



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de um sistema automático de limpeza – uma aplicação à indústria cerâmica

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Engineering design of an automatic system – an application to the ceramic industry

Autor

Sandrine Ferreira Lopes

Orientadores

José Domingos Moreira da Costa

João Gonçalves

Júri

Presidente	Professor Doutor José António Martins Ferreira Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho Professor Associado com agregação da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa Professor Associado com agregação da Universidade de Coimbra

CERUTIL – Cerâmica Utilitária S.A.



Coimbra, Setembro, 2016

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e
nunca se arrepende.” Leonardo da Vinci

À mes parents, frères et à toi

Agradecimentos

A concretização deste trabalho não seria possível sem a ajuda e apoio de várias pessoas que, muito ou pouco, estiveram sempre presentes ao longo desta etapa e às quais não podia deixar de prestar o meu agradecimento, assim quero especialmente agradecer:

Ao Professor José Domingos Moreira da Costa por ter aceitado orientar este projeto e desafio, pelos ensinamentos que me transmitiu e orientação que me fizeram olhar e perceber os problemas encontrados segundo outra perspetiva.

Ao Professor Domingos Xavier Viegas que apesar de não estar diretamente relacionado com o trabalho sempre se mostrou disponível para as dúvidas em relação à parte aerodinâmica do trabalho.

Ao Professor Amílcar Lopes Ramalho pelo tempo, ensinamentos e equipamentos que disponibilizou para a realização de alguns ensaios.

Ao Engenheiro João Gonçalves que sempre mostrou disponibilidade para esclarecer as dúvidas práticas que surgiram assim como pelos conselhos e opiniões em relação ao desenho do projeto.

Ao meu primo Filipe pela ajuda na filmagem dos ensaios mas também pela paciência, apoio, conselhos, amizade e momentos de descontração proporcionados durante esta longa etapa.

Aos meus amigos e colegas que sempre me apoiaram e ajudaram quando as coisas não correram de forma prevista.

Por último mas principalmente à minha família pela confiança que sempre depositaram em mim. Ao meu pai, por ser o homem mais bondoso, justo e corajoso que conheço, pelo exemplo incomparável que sempre me deu ao longo da minha vida e pelo apoio e compreensão incondicional, à minha mãe pela mulher extraordinária e lutadora que é e sempre me ensinou a ser, pela força que me deu e por não deixar desistir lembrando-me sempre que era capaz, ao meu irmão que mesmo sem saber sempre foi uma inspiração e âncora para mim e à minha irmã pela ajuda e carinho que me ajudaram a continuar.

Resumo

Este projeto foi realizado com a intenção de criar uma solução prática para um problema real inserido no meio industrial com base e com recurso a conhecimentos académicos. O principal objetivo desta tese é a conceção e projeto de um sistema de limpeza por sopro para remoção de partículas de sujidade. Foi necessária a recolha e análise de um conjunto de partículas de modo a se conseguir determinar o coeficiente de arrasto e assim a velocidade de escoamento necessário para garantir o arrasto das mesmas, sendo nesta parte que os conhecimentos académicos foram predominantes, nomeadamente na realização de vários ensaios de caracterização geométrica das partículas e nos ensaios realizados para obtenção do coeficiente de arrasto.

Depois de saber qual a velocidade que seria necessária realizou-se um estudo de mercado visando a pesquisa dos equipamentos mais adequados, tendo sido selecionadas as denominadas facas de ar projetar e efetuou-se o dimensionamento da estrutura completa, sendo que esta fase incluiu uma vertente mais prática, nomeadamente em relação à realização de pedidos de orçamento.

A modelação do sistema foi realizada com recurso ao *software* Inventor e a análise de esforços através do ADINA.

O objetivo principal foi cumprido tendo sido realizada a seleção de equipamentos por catálogo dos fabricantes e o dimensionamento completo do sistema. A empresa começou já a implementação de uma medida de melhoria proposta (colocação da chapa por fora da estrutura dos balancetes) para posterior montagem e funcionamento do sistema de limpeza.

Palavras-chave: Coeficiente de arrasto, Velocidade de Escoamento, Partículas, Balancetes, Sistema de Limpeza.

Abstract

This thesis was accomplished for the resolution of a real problem in the industrial environment based on academic knowledge. The main objective of this thesis is the projection of a cleaning system using blowing air for dirt particles removal. Therefore it was necessary to pick some of these particles and create a sample to analyse and obtain the drag coefficient associated to the particles and then the flow velocity needed to guarantee the drag of them, for this part it was mostly needed the scientific knowledge to realize all the laboratorial tests to characterize the particles and aerodynamic testing to obtain the drag coefficient.

After knowing the flow velocity needed it was necessary to realize a research of the equipment more suitable for the solution developed, having been selected air knives, it was possible the projection of all structure. This phase was more practical like asking budget proposals.

For the structure and system modelling it was used Inventor software and ADINA to stress analysis.

The main objective was achieved the selection of the right equipment and projection of the all system was made and the company has accepted and started to implement a measure to improve proposed (placing the galvanized sheet externally to the structure of the basket) to afterwards install and function of the cleaning system.

Keywords Drag Coefficient, Flow Velocity, Particles, Basket, Cleaning System.

ÍNDICE

Índice	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	2
1.1.1. Impacto económico resultante da rejeição.....	6
1.2. Lei geral da aerodinâmica sobre partículas.....	9
1.2.1. Modelo prático – Análise aerodinâmica sobre as partículas de sujidade	12
1.3. Objetivos.....	13
1.4. Estado de arte.....	14
2. Ensaio Laboratoriais	17
2.1. Metodologia	17
2.2. Análise das superfícies a limpar	19
2.3. Caracterização das partículas.....	21
2.3.1. Coeficiente de atrito estático	22
2.3.2. Cálculo da densidade das partículas	25
2.4. Caracterização geométrica.....	27
2.5. Determinação da velocidade de equilíbrio.....	29
2.6. Determinação do coeficiente de arrasto.....	31
2.7. Cálculo da velocidade de escoamento	32
3. Discussão e Análise dos resultados	33
3.1. Comparação dos valores obtidos com as três leis.....	33
3.2. Avaliação dos parâmetros presentes na Lei do artigo.....	35
3.3. Análise dos parâmetros presentes na lei de Swamme.....	37
3.4. Interpretação gráfica dos parâmetros presentes na lei de Chien.....	38
3.5. Conclusões	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
ANEXO	41
Representação do modelo 3D do sistema completo	41
Análise de esforços, tensões e deformações na estrutura	43
Dimensionamento estático dos parafusos de fixação da estrutura	46
Funcionamento do Sistema Completo.....	49
APÊNDICE A	53
Mapa da fábrica	53
APÊNDICE B.....	55
Catalogação das partículas.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ilustração de peças com defeito do tipo pintas pretas (à esquerda) e sujidades e areias (à direita).....	1
Figura 1.2. Ilustração de um balancete.....	2
Figura 1.3. Acumulação de partículas de massa consistente e material ferroso no chapéu do balancete.....	3
Figura 1.4. Transferência de partículas do chapéu para as placas do balancete por deslizamento (à esquerda) e por efeito de ricochete devido à queda e embate da partícula no chapéu (à direita).....	4
Figura 1.5. Contaminação de uma peça vidrada com massa lubrificante, material ferroso pós e areias.....	4
Figura 1.6. Defeitos resultantes da contaminação com massa lubrificante, material ferroso, pós e areias.....	5
Figura 1.7. Contaminação com material das placas dos balancetes.....	5
Figura 1.8. Resultado da contaminação com material das placas dos balancetes.....	6
Figura 1.9. Dados amostrais relativamente à rejeição em 2015.....	7
Figura 1.10. Custos correspondentes à rejeição por defeitos em 2015.....	7
Figura 1.11. Previsão do custo de não qualidade associado aos defeitos em estudo para o ano de 2015.....	9
Figura 1.12. Ação da distribuição de pressão e tensão viscosa ao longo da superfície do corpo.....	10
Figura 1.13. Representação da força aerodinâmica e momento resultantes.....	10
Figura 1.14. Representação das forças de sustentação e de arrasto.....	11
Figura 1.15. Decomposição da força resultante, R , segundo os eixos da partícula.....	11
Figura 1.16. Forças impostas nas partículas de sujidades quando sujeitas a um escoamento.....	12
Figura 2.1. Metodologia empregada.....	17
Figura 2.2. Amostra 10×10 cm ² da superfície das placas MDF (esquerda) e da superfície dos chapéus dos balancetes (direita).....	19
Figura 2.3. Rugosidade da Superfície da Placa MDF (esquerda) e da Chapa Zincada (direita).....	20
Figura 2.4. Perfil da Rugosidade da Superfície da Chapa Zincada.....	20
Figura 2.5. Perfil da Rugosidade da Superfície da Placa MDF.....	20
Figura 2.6. Equipamento utilizado para obtenção do coeficiente de atrito estático das partículas.....	22
Figura 2.7. Tubo e escala utilizados para a realização dos ensaios.....	30
Figura 3.1. Comparação de modelos de determinação do coeficiente de arrasto.....	33

Figura 3.2. Comparação da velocidade mínima necessária para o arrasto das partículas na chapa zincada.	34
Figura 3.3. Comparação da velocidade mínima necessária para o arrasto das partículas na placa MDF.....	34
Figura 3.4. Relação entre o coeficiente de arrasto experimental e o coeficiente de arrasto da esfera equivalente de acordo com a lei de Clift e Gauvin.	36
Figura 3.5. Relação entre o coeficiente de arrasto e o fator de forma associado a cada partícula.	36
Figura 3.6. Relação entre o coeficiente de arrasto e o fator de forma de Corey.	37
Figura 3.7. Relação entre o coeficiente de arrasto e a esfericidade das partículas.....	38
Figura 4.1. Representação do modelo 3D do sistema de limpeza.	41
Figura 4.2. Esquematização da estrutura de suporte para as facas de ar.	42
Figura 4.3. Esquematização da distribuição de ar soprado por uma faca de ar.....	43
Figura 4.4. Demonstração das tensões na estrutura de suporte do sistema.	45
Figura 4.5. Demonstração do deslocamento e esforços na estrutura de suporte do sistema.	45
Figura 4.6. Esquematização das reações na base de fixação.	46
Figura 4.7. Representação do sistema automático de limpeza final.	50
Figura 4.8. Esquematização da proposta de melhoria para a chapa dos balancetes: balancete atual (esquerda) vs balancete melhorado (direita).....	51
Figura A.1. Esquematização do mapa da fábrica.	53
Figura B.1. Caracterização das dimensões da partícula um.	55
Figura B.2. Caracterização das dimensões da partícula dois.....	55
Figura B.3. Caracterização das dimensões da partícula três.....	55
Figura B.4. Caracterização das dimensões da partícula quatro.	56
Figura B.5. Caracterização das dimensões da partícula cinco.....	56
Figura B.6. Caracterização das dimensões da partícula sete.	56
Figura B.7. Caracterização das dimensões da partícula treze.....	57
Figura B.8. Caracterização das dimensões da partícula catorze.....	57
Figura B.9. Caracterização das dimensões da partícula quinze.....	57
Figura B.10. Caracterização das dimensões da partícula dezasseis.	58
Figura B.11. Caracterização das dimensões da partícula dezassete.	58
Figura B.12. Caracterização das dimensões da partícula dezoito.....	58
Figura B.13. Caracterização das dimensões da partícula dezanove.	59
Figura B.14. Caracterização das dimensões da partícula vinte.	59

Figura B.15. Caracterização das dimensões da partícula vinte e dois. 59
Figura B.16. Caracterização das dimensões da partícula vinte e três. 60
Figura B.17. Caracterização das dimensões da partícula vinte e quatro. 60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Descrição dos custos associados a cada tipo de defeito.	8
Tabela 1.2. Caracterização de partículas segundo dois grupos.	14
Tabela 2.1. Descrição da forma massa e peso das partículas representantes da amostra recolhida.	21
Tabela 2.2. Alturas máximas atingidas até a partícula entrar em desequilíbrio estático.	22
Tabela 2.3. Valores obtidos para o coeficiente de atrito estático de cada partícula nas diferentes superfícies.	23
Tabela 2.4. Força de atrito associada a cada partícula de acordo com o tipo de superfície.	24
Tabela 2.5. Densidade das partículas.	26
Tabela 2.6. Dimensões dos eixos das partículas.	27
Tabela 2.7. Valores correspondentes aos vários parâmetros de caracterização das partículas.	28
Tabela 2.8. Valores referentes à esfericidade, circularidade e fator de forma associado a cada partícula.	28
Tabela 2.9. Velocidades terminais determinadas experimentalmente.	30
Tabela 2.10. Coeficiente de arrasto de cada partícula.	31
Tabela 2.11. Velocidade de escoamento necessário para que se dê o arrasto das partículas nas diferentes superfícies.	32
Tabela 4.1. Valores de forças distribuídas a que a estrutura está sujeita.	44

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

\vec{A} [N] – Força axial segundo o eixo do corpo

$|\vec{a}|$ [m/s^2] – Aceleração

A_p [cm^2] – Área da superfície da partícula

A_{sph} [cm^2] – Área da superfície equivalente à esfera

A_t [mm^2] – Área resistente do parafuso

c – Circularidade da partícula

c – Relação de rigidez entre os parafusos e a flange

C_A – Coeficiente da força axial

C_d – Coeficiente de arrasto

$C_{d,sphere}$ - Coeficiente de arrasto da esfera equivalente de acordo com a lei de

Clift e Gauvin.

C_L – Coeficiente de sustentação

C_M – Coeficiente do momento

C_N – Coeficiente da força normal

\vec{D} [N] – Força de arrasto

d_A [cm] – Diâmetro equivalente da superfície da esfera

d_l [cm] – Comprimento máximo da partícula

d_m [cm] – Comprimento médio da partícula

d_n [cm] – Diâmetro nominal da partícula

d_p [cm] – Dimensão da partícula

d_s [cm] – Comprimento mínimo da partícula

E [MPa] – Módulo de Young dos parafusos

E_m [MPa] – Módulo de Young da flange

$|\vec{F}|$ [N] - Força

F_a [N] – Força de atrito

F_D [N] – Força de arrasto

- F_i [N] – Força recomendada para os parafusos
- F_{min_1} [N] – Força mínima para os parafusos da zona 1
- F_{min_2} [N] – Força mínima para os parafusos da zona 2
- \vec{F}_x [N] – Força de arrasto
- \vec{F}_y [N] – Força de sustentação
- F_{∞} [N] – Força resultante do impacto do fluido no corpo
- F_{152} [N] – Força de impulso da faca de 152 mm
- F_{305} [N] – Força de impulso da faca de 305 mm
- g [m/s^2] – Aceleração da gravidade
- I [N] – Força de Impulsão
- K_p [N/mm] – Constante de rigidez dos parafusos
- K_m [N/mm] – Constante de rigidez da flange
- l [m] – Comprimento total do corpo
- l [mm] – Comprimento dos parafusos
- \vec{L} [N] – Força de sustentação
- L_1 [mm] – Distância do ponto de rotação ao centro dos parafusos da zona 1
- L_2 [mm] – Distância do ponto de rotação ao centro dos parafusos da zona 2
- M [N.mm] – Momento na base da estrutura
- \vec{M} [Nm] – Momento aerodinâmico resultante
- m_a [g] – Massa aparente da partícula
- m_p [g] – Massa da partícula
- n – Coeficiente de segurança
- \vec{N} [N] – Força normal de acordo com o plano do corpo
- Q [N] – Reação na base da estrutura
- P [N] – Peso da partícula
- p [Pa] – Distribuição de pressão ao longo da superfície do corpo
- P_a [N] – Peso aparente da partícula
- $P_{m\acute{a}x}$ [N] – Força máxima a que os parafusos estarão sujeitos
- P_{mp} - Projeção máxima do perímetro
- P_p [cm] - Perímetro do círculo equivalente à área máxima projeção.

