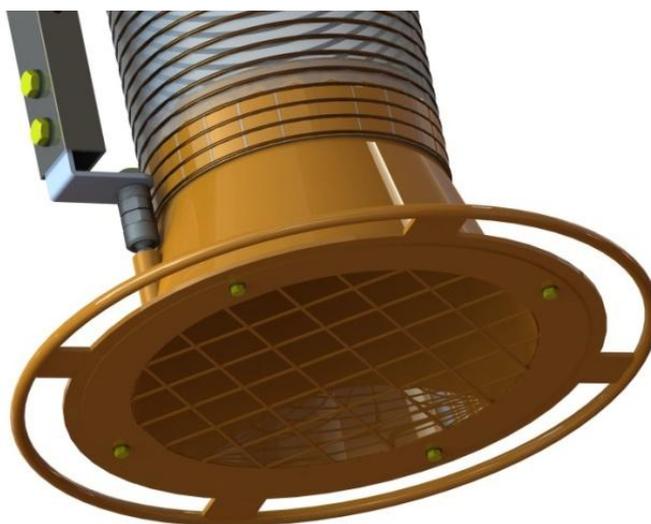


Figura 63 - Sistema de captação do aspirador

Como se pode ver pela Figura 63 o captador tem na frente uma rede cujo objectivo é o de protecção contra a entrada de elementos de grandes de dimensões, tais como plásticos ou papéis no sistema de aspiração, já que a entrada destes poderia entupir o sistema o que levaria a uma sobrecarga do sistema podendo inclusivamente avariar algum componente do mesmo. Ainda na mesma figura (Figura 63) é possível ver que o captador tem um varão a toda a volta deste. O objectivo desde varão é o de servir de pega de modo a permitir ao operador o fácil direccionamento do captador para a posição desejada. O captador encontra-se ligado ao braço articulado por uma junção rotativa dupla, o que permite um ajuste mais “fino” e adequado do captador em relação à fonte poluidora e por isso possibilita o melhoramento da eficácia de aspiração.

No que diz respeito à ligação do tubo flexível ao aspirador esta é efectuada graças a uma ligação flangeada na base do tubo flexível (que por sua vez está ligada ao tubo flexível da mesma forma que este se liga ao captador). Esta ligação tem, no entanto, um pormenor diferenciador já que permite um grau de liberdade ao braço, que é o de rotação sobre si próprio. Este efeito foi conseguido através da construção de uma ligação rotativa (Figura 64).

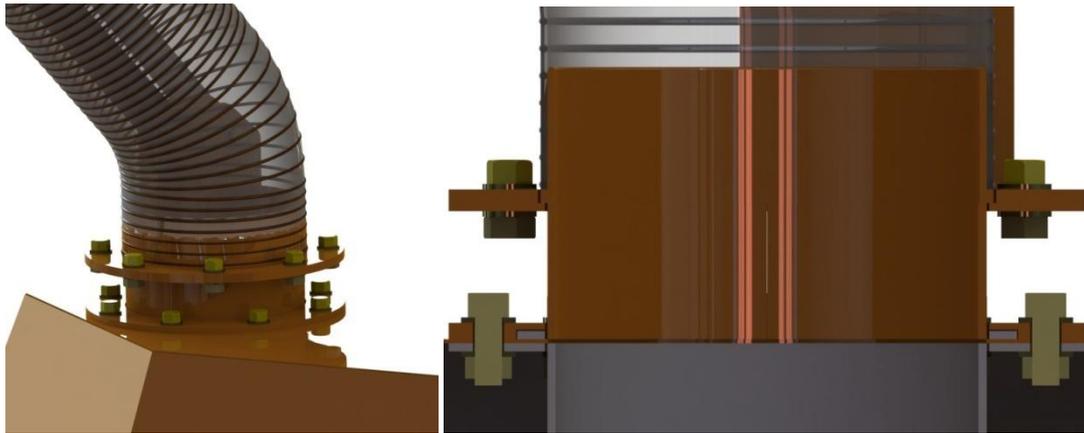


Figura 64 - Ligação rotativa do tubo flexível

A base do tubo flexível está ligada (através de uma ligação flangeada) a um tubo de entrada no equipamento que tem uma flange livre e sem furação (ou seja, que não se encontra fixa) pousada. Sobre a flange existe uma outra com um rebaixe de 3,5mm que encaixa sobre a flange livre com uma folga de 0,5mm e é ligada à flange interna do equipamento por parafusos. Como a ligação entre a flange e o tubo não é fixa, permite a rotação do tubo em relação à flange que está fixa na flange interna. O esquema da ligação pode ser visto na Figura 65 que se encontra abaixo.

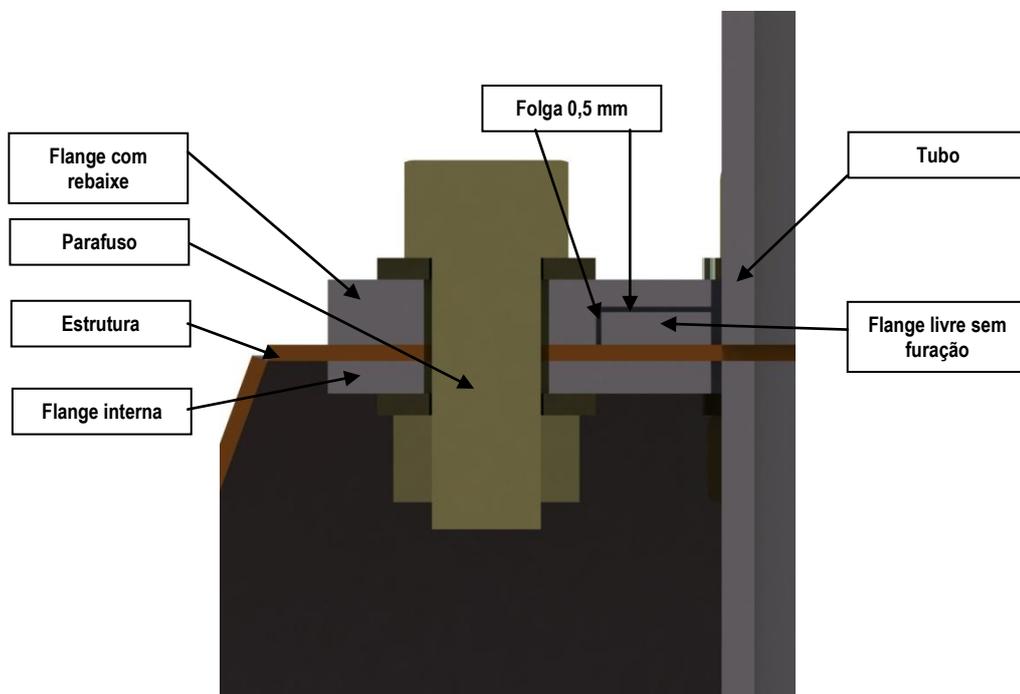


Figura 65 - Esquema ligação rotativa

O tubo flexível, assim como o captador, devem ter mobilidade, de forma a ser possível deslocá-los para a posição mais apropriada, no entanto, esta mobilidade deve ser controlada, isto é, o conjunto deve ficar fixo na posição pretendida. Existem algumas formas de se conseguir esse propósito através de um dispositivo equilibrador, que não é mais do que um mecanismo que suporta (ou equilibra) o peso de um determinado objecto, ao mesmo tempo que lhe permite movimentar-se rapidamente quando necessário. Existem vários tipos de dispositivos deste género, os contrapesos, os mecanismos de molas, e os mecanismos de barra e mola. Este último é um dos mecanismos mais utilizados na movimentação de braços de aspiração, pelo facto de ser um mecanismo compacto, leve e de baixa inércia.

Os mecanismos de barra e mola foram desenvolvidos por George Cawardine no início do século XX sendo a aplicação mais conhecida dos mecanismos de barra e mola a dos candeeiros de secretária (Figura 66).



Figura 66 - Candeeiro de mecanismo de "barra e mola" [18]

O dimensionamento do mecanismo barra e mola utilizado nesta aplicação encontra-se descrito no Anexo F.

Realçando os aspectos construtivos mais importantes do braço articulado, pode-se começar por destacar a fixação deste ao aspirador, nomeadamente à união rotativa.

Tal como se verifica na Figura 67 a ligação do braço articulado ao braço é efectuada por uma flange adaptada à qual está soldada metade da base dois reforços e um casquilho. A função dos reforços e do casquilho é a de garantir a manutenção do espaçamento entre as duas partes da base do braço.

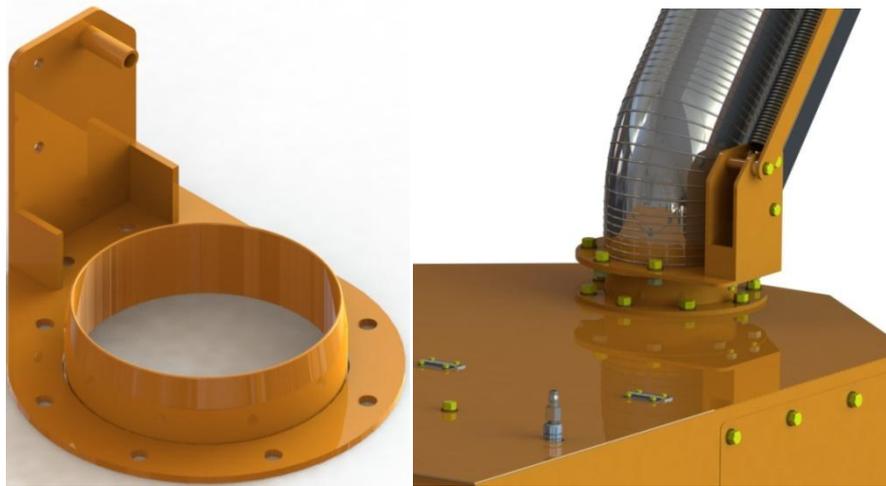


Figura 67 - Ilustração ligação do braço articulado

As barras do braço articulado são em alumínio, o objectivo da utilização do alumínio, é a de baixar o peso e a inércia do braço, tornando-o mais fácil de manusear. Para além disso, como o braço é mais leve a influência do peso do deste sobre o cálculo da mola do braço pode ser ignorado.

No que diz respeito às ligações entre as barras e as junções rotativas do braço, estas têm casquilhos em nylon. A utilização destes casquilhos tem como objectivo fazer com que a rotação se efectue mais facilmente, pois fica reduzido o atrito nas junções, para além de evitar o contacto directo do alumínio com o aço.

Na ligação intermédia, uma das características mais importantes foi o facto de se ter “retirado” material de modo a reduzir no peso do braço articulado e por conseguinte a inércia. Tal como na base encontra-se soldado a uma das partes dos reforços e casquilhos que têm como principal objectivo a manutenção do espaçamento desejado entre as duas partes.

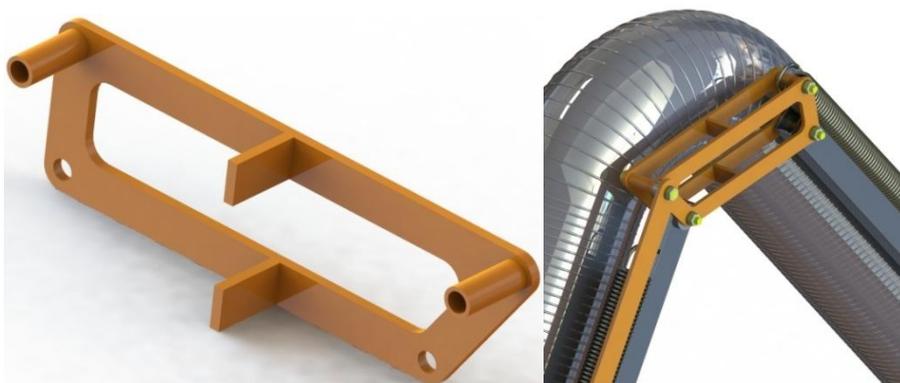


Figura 68 - ligação intermédia braço articulada

5.5. Filtro carvão activo

O filtro de carvão activo fica colocado na conduta de saída dos gases. Tal como se pode ver por observação da Figura 69, a caixa que vai receber os “pellets” do carvão activo, tem os lados com chapa perfurada, para que seja possível a passagem do ar.

