

Desenvolvimento de um programa de dimensionamento de instalações para transporte pneumático

Celso Filipe França Costa

Dissertação apresentada Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
no âmbito do Mestrado integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Eng. Carlos Pinho



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro
2009

Esta página foi deixada em branco intencionalmente

Resumo

Neste trabalho estudam-se alguns processos de dimensionamento de sistemas de transporte pneumático, tentando desenvolver ferramentas para auxiliar ao projecto de tais instalações.

A fase primária do trabalho desenvolvido descreve os conceitos da mecânica dos fluidos, os quais, juntamente com definições empíricas desenvolvidas anteriormente, sustentam o projecto de transporte de partículas em suspensão.

De forma a criar uma ponte para a automação de alguns processos de cálculo, são desenvolvidos fluxogramas contendo a sequência de cálculo para problemas específicos, a partir de alguns casos práticos.

O próximo passo lógico é extrapolar os casos estudados, para se obter processos com uma maior gama de aplicabilidade, estando assim facilitada a automação do cálculo de trechos do sistema transportador que se pretende dimensionar.

As sequências obtidas dão origem a algoritmos lógicos, que, com a ajuda do EES se transformaram em módulos de cálculo independentes. Estes componentes do programa principal estão ligados entre si através de uma rede de tabelas onde são armazenados os resultados obtidos, os quais convergem no final do programa para permitir ao utilizador uma visão alargada das especificações do sistema dimensionado.

Sempre que possível é fornecido ao utilizador um conjunto de dados tabelados para facilitar a pesquisa de propriedades dos intervenientes no processo, sendo também oferecida a possibilidade de inserir dados personalizados, de forma a tratar situações ímpares.

Para melhorar a independência do programa, são analisados os métodos de escolha para alguns parâmetros, os quais se baseiam em critérios empíricos. Sendo utilizados para prever o entupimento do sistema ou mesmo o desperdício de energia no transporte, otimizando os valores obtidos e tornando assim o sistema não só mais eficaz mas também mais eficiente.

A partir dos módulos de cálculo desenvolvidos foi criada uma aplicação executável, a qual não necessita de instalação prévia, não sendo exigido ao utilizador final dispor do programa EES no seu computador.

O resultado deste trabalho é um conjunto de ferramentas coerentes, com excelente transmissibilidade de dados entre si, formando um programa coeso de interface intuitivo. Para demonstrar a comodidade do programa é apresentado um exemplo de resolução manual de um problema de dimensionamento de uma instalação para transporte pneumático completa.

Software development to assisted design of Pneumatic conveying facilities

Abstract

The processes of pneumatic conveying design are studied in this work, trying to develop a wide toolset to aid in the project of future systems.

The first phase of this report describes the basic concepts of fluid mechanics, which support the entire research done to the methods of pneumatic conveying.

Maps containing the calculation sequence to specific problems are developed from real examples, in order to create a bridge to the automation of the design processes.

The next logical step is to extrapolate the studied cases, to obtain new processes, with a wider range of applicability, making it easier to automate the design of some parts of the transport system, by breaking the installation design in several smaller parts.

The resulting sequences provide new logical algorithms, which supported by EES, will generate independent calculation modules. These modules of the main program are connected by a network of lookup tables, where you can store the results obtained. The network of tables delivers all the calculated values to final module, where an extensive analysis and report are produced, in order to keep the user informed of all the details behind the installation design.

A set of table organized data is provided to the user as often as possible, so he can be aware of the process, it is also possible to customize some data, in order to face unique cases, giving the user freedom to explore new situations.

To improve de program's independence, was made an analysis of the usual choice methods of some parameters, which are based upon empirical criteria. These parameters are used to predict system's choking or transport energy waste, optimizing the values making the installation not only more effective but also with a higher performance.

From the calculation modules developed an executable file is created, which needs no installation procedure, neither demands that the user has EES previously running in his computer.

The end result is a complete set of tools to aid the user, so he can project better and faster, with an excellent data exchange between tools, with a user friendly interface. To properly demonstrate the huge advantage of this software, a typical dimensioning exercise is presented in the end.

Agradecimentos

Em primeiro lugar ao engenheiro Carlos Pinho, o qual, além sempre disponível, foi incansável na ajuda prestada. O facto de esta lista de agradecimentos não ser mais extensa deve-se essencialmente à diversidade de assuntos abordados, bem como a quantidade de recursos disponibilizados pelo engenheiro Carlos Pinho.

Ao engenheiro Armando Oliveira, pela sua ajuda nas questões técnicas do programa EES, sobre o qual lecciona, bem como algumas soluções imaginativas na área da estrutura de programação.

Não podia deixar de mencionar um especial agradecimento à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, cujos recursos bibliográficos foram de importância vital para este trabalho, bem como as suas instalações.

Por último, mas não menos importante, à minha família, a qual me apoiou bastante, permitindo manter a motivação até à conclusão deste trabalho.

Índice Geral

Resumo	i
Abstract	ii
Agradecimentos.....	iii
Índice de figuras	vii
Índice de tabelas.....	viii
Nomenclatura	1
Introdução	3
Capítulo I.....	5
Princípios de funcionamento do transporte pneumático	5
I.1. Conceitos básicos no transporte pneumático	6
I.2. Fases do escoamento bifásico	8
Capítulo II.....	9
Escoamento Interno	9
II.1 Definição do regime de escoamento.....	10
II.2 Resistência ao escoamento das partículas	11
II.2.1 Arrasto de uma partícula isolada.....	11
II.2.2 Arrasto de uma nuvem de partículas	12
II.2.3 Coeficiente de fricção de Darcy.....	12
II.2.4 Caracterização da interacção partícula-escoamento pelo critério de Owen	13
Capítulo III.....	14
Métodos de cálculo da perda de carga	14
III.1 Modelo de Barth.....	16
III.1.1. Perda de carga no fluido.....	16
III.1.2. Perda de carga na componente sólida	16
III.1.3.Perda de carga na aceleração.....	17
III.2 Modelo de Yang.....	18
II.2.1 Contribuição estática.....	18
II.2.2 Fricção no escoamento.....	18
II.2.3 Perda de carga na aceleração.....	19
III.3 Engasgamento ou sufoco	21
III.3.1. Yuosfi e Gau	21

III.3.2. Knowlton e Bachovchin	21
III.3.3. Yang	22
III.3.4. Punwani	22
III.4 Mudanças de direcção.....	23
Capítulo IV.	25
Separadores ciclónicos de partículas.....	25
IV.1 Modelo de Koch e Licht	26
IV.2 Ciclones típicos.....	27
IV.3 Critérios de dimensionamento dos separadores ciclónicos.....	28
IV.4 Rendimento	29
IV.5 Perda de carga Shepherd e Lapple.....	30
Capítulo V.	32
Dimensionamento de unidades de movimentação de ar	32
V.1. Potência dos movimentadores de ar	33
V.2. Tipos de funcionamento dos sistemas	34
V.2.1 Sistemas em Sobrepressão.....	34
V.2.2. Sistemas em depressão	36
Capítulo VI.	38
Construção de um programa de dimensionamento	38
VI.1 Conceitos iniciais	39
VI.2 Programa de base.....	40
VI.3 Estrutura do programa de dimensionamento.....	41
VI.4. Aplicação em EES.....	43
VI.4.1 Dados de entrada	45
VI.4.2 Perdas de carga em linha segundo o modelo de Barth.....	48
VI.4.3 Perdas de carga em linha segundo o modelo de Yang.....	51
VI.4.4 Perda de carga nas mudanças de direcção	54
VI.4.5 Separadores ciclónicos.....	57
VI.4.6 Correção das propriedades do fluido	60
VI.4.7 Recalcular a perda de carga	61
VI.4.6 Redimensionar os acessórios da instalação	62
VI.4.7 Análise de resultados	63
Capítulo VII.	67

Exemplos práticos.....	67
Capítulo VIII.	75
Conceitos práticos relativos ao dimensionamento	75
Capítulo IX.....	77
Conclusões e observações finais	77
Referências	79

Anexos

Anexo A - Algoritmo de introdução de dados iniciais	82
Anexo B - Algoritmo de cálculo da perda de carga através do modelo de Barth.....	86
Anexo C - Algoritmo de cálculo da perda de carga através do modelo de Yang.....	91
Anexo D - Algoritmo de cálculo da perda de carga nas mudanças de direcção.....	97
Anexo E - Algoritmo de dimensionamento dos separadores de partículas	101

Índice de figuras

Figura 1 - Actuação da pressão num elemento diferencial	14
Figura 2 - Identificação das coeficientes definidores da geometria da mudança de direcção ...	23
Figura 3 - Uso de junções em T para reduzir o desgaste nas mudanças de direcção	23
Figura 4 - Esquema básico do funcionamento ciclónico nos separadores de partículas	26
Figura 5 - Geometria geral dos separadores ciclónicos de partículas	27
Figura 6 - Esquema de funcionamento de um compressor tipo Roots	33
Figura 7 - Sistema de transporte de aparas metálicas em sobrepressão da National Conveyors	34
Figura 8 - Sistema de transporte de cinzas por sobrepressão da National Conveyors	35
Figura 9 - Sistema de transporte de aparas metálicas em depressão da National Conveyors ...	36
Figura 10 - Sistema de transporte de cinzas em depressão da National Conveyors.....	37
Figura 11 - Esquema de ligação directa de dados entre os módulos de cálculo	41
Figura 12 - Esquema da distribuição de dados através de tabelas de consulta	42
Figura 13 - Menu de acesso a todos os módulos de cálculo	42
Ilustração 14 - Codificação de um comando macro posteriormente guardado em *.emf	43
Figura 15 – Diagrama esquemático da rede de contactos do programa	44
Figura 16 - Módulo inicial de inserção de dados	45
Figura 17 - Fluxograma de inserção de dados e estimativas iniciais	47
Figura 18 - (Esquerda) Módulo da cálculo da perda de carga em linha, aplicando Barth; (direita) Análise percentual dos resultados	48
Figura 19 - Fluxograma de funcionamento do módulo de cálculo da perda de carga pelo modelo de Barth.....	50
Figura 20 - (Esquerda) Módulo de cálculo da perda de carga através de Yang; (Direita) Análise percentual dos resultados	51
Figura 21 - Fluxograma de funcionamento do módulo de cálculo das perdas de carga pelo modelo de Yang.....	53
Figura 22 - Módulo de cálculo das perdas ocorridas nas mudanças de direcção	54
Figura 23 - Fluxograma de funcionamento do cálculo da perdas de carga nas curvas.....	55
Figura 24 - Módulo de dimensionamento dos separadores de partículas.....	57
Figura 25 - Fluxograma sequencial do módulo de dimensionamento dos separadores ciclónicos	58
Figura 26 - Módulo auxiliar de correcção das propriedades do fluido.....	60
Figura 27 - Módulo auxiliar para obter os valores da perda de carga recalculados	61
Figura 28 - Módulo auxiliar de redimensionamento dos acessórios do sistema	62
Figura 29 - Módulo de exposição e análise dos resultados obtidos.....	63
Figura 30 - Esquema da tubagem a dimensionar	68
Figura 31 - Instalação completa.....	68

Índice de tabelas

Tabela 1 - Gamas de valores do número de Reynolds para os respectivos tipos de escoamento	10
Tabela 2 - Gamas de valores da equação 2.4 para os correspondentes tipos de escoamento ..	10
Tabela 3 - Ajustamentos da velocidade intersticial do fluido em função dos parâmetros críticos	13
Tabela 4 - Sequência de cálculo da perda de carga, baseada no método de Barth.....	17
Tabela 5 - Sequência de cálculo da perda de carga, baseada no modelo de Yang	20
Tabela 6 - Comprimentos equivalentes para acessórios da instalação.....	24
Tabela 7 - Relação do coeficiente f_b com o rácio R_b/D	24
Tabela 8 - Proporções adimensionais de alguns separadores padrão encontrados actualmente na literatura	27
Tabela 9 - Regras guia ao dimensionamento de separadores.....	28
Tabela 10 - Sequência de dimensionamento de um separador de partículas a partir de um separador padrão	31
Tabela 11 - Comando em destaque para o programa desenvolvido	43

Nomenclatura

Símbolo	Descrição da variável	Unidades
A	Área	$[m^2]$
Ac	Parâmetro de proporção do separador ciclónico, ver ilustração 3	$[m]$
Bc	Parâmetro de proporção do separador ciclónico, ver ilustração 3	$[m]$
C_D	Coefficiente de arrasto (Drag) de uma nuvem de partículas	$[-]$
C_{DS}	Coefficiente de arrasto (Drag) de uma partícula isolada	$[-]$
d	Parâmetro da equação (4.13)	$[m]$
D	Diâmetro do tubo	$[m]$
D_i	Diâmetro interno do tubo	$[m]$
Dc	Parâmetro de proporção do separador ciclónico, ver ilustração 3	$[m]$
De	Parâmetro de proporção do separador ciclónico, ver ilustração 3	$[m]$
d_p	Diâmetro médio das partículas	$[m]$
Dx	Parâmetro de proporção do separador ciclónico, ver ilustração 3	$[m]$
f	Coefficiente de fricção de Darcy	$[-]$
F_a	Força de atrito	$[N]$
f_{ph}	Coefficiente de fricção de Darcy aplicado às partículas na horizontal	$[-]$
f_{pv}	Coefficiente de fricção de Darcy aplicado às partículas na vertical	$[-]$
Fr	Número de Froude	$[-]$
G	Aceleração gravítica	$[m/s^2]$
g	Parâmetro para a obtenção do rendimento do separador ciclónico	$[-]$
Hc	Parâmetro de proporção do separador ciclónico, ver ilustração 3	$[m]$
l	Comprimento natural	$[m]$
K_a	Coefficiente do separador de partículas; equação (4.9)	$[-]$
K_b	Coefficiente do separador de partículas; equação (4.10)	$[-]$
K_c	Coefficiente do separador de partículas; equação (4.12)	$[-]$
Kd	Coefficiente de majoração da perda de carga no modelo de Koch e Licht	$[-]$
L	Extensão total de tubagem na instalação	$[m]$
Lc	Parâmetro de proporção do separador ciclónico, ver ilustração 3	$[m]$
L_h	Extensão de tubagem na horizontal	$[m]$
L_v	Extensão de tubagem na vertical	$[m]$
m_f	Caudal mássico do fluido	$[kg/s]$
m_p	Caudal mássico de partículas	$[kg/s]$
O	Parâmetro adimensional representativo do critério de Owen	$[-]$
p	Pressão de trabalho	$[Pa]$
Re	Número de Reynolds	$[-]$
U_c	Velocidade crítica de sufoco	$[m/s]$
U_f	Velocidade intersticial do fluido	$[m/s]$
U_{ph}	Velocidade da partícula na horizontal	$[m/s]$
U_{pv}	Velocidade da partícula na vertical	$[m/s]$
U_s	Parâmetro da equação (4.17)	$[m/s]$
$U_{saltação}$	Velocidade de saltação	$[m/s]$
U_{th}	Velocidade terminal na horizontal	$[m/s]$
U_{tv}	Velocidade terminal na vertical	$[m/s]$
V_c	Velocidade de entrada no separador ciclones	$[m/s]$
V_{cn}	Volume do ciclone para o comprimento natural	$[m^3]$
V_H	Volume do ciclone abaixo da conduta de saída dos gases limpos	$[m^3]$

V_s	Parâmetro da equação (4.13)	[m ³]
T	Temperatura do ar	[°C]

Símbolos do alfabeto grego

β	Parâmetro de influência na perda de carga na aceleração, expresso graficamente	[-]
ε'	Rugosidade	[m]
ε_h	Porosidade do escoamento horizontal	[-]
ε_v	Porosidade do escoamento vertical	[-]
ε_c	Porosidade aquando da velocidade crítica de sufoco	[-]
H	Rendimento da separação das partículas provocada no ciclone	[%]
Θ	Factor de carga ou concentração de partículas no escoamento	[-]
λ_p	Coefficiente de atrito, função das propriedades dos sólidos de da conduta, equação (3.8)	[-]
λ_{sh}	Coefficiente de atrito, função das propriedades dos sólidos de da conduta, na direcção horizontal	[-]
λ_{sv}	Coefficiente de atrito, função das propriedades dos sólidos de da conduta, na direcção vertical	[-]
μ	Viscosidade do fluido	[Ns/m]
ρ_f	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
ρ_p	Massa específica das partículas	[kg/m ³]
$\Delta\rho_a$	Perda de carga na aceleração	[Pa]
$\Delta\rho_b$	Perda de carga nas mudanças de direcção	[Pa]
$\Delta\rho_{curvas}$	Perda de carga total nas mudanças de direcção	[Pa]
$\Delta\rho_{est}$	Contribuição estática da perda de carga no modelo de Yang	[Pa]
$\Delta\rho_f$	Perda de carga do fluido transportador	[Pa]
$\Delta\rho_{Fg}$	Contribuição do atrito na fase gasosa para a perda de carga no modelo de Yang	[Pa]
$\Delta\rho_{Fs}$	Contribuição do atrito na fase sólida para a perda de carga no modelo de Yang	[Pa]
$\Delta\rho_{fri}$	Contribuição do atrito na perda de carga no modelo de Yang	[Pa]
$\Delta\rho_{linha}$	Perda de carga total nos troços rectos	[Pa]
$\Delta\rho_{sg}$	Contribuição da fase gasosa na perda de carga no modelo de Yang	[Pa]
$\Delta\rho_{sh}$	Perda de carga da matéria sólida nos troços horizontais	[Pa]
$\Delta\rho_{sp}$	Contribuição da fase sólida na perda de carga no modelo de Yang	[Pa]
$\Delta\rho_{sv}$	Perda de carga da matéria sólida nos troços verticais	[Pa]
$\Delta\rho_{total}$	Perda de carga total na instalação	[Pa]
τ	Factor de relaxação das partículas	[s]
ξ	Parâmetro de influência na perda de carga na aceleração, expresso graficamente	[-]
ψ	Esfericidade das partículas	[-]

Introdução

Como transportar partículas sólidas de um ponto A para um ponto B? Quanto pode movimentar? Qual a potência necessária para vencer os obstáculos?... Estas são apenas algumas das perguntas com as quais os engenheiros se debatem ao projectar um sistema de transporte pneumático.

Perspectiva histórica. Entre os primeiros a utilizar ar para transporte de materiais em suspensão esteve Sturtevant, que em 1866 iniciou uma série de experiências direccionadas principalmente à de poeiras provenientes de operações de maquinagem, entre outras. Deste trabalho experimental nasceu a B. F. Sturtevant Company. Aqui desenvolveu um sistema de transporte pneumático para materiais de baixa densidade, como aparas, serradura, desperdícios de papel, algodão, os quais não sendo abrasivos podiam passar através do ventilador. Se os materiais fossem nocivos à unidade ventiladora, eram separados para um receptor através de uma porta estanque, e introduzidos de novo na corrente no lado pressurizado do ventilador, criando assim um *by-pass*.

J. M. Dodge, em 1901, realizou experiências para fazer o transporte de lajes de uma fundição para outra. Este usou um duplo fundo, em que uma das placas estava perfurada, e em cada orifício existia uma esfera de baixa densidade suportada por um retentor. O espaço entre as duas placas estava pressurizado, e quando uma laje era colocada sobre as esferas, esta era suportada pela pressão de ar, fazendo-as flutuar através do percurso. Apenas um destes sistemas foi construído, pois existiam formas mais práticas de movimentar as lajes. No entanto este método poderá ser viável em aplicações na actualidade (Hudson, 1954).

Hoje em dia os sistemas de transporte pneumático usam-se para movimentar:

- a) Materiais a granel em suspensão numa corrente de ar, designado por transporte em fase diluída, tratando-se da forma amplamente empregue nos dias de hoje;
- b) Objectos ou pacotes de forma tubular;
- c) Materiais a granel no estado conhecido como fluidização, que se consegue injectando ar no seio do material. Trata-se do caso menos comum de transporte pneumático em fase densa.

Os materiais a transportar podem ser todos aqueles a granel, tais como cereais, cinzas, serrim, cimento..., etc. É fundamental que os materiais a transportar tenham um baixo teor de humidade (máximo 20%) e não sejam propícios a agregarem-se às paredes da tubagem.

Normalmente a capacidade de transporte pode chegar a 400 t/h, percorrendo até um máximo de 500 metros. Para maiores distâncias o transporte pneumático deixa de ser competitivo.

Entre as vantagens pode referir-se:

- a) Grande limpeza da instalação, ao utilizarem-se tubagens herméticas obtêm-se perdas diminutas do material a transportar;
- b) Grande economia no atravancamento, e grande facilidade de adaptação às especificações de cada situação;
- c) São sistemas de fácil automação para os quais são necessários poucos operários para manutenção.

Como desvantagens há que enfatizar:

- a) São instalações com um grande consumo de energia por unidade de produto movimentado. Para vãos entre os 25 e os 400 metros consomem entre 1 e 6 cv por t/h.
- b) Como muitos dos materiais a transportar são abrasivos, as tubagens sofrem grande desgaste, principalmente nas mudanças de direcção.

O princípio de funcionamento da movimentação reside na criação de uma diferença de pressões entre os pontos a montante e a jusante (Arriola, 1974). Quanto à forma como é gerada essa diferença de pressões pode-se enquadrar dois grandes grupos de sistemas:

- 1) *Funcionamento em depressão*, ou seja o material é transportado a pressões inferiores à pressão atmosférica, estando o compressor situado após o ponto de descarga;
- 2) *Funcionamento em sobrepressão*, o compressor actua no ponto de carga, aumentando a pressão e impelindo o material a avançar

O desenvolvimento de tal sistema depende de um grande número de variáveis, o que o condena a uma espiral de processos de tentativa e erro.

Para de alguma forma minimizar o esforço de cálculo, torna-se necessário programar uma série de rotinas, das quais resulta um sistema mais eficiente. Para isso é necessário software de cálculo, o qual será seleccionado, e devidamente justificado numa secção posterior.

Mas o software de cálculo é apenas o meio de atingir um resultado final, a base de todo o projecto é o domínio da Mecânica de Fluidos, bem como as técnicas usadas no transporte de sólidos de pequena granulometria.

Como em qualquer processo de aprendizagem, antes de criar algo novo é necessário pesquisar o que já foi feito nessa área, tentando adoptar os caminhos mais eficientes. A partir dos anos setenta, começou a haver maior interesse no transporte pneumático em fase densa, dada a grande demanda de nova tecnologia para aplicação às grandes indústrias de extracção, logística e de armazenamento, (Rhodes, 1998).

...a Granel, Estes materiais são compostos de partículas discretas de vários calibres, desde grãos finos até... . De uma forma geral são secos, pelo menos secos o suficiente para que não haja formação de aglomerados, deixando de se poder considerar um conjunto de partículas discretas (Hawk, 1971).

Capítulo I.

Princípios de funcionamento do transporte pneumático

Segundo o estudo da Física, define-se expansibilidade como a propriedade que os gases têm de ocupar todo o espaço que se lhes oferece.

Porém, sob o ponto de vista da Técnica, ou da Pneumática em particular, os gases quando se expandem realizam trabalho (Novais, 1995).

Entendemos ser mais importante este último conceito porque deste modo associa-se aos gases uma dimensão energética, já que falar de ar comprimido é falar de energia.

O transporte pneumático envolve o movimento de milhões de partículas, num espaço confinado. Para começar a perceber esta forma de transporte, primeiro é necessária uma análise detalhada do comportamento de uma partícula isolada. Compreendidos estes fenómenos, é possível desenvolver sistemas complexos, os quais envolvem uma nuvem de partículas, as interações entre elas e com as paredes limites.

Neste tipo de transporte os sólidos são transportados por uma corrente de fluido em movimento. À medida que a velocidade superficial do fluido e a velocidade da partícula em ordem a um referencial fixo se aproximam, o escoamento assemelha-se cada vez mais a um escoamento monofásico.

Este capítulo, apresenta os conceitos basilares da modelação de um escoamento bifásico, focando-se no modelo de uma partícula isolada. Durante o transporte dos sólidos podem ocorrer várias fases de escoamento, sendo que as expressões apresentadas destinam-se ao escoamento em fase diluída, que é o mais corrente.

I.1. Conceitos básicos no transporte pneumático

Para uma melhor compreensão dos desenvolvimentos que se seguirão, apresentam-se de forma sucinta os conceitos básicos ligados à teoria do transporte pneumático.

Velocidade terminal, sob a acção da gravidade, uma partícula atinge uma velocidade máxima em queda livre através de um fluido em repouso, velocidade essa denominada velocidade terminal, U_t .

$$U_t = \sqrt{\frac{4 (\rho_p - \rho_f) g d_p}{3 \rho_f C_{DS}}} \quad (1.1)$$

Dando origem ao número adimensional de Reynolds, que representa o escoamento em torno da partícula numa situação de queda livre.

Velocidade da partícula, devido ao arrasto do fluido, a partícula atinge uma velocidade superior à que atingiria em queda livre, em relação a um sistema de eixos cartesianos fixo.

$$U_p = U_f - U_t \quad (1.4)$$

Na fase diluída, as partículas são transportadas em suspensão no ar, em que é um mecanismo de arrasto o responsável pela sua movimentação. Portanto a velocidade das partículas em relação a um referencial fixo será menor que a velocidade intersticial do gás. O processo de medição deste parâmetro é difícil e complexo, sendo apenas mensurada para efeitos académicos ou de pesquisa. Normalmente é apenas referida a velocidade do ar.

Na direcção horizontal a velocidade das partículas será tipicamente cerca de 80% da velocidade do gás. Isto é normalmente expresso na forma do rácio entre a velocidade das partículas e a do fluido.

No fluxo vertical ascendente, a velocidade das partículas é normalmente 70% da velocidade do fluido.

Velocidade terminal de partículas não-esféricas

O transporte pneumático não está de maneira alguma limitado a partículas esféricas, por isso têm sido desenvolvidas correlações experimentais, de forma a ter em conta a não esfericidade das partículas.

Regime de Stokes e intermédio

$$(U_t)_{n\grave{a}oesf.} = 0,843 \log_{10} \left(\frac{\psi}{0,065} \right) U_t \quad (1.2)$$

Regime de Newton

$$(C_{DS})_{n\grave{a}oesf.} = 5,31 - 4,88 \psi \quad (1.3)$$

Ambas as expressões foram desenvolvidas por Pettyjohn e Christiansen, publicadas em (Klinzing 1981)

Porosidade

Os parâmetros de porosidade e de velocidade da partícula estão estritamente ligados entre si. No transporte pneumático a sua medição, é essencial para a modelação e compreensão do escoamento bifásico. Apesar da sua relativa importância, estas duas quantidades são pouco mencionadas na literatura.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\dot{m}_p}{(\rho_p - \rho_f) U_p A} \quad (1.5)$$

A razão para esta lacuna prende-se com a dificuldade em obter medições de um grau de precisão aceitável para a porosidade e para a velocidade da partícula, como já foi referido anteriormente. A definição básica de porosidade pode ser expressa como o número de partículas num dado elemento de volume (Marcus et al, 1990.)

Número de Froude

$$Fr = \frac{U_f}{\sqrt{g D}} \quad (1.6)$$

A relação mostrada acima aparece em várias equações, a qual expressa um coeficiente adimensional designado por número de Froude. Este representa a razão entre as forças de inércia e as forças da gravidade, numa secção do escoamento num dado instante, em que g representa a aceleração gravítica. No caso dos escoamentos em tubagem é comum utilizar para comprimento característico o diâmetro, D .

Concentração de transporte ou factor de carga, factor bastante relevante no transporte pneumático, dado que define a razão entre o caudal mássico de fluido e o de sólidos, e consequentemente a fase em que se dá o escoamento. Em regime diluído a concentração é expressa por:

$$\theta = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_f} = \frac{\rho_p U_p A}{\rho_f U_0 A} \quad (1.7)$$

Velocidade de saltação

Não é teoricamente possível prever as condições às quais ocorre a saltação. No entanto várias correlações têm sido propostas na literatura, de forma a caracterizar este fenómeno. A correlação proposta por Zenz em 1964 é frequentemente usada, embora seja inteiramente empírica e necessite de recorrer a um gráfico. Leung e Jones (1978), referem que este método sofre de um erro de aproximadamente 54% (Rhodes, 1998).

A correlação proposta por Rizk (1973), baseia-se numa abordagem semi-empírica, sendo relativamente simples de usar, obtendo um erro similar à anterior. A sua forma mais explícita é:

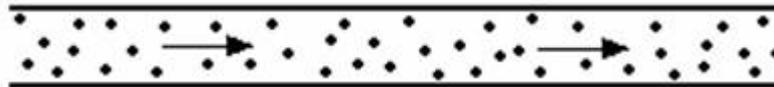
$$\theta = \frac{M_p}{\rho_f U_{Saltação} A} = \left\{ \frac{1}{10^{(1440x+1,96)}} \right\} \left\{ \frac{U_{Saltação}}{\sqrt{g D}} \right\}^{(1100x+2,5)} \quad (1.8)$$

I.2. Fases do escoamento difásico

Por extensão da definição anterior podemos distinguir 4 regimes de funcionamento distintos:

- **Fase diluída**

A fase diluída no transporte pneumático pode ser definida como o processo de movimentação dos sólidos, mantendo-os em suspensão através de uma velocidade intersticial do gás adequada à manutenção dos fenómenos de saltação. Esta fase é essencialmente um processo contínuo, caracterizado pela alta velocidade, baixa pressão e concentração de partículas reduzida.