- P_1 [N] – Força nos parafusos da zona 1
 P_2 [N] – Força nos parafusos da zona 2
 P_{152} [N] – Força devido ao peso da faca de 152 mm
 P_{305} [N] – Força devido ao peso da faca de 305 mm
 \vec{R} [N] – Resultante da força aerodinâmica no corpo
 Re – Número de Reynolds
 S [m²] – Área de referência do corpo
 u_∞ [m/s] – Velocidade do meio
 V [cm³] – Volume da partícula
 V_p [cm³] – Volume da partícula
 w_t [m/s] – Velocidade terminal da partícula
 X – Circularidade da partícula
 α [°] – Ângulo formado entre a direção do escoamento e eixo médio do corpo
 β – Fator de forma de Corey
 μ_e – Coeficiente de atrito
 $\mu_{e,sup}$ – Coeficiente de atrito estático da superfície
 μ_f [P] – Viscosidade do fluido
 ρ_f [kg/m³] – Densidade do fluido
 ρ_l [kg/m³] – Densidade do líquido
 ρ_p [kg/m³] – Densidade da partícula
 ρ_∞ [kg/m³] – Densidade do meio
 σ_c [MPa] – Tensão de cedência dos parafusos de acordo com o grau métrico
 $\sigma_{máx}$ [MPa] – Tensão máxima a que os parafusos estarão sujeitos
 σ_p [MPa] – Tensão de prova dos parafusos de acordo com o grau métrico
 τ [N/m²] – Distribuição da tensão viscosa ao longo da superfície do corpo
 ϕ – Esfericidade da partícula
 ψ – Fator de forma da partícula

Siglas

- fps* – frames por segundo
MDF – *Medium density fiberboard*

1. INTRODUÇÃO

Desde que a indústria surgiu nasceu, também com ela, a necessidade de se resolver problemas, inovar e evoluir ao longo do tempo mas também se criou a necessidade de se fazer melhor em relação à concorrência de aumentar a qualidade de produção e diminuir as falhas existentes e é no seguimento desta vontade de fazer bem sem falhas e prejuízos que se insere o trabalho desenvolvido e aqui apresentado. No enquadramento da realização do estágio curricular na empresa CERUTIL foi proposto que se estudasse um problema específico ligado à rejeição na produção das peças, louça cerâmica utilitária (p.e. travessas, tijelas, pratos, entre outros) e que se propusesse uma solução a implementar para a resolução do mesmo.

O problema a estudar deve-se ao aparecimento de defeitos nas peças cozidas denominados como “pintas pretas” e “sujidades e areias”, de acordo com a figura 1.1., que impõem automaticamente a rejeição da peça para o lixo sem qualquer hipótese de retoque.



Figura 1.1. Ilustração de peças com defeito do tipo pintas pretas (à esquerda) e sujidades e areias (à direita).

Antes de entrar no problema propriamente dito e aprofundar o mesmo será realizado um breve enquadramento sobre o processo global de produção da fábrica para que se torne mais fácil para o leitor perceber o trabalho desenvolvido.

1.1. Enquadramento

Como se pode observar através do Apêndice A a fábrica encontra-se dividida em várias zonas de produção. A primeira etapa do processo consiste na preparação da pasta cerâmica (fornecida por outra entidade) em blocos de acordo com a peça que irá ser produzida. Cada peça possui um molde próprio levando assim à necessidade de preparar a pasta em blocos com diferentes tamanhos e formas. Depois de preparada a pasta é transportada para a zona de conformação onde é colocada nas diversas prensas sendo assim formadas as peças que imediatamente de seguida são levadas para a zona de acabamento e, posteriormente, colocadas em carros onde permanecem nas estufas durante o tempo necessário para o processo de secagem. Depois de secas as peças são vidradas tanto interna como exteriormente e depois desta etapa são colocadas em balancetes, representados na figura 1.2., que se deslocam de forma automática através de um transportador aéreo suportado sob uma viga em I com recurso a uma corrente e roletes implementados nos balancetes, à espera de serem colocadas no forno para a fase final de cozedura.



Figura 1.2. Ilustração de um balancete.

Como se pode analisar pelo Apêndice A o transportador abrange um considerável espaço aéreo da fábrica e atendendo ao facto de no total existirem 1700

balancetes depois da vidragem as peças não são de imediato cozidas podendo estas ficarem no transportador durante vários dias sujeitas às várias sujidades presentes no ar e ambiente da fábrica. É durante este tempo de espera que ocorre a deposição de partículas de sujidade nas peças levando assim à origem dos defeitos anteriormente mencionados. Este tipo de defeitos específicos têm origem na deposição de partículas de massa lubrificante e material ferroso, tal como ilustrado na figura 1.3., resultante do desgaste, do rolamento dos balancetes mas também da deposição de pós e areias.



Figura 1.3. Acumulação de partículas de massa consistente e material ferroso no chapéu do balancete.

Em relação às partículas de massa lubrificante e material ferroso observou-se, através da realização de alguns testes, que a sua deposição é realizada de forma concentrada nos chapéus dos balancetes sendo depois transferidas para as peças por deslizamento, tal como representado na figura 1.4. mas também ocorre contaminação das peças devido ao efeito ricochete no momento em que pedaços de massa se desagregam da corrente caindo no chapéu e aterrando numa peça dos balancetes vizinhos de acordo com o esquema da figura 1.4.

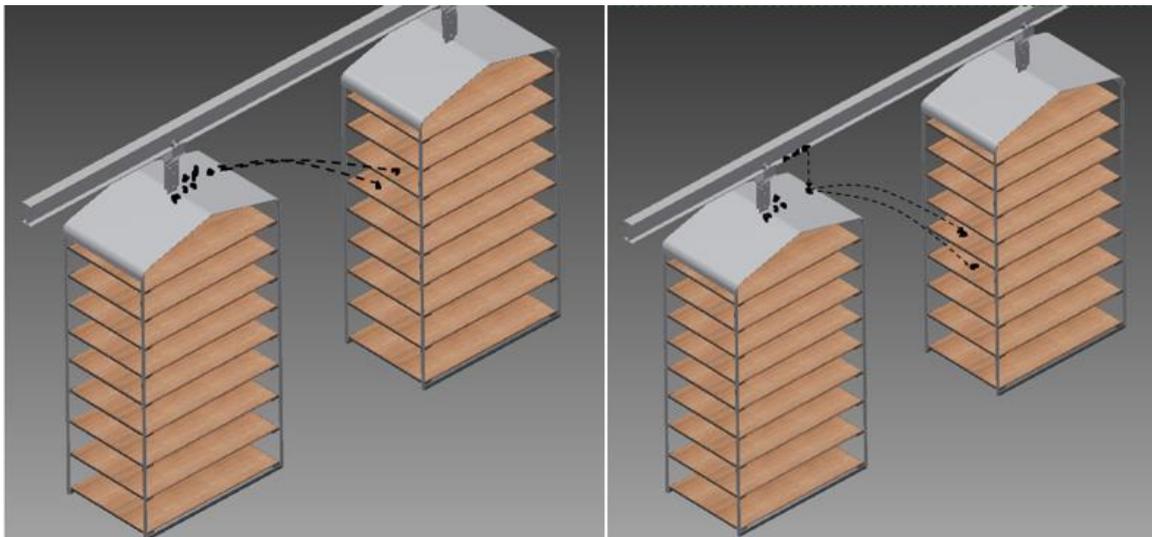


Figura 1.4. Transferência de partículas do chapéu para as placas do balancete por deslizamento (à esquerda) e por efeito de ricochete devido à queda e embate da partícula no chapéu (à direita).

Atendendo a que a informação sobre a origem do material dos defeitos era apenas uma suposição foi realizado um teste de contaminação propositada de modo a assegurar que a contaminação provinha de facto do material lubrificante e ferroso da corrente e roletes dos balancetes. Na figura 1.5. está representada uma peça já vidrada e contaminada com massa consistente, material ferroso, pós e areias e na figura 1.6. podem-se observar os defeitos resultantes da contaminação na peça já cozida e que validam a informação fornecida sobre a fonte de contaminação.



Figura 1.5. Contaminação de uma peça vidrada com massa lubrificante, material ferroso, pós e areias.



Figura 1.6. Defeitos resultantes da contaminação com massa lubrificante, material ferroso, pós e areias.

Para além das fontes de contaminação mais óbvias testou-se ainda uma peça com material das placas, figura 1.7., uma vez que algumas se encontram em considerável estado de degradação o que implica deposição de material das mesmas nas peças vidradas. Como se pode verificar pela figura 1.8. o material das placas não impõe qualquer tipo de defeito o que já seria de prever considerando que o mesmo é biodegradável.



Figura 1.7. Contaminação com material das placas dos balancetes.



Figura 1.8. Resultado da contaminação com material das placas dos balancetes.

Como se pode observar pela análise das figuras anteriores o material degradado das placas não impõe qualquer tipo de defeito para as peças, concluindo-se assim que a origem da contaminação com resultado dos defeitos “pintas pretas” resulta apenas do material lubrificante da corrente e do material ferroso resultante do desgaste dos rolamentos.

1.1.1. Impacto económico resultante da rejeição

Com o intuito de se perceber qual a verdadeira dimensão do problema e quais os custos associados ao mesmo, de modo a perceber posteriormente se o investimento necessário para o sistema fará sentido, realizou-se uma análise relativamente à rejeição durante o ano de 2015.

Através do tratamento dos dados amostrais fornecidos pelo departamento de qualidade nas várias auditorias realizadas obteve-se o gráfico 1.1. que mostra a quantidade de peças rejeitadas durante o ano de 2015. A análise mais detalhada das peças que foram rejeitadas, tendo em consideração o seu custo de fabrico permitiu representar na figura 1.9. e descritos na tabela 1.1., os valores amostrais associados ao custo de não qualidade correspondente a cada tipo de defeito existente.

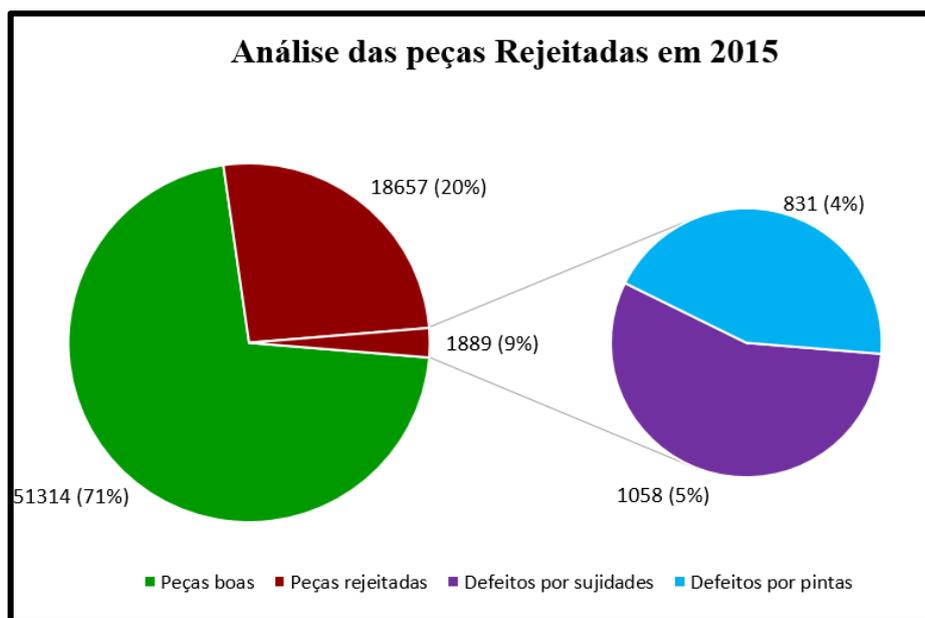


Figura 1.9. Dados amostrais relativamente à rejeição em 2015.

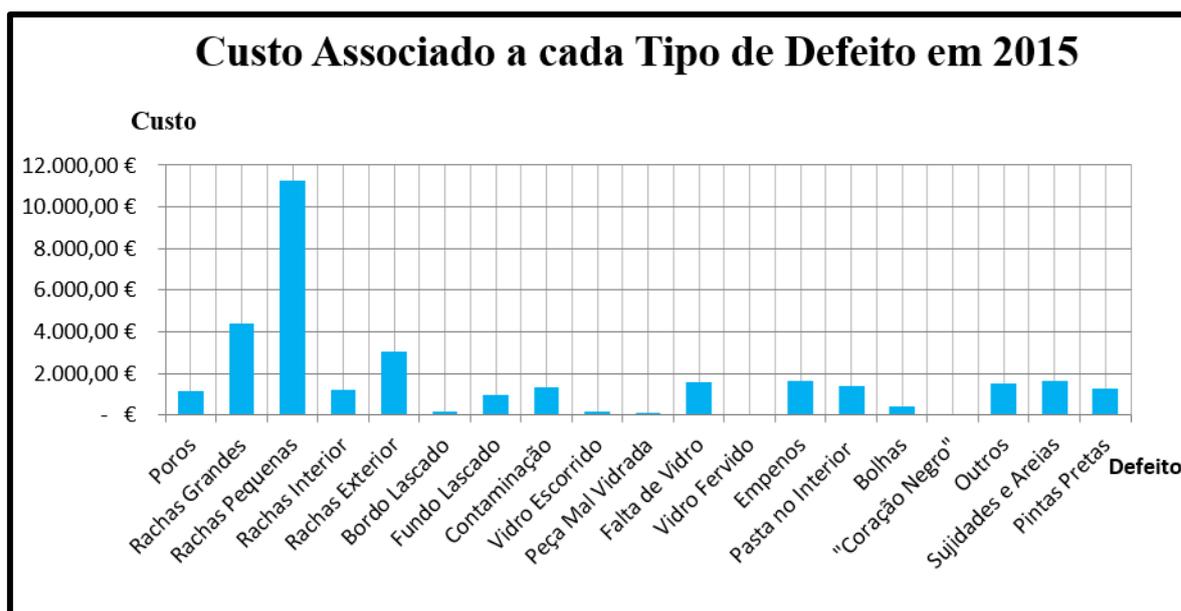


Figura 1.10. Custos correspondentes à rejeição por defeitos em 2015.

Apesar de na figura 1.10. não se conseguir ver o valor exato em relação ao custo de cada defeito, estes encontram-se descritos na tabela 1.1., no entanto serve para se ter uma perceção e comparação mais óbvia entre os custos dos vários defeitos. Apesar de não serem os defeitos com o maior custo associado apresentam ainda um valor considerável sendo que a sua eliminação seria de grande vantagem para a redução do custo de não qualidade obtido anualmente.

Tabela 1.1. Descrição dos custos associados a cada tipo de defeito.

Defeitos	Custo
Poros	1.177,33 €
Rachas Grandes	4.420,88 €
Rachas Pequenas	11.266,70 €
Rachas Interior	1.183,53 €
Rachas Exterior	3.022,48 €
Bordo Lascado	182,17 €
Fundo Lascado	955,48 €
Contaminação	1.307,57 €
Vidro Escorrido	152,36 €
Peça Mal Vidrada	128,05 €
Falta de Vidro	1.571,57 €
Vidro Fervido	50,29 €
Empenos	1.664,40 €
Pasta no Interior da Peça	1.374,39 €
Bolhas	438,09 €
"Coração Negro"	54,65 €
Outros	1.540,52 €
Sujidades e Areias	1.645,07 €
Pintas Pretas	1.296,47 €
Total	33.432,00 €

Analisando agora os valores específicos em relação aos defeitos com interesse para este estudo obteve-se um total correspondente a 2.942 € o que pode parecer baixo mas, no entanto este valor correspondente apenas à amostra recolhida ao longo do ano. Para tentar obter uma previsão do custo de não qualidade total associado a estes defeitos realizou-se uma previsão probabilística, esquematizada na figura 1.11., assumido que a produção total de 2015 teria um comportamento semelhante à amostra recolhida, concluiu-se que o número total de peças rejeitadas devido à presença de defeitos como “pintas pretas” e “sujidades” seria à volta de 37.057 peças levando assim a um valor do custo de não qualidade igual a 57.705 €. É de ter em conta que estes valores são apenas representativos podendo não corresponder ao valor real uma vez que a sua obtenção foi realizada com recursos a cálculos de previsão.

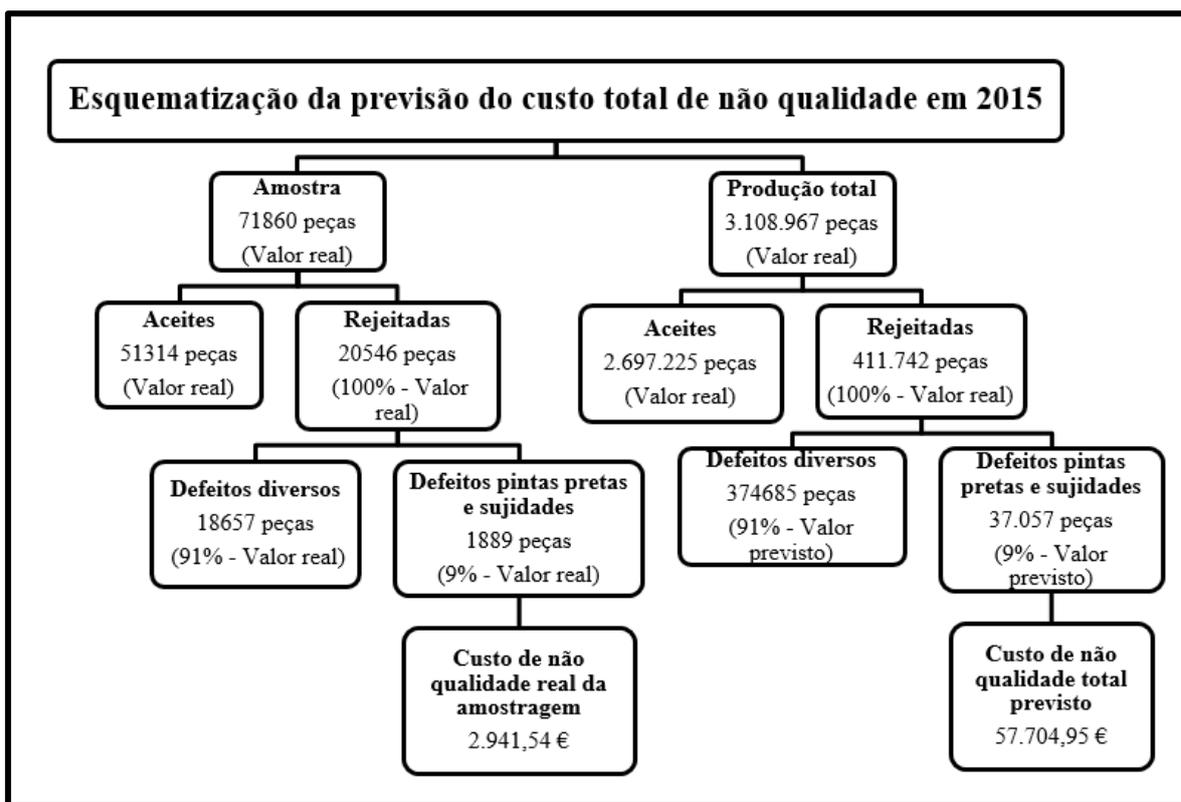


Figura 1.11. Previsão do custo de não qualidade associado aos defeitos em estudo para o ano de 2015.