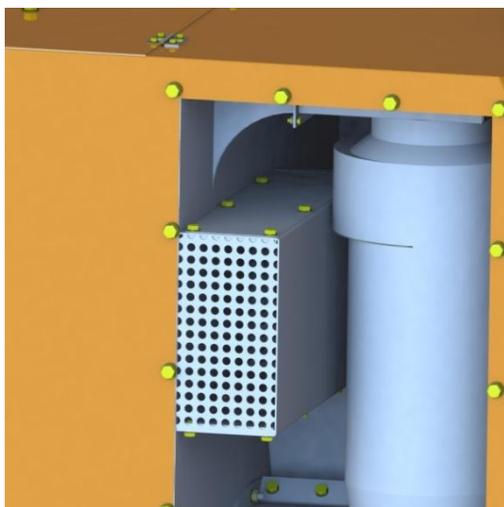


Figura 69 - Pormenor caixa filtro de carvão activo

Para facilitar a introdução e substituição dos “pellets do carvão activo, a caixa do filtro é aberta, quer na parte superior, quer na inferior (Figura 70).



Figura 70 - Ilustração pormenor aberturas filtro carvão activo

Desta forma facilmente se consegue colocar e remover os “pellets removendo a tampa devida (a superior para introdução e a inferior para remoção).

5.6. Acessórios do aspirador

Ligados ao corpo do aspirador existem acessórios que são essenciais ao funcionamento do aspirador e que são de inclusão obrigatória.

Um dos principais acessórios do aspirador são as gavetas, é nestas que são recolhidas as partículas colectadas tanto pelos ciclones (filtro pré-separador) como pelos filtros de cartuchos (filtro principal).

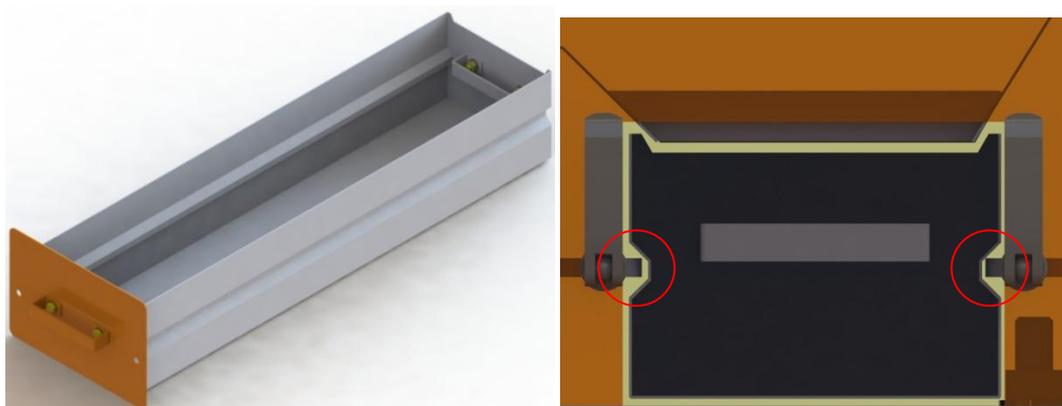


Figura 71 - Formato da gaveta de recolha de partículas

O formato definido para a gaveta tem a ver com a necessidade de fazer com a abertura e fecho da gaveta se faça da forma mais fluida possível, tal consegue-se por redução dos pontos de contacto da gaveta, a observação do destaque no lado direito da Figura 71, permite observar isso mesmo. Denota-se que a gaveta se encontra ligeiramente elevada em relação à base do aspirador e apoiada lateralmente em guias para a gaveta deslizar. É possível observar na mesma figura o recorte existente na parte superior da gaveta. Este corte tem o sentido de permitir que a gaveta possa ser introduzida e retirada sem embater nas chapas deflectoras que entram ligeiramente dentro da gaveta de forma a garantir que as partículas entram dentro desta. De realçar que este recorte apenas existe nas gavetas da câmara do filtro de cartuchos, pois nos ciclones não houve necessidade de colocação de chapas deflectoras. Na parte interior da gaveta existe uma pega de modo a facilitar o seu transporte.

No aspirador, foram colocadas três gavetas idênticas à da Figura 72, uma para o filtro pré-separador e duas para o filtro principal, cada uma com uma capacidade de 24l.

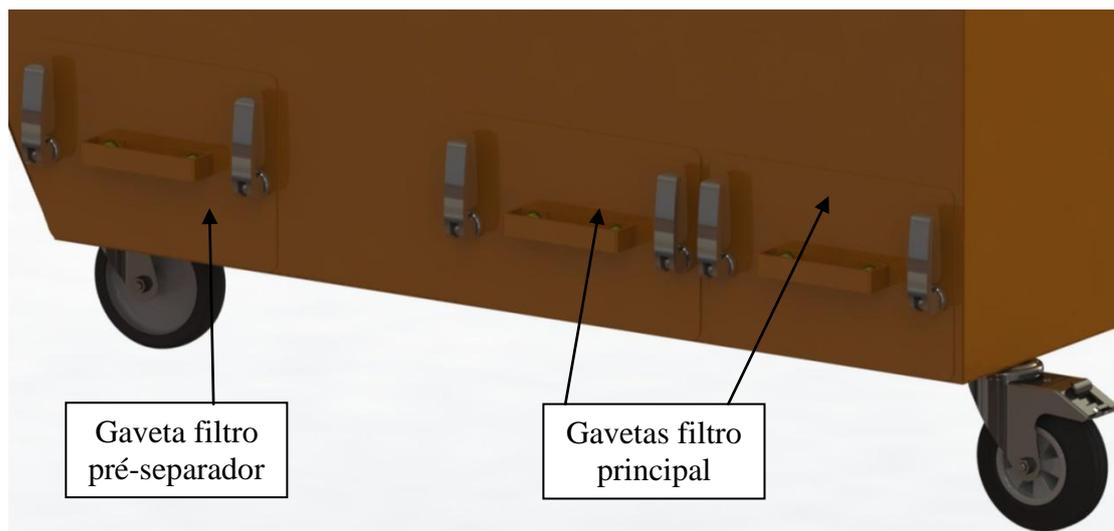


Figura 72 - Gavetas do aspirador

A utilização de três gavetas iguais leva a uma standardização da construção do equipamento e por isso a um menor custo.

A mobilidade do aspirador é conseguida por meio de quatro rodízios (Figura 73), todos eles com eixo rotativo, dois deles, os traseiros, têm travão de modo a ser possível a fixação segura do aspirador até mesmo em superfícies inclinadas. A fixação dos rodízios ao aspirador é feita por flange nos dianteiros e por varão roscado nos traseiros, esta diferença deve-se ao espaço reduzido que existe entre a gaveta e o final do aspirador, que leva a que esta seja a melhor solução. Cada um dos rodízios tem uma capacidade de suportar uma massa até 100 kg.

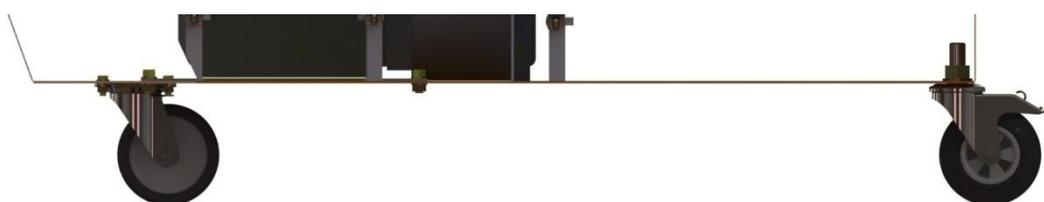


Figura 73 - Rodízios do aspirador

Outro acessório importante é a pega do carrinho que serve para que o operador, quando pretende deslocar o aspirador, de modo a que se consiga controlar a trajectória do aspirador. Para o projecto da pega foi pensada uma solução que alia a funcionalidade à estética geral do equipamento. A forma final da pega encontra-se representada na figura abaixo (Figura 74). A ligação da pega à estrutura é uma ligação aparafusada.



Figura 74 - Ilustração pega aspirador

A preocupação com a manutenção do equipamento levou à inclusão de uma abertura lateral para que facilmente se possa ter acesso a todo o conjunto que se encontra alojado na parte frontal (Ventilador, ciclones, motor, etc.). Esta porta irá também permitir a fácil montagem do equipamento na fase de produção.

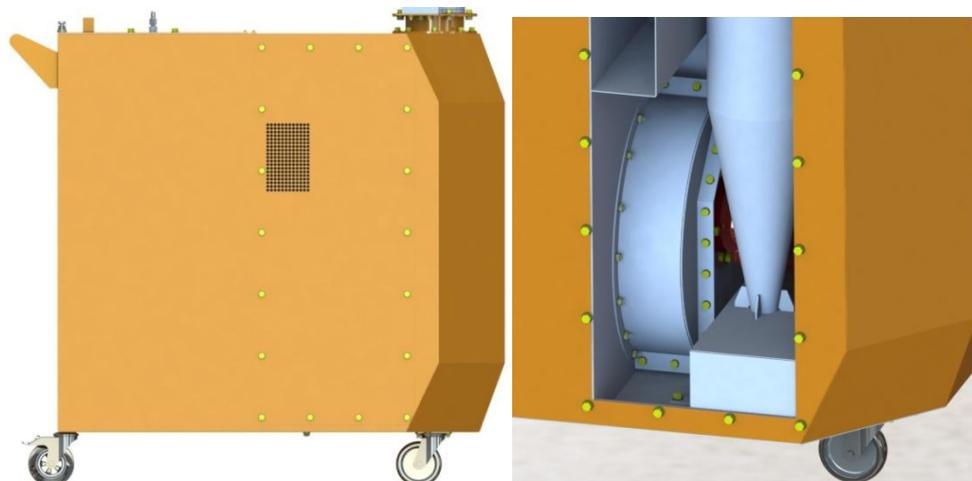


Figura 75 - Porta de manutenção

A porta, inclui uma grelha por onde vai sair o ar do sistema já livre de partículas e odores prejudiciais. Visto que, o acesso a este compartimento vai ser esporádico, a ligação da porta será aparafusada. Este facto tem também em conta a segurança, já que desta forma não é possível o fácil acesso à parte motora do equipamento.

5.7. Características gerais do equipamento

Em linhas gerais o aspirador terá o seguinte aspecto (Figura 74).



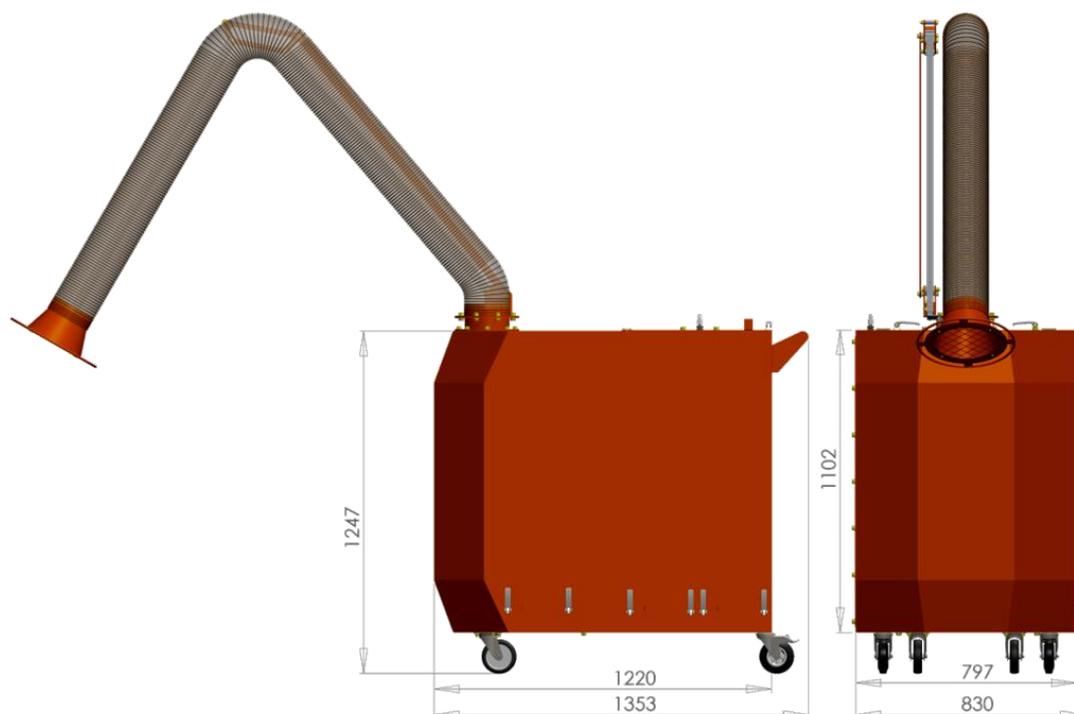
Figura 76 - Ilustração geral do aspirador

Um resumo das principais características do equipamento pode ser visto na tabela abaixo:

Tabela 15 - Características gerais do aspirador

Principais características do aspirador	
Característica	Valor
Caudal (m ³ /h):	1500
Área Filtrante (m ²):	20
Unidade Filtrante:	Ciclones + Filtro de cartuchos + Filtro de carvão activado
Potência Motor (kW):	2,2
Ruído Motor (DBa):	69
Comprimento braço (m):	3
Diâmetro tubo flexível (mm):	160
Peso (kg):	250

As dimensões gerais do aspirador são as seguintes:



Em termos de custo do equipamento, foi efectuado o estudo do custo dos constituintes do equipamento (motor, tubo flexível, rodízios etc.), os preços foram obtidos por contacto directo com o fornecedor, foi também feita uma primeira aproximação ao preço da construção do equipamento em parceria com o principal fornecedor Setimep (ao qual é geralmente contratado o fabrico dos equipamentos projectados pela Setimep). Com estes dois parâmetros determinados, foi possível fazer o levantamento do custo geral do equipamento tendo sido elaborado um mapa de custos dos vários constituintes do equipamento.