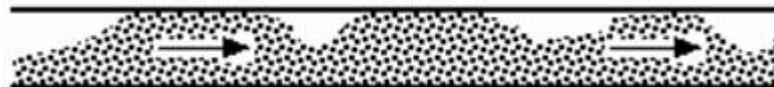


- **Fase densa**

A fase densa baseia-se num impulso de gás para forçar a movimentação do material sob a forma de processo em carga. É essencialmente um processo caracterizado pela baixa velocidade, alta pressão e elevada concentração de sólidos, ao contrário da fase diluída. Dentro desta pode-se distinguir duas outras fases:

- i) **Fase densa contínua**

Baixa velocidade do fluido, em que o material se movimenta em vagas sinusoidais. Indicado para sistemas em que a erosão, economia energética e degradação do produto são problemas centrais;



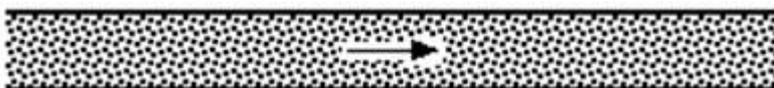
- ii) **Fase densa descontínua**

Velocidade imediatamente superior à de saltação. Indicado para o transporte de pós finos ou para a distribuição de partículas de baixo calibre;



- **Fase sólida**

Material movimentado a velocidades extremamente reduzidas. Ao longo da tubagem, toda as secções transversais têm uma porosidade quase nula. Este método é propício à movimentação de produtos frágeis.



De relembrar que este trabalho propõe-se a tratar exclusivamente os fenómenos ocorridos em escoamentos na fase diluída.

Sistemas de transporte em fase diluída, são comuns na indústria actual, mas fazem surgir uma ampla gama de problemas, tais como desgaste, danos nos produtos, segregação bem como consumos energéticos elevados, relativamente a outros modelos anteriormente apresentados

Capítulo II.

Escoamento Interno

Num gás existe espaço vazio entre as moléculas e o facto de se movimentarem livremente provoca colisões entre elas e sobre as superfícies onde estão inseridas ou contidas.

Por exemplo, se a um reservatório fechado fornecermos calor à massa gasosa nele contida, a pressão interna sobe porque houve aumento da velocidade das moléculas e, conseqüentemente, aumentou também a média de colisões sobre as superfícies em causa.

Neste processo termodinâmico, o aumento de pressão é directamente proporcional ao aumento de temperatura ($p_1 \cdot T_2 = p_2 \cdot T_1$) (Novais, 1995).

Existem essencialmente, duas vias pelas quais é possível exercer uma força sobre um fluido, alterando-lhe, portanto, a sua quantidade de movimento: através de tensões de corte ou pela acção de gradientes de pressão. Na sua expressão mais simples e pela mesma ordem, os escoamentos de Couette e Poiseuille constituem materializações destas duas alternativas.

O transporte de líquidos ou gases no interior de tubagens é, normalmente e pela mesma ordem, assegurando por bombas ou ventiladores. O correspondente dimensionamento exige que sejam conhecidas as barreiras a vencer ao longo do trajecto, as quais serão tratadas no próximo capítulo.

A viscosidade e a massa volúmica do fluido transportado serão aqui consideradas constantes, assumindo assim uma temperatura não variável ao longo de toda a instalação (Munson, 2006).

A dependência funcional entre o factor de atrito, o número de Reynolds e a rugosidade relativa não é fácil de ser determinada. Grande parte da informação disponível sobre este assunto deve-se às experiências de J. Nikuradse em 1933.

Posteriormente esta informação foi ampliada através de resultados de outros trabalhos experimentais. As experiências de Nikuradse eram baseadas na medição da queda de pressão necessária para produzir o caudal desejado, num tubo de rugosidade predefinida. Os resultados experimentais eram tratados, emergindo o coeficiente de atrito para o respectivo número de Reynolds do escoamento. Com a repetição destas experiências para diferentes combinações de variáveis foi possível obter relação de atrito, a qual será tratada a seguir.

Assim sendo, este capítulo foca os regimes de escoamento, os métodos usados para a sua identificação, bem como as conseqüências para a resistência à progressão das partículas. Além da interacção sólidos-tubagem, são tratadas as interacções numa nuvem de partículas, de forma a tecer algumas considerações sobre o seu movimento e energia dispendida no processo.

II.1 Definição do regime de escoamento

Este número adimensional representativo das forças de inércia e viscosidade activas no escoamento, está implicitamente ligado às forças devidas ao gradiente de pressão. Tomado como indicador do regime em que o escoamento se desenvolve, é vastamente utilizado para comparação entre sistemas com semelhança geométrica.

$$Re_f = \frac{\rho_f d_p U_f}{\mu_f} \quad (2.1)$$

Tabela 1 - Gamas de valores do número de Reynolds para os respectivos tipos de escoamento

Gama de valores de Reynolds	Regime de escoamento relativo partícula/ar
$Re_p < 2$	Stokes
$2 < Re_p < 500$	Intermédio
$500 < Re_p < 200.000$	Newton

Os parâmetros de comprimento e de velocidade presentes no número de Reynolds, são as quantidades escolhidas como representativas do escoamento em causa, apesar essa opção tomada pelo utilizador afectar o resultado, o significado deste número mantêm-se inalterável, embora as condições da sua aplicabilidade variem.

$$Re_t = \frac{\rho_f d_p U_t}{\mu_f} \quad (2.2)$$

$$Re_D = \frac{\rho_f D U_f}{\mu_f} \quad (2.3)$$

Alguns dos parâmetros necessários neste tema, como por exemplo a velocidade terminal, o coeficiente de arrasto são interdependentes, o que torna a sua obtenção um processo de tentativa e erro.

Para auxiliar a definição do regime de escoamento, em alternativa ao número de Reynolds, pode utilizar-se a equação desenvolvida por McCabe e Smith (Pinho, 2005).

$$K = d_p * \sqrt[3]{\frac{g * \rho_f * (\rho_p - \rho_f)}{\mu_f^2}} \quad (2.4)$$

Tabela 2 - Gamas de valores da equação 2.4 para os correspondentes tipos de escoamento

Gama de valores de McCabe e Smith	Regime de escoamento relativo partícula/ar
$K < 3,3$	Stokes
$3,3 < K < 43,6$	Intermédio
$K > 43,6$	Newton

II.2 Resistência ao escoamento das partículas

II.2.1 Arrasto de uma partícula isolada

A resistência que uma partícula oferece ao escoamento pode ser definida por um coeficiente adimensional, C_{DS} , o qual afecta a velocidade terminal dessa partícula. Por sua vez o coeficiente de arrasto é influenciado por essa mesma velocidade, na forma do número de Reynolds por ela estabelecido, Re_t . Essa influência varia com o regime de escoamento da partícula

Regime de Stokes

$$C_{DS} = \frac{24}{Re_t} \quad (2.5)$$

Regime intermédio

$$C_{DS} = \frac{18,5}{Re_t^{0,6}} \quad (2.6)$$

Regime de Newton

$$C_{DS} = 0,44 \quad (2.7)$$

O facto de o cálculo do coeficiente de arrasto estar associado ao tipo de escoamento no qual ocorre, torna a sistematização do processo complexa, podendo causar alguma deriva nos resultados. Para uma aproximação bastante simples da curva de arrasto completa, definida pelos coeficientes nos vários regimes, estão disponíveis na literatura algumas equações gerais, por exemplo,

$$C_{DS} = \frac{24}{Re_p} + \frac{4}{\sqrt{Re_p}} + 0,4 \quad (2.8)$$

utilizada por Kaskas publicada em Klinzing, ou a proposta por Clift e Gauvin

$$C_{DS} = \left(\frac{24}{Re_p} \right) (1 + 0,15 Re_p^{0,687}) + \frac{0,42}{1 + 4,25 \times 10^4 Re_p^{-1,16}} \quad (2.9)$$

II.2.2 Arrasto de uma nuvem de partículas

As expressões anteriores tratam o arrasto de uma partícula isolada, sendo que no transporte pneumático, o cálculo deve ser idealizado para uma nuvem de partículas. Vários autores apresentam a correlação entre estas duas situações através da seguinte expressão

$$C_D = C_{Ds} \varepsilon^{-4,7} \quad (2.10)$$

reconhecida a sua eficácia pelos diversos intervenientes no universo do transporte pneumático.

II.2.3 Coeficiente de fricção de Darcy

O factor f , coeficiente de Darcy ou factor de resistência, é um parâmetro adimensional, o qual está dependente do número de Reynolds e da rugosidade relativa. De uma forma simplificada este factor é consequência da tensão de corte média, exercida sobre a parede da tubagem.

$$f = \left(Re, \varepsilon'/D \right) \quad (2.11)$$

Desenvolvida por Colebrook, a equação seguinte é válida para toda a gama não-laminar do diagrama de Moody

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon'/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.12)$$

Na verdade, o diagrama de L. F. Moody, não é mais que uma representação desta fórmula, a qual baseia-se no ajustamento empírico de dados da perda de carga em tubos. A principal desvantagem deste método é sem sombra de dúvida a dependência implícita do factor de resistência f .

Após o estudo dos dados obtidos no superpipe da Universidade de Princeton.

Este resultado torna evidente que uma boa aproximação à equação de Colebrook não depende apenas da equação para representar o caso do escoamento turbulento liso.

Considerando os efeitos da rugosidade as diferenças esbatem-se largamente.

Com base nas considerações anteriores procurou desenvolver-se um método simples para estabelecer correlações na forma de leis de potência. A procura de uma equação para representar o coeficiente de atrito em tubos lisos resultou numa equação simultaneamente simples e próxima dos resultados obtidos com a equação de Prandtl (erro inferior a 0.04%). Referiu-se a ligação que é possível estabelecer com recentes teorias que advogam um perfil universal na forma de uma lei de potência dependente do número de Reynolds e estendeu-se o resultado ao caso do escoamento rugoso: apesar de uma maior complexidade relativamente a outras aproximações, a equação obtida tem a mesma validade que a equação de Colebrook e origina valores ligeiramente mais próximos desta (Branco, 2004).

$$f = -1,82 * \log \left[\left(\frac{\varepsilon'}{D * 3,7} \right)^{1/0,91} + 10^{-\left[\frac{(\log Re_D)^{1,288}}{1,78 * Re_D^{0,0075}} \right]} \right] \quad (2.13)$$

Esta equação tem por um lado a vantagem de ser eficiente relativamente, e de ter exactidão muito elevada, quando se comparam os valores obtidos com os resultados experimentais de Nikuradse.

II.2.4 Caracterização da interacção partícula-escoamento pelo critério de Owen

$$O(10^{-2}) < \frac{\rho_f u_\tau^2}{\rho_p g d_p} < O(1) \quad (2.14)$$

Quando este parâmetro não obedece ao limite inferior da gama, pode-se concluir que o escoamento não consegue manter a saltação, o que origina maiores deposições e provavelmente o bloqueamento da tubagem.

Por outro lado, se o limite superior for ultrapassado, constata-se que a velocidade imprimida ao fluido é mais do que suficiente para manter o escoamento dinâmico, e portanto verifica-se um desperdício de energia.

Em função do critério de Owen e dos critérios de sufoco, os quais serão tratados mais à frente neste trabalho, definem-se as medidas a ser tomadas quanto à velocidade do fluido, de forma a obter um sistema optimizado.

Tabela 3 - Ajustamentos da velocidade intersticial do fluido em função dos parâmetros críticos

	O<0,01	0,01<O<0,99	O>0,99
$U_c < U_f$	↑ U_f	U_f -/-	↓ U_f
$U_c > U_f$	↑ U_f	↑ U_f	NA

Capítulo III.

Métodos de cálculo da perda de carga

O desempenho de um sistema de movimentação pneumático, em termos de capacidade de carga, depende essencialmente da resistência oferecida pelo mesmo à passagem da suspensão. Quanto maior for a resistência do sistema, maior será a perda de carga ou então a pressão estática no ventilador.

Esta resistência, provocada pelo atrito nas paredes dos tubos, pode ser estimada pela seguinte equação:

$$F_a/A = f \frac{\rho_f U_f^2}{2} \quad (3.1)$$

Onde,

- F_a é a força de atrito [N]
- A representa a área sobre a qual a força actua [m^2]
- ρ_f é a massa específica do fluido de transporte [kg/m^3]
- U_f representa a velocidade intersticial do fluido [m/s]
- f coeficiente de fricção de Darcy [-]

Se for feito um balanço energético num comprimento diferencial, L1 até L2, de uma tubagem horizontal, de diâmetro D, a força total requerida para vencer o arrasto por fricção, deverá ser fornecida pela pressão imposta, verificando-se perda de carga Δp ao longo do comprimento.

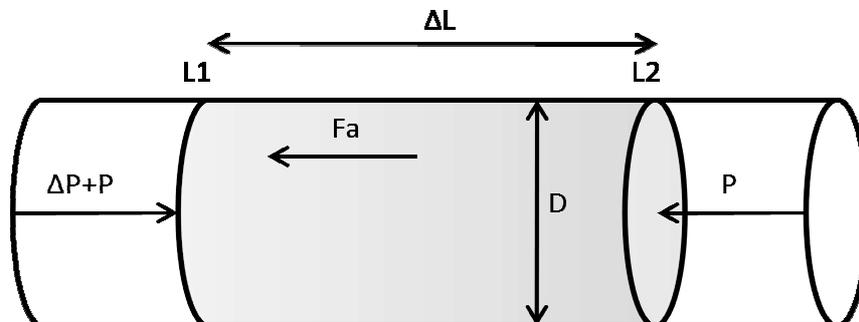


Figura 1 - Actuação da pressão num elemento diferencial

Balanço energético

A força devida à perda de carga é:

$$\Delta p A = \Delta p \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.2)$$

A força de fricção F_a , é expressa em unidades de força por unidade de área, logo

$$F_a A = F_a / A \pi D \Delta L = \left(f \frac{\rho_f U_f^2}{2} \right) \pi D \quad (3.3)$$

Conclui-se assim que a perda de carga no fluido pode ser expressa por:

$$\Delta p \frac{\pi D^2}{4} = \left(f \frac{\rho_f U_f^2}{2} \right) \pi D \Delta L \Leftrightarrow \Delta p = 4 \left(f \frac{\rho_f U_f^2}{2} \right) (\Delta L / D) \quad (3.4)$$

Pode-se então inferir que a perda de carga de um escoamento monofásico

- É directamente proporcional ao quadrado da velocidade intersticial do gás;
- Directamente proporcional á distância percorrida, entenda-se comprimento da tubagem;
- Inversamente proporcional ao diâmetro do tubo.

(Bathia, 2009)

Para manter a perda de carga tão baixa quanto possível, é recomendada moderação na velocidade do gás.

Além das perdas de carga calculadas através do diagrama de Moody e que correspondem a um dado comprimento de tubagem, L, outras há que têm carácter local, como, por exemplo, entradas e saídas de conduta, expansões ou contracções, curvas, válvula, etc. Por oposição às primeiras também designadas por regulares, as perdas de carga localizadas são também conhecidas perdas de carga singulares.

O cálculo teórico destas perdas, que chegam a revestir-se de importância determinante, é praticamente inviabilizado pela grande complexidade do escoamento a elas inerente. Normalmente, o seu conhecimento advém de medições laboratoriais, cujos resultados são depois, associados aos parâmetros característicos do escoamento na conduta (Oliveira, 2006).

O escoamento difásico apresenta um maior desafio de cálculo, em relação ao monofásico, visto que alguns comportamentos das partículas são baseados em trabalhos experimentais. Da compilação de diversas publicações, foi possível extrair e sistematizar alguns métodos para a obtenção da perda de carga em troços lineares.

III.1 Modelo de Barth

Resultado da reunião de diversos artigos publicados pelo alemão Barth, e sistematizado por (Janeiro Borges, 1983), este método atende a pormenores que são simplificados noutros processos.

$$\Delta p_{total} = \Delta p_s + \Delta p_f + \Delta p_a \quad (3.5)$$

III.1.1. Perda de carga no fluido

A perda de carga no fluido, que é directamente dependente do factor de fricção de Darcy, o qual pode ser obtido pela expressão

$$\Delta p_f = f \frac{L}{D} \frac{U_f^2}{2} \rho_f \quad (3.6)$$

III.1.2. Perda de carga na componente sólida

A perda de carga da parte sólida é expressa por

$$\Delta p_s = \lambda_s \theta \rho_f \frac{L}{D} \frac{U_f^2}{2} \quad (3.7)$$

Sendo que

$$\frac{U_p}{U_f} = \frac{1 - \sqrt{\frac{1}{2} \lambda_p \frac{U_t^2}{g D} \left[1 - \left(\frac{U_t}{U_f} \right)^2 \right] + \left(\frac{U_t}{U_f} \right)^3}}{1 - \frac{1}{2} \lambda_p \frac{U_t^2}{g D}} \quad (3.8)$$

As expressões propostas por Barth para as relações entre as velocidades, resultam em cálculos complexos e morosas iterações. O coeficiente de fricção refere-se à fase sólida vem dado por

$$\lambda_s = \lambda_p \frac{U_p}{U_f} + \frac{2}{Fr^2} \frac{U_p}{U_f} \quad (3.9)$$

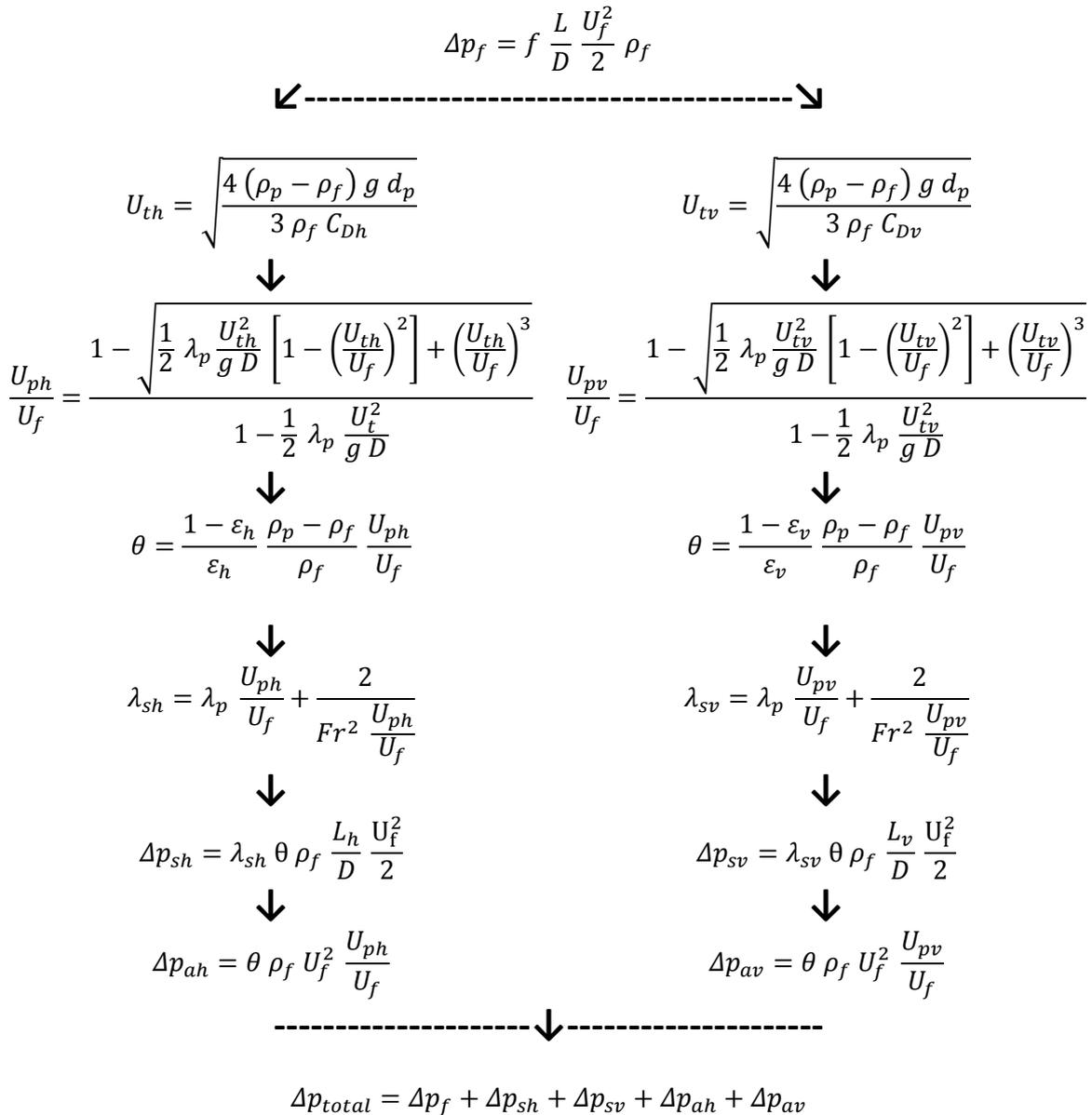
O parâmetro λ_p é um coeficiente de atrito, que traduz a interacção entre a partícula e as paredes na vizinhança. Toma o valor $\lambda_p=10^{-2}$ para partículas de materiais duros envolvidas por tubagens macias, e o valor $\lambda_p=10^{-4}$ para a situação inversa. Embora estes valores sejam bastante utilizados, como já foi dito anteriormente, é necessária alguma investigação neste campo, de forma a obter valores mais fidedignos. A pouca quantidade de informação referente a este parâmetro λ_p disponível na literatura técnica e científica em língua inglesa é o principal obstáculo ao emprego do módulo de Barth.

III.1.3. Perda de carga na aceleração

Quando as partículas sólidas são introduzidas no sistema, o fluido transmite-lhes energia até se dar a estabilização da sua velocidade. Esta transferência de energia provoca uma resistência adicional à progressão do escoamento, e pode ser contabilizada de forma simplista por (Pinho, 2005)

$$\Delta p_a = \theta \rho_f U_f^2 \frac{U_p}{U_f} \quad (3.10)$$

Tabela 4 - Sequência de cálculo da perda de carga, baseada no método de Barth



III.2 Modelo de Yang

Tal como o método anterior este sistema advém da compilação de diversos trabalhos sobre o transporte publicados por Yang, sistematizados por Pinho (2005).

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{est} + \Delta p_{fri} + \Delta p_a \quad (3.11)$$

II.2.1 Contribuição estática

$$\Delta p_{sp} = \rho_p (1 - \varepsilon) L g \quad (3.12)$$

$$\Delta p_{sg} = \rho_f \varepsilon L g \quad (3.13)$$

A parcela estática da perda de carga, segundo Yang, quantifica a energia proveniente do escoamento que é utilizada para superar diferenças de cota. Torna-se claro que esta parcela toma o valor nulo quando o escoamento se desenrola na horizontal.

II.2.2 Fricção no escoamento

$$\Delta p_{Fg} = f \frac{L}{D} \frac{U_f^2}{2} \rho_f \quad (3.14)$$

$$\Delta p_{Fs} = f_p \frac{L}{D} \rho_p (1 - \varepsilon) \frac{U_p^2}{2} \quad (3.15)$$

Segundo Yang e Keairns (1976) os parâmetros da fricção para o transporte vertical e horizontal respectivamente podem ser obtidos através de

$$f_{pv} = 0,0206 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \left[(1 - \varepsilon) \frac{Re_t}{Re_p} \right]^{-0,869} \quad (3.16)$$

$$f_{ph} = 0,117 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \left[(1 - \varepsilon) \frac{Re_t}{Re_p} \frac{U_f}{\sqrt{g D}} \right]^{-1,15} \quad (3.17)$$

Enquanto as velocidades terminais corrigidas são obtidas através de Pinho (2005)

$$U_{tv} = \sqrt{\left(g + \frac{f_p}{D} \frac{U_{pv}^2}{2} \right) \left[\frac{4}{3} \frac{(\rho_p - \rho_f) d_p}{\rho_f C_{Dv}} \varepsilon^{4,7} \right]} \quad (3.18)$$

$$U_{th} = \sqrt{\left(\frac{f_p}{D} \frac{U_{ph}^2}{2} \right) \left[\frac{4}{3} \frac{(\rho_p - \rho_f) d_p}{\rho_f C_{Dh}} \varepsilon^{4,7} \right]} \quad (3.19)$$

Apesar já ter sido vista a relação entre as velocidades terminal e da partícula, é de referir a comodidade de utilização das expressões de Hinkle modificadas para a obtenção de estimativas iniciais da velocidade das partículas, segundo Klinzing (1981)

$$U_{pv} = U_0 (1 - 0,68 d_p^{0,92} \rho_p^{0,5} \rho_f^{-0,2} D^{-0,54}) \quad (3.20)$$

$$U_{ph} = U_0 (1 - 0,044 d_p^{0,3} \rho_p^{0,5}) \quad (3.21)$$

O parâmetro U_0 refere-se à velocidade superficial do fluido, por uma questão de coerência com a publicação de Klinzing, manteve-se esta nomenclatura apenas nestas duas expressões.

Esta análise pressupõe que as partículas perdem quantidade de movimento após colidirem com as paredes da tubagem. A perda de carga devida à fricção entre os sólidos e as paredes é uma consequência da reaceleração das partículas (Rhodes, 1998).

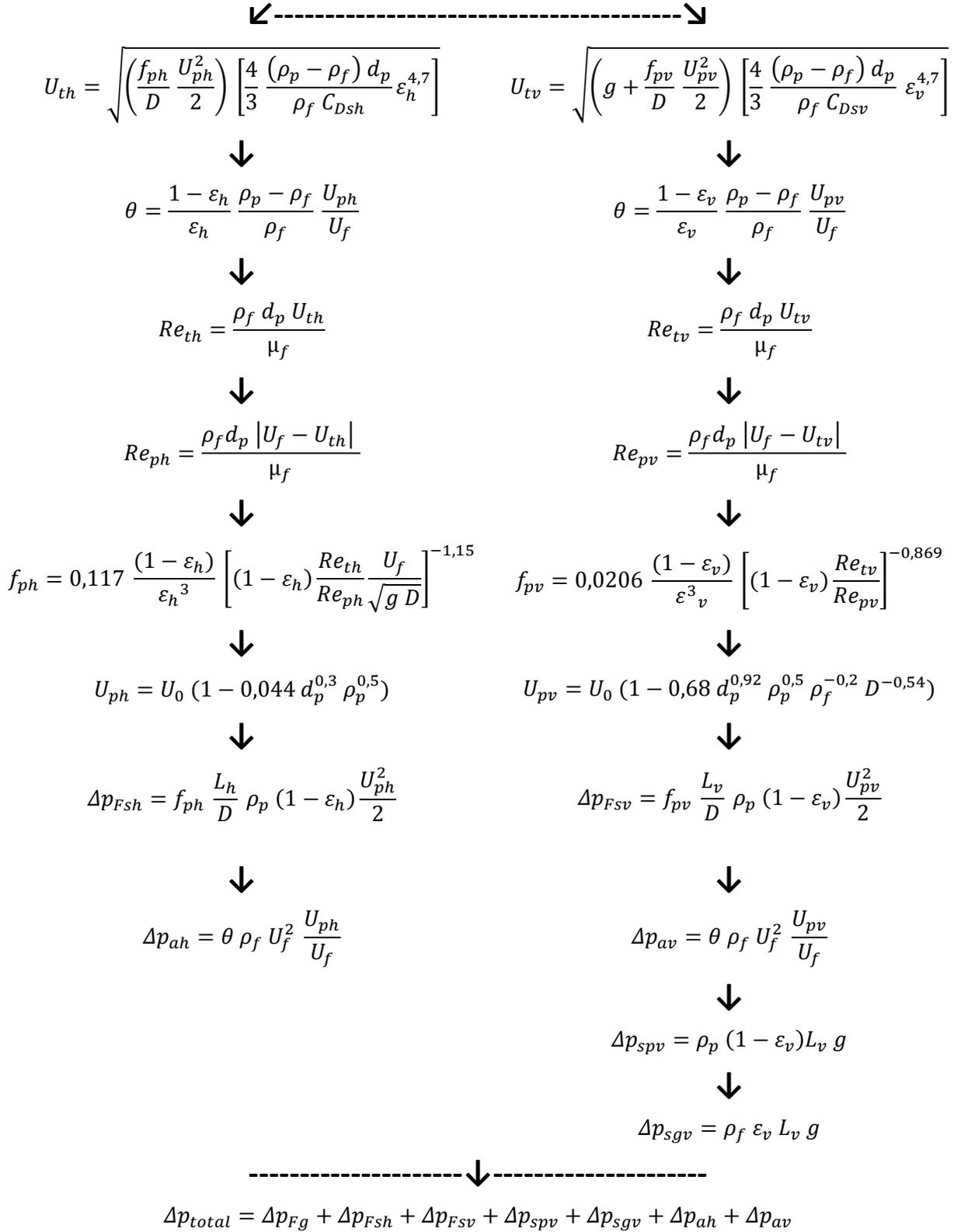
II.2.3 Perda de carga na aceleração

A expressão (3.7) incorporada no modelo de Barth também é válida para o cálculo da componente da perda de carga devida à aceleração. No entanto existe um outro método proposto por Rose e Duckworth publicado por Klinzing (1981), o qual se baseia em parâmetros experimentais, que são consultados graficamente

$$\Delta p_a = 1,12 \left(\frac{\rho_f U_f^2}{2} \right) \left(\frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_f} \right) \xi \beta \quad (3.22)$$

Tabela 5 - Sequência de cálculo da perda de carga, baseada no modelo de Yang

$$\Delta p_{Fg} = f \frac{L}{D} \frac{U_f^2}{2} \rho_f$$



III.3 Engasgamento ou sufoco

O fenómeno de engasgamento, também chamado sufoco, no transporte pneumático vertical, foi descrito na íntegra por Zenz e Othmer. A elevada velocidade intersticial do fluido, as partículas são impelidas através da tubagem ascendente, numa suspensão que aparente estar uniformemente distribuída, ou seja, em fase diluída. Se essa mesma velocidade for diminuída gradualmente, para o mesmo caudal transportado, a concentração local de sólidos aumenta visivelmente. Poderá ser alcançado um ponto onde, a suspensão uniformemente distribuída se tornará instável. É então que se dá o colapso da suspensão, fazendo com que as partículas passem a ser transportadas em fase densa contínua ou em densa descontínua, com uma concentração média de sólidos superior. O mecanismo causador do fenómeno de engasgamento não é inteiramente compreendido. Nem todos os sistemas apresentam este problema. De uma forma geral, o transporte de partículas finas em tubagens de grande diâmetro está menos susceptível ao sufoco, do que a movimentação de sólidos grosseiros em tubos de pequenas dimensões (Marcus et al, 1990). Na tentativa de quantificar os parâmetros no ponto de engasgamento, vários autores propuseram métodos diferentes, dos quais alguns serão seguidamente tratados de forma sucinta.