1.2. Lei geral da aerodinâmica sobre partículas

De modo a enquadrar o presente problema nos conceitos de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos apresenta-se a seguir uma breve introdução teórica relativamente às forças a que fica sujeito um corpo/ partícula quando submetida a um escoamento.

Qualquer corpo que esteja submetido à presença de um escoamento fica sujeito à ação de forças aerodinâmicas devido à distribuição de pressão (p) resultante do impacto das moléculas do fluido na superfície do corpo e a uma tensão viscosa (τ) devido às forças de fricção entre o fluido e a superfície na sua superfície, enquanto que a primeira componente atua perpendicularmente à superfície do corpo a segunda atua tangencialmente às linhas de escoamento e, conseqüentemente tangencialmente à superfície do corpo, conforme representado pela figura 1.12.

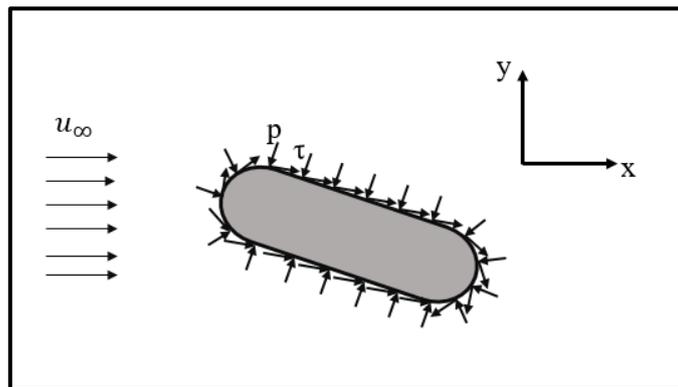


Figura 1.12. Ação da distribuição de pressão e tensão viscosa ao longo da superfície do corpo.

Integrando o efeito das distribuições de p e τ ao longo da superfície do corpo/partícula resultam uma força resultante, \vec{R} , aplicada no centro de pressões do corpo e um momento, \vec{M} , aplicado na extremidade onde incidente em primeiro o escoamento, também denominado como bordo de ataque, de acordo com a figura 1.13.

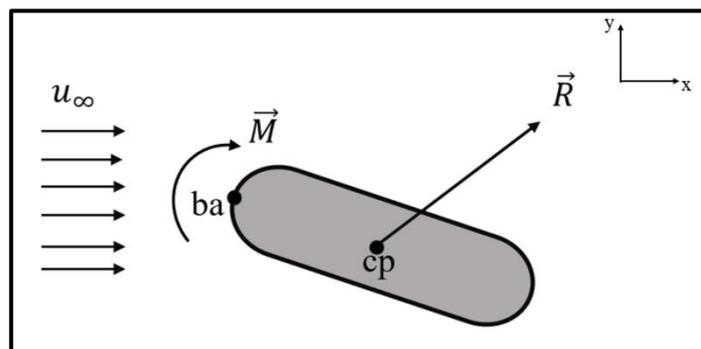


Figura 1.13. Representação da força aerodinâmica e momento resultantes.

A força resultante, \vec{R} , pode ser decomposta através das suas respectivas componentes segundo x e y , de acordo com a figura 1.14., sendo a componente perpendicular ao escoamento, segundo o eixo y , correspondente à força de sustentação (*Lift*), \vec{L} , e a componente paralela ao escoamento, ou seja segundo a direção do eixo x , correspondente à força de arrasto (*Drag*), \vec{D} .

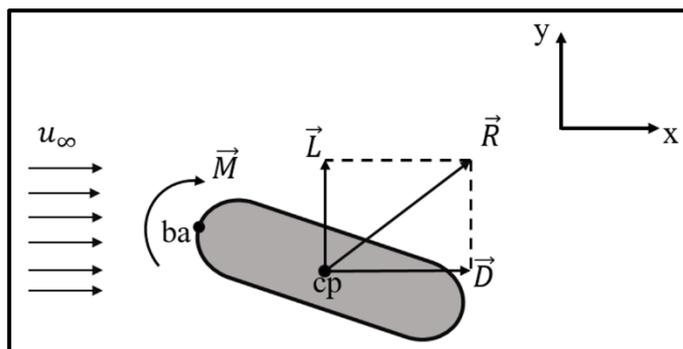


Figura 1.14. Representação das forças de sustentação e de arrasto.

Por outro lado essa mesma força resultante pode ser decomposta segundo os próprios eixos da partícula, tal como se pode observar através da figura 1.15., resultando dessa decomposição uma força normal \vec{N} , perpendicular ao comprimento total da partícula, l , e uma força axial \vec{A} , paralela ao comprimento da partícula.

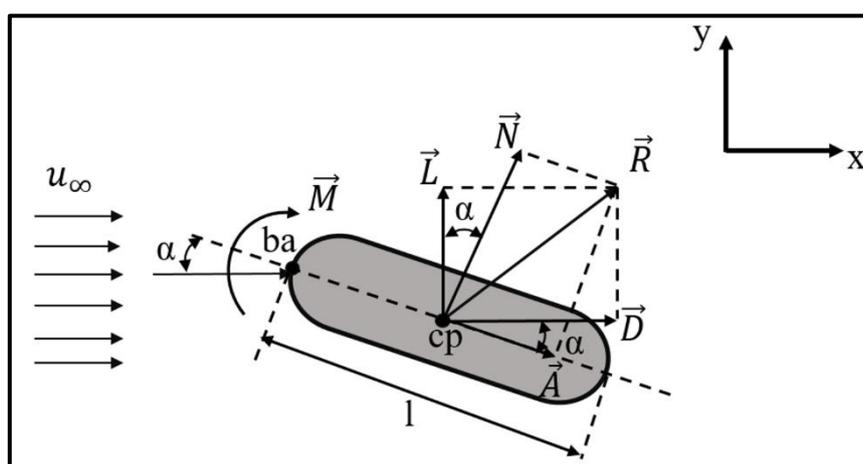


Figura 1.15. Decomposição da força resultante, \vec{R} , segundo os eixos da partícula.

Através da análise da figura 1.15. consegue-se obter uma relação entre as forças \vec{L} , \vec{D} , \vec{N} e \vec{A} , através do ângulo α , definido entre a direção do escoamento e do comprimento total da partícula, através das seguintes expressões:

$$\vec{D} = N \times \sin(\alpha) + A \times \cos(\alpha) \quad (1.1)$$

$$\vec{L} = N \times \cos(\alpha) - A \times \sin(\alpha) \quad (1.2)$$

Uma vez definidas todas as forças aerodinâmicas a que o corpo estará sujeito pode-se definir os coeficientes aerodinâmicos adimensionais, sendo estes parâmetros de maior importância para o estudo em causa.

Correspondente a cada força existe um respetivo coeficiente sendo estes: o coeficiente de sustentação, C_L , o coeficiente de arrasto, C_d , o coeficiente normal, C_N , o coeficiente axial, C_A e o coeficiente do momento, C_M , definidos respetivamente pelas seguintes expressões:

$$C_L = \frac{|\vec{L}|}{\frac{1}{2} \times \rho_{\infty} \times u_{\infty}^2 \times S} \quad (1.3)$$

$$C_d = \frac{|\vec{D}|}{\frac{1}{2} \times \rho_{\infty} \times u_{\infty}^2 \times S} \quad (1.4)$$

$$C_N = \frac{|\vec{N}|}{\frac{1}{2} \times \rho_{\infty} \times u_{\infty}^2 \times S} \quad (1.5)$$

$$C_A = \frac{|\vec{A}|}{\frac{1}{2} \times \rho_{\infty} \times u_{\infty}^2 \times S} \quad (1.6)$$

$$C_M = \frac{|\vec{M}|}{\frac{1}{2} \times \rho_{\infty} \times u_{\infty}^2 \times S} \quad (1.7)$$

em que ρ_{∞} representa a densidade do fluido em que está submersa a partícula, u_{∞} , a velocidade do respetivo fluido e S a área de referência do corpo.

1.2.1. Modelo prático – Análise aerodinâmica sobre as partículas de sujidade

Depois de analisado o modelo geral teórico efetuou-se um modelo mais específico de modo a representar a situação real esquematizada através da figura 1.16.

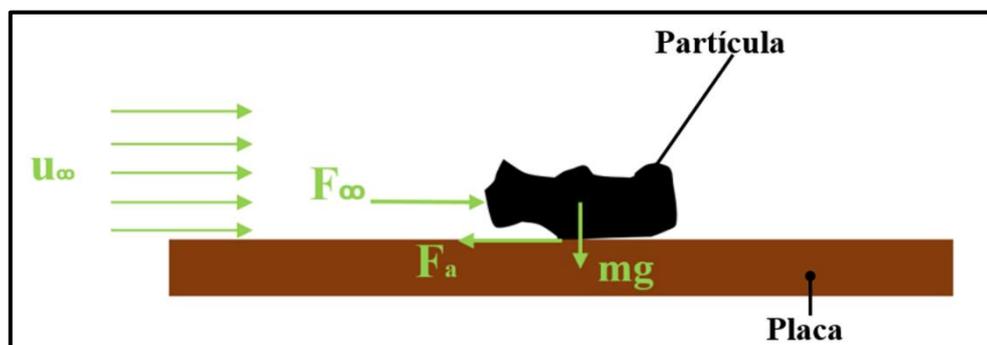


Figura 1.16. Forças impostas nas partículas de sujidades quando sujeitas a um escoamento.

Ao se relacionar o modelo teórico, descrito anteriormente, com o modelo prático, aqui presente, conclui-se que a força imposta à partícula e resultante da presença do escoamento é equivalente à força de arrasto da mesma. Para que haja efetivamente arrasto da partícula a força de arrasto terá que ser superior à força de atrito entre a partícula e a superfície em que a mesma se encontra exposta, tendo então que se cumprir a condição representada por:

$$F_{\infty} \equiv F_D > F_a \quad (1.8)$$

Sabendo que:

$$F_D = 0,5 \times C_d \times \rho_{\infty} \times u_{\infty}^2 \quad (1.9)$$

em que C_d representa o coeficiente de arrasto da partícula, e:

$$F_a = \mu_{e,sup} \times m_p \times g \quad (1.10)$$

em que $\mu_{e,sup}$ representa o coeficiente de atrito estático entre a partícula e a superfície em que a mesma se encontra, m_p a massa da partícula e g a aceleração da gravidade. Facilmente se chega à conclusão que a velocidade do escoamento, para que se consiga o arrasto da partícula, terá que ser obtido de acordo com a seguinte expressão:

$$u_{\infty} > \sqrt{\frac{\mu_{e,sup} \times m_p \times g}{0,5 \times C_d \times \rho_{\infty}}} \quad (1.11)$$

1.3. Objetivos

O trabalho desenvolvido e apresentado neste documento tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema que seja capaz de limpar os balancetes. Para tal foi necessário realizar uma análise, caracterização e estudo aerodinâmico de partículas constituídas por massa lubrificante e material ferroso, para que se possa chegar ao valor de velocidade do escoamento necessário para que seja possível o arrasto das mesmas.

A principal variável em estudo é o coeficiente de arrasto das partículas, visto que sem este parâmetro seria impossível determinar o valor necessário para a velocidade do escoamento, sendo que para determinar este foi necessário a realização de diversos ensaios.

Depois de feita a análise aerodinâmica das partículas foi realizada a seleção do equipamento mais adequado assim como o dimensionamento do sistema completo.

1.4. Estado de arte

O conhecimento de como uma partícula irregular se estabiliza num fluido é fundamental em diversos campos de pesquisa e aplicações tais como: sedimentação, misturas químicas, despoejamento, processamento mineral, entre outros.

Na maioria destas aplicações o conhecimento da velocidade terminal ou de equilíbrio é de interesse nomeadamente para a projeção e otimização de equipamentos. Por outro lado sabe-se que a velocidade terminal, w_t , de uma partícula se encontra diretamente relacionada com o seu coeficiente de arrasto, como tal existe uma relação entre ambas definida pela chamada Lei do Impacto de Newton, que relaciona a força de arrasto com as forças que atuam sobre a partícula, dada por:

$$w_t = \frac{\sqrt{4gd_p(\rho_p - \rho_f)}}{3C_d\rho_f} \quad (1.12)$$

em que d_p representa a dimensão da partícula, ρ_p a densidade da partícula, ρ_f a densidade do fluido e C_d o coeficiente de arrasto da partícula.

Existem vários tipos de partículas sendo que nem todas são de igual nível de dificuldade em termos de análise. Como tal designaram-se dois grandes grupos para distinção do tipo de partículas tal como descrito na tabela 1.2.

Tabela 1.2. Caracterização de partículas segundo dois grupos.

Partícula	Esférica	Não esférica
Regular	Polígonos e esferoides com baixa razão entre eixos	Cubos, cilindros, discos, tetraedros, esferoides com elevada razão entre eixos
Irregular	Areias, várias poeiras e sujidades, carvão pulverizado	Biomassa pulverizada, flocos, lascas, aglomerados.

Para o caso de partículas irregulares o conhecimento do coeficiente de arrasto pode ser de alguma dificuldade uma vez que a dimensão da partícula não é de todo regular, passando assim a depender não só do número de Reynolds mas também do fator de forma da partícula em questão.

Existem inúmeros fatores para a caracterização de partículas quer por forma ou tamanho. Um dos parâmetros considerado mais relevante foi definido por Wadell sendo este denominado como diâmetro equivalente do volume ou diâmetro nominal e dado por:

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (1.13)$$

em que V é o volume da partícula.

Associado a este parâmetro foi definido o diâmetro equivalente de superfície dado por:

$$d_A = \sqrt{\frac{4A_p}{\pi}} \quad (1.14)$$

em que A_p é a área de superfície da partícula.

A razão entre estes dois parâmetros é considerada de extrema importância em vários estudos.

Outro parâmetro adimensional também introduzido por Wadell na caracterização de partículas é a designada esfericidade, definida por:

$$\phi = \frac{A_{sph}}{A_p} \quad (1.15)$$

em que A_{sph} , é a área de superfície da esfera equivalente.

No entanto este parâmetro apresenta algumas dificuldades para partículas que sejam muito irregulares, nomeadamente na medição da área de superfície atual da partícula. Para estes casos foi proposto um parâmetro de circularidade c , dado por:

$$c = \frac{\pi d_A}{P_p} \quad (1.16)$$

em que P_p representa o perímetro do círculo equivalente à área com máxima projeção.

Os fatores mencionados anteriormente caracterizam a partícula com base em projeções de áreas e volumes, no entanto, existem fatores que recorrem aos eixos das partículas tal como o fator de forma de Corey. Este fator recorre aos eixos da partícula denominando-os por mínimo d_s , médio d_m , e máximo d_l , sendo definido pela razão entre o eixo mínimo da partícula e a raiz quadrada do produto entre os eixos máximo e médio.

No entanto para partículas altamente irregulares Dellino et al. Introduziu um novo fator ψ , com base na razão entre a esfericidade Φ e a circularidade X , definida pela razão entre P_{mp} , projeção máxima do perímetro e P_p , perímetro do círculo equivalente que contém os eixos d_l e d_m (definidos segundo o fator de forma de Corey).

2. ENSAIOS LABORATORIAIS

2.1. Metodologia

Para obtenção do parâmetro necessário, ou seja, da velocidade de escoamento de modo a se conseguir o arrasto das partículas foi necessário recorrer a uma certa metodologia esquematizada através da figura 2.1.