De realçar que neste mapa não se encontra uma estimativa de custo das molas do braço articulado. Isto acontece por a data da elaboração deste relatório, não havia ainda contacto firmado com um fornecedor especializado neste sector que auxiliasse no dimensionamento das molas para o braço articulado.

O estudo de custos efectuado e que resultou na elaboração de um mapa de custos do equipamento encontra-se sintetizado na tabela abaixo (Tabela 16):

Construção do equipamento

Tabela 16 - Mapa de custos do sistema de aspiração

	Fornecedor	€ / UNIT	QUANT	PREÇO (€)
Trabalho de Chapa (Inclui material, parafusos, etc.)	METALOGONDE	1.600,00 €	1	1.600,00 €
Cartuchos CAR325/PS1/600/175/COL270B- TF/SV	ALTAIR	80,30 €	2	160,60 €
Carvão activo (BI-ON+ /AC) (5kg)	BIOCONSERVACIÓN	4,13 €	5	20,65 €
Turbina + Venturi do Ventilador (FV 38-R2 S4)	FLAKT SOLIVENT	290,00 €	1	290,00 €
Motor trifásico DRE100M2/FF, P=2,2kW, ED=S1, nM=2880rpm	SEW	283,54 €	1	283,54 €
Conversor de frequência MOVITRAC LTE MCLTEB0022-5A3-4-00, REF=08297193	SEW	285,35 €	1	285,35 €
Temporizador com diferencial de pressão	ASCO NUMATICS	48,56 €	1	48,56 €
Electrovalvula 1/2" (SCG210C087)	ASCO NUMATICS	28,98 €	2	57,96 €
Válvula Anti-retorno 1/2" (346 02 444)	ASCO NUMATICS	6,87 €	1	6,87 €
Passamuros 1/2" ASCO NUMATICS	ASCO NUMATICS	4,93€	1	4,93
Joelho Roscas FF 1/2" (51.213.60)	AIREX	3,00 €	1	3,00 €
Macho Acoplador Ar Jap R. 1/2" (51.315.60)	AIREX	8,25 €	1	8,25 €
Tubo Flexível (HELIFLEX PU METAL) (3m)	HELIFLEX	25,81 €	3	77,42 €
Rodizio GAYNER (33-976-FD)	RODALGÉS	9,87 €	2	19,74 €
Rodizio GAYNER (33-974-FD)	RODALGÉS	8,38 €	2	16,76 €
Vedante espuma (4m)	A.CAQUANT	5,00 €	4	20,00 €
TOTAL				2.903,63 €

6. Conclusões

A realização do presente projecto permitiu adquirir conhecimentos nas mais diversas áreas através de experiências de trabalho que só um projecto completo como o de uma tese de mestrado poderia providenciar.

O tema proposto, um sistema móvel de aspiração e tratamento de partículas, foi bastante interessante e aliciante pois permitiu estudar e obter uma panóplia de conhecimentos.

Como todo o início, a articulação das diferentes áreas de conhecimento não foi fácil, tendo em consideração a tarefa a desenvolver. Uma boa organização num trabalho desta envergadura, foi considerada crucial, bem como, a definição de objectivos claros e tangíveis.

No que ao trabalho desenvolvido diz respeito, para cumprir os objectivos definidos, o sistema foi desmembrado em cinco partes principais, com os resultados que se seguem.

O sistema de captação e transporte consiste numa hotte circular com 226mm de diâmetro com uma capacidade de captar até uma distância de 350mm de distância e que acoplada a um tubo flexível de 3m de comprimento. Este sistema é movimentado e fixo através de um mecanismo de barra e mola. No entanto, este mecanismo, antes de ser implementado, carece de um parecer técnico por parte de um parceiro (fornecedor) especializado na área e que à data da conclusão deste trabalho ainda não existia.

O filtro principal será um filtro de cartuchos de dois cartuchos com uma área filtrante total de 20 m² e com uma capacidade de captar partículas até 0,2 µm. A escolha deste tipo de filtro deveu-se a este ser um tipo de filtro que melhor se adapta às características pretendidas para o equipamento (em termos de mobilidade) e para o tipo de partículas (partículas solidas secas) que se pretende captar. Para uma extensão da vida útil dos cartuchos foi incluído um sistema de limpeza automática (por ar comprimido) do filtro com capacidade para duas limpezas.

O filtro pré-separador será um sistema de multiciclones (composto por dois ciclones em paralelo), com dimensões gerais de (800x600x200mm) e com uma capacidade de captar partículas até 12 µm. A escolha deste tipo de filtro pré-separador depende-se do facto de ser o único capaz de captar as partículas de forma eficiente e ocupando um espaço razoável.

O filtro de remoção de odores vai ser um filtro de 5kg de carvão activo com permanganato de potássio, este valor foi o recomendado pelo fabricante tendo em conta o caudal de ar a tratar e a temperatura do mesmo.

O ventilador será um Ventilador com uma capacidade de gerar 308 mmca de pressão e um caudal de 1500 m³/h a uma velocidade de 3500 rpm. A opção por este ventilador, foi pelo facto de ser o que melhor se adequa a esta aplicação, já que consegue vencer as perdas de carga ao longo do sistema e debitar o caudal pretendido, tudo isto com um ventilador de dimensões reduzidas.

No que diz respeito à construção do sistema, esta foi pensada de modo a considerar os seguintes aspectos: Desgaste/aerodinâmica do sistema, espaço, fabrico/custo e estética. O material escolhido como preferencial foi o aço de construção S235JR e o processo de fabrico a construção soldada. A escolha deste material e processo de fabrico foi feita pois são os que minimizam o custo de fabrico (tendo em conta uma cadência de produção unitária).

A maioria dos objectivos, propostos para o trabalho, foram atingidos com a obtenção de um equipamento móvel (dimensões de 800x1200x1200mm) com um caudal de 1500 m³/h capaz de aspirar e tratar partículas solidas com dimensões de até 0,2 µm a um preço considerado competitivo (<3000€).

No entanto, não foi possível atingir o parâmetro, previamente definido, relativo ao peso do equipamento, que foi ultrapassado em mais de 50% devido ao material escolhido para a produção do equipamento, o aço de construção S235JR.

A especificação do peso a atingir estipulada pela Setimep (150kg) foi fruto de uma análise primária do mercado (dos sistemas de aspiração de fumos) que revelou que muitos destes equipamentos têm um peso na ordem dos 100 a 180 kg. Contudo, uma observação mais atenta mostra que estes equipamentos, com peso mais reduzido, são equipamentos estudados e desenvolvidos por multinacionais, em que a escala de venda se mede aos milhares e não às unidades. Por este motivo, a aposta destas empresas passa pela aplicação de materiais poliméricos mais leves, o que provoca uma grande redução do peso mas cujo custo de desenvolvimento é neste momento, e para o nível de produção pretendido, proibitivo para a Setimep.

Em resumo é possível concluir que foi possível dimensionar com sucesso um sistema móvel de aspiração e tratamento de partículas com as características desejadas, faltando agora, passar do papel para a prática, através da produção de um protótipo para testes, de forma a ser possível colocar o equipamento à venda.

7. Propostas de trabalho futuro

A partir deste ponto e como trabalho futuro a desenvolver será interessante o estudo do comportamento do sistema usando um software de simulação obtendo-se, deste modo, uma forma de validação dos cálculos teóricos efectuados, para além de se estudar opções alternativas do sistema.

Para além disso será importante a construção de um protótipo físico para testar o seu funcionamento e verificar se este consegue realmente cumprir com os propósitos para o qual foi dimensionado.

Com o produto devidamente testado, validado e pronto para venda, será interessante o estudo de outras versões deste equipamento, como por exemplo a possibilidade de comercialização sem o módulo de pré-separação, assim como de opcionais para o equipamento, como iluminação, outros tipos de tubos, etc.

8. Bibliografia

DE NEVERS, Noel

Air Pollution Control Engineering, McGraw-Hill, 1995

FAN, Liang-Shih; ZHU, Chao

Principles of Gas-Solid Flows, Cambridge University Press, 1998

MACINTYRE, Archibald Joseph

Ventilação Industrial e Controle da Poluição, 2.^a Edição, LTC, 1990

MACEDO, Ricardo

Manual de Higiene do Trabalho na Indústria, Fundação Calouste Gulbenkian, 1988

BROWN, R. C.

Air Filtration, Pergamon Press, 1993

PLOG, Barbara A.; MPH; CIH; CSP;

Fundamentals of Industrial Hygiene, 3.^a Edição, National Safety Council, 1988

MARTINS, Luís

Apontamentos de Projecto de Redes de Fluidos, 2009

HAWKESA, Jeremy J.; COAKLEY, W. Terence; GROSCHL, Martin; BENES, Ewald; ARMSTRONG, Sian; TASKER, Paul J.; NOWOTNY, Helmut

Single half-wavelength ultrasonic particle filter: Predictions of the transfer matrix multilayer resonator model and experimental filtration results, 2001

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS

Adsorption Design Guide, U.S ARMY , 2001

M J French and M B Widde

The spring-and-lever balancing mechanism, George Carwardine and the Anglepoise lamp, Lancaster University, UK, 2000

MIRANDA, António Augusto Sousa
Apontamentos de Órgãos de Máquinas, 2008

NUNES, António Vasco Amaral
Apontamentos de Ventilação industrial, 2007

ESTEVES, João Miguel Clemente de Sena
Apontamentos de electrotecnia e electrónica, 2008

9. Referências

- [1] <http://www.masterresource.org/2010/04/population-consumption-carbon-emissions-and-human-well-being-in-the-age-of-industrialization-part-iii-have-higher-us-population-consumption-and-newer-technologies-reduced-well-being/>, acessado em 05/08/2011
- [2] [http://www.plymovent.com/plymovent-int-en/products/mobile_filters_\(welding_fumes\)](http://www.plymovent.com/plymovent-int-en/products/mobile_filters_(welding_fumes)), acessado em 05/04/2011
- [3] <http://fgmindustrial.com/dustcollectors.html>, acessado em 30/06/2011.
- [4] <http://www.heliflex.pt/ficheiros/catalogo2011.pdf>, acessado em 28/09/2011
- [5] Apêndice técnico Heliflex
- [6] <http://www.ccohs.ca/oshanswers/prevention/ventilation/hoods.html>, acessado em 02/10/2011
- [7] Apontamentos de Ventilação Industrial, Amaral Nunes
- [8] Fundamentals of Industrial Hygiene, 3.^a Edição, National Safety Council, 1988
- [9] Single half-wavelength ultrasonic particle filter: Predictions of the transfer matrix multilayer resonator model and experimental filtration results, 2001
- [10] Principles of Gas-Solid Flows, Cambridge University Press, 1998
- [11] Ventilação Industrial e Controle da Poluição, 2.^a Edição, LTC, 1990
- [12] www.Altair-srl.com, acessado em 22/08/2011
- [13] Air Pollution Control Engineering, McGraw-Hill, 1995
- [14] Apontamentos de Projecto de Redes de Fluidos, 2009