III.3.1. Yuosfi e Gau

Estes autores consideraram uma suspensão uniformemente distribuída, a qual é perturbada por uma variação sinusoidal da velocidade intersticial do fluido. Verifica-se um aumento da instabilidade da suspensão com o aumento da concentração de partículas ao longo do tempo e da subida na tubagem, que provocada pela perturbação da velocidade (Marcus et al, 1990).

$$\frac{U_c}{\sqrt{g d_p}} = 32 Re_t^{-0,06} \left[\frac{\dot{M}_p}{\rho_f U_c} \right]^{0,28} \quad (3.23)$$

III.3.2. Knowlton e Bachovchin

A equação empírica produzida por estes dois autores inclui uma forma dúbia de número de Reynolds aplicado às partículas, baseado na velocidade das partículas em relação a um referencial fixo (Marcus et al, 1990). Os resultados das experiências de Knowlton e Bachovchin são dos poucos dados disponíveis na literatura, para fenómenos de sufoco a alta pressão, mas apesar de serem fiáveis nesta situação, são de aplicação duvidosa em diferentes condições.

$$\frac{U_c}{\sqrt{g d_p}} = 9,07 \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{0,347} \left(\frac{\dot{m}_p d_p}{\mu_f} \right)^{0,214} \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0,246} \quad (3.24)$$

III.3.3. Yang

A determinação das condições de engasgamento é algo sobre o qual a literatura é escassa, e baseada primeiramente em observações experimentais, que levam ao aparecimento de diversas correlações empíricas. A meta de Yang é definir de forma objectiva as condições para as quais ocorre tal fenómeno.

Após ter definido experimentalmente que f_p toma o valor 0,01 nas condições em que ocorre engasgamento (Pinho, 2005), aplicou as já conhecidas relações entre as velocidades das partículas de onde resultam

$$f_{p,c} = \frac{2 D (\varepsilon_c^{-4,7} - g)}{[U_c - U_t]} = 0,01 \quad (3.25)$$

$$\dot{M}_p = [U_c - U_t] \rho_p (1 - \varepsilon_c) \quad (3.26)$$

$$\dot{M}_p = \frac{\dot{m}_p}{A} \quad (3.27)$$

III.3.4. Punwani

A definição do sufoco por Punwani é em tudo semelhante à de Yang, embora atribua um valor dependente de ρ_p , ao parâmetro de fricção f_p aquando do engasgamento. Este valor é baseado em resultados experimentais obtidos por Punwani.

$$f_{p,c} = \frac{2 D (\varepsilon_c^{-4,7} - g)}{[U_c - U_t]} = 0,074 \rho_p^{0,77} \quad (3.28)$$

III.4 Mudanças de direcção

Tal como nos escoamentos monofásicos a perda de carga localizada nas mudanças de direcção é equiparada a um comprimento equivalente de troço recto que produza a mesma diferença de pressões entre os seus pontos terminais.

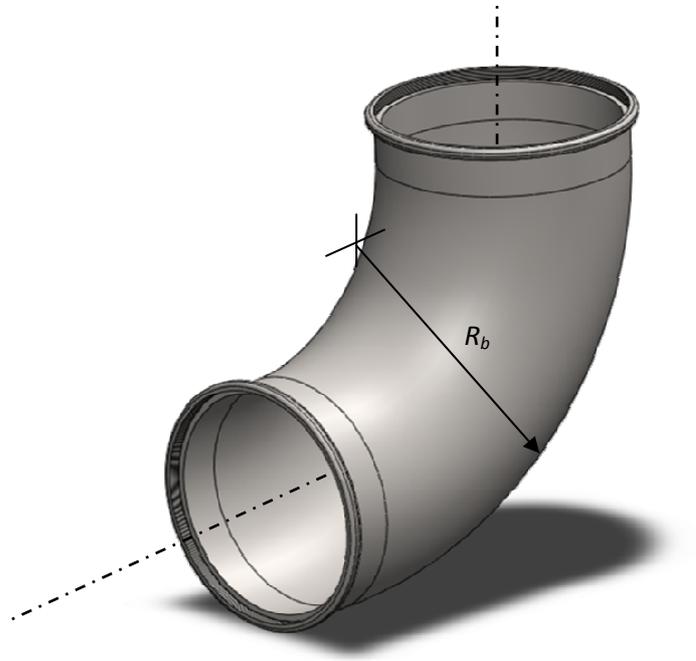


Figura 2 - Identificação dos coeficientes definidores da geometria da mudança de direcção

No passado, os projectistas de sistemas de transporte pneumático em fase diluída, dimensionavam intuitivamente mudanças de direcção com grandes raios de curvatura, de forma a reduzir o desgaste e aumentar a vida útil das curvas a 90°. No entanto, Zenz (1964) recomenda o uso de juncos em T, com uma das entradas tapada, em vez das usuais curvas. O conceito de funcionamento destas aplicações, baseia-se na quantidade de sólidos que progressivamente se aloja na entrada tapada da junção, proporcionando um efeito amortecimento, prevenindo o desgaste na parede da tubagem.

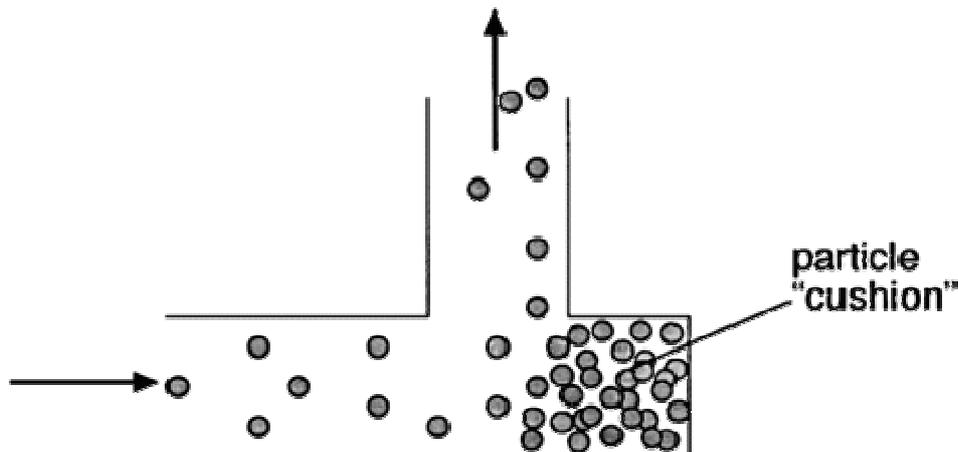


Figura 3 - Uso de junções em T para reduzir o desgaste nas mudanças de direcção

Em 1982, Bodner determinou a relação da vida útil e perda de carga para diferentes configurações de curvas. Ele concluiu que a vida útil de uma junção em T ultrapassava largamente o tempo de serviço de uma curva de raio longo, de facto estima-se que as curvas a 90º durem cerca de 15 vezes menos que uma junção em T no seu lugar. Os seus resultados experimentais concluíram também que os factores de atrito, bem como a perda de carga são semelhantes nas duas configurações.

Apesar da grande quantidade de investigadores a trabalhar na área das perdas de carga localizadas, ainda não se conseguiu definir um método preciso suficiente para obter a perda de carga numa curva, que não pela via experimental. Na gíria industrial assume-se por vezes que a perda de carga numa curva equivale a cerca de 7,5 metros de tubagem linear vertical (Rhodes, 2001).

Tabela 6 - Comprimentos equivalentes para acessórios da instalação

Acessórios	Diâmetros nominais [mm]									
	25	40	50	80	100	125	150	200	250	300
Cotovelo	1,5	2,5	3,5	5	7	10	15	20	25	30
Curva com Rb=D	0,3	0,5	0,6	1	1,5	2	2,5	3,5	4	5
Curva com Rb=2xD	0,15	0,25	0,3	0,5	0,8	1	1,5	2	3	3,6
Derivação em T	1,5	2,4	3	5	6	8	10	12	15	18

Comprimentos equivalentes [m]

Apesar das já recorrentes tabelas da literatura da mecânica dos fluidos, onde são apresentados os comprimentos equivalentes, neste projecto enveredou-se por um sistema empírico proposto por uma associação americana de transporte pneumático, (Kunii e Levespiel, 1991).

$$\Delta p_b = 2 f_b \bar{\rho}_p U_f^2 \quad (3.29)$$

$$\bar{\rho}_p = (1 - \varepsilon)\rho_p + \varepsilon \rho_f \quad (3.30)$$

Tabela 7 - Relação do coeficiente f_b com o rácio Rb/D

f_b	R_b/D
0,375	2
0,188	4
0,125	6

O factor f_b é correspondente a um determinado rácio Rb/D, e $\bar{\rho}_p$ representa a massa específica média do escoamento. Através dos valores propostos para f_b é possível fazer a interpolação para todos os rácios, o que torna a sistematização deste processo bastante mais prática (Pinho, 2005).

Capítulo IV.

Separadores ciclónicos de partículas

A unidade de separação pode ter uma enorme influência no desempenho geral da instalação, mas pode ser particularmente nefasta em sistemas de baixa pressão.

A selecção do sistema apropriado está dependente do grau de separação requerido, bem como a toxicidade dos sólidos para o meio ambiente, em caso de fuga.

Ao utilizar de um separador ciclónico é mais fácil controlar as aparas e as poeiras que se recolhidas do meio ambiente. Grande parte destas partículas são conduzidas para o depósito imediatamente por baixo do separador, tornando o ar que circula em direcção ao filtro bastante menos poluído. Isto não só tornam as operações de limpeza dos filtros menos frequentes, mas também mantêm os filtros mais limpos, e consequentemente mais eficazes (MacIntyre, 2008).

O princípio de funcionamento deste tipo de separadores baseia-se diferença de densidades e velocidades das partículas no escoamento. Na câmara de expansão a velocidade do ar diminui, e pela acção da gravidade, os sedimentos de maiores dimensões são evacuados pelo escape, antes das partículas mais pequenas (Marcus et al, 1990).

O objectivo deste capítulo não é realizar uma apresentação exaustiva dos processos teóricos, que ocorrem no interior das unidades separadoras, mas proporcionar uma visão sequencial de alguns métodos correntes.

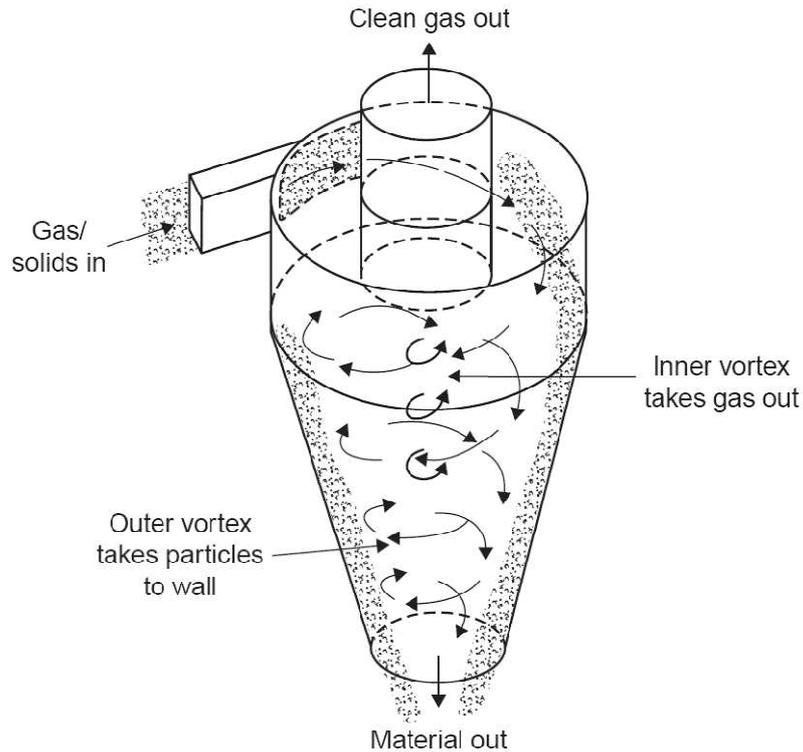


Figura 4 - Esquema básico do funcionamento ciclônico nos separadores de partículas

Seja um sistema em depressão ou em sobrepressão a separação tem um papel relevante na perda de carga do sistema total. Estes dispositivos são utilizados tanto para a separação fluido-partículas, como para a organização dos caudais por diâmetro das partículas. Os critérios base para o dimensionamento de um separador são:

- Tipo de funcionamento do sistema;
- Caudal de fluido à entrada;
- Concentração de sólidos;
- Humidade e temperatura sobre a qual decorre o processo;
- Distribuição do tamanho das partículas

IV.1 Modelo de Koch e Licht

Tratando-se de uma simbiose entre os conceitos teóricos desenvolvidos por Leith e Licht para a separação, e consequente característica de rendimento (Kock & Licht, 1977), e a correlação para a velocidade de saltação obtida por Zenz e Kalen (1979).

IV.2 Ciclones típicos

O dimensionamento de um ciclone é normalmente referido a proporções já testadas por outros autores.

Stairmand – Alto rendimento

Swift – Alto rendimento

Swift – Utilização geral

Lapple – Utilização geral

Peterson e Whithy – Utilização geral

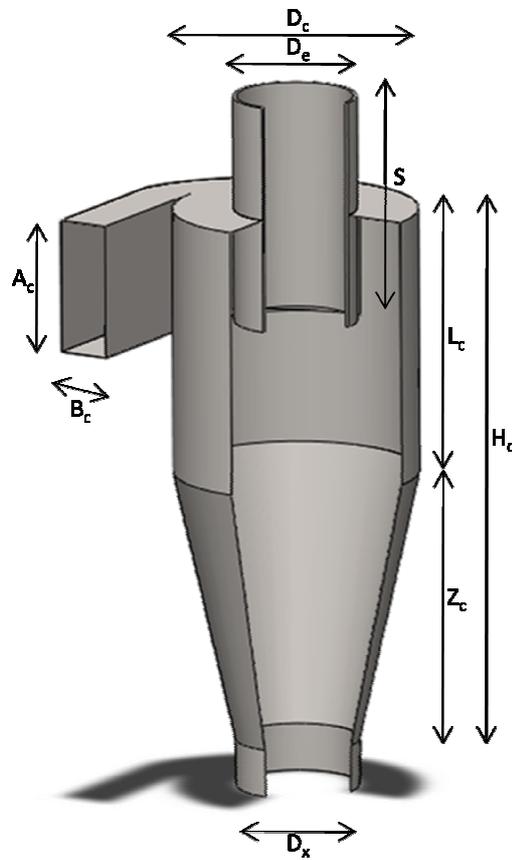


Figura 5 - Geometria geral dos separadores ciclônicos de partículas

Tabela 8 - Proporções adimensionais de alguns separadores padrão encontrados actualmente na literatura

	A_c/D_c	B_c/D_c	S/D_c	D_e/D_c	L_c/D_c	H_c/D_c	D_x/D_c
Stairman	0,5	0,2	0,5	0,5	1,5	4,0	0,375
Swift -	0,44	0,21	0,5	0,4	1,4	3,9	0,4
Swift -	0,5	0,25	0,6	0,5	1,75	3,75	0,4
Lapple	0,5	0,25	0,625	0,5	2,0	4,0	0,25
Peterson & Withy	0,583	0,208	0,583	0,5	1,333	3,17	0,5

IV.3 Critérios de dimensionamento dos separadores ciclónicos

A selecção dos coeficientes adimensionais referidos anteriormente, deve obedecer a certas restrições, de forma a evitar alguns problemas pós dimensionamento:

Tabela 9 - Regras guia ao dimensionamento de separadores

1º	$A_c < S \Rightarrow S_c > 0$, para impedir o curto-circuito das partículas desde a conduta de entrada até à conduta de saída dos gases limpos;
2º	$B_c < \frac{(D_c - D_e)}{2}$, para se evitar uma contracção súbita no escoamento na entrada do ciclone;
3º	$S + I \leq H_c$, de forma a manter o vórtice dentro do ciclone;
4º	$S < L_c$;
5º	$L_c < H_c$;
6º	$\Delta p_{ciclone} < 250 [mm H_2O]$;
7º	$\frac{V_c}{U_s} \leq 1,35$, para se prevenir a recolecta das partículas já depositadas;
8º	$\frac{V_c}{U_s} \approx 1,25$, para se obter o melhor rendimento de separação possível.

As considerações anteriores partem de uma aproximação inicial do raio R_c , feita com base no caudal transportado e na velocidade à entrada do separador.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_p}{\rho_p} \quad (4.1)$$

$$R_c = \sqrt{\frac{2 \dot{V}}{V_c}} \quad (4.2)$$

O raio é primeiro estimado com base no caudal volúmico total transportado. Se as medidas de atravancamento de R_c forem excessivas, divide-se o caudal por separadores múltiplos, montados em paralelo, com caudal de entrada, \dot{V}_i . Recalcula-se o raio previsto, aumentando ou diminuindo o número de separadores até o que o valor se enquadre na gama desejada.

$$\frac{V_c}{U_s} = \frac{1}{11,58} \sqrt[3]{\frac{\rho_f^2}{\mu_f(\rho_p - \rho_f)}} \left[\sqrt[3]{\frac{1 - (B_c/D_c)}{(B_c/D_c)^{0,4}}} \right] \frac{\sqrt[3]{V_c}}{D_c^{0,067}} \quad (4.3)$$

IV.4 Rendimento

$$\eta = 1 - e \left\{ -2 \left[\frac{G \tau_i \dot{V}}{D_c^3} (n+1) \right]^{\frac{0,5}{n+1}} \right\} \quad (4.4)$$

Em que τ representa o *tempo de relaxação dinâmica* das partículas, quantificando a reacção da partícula a mudanças impulsivas da *velocidade do fluido* (Marcus et al., 1990), como tal pode ser apresentado como função da *velocidade terminal*

$$\tau = \frac{U_t \rho_p}{(\rho_p - \rho_f) g} \quad (4.5)$$

$$n = 1 - \left[1 - \frac{(39,4 D_c)^{0,14}}{2,5} \right] \left[\frac{T}{293,15} \right]^{0,3} \quad (4.6)$$

$$V_s = \frac{[(S - A_c/2)(D_c^2 - D_e^2)]}{4} \quad (4.7)$$

$$G = \frac{8 K_c K_b^2}{K_a^2} \quad (4.8)$$

$$K_a = \frac{A_c}{D_c} \quad (4.9)$$

$$K_b = \frac{B_c}{D_c} \quad (4.10)$$

Comprimento natural, I

$$I = 2,3 D_e \left(\frac{D_c^2}{A_c B_c} \right)^{1/3} \quad (4.11)$$

Caso I<(Hc-S)

$$K_c = \frac{(2 V_s + V_{cn})}{(2 D_c^3)} \quad (4.12)$$

$$d = D_c - (D_c - D_x) \left[\frac{(S + I - L_c)}{(H_c - L_c)} \right] \quad (4.13)$$

$$V_{cn} = \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) (L_c - S) + \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left(\frac{I + S + L_c}{3} \right) \left(1 + \frac{d}{D_c} + \frac{d^2}{D_c^2} \right) - \left(\frac{\pi D_c^2 I}{4} \right) \quad (4.14)$$

Volume do ciclone correspondente ao seu comprimento natural

Para I>(Hc-S)

$$K_c = \frac{(2 V_s + V_H)}{(2 D_c^3)} \quad (4.15)$$

$$V_H = \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) (L_c - S) + \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left(\frac{H_c - L_c}{3} \right) \left(1 + \frac{D_x}{D_c} + \frac{D_x^2}{D_c^2} \right) - \left(\frac{\pi D_c^2 I}{4} \right) (H_c - S) \quad (4.16)$$

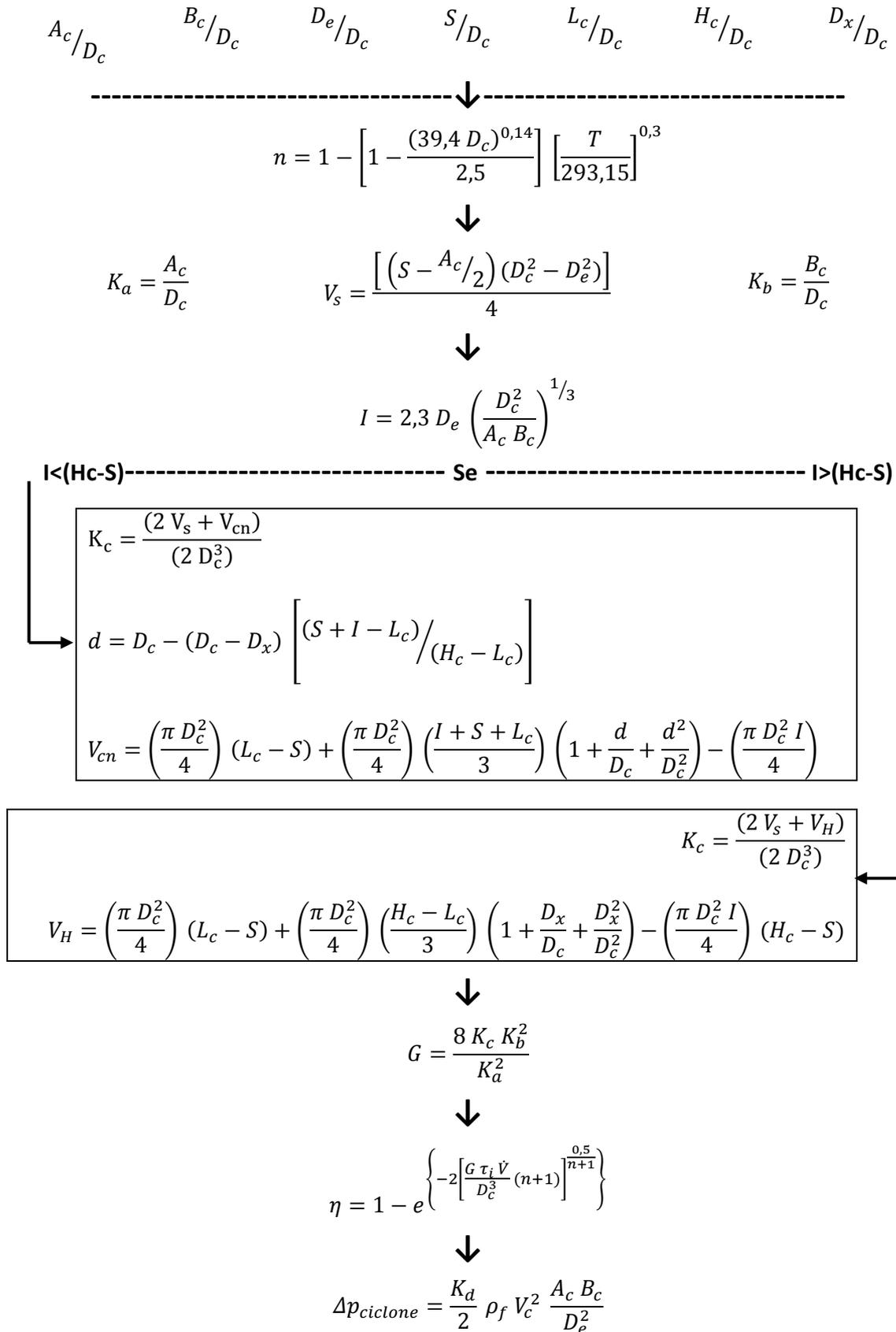
Volume abaixo da conduta de saída dos gases limpos

IV.5 Perda de carga Shepherd e Lapple

$$\Delta p_{ciclone} = \frac{K_d}{2} \rho_f V_c^2 \frac{A_c B_c}{D_e^2} \quad (4.17)$$

Segundo Perry e Chilton (1973), em que $K_d = 16$ se o ciclone não tiver qualquer deflector na conduta de entrada e $K_d = 7,5$ no caso de existir um deflector, sugere a utilização de $K_d=16$, de forma a obter um ligeiro factor de segurança (Pinho, 2005).

Tabela 10 - Sequência de dimensionamento de um separador de partículas a partir de um separador padrão



Capítulo V.

Dimensionamento de unidades de movimentação de ar

A aplicação de ventiladores, para a movimentação de sólidos em suspensão num fluido está limitada pela extensão do desgaste provocado pelas partículas a transportar, causado aquando da sua passagem pelo equipamento. Este fenómeno é especialmente grave no caso de compressores ventiladores com baixas tolerâncias entre os seus componentes, os quais são rapidamente danificados pelo desgaste erosivo, mesmo com baixos valores de concentração de sólidos. Assim sendo os aparelhos centrífugos são os mais adequados para a compressão directa de suspensões, pois têm poucas peças de baixa tolerância, tornando-os menos sujeitos ao desgaste. Os aparelhos centrífugos dividem-se em dois tipos; máquinas de fluxo radial e máquinas de fluxo axial (Hawk 1973).

Os ventiladores **centrífugos de fluxo axial** são menos adequados para aplicações de transporte pneumático de suspensões, pois produzem um aumento da pressão mínima, sendo geralmente montados em andares de compressão. Além de aumentar a complexidade da instalação, a montagem por andares causa estratificação da suspensão, o que concentra a erosão nas áreas críticas. Este tipo de máquinas opera a altas velocidades, o que em conjugado com o facto de serem constituídos por pás finas, diminui o seu desempenho após poucos ciclos de fadiga. A experiência diz-nos que caudais de ... causam desgaste considerável, atendo a que a substituição ou reparação das pás é uma operação de elevado custo, esta é uma situação a evitar.

As máquinas ventiladoras de **fluxo radial** estão melhor adaptadas para lidar com escoamentos de suspensões de partículas. Os seus componentes robustos estão menos sujeitos a fenómenos de desgaste, quando comparados aos compressores centrífugos axiais. A estratificação do escoamento é menos pronunciada, e consegue-se um maior aumento de pressão por passagem.

O objectivo deste capítulo é abordar os critérios de selecção de uma unidade movimentadora de fluido, conforme os parâmetros de perda de carga, geometria da instalação e propriedades do material a transportar.

V.1. Potência dos movimentadores de ar

De um modo muito geral, para as instalações de média e alta pressão são utilizados compressores rotativos do tipo Roots principalmente. Nas redes de baixa pressão são normalmente empregues ventiladores centrífugos, os quais podem gerar depressões até um metro de coluna de água.

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m} \int dh \quad (5.1)$$

Traduz a *Primeira Lei da Termodinâmica*, fazendo o balanço energético aplicado a um volume de controlo, que neste caso é o sistema de movimentação de ar. Considerando o sistema reversível, assumimos inicialmente que não há calor transferido do sistema, logo

$$\dot{W} = \dot{m}_f \int v dp \quad (5.2)$$

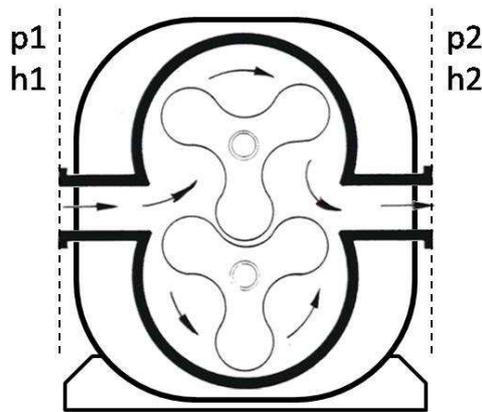


Figura 6 - Esquema de funcionamento de um compressor tipo Roots

Este consiste num corpo de secção elíptica contendo dois rotores simétricos em forma de oito, rodando em sentidos opostos e cujos lóbulos engrenam, sincronizados por engrenagens exteriores (Novais, 1995).

$$\dot{W} = \dot{m}_f R T \int 1/p dp \quad (5.3)$$

$$\dot{W}_{reversível} = \dot{m}_f R T \ln p^2/p_1 \quad (5.4)$$

Na verdade a compressão do ar gera um aumento na temperatura, a qual é transferida através dos aparelhos de compressão, não podendo assim ser considerados isentrópicos. Além das perdas por transferência de calor, outras surgem, como por exemplo perdas mecânicas, o que leva à definição de um rendimento para o compressor, assim a potência necessária num caso real será expressa por

$$\dot{W}_{real} = \frac{\dot{W}_{reversível}}{\eta} \quad (5.5)$$

V.2. Tipos de funcionamento dos sistemas

V.2.1 Sistemas em Sobrepressão

Os sistemas de sobrepressão, operam acima da pressão atmosférica, sendo usados para transportar materiais a granel, desde uma ou mais fontes para um ou mais destinos, localizados a distâncias intermédias, mas com maior capacidade que os sistemas em depressão. Uma utilização típica destes sistemas consiste geralmente numa válvula de rotação; tubagem, a qual inclui curvas reforçadas e de raio longo; um filtro receptor ou uma combinação ciclone/filtro; e um dispositivo de movimentação apropriado tipo Roots. A ilustração seguinte mostra uma configuração típica destes sistemas:

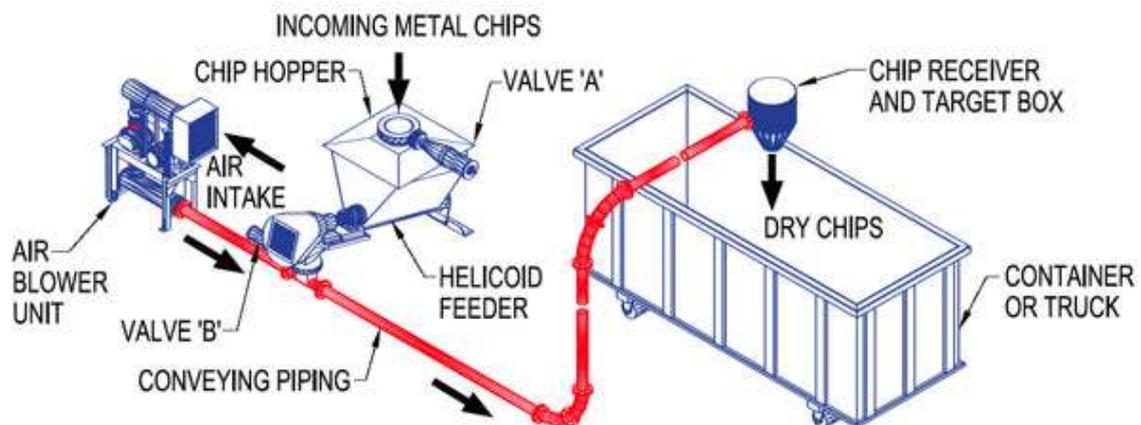


Figura 7 - Sistema de transporte de aparas metálicas em sobrepressão da National Conveyors

O produto entra na linha de transporte, a qual está a alta pressurizada, através de um dispositivo alimentador, normalmente uma válvula de rotação estanque, ou um sistema baseado no efeito de Venturi. Os sólidos estão em suspensão no fluxo de gás, movimentando-se a velocidades relativamente elevadas dependendo das propriedades da partícula, como já foi demonstrado nas secções anteriores. A suspensão é separada no ponto terminal, através de um separador ciclónico, ou escoada directamente para dispositivos gravíticos colectores de poeiras.