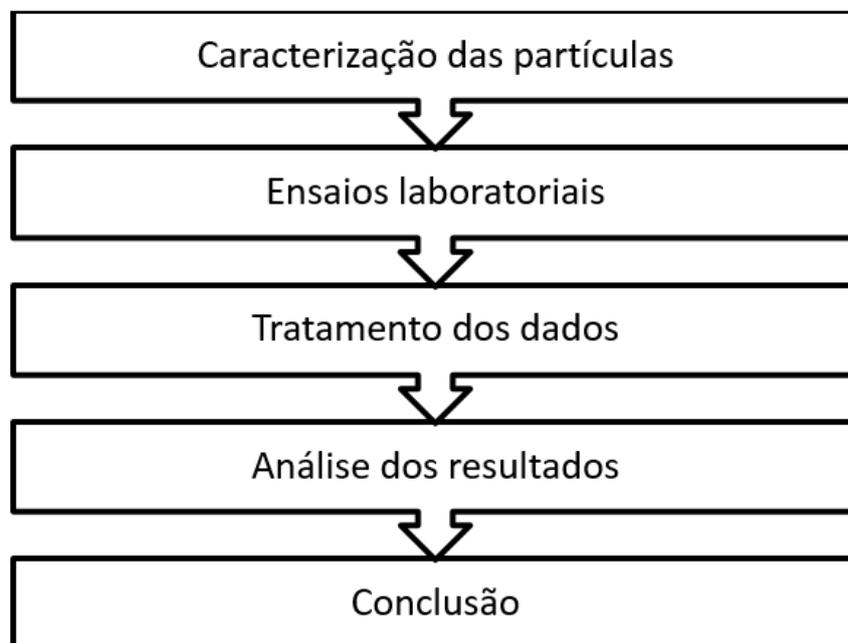


Figura 2.1. Metodologia empregada.

A caracterização das partículas será realizada com base no fator de forma de Corey e pelo parâmetro definido por Dellino et al. Por sua vez os ensaios laboratoriais tiveram como principal objetivo a obtenção da velocidade terminal necessária para determinar a gama do número de Reynolds em que se situava a amostra de partículas recolhidas, através da seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho_f \times w_t \times d_p}{\mu_f} \quad (2.1)$$

em que μ , representa a viscosidade cinemática do fluido.

Depois de calculado o número de Reynolds pode finalmente obter-se o coeficiente de arrasto das diferentes partículas de acordo com as três correlações selecionadas e representadas pelas seguintes expressões:

Lei proposta por Fabio Dioguardi e Daniela Mele:

$$C_d = \frac{C_{d,sphere}}{Re^2 \psi^{exp}} \left(\frac{Re}{1,1883} \right)^{\frac{1}{0,4826}} \quad (2.2)$$

em que $C_{d,sphere}$, e exp são dados respetivamente por:

$$C_{d,sphere} = \frac{24}{Re} (1 + 0,15Re^{0,687}) + \frac{0,42}{1 + 42500Re^{-1,16}} \quad (2.3)$$

e

$$exp = f(Re) = Re^a = \begin{cases} Re^{-0,23}, & \text{para } Re \in 0 - 50 \\ Re^{0,05}, & \text{para } Re \in 50 - 10000 \end{cases} \quad (2.4)$$

Lei proposta por Swamme e Ojha:

$$C_d = \left[\frac{48,5}{(1 + 4,5\beta^{0,35})^{0,8} \times Re^{0,64}} + \left\{ \left(\frac{Re}{Re + 100 + 100\beta} \right)^{0,32} \frac{1}{\beta^{18} + 1,05\beta^{0,8}} \right\} \right] \quad (2.5)$$

em que β representa o fator de forma de Corey dado por:

$$\beta = \frac{d_s}{\sqrt{d_l d_m}} \quad (2.6)$$

Lei de Chien:

$$C_d = \frac{30}{Re} + 67,289e^{-5,03\Phi} \quad (2.7)$$

Depois de obtidos os diferentes coeficientes de arrasto de cada partícula facilmente se obtém a velocidade de escoamento necessária através do tratamento de dados levando finalmente à conclusão para a seleção dos equipamentos e dimensionamento do sistema completo.

2.2. Análise das superfícies a limpar

Para se garantirem resultados o mais próximo possível da situação real os ensaios foram realizados sobre modelos das superfícies reais, placa MDF (*édium density fiberboard*) e chapa zincada, representadas pela figura 2.2.



Figura 2.2. Amostra 10×10 cm² da superfície das placas MDF (esquerda) e da superfície dos chapéus dos balancetes (direita).

De modo a verificar a concordância entre os resultados obtidos examinou-se a rugosidade de cada uma das superfícies dando assim a possibilidade de prever em qual é que as partículas teriam maior dificuldade em deslizar.

Apesar de através da observação da figura 2.3. conseguiu-se detetar que, aparentemente, a superfície da placa MDF apresenta maior rugosidade do que a superfície da chapa sendo que através dos valores obtidos e representados nas figuras 2.4. e 2.5. consegue-se concluir claramente que a placa MDF possui uma superfície mais rugosa a superfície da chapa zincada que apresenta uma superfície mais uniforme ou seja com menos picos de rugosidade sendo assim mais lisa o que confere uma força de atrito menor entre a chapa e as partículas a arrastar.

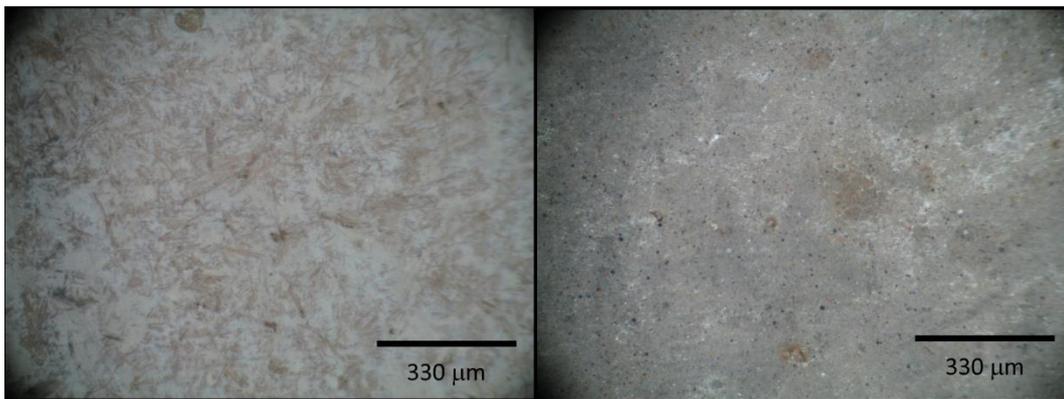


Figura 2.3. Rugosidade da Superfície da Placa MDF (esquerda) e da Chapa Zincada (direita).

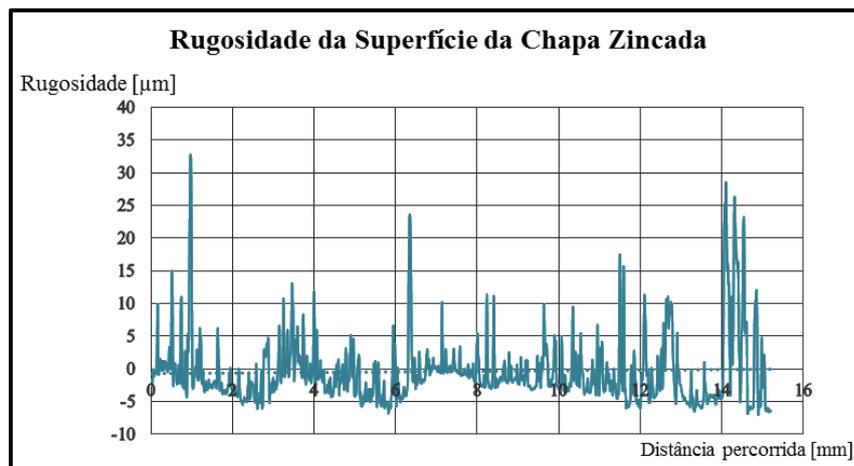


Figura 2.4. Perfil da Rugosidade da Superfície da Chapa Zincada.

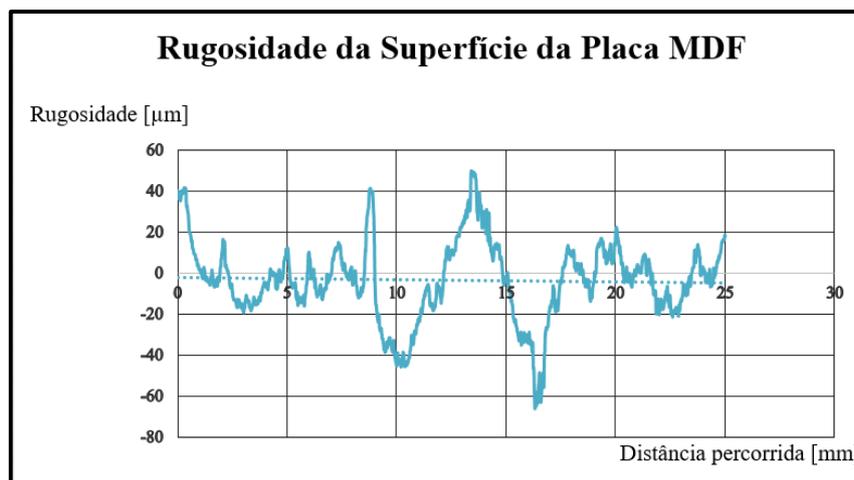


Figura 2.5. Perfil da Rugosidade da Superfície da Placa MDF.

2.3. Caracterização das partículas

Antes da realização dos ensaios propriamente ditos foi necessário realizar a caracterização das partículas. Esta caracterização consistiu na obtenção de alguns parâmetros físicos tais como o coeficiente de atrito estático e a densidade das mesmas, mas também da sua análise geométrica realizada com base no fator de forma de Corey, descrito anteriormente. A amostra recolhida era composta por 24 partículas, sendo que as partículas 8,10 e 12, se revelaram impróprias para o estudo, catalogadas no Apêndice B com diferentes formas e massas, de acordo com a tabela 2.1.

Tabela 2.1. Descrição da forma massa e peso das partículas representantes da amostra recolhida.

Partícula	Forma	Massa [g]	Peso [N]
1	Irregular	0,4985	0,00489
2	Plana	0,7140	0,007
3	Alongada	0,7277	0,00714
4	Redonda	0,4399	0,00432
5	Plana	1,4944	0,01466
6	Alongada	0,4671	0,00458
7	Irregular	0,6137	0,00602
9	Plana	0,6124	0,00601
11	Alongada	0,5135	0,00504
13	Plana	1,2394	0,01216
14	Irregular	0,8953	0,00878
15	Irregular	1,4206	0,01394
16	Plana	1,8743	0,01839
17	Plana	2,2013	0,02159
18	Irregular	2,6559	0,02605
19	Irregular	1,095	0,01074
20	Alongada	1,0898	0,01069
21	Plana	1,2369	0,01213
22	Plana	4,4809	0,04396
23	Plana	3,9918	0,03916
24	Irregular	2,7661	0,02714

2.3.1. Coeficiente de atrito estático

Para a medição deste parâmetro recorreu-se ao método do plano inclinado, com o auxílio do aparelho ilustrado na figura 2.6., com a realização dos ensaios para cada uma das superfícies a estudar.

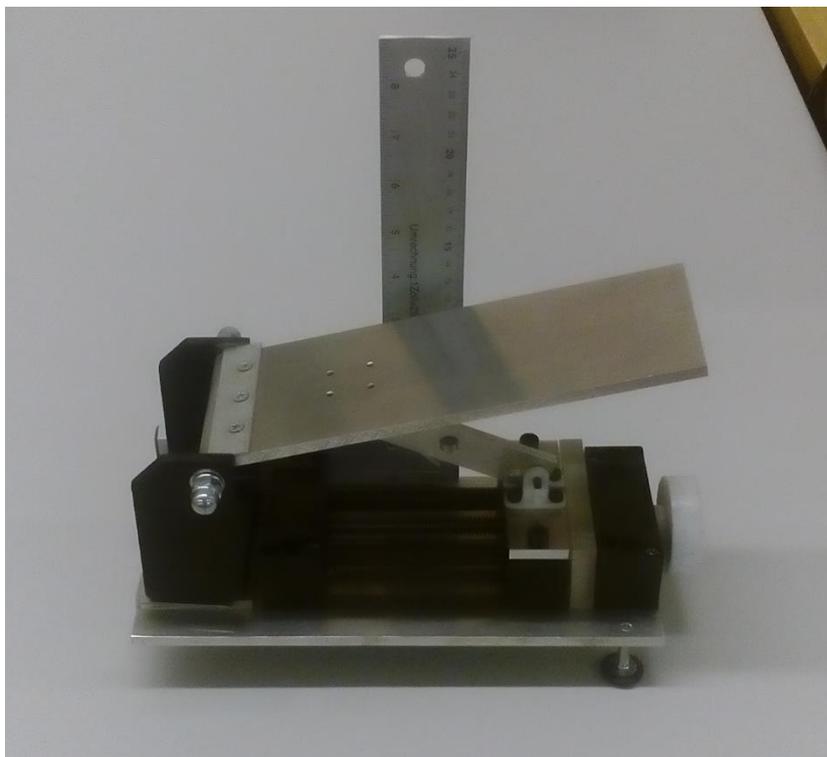


Figura 2.6. Equipamento utilizado para obtenção do coeficiente de atrito estático das partículas.

O processo consistiu na colocação das amostras na extremidade superior de cada superfície e aumentando progressivamente a inclinação do plano verificar a que altura medida pela régua é que a amostra deixava o estado de equilíbrio estático. Os valores obtidos nos ensaios encontram-se representados na tabela 2.2.

Tabela 2.2. Alturas máximas atingidas até a partícula entrar em desequilíbrio estático.

Amostra	Superfície					
	Chapa zincada			Placa MDF		
	Altura máxima [cm]			Altura máxima [cm]		
	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio
1	18,9	18,2	21,2	21,5	21,8	22,3
2	19,4	25	24,8	25	18,8	24
3	19,5	21,4	19,9	22,3	17,8	18,7

4	14,3	14,9	16,9	14,9	17,7	16
5	18,9	25	21,4	23,2	21,4	25
6	21	22,2	18,9	21,4	22,5	23
7	17,6	13,9	15,6	17,1	17,1	16
9	22	25	23,8	21,4	23,5	25
11	20,7	22,9	19,8	20,4	23,1	16,8
13	25	25	25	25	25	25
14	23,3	23,3	20	20,4	19,5	18
15	25	25	25	25	25	25
16	25	25	25	22,2	25	23,5
17	19	15,9	13,2	22,4	13,6	15
18	21,8	22,1	15,5	19,9	19,2	18
19	20,7	25	20,9	17,3	23	22,5
20	17,2	17,8	20,6	18,1	20,9	20,7
21	24,5	20,6	18,4	19,2	18,7	25
22	25	20,8	18,8	20,5	25	21,2
23	18,9	20,3	20	21	25	25
24	25	23,6	18,4	23,3	25	23,7

Para se obterem os valores do coeficiente de atrito estático substituíram-se os valores obtidos para a altura máxima atingida na seguinte expressão (2.1), estando os resultados obtidos na tabela 2.3.

$$\mu_e = \frac{h[cm] - 9,3[cm]}{11,85} \tag{2.8}$$

Tabela 2.3. Valores obtidos para o coeficiente de atrito estático de cada partícula nas diferentes superfícies.