- [15] <http://www.phreshfilter.com/difference.php>, acessado a 22/10/2011
- [16] Adsorption Design Guide, U.S. Army Corps of Engineers, 2001
- [17] <http://www.flaktwoods.fr/>, acessado em 22/02/2011
- [18] <http://www.sew-eurodrive.pt/>, acessado em 22/02/2011
- [19] <http://arco-a-jesus.blogspot.com/>, acessado em 22/09/2011
- [20] www.wikipédia.pt, acessado em 22/01/2011
- [21] The spring-and-lever balancing mechanism, George Carwardine and the Anglepoise lamp
- [22] Apontamentos de Órgãos de Máquinas, 2008

Anexos

Anexo A

Análise de Mercado

Tabela 17 - Tabela de análise de mercado

				
Empresa	AirBravo	Donaldson	Euromate	Nederman
País	Itália	USA	Holanda	Suécia
Modelos	Airbox 750 Airbox1250 Airbox2000	Easy-trunk Porta-trunk	MFE MFD MFS	FilterCart Original FilterCart W3 FilterCart Carbon
Preço				
Tipo de filtro	Mecânico + carvão activado Electroestático + carvão activado	Nanofibras de celulose	Mecânico + carvão activado Electroestático + carvão activado	HEPA + carvão activado
Capacidade (m3/h)	Airbox750 - 750 Airbox1250 - 1250 Airbox2000 - 2000	Easy-trunk - 1274 Porta-trunk - 1324	MFE - 1300 MFD - 1250 MFS - 1250	FilterCart Original - 1050 FilterCart W3 - 600 a 1050 FilterCart Carbon - 600
Potência Motor (kw)	Airbox750 - 0,55 Airbox1250 - 0,75 Airbox2000 - 1,5	Easy-trunk - 1.12 Porta-trunk - 1.12	MFE - 0.75 MFD - 0.75 MFS - 0.75	FilterCart Original - 0,75 FilterCart W3 - 0,75 FilterCart Carbon - 0,55
Dimensões (mm)	Airbox750 - 680*425*800 Airbox1250-680*700*1160 Airbox2000-680*700*1160	Easy-trunk - 711*1040*980 Porta-trunk - 699*1020*899	MFE - 1210*810*900 MFD - 1210*810*900 MFS - 1210*810*1020	FilterCart Original - 1145*770*1410 FilterCart W3 - 1145*770*1410 FilterCart Carbon - 1145*770*1410
Nível de ruído (dba)	Airbox750 - 68 Airbox1250 - 72 Airbox2000 - 72	Easy-trunk - 70 Porta-trunk - 75	MFE - 69 MFD - 69 MFS - 69	FilterCart Original - 73 FilterCart W3 - 73 FilterCart Carbon - 74
Comprimento do Braço (m)	Airbox750 - 2 Airbox1250 - 3 Airbox2000 - 3	Easy-trunk - 2ou3 Porta-trunk - 2ou3	MFE - 4 a 10 MFD - 4 a 10 MFS - 4 a 10	FilterCart Original - 2 ou 3 FilterCart W3 - 2 ou 3 FilterCart Carbon - 2
Diâmetro do tubo (mm)	Airbox750 - 125 Airbox1250 - 150 Airbox2000 - 200	Easy-trunk - 152 Porta-trunk - 152	MFE - 200 MFD - 200 MFS - 200	FilterCart Original - 160 FilterCart W3 - 160 FilterCart Carbon - 160
Peso (kg)	Airbox750 - 75 Airbox1250 - 133 ou 190 Airbox2000 - 195 ou 225	Easy-trunk - 181 Porta-trunk - 154	MFE - 145 MFD - 108 MFS - 130	FilterCart Original - 73 FilterCart W3 - 73 FilterCart Carbon - 82
Sistema de movimentação do braço	mecanismo exterior	mecanismo exterior	Manga flexível	Manga flexível
Sistema de limpeza do filtro	Airbox750 - não Airbox1250 - não Airbox2000 - não	Easy-trunk - sim Porta-trunk - não	Opcional	
Representação em Portugal	Não	Não	Sim -Electro-Portugal, Lda e Manutan	Sim - Nederman Iberica SA - Portugal

				
Empresa	Nederman	Airtec	ULT AG	Fumex
País	Suécia	Alemanha	Alemanha	Suécia
Modelos	WeldFilter C10	FUMO	SRA SKW	MF
Preço				
Tipo de filtro	HEPA + carvão activado		Mecânico + carvão activado	Mecânico resistente à chama + Carvão activado opcional
Capacidade (m³/h)	500 a 900	1200 a 3950	SRA - 1600 ou 2360 SKW - 1200 ou 1800	1200
Potência Motor (kw)	1,1	1,1 a 4	SRA - 1,1 ou 2,2 SKW - 0,75 ou 1,1	0,75
Dimensões (mm)	840*665*1270		SRA - 680*750*1225 SKW - 700*700*1300	960*470*640
Nível de ruído (dba)			SRA - 62 ou 63 SKW - 75 a 78	
Comprimento do Braço (m)	3		2,7 a 9	2
Diâmetro do tubo (mm)	160		120 a 180	160
Peso (kg)	175		SRA - 110 ou 135 SKW - 135 ou 140	78
Sistema de movimentação do braço	Manga flexível		Mecanismo exterior	Mecanismo exterior
Sistema de limpeza do filtro	Filtro lavável		Opcional	
Representação em Portugal	Sim - Nederman Iberica SA - Portugal	Não	Não	Não

				
Empresa	Teka	PlymoVent	Plymoth	Coral
País	Alemanha	Suécia	Suécia	Itália
Modelos	Filtoo StrongMaster	EMK MFC M1	Mobi-Flex	Clean Go Cleaning No-Smoke JetClean
Preço (€)	Filtoo - 999 StrongMaster-3335 a 3950	EMK MFC M1		Clean Go Cleaning No-Smoke JetClean
Tipo de filtro	Pré-filtro+filtro mecânico+ carvão Filtro de cartuchos PTFE	Electroestático ou mecânico + carvão activado	Mecânico	Mecânico + carvão activado electroestático + carvão activado
Capacidade (m3/h)	Filtoo - 2500 StrongMaster - 3000	EMK - 1500 MFC - 1200 M1 - 1400	1000	Clean Go - 1380 ou 1420 Cleaning No-Smoke - 1600 ou 2000 JetClean - 1100 a 1600
Potência Motor (kw)	Filtoo - 1,1 StrongMaster - 1,1	EMK - 0,75 MFC - 1,1 M1	0,75	Clean Go - 1,1 Cleaning No-Smoke - 1,1 ou 2,2 JetClean - 0,75 a 2,2
Dimensões (mm)	Filtoo - 580*580*900 StrongMaster - 665*776*1265	EMK-900*1340*1240 MFC - 689*771*1007 M1 - 1170*790*970		Clean Go - 700*1038*738 Cleaning No-Smoke- 810*810*1150 JetClean - 896*730*985
Nível de ruído (dba)	Filtoo - 72 StrongMaster - 70	EMK - 70 MFC - 70 M1 - 70		Clean Go - 76 Cleaning No-Smoke - 74 ou 76 JetClean - 71 a 75
Comprimento do Braço (m)	Filtoo - 3 StrongMaster - 2 a 4	EMK - 2 a 4 MFC - 3 M1 - 2 a 4	1,5 a 3	Clean Go - 2,5 Cleaning No-Smoke - 2,5 JetClean - 2,5
Diâmetro do tubo (mm)	Filtoo - 160 StrongMaster - 160	EMK - 125 a 160 MFC - 125 a 160 M1 - 125 a 160	160	Clean Go - 150 Cleaning No-Smoke - 150 ou 180 JetClean - 150
Peso (kg)	Filtoo - 80 StrongMaster - 130	EMK - 118 MFC - 119 M1 - 169		Clean Go - 131 ou 151 Cleaning No-Smoke - 148 ou 176 JetClean - 125 a 160
Sistema de movimentação do braço	Filtoo - Manga flexível StrongMaster - vários	Manga Fléxivel, M1 com curva fléxivel ou manga fléxivel	Manga fléxivel	Mecanismo exterior
Sistema de limpeza do filtro		Lavável, M1 com limpeza automática		
Representação em Portugal	Não	Sim - Metec	Não	Sim - Ventasel

				
Empresa	MonoxiVent	KLEPP	Lincoln	Kemper
País	USA	Alemanha	USA	Alemanha
Modelos	PHS PCFS	KSF	Mobiflex 200-M Mobiflex 400-M	Filter-Master Filter-Master XL
Preço (€)				Filter-Master - 1600 a 3000 Filter-Master XL - 4100 a 6100
Tipo de filtro	Filtro HEPA ou mecânico+ carvão activado	Filtro HEPA	Celulose ou Celulose + Polyester	Mecânico ou electrostático ou PTFE
Capacidade (m3/h)	PHS - 1275 PCFS - 1275	1500	1250	Filter-Master - 1200 Filter-Master XL - 1000
Potência Motor (kw)	PHS - 1,1 PCFS - 1,1	2,2		Filter-Master - 1,1 Filter-Master XL - 1,5
Dimensões (mm)		670*760*1325	900*810*1210 ou 1020*810*1210	Filter-Master - 655*655*1020 Filter-Master XL - 655*655*1460
Nível de ruído (dba)				Filter-Master - 68 Filter-Master XL - 69
Comprimento do Braço (m)	PHS - 2 a 3 PCFS - 2 a 3		3 a 4	Filter-Master - 2 a 4 Filter-Master XL - 2 a 4
Diâmetro do tubo (mm)			200	Filter-Master - 150 Filter-Master XL - 150
Peso (kg)	PHS - 136 PCFS - 163		Mobiflex 200-M - 111 Mobiflex 400-M - 130	Filter-Master - 80 Filter-Master XL - 135
Sistema de movimentação do braço	Manga flexível	Manga flexível	Rigido com curva flexível	Manga Flexível ou rigido com curva flexível
Sistema de limpeza do filtro			200-M - Não 400-M - Sim	
Representação em Portugal	Não	Não	Sim, Electro-Arco	Sim, SCH Helvética

Processamento / Material poluente	Dimensões das partículas [µm]	Características / Poluente	M³/m² h	Velocidade de filtração m/l'	Tipo média filtrante recomendado	Tratamento superficial recomendado
Pólvore de amianto	< 100	cancerígeno	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270B-AL	
Sulfato de cálcio em pó		higroscópico	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B-TF	
Cimento	3,0 - 40	higroscópico	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B	
Pó de cinzas de carvão		-	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270B-TF	
Pó de carvão	< 40	explosivo	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B-AL	
Metallização	x min. < 1, media < 10	explosivo	30 - 42	0,5 - 0,7	COL 270B-AL	Aerosil (precoating)
Farinha	< 200	explosivo	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270B-AL	
Fumos de corte c/oxigênio e inox	x min. < 1, media < 10	-	36 - 48	0,6 - 0,8	COL 270B-TF	Aerosil (precoating)
Pó de grafite	3,0 - 50	explosivo	30 - 36	0,5 - 0,6	COL 270B-AL	
Pó de moagem latão	< 40	-	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B-TF	
Pó de moagem ferro fundido	< 60	-	60 - 72	1 - 1,2	COL 270B-TF	
Pó de moagem matérias plásticas	4 - 100	eletrostático	66 - 78	1,1 - 1,3	COL 270B-AL	
Pó de moagem inox	< 40	-	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B-TF	
Pó de moagem aço	2,0 - 30	aderente	60 - 72	1 - 1,2	COL 270B-TF	
Pó de moagem madeira	2 - 200	fibroso	60 - 72	1 - 1,2	COL 270B-TF	
Fumos de corte laser	x min. < 1, media < 10	aderente	30 - 36	0,5 - 0,6	COL 270B-TF	Cal viva com pedra pré-revestida
Fumos de corte laser inox	x min. < 1, media < 10	-	30 - 36	0,5 - 0,6	COL 270B-TF	Aerosil (precoating)
Pó de cal	3,0 - 50	-	30 - 37	0,5 - 0,6	COL 270W	