Neste tipo de sistema as partículas não passam através do ventilador. Deste facto resultam duas vantagens óbvias: as pás do ventilador não danificam os materiais mais sensíveis; e por outro lado o ventilador não sofre danos por erosão, provocados pelos materiais. Operam geralmente de forma contínua – o produto está a ser constantemente alimentado, chegando ao terminal sem que haja desvios. Isto permite a sua fácil implementação em aplicações de dosagem e pesagem de lotes de produtos.

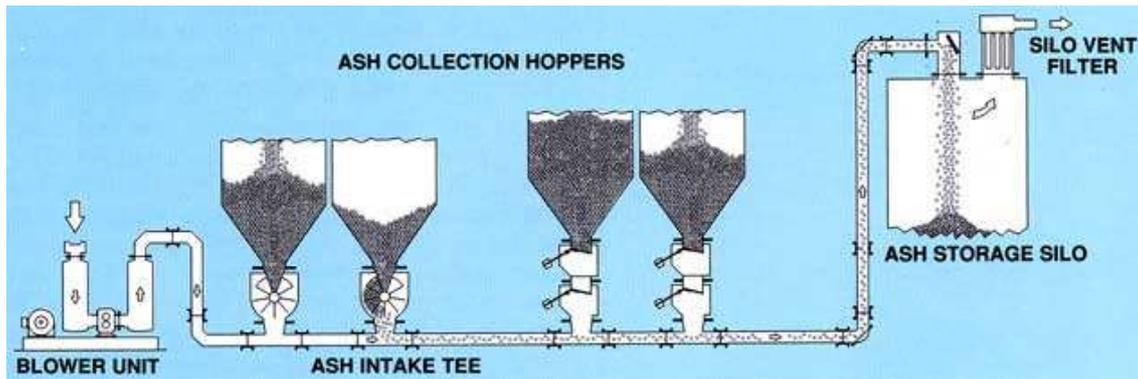


Figura 8 - Sistema de transporte de cinzas por sobrepressão da National Conveyors

Aplicações

O transporte em sobrepressão na fase diluída é especialmente apropriado para movimentação de cargas moderadas, destinadas a vencer vãos intermédios. Sendo estes sistemas versáteis e facilmente adaptáveis a diferentes materiais sujeitos a pressões reduzidas, possibilitam a utilização de tubagens de menor custo e ligações menos exigentes. Cimento, cinzas, produtos alimentares, resinas e produtos químicos secos são alguns exemplos do que pode ser transportado por este método.

Especificações

Gama de caudais	entre 1 e 50 t/h
Velocidade de transporte	dos 15 [m/s] até aos 40 [m/s]
Distâncias a percorrer	200 ou mais metros
Movimentador de gás	normalmente do tipo roots, ou ventilador
Pressão de funcionamento	100 kPa
Concentração de partículas	acima de 2,0

V.2.2. Sistemas em depressão

Sistemas em depressão são normalmente usados para movimentar sólidos a partir de várias fontes, como por exemplo, silos de armazenamento, camiões ou vagões ferroviários, para um ou mais destinos. Estes sistemas tornam-se excelentes em casos onde é necessário transportar vários tipos de produtos simultaneamente. Este tipo de utilização é bastante dispendioso, dado que ser necessário um separador em cada destino, cada como seu sistema independente de vácuo.

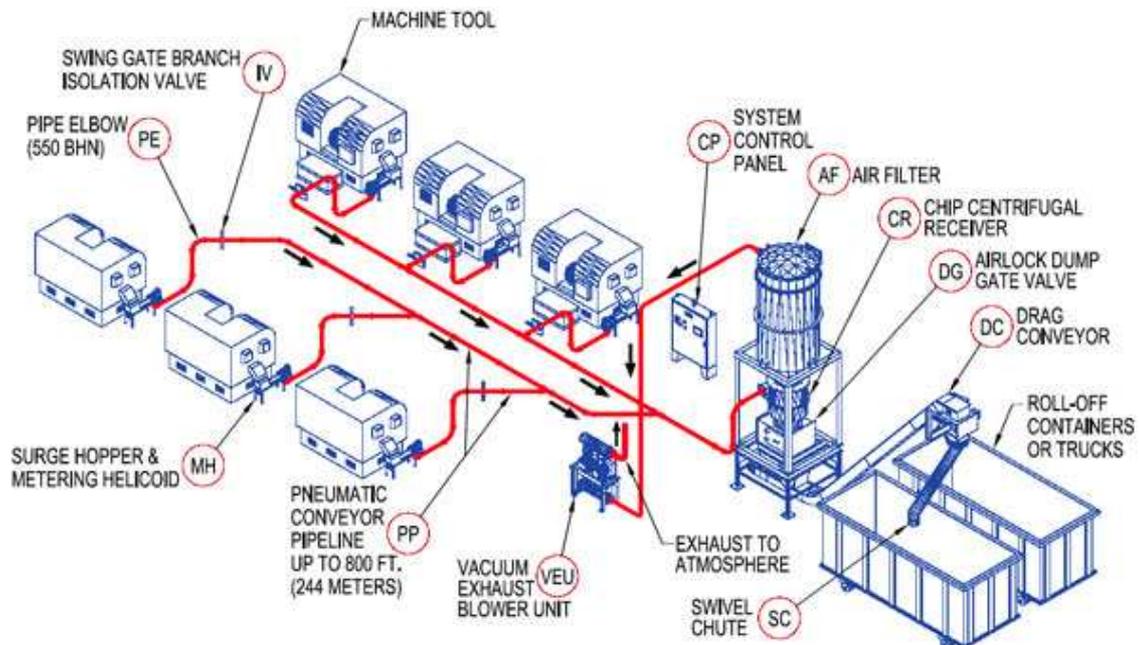


Figura 9 - Sistema de transporte de aparas metálicas em depressão da National Conveyors

Na movimentação em vácuo, não existem partes móveis em contacto com as partículas, nem fugas de poeiras para a atmosfera. Devido a esta estanquicidade superior, estes são geralmente categorizadas em função da poluição provocada pela instalação, principalmente quando se transportam matérias nocivas. A principal desvantagem deste tipo de instalações é a capacidade de carga limitada, bem como a reduzida distância que permitem vencer. Para ultrapassar estes obstáculos os componentes deveriam ser dimensionados para um vácuo mais potente, e torna este método secundário em relação a outros menos dispendiosos.

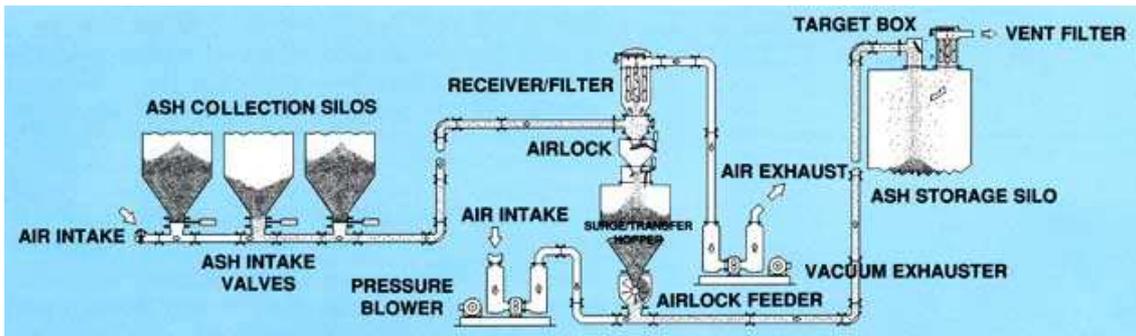


Figura 10 - Sistema de transporte de cinzas em depressão da National Conveyors

Aplicações

Sistemas em depressão são particularmente utilizados em instalações que movimentam caudais reduzidos, a uma distância intermédia, a partir de várias fontes para um só destino. A baixa pressão destes sistemas permite reduzir custos na tubagem e nas suas ligações.

Este método é utilizado em sistemas de aspiração central, ou outras instalações que envolvam redes de tubagem, transportando material para um único terminal de descarga (Bathia, 2009).

Especificações

Gama de caudais	baixo a médio, normalmente inferior a 10 t/h
Velocidade de transporte	dos 12 [m/s] até aos 40 [m/s]
Distâncias a percorrer	100 a 200 metros
Movimentador de gás	gerador de vacum tipo roots, ou ventilador
Pressão de funcionamento	até 50% de vácuo
Concentração de partículas	superior de 2,0

Capítulo VI.

Construção de um programa de dimensionamento

Tendo sido já esclarecidos os modelos numéricos nos quais assenta o dimensionamento do transporte pneumático, sistematizadas sequências de cálculo, é chegada a altura de maximizar a automação do cálculo através da realização de um utilitário dedicado, construído a partir de um programa comercial.

A construção pode ser dividida em duas fases, ou versões: uma fase inicial, em que são aplicadas as metodologias já explicadas resultando num programa de manipulação directa; e uma segunda fase na qual é desenvolvida interacção do utilizador como programa, resultando num programa de manipulação indirecta.

Na versão de manipulação directa, o utilizador tem acesso a todo o código do programa, inserindo os dados na janela de equações, e recebendo os resultados sem qualquer organização visual.

Quando a versão anterior se encontra completamente funcional é tempo de desenvolver uma versão manipulada indirectamente, através da criação de janelas dedicadas, organização da introdução de dados, espaços para a exposição de dados por vezes auxiliados por gráficos explicativos, etc. Tudo isto de forma a tornar o programa “Amigo do Utilizador”.

Sintetizando:

1. Conhecer o utilizador ao qual o programa se destina;
2. Compreender as funções do ramo ao qual se aplica;
3. Compreender os princípios gestão de informação no ecrã;
4. Desenvolver um sistema de navegação e menus;
5. Escolher um programa base adequado;
6. Proporcionar comentários esclarecedores do funcionamento;
7. Facilitar a internacionalização e acessibilidade;
8. Criar gráficos, ícones e imagens de fácil compreensão;
9. Organizar de forma clara as janelas constituintes do programa;
10. Testar, testar e voltar a testar.

Esta é a direcção a seguir na construção de um programa eficaz (Galitz, 2002).

VI.1 Conceitos iniciais

Para conseguir desenvolver um programa de auxílio ao dimensionamento de algo é necessário compreender o que se está a dimensionar, no fundo ver o problema da perspectiva do utilizador. Não se trata da investigação de novos modelos de cálculo, mas sim de apoiar quem já os utiliza, e portanto é possível aproveitar casos práticos de dimensionamento já resolvidos, para construir fluxogramas que ajudarão na sistematização dos processos.

Interpretar a Perspectiva do utilizador, é o passo seguinte para começar a idealizar a estrutura de cálculo que é necessário, independentemente do programa de cálculo. Assim concluí-se que para calcular os parâmetros do dimensionamento, o utilizador deve fornecer:

Propriedades das partículas em suspensão;

- Caudal de sólidos a transportar;
- Relação entre o caudal de sólidos e o fluido de transporte;
- Extensão de tubagem na horizontal e na vertical respectivamente;
- Acidentes no percurso, tais como mudanças de direcção;
- Tipo de funcionamento do sistema, em depressão ou em sobrepresão;

Por defeito, o fluido de transporte é ar, pois, apesar de outros fluidos serem requeridos para certas instalações, a grande maioria das aplicações recorre ao ar como transportador.

Definidas que estão as variáveis de entrada, há que estar sensibilizado para os valores que serão mais funcionais na saída. Grosso modo o utilizador procura dimensionar:

- A velocidade a que o fluido deve circular;
- As medidas de tubagem a serem utilizadas;
- A perda de carga nos troços lineares, e o peso das partes que a constituem;
- A resistência provocada pelas mudanças de direcção, e como pode ser optimizada;
- As proporções dos separadores de partículas;
- Um gráfico que traduza o ponto de funcionamento da instalação, o qual auxiliará a escolha de uma unidade movimentadora de ar, ou de outro gás transportador.

Embora os objectivos anteriores sejam a razão da existência do programa, este deve apresentar todas as variáveis que calculou, para que o utilizador possa tomar decisões em consciência da contribuição de cada uma delas.

VI.2 Programa de base

Tal como já foi referido o processo de dimensionamento é em grande parte dominado métodos iterativos, o que impõe o uso de um programa que consiga lidar com uma constante substituição de todas as suas variáveis. Apesar de programas como o MATLAB ou o MATCAD terem excelentes capacidades de cálculo, o programa escolhido foi o EES. Não porque tenha mais capacidades, mas porque a sua construção assenta na arbitragem de um valor inicial e a consequente resolução das equações e substituição dos valores previamente estabelecidos até chegar a valores que satisfaçam todas as restrições.

O EES encontra a solução numérica de um conjunto de equações algébricas, mas também é capaz de:

- Resolver equações diferenciais e integrais;
- Optimização de sistemas;
- Análises de incerteza, bem como regressões lineares e não-lineares;

O EES foi desenvolvido pelos professores, Dr. William Beckman e Dr. Sanford Klein, ambos da Universidade de Wisconsin. A sua experiência no ensino de termodinâmica e transferência de calor, mostrou a ambos que os estudantes estavam a usar demasiado tempo a pesquisar propriedades termodinâmicas e a resolver equações, quando deviam estar a adquirir conhecimento de modelação de casos reais.

EES vs “Os Outros”

1. As equações podem ser inseridas em qualquer ordem, podendo estar as variáveis em qualquer membro da equação, o EES reorganiza-as de forma a obter a solução mais eficiente;
2. Proporciona um grande número de funções que determinam as propriedades termo físicas de uma enorme variedade de substâncias;

O EES pode ser usado para resolver problemas de dimensionamento, nos quais o efeito de um ou mais parâmetros têm de ser determinados. Para este efeito o programa dispõe de tabelas paramétricas onde podem ser calculadas as variáveis dependentes a partir dos dados fornecidos pelo utilizador. Após o cálculo é proporcionada a possibilidade de contrastar os valores obtidos em num gráfico de duas variáveis, construído a partir das tabelas paramétricas ou de consulta.

VI.3 Estrutura do programa de dimensionamento

Tudo junto em oposição a uma estrutura de módulos

A ideia de conceber uma única página de código, onde são introduzidos todos os dados e obtidos os resultados é tentadora. Para isso agruparam-se todos os módulos de cálculo, como por exemplo a perda de carga e as respectivas velocidades, num só ficheiro. Dado que todos os módulos estavam completamente funcionais seria de esperar que o conjunto também o fosse, o que não se veio a verificar. O resultado prático da junção foi a impossibilidade do programa lidar com todas as variáveis, não convergindo para um resultado de acordo com as restrições do problema. Além disso, o interface resultava demasiado confuso.

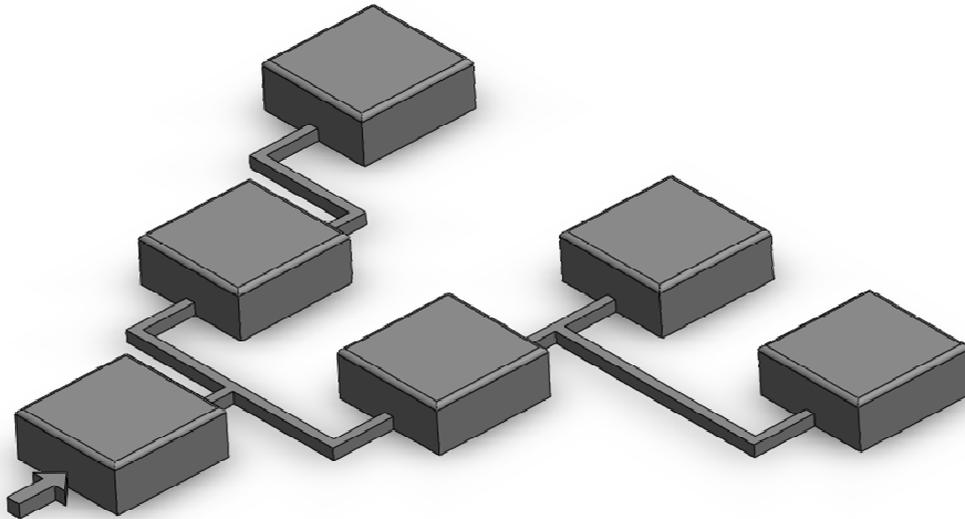


Figura 11 - Esquema de ligação directa de dados entre os módulos de cálculo

Assim foi necessário um novo tipo de abordagem, um conjunto de módulos independentes com botões de ligação entre si. A ligação é possibilitada pelas opções de “Link”, ou da realização de um ficheiro “Macro”*, ambas apenas possíveis na versão profissional do EES. Mesmo depois de ligar as diferentes aplicações entre si surge a necessidade de fazer o transporte tanto dos dados iniciais como dos resultados obtidos nas aplicações já executadas. A solução para este impasse encontra-se nas capacidades de \$IMPORT e \$EXPORT do programa base, as quais permitem importar valores a atribuir às respectivas variáveis, e consequentemente exportar os resultados, de forma a serem usados nas aplicações a jusante.

Um local de armazenamento de dados, acessível ao longo de todo o programa

Uma hipótese seria exportar os valores para o “CLIPBOARD”, uma operação em tudo semelhante ao que acontece quando um texto é copiado e posteriormente colado noutro aplicativo. Apesar da quantidade de dígitos possível de armazenar no “CLIPBOARD” ser relativamente elevada, cerca de 65.000 caracteres, após serem importados para uma aplicação, esses dados não mais poderão ser acedidos. Isto levanta sérios problemas neste caso em concreto, visto que grande parte dos valores, são utilizados em mais do que uma aplicação.

A solução encontrada foi a utilização de tabelas de consulta, ou “Lookup Tables”, onde são guardados todos os valores utilizados, os quais estão sempre disponíveis para consulta e actualização. A conveniência do armazenamento dos dados de uma forma bem estruturada e de fácil acesso será explorada mais adiante.

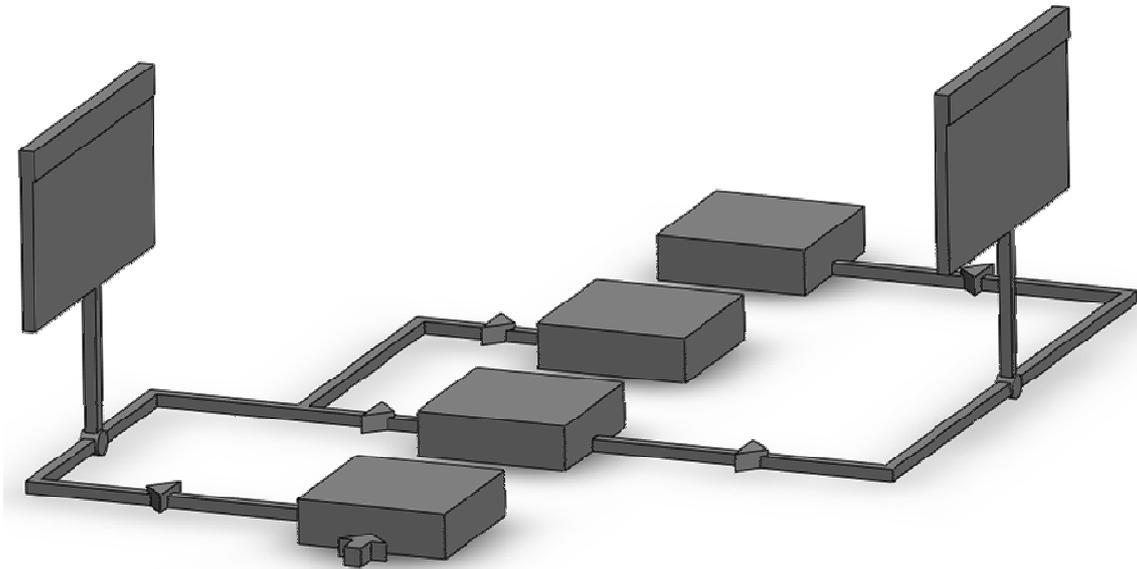


Figura 12 - Esquema da distribuição de dados através de tabelas de consulta

Apesar de funcionar em pleno, com a criação de um ficheiro executável, estes comandos de ligação entre módulos passam a ser redundantes. Isto porque o ficheiro executável já contempla um menu de acesso aos diferentes componentes de cálculo.

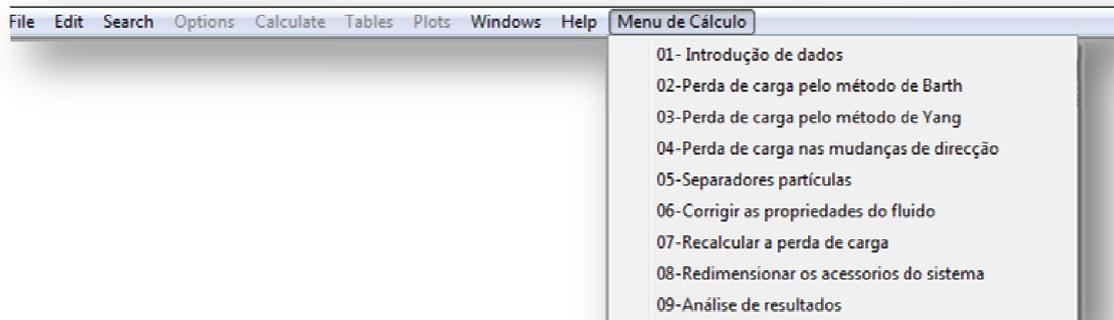


Figura 13 - Menu de acesso a todos os módulos de cálculo

VI.4. Aplicação em EES

As operações mencionadas anteriormente, para serem implementadas, necessitaram de comandos diversos, alguns dos quais são aqui expostos.

Tabela 11 - Comando em destaque para o programa desenvolvido

\$OPENLOOKUP 'C:\...'	De forma a aumentar a eficiência do algoritmo, a tarefa de actualização das tabelas de consulta pode ser implementada através de directivas internas do EES, inseridas na parte inicial do código de cada módulo de cálculo.
\$EXPORT 'C:\...'	No final de cada módulo, os dados necessários às aplicações subsequentes são guardados, através deste comando nas tabelas de consulta respectivas
\$UPDATEGUESSES	O método de funcionamento do EES exige a definição de uma estimativa do valor a calcular logo à partida. Ao introduzir esta directiva, o programa actualiza as estimativas, de acordo com resultados anteriores, diminuído o tempo de iteração do programa.
LOOKUP('Nome',1,'Col')	Os valores que foram anteriormente guardados nas tabelas, podem ser chamados ao programa principal, e atribuídos a novas variáveis. Para o seu funcionamento é necessário designar a tabela, a coluna e a linha do valor pretendido.
LOOKUP\$ROW('Nome',1,'Col')	Algumas tabelas de consulta contêm dados não alteráveis, que estão disponíveis na literatura. Um exemplo é a tabela de velocidades recomendadas do fluido, para cada tipo de material. Quando o utilizador selecciona o material a transportar, da lista no menu, este comando associa o nome do material escolhido, na coluna 1 à velocidade correspondente na coluna 2, da linha com o nome do material escolhido.

*Um ficheiro **macro** é basicamente um conjunto de instruções de comando para o EES bem como para programas exteriores. Essas instruções podem ser abrir ou fechar um programa, um ficheiro, guardar dados, imprimir ou mesmo atribuir valores às variáveis especificadas.*

As instruções contidas no ficheiro são executadas pela ordem na qual foram escritas, por exemplo:

***Macro**

```
OpenLookup 'C:\Users\Filipe\Documents\PROJECTO\Algoritmos\IC_inicio.txt'
Solve
Save
```

Ilustração 14 - Codificação de um comando macro posteriormente guardado em *.emf

Este conjunto de instruções abre a tabela de consulta especificada, resolve o sistema de equações, e grava as alterações verificadas.

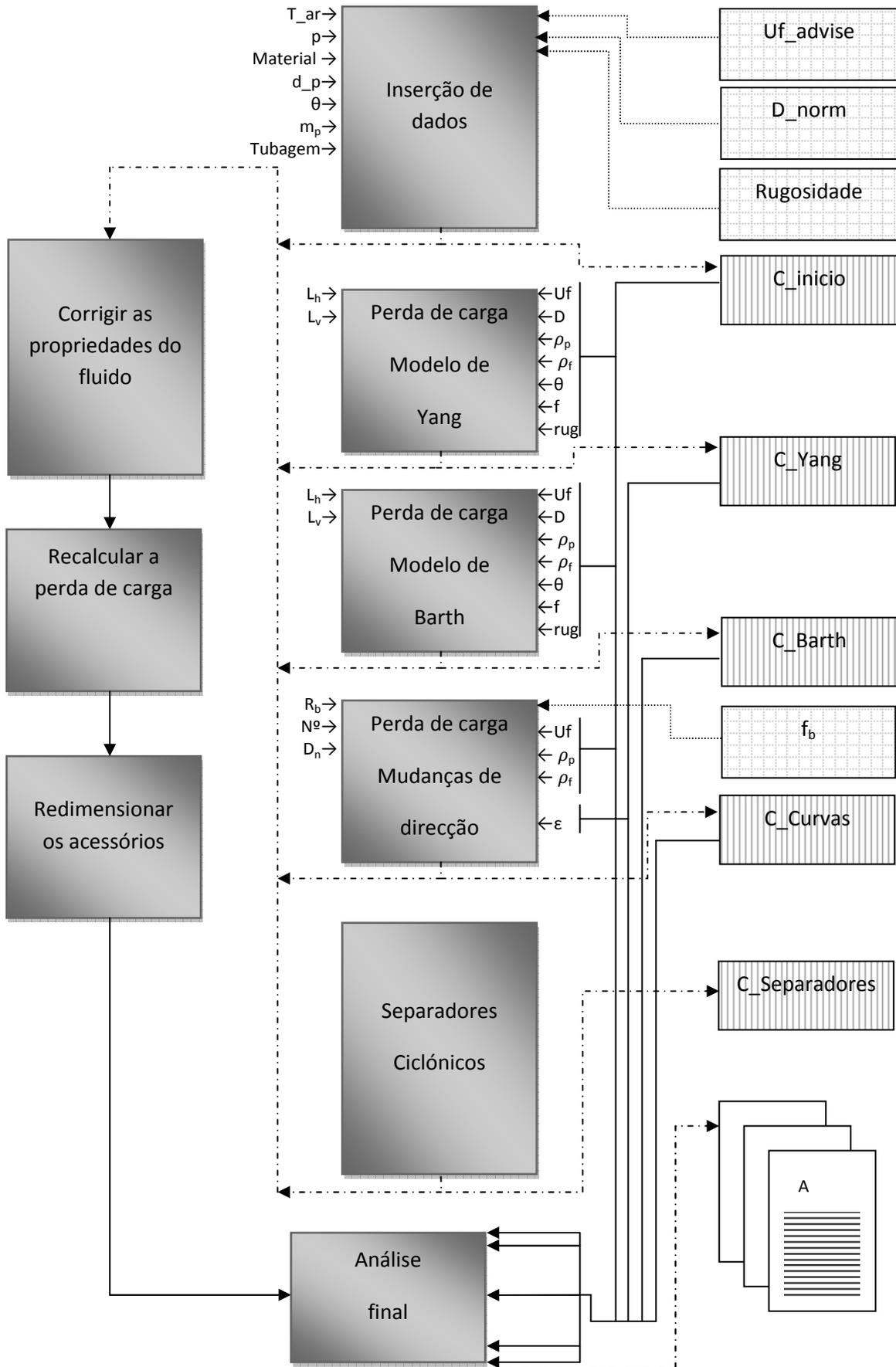


Figura 15 – Diagrama esquemático da rede de contactos do programa

VI.4.1 Dados de entrada

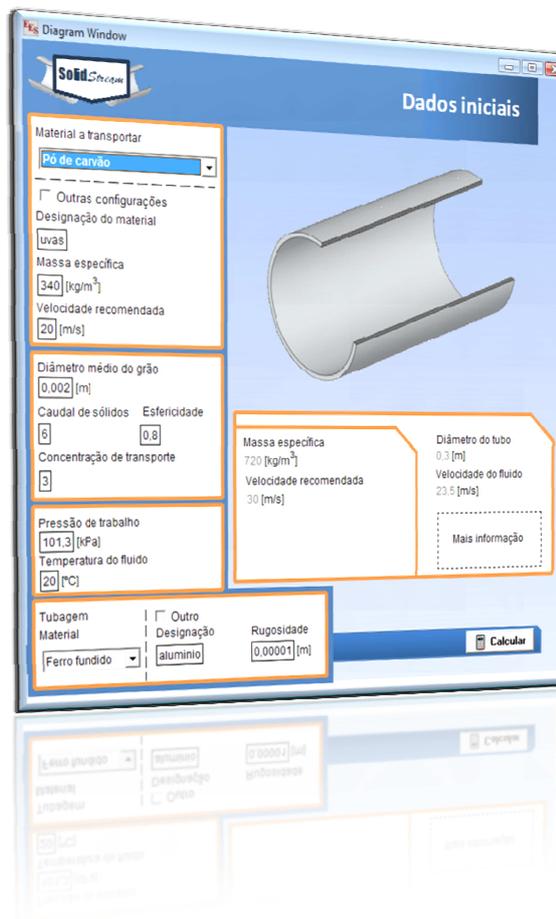


Figura 16 - Módulo inicial de inserção de dados

Funcionamento

São introduzidos os requerimentos do utilizador, segundo os quais o programa define um valor para a velocidade do fluido e um diâmetro de entre os valores estipulados pela norma DIN 2448

A selecção da velocidade de transporte passa por quatro fases:

1. É utilizada a velocidade recomendada pela tabela;
2. A velocidade anterior é corrigida segundo o valor seleccionado para o diâmetro;
3. Confirma-se que o valor encontrado está de acordo com os limites estabelecidos por Owen, caso isso não aconteça, a velocidade do fluido deve ser novamente modificada de forma a concordar com as fronteiras do critério anterior;
4. Constata-se que a velocidade à qual é provável ocorrer engasgamento é inferior à velocidade do fluido, caso contrário a velocidade é novamente corrigida.