Amostra	Valores obtidos do Coeficiente de Atrito Estático μ_e						Valores Médios	
	Chapa			Placa			Chapa	Placa
	$\mu_{e, Chapa}$			$\mu_{e, Placa}$			$\bar{\mu}_e$	
1	0,8101	0,7511	1,0042	1,0295	1,0549	1,0970	0,8551	1,0605
2	0,8523	1,3249	1,3080	1,3249	0,8017	1,2405	1,1617	1,1224
3	0,8608	1,0211	0,8945	1,0970	0,7173	0,7932	0,9255	0,8692
4	0,4219	0,4726	0,6414	0,4726	0,7089	0,5654	0,5120	0,5823
5	0,8101	1,3249	1,0211	1,1730	1,0211	1,3249	1,0520	1,1730
6	0,9873	1,0886	0,8101	1,0211	1,1139	1,1561	0,9620	1,0970

7	0,7004	0,3882	0,5316	0,6582	0,6582	0,5654	0,5401	0,6273
9	1,0717	1,3249	1,2236	1,0211	1,1983	1,3249	1,2068	1,1814
11	0,9620	1,1477	0,8861	0,9367	1,1646	0,6329	0,9986	0,9114
13	1,3249	1,3249	1,3249	1,3249	1,3249	1,3249	1,3249	1,3249
14	1,1814	1,1814	0,9030	0,9367	0,8608	0,7342	1,0886	0,8439
15	1,3249	1,3249	1,3249	1,3249	1,3249	1,3249	1,3249	1,3249
16	1,3249	1,3249	1,3249	1,0886	1,3249	1,1983	1,3249	1,2039
17	0,8186	0,5570	0,3291	1,1055	0,3629	0,4810	0,5682	0,6498
18	1,0549	1,0802	0,5232	0,8945	0,8354	0,7342	0,8861	0,8214
19	0,9620	1,3249	0,9789	0,6751	1,1561	1,1139	1,0886	0,9817
20	0,6667	0,7173	0,9536	0,7426	0,9789	0,9620	0,7792	0,8945
21	1,2827	0,9536	0,7679	0,8354	0,7932	1,3249	1,0014	0,9845
22	1,3249	0,9705	0,8017	0,9451	1,3249	1,0042	1,0323	1,0914
23	0,8101	0,9283	0,9030	0,9873	1,3249	1,3249	0,8805	1,2124
24	1,3249	1,2068	0,7679	1,1814	1,3249	1,2152	1,0999	1,2405

Depois de obtidos os valores para os coeficientes de atrito estáticos tanto para o caso da chapa como da placa calculou-se finalmente a força de atrito imposta a cada partícula nas diferentes superfícies através da seguinte equação:

$$F_a = \mu_{e,sup} \times m_p \times g \quad (2.9)$$

Os resultados encontram-se expostos na tabela 2.4.

Tabela 2.4. Força de atrito associada a cada partícula de acordo com o tipo de superfície.

	Força de Atrito	
	Chapa	Placa
Amostra	Fa [N]	
1	0,00418	0,00519
2	0,00814	0,00786
3	0,00661	0,0062
4	0,00221	0,00251
5	0,01542	0,0172
6	0,00441	0,00503
7	0,00325	0,00378
9	0,00725	0,0071

11	0,00503	0,00459
13	0,01611	0,01611
14	0,00956	0,00741
15	0,01846	0,01846
16	0,02436	0,02214
17	0,01227	0,01403
18	0,02309	0,0214
19	0,01169	0,01055
20	0,00833	0,00956
21	0,01215	0,01195
22	0,04538	0,04798
23	0,03448	0,04748
24	0,02985	0,03366

2.3.2. Cálculo da densidade das partículas

Para obtenção da densidade das amostras recorreu-se ao Princípio de Arquimedes. Primeiro registou-se a massa seca, medindo-se de seguida o correspondente peso, P , de cada amostra selecionada mergulhando-se de seguida a respetiva amostra num recipiente com água à temperatura de 21 °C registando-se posteriormente a sua massa enquanto mergulhada no líquido, tendo-se obtido os valores apresentados na tabela 2.5.

É de notar que a massa da amostra mergulhada no recipiente é inferior à massa seca devido às forças de impulsão que o líquido exerce sobre a amostra, levando assim a valores de peso aparente, P_a . Essa força de impulsão pode ser obtida através da subtração do peso em seco com o peso aparente, ou seja:

$$I = P - P_a \quad (2.10)$$

Sabendo que a força de impulsão pode ser definida como o peso de fluido deslocado, sendo dado por:

$$I = \rho_l \times V_p \times g \quad (2.11)$$

Obtém-se que:

$$\rho_l \times V_p \times g = P - P_a \quad (2.12)$$

Por último sabendo que:

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p} \quad (2.13)$$

Obtém-se a fórmula final para medição da densidade das amostras, cujos valores obtidos se encontram presentes na tabela 2.5.

$$\rho_p = \rho_l \times \frac{m_p}{m_p - m_a} \quad (2.14)$$

Tabela 2.5. Densidade das partículas.

Amostra	Massa seca, mp [g]	Massa Aparente, ma [g]	Densidade [g/cm³]	Volume [cm³]
1	0,4985	0,1915	1,6238	0,307
2	0,7140	0,2280	1,4691	0,486
3	0,7277	0,4144	2,3227	0,3133
4	0,4399	0,1709	1,6353	0,269
5	1,4944	0,9002	2,5150	0,5942
6	0,4671	0,1713	1,5791	0,2958
7	0,6137	0,2370	1,6291	0,3767
9	0,6124	0,2283	1,5944	0,3841
11	0,5135	0,2059	1,6694	0,3076
13	1,2394	0,4034	1,4825	0,836
14	0,8953	0,2075	1,3017	0,6878
15	1,4206	0,3891	1,3772	1,0315
16	1,8743	0,4676	1,3324	1,4067
17	2,2013	0,9312	1,7332	1,2701
18	2,6559	1,4968	2,2913	1,1591
19	1,095	0,4576	1,7179	0,6374
20	1,0898	0,7275	3,0080	0,3623
21	1,2369	0,4238	1,5212	0,8131
22	4,4809	2,425	2,1795	2,0559
23	3,9918	2,1662	2,1866	1,8256
24	2,7661	0,9634	1,5344	1,8027

2.4. Caracterização geométrica

A caracterização geométrica das partículas foi realizada com base no fator de forma de Corey e parâmetro de Dellino et al. como tal foi necessário proceder à medição dos eixos mínimos, máximos e médios de cada partícula, cujos valores se encontram expostos na tabela 2.6.

Tabela 2.6. Dimensões dos eixos das partículas.

Partícula	d _l [cm]	d _m [cm]	d _s [cm]
1	1,3	1	0,5
2	1,2	1	0,4
3	1,8	0,8	0,6
4	1	0,9	0,9
5	1,5	1,4	0,5
6	1,7	1,1	0,6
7	1,8	0,7	0,6
13	1,9	1,1	0,5
14	2,1	0,9	0,6
15	1,5	1,3	0,9
16	1,8	1,4	0,8
17	2,2	1,1	0,7
18	2,4	1,1	0,8
19	1,8	1,1	0,8
20	2,3	0,9	0,4
21	3	1,5	0,5
22	2,2	1,8	0,8
23	2,2	1,4	0,8
24	2	1,7	1

Depois de definidos os eixos das partículas calcularam-se os parâmetros correspondentes ao tamanho da partícula d_p , área se superfície equivalente A_{sph} e área atual da partícula A_p , obtida por intermédio da expressão da área para um elipsoide escaleno:

$$A_p = 4\pi \left(\frac{(dl/2)^2 \times (dm/2)^2 + (dl/2)^2 \times (ds/2)^2 + (dm/2)^2 \times (ds/2)^2}{3} \right)^{\frac{1}{1,6075}} \quad (2.16)$$

Os resultados obtidos encontra-se na tabela 2.7.

Os valores de P_{mp} foram obtidos através do envolvimento da partícula por um cordão em torno da superfície maior e medição do mesmo sendo que P_p foi calculado através da equação de uma circunferência assumindo como valor do raio a dimensão do eixo máximo, d_l , da partícula.

Tabela 2.7. Valores correspondentes aos vários parâmetros de caracterização das partículas.

Partícula	d_p [cm]	A_{sph} [cm ²]	A_p [cm ²]	P_{mp} [cm]	P_p [cm]
1	0,836976	2,200778703	1,930213052	4,6	4,08407
2	0,975467	2,989337641	1,646881257	4,3	3,769911
3	0,842663	2,230785028	2,451873579	4,9	5,654867
4	0,800912	2,01520382	1,885991068	3,6	3,141593
5	1,043065	3,418003917	3,251292412	4,8	4,712389
6	0,826672	2,146921858	3,066806488	Partícula danificada	
7	0,89605	2,52240337	2,207010351	5	5,654867
13	1,168788	4,291623777	3,292088575	5,8	5,969026
14	1,095186	3,768127351	3,247143827	6	6,597345
15	1,253594	4,937005519	3,791604591	5,6	4,712389
16	1,390169	6,071347853	4,640761284	6,3	5,654867
17	1,34363	5,67164973	4,38051377	6,4	6,911504
18	1,303289	5,336191356	5,146828385	7	7,539822
19	1,067754	3,581724387	3,715084269	5,1	5,654867
20	0,884484	2,45770459	3,176117247	6,6	7,225663
21	1,158017	4,212889795	7,964872915	Partícula danificada	
22	1,577615	7,819016246	7,48113772	6,2	6,911504
23	1,51636	7,223614191	5,796794019	7,2	6,911504
24	1,509993	7,163079375	6,932544787	7,1	6,283185

Por fim procedeu-se ao cálculo dos parâmetros necessários tais como a esfericidade, Φ , e a circularidade X , de modo a se chegar ao fator de forma pretendido, ψ , estando os valores apresentados na tabela 2.8.

Tabela 2.8. Valores referentes à esfericidade, circularidade e fator de forma associado a cada partícula.

Partícula	Φ - Esfericidade	X - Circularidade	ψ - Fator de forma
1	1,140173983	1,12632729	1,012293668
2	1,815150685	1,140610425	1,591385318
3	0,909828731	0,866510246	1,049991891

4	1,068511858	1,14591559	0,932452501
5	1,051275457	1,018591636	0,687273753
6	0,700051297	Partícula danificada	
7	1,142905093	0,884194128	1,292595208
13	1,303617348	0,97168281	1,341607913
14	1,160443624	0,909456818	1,275974408
15	1,302088707	1,188356908	1,095705085
16	1,308265494	1,114084602	1,174296361
17	1,294745326	0,925992396	1,398224577
18	1,036792167	0,928403835	1,116746968
19	0,964103134	0,901878011	1,068995055
20	0,773807891	0,913410978	0,847162898
21	0,528933712	Partícula danificada	
22	1,045164056	0,897055134	1,165105708
23	1,246139533	1,041741446	1,196208078
24	1,033253963	1,130000096	0,91438396

2.5. Determinação da velocidade de equilíbrio

A velocidade de equilíbrio foi determinada através de vários ensaios laboratoriais que consistiram em largar cada partícula num tubo de vidro com 3 cm de diâmetro e 1,5 metros de altura, cheio de água à temperatura de 21 °C, como se pode observar pela figura 2.7. Com auxílio de uma máquina com uma resolução de 25 fps por segundo filmaram-se os diversos ensaios realizados (três por partícula) e, posteriormente através da análise *frame por frame* atendendo à escala colocada, conseguiu-se chegar ao valor de estabilização para cada partícula, de acordo com os valores apresentados na tabela 2.9.

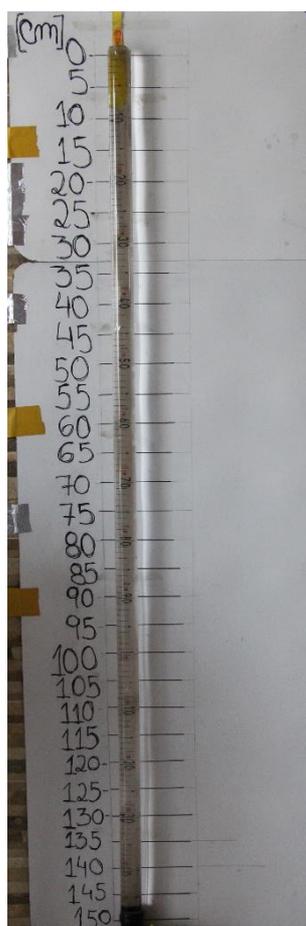


Figura 2.7. Tubo e escala utilizados para a realização dos ensaios.

Tabela 2.9. Velocidades terminais determinadas experimentalmente.

Velocidades Terminais [cm/s]				
Partícula	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
1	17,2459609	17,26741623	15,30001368	16,6044636
2	19,4143282	19,99926514	18,44686949	19,28682095
3	19,2123724	18,89329806	19,81074481	19,30547177
4	20,199515	16,90182246	16,70847868	17,93660538
5	26,6369048	24,45987654	27,31481481	26,13719871
6	15,5523668	14,97481428	16,39548836	15,64088981
7	17,4213435	17,34273956	17,48971193	17,41793168
13	25,8928571	19,34340094	15,15215935	20,12947248
14	14,5089286	11,46723647	25,41454082	17,13023528
15	17,6148584	25,07716049	20,29688419	20,99630104
16	26,4136905	24,54805996	20,08586481	23,68253842
17	20,966199	19,53997648	24,81261023	21,77292856
18	18,5588345	21,98310948	13,77019558	18,10404653

19	14,7374837	16,08796296	17,11676955	15,98073875
20	19,6499433	20,37237454	19,75284679	19,92505488
21	14,0359269	15,19694297	24,24492945	17,8259331
22	25,4464286	24,72993827	26,97704082	25,71780255
23	13,7445887	17,36486893	15,28290914	15,46412227
24	18,9554989	18,05159942	20,51622732	19,17444187

2.6. Determinação do coeficiente de arrasto

Depois de caracterizadas as partícula e de conhecido o fator de forma associado a cada uma, assim como a sua velocidade de estabilização, determinaram-se os coeficientes de arrasto segundo as várias correlações anteriormente mencionadas tendo-se encontrado os valores descritos na tabela 2.10.

Tabela 2.10. Coeficiente de arrasto de cada partícula.

Partícula	C_d – Lei de Fabio Dioguardi e Daniela Mele	C_d – Lei de Swamme and Ojha	C_d – Lei de Chien
1	0,498837	1,929717	0,231706
2	0,248995	2,209367	0,022881
3	0,463508	1,739625	0,692335
4	0,558777	0,808474	0,32282
5	0,84069	2,296299	0,340434
6	Partícula Danificada		
7	0,345055	1,654565	0,226453
13	0,313368	2,296636	0,104653
14	0,343689	1,92555	0,205621
15	0,420794	1,415441	0,104011
16	0,379765	1,705511	0,098871
17	0,29235	1,866056	0,10637
18	0,410621	1,747009	0,367196
19	0,449147	1,574966	0,52965
20	0,627538	2,730461	1,358208
21	Partícula Danificada		
22	0,388357	2,027502	0,347163
23	0,371167	1,854433	0,135708
24	0,550439	1,614872	0,371241

2.7. Cálculo da velocidade de escoamento

A velocidade de escoamento, cujos valores se encontram na tabela 2.11., foi calculada com base na equação (1.11) resultante do equilíbrio entre as forças a que as partículas ficarão sujeitas na presença de um escoamento.

Tabela 2.11. Velocidade de escoamento necessário para que se dê o arrasto das partículas nas diferentes superfícies.

Partícula	Lei de Fabio Dioguardi e Daniela Mele		Lei de Swamme and Ojha		Lei de Chien	
	$u_{\infty, \text{Chapa}}$	$u_{\infty, \text{Placa}}$	$u_{\infty, \text{Chapa}}$	$u_{\infty, \text{Placa}}$	$u_{\infty, \text{Chapa}}$	$u_{\infty, \text{Placa}}$
	[m/s]					
1	8,1988	9,1303	4,1685	4,6421	12,0299	13,3967
2	17,5252	17,2256	5,8833	5,7828	57,8120	56,8237
3	9,4855	9,1927	4,8962	4,7451	7,7613	7,5216
4	5,6962	6,0749	4,7356	5,0504	7,4942	7,9924
5	9,3452	9,8678	5,6545	5,9707	14,6855	15,5068
7	8,1292	8,7609	3,7124	4,0008	10,0347	10,8144
13	15,5460	15,5460	5,7425	5,7425	26,9010	26,9010
14	11,5152	10,1386	4,8649	4,2833	14,8875	13,1077
15	13,3833	13,3833	7,2972	7,2972	26,9191	26,9191
16	14,6266	13,9429	6,9020	6,5794	28,6659	27,3260
17	12,1777	13,0226	4,8201	5,1545	20,1887	21,5893
18	13,0028	12,5191	6,3039	6,0694	13,7501	13,2386
19	10,4148	9,8902	5,5617	5,2816	9,5907	9,1076
20	8,0428	8,6175	3,8558	4,1313	5,4670	5,8576
22	15,5482	15,9869	6,8048	6,9968	16,4449	16,9088
23	15,7486	18,4803	7,0457	8,2678	26,0450	30,5626
24	11,0024	11,6847	6,4235	6,8219	13,3972	14,2280
\bar{u}_{∞}	11,7287	11,9685	5,5690	5,6951	18,3573	18,6942

Analisando os valores obtidos conclui-se que todas as leis obtêm valores médios de velocidade mais elevados para o caso do arrasto das partículas nas placas de MDF o que já seria de esperar considerando que os valores correspondentes à força de atrito entre partícula e placa são mais elevados nesta devido à rugosidade da mesma ser mais acentuada do que na chapa zincada.

Como tal conclui-se que à partida a limpeza das placas será mais difícil que a limpeza das chapas.

3. DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo e analisam-se e comparam-se os coeficientes de arrasto, determinados através de vários leis que usam diferentes parâmetros de forma para caracterização das partículas, de modo a tentar obter uma relação entre os valores obtidos no capítulo anterior. Pretende-se prever qual a forma da partícula, entre as várias presentes na amostragem, que será mais difícil de remover por sopro.