Processamento / Material poluente	Dimensões das partículas [µm]	Características / Poluente	M³/m² h	Velocidade de filtração m/l'	Tipo média filtrante recomendado	Tratamento superficial recomendado
Leite em pó		-	36 - 48	0,6 - 0,8	COL 270B-TF	Aerosil (precoating)
Formadura	2,0 - 40	-	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B-TF	
Pó papel	< 1000	fibroso-eletrostático	50 - 60	0,83 - 1	COL 270B-AL	Fibra pré-separadora
Pós de pintura cerâmica por arco-plasma	x min. < 1, media < 10	-	30 - 42	0,5 - 0,7	COL 270B-AL	
Pós de pintura metais por arco-plasma	x min. < 1, media < 10	-	30 - 42	0,5 - 0,7	COL 270B-AL	Aerosil (precoating)
Fumos de corte plasma, aço inox	x min. < 1, media < 10	-	36 - 48	0,6 - 0,8	COL 270B-TF/AL	Aerosil (precoating)
Pó de lustração latão	3,0 - 30	aderente	42 - 54	0,7 - 0,9	COL 270W	
Pó de lustração inox		fibroso	60 - 72	1 - 1,2	COL 270W	Fibra pré-separadora
Pó de tratamento com granalha aço (centrifuga)	< 200	aglomerante	54 - 66	0,9 - 1,1	COL 270B	
Pó de tratamento com granalha cerâmica	< 100	-	66 - 78	1,1 - 1,3	COL 270B	
Pó de tratamento com granalha cerâmica (a mão)	< 100	-	72 - 90	1,2 - 1,5	COL 270B	
Pó de tratamento com granalha aço	< 50	aglomerante	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B	
Pó de tratamento com granalha pedra	< 100	aglomerante	66 - 78	1,1 - 1,3	COL 270B	
Açúcar em pó	5 - 200	higroscópico, explosivo	48 - 54	0,8 - 0,9	COL 270B-AL	
Tabaco em pó		-	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B	
Pó de pigmentos colorantes	< 10	cancerígeno	24 - 30	0,4 - 0,5	COL 270B-AL	
Cinzas de incineradores de lixos	2 - 200	higroscópico	30 - 36	0,5 - 0,6	COL 270W	
Fumo de soldadura sistema exaustão Fumo de moagem, moagem inox	x min. < 1, media < 10	decapado	48 - 60	0,8 - 1	COL 270W	Aerosil (precoating)
Fumo de soldadura sistema exaustão Fumo de moagem, moagem inox	x min. < 1, media < 10	oleoso	36 - 48	0,6 - 0,8	COL 270B-TF	Revestimento com teflon
Corte laser em plexiglass	x min. < 1, media < 10	aderente, aglomerante	24 - 30	0,4 - 0,5	COL 270W	Aerosil (precoating) in contínuo
Pó de carvão		-	60 - 72	1 - 1,2	COL 270B-AL	
Pó de alumínio		aderente, explosivo	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270B-AL	Aerosil (precoating)
Pó de alumina		-	18 - 30	0,3 - 0,5	COL 270B-AL	Aerosil (precoating)
Pó de tijolos		-	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270W	

Figura 78 – Pag. 1 Catálogo ALTAIR seleção de material filtrante

Processamento / Material poluente	Dimensões das partículas [µm]	Características / Poluente	M³/m² h	Velocidade de filtragem m/l'	Tipo média filtrante recomendado	Tratamento superficial recomendado
Negro fumo		higroscópico	18 - 30	0,3 - 0,5	COL 270B-TF	Aerosil (precoating)
Pó de ferro fundido		aglomerante	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270W	Aerosil (precoating)
Pó de cerâmica		-	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B	
Pó de argila	10 - 40	higroscópico	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270B-TF	
Pó de café		-	60 - 72	1 - 1,2	COL 270B	
Pó de terra		-	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B	
Pó de alimentos		aglomerante	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270B-TF	Aerosil (precoating)
Pó de fertilizantes		-	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270W	
Pó de gesso		-	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270W	
Pó de couro		eletrostático	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B-AL	
Cal com pedra	3,0 - 50	-	66 - 78	1,1 - 1,3	COL 270B	
Pó de mármore	< 50	eletrostático	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270B-AL	
Pós metálicos oleosos	< 200	-	48 - 50	0,8 - 0,83	COL 270B-OWR	Aerosil (precoating)
Pós metálicos secos	< 200	eletrostático	60 - 72	1 - 1,2	COL 270B-AL	
Pó de amoladura metais	< 200	eletrostático	60 - 72	1 - 1,2	COL 270B-AL	
Pós farmacêuticos	< 50	-	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270W	Aerosil (precoating)
Pós plásticos	< 200	eletrostático	48 - 50	0,8 - 0,83	COL 270B-AL	
Pós de PVC	< 200	eletrostático	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B-AL	

Processamento / Material poluente	Dimensões das partículas [µm]	Características / Poluente	M³/m² h	Velocidade de filtragem m/l'	Tipo média filtrante recomendado	Tratamento superficial recomendado
Pintura a pó	< 50	eletrostático	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B-AL	
Pó de corte borracha		aglomerante	48 - 60	0,8 - 1	COL 270W	Aerosil (precoating)
Sai em pó		-	30 - 35	0,5 - 0,58	COL 270B-AL	
Tratamento jato de areia metais	< 200	-	55 - 60	0,9 - 1	COL 270B	
Serragem	< 200	-	60 - 72	1 - 1,2	COL 270B	
Silica		eletrostático	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B-AL	
Silicatos		eletrostático	48 - 60	0,8 - 1	COL 270B-AL	
Purga silos pré-misturados para construção		-	34 - 48	0,56 - 0,8	COL 270W	
Amido		aglomerante	30 - 48	0,5 - 0,8	COL 270W	Aerosil (precoating)
Pó de talco		-	18 - 34	0,3 - 0,56	COL 270W	Aerosil (precoating)
Pó de toner		-	22 - 34	0,36 - 0,56	COL 270B-AL	Aerosil (precoating)
Fumos de soldadura em aço oleoso	< 50	oleoso	36 - 48	0,6 - 0,8	COL 270B-TF	Aerosil (precoating)
Fumos de soldadura em aço decapado	< 50	decapado	48 - 60	0,8 - 1	COL 270W	
Pó de polimento madeira	< 100	-	55 - 60	0,9 - 1	COL 270B	
Pó de polimento pintura	< 50	eletrostático	48 - 55	0,8 - 0,9	COL 270B-AL	
Mesclagem pigmentos tintas		-	33 - 40	0,56 - 0,66	COL 270W	
Pós de processo de desmonte de fusões em ferro		-	55 - 60	0,9 - 1	COL 270B	
Purga silos pós plásticos		-	38 - 48	0,63 - 0,8	COL 270W	

Os valores levam em consideração uma concentração média compreendida entre 0 e 10 g/m³. Supõe-se um fundo de assentamento compreendido entre 80 e 120 mm H₂O. Sem uma poeira residual média <= 8 mg/m³. Se por ventura a concentração das poeiras na entrada for acima de 10 g/m³ recomendamos de reduzir o valor da velocidade de aproximadamente 20%. Para informações mais pormenorizadas contactar o nosso Departamento Técnico.

N.B. Todos os dados contidos neste catálogo podem ser submetidos a alterações e aperfeiçoamentos. ALTAIR reserva-se o direito de efectuar alterações sem aviso prévio. A empresa ALTAIR não assume nenhuma responsabilidade com referência ao projecto e à dimensão de todo o sistema.

Figura 79 – Pag. 2 Catálogo ALTAIR selecção de material filtrante

Anexo C

Lei de Stokes

Em muitos casos um fluxo (gás + partículas) pode ser bem aproximado pela lei de Stokes, na qual é ignorada a influência da inércia (o n.º de Reynolds é considerado igual a zero).

Imagine-se uma partícula esférica que está a assentar num fluido gasoso tal como se vê na Figura 80.

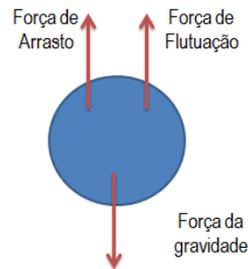


Figura 80 - Forças actuantes sobre uma partícula num fluido [13]

Escrevendo a Lei de Newton para a partícula obtém-se a seguinte equação:

$$m \cdot a = \rho_{particula} \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot D^3 \cdot g - \rho_{fluido} \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot D^3 \cdot g - F_d \quad (41)$$

O termo $m \cdot a$ representa a aceleração descendente da partícula. Os três termos no lado direito de equação são respectivamente, a força da gravidade, a força de flutuação e a força de arrasto (resistência ao ar) que actuam sobre a partícula.

Se uma partícula está inicialmente numa posição de repouso a sua velocidade inicial é zero, assim como a força de arrasto que é proporcional à velocidade. Se esta acelera rapidamente, à medida que acelera a força de arrasto aumenta com a velocidade até que seja igual à força da gravidade menos a força de flutuação.

A esta velocidade, chamada de velocidade terminal de assentamento, o somatório das forças actuantes na partícula é igual a zero. Para calcular esta velocidade, e sabendo que a essa velocidade a aceleração é igual a zero temos que:

$$F_d = \left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot D^3 \cdot g \cdot (\rho_{particula} - \rho_{fluido}) \quad (42)$$

Para cálculo da velocidade terminal de assentamento, é necessária uma relação entre a força de arrasto e a velocidade. Esta relação foi estudada e trabalhada matematicamente por Stokes resultando na seguinte equação:

$$F_d = 3 \cdot \pi \cdot \mu_{fluido} \cdot D \cdot U \quad (43)$$

O que alterando na equação acima e resolvendo em ordem à velocidade (U) temos:

$$U = g \cdot D^2 \cdot \frac{(\rho_{partícula} - \rho_{fluido})}{18 \cdot \mu_{fluido}} \quad (44)$$

Esta equação é conhecida pelo nome de Lei de Stokes.

A Lei de Stokes já foi verificada numa vasta gama de situações em que as suas assunções se mostraram boas. No entanto, tanto para partículas muito grandes como para partículas muito pequenas verifica-se que as assunções da Lei falham.

Partículas demasiado grandes para a aplicação da Lei de Stokes

Quando se vai para partículas de cada vez maior dimensão, eventualmente verifica-se que o fluxo de fluido que passa a volta da esfera deixa de obedecer à aproximação de que a velocidade na periferia é negligenciável. Assim a equação de arrasto de Stokes, que é baseada nessa assunção, torna-se imprecisa. Em partículas de ainda maior dimensão, o fluxo de fluido em volta da partícula torna-se turbulento e as principais assunções da Lei de Stokes tornam-se inaplicáveis.

Embora tenham sido feitas várias tentativas para encontrar uma fórmula equivalente à estudada por Stokes aplicada a partículas maiores, ainda não existiu fórmula teórica que conseguisse representar os dados obtidos experimentalmente em mais do que uma pequena gama de valores.

No entanto, os dados experimentais podem ser facilmente atingidos com uma relação não dimensional. Um novo parâmetro, denominado por coeficiente de arrasto C_d , é definido pela seguinte equação:

$$C_d = \frac{F_d}{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D^2 \cdot \rho_{fluido} \cdot \left(\frac{V^2}{2}\right)} \quad (45)$$

O n.º de Reynolds, discutido amplamente em textos da área da mecânica dos fluidos, é um número adimensional, e corresponde ao rácio entre as forças de inércia actantes sobre uma massa de fluido e as forças “viscosas” actantes sobre a mesma massa de

fluido no mesmo fluxo. A fórmula com a qual se obtém o n.º de Reynolds para uma partícula é então a seguinte:

$$Re_{particula} = \frac{D \cdot V \cdot \rho_{fluido}}{\mu_{fluido}} \quad (46)$$

Algumas teorias apontam que para esferas lisas, num escoamento de um fluido Newtoniano uniforme, subsónico e de densidade constante, o coeficiente de arrasto (C_d) depende em exclusivo do n.º Reynolds. Esta condição foi verificada experimentalmente com precisão satisfatória para uma gama de n.º de Reynolds de:

$$0.3 \leq Re_{particula} \leq 1000 \quad (47)$$

Verifica-se que para a gama acima representada que a relação entre o n.º de Reynolds e C_d pode ser dada por:

$$C_d = \frac{24}{Re_{particula}} (1 + 0.14 \cdot Re_{particula}^{0.7}) \quad (48)$$

Partículas demasiado pequenas para a aplicação da lei de Stokes

Quando as partículas se tornam demasiado pequenas, outro dos princípios que levaram à lei de Stokes torna-se impreciso. A lei de Stokes assume que um fluido onde uma partícula se move é um meio contínuo. A realidade é que gases e líquidos e sólidos reais não são verdadeiramente meios contínuos, visto que são constituídos por átomos e moléculas.