No final do cálculo todos os valores são transportados para uma tabela exclusiva do módulo inicial, de onde serão mais tarde importados para outros módulos.

Dados de entrada

- *Material a transportar*, existem materiais em arquivo com as suas respectivas propriedades, para serem utilizados de imediato. Caso o material não conste na lista disponível, deve ser fornecida a massa específica e velocidade à qual o utilizador recomenda que o fluido circule
- *Caudal de sólidos*, quantidade de partículas a transportar, expressa em kg/s
- *Diâmetro das partículas*, diâmetro médio das partículas, onde há que ter em atenção o caso particular dos sólidos não-esféricos
- *Factor de carga*, θ , apesar deste factor estar ao encargo do utilizador deve ser enquadrado em certos limites recomendados. Como estimativa inicial deve ser tomado um valor entre 2 e 3, o qual pode ser melhorado numa próxima utilização, conforme os resultados obtidos
- *Material da tubagem*, tal como nos sólidos a transportar, existe uma listagem com os materiais mais comuns e as respectivas rugosidades. Caso o material não esteja disponível, deve ser fornecida a designação do material bem como a sua rugosidade
- *Pressão de trabalho*, esta será a pressão estimada inicialmente pelo utilizador. Após ter sido calculada a perda de carga da instalação, esta será melhorada conforme o tipo de funcionamento do sistema, e todos os parâmetros dela dependentes serão recalculados.
- *Temperatura do fluido*, será considerada constante ao longo de toda a linha, tendo especial influência na viscosidade do fluido, e mais tarde no rendimento dos separadores ciclónicos.

Saída de resultados

- *Diâmetro a utilizar*, em função do caudal de sólidos e da velocidade recomendada é calculado um diâmetro correspondente. O diâmetro a utilizar na instalação será o imediatamente superior, encontrado na norma DIN 2448.
- *Velocidade de sufoco*, embora existam várias definições para a obtenção da velocidade de sufoco, optou-se por usar o critério de Knowlton e Bachovchin, dado que para além de ser fácil de implementar peca por excesso, o que se traduz num maior factor de segurança no que ao engasgamento diz respeito.
- *Parâmetro de Owen*, como já foi referido anteriormente, este parâmetro dá uma noção da energia implícita ao escoamento. Caso seja demasiado baixo, está em risco a saltação e conseqüentemente a continuidade do escoamento em fase diluída. Um valor muito elevado reflecte um uso excessivo de energia para a movimentação da carga, o que acarreta um desperdício claro de recursos.
- *Velocidade do fluido*, após todas as correcções, em função das normalizações, velocidade crítica e *parâmetro de Owen*, obtém-se a *velocidade do fluido* que garante o melhor desempenho do sistema.

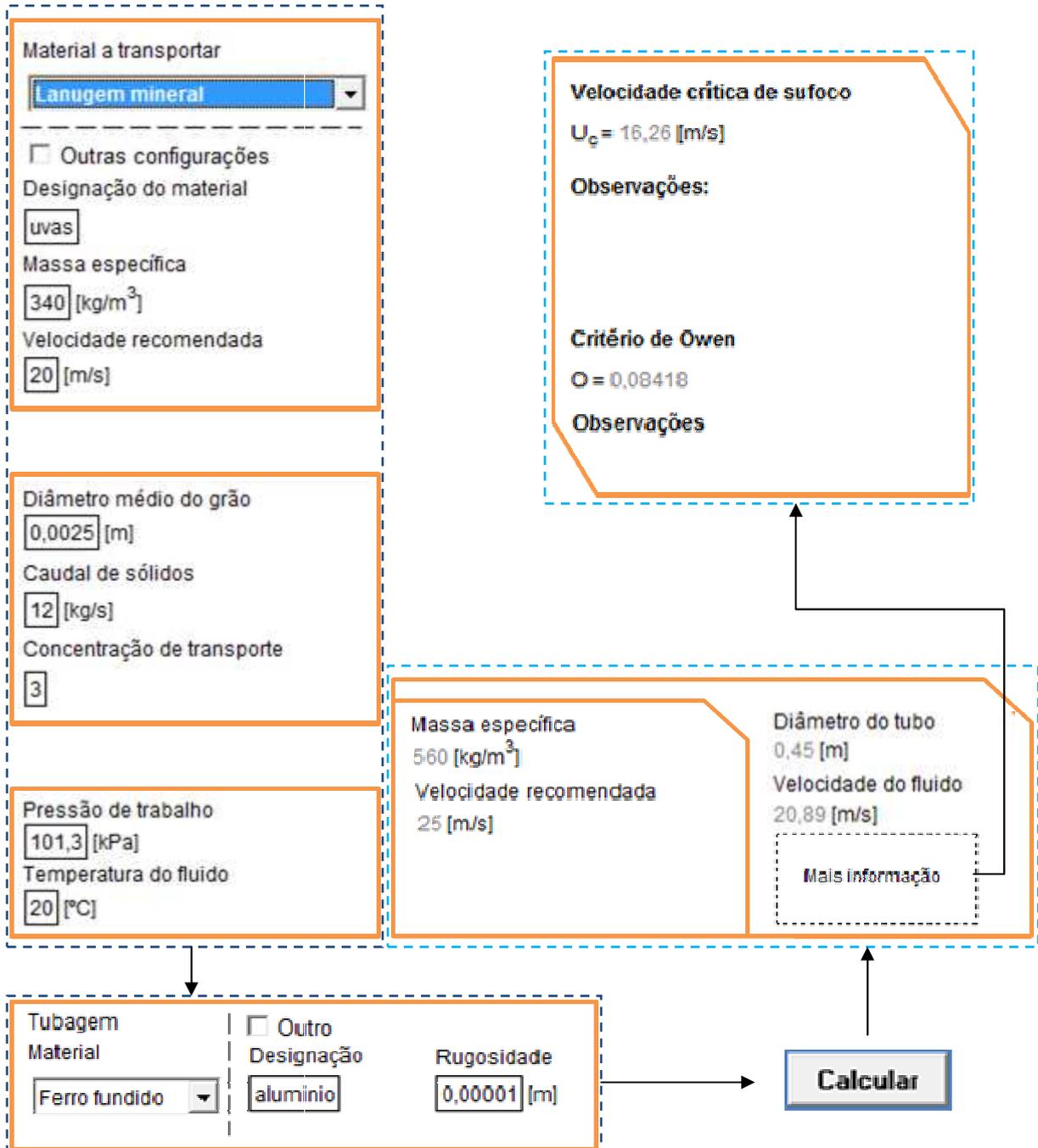


Figura 17 - Fluxograma de inserção de dados e estimativas iniciais

- Inserção de dados do problema
- Resultados calculados

VI.4.2 Perdas de carga em linha segundo o modelo de Barth

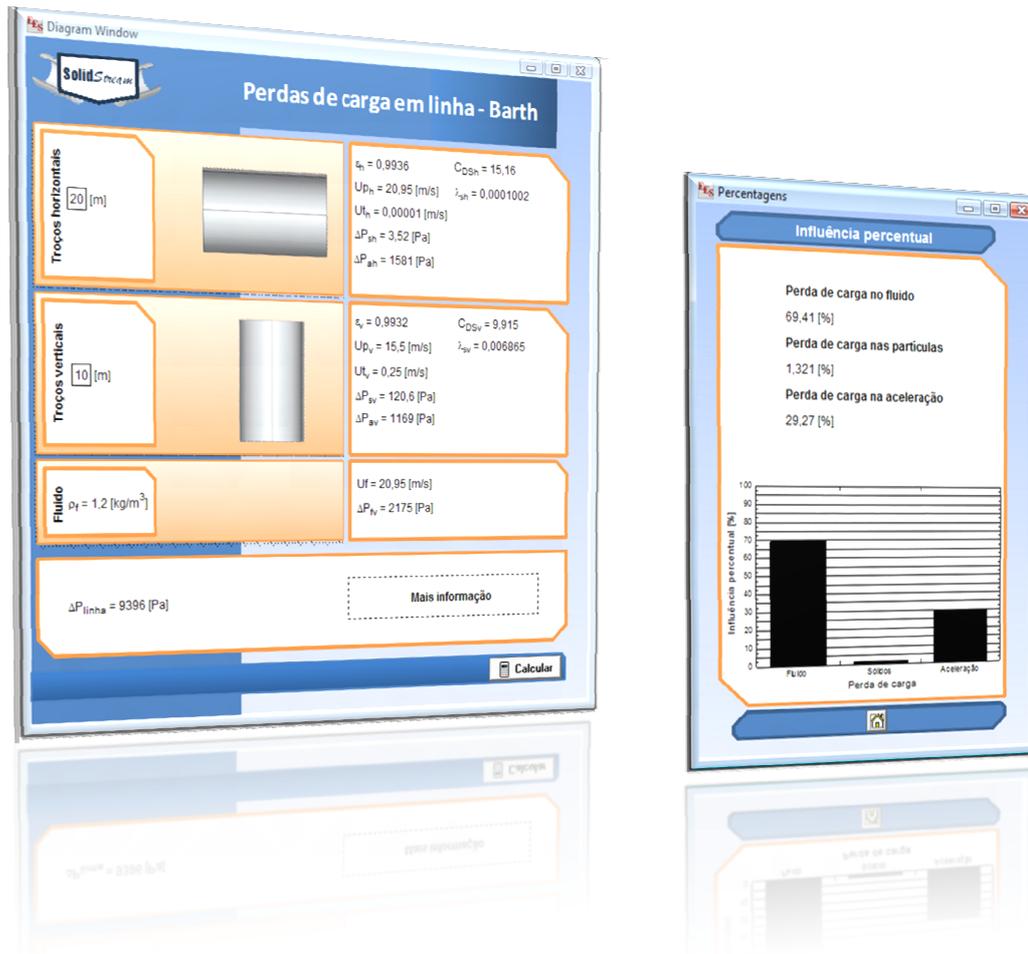


Figura 18 - (Esquerda) Módulo da cálculo da perda de carga em linha, aplicando Barth; (direita) Análise percentual dos resultados

Ao utilizador é dada a possibilidade de optar entre dois métodos distintos para o cálculo da perda de carga em troços rectos, a metodologia de Barth ou a metodologia de Yang, ambos os processos já expostos na secção teórica.

Funcionamento

Após terem sido calculados os parâmetros necessários no módulo inicial, eles são transferidos para esta secção automaticamente. O utilizador fornece a extensão total de troços verticais e horizontais respectivamente, e o algoritmo fornece todas as componentes da perda de carga devidamente indexadas. Clicando na área rotulada de "Mais informação", é apresentada uma nova janela, onde se explicita a relação percentual entre as componentes da perda de carga.

NOTA: Deve-se ter em atenção que, devido à difícil convergência deste método alguns resultados vêm afectados de resíduos elevados. Visto isto, este módulo serve apenas como demonstração do método em si. Para obter os valores necessários para os módulos a jusante o utilizador deve calcular a perda de carga através do método de Yang.

Dados de entrada

- *Troços horizontais*, somatório de todas secções de tubos dispostas na horizontal
- *Troços verticais*, somatório de todas as secções de tubo na vertical
- Todos os outros dados necessários são atribuídos automaticamente a partir da tabela do módulo a montante.

Saída de resultados

- *Velocidade terminal*, de acordo com a equação (1.1), são obtidas as *velocidades terminais* para os escoamentos na vertical e na horizontal, U_{tv} e U_{th} , respectivamente.
- *Velocidade das partículas*, U_p horizontal e vertical, obtida conforme a expressão (3.4), aplicada em ambas as direcções;
- *Porosidade*, ϵ , na presença de várias direcções do escoamento, a *porosidade* apresenta valores correspondentes a cada uma delas. Neste caso são apenas admitidos escoamentos verticais e horizontais, resultando, ϵ_v e ϵ_h , respectivamente.
- *Perda de carga do fluido transportador*, Δp_f , esta componente é apenas derivada à resistência provocada pelo fluido ao escoamento. Está dependente do coeficiente de Darcy calculado anteriormente, f .
- *Perda de carga da matéria sólida nos troços horizontais e verticais*, Δp_{sh} e Δp_{sv} , das equações resulta a contribuição das partículas sólidas na perda de carga
- *Perda de carga na aceleração na horizontal e na vertical*, Δp_{ah} e Δp_{av} , através da opção analítica, equação (3.7), obtêm-se as perdas de carga devidas à aceleração das partículas até ao regime de escoamento definitivo do transporte
- *Perda de carga total nos troços rectos da instalação*, Δp_{linha} , após o cálculo de todas as componentes anteriores da perda de carga, o seu somatório resulta na perda de carga total nos troços rectos.

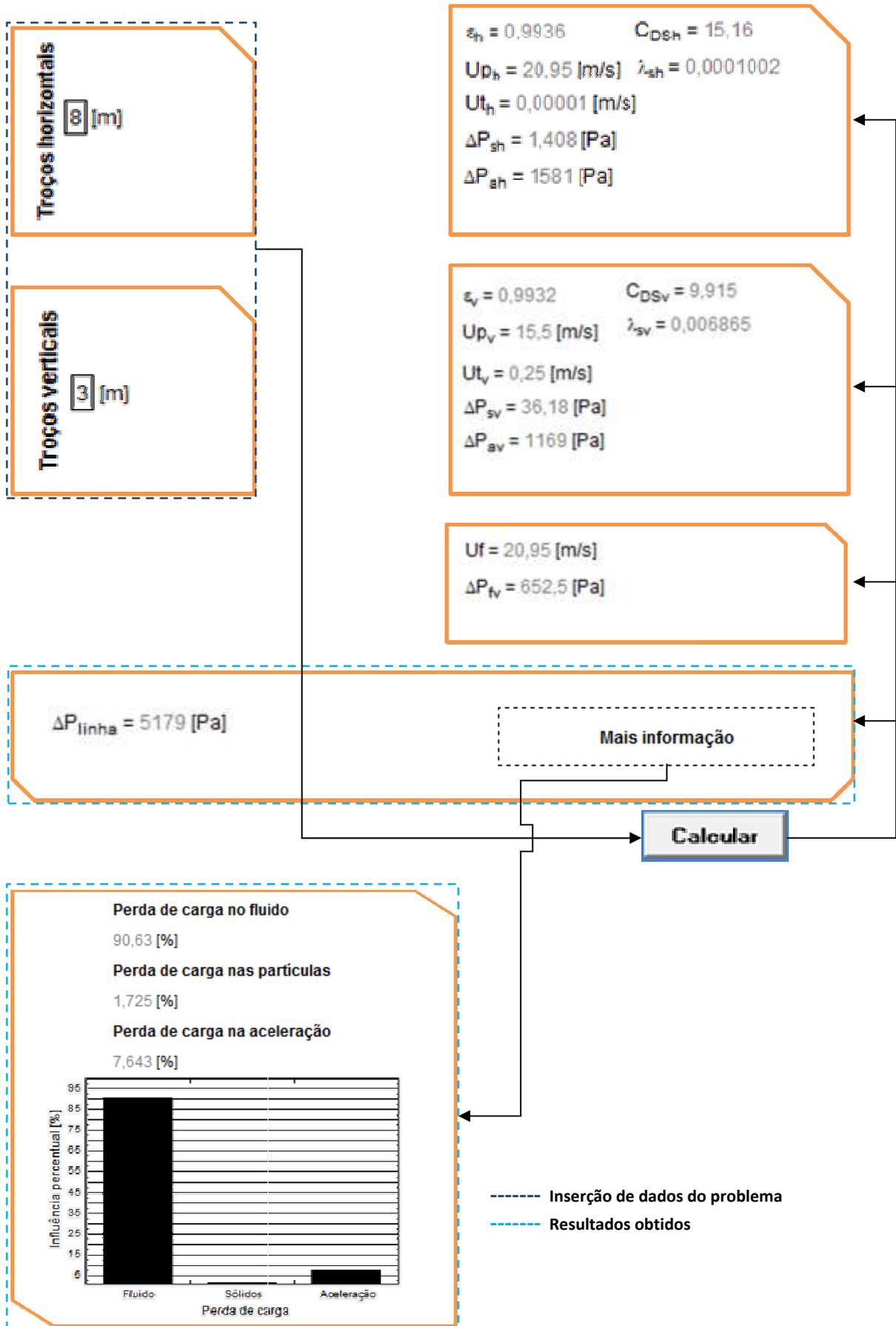


Figura 19 - Fluxograma de funcionamento do módulo de cálculo da perda de carga pelo modelo de Barth

VI.4.3 Perdas de carga em linha segundo o modelo de Yang

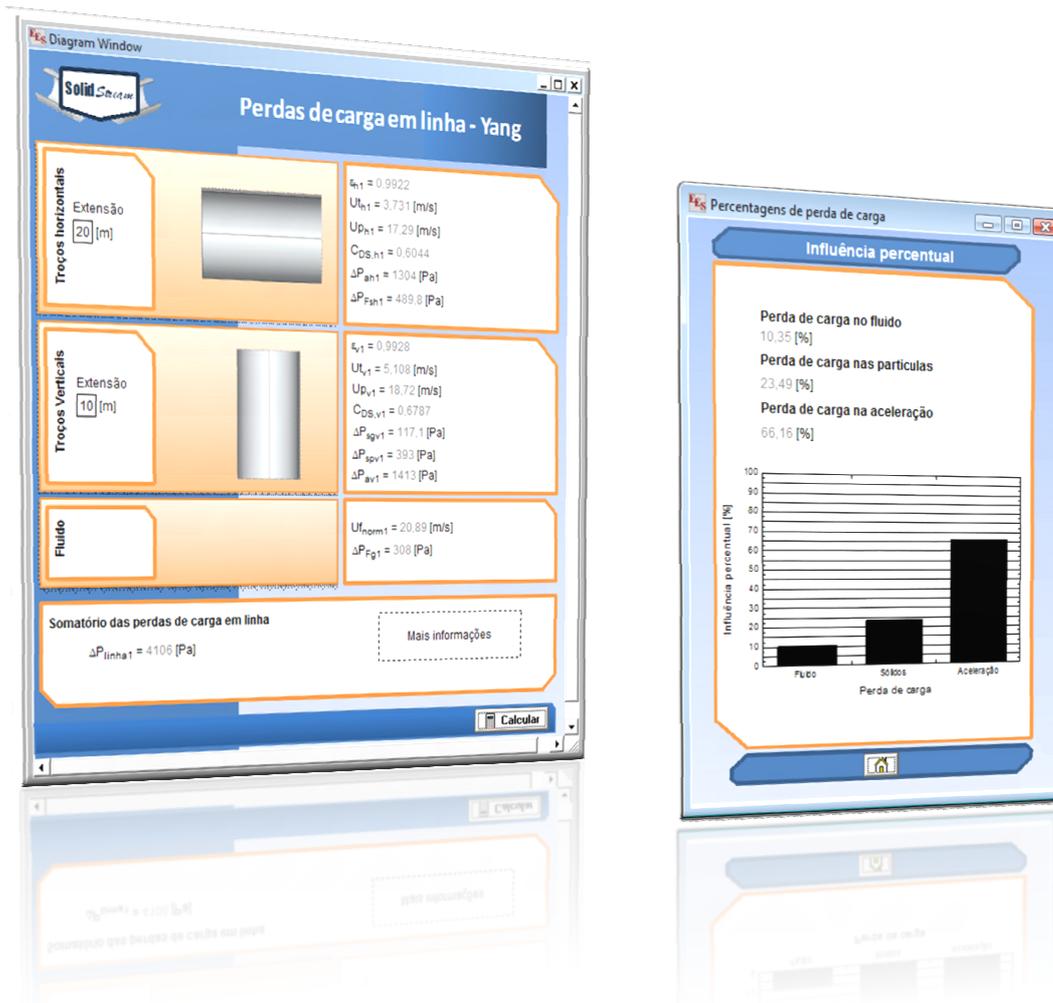


Figura 20 - (Esquerda) Módulo de cálculo da perda de carga através de Yang; (Direita) Análise percentual dos resultados

Funcionamento

Para fazer o cálculo dos componentes da perda de carga no modelo de Yang, é necessário introduzir as extensões de tubagem na horizontal e na vertical respectivamente.

O processo de cálculo dos parâmetros desenvolve-se segundo o esquema sequencial apresentado na *tabela – 5*.

Após ter sido concluído o cálculo o programa apresenta as diferentes componentes da perda de carga, bem como alguns dos parâmetros intermédios, separados por direcção de escoamento.

Ao pressionar a área 'Mais Informação', é revelada uma nova janela, onde se faz a análise gráfica e percentual da influência dos diferentes constituintes do valor total da perda de carga.

Dados de entrada

- *Troços horizontais*, somatório de todas secções de tubos dispostas na horizontal
- *Troços verticais*, somatório de todas as secções de tubo na vertical
- Todos os outros dados necessários são atribuídos automaticamente a partir da tabela do módulo anterior.

Saída de resultados

- *Velocidade terminal*, U_t , obtida a partir da relação entre a velocidade do fluido e a velocidade das partículas em relação a um referencial fixo
- *Velocidade das partículas*, U_p horizontal e vertical, calculados pelas expressões de Hinkle, equações (3.17) e (3.18)
- *Porosidade na horizontal e na vertical*, ϵ , representativa da diferença entre a percentagem de espaços ocupados pelo fluido nas duas direcções do escoamento
- *Perda de carga na aceleração na horizontal e na vertical*, Δp_a , apesar de já terem sido apresentadas alternativas à equação inerente ao modelo de Barth, esta continua a ser a mais prática de implementar, logo será novamente utilizada
- *Contribuição estática da fase sólida na perda de carga no modelo de Yang*, Δp_{sp} , esta componente reflecte a energia dispendida pelas partículas para vencer diferenças de cota
- *Contribuição estática da fase gasosa na perda de carga no modelo de Yang*, Δp_{sg} , esta componente reflecte a energia dispendida pelo gás para vencer diferenças de cota
- *Contribuição do atrito na fase gasosa para a perda de carga no modelo de Yang*, Δp_{Fg} , este parâmetro tem o mesmo significado e consequentemente o mesmo valor de Δp_f , utilizado no modelo de Barth
- *Contribuição do atrito na fase sólida para a perda de carga no modelo de Yang*, Δp_{Fs} , componente devida ao fenómeno de fricção das partículas, em conformidade com a expressão (3.15), em ambas as direcções do escoamento;
- *Perda de carga total nos troços rectos da instalação*, Δp_{linha} , após o cálculo de todas as componentes anteriores da perda de carga, o seu somatório resulta na perda de carga total nos troços rectos

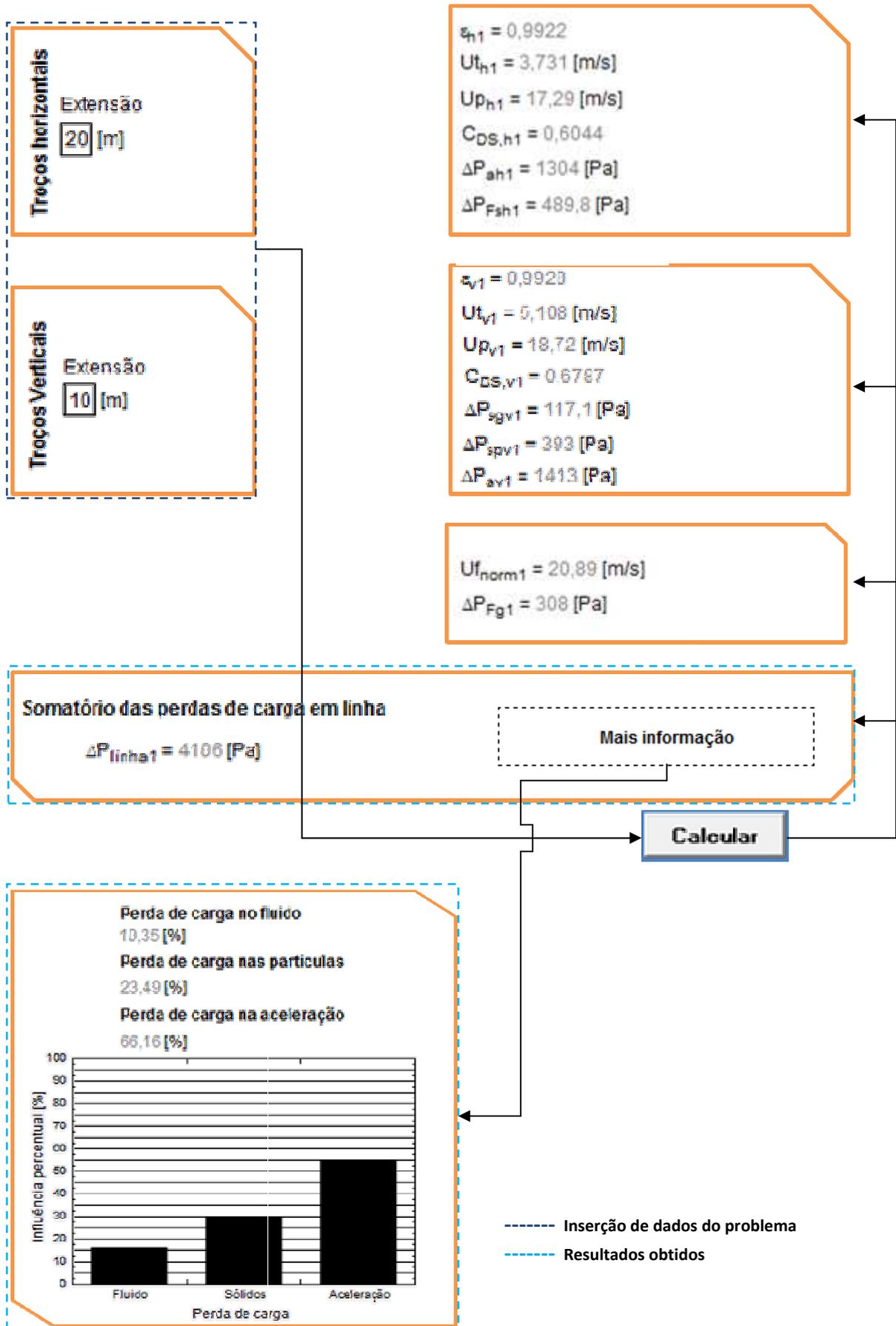


Figura 21 - Fluxograma de funcionamento do módulo de cálculo das perdas de carga pelo modelo de Yang

VI.4.4 Perda de carga nas mudanças de direcção

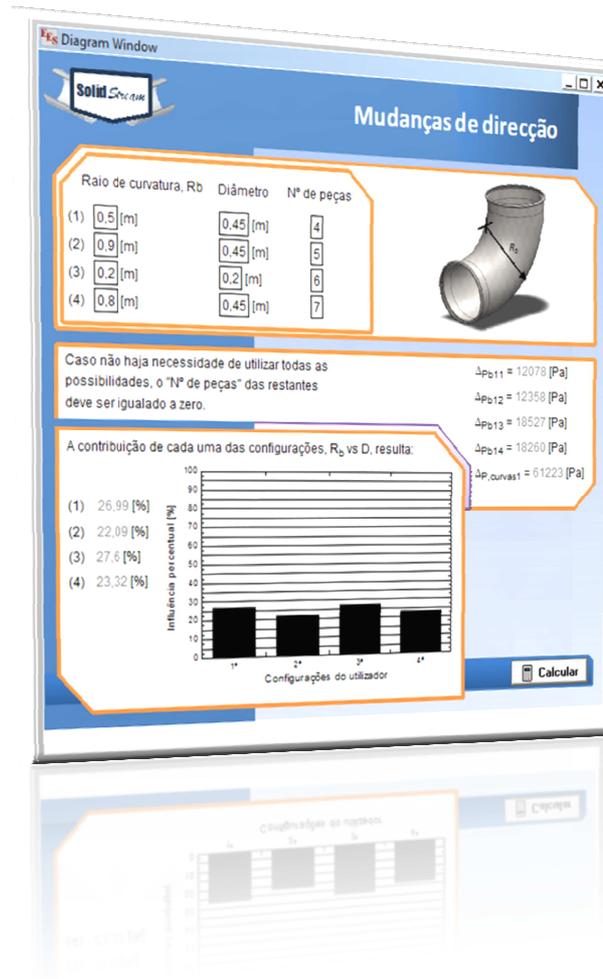


Figura 22 - Módulo de cálculo das perdas ocorridas nas mudanças de direcção

Este módulo calcula a perda de carga nas secções não rectas da instalação. Mais do que apenas calcular, ele apresenta a influência das diferentes combinações raio/diâmetro na nos resultados de perda de carga obtidos.

Funcionamento

O cálculo da perda de carga em cada uma das mudanças de direcção é feito de acordo com a expressão (3.26), a qual está dependente do factor f_b , definido em função da relação entre o raio de curvatura e o diâmetro da tubagem.