Para efeitos de simplificação do texto a lei proposta por Fabio Dioguardi e Daniela Mele será referido neste capítulo como lei do artigo, atendendo a que é a lei resultante do estudo feito pelo artigo que serviu como principal referência [2] para a realização do estudo das partículas presente nesta tese.

3.1. Comparação dos valores obtidos com as três leis

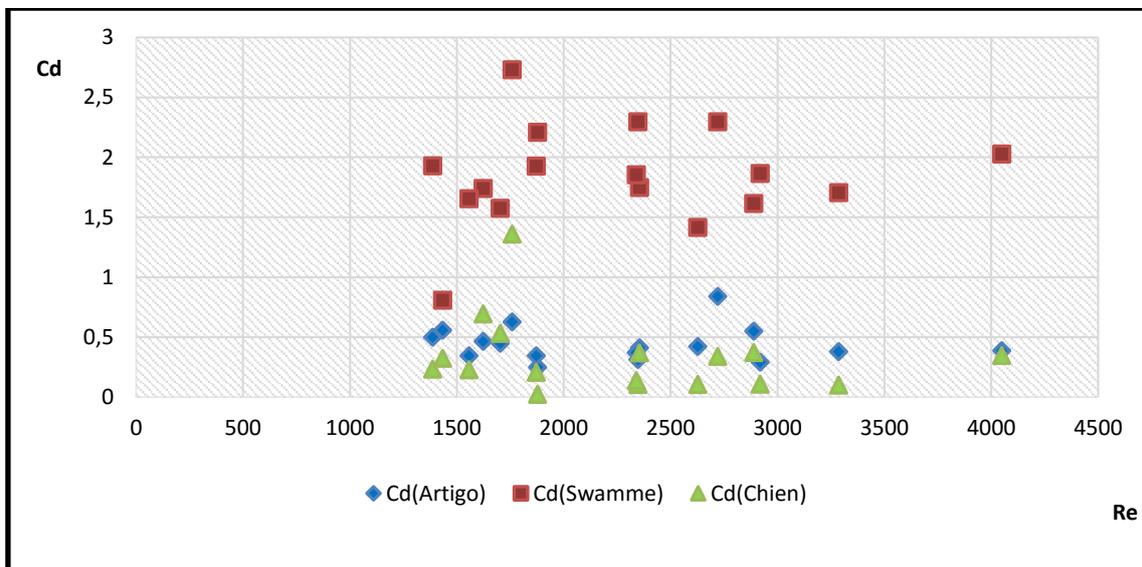


Figura 3.1. Comparação de modelos de determinação do coeficiente de arrasto.

A partir da análise da figura 3.1. pode observar-se que relativamente à lei proposta pelo artigo, usado como referência, os valores obtidos com a lei de Chien são ligeiramente inferiores, enquanto que a lei de Swamme apresenta valores bastante mais elevados o que levou à obtenção de valores mais baixos das velocidades necessárias para o

arrasto das partículas. A principal diferença entre as leis de Chien e do artigo em relação à lei de Swamme consiste no fator usado para a caracterização da partícula. Enquanto que a lei de Swamme apenas considera o fator de Corey, que por sua vez é definido apenas pelos comprimentos máximo mínimo e médio das partículas, tanto a lei do artigo como a lei de Chien usam como parâmetros de caracterização das partículas as áreas e perímetros o que confere outro grau de importância à influência da forma da partícula no próprio coeficiente de arrasto, levando assim a valores mais baixos de C_d , e conseqüentemente a uma maior dificuldade para o arrasto das mesmas.

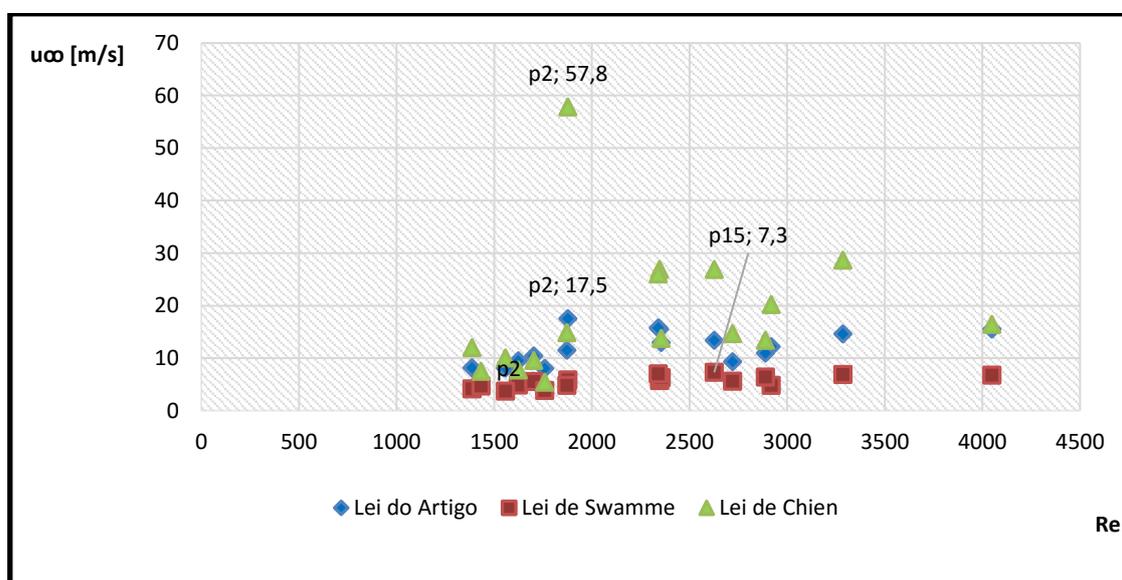


Figura 3.2. Comparação da velocidade mínima necessária para o arrasto das partículas na chapa zincada.

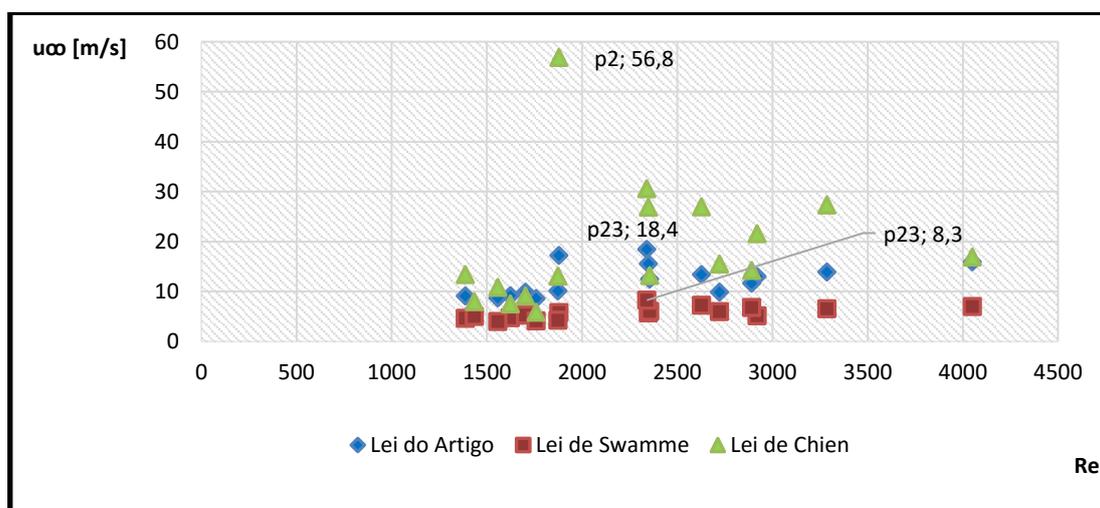


Figura 3.3. Comparação da velocidade mínima necessária para o arrasto das partículas na placa MDF.

Como seria de esperar a lei de Swamme prevê velocidades de escoamento mais baixas que é consequência dos valores mais elevados do coeficiente de arrasto. O valor máximo de velocidade foi obtido a partir da lei de Chien, correspondente ao valor de 56,8 m/s para o arrasto da partícula 2 que foi a que teve o valor mais baixo de coeficiente de arrasto. Apesar de graficamente não ser facilmente perceptível em quais dos casos será necessário um valor mais elevado para a velocidade de arrasto, através dos valores tabelados no capítulo anterior é claro que, salvo certas exceções, nas placas MDF o arrasto será mais difícil do que na chapa zincada.

É de notar que o máximo valor do coeficiente de arrasto não foi obtido em cada modelo sempre para a mesma partícula, exceto na lei de Chien que prevê a partícula dois como a mais crítica assim como a lei proposta no artigo para o caso do arrasto na chapa zincada.

3.2. Avaliação dos parâmetros presentes na Lei do artigo

De acordo com a expressão que representa a lei proposta pelo artigo o coeficiente de arrasto de uma partícula irregular depende do coeficiente de arrasto da esfera equivalente, do número de Reynolds e do fator de forma da própria partícula. Como tal irá analisar-se a influência de cada parâmetro em relação ao coeficiente de arrasto.

Uma vez que o intervalo correspondente aos números de Reynolds não se altera de lei para lei e que a influência do mesmo no coeficiente de arrasto já se encontra esquematizado na figura 3.1. apenas serão analisados os restantes parâmetros das várias leis.

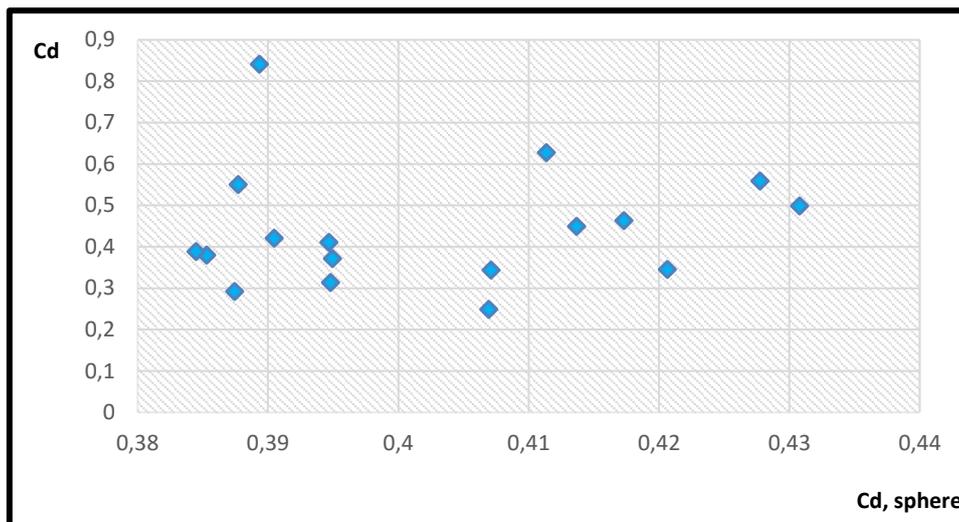


Figura 3.4. Relação entre o coeficiente de arrasto experimental e o coeficiente de arrasto da esfera equivalente de acordo com a lei de Clift e Gauvin.

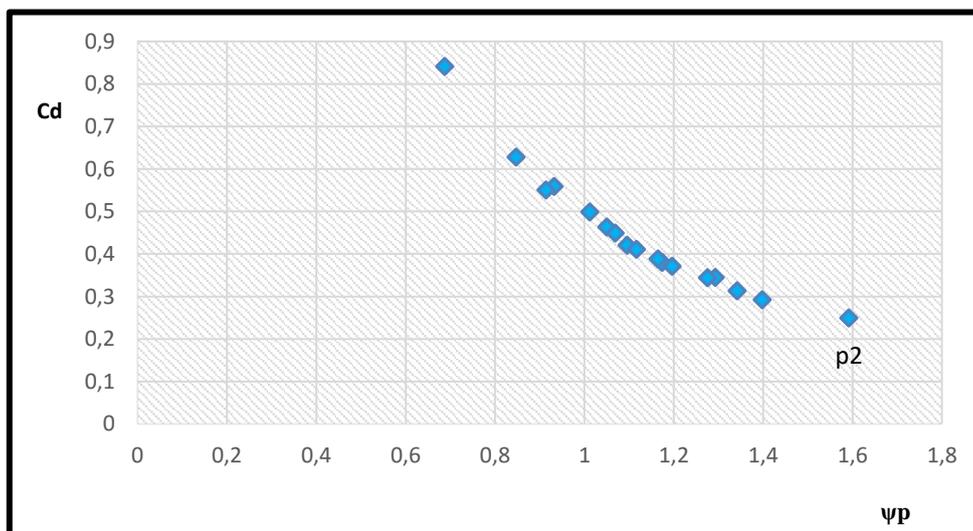


Figura 3.5. Relação entre o coeficiente de arrasto e o fator de forma associado a cada partícula.

Da análise dos gráficos representados pelas figuras 3.3. e 3.4. facilmente se consegue concluir que apenas o fator de forma das partículas têm uma influência significativa no coeficiente de arrasto, sendo a relação entre eles inversamente proporcional, ou seja quanto maior for o fator de forma mais difícil será o seu arrasto. Na figura 3.5. realça-se ainda o fato de que a partícula com menor valor de coeficiente de arrasto e maior coeficiente de forma é a partícula dois.

3.3. Análise dos parâmetros presentes na lei de Swamme

Por sua vez a lei de Swamme impõe que o coeficiente de arrasto das partículas apenas é dependente do número de Reynolds e do fator de forma de Corey.

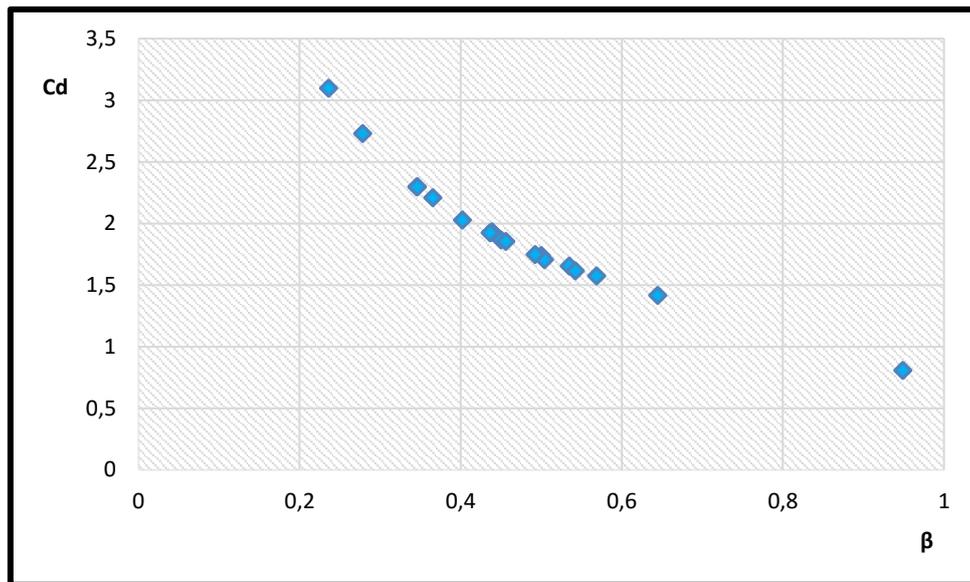


Figura 3.6. Relação entre o coeficiente de arrasto e o fator de forma de Corey.

Tal como sucede com a lei anterior, a lei de Swamme também apresenta uma relação inversa entre o coeficiente de arrasto e o fator de forma, sendo que quanto mais a partícula se aproxima da forma esférica menor será o seu coeficiente de arrasto. Neste caso a partícula considerada mais desfavorável é a partícula quatro.

3.4. Interpretação gráfica dos parâmetros presentes na lei de Chien

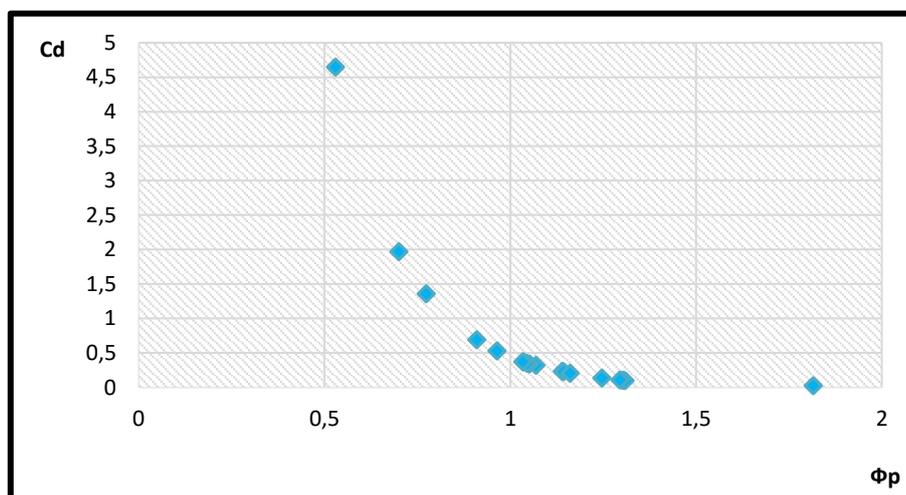


Figura 3.7. Relação entre o coeficiente de arrasto e a esfericidade das partículas.