Se uma partícula, que viaja no fluido, é bastante maior que os espaços entre os átomos e as moléculas do fluido a interacção entre os dois é idêntica à que se verificaria se o fluido fosse um meio contínuo. À medida que se reduz o tamanho da partícula para a ordem do espaço intermolecular do fluido, o modo como a partícula interage com as moléculas do fluido altera-se. Quando uma partícula tem um grande n.º de colisões moleculares por unidade de tempo, a maioria das moléculas faz uma reflexão especular (Figura 81) com o ângulo de reflexão igual ao raio de incidência. Se o n.º de colisões é pequeno, uma fracção significativa das moléculas da colisão é absorvida na superfície da partícula e mantêm-se lá o tempo suficiente para que se “esqueçam” da direcção de onde vieram. Neste caso a reflexão é difusa (Figura 81), ou seja aleatória.

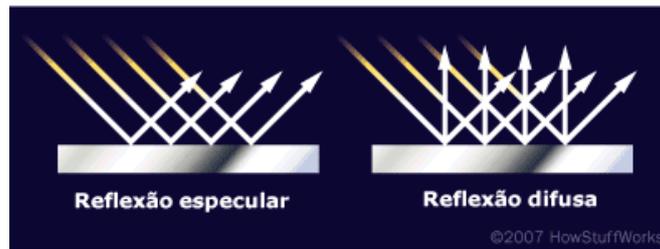


Figura 81 - Reflexão especular vs Reflexão difusa [19]

A mudança de uma reflexão especular para uma reflexão difusa faz baixar a força de arrasto, o que faz com que a partícula se mova mais rapidamente. O factor de correcção que melhor responde a esta mudança de comportamento, e também o mais utilizado tem a seguinte forma:

$$F_d = \frac{F_{d-Stokes}}{1 + \frac{A \cdot \lambda}{D}} \quad (49)$$

O termo $1 + \frac{A \cdot \lambda}{D}$ usado na fórmula é normalmente denominado de Factor de correcção de Cunningham e apenas é aplicado para valores de λ/D na ordem de grandeza igual a 1. Para valores de muito maior ordem de grandeza são usadas fórmulas mais complexas. Apesar de a fórmula para o cálculo preciso de λ serem razoavelmente bem conhecidas (baseadas na medição da viscosidade de fluidos), a constante A não é universal para todas as partículas. A maioria das pessoas utiliza o valor descoberto por Milikan para gotículas de óleo assentando no ar, $A = 1.728$, este valor não deriva de nenhum fundamento teórico e não é necessariamente aplicável para todo o tipo de fluidos mas é bastante utilizado pelo facto de não existir informação melhor.

Conclusão

Experimentalmente verificou-se que para partículas com diâmetro entre $0.1\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$ pode ser utilizada com segurança a lei de Stokes para efeitos de dimensionamento de separadores de partículas visto que para esta gama o erro, no pior dos casos, é de 10%.

Assim e visto que a gama tamanho das partículas que se encontra dentro dessa gama e como não se tratam de dispositivos em que a ordem de precisão exigida é elevada conclui-se que se pode usar a lei de Stokes com segurança para o cálculo dos dispositivos de separação.

Anexo D

Fundamentos Teóricos do dimensionamento de Ventiladores

Diagrama de velocidades

Nos ventiladores, como em todas as turbomáquinas, uma partícula de fluido em contacto com a pá do rotor não tem a mesma trajectória que a do ponto do rotor com a qual a cada instante entra em contacto. Ao mesmo tempo que o ponto da pá descreve uma circunferência, a partícula percorre uma trajectória sobre a superfície de pá (movimento relativo). A composição desse movimento relativo e do movimento simultâneo do ponto da pá (movimento de arrastamento) resulta no movimento absoluto da trajectória da partícula.

Para um determinado ponto M correspondente a uma partícula de fluido em contacto com a pá, podemos caracterizar o movimento pela velocidade ao longo da trajectória correspondente. Na Figura 82 é possível ver o diagrama de velocidade para os pontos 1 (entrada), 2 (saída) e M (ponto aleatório) de uma pá de um ventilador.

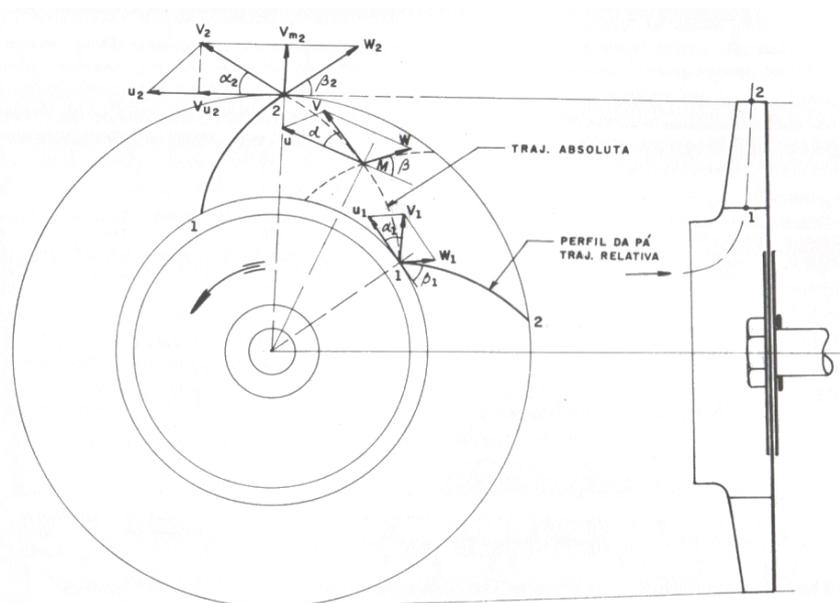


Figura 82 - Diagrama de velocidades na pá de um ventilador [11]

O diagrama de velocidades é formado pelos vectores \vec{U} , \vec{W} e \vec{V} . A velocidade tangencial (\vec{U}) tangente à circunferência descrita pelo ponto M da pá pode ser dado pela seguinte fórmula:

$$U = \Omega \cdot r \quad (50)$$

Em que Ω é o seu módulo e é dado pelo produto da velocidade angular e o raio (r) correspondente ao ponto M ($\Omega = \pi \cdot n/30$ (rad/s)). \vec{W} , corresponde à velocidade relativa, isto é, à velocidade da partícula (no ponto M) percorrendo a trajectória que corresponde ao perfil da pá. \vec{V} , é velocidade absoluta, é dado pela soma geométrica das duas anteriores e é tangente à trajectória absoluta no ponto M .

O diagrama fica completo com a indicação de:

- Ângulo α , que \vec{V} forma com \vec{U} ,
- Ângulo β , que \vec{W} forma com o prolongamento de \vec{U} em sentido oposto. É o ângulo da pá no ponto considerado.
- A projecção de \vec{V} sobre \vec{U} , isto é, a componente periférica de \vec{V} e que é representada por \vec{V}_u . Esta grandeza, aparece na equação da energia cedida pelo rotor ao fluido.
- A projecção de \vec{V} sobre a direcção radial (\vec{V}_m). Esta componente intervém no cálculo do caudal do ventilador.

Os diagramas de velocidades mais importantes são os de entrada e saída das pás do rotor, pois representam as grandezas que aparecem na equação de Euler conhecida como a “Equação de Energia das Turbomáquinas”.

Equação da Energia

Se for aplicada uma potência P , pelo rotor a uma massa de gás de peso específico γ , este gás adquire uma energia H_e (altura de elevação) graças à qual tem condições de escoar segundo um caudal Q .

Pode-se escrever que:

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H_e \quad (50)$$

Leonarde Euler deduziu a equação da energia H_e cedida pelo rotor à unidade de peso de fluido:

$$H_e = \frac{U_2 \cdot V_{U2} - U_1 \cdot V_{U1}}{g} \quad (51)$$

Na grande maioria dos casos, o rotor é projectado de modo a que a entrada do fluido seja radial o que elimina o termo negativo ($\alpha=90^\circ$), simplificando a equação de Euler, ficando da seguinte forma:

$$H_e = \frac{U_2 \cdot V_{U2}}{g} \quad (52)$$

Pelo diagrama de velocidades temos que:

$$\varphi = \frac{V_{U2}}{U_2} = \frac{1}{1 + \frac{\tan \alpha_2}{\tan \beta_2}} \quad (53)$$

Ficando:

$$H_e = \frac{U_2^2}{g} \cdot \varphi \quad (54)$$

Observa-se portanto a importância fundamental do que se passa à saída do rotor e, por consequência, da velocidade de saída U_2 e do ângulo de inclinação das pás à saída do rotor (β_2).

Se for aplicada a equação de Bernoulli aos pontos de saída e à entrada do rotor, chegaremos a uma expressão para a altura total de elevação H_e útil na análise do que acontece no rotor do ventilador. Assim temos:

$$H_e = \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2g} \quad (55)$$

A energia cedida pelo rotor ao fluido pode ser apresentada de duas formas:

- Energia de pressão (pressão estática), dada por:

$$H_p = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} = \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2g} \quad (56)$$

- Energia dinâmica ou cinética, dada por:

$$H_c = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \quad (57)$$

A parcela $\frac{U_2^2 - U_1^2}{2g}$ representa a energia proporcionada pela variação da força centrífuga entre a entrada e a saída enquanto $\frac{W_2^2 - W_1^2}{2g}$ é a energia despendida para fazer a velocidade relativa variar ao longo da pá do rotor.

As grandezas referentes aos fenômenos que ocorrem à entrada e saída do rotor são essenciais para o dimensionamento de um ventilador.

Alturas energéticas

Às parcelas de energia que a unidade de peso de um fluido possui, para deslocar-se entre dois determinados pontos, expressas em altura de coluna do fluido denominam-se por alturas de elevação.

Uma altura de elevação representa o desnível energético entre dois pontos, que pode ser de pressão, de energia cinética ou de ambos. A conceitualização de algumas destas alturas será demonstrada de seguida.

A *energia útil de elevação* H_u ou pressão total é a energia total ganha pelo fluido (por unidade de peso) ao passar pelo ventilador, desde a boca de entrada (índice “O”) até à boca e saída (índice “3”).

$$H_u = \left(\frac{P_3}{\gamma} - \frac{P_0}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_3^2 - V_0^2}{2g} \right) \quad (58)$$

Graças a esta energia recebida, o fluido tem capacidade para escoar ao longo das condutas. Como se pode ver pela fórmula acima, esta energia é constituída por duas parcelas, a Altura de carga estática (H_s), que representa o ganho de energia de pressão do fluido desde a entrada até à saída do ventilador, e a altura de carga dinâmica (H_V) que representa o ganho de energia cinética do fluido desde a entrada até à saída do ventilador.

$$H_s = \frac{P_3}{\gamma} - \frac{P_0}{\gamma} \text{ ou } H_s = H_{s3} - H_{s0} \quad (59)$$

$$H_V = \frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_0^2}{2g} \text{ ou } H_V = H_{V3} - H_{V0} \quad (60)$$

A *altura total de elevação*, H_e é a energia total cedida pelo rotor do ventilador ao fluido. Uma parte desta energia é perdida por efeito e atritos e turbulências no ventilador (denominadas de perdas hidráulicas(H_ε)) de modo que a energia útil (H_u) é igual a:

$$H_u = H_e - H_\varepsilon \quad (61)$$

A altura motriz de elevação H_m , é a energia fornecida pelo veio do motor que acciona o ventilador. Nem toda esta energia é aproveitada pelo rotor para comunicar ao fluido a energia H_e pois parte desta é perdida por perdas mecânicas (H_p) nos rolamentos, na transmissão, etc. Pode-se então escrever que:

$$H_m = H_e - H_p \quad (62)$$

Potências

O trabalho efectuado ou a energia cedida para efectuar trabalho numa determinada unidade de tempo constitui a potência. Isto significa que, a cada altura de elevação corresponde uma potência com a mesma designação.