De forma a deixar alguns graus de liberdade ao utilizador, o diâmetro de cada uma das configurações não está automaticamente dependente do diâmetro normalizado dos troços rectos, obtido no módulo inicial

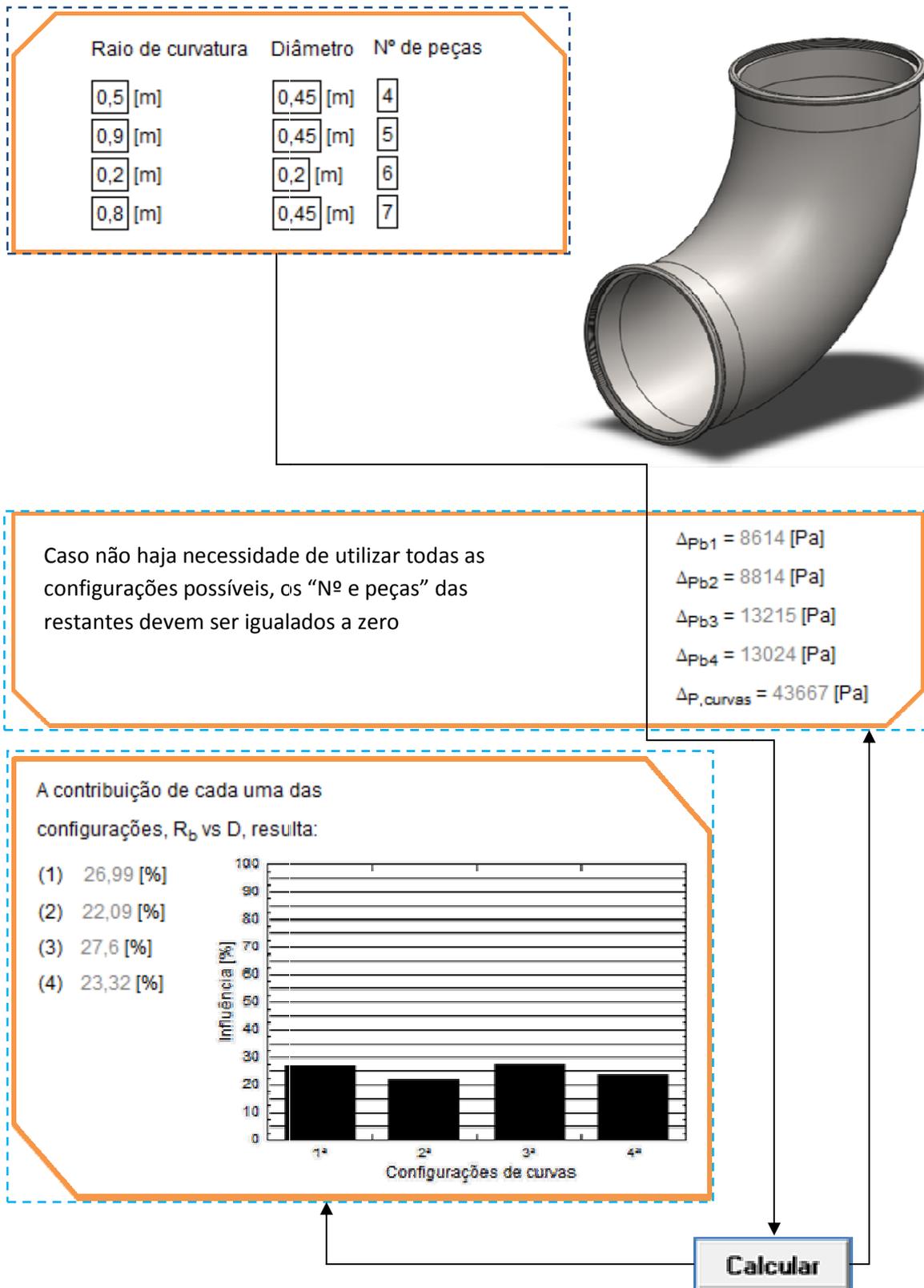


Figura 23 - Fluxograma de funcionamento do cálculo da perdas de carga nas curvas

- - - - - Inserção de dados do problema
- - - - - Resultados calculados

Dados de entrada

- *Raio de curvatura*, possibilidade de testar até 4 combinações de raios de curvatura
- *Diâmetro*, diâmetro do tubo, visto que pode haver alargamentos ou estreitamentos na tubagem as opções de diâmetro não foram limitadas ao calculado no módulo anterior
- *Número de peças*, quantidade de elementos com a combinação R_b vs D já introduzida

Auxiliares

- *Rácio R_b/D , R* , é necessário definir esta relação de forma a utilizar os valores tabelados, os quais foram já apresentados pela tabela 6

Saída de resultados

- *Contribuição na perda de carga*, está definida em percentagem, e representa o peso de cada uma das quatro configurações. Este cálculo é baseado no f_b , e auxilia o utilizador na escolha uma combinação mais eficiente. Para melhor compreensão, é também apresentado um gráfico de barras, com a influência percentual de cada uma das configurações anteriores.
- *Perda de carga em cada conjunto de curvas com as mesmas características*, Δp_b , Resistência ao escoamento ao negociar mudança de direcção com um raio R_b , no interior de uma tubagem com diâmetro D , nas curvas semelhantes
- *Perda de carga total ocorrida nas mudanças de direcção*, Δp_{curvas} , Somatório de toda a perda de carga ocorrida aquando das mudanças de direcção.

VI.4.5 Separadores ciclónicos

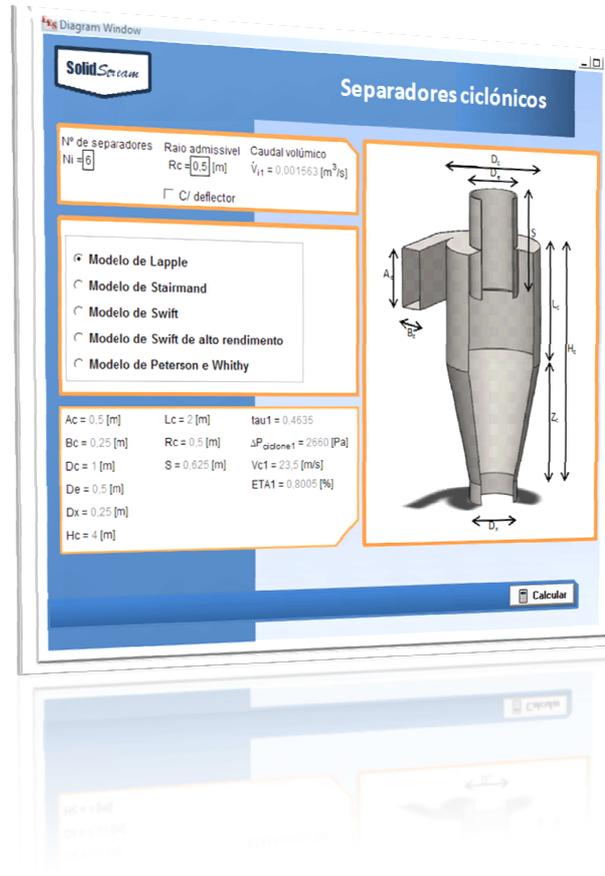


Figura 24 - Módulo de dimensionamento dos separadores de partícuais

Funcionamento

Sabendo m_p então:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_p}{\rho_p} ; R_c = \sqrt{\frac{2 \dot{V}}{V_c}}$$

Onde V_c é aproximadamente igual à velocidade intersticial do fluido, dado que não é considerada a variação de velocidade devida à mudança de área da secção, à entrada do separador. A partir da velocidade considerada pode obter-se um valor inicial de R_c , verificando-se a sua validade para as condições requeridas, conforme o valor resultante do rendimento de separação. Caso as proporções sejam excessivas, deve-se ter em atenção que R_c não deve ultrapassar os 0,5 metros. Para que os valores estejam em conformidade com esta constatação experimental, deve-se dividir o caudal por vários separadores colocados em paralelo, até que a condição anterior seja coerente (Pinho, 2005).

O utilizador introduz o raio, R_c , pretendido para o separador ciclónico e o número de aparelhos a utilizar. Ao que o programa fornece os respectivos rendimentos, proporções e capacidade em caudal volúmico de cada aparelho. Caso as características não satisfaçam o utilizador, pode alterar os valores estipulados e calcular novos resultados, sendo que serão imediatamente actualizados na tabela de valores. Apenas a última configuração escolhida é guardada para utilizações a jusante.

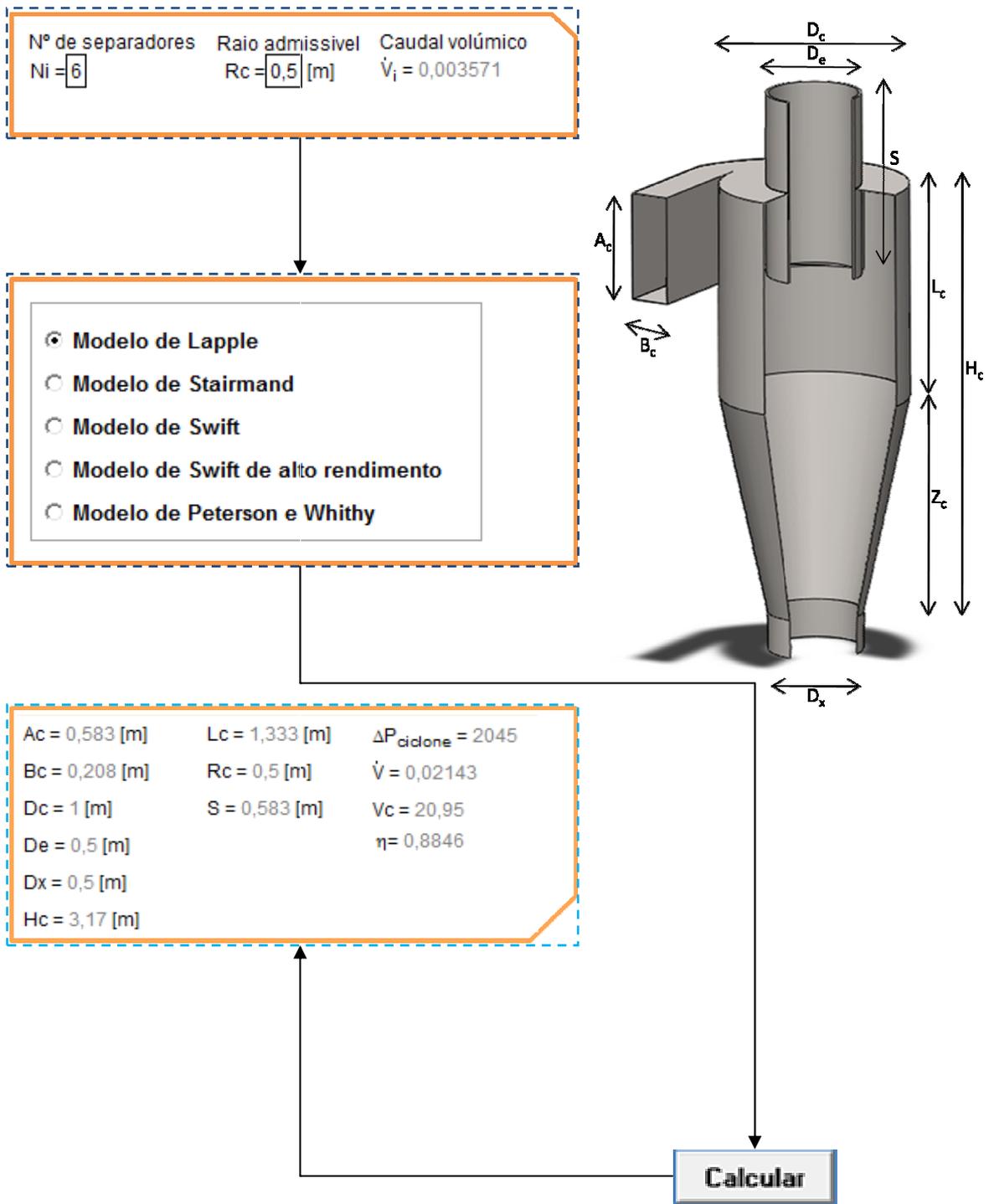


Figura 25 - Fluxograma sequencial do módulo de dimensionamento dos separadores ciclônicos

----- Inserção de dados do problema
 - - - - - Resultados calculados

Dados de entrada

- *Parâmetros adimensionais de um ciclone padrão*, de acordo com as referidas na literatura, já expostas na secção IV.2, tabela 7. A introdução destes dados é feita através de botões mutuamente exclusivos, que ao serem actuados introduzem as seguintes equações directamente no código do programa:
Cicl\$='Lapple' – Para fornecer informação aos módulos posteriores
Util\$='utilização geral' - Para fornecer informação aos módulos posteriores
 $Ac/Dc=0,5$
 $Bc/Dc=0,25$
 $S/Dc=0,625$
 $De/Dc=0,5$
 $Lc/Dc=2$
 $Hc/Dc=4$
 $Dx/Dc=0,25$
- *Raio admissível para o separador*, o raio de cada um dos separadores deve ser estimado pelo processo já visto no início desta secção, quando foi exposto o funcionamento do módulo.
- *Número de ciclones a utilizar*, o qual está dependente do volume a separar, dimensões do separador bem como do rendimento do mesmo.

Saída de resultados

- *Dimensões do separador*, a partir do modelo seleccionado e do raio estimado anteriormente, as dimensões do separador são calculadas, sem recurso a mais nenhuma equação
- *Rendimento*, revela a quantidade percentual de partículas de diâmetro d_p que serão afastadas do fluido. Conhecendo este valor pode-se rever a estimativa do raio admissível, com o intuito de melhorar a eficiência do ciclone
- *Caudal volúmico por separador*, representa o caudal introduzido em cada um dos separadores montados em paralelo
- *Perda de carga no separador*, é calculada segundo a expressão (4.14), proposta por Shepherd e Lapple

VI.4.6 Correção das propriedades do fluido

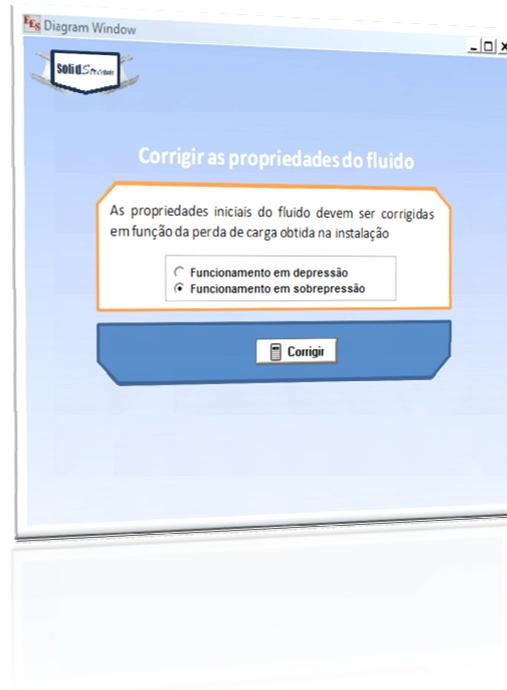


Figura 26 - Módulo auxiliar de correção das propriedades do fluido

Funcionamento

Após ter sido feito o cálculo das perdas de carga no sistema é necessário fazer as respectivas correções aos valores iniciais de pressão e temperatura, de forma ao bom funcionamento de todo o sistema. Essas alterações vão depender do tipo de instalação em estudo, seja um funcionamento em sobrepressão ou em depressão.

O módulo exige a escolha de um dos tipos funcionamento acima mencionados, procedendo da seguinte forma:

- Funcionamento em sobrepressão

A perda de carga total da instalação obtida anteriormente é somada ao valor de pressão admitido inicialmente. Este valor será considerado como a nova pressão do ar, afectando o valor da massa específica do mesmo dado que

$$\rho_f = f(T; P_{ar}) \quad (6.1)$$

$$\rho_{f,sobrepressão} = f[T; (P_{ar0} + \Delta p_{total})] \quad (6.2)$$

- Funcionamento em depressão

No caso de se tratar de um sistema em depressão, a correção das propriedades do fluido deve ser feita por

$$\rho_{f,depressão} = f[T; (P_{ar0} - \Delta p_{total})] \quad (6.3)$$

VI.4.7 Recalcular a perda de carga

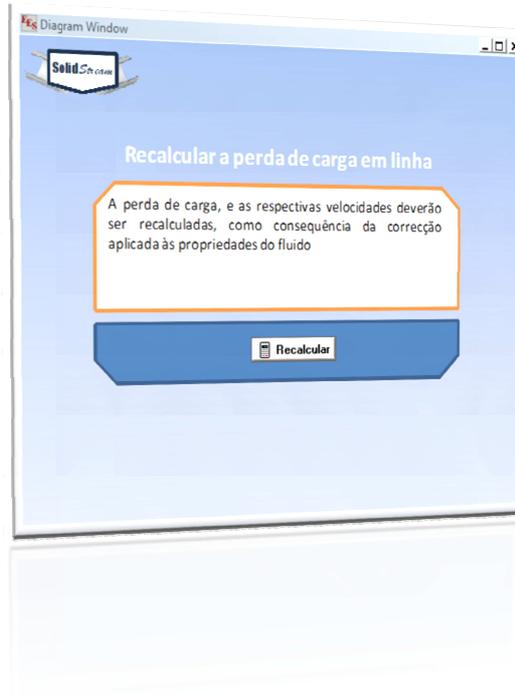


Figura 27 - Módulo auxiliar para obter os valores da perda de carga recalculados

Funcionamento

A correção das propriedades do fluido provoca alterações a nível da sua massa específica, o que por sua vez vai influenciar os valores das velocidades obtidas anteriormente no modelo de Yang.

Através de uma rede de tabelas, especialmente concebida para albergar os dados provenientes da correção dos resultados obtidos anteriormente, os valores mais actualizados são importados para este módulo.

O programa usa as expressões de Hinkle para fazer a primeira estimativa às novas velocidades das partículas, e posteriormente utiliza a definição deste parâmetro em função da velocidade do fluido e da velocidade terminal.

A partir deste momento pode prosseguir com as instruções de cálculo da sequência do modelo de Yang, explicita na *tabela – 5*, exportando os resultados para a tabela correspondente.

VI.4.6 Redimensionar os acessórios da instalação

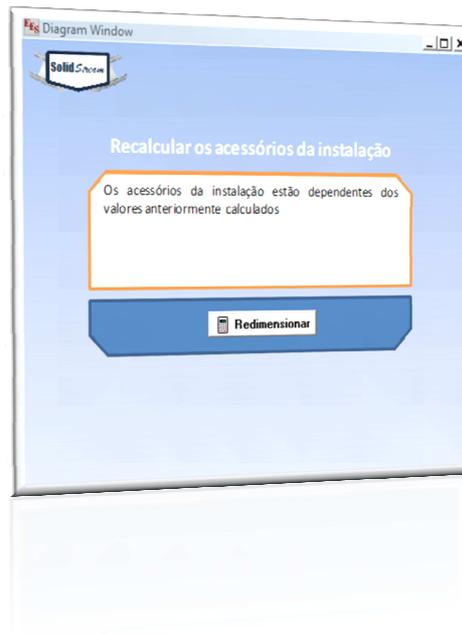


Figura 28 - Módulo auxiliar de redimensionamento dos acessórios do sistema

Funcionamento

As mudanças introduzidas neste módulo afectam a perda de carga nas mudanças de direcção e a perda de carga nos separadores de partículas.

- Mudanças de direcção
Os parâmetros dimensionais das curvas, tais como diâmetro ou o raio de curvatura, não são alterados, visto que, foram definidos directamente pelo utilizador. Como consequência deste facto, o factor f_b também se mantém, deixando espaço para correcções apenas ao nível da perda de carga de cada conjunto de curvas. Estas alterações são devidas à influência da velocidade do fluido na sua expressão de cálculo, velocidade essa que foi recalculada módulo explorado anteriormente;
- Separadores de partículas
Todos os parâmetros geométricos do separador já foram previamente estabelecidos, sem que haja interferência de qualquer valor sofrível de alteração devido a correcção das propriedades do fluido. Assim sendo, os únicos resultados afectados neste módulo auxiliar serão a perda de carga no separador e o seu rendimento de separação, devido a uma pequena influência no valor da velocidade na primeira e do tempo de relaxação da partícula no segundo. Após a obtenção destes resultados o utilizador terá de verificar o rendimento, para verificar se ainda se encontra nos limites por ele estabelecidos no início do dimensionamento. Caso os valores não estejam de acordo com os requerimentos do utilizador, este será obrigado a voltar ao módulo de dimensionamento de separadores, para alterar o número de ciclones em paralelo, ou modificar as proporções admissíveis para cada aparelho.

Este módulo conclui o processo de correcções a aplicar aos valores iniciais, precipitado pela correcção das propriedades de do fluido, pode-se agora realizar a análise de características da instalação projectada com auxílio do módulo final do programa.

VI.4.7 Análise de resultados



Figura 29 - Módulo de exposição e análise dos resultados obtidos

Funcionamento

Tal como o nome indica, este módulo dedica-se à colecta, tratamento e exposição dos valores calculados ao longo dos módulos a montante. Através de toda uma rede de tabelas já expressa na *Figura - 12*, é possível fazer convergir todos os valores calculados para que neste módulo, através do também já esclarecido comando de consulta de tabelas, se possa criar uma descrição completa da instalação dimensionada.

Exposição

Ao compilar os valores calculados, o programa põe à disposição do utilizador dois tipos de relatórios descritivos do sistema: em modo de texto, ou na forma de comparação gráfica de alguns parâmetros. Em cada janela contendo uma parte da descrição da instalação é possível ter acesso ao comando 'Imprimir'. Além de tornar possível a escolha do conteúdo a imprimir, caso o utilizador tenha um programa de conversão para pdf, seleccionando-o como impressora, torna-se fácil a criação de ficheiros seguros para transmitir a informação calculada a terceiros.

Relatório da instalação calculada

Propriedades do fluido transportador

Designação:

Massa específica, ρ_f : 0,3231 [kg/m³]

para uma pressão de 27,19 [kPa] a 20 [°C]

Recomenda-se uma velocidade intersticial igual a 21,89 [m/s]

O escoamento processa-se no regime de

onde está enquadrado o número de Reynolds respectivo 593627

Características das partículas

Designação:

Massa específica, ρ_p : 720 [kg/m³]

Diâmetro: $d_p = 0,002$ [m] e **esfericidade** $\psi = 0,8$

A instalação desloca 6 [kg/s] **numa concentração de valor** $\theta = 3$

Na horizontal as partículas atingem uma velocidade terminal de 5,457 [m/s] ,
sendo transportadas a 17,88 [m/s] **em relação a um referencial fixo.**

Na direcção vertical as partículas atingem uma velocidade terminal de 6,536 [m/s]
sendo transportadas a 20,51 [m/s] **em relação a um referencial fixo.**

Parâmetros críticos ao funcionamento

A instalação foi testada à possibilidade de entupimento nos troços verticais, estimando uma velocidade crítica igual a $U_c = 18,16$ [m/s]

Como a velocidade do fluido é superior à velocidade crítica, não é provável que ocorra sufoco na linha de transporte

Através da aplicação do critério de Owen verifica-se que:

O valor de Owen está dentro dos parâmetros aceitáveis, o que se traduz num uso eficiente da energia no transporte.

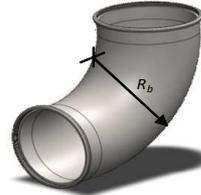
Componentes da instalação

A instalação é composta por 20 [m] de tubagem na horizontal, e 10 [m] dispostos na vertical, o que totaliza 30 [m] de extensão de tubo.

São utilizadas tubagens em _____, com um rugosidade igual a 0,00024 [m], e diâmetro interno de valor 0,25 [m], segundo a norma DIN 2448.

Nas mudanças de direcção curvas de 90° com as seguintes configurações:

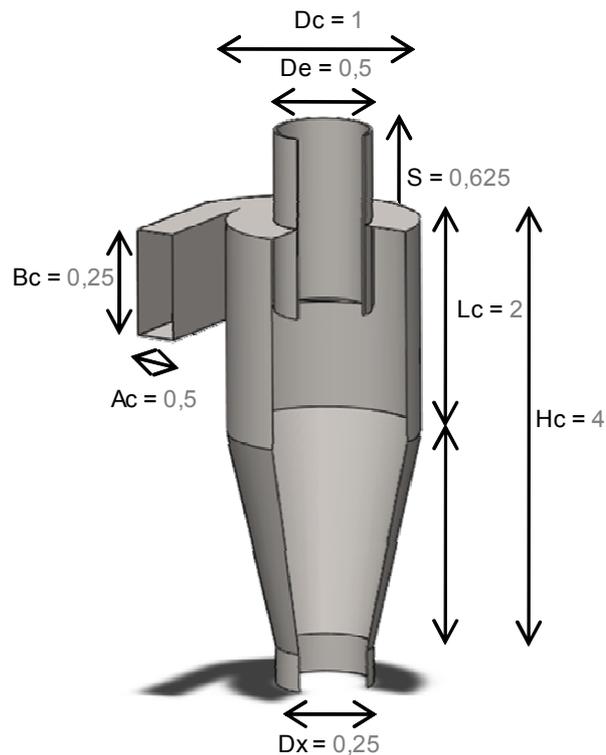
Diâmetro	Rb	Nº de peças
D1 = 0,45	0,5	4
D2 = 0,45	0,9	5
D3 = 0,2	0,2	6
D4 = 0,45	0,8	7



Para separar as partículas usam-se 6 separadores ciclônicos, com rendimento igual 78,26 [%], e com as seguintes proporções:

Tipo:

Função:



Perda de carga na instalação

*** Troços lineares, calculados pelo método de Yang**

	Horizontal	Vertical
Contribuição estática		
Gás		$\Delta P_{sgv1} = 456,7$ [Pa]
Partículas		$\Delta P_{spv1} = 1455$ [Pa]
Contribuição da fricção		
Gás	$\Delta P_{Fg1} = 679$ [Pa]	
Partículas	$\Delta P_{Fsh1} = 1750$ [Pa]	$\Delta P_{Fsv1} = 107,3$ [Pa]
Componente da aceleração		
	$\Delta P_{ah1} = 447,8$ [Pa]	$\Delta P_{av1} = 475,6$ [Pa]
Perda de carga linear total: 5371 [Pa]		

*** Mudanças de direcção**

1ª Configuração	$\Delta P_{b11} = 2602$ [Pa]
2ª Configuração	$\Delta P_{b12} = 2663$ [Pa]
3ª Configuração	$\Delta P_{b13} = 3904$ [Pa]
4ª Configuração	$\Delta P_{b14} = 3934$ [Pa]
Perda de carga total nas mudanças de direcção: 13103 [Pa]	

*** Separadores de partículas**

A perda de carga do conjunto de separadores é igual a 363,2 [Pa]

Esta instalação tem uma uma perda de carga total de 18837 [Pa], enquanto funcionar em

Capítulo VII.

Exemplos práticos

O exemplo de dimensionamento contido neste capítulo trata uma instalação de transporte pneumático em fase diluída, na qual se faz a movimentação de sólidos por sobrepressão. Apesar dos dois métodos de perda de carga já expostos anteriormente, neste exemplo optou-se por utilizar o método de Yang, o qual pode ser consultado na secção III.2. de forma a acompanhar o raciocínio ao longo da resolução.

Os princípios de cálculo e estruturação de instalações dedicadas ao transporte pneumático de sólidos a granel, não podem aqui ser abordados no seu todo. Apenas alguns conceitos principais serão explicitados numa aplicação prática, onde se tenta ser o mais abrangente possível, no que à diversidade de conteúdos diz respeito. Assuntos como a gestão de energia, detalhes dos componentes da instalação, tratamento dos sólidos antes e depois do transporte ou fenómenos de desgaste, já foram abordados superficialmente nos capítulos anteriores. Temas como a separação de partículas, serão tratados superficialmente, apenas sob a forma de guias ao dimensionamento destes aparelhos, sendo para isso, escolhidas as proporções de um separador ciclónico padrão disponível na literatura do género.

Quando a trabalhar com grandes perdas de carga o efeito da compressibilidade do ar pode ser notado ao longo da instalação. No exemplo deste capítulo este efeito não será tido em consideração, caso fosse necessário as consequências da compressibilidade poderiam ser obtidas pela equação dos gases perfeitos, para a massa específica e através da equação da continuidade para velocidade do fluido (Weber, 1981).

O esquema seguinte representa uma instalação de transporte pneumático de areia no distribuidor. O débito de areia é de 12 t/h, e o factor de carga é 5. Sabe-se que as partículas de areia têm 250 μm de diâmetro e uma massa volúmica de 2750 kg/m^3 . O ar transportador está a 1 atm e 15 $^{\circ}\text{C}$.

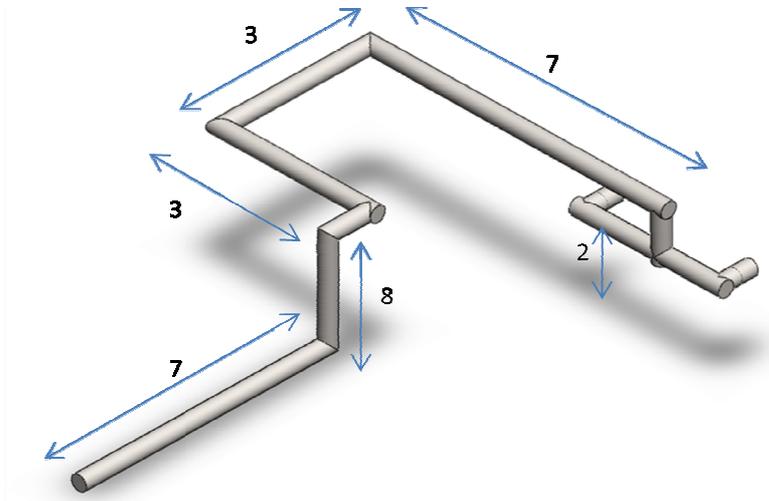


Figura 30 - Esquema da tubagem a dimensionar

Usando o modelo de Yang dimensione o sistema, sabendo que as condutas são em aço ao carbono.

Qual deverá ser a potência de accionamento do ventilador admitindo um rendimento não superior a 65%?