Tal como nos casos anteriores o fator ligado à caracterização geométrica das partículas apresenta grande influência sobre o coeficiente de arrasto mantendo o padrão da relação como sendo inversamente proporcional o que está de acordo com o esperado; quanto mais esférica for a partícula menor será a resistência ao escoamento, exigindo assim uma velocidade de escoamento mais elevada para que seja possível o seu arrasto. Mais uma vez se pode observar uma semelhança de resultados entre a lei proposta no artigo e a lei de Chien uma vez que em ambos os casos a partícula considerada mais desfavorável atendendo à caracterização geométrica é a partícula dois.

3.5. Conclusões

De uma forma geral a conclusão obtida com base nas três leis é coerente e semelhante. O fator predominante e que tem maior influência no coeficiente de arrasto é a forma da partícula. Com base nos cálculos realizados chegou-se a conclusão que a partícula mais desfavorável seria a partícula dois, o que já seria de esperar visto ser a partícula com uma maior força de atrito a vencer, levando assim a que seja necessário um sopro das facas de ar com uma velocidade mínima de 60 m/s.

Conclui-se então que o equipamento pré-selecionado (facas de ar) é adequado

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Anderson, J.D. (2011), “Fundamentals of Aerodynamics” 5ª Ed, McGraw-Hill, Inc. New York 1991. McGraw-Hill Series in Aeronautical and Astronautical Engineering
- [2] C.M. Branco, J.A.M. Ferreira, J.D.M. Costa e A. Ribeiro, “Projecto de Órgãos de Máquinas” 3ª Ed, Fundação Calouste Gulbenkian, 2012.
- [3] Dioguardi, Fabio e Mele, Daniela, “A new shape dependent drag correlation for non-spherical rough particles. Experiments and results”, Powder Technology 277 (2015) 222-230, <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.062>.
- [4] E. Loth, “Drag of non-spherical solid particles of regular and irregular shape”, Powder Technol. 182 (2008) 342-353, <http://dx.doi.org/10.1016/j.powder.2007.06.001>.
- [5] Mandø, Matthias e Rosendahl, Lasse, “On the motion of non-spherical particles at high Reynolds number”, Powder Technology 202 (2010) 1-13, <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2010.05.001>.
- [6] Oliveira & Lopes (2006) – Oliveira, Luís A. & Lopes, António G., “Mecânica dos Fluidos”, 1ª Edição, ETEP – Edições Técnicas e Profissionais
- [7] Tran-Cong, Sabine, Gray, Michael e Michaelides, Efsthios, E., “Drag coefficients of irregularly shape particles”, Powder Technology 139 (2004) 21-32, <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2003.10.002>.

ANEXO

Representação do modelo 3D do sistema completo

A modelação do sistema, representado pela figura 4.1. foi realizada com recurso ao programa Inventor. O sistema é composto por uma estrutura tubular em aço EN 10025-2 E355, item 5, que serve de suporte ao conjunto de facas de ar, item 1. Para além das facas de ar o sistema é composto por um sistema de tubagem e válvulas, item 3, um soprador, item 2, um divisor de tubos, item 4, de modo a se conseguir distribuir o ar pelos três conjuntos de facas existentes, duas colunas de facas verticais que terão como função criar uma cortina de ar de modo a impedir que as impurezas sopradas pelas facas verticais contaminem os balancetes adjacentes e uma coluna de facas horizontais para a limpeza das placas e chapéu dos balancetes. Uma vez que foi pedido que o sistema fosse automático propôs-se a instalação de um conjunto de sensores, item 6, cuja função será descrita um pouco mais à frente.

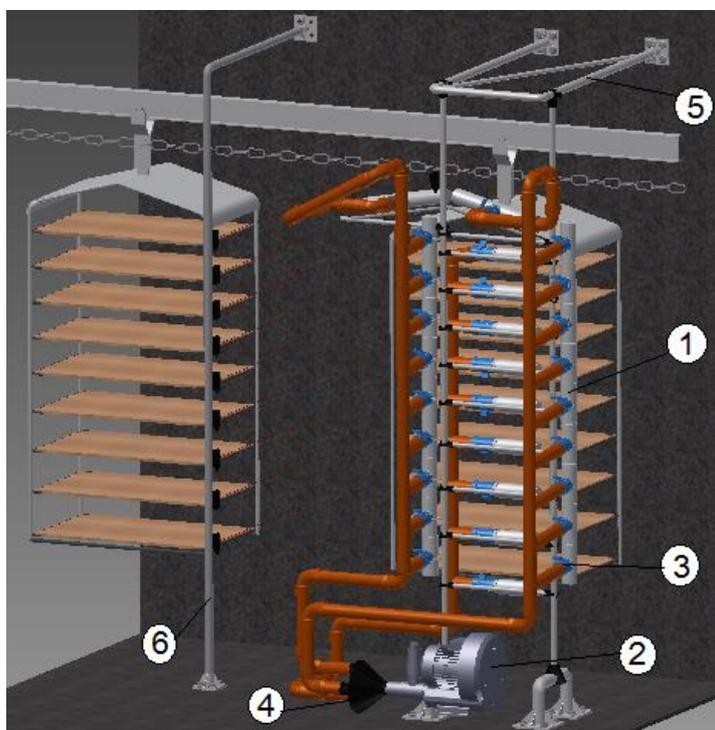


Figura 4.1. Representação do modelo 3D do sistema de limpeza.

A figura 4.2. representa a estrutura de suporte dimensionada constituída por um suporte superior fixa através de parafusos na parede, item 1, composto por um tubo

diagonal de apoio e um tubo horizontal em que encaixam as abraçadeiras, item 2, conectando assim o suporte superior à estrutura que contém as facas de ar. De forma semelhante a estrutura contém dois suportes inferiores, item 8, fixos também por parafusos ao chão, formados por um único tubo que também se encontra conectado pela estrutura principal através de duas abraçadeiras que em conjunto com as abraçadeiras permitem o ajuste da posição segundo a direção z (de acordo com o sistema de eixos representado na figura 4.2.). A estrutura principal que irá servir de apoio às facas de ar é constituída por 9 tubos de igual dimensão horizontais, item 6, onde serão assentes as facas para realização do sopro das placas. Estes tubos, tal como o suporte inferior e superior, encontram-se ligados aos tubos verticais por meio de abraçadeiras de modo a ser possível ajustar a sua posição segundo y. Para a instalação das facas responsáveis pela limpeza das chapas dos balancetes acoplou-se um tubo com o mesmo ângulo de curvatura que as chapas, item 5, a dois tubos iguais aos horizontais com a mesma ligação através de abraçadeiras de modo a ser também possível a regulação da posição.

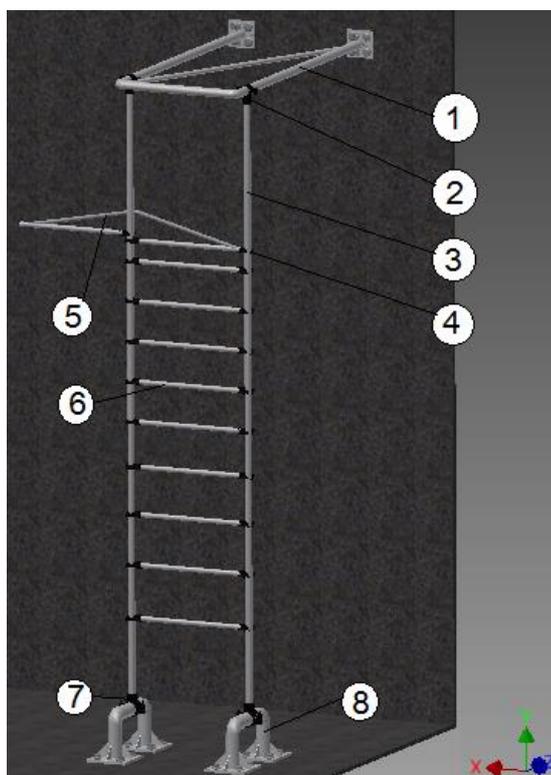


Figura 4.2. Esquemática da estrutura de suporte para as facas de ar.

Análise de esforços, tensões e deformações na estrutura

Apesar da estrutura ter sido modelada através do Inventor tanto a análise da deformação da estrutura e esforços foi realizada através do ADINA enquanto que através do Inventor apenas foram analisadas as tensões a que a estrutura estará sujeita.

A estrutura estará sujeita a dois tipos de forças: uma devido aos pesos próprios tanto da própria estrutura como das facas e outra devido ao impulso gerado pelo sopro de ar quando accionadas as facas. O peso próprio da estrutura é considerado de forma automática pelo programa sendo que a informação sobre o peso das facas encontrou-se disponível no catálogo de um fornecedor, sendo respetivamente o peso das facas de 152 mm (facas horizontais e verticais) e facas de 305 mm (facas para limpeza das chapas) igual a $P_{152} = 4,9 \text{ N}$ e $P_{305} = 6 \text{ N}$, correspondendo ao fato de o modelo selecionado ter uma massa correspondente a 0,11 kg com um acréscimo de 2kg por cada metro.

Para o cálculo da força correspondente ao impulso recorreu-se ao padrão de distribuição de ar, figura 4.3., segundo o catálogo da Exair.

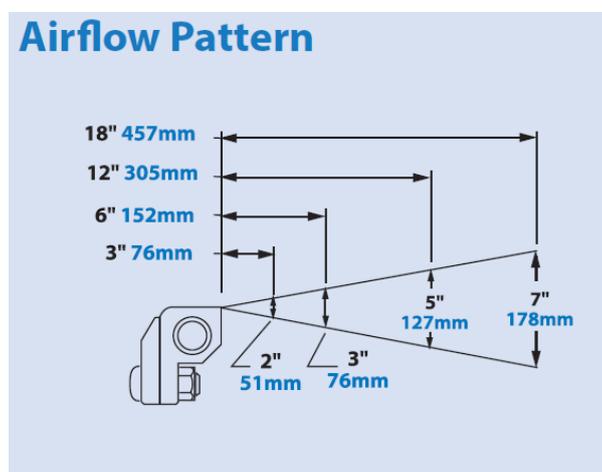


Figura 4.3. Esquemática da distribuição de ar soprado por uma faca de ar.

Com base na informação fornecida na figura e atendendo a que a abertura das facas de ar é de 1 mm e que o comprimento das mesmas será de 152 mm e 305mm, consegue-se calcular o volume de ar soprado pelas mesmas até o alcance de 457 mm (atendendo a que a largura das placas é de 450 mm este padrão de ar consegue atingir a distância de sopro pretendida) e através da densidade chegar à massa de ar soprado.

Por outro lado atendendo aos resultados obtidos para a velocidade de escoamento necessária, 60 m/s (de modo a se obter alguma margem de segurança foi

considerada uma velocidade correspondente a 70 m/s) e estando a faca em repouso até ao exato momento de accionamento consegue-se determinar a aceleração que o ar irá desenvolver no accionamento e conseqüentemente recorrendo à segunda lei de Newton

$$|\vec{F}| = m|\vec{a}| \quad (4.1)$$

assim as forças de impulso correspondentes às facas de 152 mm e 305 mm foram respetivamente $F_{152} = 194,4$ N e $F_{305} = 391,48$ N.

No entanto tanto os pesos como os impulsos das facas são sentidos ao longo da estrutura de forma distribuída e não pontual, como tal, para efeitos de análise no ADINA usaram os valores das forças distribuídas, afixados na tabela 4.1. Em relação à aplicação das forças no Inventor é usada a intensidade das mesmas e são seleccionadas as faces em que essa mesma força atua o que faz com que seja assumida de forma distribuída pela respetivas faces seleccionadas.

Tabela 4.1. Valores de forças distribuídas a que a estrutura está sujeita.

	Faca de 152 mm	Faca de 305 mm
Distribuição do peso nos tubos horizontais [N/m]	0,011 N/mm	0,417 N/mm
Distribuição da força de impulso das facas horizontais [N/m]	0,417 N/mm	0,840 N/mm
Distribuição do peso nos tubos verticais [N/m]	0,003 N/mm	Não aplicável
Distribuição da força de impulso das facas verticais [N/m]	0,116 N/mm	Não aplicável

Nas figuras 4.4. e 4.5. estão representados as tensões esforços e deslocamentos na estrutura sendo que, em ambos os casos, os valores obtidos são inferiores à tensão de cedência do material (EN 10025-2 E355) apresentado assim um coeficiente de segurança igual a

$$n = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{355}{30} = 11,8 \quad (4.2)$$

levando assim a concluir que as dimensões admitidas para a estrutura são aceitáveis

Como se pode observar na figura 4.4 a estrutura encontra-se no geral com uma distribuição de tensão baixa exceto na zona de união dos tubos oblíquos. No entanto esta

zona de concentração de tensões deve-se ao facto de na modelação existir contato entre o tubo vertical e os tubos oblíquos o que na realidade não se sucede para além de que a estrutura oblíqua e que servirá de apoio às facas de 305 mm será ligada por soldadura com reforço de modo a evitar concentrações pelo que em termos de análise geral da estrutura esta zona não tem influência.

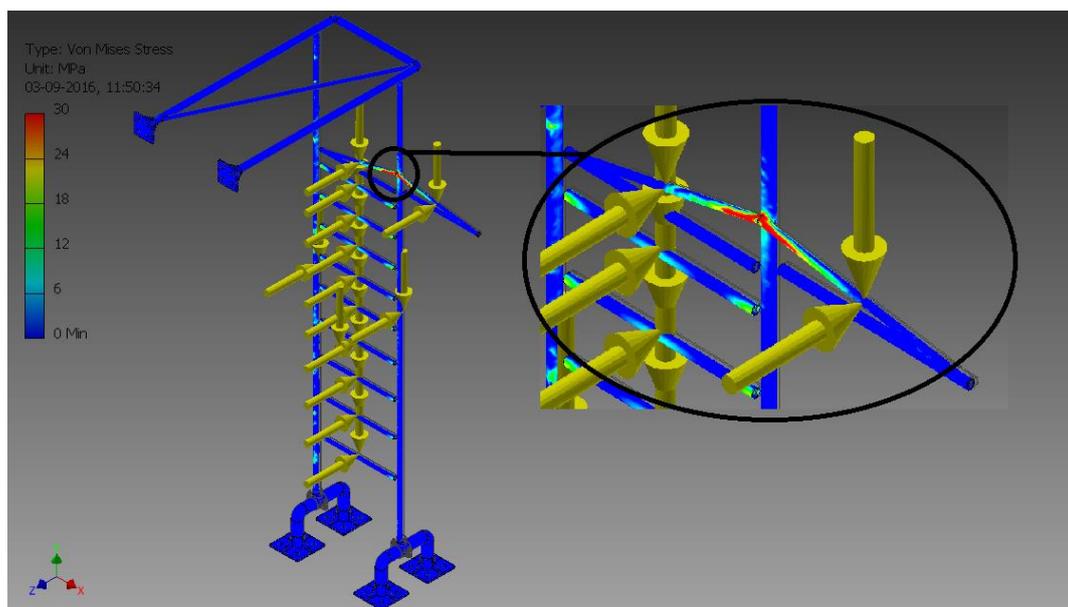


Figura 4.4. Demonstração das tensões na estrutura de suporte do sistema.

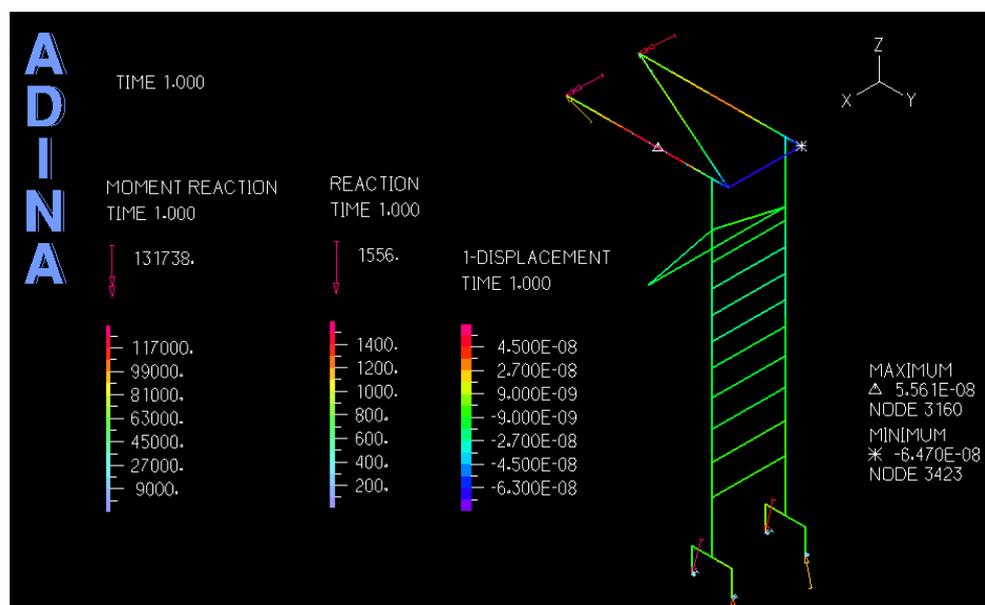


Figura 4.5. Demonstração do deslocamento e esforços na estrutura de suporte do sistema.