A *Potência útil* (P_u) é a potência ganha pelo fluido ao passar pelo ventilador:

$$P_u = \gamma \cdot Q \cdot H_u \quad (63)$$

A *Potência total de elevação* (P_e) é a potência cedida pelas pás do rotor ao fluido:

$$P_e = \gamma \cdot Q \cdot H_e \quad (64)$$

A *Potência motriz, mecânica ou efectiva* (P_m) é a potência fornecida pelo motor ao eixo do rotor do ventilador:

$$P_m = \gamma \cdot Q \cdot H_m \quad (65)$$

Rendimentos

O rendimento é a relação entre a potência aproveitada e a fornecida. Temos no caso dos ventiladores:

Rendimento hidráulico

$$\varepsilon = \frac{P_u}{P_e} \quad (66)$$

Rendimento mecânico

$$\rho = \frac{P_e}{P_m} \quad (67)$$

Rendimento total

$$\eta = \frac{P_u}{P_m} \quad (68)$$

Rendimento volumétrico

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + Q_f} \quad (69)$$

Em que:

Q – Volume de gás realmente deslocado por acção do ventilador

Q_f – Volume de gás de gás que fica continuamente a circular no interior do ventilador em consequência das diferenças de pressão que provocam recirculação interna de uma parcela de gás. É normalmente designado por caudal de fugas.

Quando é referida a potência de ventiladores em catálogos, normalmente é sempre fazendo referência à potência motriz.

$$P_m = \gamma \cdot Q \cdot H_m = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_u}{\eta} \quad (70)$$

Quando $V_3 = V_0$, $H_u = H$, assim a potência motriz fica:

$$P_m = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (71)$$

Anexo E

Tabelas do SMACNA utilizadas

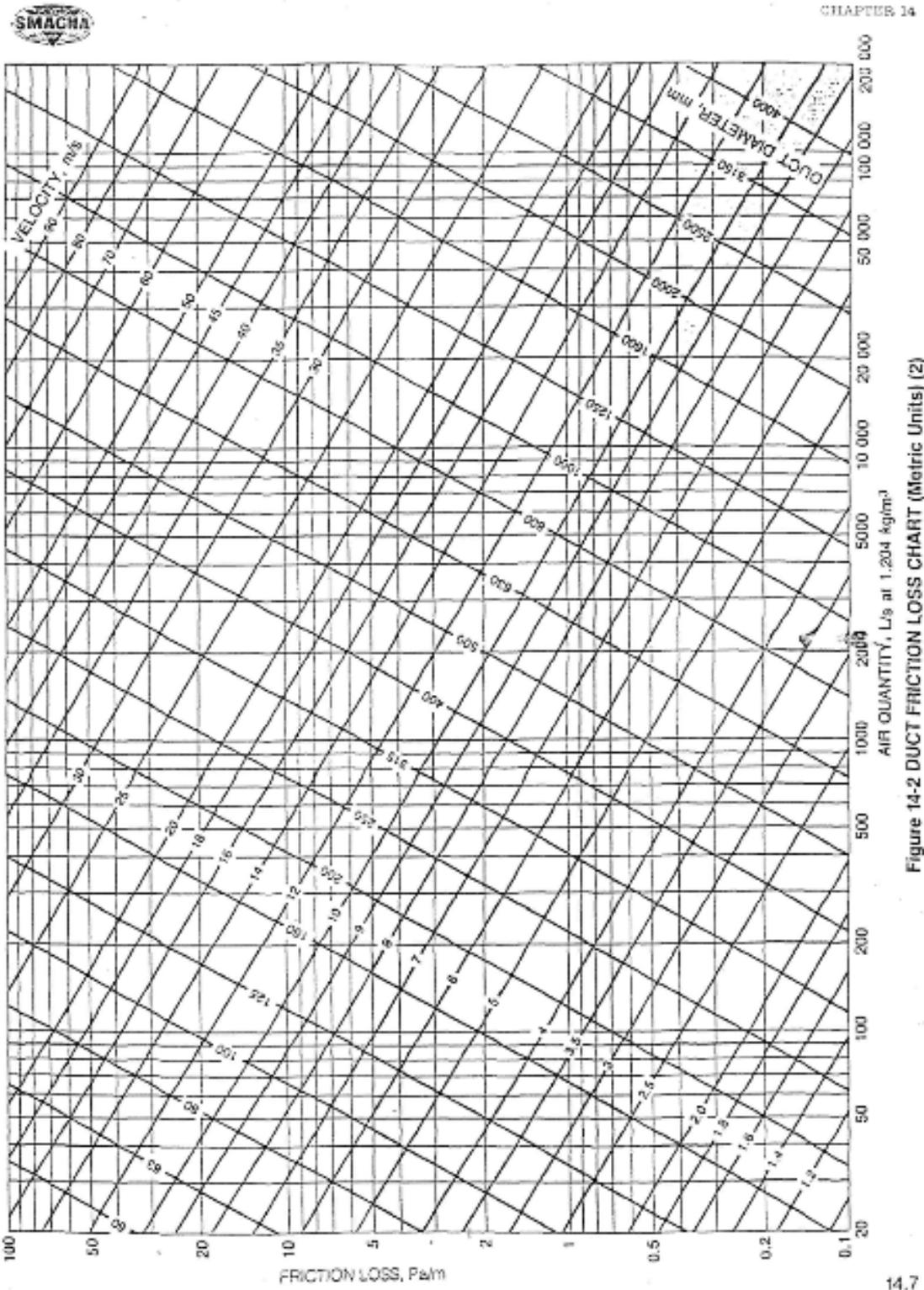
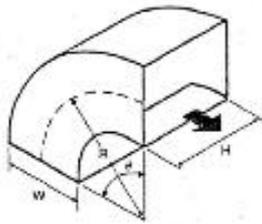


Figure 14-2 DUCT FRICTION LOSS CHART (Metric Units) (2)

Figura 83 - Perda de carga/m de conduta linear [7]

F. Elbow, Rectangular, Smooth Radius without Vanes (15)



Coefficients for 90° elbows: (See Note 1)

R/W	Coefficient C (See Note 3)										
	H/W										
	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0
0.25	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
0.75	0.57	0.52	0.48	0.44	0.40	0.39	0.39	0.40	0.42	0.43	0.44
1.0	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.21	0.21
1.5	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17
2.0	0.20	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15

Note 3: Correction Factor for Reynolds number — K_{Re}

R/W	$Re, 10^4$									
	1	2	3	4	6	8	10	14	20	
0.5	1.40	1.28	1.19	1.14	1.09	1.06	1.04	1.0	1.0	
≥0.75	2.0	1.77	1.64	1.58	1.48	1.38	1.30	1.15	1.0	

U.S. Units
For Standard Air: $Re = 8.56 DV$ (Metric Units)
 $Re = 55.4 DV$

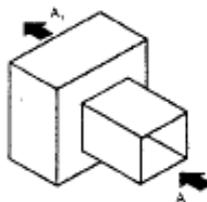
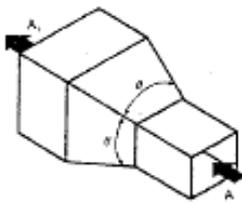
where:
D = duct diameter, inches (mm)
V = duct velocity, fpm (m/s)

For Rectangular Ducts:
 $D = \frac{2HW}{H + W}$

14.20

Figura 84 - Coeficiente de perda de Carga em curvas rectangulares [7]

B. Transition, Rectangular, Pyramidal (15)



When $\theta = 180^\circ$

A ₁ /A	Coefficient C (See Note 6)							
	θ							
	16°	20°	30°	45°	60°	90°	120°	180°
2	0.18	0.22	0.25	0.29	0.31	0.32	0.33	0.30
4	0.36	0.43	0.50	0.56	0.61	0.63	0.63	0.63
6	0.42	0.47	0.58	0.68	0.72	0.76	0.76	0.75
≥10	0.42	0.49	0.59	0.70	0.80	0.87	0.85	0.86

Figura 85 - Coeficiente de perda de carga em transições [7]

Anexo F

Dimensionamento do braço articulado

Os mecanismos de barra e mola foram desenvolvidos por George Cawardine no início do século XX. A grande vantagem da utilização deste tipo de mecanismos são o facto de ser um mecanismo compacto, leve e de baixa inércia. O seu dimensionamento é bastante simples.

Vamos começar por considerar o caso mais simples, a análise do mecanismo simples de barra e mola com apenas um grau de liberdade (Figura 86 a) e b)).

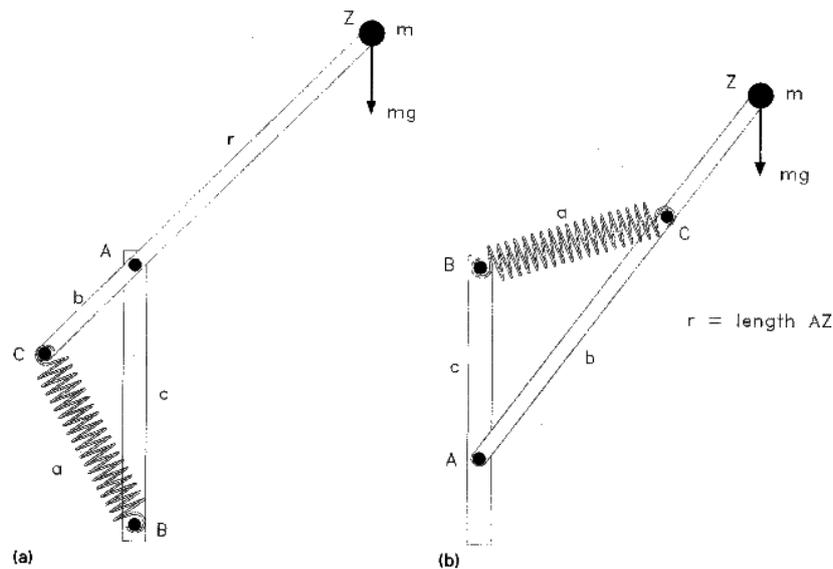


Figura 86 - Mecanismo simples de barra e mola [20]

Como se pode ver existe na Figura 86 a) uma massa (m) no ponto Z do braço CAZ que é pivotada em A pelo braço AB . Todo o mecanismo está num plano vertical e o braço AB está numa posição vertical. O objectivo é suportar a massa m correctamente numa gama alargada de ângulos (θ). Vão ser apresentados dois métodos para resolver este problema.

Método 1:

Seria possível equilibrar o braço utilizando uma força constante vertical e descendente em C igual a mgr/b . A mola CB terá de exercer um momento em A igual ao desta força vertical, para todos os ângulos (θ) do braço.

Considere-se uma força P na direcção AC adicionada à força da mola F , de modo a que o somatório destas duas forças seja vertical. Como P não provoca nenhum momento

em relação a A, a sua resultante vertical tem o mesmo momento em A que a força F, para um balanceamento exacto a resultante tem de ser sempre igual a mgr/b .

Agora considere-se ABC como um triângulo de forças utilizado para obter esta resultante. A resultante representada por AB é vertical e é constante se a força na mola for proporcional a CB, isto é ao comprimento da mola. Então, o comprimento livre da mola tem de ser zero. Para a resultante ser igual a mgr/b , a escala do triângulo de forças tem de ser escolhida de forma a que o comprimento c represente a força mgr/b , assim sendo, uma extensão c da mola daria esta força e o k da mola (relação entre a carga e a deformação da mola) é dada por:

$$k = \frac{m \cdot g \cdot r}{b \cdot c} \quad (72)$$

Método 2

Um método alternativo é o seguinte:

$$\text{Área do triângulo ABC} = \frac{1}{2} \cdot BC \cdot (\text{distância perpendicular de A da linha BC}) \quad (73)$$

Ou seja, o braço em relação a A da força F na mola BC, por outras palavras a distância perpendicular de A da linha BC é:

$$(\text{distância perpendicular de A da linha BC}) = \frac{2 \cdot \text{Área do triângulo ABC}}{BC} \quad (74)$$

No entanto a área do triângulo ABC é igual a:

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot c \cdot \sin \theta \quad (75)$$

Assim sendo, o braço da força F em relação a A é:

$$\frac{b \cdot c \cdot \sin \theta}{a} \quad (76)$$

O momento necessário é $m \cdot g \cdot r \cdot \sin \theta$ por isso, para existir balanceamento, é necessário que:

$$\frac{F \cdot b \cdot c \cdot \sin \theta}{a} = m \cdot g \cdot r \cdot \sin \theta \quad (77)$$

ou,

$$F = \frac{m \cdot g \cdot r}{b \cdot c} \cdot a \quad (78)$$

Por outras palavras, a tensão F na mola é proporcional ao seu comprimento a (tal como referido anteriormente), o k da mola é $k = mgr/bc$. Para que a tensão F seja zero, a também tem de ser zero, isto é, a mola tem de ter comprimento livre zero.