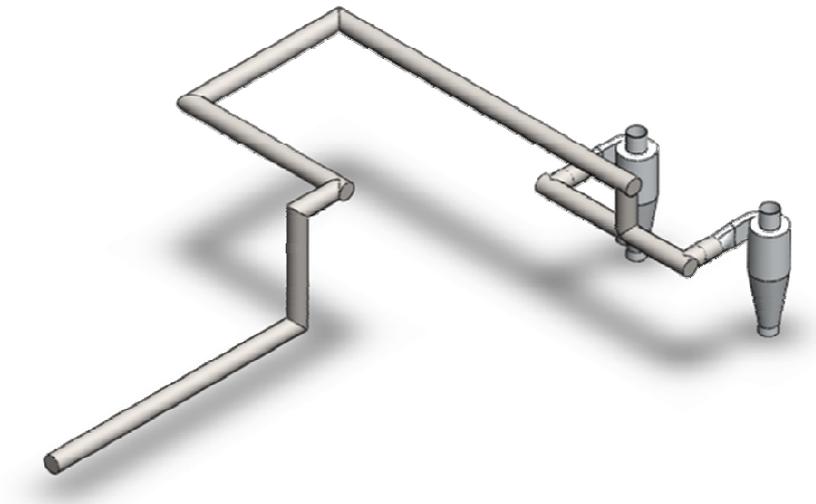


Figura 31 - Instalação completa

A instalação anterior será aplicada num sistema a funcionar em sobrepressão. Pretende-se dimensionar os dispositivos de separação ciclônica de forma a obter rendimentos próximos dos 100%. Pode optar por guiar o seu dimensionamento por aparelhos padrão definidos na literatura, mas, por razões de atravancamento o raio dos separadores não deve exceder os 50 cm, independentemente do número de aparelhos utilizados.

Resolução

Valores conhecidos à partida

$\dot{m}_p = 15 \left[\frac{t}{h} \right] = 4,167 \left[\frac{kg}{s} \right]$	$p = 1[atm] = 1,013 \times 10^5 [Pa]$
$\rho_p = 2750 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$T = 15[^\circ C]$
$d_p = 250 \times 10^{-6} [m]$	$rug = 45 \times 10^{-6} [m]$
$\theta = 5$	$\mu_f = 17,811 \left[\frac{N s}{m^2} \right]$
$L_v = 10 [m]$	$L_h = 20 [m]$

$$\rho_f = \frac{1,013 \times 10^5}{287 \times (15 + 273,15)} = 1,225 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\theta = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_f} \Leftrightarrow \dot{m}_f = \frac{4,167}{5} = 0,833 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$\dot{V}_f = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f} = \frac{0,833}{1,225} = 0,680 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$U_f = 35 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\dot{V}_f = U_f A \Leftrightarrow \dot{V}_f = U_f \frac{\pi D^2}{4} \Leftrightarrow D = \sqrt{\frac{4 \times \dot{V}_f}{U_f \pi}} = 0,157 [m]$$

- Deverá ser escolhido um diâmetro normalizado imediatamente superior ao obtido anteriormente DIN 2448

$$D_e = 0,165 [m] \Leftrightarrow D_i = 0,165 - 0,005 = 0,160 [m]$$

$$(U_f)_{normalizada} = \frac{4 \times \dot{V}_f}{\pi D^2} = \frac{4 \times 0,680}{\pi \times (0,160)^2} = 33,778 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Critério de engasgamento de instalação através da expressão de Knowlton e Bachovchin

$$\frac{U_c}{\sqrt{g d_p}} = 9,07 \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{0,347} \left(\frac{\dot{m}_p d_p}{\mu_f} \right)^{0,214} \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0,246}$$

$$\Leftrightarrow U_c = 9,07 \left(\frac{2750}{1,225} \right)^{0,347} \left(\frac{4,167 \times 250}{17,811} \right)^{0,214} \left(\frac{250 \times 10^{-6}}{0,160} \right)^{0,246} \sqrt{9,8 \times 250 \times 10^{-6}}$$

$$U_c = 3,914 [m/s]$$

- Superior à velocidade do fluido, logo não deverá ocorrer sufoco do escoamento ao longo da instalação

Critério de Owen

$$Re_D = \frac{\rho_f D U_f}{\mu_f} = \frac{1,225 \times 33,778 \times 0,160}{17,811 \times 10^{-6}} = 371940$$

$$f = -1,82 * \log \left[\left(\frac{rug}{D * 3,7} \right)^{1/0,91} + 10^{-\left[\frac{(\log Re_D)^{1,288}}{1,78 * Re_D^{0,0075}} \right]} \right]$$

$$\Leftrightarrow f = 0,0166$$

$$O = \frac{\rho_f U_f f}{8 \rho_p g d_p} = \frac{1,225 \times 33,778 \times 0,0166}{8 \times 9,8 \times 2750 \times 250 \times 10^{-6}}$$

$$O(10^{-2}) < O = 0,0127 < O(1)$$

- O valor do parâmetro de Owen encontra-se dentro dos limites estabelecidos. De acordo com estes critérios estamos em condições de prosseguir para o cálculo da perda de carga.

Definição do regime de escoamento através da expressão de McCabe & Smith

$$K = d_p * \sqrt[3]{\frac{g * \rho_f * (\rho_p - \rho_f)}{\mu_f^2}} = 250 \times 10^{-6} \times \sqrt[3]{\frac{9,8 \times 1,225 * (2750 - 1,225)}{(17,811 \times 10^{-6})^2}} = 11,758$$

Estamos na presença de um escoamento em regime intermédio

$$\left. \begin{aligned}
 C_{Ds} &= \frac{18,5}{Re_t^{0,6}} \\
 U_t &= \sqrt{\frac{4 (\rho_p - \rho_f) g d_p}{3 \rho_f C_{Ds}}} \\
 Re_t &= \frac{\rho_f d_p U_t}{\mu_f}
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 C_{Ds} &= 2,402 \\
 U_t &= 1,747 \text{ [m/s]} \\
 Re_t &= 30,04 \\
 &\text{Este valor de Reynolds verifica o regime} \\
 &\text{intermédio}
 \end{aligned}$$

Estimativa inicial da velocidade das partículas em relação a um referencial fixo

$$U_p = U_f - U_t = 33,778 - 1,747 = 32,031 \text{ [m/s]}$$

$$U_f / U_t = \frac{33,778}{1,747} = 19,335 > 1,5$$

Escoamentos na horizontal



$$\left. \begin{aligned}
 Re_{th} &= \frac{\rho_f d_p U_{th}}{\mu_f} \\
 C_{Dsh} &= \frac{18,5}{Re_{th}^{0,6}} \\
 \varepsilon_h &= \left[1 + \frac{\theta \rho_f U_f}{(\rho_p - \rho_f) U_{ph}} \right]^{-1} \\
 Re_{ph} &= \frac{\rho_f d_p (U_f - U_{th})}{\mu_f} \\
 f_{ph} &= 0,117 \frac{(1 - \varepsilon_h)}{\varepsilon_h^3} \left[(1 - \varepsilon_h) \frac{Re_{th} U_f}{Re_{ph} \sqrt{g D}} \right]^{-1,15} \\
 U_{ph} &= U_0 (1 - 0,044 d_p^{0,3} \rho_p^{0,5}) \\
 U_{th} &= \sqrt{\left(\frac{f_{ph} U_{ph}^2}{D} \right) \left[\frac{4 (\rho_p - \rho_f) d_p}{3 \rho_f C_{Dsh}} \varepsilon_h^{4,7} \right]}
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 Re_{th} &= 63,84 \\
 Re_{ph} &= 111,3 \\
 C_{Dsh} &= 1,528 \\
 \varepsilon_h &= 0,9973 \\
 f_{ph} &= 0,0122 \\
 U_{th} &= 3,713 \text{ [m/s]} \\
 U_{ph} &= 27,3 \text{ [m/s]}
 \end{aligned}$$

Escoamentos na vertical



$$\begin{aligned}
 Re_{tv} &= \frac{\rho_f d_p U_{tv}}{\mu_f} \\
 C_{Dsv} &= \frac{18,5}{Re_{tv}^{0,6}} \\
 \varepsilon_v &= \left[1 + \frac{\theta \rho_f U_f}{(\rho_p - \rho_f) U_{pv}} \right]^{-1} \\
 Re_{pv} &= \frac{\rho_f d_p (U_f - U_{tv})}{\mu_f} \\
 f_{pv} &= 0,0206 \frac{(1 - \varepsilon_v)}{\varepsilon_v^3} \left[(1 - \varepsilon_v) \frac{Re_{tv}}{Re_{pv}} \right]^{-0,869} \\
 U_{pv} &= U_0 (1 - 0,68 d_p^{0,92} \rho_p^{0,5} \rho_f^{-0,2} D^{-0,54}) \\
 U_{tv} &= \sqrt{\left(g + \frac{f_{pv} U_{pv}^2}{D} \right) \left[\frac{4 (\rho_p - \rho_f) d_p}{3 \rho_f C_{Dsv}} \varepsilon_v^{4,7} \right]}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} Re_{tv} \\ C_{Dsv} \\ \varepsilon_v \\ Re_{pv} \\ f_{pv} \\ U_{pv} \\ U_{tv} \end{aligned}} \right\}
 \begin{aligned}
 Re_{tv} &= 59,27 \\
 Re_{pv} &= 28,16 \\
 C_{Dsv} &= 1,598 \\
 \varepsilon_v &= 0,9977 \\
 f_{pv} &= 0,0049 \\
 U_{tv} &= 3,447 [m/s] \\
 U_{pv} &= 32,14 [m/s]
 \end{aligned}$$

Perda de carga

$$\Delta p_{Fg} = f \frac{L}{D} \frac{U_f^2}{2} \rho_f = 0,0166 \times \frac{(10 + 20)}{0,160} \times \frac{33,778^2}{2} \times 1,225 = 2175,12 [Pa]$$

$$\begin{aligned}
 \Delta p_{Fsh} &= f_{ph} \frac{L_h}{D} \rho_p (1 - \varepsilon_h) \frac{U_{ph}^2}{2} = 0,0122 \times \frac{20}{0,160} \times 2750 \times (1 - 0,9973) \times \frac{27,3^2}{2} \\
 &= 4219,51 [Pa]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta p_{Fsv} &= f_{pv} \frac{L_v}{D} \rho_p (1 - \varepsilon_v) \frac{U_{pv}^2}{2} = 0,0049 \times \frac{10}{0,160} \times 2750 \times (1 - 0,9977) \times \frac{32,14^2}{2} \\
 &= 1000,46 [Pa]
 \end{aligned}$$

$$\Delta p_{spv} = \rho_p (1 - \varepsilon_v) L_v g = 2750 \times (1 - 0,9977) \times 10 \times 9,8 = 619,85 [Pa]$$

$$\Delta p_{sgv} = \rho_f \varepsilon_v L_v g = 1,225 \times 0,9977 \times 10 \times 9,8 = 119,774 [Pa]$$

$$\Delta p_{ah} = \theta \rho_f U_f^2 \frac{U_{ph}}{U_f} = 5 \times 1,225 \times 33,778^2 \times \frac{27,3}{33,778} = 5648,1 [Pa]$$

$$\Delta p_{av} = \theta \rho_f U_f^2 \frac{U_{pv}}{U_f} = 5 \times 1,225 \times 33,778^2 \times \frac{32,14}{33,778} = 6649,45 [Pa]$$

$$\Delta p_{linear} = \Delta p_{Fg} + \Delta p_{Fsh} + \Delta p_{Fsv} + \Delta p_{spv} + \Delta p_{sgv} + \Delta p_{ah} + \Delta p_{av} = 19812,4 [Pa]$$

Mudanças de direcção

Assumem-se todas as curvas de configuração semelhante

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_h - \varepsilon_v}{2} = \frac{0,9973 + 0,9977}{2} = 0,9975$$

$$\bar{\rho}_p = (1 - \bar{\varepsilon})\rho_p + \bar{\varepsilon}\rho_f = 8,097 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$R_b/D = 0,8/0,160 = 5 \Rightarrow f_b = 0,1565$$

$$\Delta p_b = 2 f_b \bar{\rho}_p U_f^2 N_{curvas} = 2 \times 0,1565 \times 8,097 \times 33,778^2 \times 5 = 14457,9 \text{ [Pa]}$$

Dimensionamento dos ciclones

	A_c/D_c	B_c/D_c	S/D_c	D_e/D_c	L_c/D_c	H_c/D_c	D_x/D_c
Lapple	0,5	0,25	0,625	0,5	2,0	4,0	0,25

- Número de ciclones: 2
- Raio admissível para os separadores: 0,5

$$A_c=0,25$$

$$H_c=2$$

$$B_c=0,125$$

$$D_x=0,125$$

$$S=0,3125$$

$$D_e=0,25$$

$$L_c=1$$

$$n = 1 - \left[1 - \frac{(39,4 D_c)^{0,14}}{2,5} \right] \left[\frac{T}{293,15} \right]^{0,3} = 1 - \left[1 - \frac{(39,4 \times 0,5)^{0,14}}{2,5} \right] \left[\frac{15 + 273,15}{293,15} \right]^{0,3} = 0,609$$

$$K_a = \frac{A_c}{D_c} = 0,5$$

$$V_s = \frac{\left[(S - A_c/2)(D_c^2 - D_e^2) \right]}{4} = 0,0087$$

$$K_b = \frac{B_c}{D_c} = 0,25$$

$$I = 2,3 D_e \left(\frac{D_c^2}{A_c B_c} \right)^{1/3} = 1,15$$

$$\eta = 1 - e \left\{ -2 \left[\frac{G \tau_i \dot{V}}{D_c^3} (n+1) \right]^{0,5} \right\}^{n+1} = 98,37 \%$$

$$\tau = \frac{U_t \rho_p}{(\rho_p - \rho_f) g} = 0,178 \text{ [s]}$$

A perda de carga no conjunto dos ciclones

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{ciclone}} &= \frac{K_d}{2} \rho_f V_c^2 \frac{A_c B_c}{D_e^2} \times N_{\text{ciclones}} = \frac{16}{2} \times 1,225 \times 33,778^2 \times \frac{0,25 \times 0,125}{0,25^2} \times 2 \\ &= 11181,3 \text{ [Pa]} \end{aligned}$$

$$\Delta p_{\text{total}} = 19812,4 + 14457,9 + 11181,3 = 45451,6 \text{ [Pa]}$$

- Se a instalação funciona em sobrepressão, a nova pressão de referência para o cálculo de ρ_f deve ter em conta a adição do Δp_{total} calculado anteriormente.

$$\rho_f = f(T; p_{\text{atm}} + \Delta p_{\text{total}}) = 1,707 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Recalcular todos os parâmetros em função do novo ρ_f

$$\Delta p_{\text{total}} = 66934,7 \text{ [Pa]}$$

Dimensionamento do movimentador de ar

$$\dot{W} = \dot{m}_f \int v dp$$

$$\dot{W} = \dot{m}_f R T \int 1/p dp$$

$$\dot{W}_{\text{reversível}} = \dot{m}_f R T \ln p_2/p_1$$

$$\dot{W}_{\text{real}} = \frac{\dot{W}_{\text{reversível}}}{\eta} = \frac{0,833 \times 287 \times (273,15 + 15) \times \ln \left(\frac{66934,7 + 1,013 \times 10^5}{1,013 \times 10^5} \right)}{0,65}$$

$$\dot{W}_{\text{real}} = 129,83 \text{ [kW]}$$

Capítulo VIII.

Conceitos práticos relativos ao dimensionamento

O dimensionamento da rede de tubagem e a escolha dos acessórios a utilizar têm um papel fundamental no posterior sucesso da instalação em funcionamento. Apesar de muito do trabalho de cálculo encontrado anteriormente ser moroso e iterativo, podem ser encontradas na literatura alguns guias de dimensionamento desenvolvidos a partir de conhecimentos empíricos adquiridos no dia-a-dia. Por vezes em cursos mais vocacionados para os aspectos técnicos são mencionados alguns procedimentos que evitam falhas no funcionamento ou aspectos que geram defeitos crónicos nas instalações (*Bathia, 2009*).

- Introduzir um troço de tubagem linear de tamanho razoável antes da primeira mudança de direcção, de forma a permitir a aceleração da suspensão até uma velocidade estável e reduzir a concentração de partículas sólidas por unidade de comprimento. Os sólidos travados pela utilização das curvas tendem a ocupar uma maior porção da secção transversal do tubo, e por isso, criam maior obstrução ao fluxo de gás, aumentando assim a perda de carga;
- Não introduzir mudanças de direcção demasiadamente consecutivas, pelas mesmas razões anteriores;
- Por vezes é necessário fazer uma estimativa imediata de alguns parâmetros a utilizar, utilizando-se regras empíricas. Por exemplo, materiais de massa específica até 800 kg/m^3 , podem ser transportados a 25 [m/s] ;
- Ter em conta a possibilidade de dividir os sistemas em subinstalações. O gás expande com a perda de carga, sendo inevitável que as velocidades aumentem ao longo de uma porção de tubagem de diâmetro constante. Velocidades elevadas das partículas levam ao aumento do desgaste nas mudanças de direcção, bem como a degradação dos produtos a transportar;
- ‘Mais ar’ pode significar ‘Menos capacidade de carga’ no transporte em fase diluída. Aglomerados e consequentes perdas por fricção, podem ser causados pelo aumento da velocidade do gás, necessitando assim de mais energia. Existe uma concentração de partículas ideal para cada tipo de produto, que maximiza o desempenho;
- Danos nos produtos e o desgaste nas curvas dependem bastante do material a transportar. Junções em ‘T’ são por vezes utilizadas, embora causem uma maior perda de carga em relação a mudanças de direcção de raio elevado;

- Verificar se todos os separadores ciclónicos têm o escape desobstruído;
- Permitir alguma perda de carga na linha de alimentação ao ventilador. Sobredimensionar alguma tolerância para filtro, silenciador, caixa acústica ou cobertura para o invólucro do compressor. Por norma deve-se ter em atenção o aumento de temperatura provocado pela compressão do gás, e compensar devidamente o sistema.

Dimensionamento das redes de tubagem

O dimensionamento do sistema de tubagens requer uma reflexão atenta sobre os factores críticos que podem arruinar a instalação ou tornar o seu funcionamento menos eficaz. Algumas regras básicas devem ser tidas em consideração:

- As linhas de transporte devem ser tão lineares quanto possível, evitando mudanças de direcção ou de cota;
- Devem contemplar um troço linear de pelo menos 1,5 metros antes de cada mudança de direcção. Este espaçamento deve ser progressivamente aumentado conforme o diâmetro da tubagem. Uma boa regra de bolso seria um comprimento de 1,5 metros para tubagem 2 polegadas, aumentando 1,5 metros por cada polegada que se aumenta no tubo.

Formas de aumentar a capacidade de carga e minimizar o desgaste

- Optimizar o factor de concentração de partículas;
- Usar velocidades de transporte tão próximas quanto possível da velocidade mínima de saltação;
- Usar materiais mais resistentes para lidar com produtos abrasivos;
- Minimizar o número de mudanças de direcção ao longo do sistema;
- Descarregar o material de forma radial, em vez de tangencial, no depósito;
- Colocar uma pala no final da tubagem de saída, para que as partículas evitem o impacto nas paredes do depósito final;
- Aumentar o diâmetro da tubagem ligeiramente antes da saída, de forma a reduzir a velocidade.

(Bathia, 2009)

Capítulo IX.

Conclusões e observações finais

“A maior parte dos especialistas em transporte pneumático concordam que as mudanças nesta área têm sido sobretudo evolutivas mas não revolucionárias.”
(Rhodes, 1998)

O objectivo deste trabalho era a criação de um programa que auxiliar ao dimensionamento de instalações pneumáticas, que optimiza-se o tempo de projecto e a eficiência das instalações. O seu desenvolvimento iniciou-se nos métodos estabelecidos para a implementação destes sistemas, culminando numa aplicação independente denominada **SolidStream**, a qual engloba todo um conjunto de ferramentas coerentes entre si.

O desempenho de tal programa pode ser, para já, considerado bastante satisfatório, embora careça de um período exaustivo de testes por utilizadores versados na área do transporte pneumático.

Dada a extensão de temas abordados por esta aplicação, é imprescindível referir alguns dos passos na identificação e resolução de obstáculos encontrados, de forma a futuros utilizadores possam compreender os processos, e, talvez proporcionar sugestões para testes ou melhoramentos.

Base de programação em EES

No decorrer deste trabalho foi apresentada uma secção esclarecedora dos motivos pelos quais se optou pela programação em EES, com o evoluir do projecto ficaram patentes algumas deficiências deste programa, as quais não impediram uma conclusão bem sucedida.

Um dos contratempos foi a impossibilidade de realizar ciclos semelhantes aos encontrados em linguagens de programação elementares, como por exemplo o Visual Basic.

Muitas vezes a dificuldade de progressão deveu-se a problemas numéricos, pois apesar de terem quase sempre solução, o programa não descreve estes erros de forma precisa, o que torna a sua resolução morosa e extremamente iterativa.

Ao utilizar a versão profissional, sendo esta muito mais polivalente que a versão académica, depara-se com alguma falta de informação para implementar correctamente algumas funcionalidades mais exóticas.

Para fazer a sistematização dos modelos em programas de cálculo algumas liberdades são retiradas ao projectista, o que pode ser melhorado com a evolução do programa.

Separadores ciclónicos

A ênfase dada ao dimensionamento de separadores de partículas, é sem dúvida diminuta, em relação não só aos tipos de separação existentes, mas também à sua capacidade de personalização.

Conseguiu-se uma ferramenta intuitiva para dimensionar um separador rapidamente, baseada em proporções dos ciclones padrões existentes na literatura.

Perda de carga da instalação

Os métodos de perda de carga apresentados, nomeadamente Barth e Yang, são o fruto da compilação e ordenamento de artigos dos autores respectivamente, Pinho (2005).

Conseguiram-se sistematizar eficazmente dois métodos distintos para o cálculo da perda de carga na instalação, deixando algum espaço de manobra ao utilizador, para testar e comparar resultados de ambos os processos.

Através de alguns exemplos práticos foi possível demonstrar a eficiência do programa como uma ferramenta pragmática no dimensionamento de instalações pneumáticas, versus a execução manual do projecto.

Produção de resultados

Tal como a secção de conclusões desta tese é um ponto de reflexão e análise do trabalho desenvolvido, pretende-se que o módulo de análise de resultados no programa exponha não só os valores obtidos mas também uma análise relativa, de forma a auxiliar o utilizador. Tendo isto em mente há que frisar o relatório produzido pelo programa, e as suas características, os quais se destinam a uma melhor análise e possibilidade de uniformização e posterior distribuição dos dados de desempenho da instalação.

Sugestões para desenvolvimentos futuros

Os conhecimentos adquiridos com a realização deste trabalho, no domínio do dimensionamento de instalações para transporte pneumáticos, recomendam a continuação da investigação nas seguintes direcções:

- Interface gráfico das soluções construtivas;
- Experimentação de outros softwares de cálculo para os mesmos objectivos aqui tratados;
- Testes com público especializado;

Os resultados deste trabalho confirmam a afirmação feita por Rhodes no início desta secção. Desenvolveu-se algo útil ao dimensionamento, que apesar de não ser revolucionário, espera conseguir uma evolução significativa na forma de projectar este tipo de instalações.

“Energy and persistence conquer all things.”

Benjamin Franklin (1706 – 1790)

Autor, diplomata, editor, inventor, físico e político americano

Referências

Arriola, L. Targhetta e Roa, A. Lopez, 1974, "Transporte y Almacenamiento de materias primas en la industria básica", Editorial Blume.

Branco, J.G.S.F., 2004, "Fenómenos de Transferência de Calor, Massa e Quantidade de Movimento à Luz da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica: Reflexões a Partir da Queima de Partículas Não-Esféricas", Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, FCT, Universidade de Coimbra.

Bathia, A., 2009, "Pneumatic conveying systems – Course Nº m-5013", PDHEngineer.com

Galitz, Wilbert O., 2002, "The Essential Guide to User Interface Design". 2nd edition, Wiley.

Hawk, C. Minor, 1971, "Bulk Materials Handling", University of Pittsburgh.

Hudson, Wilbur G., "Conveyors and related equipment", 3rd edition, John Wiley & Sons

Janeiro Borges, A. R. e Galvão Teles, J. C., 1983, Boletim de Ciência e Tecnologia, nº 10, pp. 24 - 34, Coimbra.

Janeiro Borges, A. R., 1984, "Introdução ao Estudo do Transporte Pneumático". Lições proferidas na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Kalen, B. e Zenz, F. A., 1974, "Theoretical-Empirical Approach to Saltation Velocity in Cyclone Design", AIChE Symposium Ser., Vol. 70, N. 137, pp 388-396.

Klinzing, G. E., 1981, "Gas-Solid Transport". McGraw-Hill Book Company.

Klinzing, G.E., 2003, "Dilute-Phase Pneumatic Conveying", Chapter 23 em "Handbook of Fluidization and Fluid Particle Systems", editor W-C Yang, Marcel Dekker Inc., New York.

Knowlton, T. M. e Bachovchin, D. M., 1975, International Conference on Fluidization, Pacific Grove, Ca, June 15 - 20.

Koch, W. H. e Licht, W., 1977, "New design approach boosts cyclone efficiency", Chemical Engineering, November 7, pp 80-88.

Kunii, D. e Levenspiel, O., 1977, "Fluidization Engineering", Robert E. Krieger Publishing Company, New York.

Kunii, D. e Levenspiel, O., 1991, "Fluidization Engineering", 2nd Edition, Butterworth-Heinemann. TRANSPORTE PNEUMÁTICO - Referências 214

MacIntyre, 2008, <http://www.cycloneseparator.com>, consultado em Novembro de 2008

Marcus, R.D, Lweung, L.S., Klinzing, G.E. e Rizk, F., 1990, "Pneumatic Conveying of Solids", Chapman and Hall, London.

Mills, D., 2004, "Pneumatic Conveying Design Guide", 2nd edition, Elsevier, Oxford MA, USA

Munson, Bruce R., Young, Donald F., Okiishi, Theodor H., "Fundamentals of fluid mechanics" 5ª edição, John Wiley and Sons.

Novais, J., 1995, "Ar comprimido industrial" 1ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian

- Oliveira, Luís A., Lopes, A. Gameiro, 2006, "Mecânica dos Fluidos", LIDEL.
- Owen, P. R., 1964, "Saltation of uniform grains in air" J. Fluid Mechanics, Vol. 20, Part 2, pp. 225 - 242.
- Owen, P. R., 1969, "Pneumatic transport" J. Fluid Mechanics, Vol. 39, Part 2, pp. 407 - 432.
- Perry & Chilton, 1973, "Chemical Engineers Handbook". 5th Edition, McGraw-Hill Book Company.
- Pinho, Carlos M. C. Tavares, 2005, "Transporte Pneumático", DEMEGI
- Rhodes, Martin, 1998 "Introduction to Particle Technology", John Wiley & Sons
- Rizk, F., 1986, "Chapter 10 - Principles of Pneumatic Conveying. Encyclopedia of Fluid Mechanics. Volume 4. Solids and Gas Solids Flows", N.P. Cheremisinoff, Editor. Gulf Publishing Company.
- Weber, M., 1991, "friction of the Air and the Air/Solid Mixture in Pneumatic Conveying", Bulk Solids Handling, Vol. 11, No. 1, pp 99 - 102.
- Weber, M. 1981, "Principles of Hydraulic and Pneumatic Conveying in Pipes", Bulk Solids Handling, Vol. 1, No.1 February.
- Yang, W-C, 1973, "Estimating the Solid Particle Velocity in Vertical Pneumatic Conveying Lines" Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol. 12, Nº 3, pp. 349-352.
- Yang, W-C, Keairns, D.L. e Archer, D.H. 1973, "Estimating the Solid Particle Velocity in Horizontal Pneumatic Conveying Lines", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 51, December, pp. 779-781.
- Yang, W-C, 1974, "Correlations for Solid friction Factors in Vertical and Horizontal Pneumatic Conveyings", AIChE Journal, vol.20, nº 3, pp 605 -607.
- Yang, W-C, 1975, "A Mathematical Definition of Choking Phenomenon and a Mathematical Model for Predicting Choking TRANSPORTE PNEUMÁTICO - Referências 216 Velocity and Choking Voidage", AIChE Journal, vol.21, nº 5, pp 1013 -1015.
- Yang, W-C e Keairns, D. L., 1976, "Estimating the Acceleration Pressure Drop and the Particle Acceleration Length in Vertical and Horizontal Transport Lines", Pneumotransport 3, 7th -9th April, (paper D7), pp. D7.89 - D7.98.
- Yang, W-C, 1978, "A Correlation for Sold Friction Factor in Vertical Pneumatic Conveying Lines", AIChE. Journal, Vol. 24, No. 3, pp 548 - 552.
- Yousfi, Y. e Gau, G.,1974 , Chem. Engng. Sci., Vol. 29 pp. 1936 - 1946.
- Zenz, F.A., 1964, "Conveyability of Materials of Mixed Particle Size", I&EC Fundamentals, Vol. 3, No. 1, pp 65-75, February.

Anexo A

Algoritmo de Introdução dos dados iniciais

Anexo B

Algoritmo de cálculo da perda de carga através do modelo de Barth

Anexo C

Algoritmo de cálculo da perda de carga através do modelo de Yang

Anexo D

Algoritmo de cálculo da perda de carga nas mudanças de direcção

Anexo E

Algoritmo de dimensionamento dos separadores de partículas

01-Dados iniciais

Equations

D_{real} e U_f recomendada

```
procedure Dnormalizado1( $D_{est}$ ) 1
```

```
     $D_{norm1}$ )
```

```
     $i = 10$ 
```

```
    repeat
```

```
         $i$ 
```

```
        =  $i + 1$ 
```

```
         $D_{n1} = \text{Lookup}('D\_norm' ; i; 'Column2' )$ 
```

```
    until ( $D_{n1} > D_{est1}$ )
```

```
     $D_{norm1} = D_{n1}$ 
```

```
end
```

```
procedure Owenobs()  $O$ 
```

```
     $Obso1\$$ ;  $Obso2\$$ ;  $Obso3\$$ )
```

```
    If( $O > 0,99$ ) then
```

```
         $Obso1\$ = 'O valor elevado de Owen implica um'$ 
```

```
         $Obso2\$ = 'excesso de energia utilizada no transporte'$ 
```

```
         $Obso3\$ = 'Experimente diminuir a velocidade do fluido'$ 
```

```
    else
```

```
         $Obso1\$ = 'O valor de Owen está dentro dos'$ 
```

```
         $Obso2\$ = 'parâmetros aceitáveis, o que se traduz num'$ 
```

```
         $Obso3\$ = 'uso eficiente da energia no transporte.'$ 
```

```
    endif
```

```
end
```

```
procedure Sufocoobs( $U_c$ ;  $U_{f_{norm}}$ ) 1
```

```
     $Obs1\$$ ;  $Obs2\$$ ;  $Obs3\$$ )
```

```
    If( $U_c > U_{f_{norm}}$ ) then
```

Obs1\$ = 'É possível que ocorra sufoco no transporte.'