Comprimento livre zero é então o principal requisito para um balanceamento perfeito. Uma mola com zero comprimento livre zero é uma mola que exerce uma força igual a zero quando o seu comprimento é zero. Como é lógico, não existe nenhuma mola que consiga contrair até ao comprimento zero, porque em algum momento as espiras da mola vão tocar uma na outra e a mola não se pode contrair mais. Molas de zero comprimento livre, são fabricadas introduzindo na mola uma pré-tensão de modo a que, se fosse possível contrair a mola para além do mínimo, o ponto de equilíbrio ocorreria no ponto de comprimento zero. Na prática as molas são feitas combinando uma mola com “comprimento negativo (feita com uma pré-tensão tal que o ponto de equilíbrio tenha um comprimento negativo) com um material inelástico de comprimento apropriado de modo a que o ponto força zero seja no de comprimento zero.

Considerando agora um mecanismo de barra e mola idêntico ao que se vai utilizar para controlar o braço do aspirador, isto é, com dois graus de liberdade e que se pode ver na Figura 87.

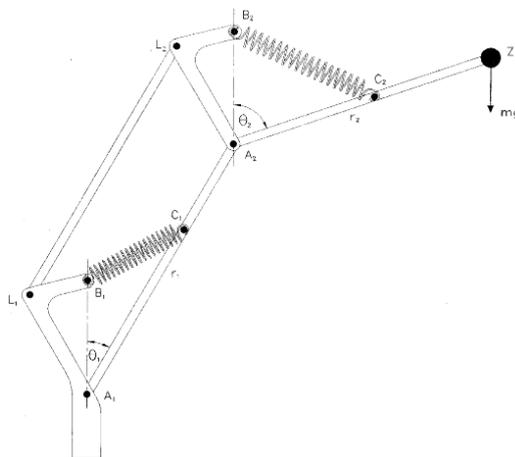


Figura 87 – Mecanismo duplo de barra e mola [20]

Este mecanismo com dois graus de liberdade pode ser feito utilizando um mecanismo de paralelogramo (ou um equivalente) para levar a referência vertical do ponto interior para o exterior. $A_1L_1B_1$ e $A_2L_2B_2$ são ligações rígidas congruentes e a

cadeia paralelogrâmica de barras mantêm A_2B_2 paralelo a A_1B_1 isto é, vertical. A mola B_2C_2 do mecanismo exterior necessita ser desenhada de acordo com os requisitos descritos anteriormente.

No que diz respeito ao mecanismo interior, o peso mg em Z pode ser substituído por uma força mg em A_2 conjuntamente com o par $m \cdot g \cdot r_2 \cdot \sin \theta_2$. A força vertical mg em A_2 é suportada pela mola B_1C_1 que tem de ser comprimento livre zero e uma dureza k calculada utilizando a mesma expressão (72). O par $m \cdot g \cdot r_2 \cdot \sin \theta_2$ é suportado inteiramente pela tensão e compressão nos braços L_1L_2 e A_1A_2 respectivamente e não impõe carga sobre a mola B_1C_1 . Isso é evidente, já que a linha A_1B_2 mantêm-se vertical, assim sendo, o par não faz trabalho quando o ângulo θ_1 varia, por isso, uma vez calculada o k da mola interior de modo a trazer a força mg em A_2 para o equilíbrio, a ligação está balanceada para todos os valores de ângulos θ_1 e θ_2 . Assim para cálculo de k de ambas as molas temos que:

$$k_1 = \frac{m \cdot g \cdot r_1}{b_1 \cdot c_1}$$

e,

$$k_2 = \frac{m \cdot g \cdot r_2}{b_2 \cdot c_2}$$

A força exercida sobre a cada uma das molas é dada pelas equações seguintes:

$$F_1 = \frac{m \cdot g \cdot r_1}{b_1 \cdot c_1} \cdot a_1 \quad (79)$$

e,

$$F_2 = \frac{m \cdot g \cdot r_2}{b_2 \cdot c_2} \cdot a_2$$

Para esta aplicação e tendo em conta os princípios acima descritos e o comprimento do tubo flexível definido (3m), foi definido o seguinte sistema de barras (Figura 88)

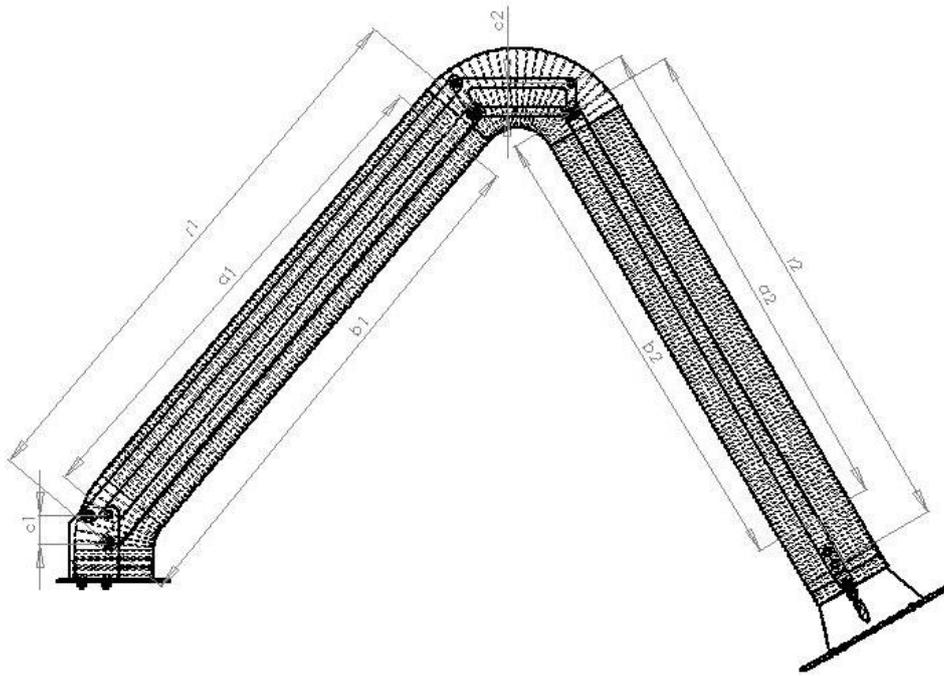


Figura 88 - Sistemas de barras braço tubo flexível

Em que:

$a_1 = 1048mm$	$b_1 = 1094mm$	$c_1 = 60mm$	$r_1 = 60mm$
$a_2 = 1029mm$	$b_2 = 977mm$	$c_2 = 60mm$	$r_2 = 60mm$

Com estas e sabendo que a massa do sistema de captação é de 3,02 kg facilmente se chega ao valor k de cada mola.

$$k_1 = \frac{3,02 \cdot 9,8 \cdot 1,167}{1,094 \cdot 0,06} = 526 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$k_2 = \frac{3,02 \cdot 9,8 \cdot 1,173}{0,977 \cdot 0,06} = 592 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

E a força exercida em cada mola é de:

$$F_1 = \frac{3,02 \cdot 9,8 \cdot 1,167}{1,094 \cdot 0,06} \cdot 1,048 = 551 \text{ N}$$

$$F_2 = \frac{3,02 \cdot 9,8 \cdot 1,173}{0,977 \cdot 0,06} = 609 \text{ N}$$

O dimensionamento das duas molas pode ser efectuado, utilizando as fórmulas de órgãos de máquinas. Em primeiro lugar importa definir o material do qual vai ser feita a mola, o que pode ser feito recorrendo à tabela da Figura 89.

MATERIAL	Temperaturas [° C]	Diâmetros [mm]	m	A [MPa.mm ^m]	Custo relativo
1. Corda de viola	0 – 120	0,1 – 6,5	0,145	2211	2,6
2. Arame temperado em óleo	0 – 180	0,5 – 12,7	0,187	1855	1,3
3. Arame estirado duro	0 – 120	0,7 – 12,7	0,190	1783	1
4. Aço cromo-vanádio	0 – 220	0,8 – 11	0,168	2005	3,1
5. Aço cromo-silício	0 - 250	1,6 – 9,5	0,108	1974	4
6. Aço inox		0,3 – 2,5	0,146	1867	7,6 – 11
7. Bronze fosforoso		0,1 – 0,6	0	1000	8

Figura 89 - Tabela de selecção de materiais para molas [21]

Numa primeira aproximação foi escolhido o material de menor custo, ou seja, o arame estirado duro. A adopção deste material é possível por se tratar de uma aplicação em que não há solicitação constante e intensiva da mola.

Selecionado o material e com o k da mola já calculado anteriormente é possível calcular as dimensões restantes da mola necessárias para que a função seja cumprida recorrendo à expressão seguinte:

$$k = \frac{F}{y} = \frac{1}{K_W} \frac{d^4 \cdot G}{8 \cdot D^3 \cdot Na} \quad (80)$$

Em que:

F – Carga aplicada na mola (N)

Y – Deformação linear da mola (m)

K_W - Factor de correcção de Wahl $\left(K_W = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0,615}{c}\right)$

G – Modulo de elasticidade ao corte (GPa)

D - Diâmetro médio da mola (De-Di) (m)

d – Diâmetro do arame (m)

Na – N.º de espiras activas $\left(Na = \frac{L}{\pi \cdot d}\right)$

C – Índice de mola (D/d)

A tensão de ruptura à tracção (S_{ut}) da mola pode ser aferida recorrendo à fórmula abaixo com diâmetro do arame (d) e recorrendo aos dados da tabela da Figura 89:

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (81)$$

Com a tensão de ruptura à tracção (S_{ut}) (ao corte) pode ser obtida a tensão de cedência (ao corte) em torsão da mola (S_{sy}), utilizando a seguinte expressão:

$$S_{sy} = 0,56 \cdot S_{ut} \quad (82)$$

Para cargas estáticas, o valor da tensão de corte máxima (τ_{max}) tem de ser inferior à a tensão de cedência (ao corte) em torsão da mola (S_{sy}), ou por outro lado igual a esta com um determinado factor de segurança (n):

$$S_{sy} = n \cdot \tau_{max} \quad (83)$$

A tensão de corte devido à carga por sua vez pode ser aferida através da expressão que se encontra abaixo descrita:

$$\tau = K_W \frac{8 \cdot F \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad (84)$$

Para a validação do dimensionamento:

$$\tau < \tau_{max}$$

Utilizando o Excel como ferramenta de cálculo, foi possível aferir para o caso da mola 1 que para se obter o k da mola pretendido será necessária uma mola com as seguintes características:

$$D_1 = 0.036 \text{ m} = 36\text{mm}$$

$$d_1 = 0.005 \text{ m} = 5\text{mm}$$

Para verificação da validade da selecção, temos em primeiro lugar de calcular a tensão de ruptura (S_{ut}) que é de:

$$S_{ut} = \frac{1783}{5^{0,190}} = 1313 \text{ MPa}$$

Com esta a tensão de cedência de corte (S_{sy}) é aferida facilmente:

$$S_{sy} = 0,56 \cdot 1313 = 735 \text{ Mpa}$$

Assim a tensão máxima de corte admissível (τ_{max}), considerando um coeficiente de segurança $n=2$ é de:

$$\tau_{max} = \frac{S_{sy}}{n} = \frac{735}{2} = 367 \text{ MPa}$$

A tensão de corte (τ) na mola não poderá ultrapassar esse valor:

$$\tau = 1,21 \frac{8 \cdot 551 \cdot 0.036}{\pi \cdot 0.05^3} = 0,49 \text{ MPa}$$

Ou seja, a mola pode cumprir sem risco nenhum a sua função.

Fazendo cálculos análogos, foi dimensionada a mola 2, tendo-se obtido os seguintes resultados:

$$D_1 = 0.035 \text{ m} = 35\text{mm}$$

$$d_1 = 0.005 \text{ m} = 5\text{mm}$$

A tensão máxima admissível foi de:

$$\tau_{max} = 367\text{MPa}$$

Enquanto a tensão instalada é de:

$$\tau = 0,52 \text{ MPa}$$

Concluindo-se que também está pode cumprir perfeitamente as suas funções.

Fazendo um resumo pode-se dizer que são necessárias molas com as seguintes características:

	Mola 1	Mola 2
k	526	592
L (mm)	1049	1029
D (mm)	36	35
D (mm)	5	5

No entanto, e como não se trata de uma área de especialidade da Setimep é recomendável que estes cálculos sejam validados por um potencial fornecedor da área.

Anexo G

Desenhos técnicos