Obs2\$ = 'Experimente outra configuração, diminuindo'

Obs3\$ = 'a velocidade do fluido'

else

Obs1\$ = 'A velocidade do fluido é superior à velocidade '

Obs2\$ = 'crítica, assim sendo não é provavel que ocorra'

Obs3\$ = 'sufoco na linha de transporte'

endif

end

PROCEDURE Esfericidade (*ψ* : *Esf*\$)

IF (*ψ*=1) THEN

Esf\$='consideradas esféricas'

ELSE

Esf\$='

ENDIF

END

\$OPENLOOKUP ' C

*DAT A**SolidStream/Uf;advise.txt'*

\$OPENLOOKUP ' C

*DAT A**SolidStream/D;norm.txt'*

\$OPENLOOKUP ' C

*DAT A**SolidStream/Rugosidade.txt'*

$\rho_f = \rho (Air; T = T_{ar}; P = P_{ar})$

$\mu_f = \mu (Air; T = T_{ar})$

$\phi = 3,74159$

$\theta = \dot{m}_{p1}/\dot{m}_{f1}$

$$D_{est1} = \sqrt{4 \cdot \frac{\dot{m}_{f1}}{\phi \cdot \rho_f \cdot U_f}}$$

call *Dnormalizado1*(*D_{est}*) 1

D_{norm1})

$$\frac{1}{\sqrt{f1}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{rug}{3,7 \cdot D_{norm1}} + \frac{2,51}{Re_{f1} \cdot \sqrt{f1}} \right)$$

$$Uf_{norm1} = 4 \cdot \frac{\dot{m}_{f1}}{\phi \cdot \rho_f \cdot D_{norm1}^2}$$

$$u_f = Uf_{norm1} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot f1}}{4}$$

$$Re_{f1} = \rho_f \cdot Uf \cdot D_{norm1} / \mu_f$$

$$O = \rho_f \cdot \frac{u_f^2}{\rho_p \cdot 9,8 \cdot d_p}$$

call *Sufoco*_{obs}(*Uc*; *Uf*_{norm}) 1

Obs1%; *Obs2*%; *Obs3*%)

call *Owen*_{obs}() *O*

Obso1%; *Obso2*%; *Obso3*%)

$$\frac{U_c}{\sqrt{9,8 \cdot d_p}} = 9,07 \cdot (\rho_p / \rho_f)^{0,347} \cdot (\dot{m}_{p1} \cdot d_p / \mu_f)^{0,214} \cdot (d_p / D_{norm1})^{0,246}$$

T1%' *C*

*DATA*_{SolidStream/C;inicio1.txt'}

\$UPDATEGUESSES

\$EXPORT *T1*%' *Uf*_{norm1}; *D*_{norm1}; *f1*; *rho*_p; *rho*_f; *theta*; *rug*; *m*_{dot}_{p1}; *d*_p; *mu*_f; *T*_{ar}; *P*_{ar};

02-Perda de carga por Barth

Equations

procedure *Coficiente*_{arrastoH}(Re_t) *h*

C_{DS_h}

If($Re_{th} < 2$) then

C_{DS_h}

$$= 24/Re_{th}$$

endif

If($Re_{th} > 500$) then

C_{DS_h}

$$= 0,44$$

endif

If($Re_{th} > 2$) AND ($Re_{th} < 500$) then

$$C_{DS_h} = \frac{18,5}{Re_{th}^{0,6}}$$

endif

end

procedure *Coficiente*_{arrastoV}(Re_t) *v*

C_{DS_v}

If($Re_{tv} < 2$) then

C_{DS_v}

$$= 24/Re_{tv}$$

endif

If($Re_{tv} > 500$) then

C_{DS_v}

$$= 0,44$$

endif

If($Re_{tv} > 2$) AND ($Re_{tv} < 500$) then

$$C_{DS_v} = \frac{18,5}{Re_{tv}^{0,6}}$$

endif

end

§OPENLOOKUP 'C

DATA_SolidStream/C;Inicio1.txt'

$$d_p = \text{Lookup}('C_inicio'; 1; 'd.p')$$

$$Uf_{norm} = \text{Lookup}('C_inicio'; 1; 'Uf_norm')$$

$$D_{norm} = \text{Lookup}('C_inicio'; 1; 'D_norm')$$

$$f = \text{Lookup}('C_inicio'; 1; 'f')$$

$$\rho_p = \text{Lookup}('C_inicio'; 1; 'rho.p')$$

$$\rho_f = \text{Lookup}('C_inicio'; 1; 'rho.f')$$

$$\theta = \text{Lookup}('C_inicio'; 1; 'theta')$$

$$L = L_v + L_h$$

$$Uf = Uf_{norm}$$

$$D = D_{norm}$$

call Coeficiente_arrastoH(Re_t) h

C_{DSh})

$$\theta = \frac{1 - \epsilon_h}{\epsilon_h} \cdot \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \cdot Up_h/Uf$$

$$C_{DSh;c} = C_{DSh} \cdot \epsilon_h^{-4,7}$$

$$Ut_h = \sqrt{4 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot 9,8 \cdot \frac{d_p}{3 \cdot \rho_f \cdot C_{DSh}}}$$

$$Up_h/Uf = \frac{1 - \sqrt{0,5 \cdot \lambda_p \cdot \frac{Ut_h^2}{9,8 \cdot D} \cdot (1 - (Ut_h/Uf)^2) + (Ut_h/Uf)^3}}{1 - 0,5 \cdot \lambda_p \cdot \frac{Ut_h^2}{(9,8 \cdot D)}}$$

$$\lambda_{sh} = \lambda_p \cdot Up_h/Uf + \frac{2}{\left(\frac{Uf}{\sqrt{9,8 \cdot D}} \cdot Up_h/Ut_h\right)}$$

$$\Delta P_{sh} = \lambda_{sh} \cdot \theta \cdot \rho_f \cdot \frac{Uf^2}{2 \cdot D} \cdot L_h$$

$$\Delta P_{ah} = \theta \cdot \rho_f \cdot Uf \cdot Up_h$$

call Coeficiente_arrastoV(Re_t) v

C_{DSv})

$$\theta = \frac{1 - \epsilon_v}{\epsilon_v} \cdot \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \cdot Up_v/Uf$$

$$C_{DSv;c} = C_{DSv} \cdot \epsilon_v^{-4,7}$$

$$Ut_v = \sqrt{4 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot 9,8 \cdot \frac{d_p}{3 \cdot \rho_f \cdot C_{DSv;c}}}$$

$$Up_v/Uf = \frac{1 - \sqrt{0,5 \cdot \lambda_p \cdot \frac{Ut_v^2}{9,8 \cdot D} \cdot \left(1 - (Ut_v/Uf)^2\right) + (Ut_v/Uf)^3}}{1 - 0,5 \cdot \lambda_p \cdot \frac{Ut_v^2}{(9,8 \cdot D)}}$$

$$\lambda_{sv} = \lambda_p \cdot Up_v/Uf + \frac{2}{\left(\frac{Uf}{\sqrt{9,8 \cdot D}} \cdot Up_v/Ut_v\right)}$$

$$\Delta P_{sv} = \lambda_{sv} \cdot \theta \cdot \rho_f \cdot \frac{Uf^2}{2 \cdot D} \cdot L_v$$

$$\Delta P_{av} = \theta \cdot \rho_f \cdot Uf \cdot Up_v$$

$$T_{Air} = 20$$

$$R = 287$$

$$p = 101,3 \cdot 10^3$$

$$\mu_f = \mu(Air; T = T_{Air})$$

$$rug = 0,045 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda_p = 10^{-4}$$

$$K = d_p \cdot \left(9,8 \cdot \rho_f \cdot \frac{\rho_p - \rho_f}{\mu_f^2}\right)^{1/3}$$

$$Re_{th} = \rho_f \cdot d_p \cdot Ut_h / \mu_f$$

$$Re_{tv} = \rho_f \cdot d_p \cdot Ut_v / \mu_f$$

Fluido horizontal

$$Re_f = \rho_f \cdot d_p \cdot Uf / \mu_f$$

Definição de f por Branco

$$f_h = -1,82 \cdot \log 10 \left((\epsilon_h/D/3,7)^{1/0,91} + 10^{-\left(\frac{(\log 10(Re_f))^{1,288}}{1,78 \cdot Re_f^{0,0075}}\right)} \right)$$

$$\Delta P_{fh} = f_h \cdot \frac{Uf^2}{2 \cdot D} \cdot L_h$$

Fluido Vertical

Definição de f por Branco

$$f_v = -1,82 \cdot \log 10 \left((\epsilon_v/D/3,7)^{1/0,91} + 10^{-\left(\frac{(\log 10(Re_f))^{1,288}}{1,78 \cdot Re_f^{0,0075}}\right)} \right)$$

$$\Delta P_{fv} = f_v \cdot \frac{Uf^2}{2 \cdot D} \cdot L_v$$

$$\Delta P_{linha} = \Delta P_{sh} + \Delta P_{ah} + \Delta P_{sv} + \Delta P_{av} + \Delta P_{fh} + \Delta P_{fv}$$

$$C1 = \frac{\Delta P_{fh} + \Delta P_{fv}}{\Delta P_{linha}} \cdot 100$$

$$C2 = \frac{\Delta P_{sh} + \Delta P_{sv}}{\Delta P_{linha}} \cdot 100$$

$$C3 = \frac{\Delta P_{ah} + \Delta P_{av}}{\Delta P_{linha}} \cdot 100$$

$$T1\$ = ' C$$

$$DATA_{SolidStream/Cth.txt}'$$

$$PB_1 = C1$$

$$PB_2 = C2$$

$$PB_3 = C3$$

$$PdCB\$_1 = \text{'Fluido'}$$

$$PdCB\$_2 = \text{'Sólidos'}$$

$$PdCB\$_3 = \text{'Aceleração'}$$

$$\$EXPORT T1\$ C1; C2; C3$$

03-Perda de carga por Yang

Equations

Yang

```
$OPENLOOKUP 'C
```

```
DATA_SolidStream/C;inicio1.txt'
```

```
procedure NãoesféricasH1( $Ut_h$ ) 1
```

```
     $Ut_{nesf;h1}$ )
```

```
    $COMMON Re_th1
```

```
    $COMMON rho_p
```

```
    $COMMON rho_f
```

```
    $COMMON psi
```

```
    $COMMON epsilon_h1
```

```
    $COMMON d_p
```

```
    If( $Re_{th1} < 500$ ) then
```

```
         $Ut_{nesf;h1}$ 
```

$$= 0,843 \cdot \log_{10}(\psi/0,065) \cdot Ut_{h1}$$

```
    else
```

```
         $Ut_{nesf;h1}$ 
```

$$= \sqrt{4 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot 9,8 \cdot \frac{d_p}{3 \cdot \rho_f \cdot (5,31 - 4,88 \cdot \psi) \cdot \epsilon_{h1}^{-4,7}}}$$

```
    endif
```

```
end
```

```
procedure NãoesféricasV1( $Ut_v$ ) 1
```

```
     $Ut_{nesf;v1}$ )
```

```
    $COMMON Re_tv1
```

```
    $COMMON rho_p
```

```
    $COMMON rho_f
```

```
    $COMMON psi
```

```
    $COMMON epsilon_v1
```

\$COMMON d_p

If($Re_{tv1} < 500$) then

$Ut_{nesf;v1}$

$$= 0,843 \cdot \log 10(\psi/0,065) \cdot Ut_{v1}$$

else

$Ut_{nesf;v1}$

$$= \sqrt{4 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot 9,8 \cdot \frac{d_p}{3 \cdot \rho_f \cdot (5,31 - 4,88 \cdot \psi) \cdot \epsilon_{v1}^{-4,7}}}$$

endif

end

T1\$ = ' C

DATA_SolidStream/C;Yang1.txt'

V\$ = ' C

Users/FilipeDocumentsPROJECTOAlgoritmosPercentagens.txt'

$Uf_{norm1} = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'Uf_norm1')$

$\psi = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'psi')$

$D_{norm1} = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'D_norm1')$

$f1 = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'f1')$

$\rho_p = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'rho_p')$

$\rho_f = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'rho_f')$

$\theta = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'theta')$

$d_p = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'd.p')$

$rug = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'rug')$

$\mu_f = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'mu_f')$

$T_{ar} = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'T.ar')$

$P_{ar} = \text{Lookup}('C.inicio' ; 1; 'P.ar')$

$L = L_v + L_h$

Ponto 1

$$C_{DS;h1} = 24/Re_{ph1} + \frac{4}{\sqrt{Re_{ph1}}} + 0,4$$

$$C_{DS;v1} = 24/Re_{pv1} + \frac{4}{\sqrt{Re_{pv1}}} + 0,4$$

$$\theta = \frac{1 - \epsilon_{h1}}{\epsilon_{h1}} \cdot \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \cdot Up_{h1}/Uf_{norm1}$$

$$\theta = \frac{1 - \epsilon_{v1}}{\epsilon_{v1}} \cdot \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \cdot Up_{v1}/Uf_{norm1}$$

Contribuição estática

$$\Delta P_{spv1} = \rho_p \cdot (1 - \epsilon_{v1}) \cdot L_v \cdot 9,8$$

$$\Delta P_{sgv1} = \rho_f \cdot \epsilon_{v1} \cdot L_v \cdot 9,8$$

Fricção

$$\Delta P_{Fg1} = f1 \cdot L \cdot \rho_f \cdot \frac{Uf_{norm1}^2}{2 \cdot D_{norm1}}$$

$$\Delta P_{Fsv1} = f_{pv1} \cdot L_v \cdot \rho_p \cdot (1 - \epsilon_{v1}) \cdot \frac{Up_{v1}^2}{2 \cdot D_{norm1}}$$

$$\Delta P_{Fsh1} = f_{ph1} \cdot L_h \cdot \rho_p \cdot (1 - \epsilon_{h1}) \cdot \frac{Up_{h1}^2}{2 \cdot D_{norm1}}$$

$$Re_{pv1} = \rho_f \cdot d_p \cdot \frac{abs(Uf_{norm1} - Up_{v1})}{\mu_f}$$

$$Re_{ph1} = \rho_f \cdot d_p \cdot \frac{abs(Uf_{norm1} - Up_{h1})}{\mu_f}$$

Vertical

$$f_{pv1} = 0,0206 \cdot \frac{1 - \epsilon_{v1}}{\epsilon_{v1}^3} \cdot ((1 - \epsilon_{v1}) \cdot Re_{tv1}/Re_{pv1})^{-0,869}$$

$$Ut_{v1} = \sqrt{\left(9,8 + f_{pv1} \cdot \frac{Up_{v1}^2}{2 \cdot D_{norm1}}\right) \cdot \left(4/3 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d_p \cdot \frac{\epsilon_{v1}^{4,7}}{\rho_f \cdot C_{DS;v1}}\right)}$$

$$Re_{tv1} = \rho_f \cdot d_p \cdot Ut_{v1}/\mu_f$$

$$Up_{v1} = Uf_{norm1} \cdot \left(1 - 0,68 \cdot d_p^{0,92} \cdot \rho_p^{0,5} \cdot \rho_f^{0,2} \cdot D_{norm1}^{-0,54}\right)$$

$$Up_{v1} = Uf_{norm1} - Ut_{v1}$$

call *NõesféricasV1*(Ut_v) 1

$Ut_{nesf;v1}$)

Horizontal

$$f_{ph1} = 0,117 \cdot \frac{1 - \epsilon_{h1}}{\epsilon_{h1}^3} \cdot \left((1 - \epsilon_{h1}) \cdot Re_{th1}/Re_{ph1} \cdot \frac{Uf_{norm1}}{\sqrt{9,8 \cdot D_{norm1}}}\right)^{-1,15}$$

$$Ut_{h1} = \sqrt{\left(f_{ph1} \cdot \frac{Up_{h1}^2}{2 \cdot D_{norm1}}\right) \cdot \left(4/3 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d_p \cdot \frac{\epsilon_{h1}^{4,7}}{\rho_f \cdot C_{DS;h1}}\right)}$$

$$Re_{th1} = \rho_f \cdot d_p \cdot Ut_{h1} / \mu_f$$

$$Up_{h1} = Uf_{norm1} \cdot (1 - 0,044 \cdot d_p^{0,3} \cdot \rho_p^{0,5})$$

$$Up_{h1} = Uf_{norm1} - Ut_{h1}$$

call NãoesféricasH1(Ut_h) 1

Ut_{nesf;h1})

Aceleração

$$\Delta P_{ah1} = \theta \cdot \rho_f \cdot Uf_{norm1} \cdot Up_{h1}$$

$$\Delta P_{av1} = \theta \cdot \rho_f \cdot Uf_{norm1} \cdot Up_{v1}$$

$$\Delta P_{linha1} = \Delta P_{ah1} + \Delta P_{av1} + \Delta P_{Fsh1} + \Delta P_{Fsv1} + \Delta P_{Fg1} + \Delta P_{sgv1} + \Delta P_{spv1}$$

$$P_1 = \frac{\Delta P_{Fg1} + \Delta P_{sgv1}}{\Delta P_{linha1}} \cdot 100$$

$$P_2 = \frac{\Delta P_{Fsh1} + \Delta P_{Fsv1} + \Delta P_{spv1}}{\Delta P_{linha1}} \cdot 100$$

$$P_3 = \frac{\Delta P_{ah1} + \Delta P_{av1}}{\Delta P_{linha1}} \cdot 100$$

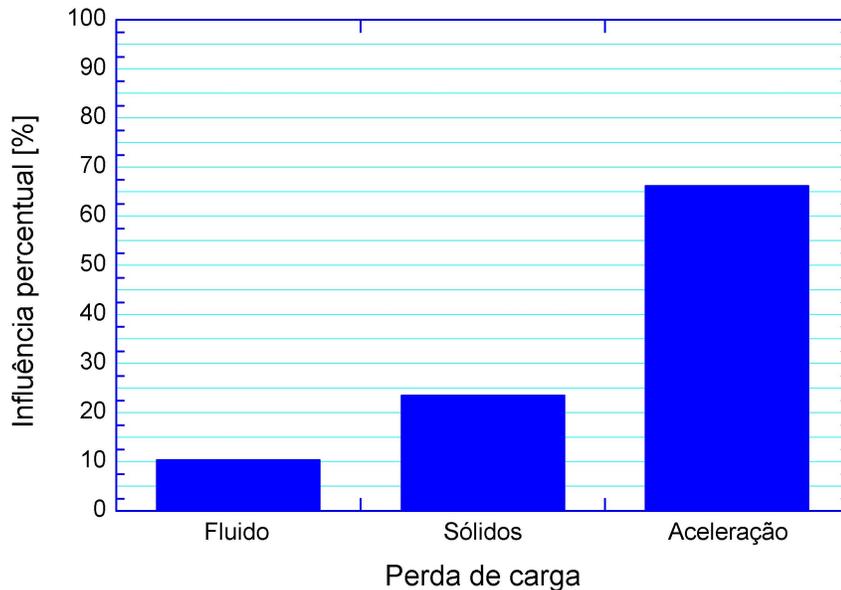
PdC\$₁ = 'Fluido'

PdC\$₂ = 'Sólidos'

PdC\$₃ = 'Aceleração'

\$EXPORT T1\$ DELTAP_linha1; epsilon_v1; epsilon_h1; Up_h1; Ut_h1; Up_v1; Ut_v1; Re_pv1; Re_ph1

Influência percentual da perda de carga



Report

Sintese dos resultados obtidos

Material a transportar:

04-Perda de carga curvas

Equations

Curvas

\$OPENLOOKUP ' C

DATA_SolidStream/C;inicio1.txt'

\$OPENLOOKUP ' C

DATA_SolidStream/f;b;table.txt'

\$OPENLOOKUP ' C

DATA_SolidStream/C;Yang1.txt'

T1\$ = ' C

DATA_SolidStream/C;Curvas1.txt'

$Uf_{norm1} = \text{Lookup}('C_inicio1' ; 1; 'Uf_norm1')$

$\epsilon_{h1} = \text{Lookup}('C_Yang1' ; 1; 'epsilon_h1')$

$\epsilon_{v1} = \text{Lookup}('C_Yang1' ; 1; 'epsilon_v1')$

$\rho_p = \text{Lookup}('C_inicio1' ; 1; 'rho_p')$

$\rho_f = \text{Lookup}('C_inicio1' ; 1; 'rho_f')$

————— Ponto 1 —————

$Uf1 = Uf_{norm1}$

$epsilon1 = \frac{\epsilon_{h1} + \epsilon_{v1}}{2}$

$\rho_{p;m1} = (1 - epsilon1) \cdot \rho_p + epsilon1 \cdot \rho_f$

1ª Combinação

$R1 = R_{b1}/D1$

$f_{b1} = \text{Interpolate1}('f_b_table' ; 'Column1' ; 'Column2' ; Column2 = R1)$

$\Delta_{Pb11} = 2 \cdot f_{b1} \cdot \rho_{p;m1} \cdot Uf1^2 \cdot N1$

2ª Combinação

$R2 = R_{b2}/D2$

$f_{b2} = \text{Interpolate1}('f_b_table' ; 'Column1' ; 'Column2' ; Column2 = R2)$

$\Delta_{Pb12} = 2 \cdot f_{b2} \cdot \rho_{p;m1} \cdot Uf1^2 \cdot N2$

3ª Combinação

$$R3 = R_{b3}/D3$$

$$f_{b3} = \text{Interpolate1}('f_b_table'; 'Column1'; 'Column2'; Column2 = R3)$$

$$\Delta_{Pb13} = 2 \cdot f_{b3} \cdot \rho_{p;m1} \cdot Uf1^2 \cdot N3$$

4ª Combinação

$$R4 = R_{b4}/D4$$

$$f_{b4} = \text{Interpolate1}('f_b_table'; 'Column1'; 'Column2'; Column2 = R4)$$

$$\Delta_{Pb14} = 2 \cdot f_{b4} \cdot \rho_{p;m1} \cdot Uf1^2 \cdot N4$$

$$\Delta_{P;curvas1} = \Delta_{Pb11} + \Delta_{Pb12} + \Delta_{Pb13} + \Delta_{Pb14}$$

$$A1 = \frac{f_{b1}}{f_{b1} + f_{b2} + f_{b3} + f_{b4}} \cdot 100$$

$$A2 = \frac{f_{b2}}{f_{b1} + f_{b2} + f_{b3} + f_{b4}} \cdot 100$$

$$A3 = \frac{f_{b3}}{f_{b1} + f_{b2} + f_{b3} + f_{b4}} \cdot 100$$

$$A4 = \frac{f_{b4}}{f_{b1} + f_{b2} + f_{b3} + f_{b4}} \cdot 100$$

$$B_1 = A1$$

$$B_2 = A2$$

$$B_3 = A3$$

$$B_4 = A4$$

$$Co\$_1 = '1^a'$$

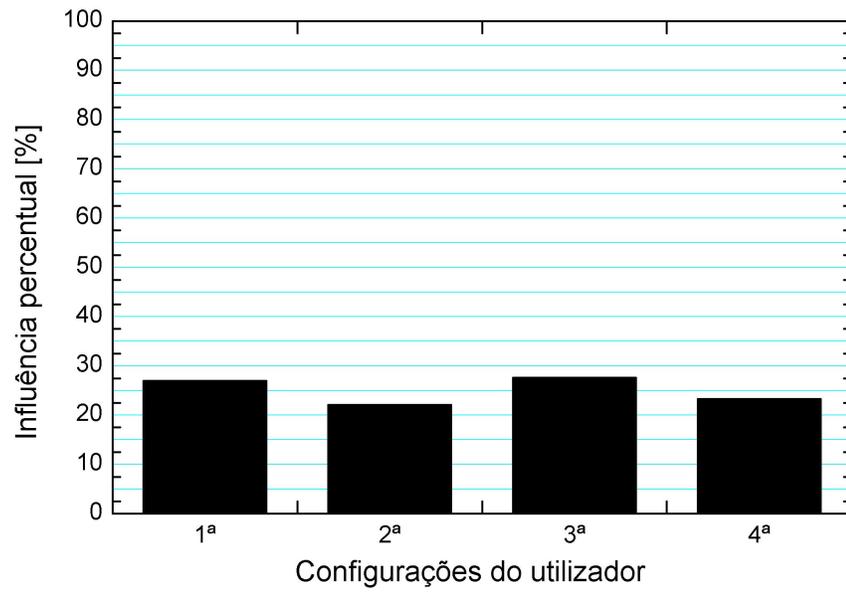
$$Co\$_2 = '2^a'$$

$$Co\$_3 = '3^a'$$

$$Co\$_4 = '4^a'$$

\$EXPORT T1\$ A1; A2; A3; A4; D1; D2; D3; D4; f_b1; f_b2; f_b3; f_b4; N1; N2; N3; N4; DELTA_Pb1

Influência percentual das configurações



05-Separadores ciclonicos

Equations

procedure VOL(I; Hc; S; Vs; D) c

Kc)

\$COMMON phi

\$COMMON Lc

\$COMMON Dx

\$COMMON De

\$COMMON d

If(I > (Hc - S)) then

$$V_H = \left(\phi \cdot \frac{Dc^2}{4} \right) \cdot (Lc - S) + \left(\phi \cdot \frac{Dc^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{Hc - Lc}{3} \right) \cdot \left(1 + Dx/Dc + \frac{Dx^2}{Dc^2} \right) - (\phi \cdot De^2 \cdot I/4) \cdot (Hc - S)$$

$$Kc = \frac{2 \cdot Vs + V_H}{s \cdot Dc^3}$$

else

$$V_{cn} = \left(\phi \cdot \frac{Dc^2}{4} \right) \cdot (Lc - S) + \left(\phi \cdot \frac{Dc^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{I + S - Lc}{3} \right) \cdot \left(1 + d/Dc + \frac{d^2}{Dc^2} \right) - (\phi \cdot De^2 \cdot I/4)$$

$$Kc = \frac{2 \cdot Vs + V_{cn}}{2 \cdot Dc^3}$$

endif

end

\$OPENLOOKUP 'C

DATA_SolidStream/C;inicio1.txt'

\$OPENLOOKUP 'C

DATA_SolidStream/C;Yang1.txt'

\$OPENLOOKUP 'C

DATA_SolidStream/C;curvas1.txt'

T1\$ = 'C

DATA_SolidStream/C;Separadores.txt'

\$UPDATEGUESSES

$$T_{ar} = \text{Lookup}('C_inicio1' ; 1; 'T_ar')$$

$$d_p = \text{Lookup}('C_inicio1' ; 1; 'd_p')$$

$$\dot{m}_{p1} = \text{Lookup}('C_inicio1' ; 1; 'm_dot_p1')$$

$$Uf1 = \text{Lookup}('C_inicio1' ; 1; 'Uf_norm1')$$

$$D_{norm1} = \text{Lookup}('C_inicio1' ; 1; 'D_norm1')$$

$$\rho_p = \text{Lookup}('C_inicio1' ; 1; 'rho_p')$$

$$\rho_f = \text{Lookup}('C_inicio1' ; 1; 'rho_f')$$

$$\mu_f = \text{Lookup}('C_inicio1' ; 1; 'mu_f')$$

$$C_{DS1} = \text{Lookup}('C_Yang1' ; 1; 'C_DS_v1')$$

$$Re_{p1} = \text{Lookup}('C_Yang1' ; 1; 'Re_ph1')$$

$$\phi = 3,14$$

Ponto 1

$$Vc1 = Uf1$$

$$\dot{V}1 = \dot{m}_{p1} / \rho_p$$

$$\dot{V}_{i1} = \dot{V}1 / Ni$$

$$Dc = 2 \cdot Rc$$

Perda de carga

$$\Delta P_{ciclone1} = Kd/2 \cdot \rho_f \cdot Vc1^2 \cdot Ac \cdot \frac{Bc}{De^2}$$

Rendimento

$$ETA1 = 1 - \exp \left(-2 \cdot \left(G \cdot tau1 \cdot \frac{\dot{V}_{i1}}{Dc^3} \cdot (n+1) \right)^{\frac{0,5}{n+1}} \right)$$

$$tau1 = 4/3 \cdot \rho_p \cdot \frac{d_p^2}{\mu_f \cdot C_{DS1} \cdot Re_{p1}}$$

$$G = 8 \cdot \frac{Kc}{Ka^2} \cdot \frac{Ka^2}{Kb^2}$$

$$Ka = Ac/Dc$$

$$Kb = Bc/Dc$$

$$n = 1 - \left(1 - \frac{(39,4 \cdot Dc)^{0,14}}{2,5} \right) \cdot \left(\frac{T_{ar} + 273,15}{293,15} \right)^{0,3}$$

$$I = 2,3 \cdot De \cdot \left(\frac{Dc^2}{Ac \cdot Bc} \right)^{1/3}$$

$$d = Dc - (Dc - Dx) \cdot \left(\frac{S + I - Lc}{Hc - Lc} \right)$$

$$Vs = \frac{\phi \cdot (S - Ac/2) \cdot (Dc^2 - De^2)}{4}$$

call VOL(I; Hc; S; Vs; D) c

Kc)

$$A0 = Ac/Dc$$

$$B0 = Bc/Dc$$

$$C0 = S/Dc$$

$$D0 = De/Dc$$

$$E0 = Lc/Dc$$

$$F0 = Hc/Dc$$

$$G0 = Dx/Dc$$

\$EXPORT T1\$ DELTAP_ciclone1; ETA1; A0; B0; C0; D0; E0; F0; G0; Ni; Rc; Kd; Cicl\$; Ut1\$;Def\$