Dimensionamento estático dos parafusos de fixação da estrutura

Na figura 4.6. encontra-se representada a base modelada para efeitos de fixação da estrutura à parede e ao chão, assim como o efeito de separação a que os parafusos estarão sujeitos devido à ação do momento e força no apoio. O valor tanto do momento como da reação foram obtidos através da análise realizada pelo ADINA sendo que se obtiveram os seguintes valores: $M=131738$ N.mm e $Q=1556$ N. Os valores correspondentes a L_1 e L_2 são respetivamente 25 mm e 75mm.

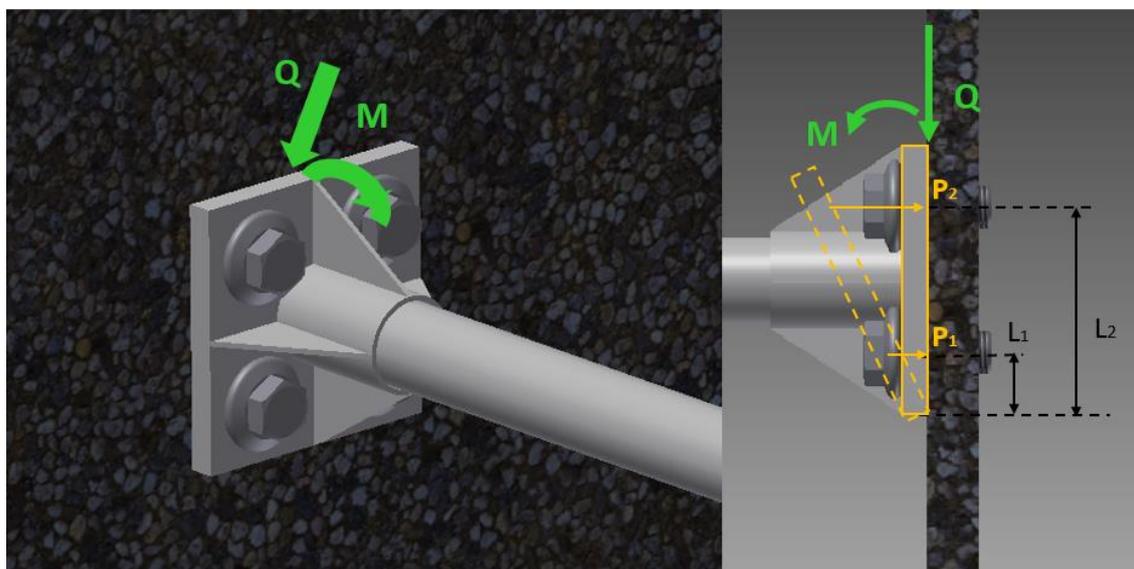


Figura 4.6. Esquemática das reações na base de fixação.

Com base no esquema da figura 4.6. sabe-se que

$$\frac{P_1}{L_1} = \frac{P_2}{L_2} \Rightarrow P_2 = \frac{P_1}{L_1} \times L_2 = 3P_1 \quad (4.3)$$

Por outro lado tem-se que

$$\sum P_i L_i = M \Rightarrow 2 \times (P_1 L_1 + P_2 L_2) = M \quad (4.4)$$

Depois de resolvido o sistema obtiveram-se os seguintes resultados: $P_1 = 263,26$ N e $P_2 = 790,43$ N, ou seja, tal como seria de prever, os parafusos mais solicitados serão os colocados na posição dois sendo a tensão máxima correspondente igual a

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 0,6\sigma_p + c \times P_{m\acute{a}x} \quad (4.5)$$

em que σ_p representa a tens\~ao de prova de acordo com a classe m\~etrica do parafuso e c a rela\~cao de rigidez entre o parafuso e a flange.

Selecionando uma classe m\~etrica 8.8 sabe-se que $\sigma_p = 600$ MPa em rela\~cao \~a constante de rigidez esta ter\~a que ser calculada atrav\~es da seguinte express\~ao

$$c = \frac{K_p}{K_p + K_m} \quad (4.6)$$

em que K_p representa a constante de rigidez dos parafusos e K_m a constante de rigidez da flange.

Admitindo que os parafusos a usar ser\~ao M6 sabe-se que a sua \~area resistente A_t \~e igual a $20,1 \text{ mm}^2$, o seu comprimento igual a 5 mm e que o seu material ser\~a um a\~co de m\~edio teor em carbono, ou seja $E=210 \text{ GPa}$, logo

$$K_p = \frac{A_t \times E}{l} = \frac{20,1 \times 2,10 \times 10^5}{5} = 844200 \text{ N/mm} \quad (4.7)$$

Por sua vez para c\~alculo da contante de rigidez da flange recorreu-se ao M\~etodo de Shigley considerando apenas a chapa da base como flange uma vez que os parafusos ir\~ao ser roscados diretamente no ch\~ao e parede. Como tal vem que

$$K_m = \frac{\pi \times E_m \times d}{\ln \left[\frac{(2t + D - d)(D + d)}{(2t + D + d)(D - d)} \right]} \quad (4.8)$$

em que E_m corresponde ao m\~odulo de Young do material, neste caso a\~co, d representa o di\~ametro do parafuso t a espessura da chapa e D o di\~ametro m\~edio de contacto entre a cabe\~ca do parafuso e a chapa que, considerando com anilha, \~e igual ao dobro do di\~ametro do parafuso. Depois de substituidos todos os valores na express\~ao acima descrita e na express\~ao correspondente \~a rela\~cao de rigidezes obtiveram-se os seguintes valores: $K_m=7,4 \times 10^6$ e $c = 0,114$. Sendo que para a tens\~ao m\~axima corresponde um valor igual a 405 MPa o que leva a um valor de coeficiente de seguran\~ca correspondente a

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{635}{405} = 1,56 \quad (4.9)$$

em que σ_c representa a tens\~ao de ced\~encia de acordo com a classe m\~etrica selecionada.

Visto que o coeficiente de segurança obtido é maior que 1,5 pode-se concluir que o parafuso selecionado, M6 com classe métrica 8.8, é adequado para a fixação da base sendo no entanto ainda necessário garantir o critério para que não haja escorregamento da junta, sendo este dado pela seguinte expressão

$$F_a = 2 \times (F_{min_1} + F_{min_2}) \times \mu > Q \quad (4.10)$$

em que μ representa o coeficiente de atrito entre a chapa e a parede, Q a força aplicada no plano da junta e F_{min} a força mínima que ocorre em cada parafuso com o momento aplicado, sendo esta dada por

$$F_{min_i} = F_i - (1 - c) \times P_i, i = 1,2 \quad (4.11)$$

em que F_i corresponde à força de pré carga que, para o caso de uma ligação não permanente é dada por

$$F_i = 0,6 \times \sigma_p \times A_t \quad (4.12)$$

Das expressões apresentadas obtiveram-se os resultados afixados na tabela 4.2.

Tabela 4.2. Resultados obtidos para a condição de escorregamento.

F_i	7236 N
F_{min1}	7002,75 N
F_{min2}	6535,68 N
F_a	5415,37N
Q	1556 N

Considerando que a força de atrito F_a é claramente superior ao esforço Q a que a base estará sujeita pode-se concluir que não existe risco de escorregamento sendo assim recomendando a aplicação, em cada base, de quatro parafuso M6 com grau métrico 8.8.

Funcionamento do Sistema Completo

O sistema previsto será constituído por 29 facas de ar esquematizadas na figura 4.7. (27 com 152 mm de comprimento das quais 9 servirão para efetuar o sopro das placas e as restantes 18 para servir como cortina de ar para proteção dos balancetes vizinhos as 2 restantes correspondem às que irão realizar a limpeza dos chapéus sendo estas com um comprimento correspondente a 305 mm) alimentadas através de um soprador, 29 válvulas para regulação da passagem/ interrupção do ar (foi sugerido a aplicação de válvulas borboleta) considerando que as facas correspondentes às placas e à respetiva proteção lateral apenas deverão ser accionadas caso não haja qualquer peça presente nas placas. De modo a que o sistema seja automático as válvulas terão que ser de accionamento elétrico tendo, cada, acoplado um controlador que irá permitir ou não a abertura das mesmas sendo esta informação adquirida e enviada através de 9 sensores posicionados 1 metro anteriormente ao sistema de limpeza tal como esquematizado na figura 4.7.

Para que as facas que irão realizar o sopro dos chapéus não estejam sempre accionadas é proposto que se instale um sensor na estrutura do sistema, tal como representado no detalhe presente na figura 4.7. para que possa dar a informação de accionamento das facas assim que o feixe seja interrompido pela barra do rolete e volte a desativar assim que o feixe seja restabelecido.

Sabendo que a velocidade dos balancetes é de 2,38 m/min e que o comprimento das placas é de 710 mm, sabe-se que o sensor estará a percorrer a placa durante 18s desde que é interrompido pela primeira vez, quando a primeira barra do balancete surge alinhada com a sua posição, até que a segunda barra do balancete volte a interromper o feixe. Considerando que o sensor apenas começa a guardar em memória informação a partir da primeira interrupção caso o feixe não volte a ser interrompido passados os 18s poderá ser enviado o comando de abertura para a válvula correspondente, sendo que o sensor deverá limpar a memória passados 20s (tempo da segunda interrupção) de modo a repetir o ciclo para o balancete seguinte. Em relação ao accionamento das válvulas estes deverá ser realizado apenas 0,12 segundos depois de enviado a ordem, sendo este o tempo que o balancete demora a chegar ao sistema de limpeza depois de ter passado pelos sensores.

De modo ao sistema projetado ser implementado foi proposta uma alteração em relação à geometria dos balancetes sendo esta a colocação dos chapéus por fora da estrutura do balancete tal como esquematizado na figura 4.8.

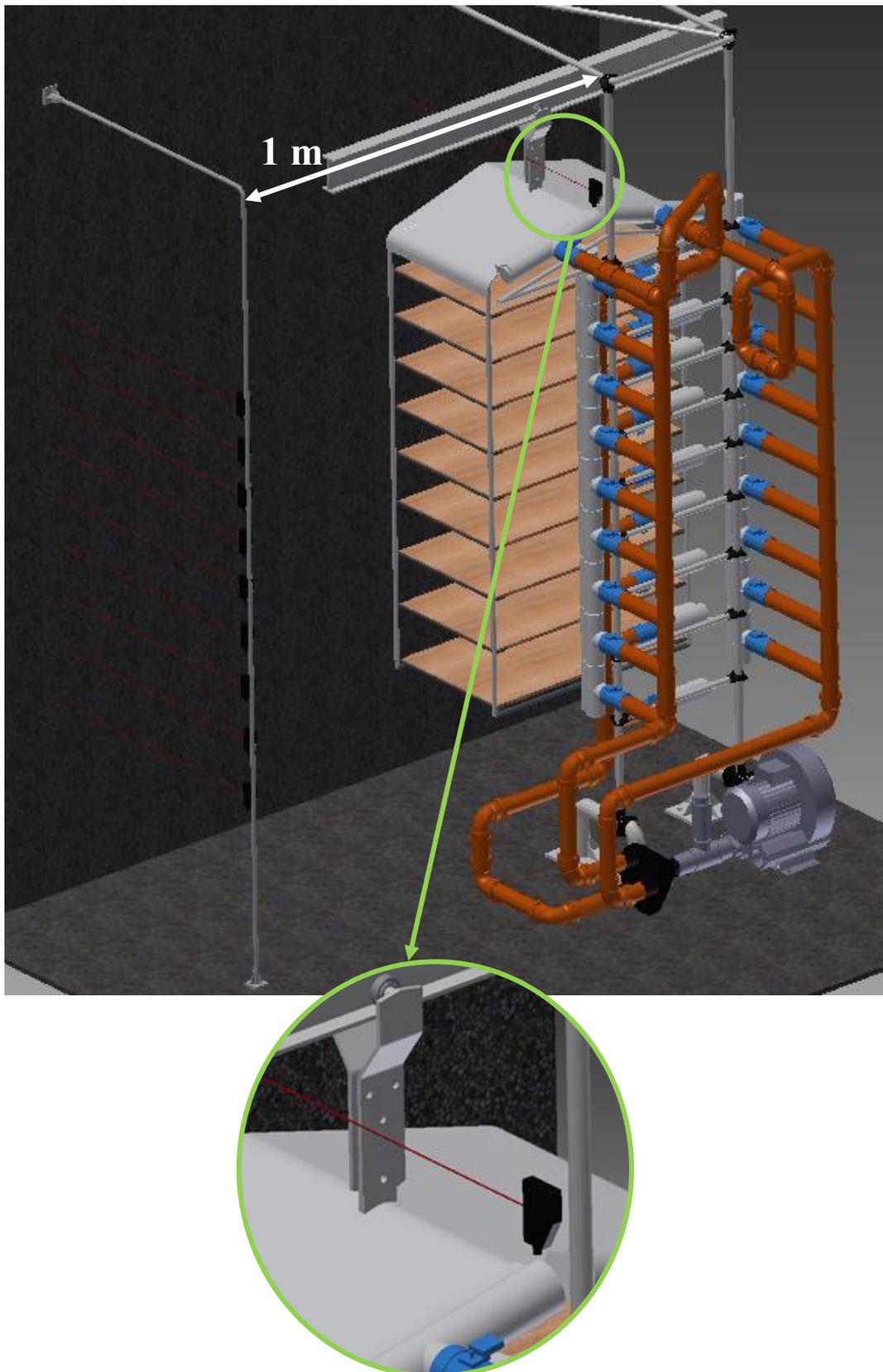


Figura4.7. Representação do sistema automático de limpeza final.

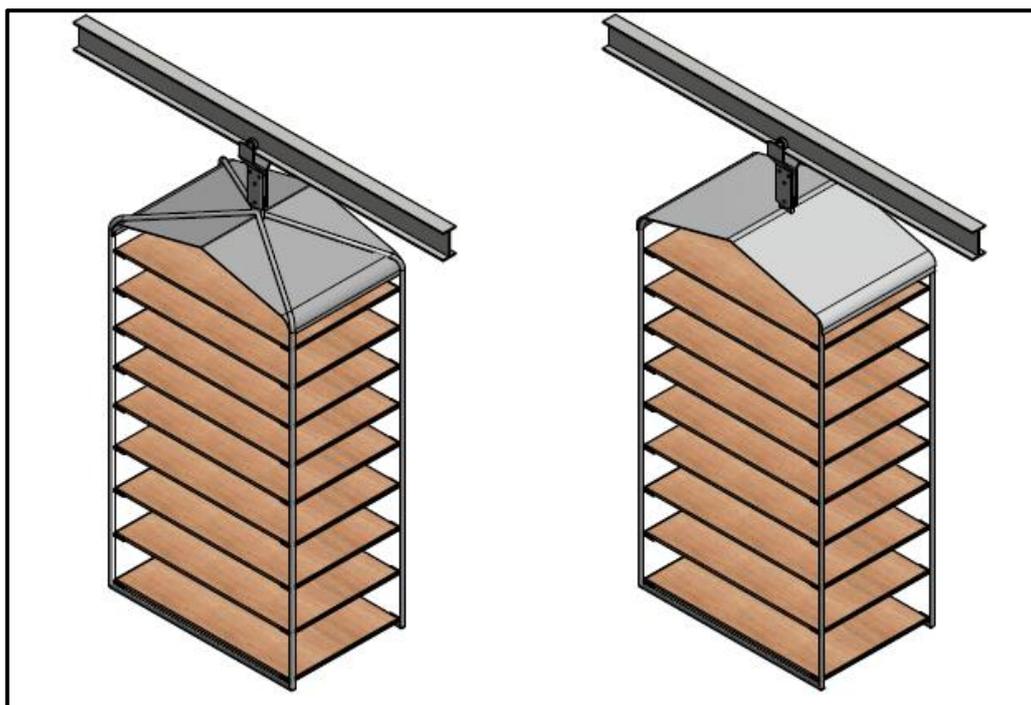


Figura 4.8. Esquematização da proposta de melhoria para a chapa dos balancetes: balancete atual (esquerda) vs balancete melhorado (direita).

APÊNDICE A

Mapa da fábrica

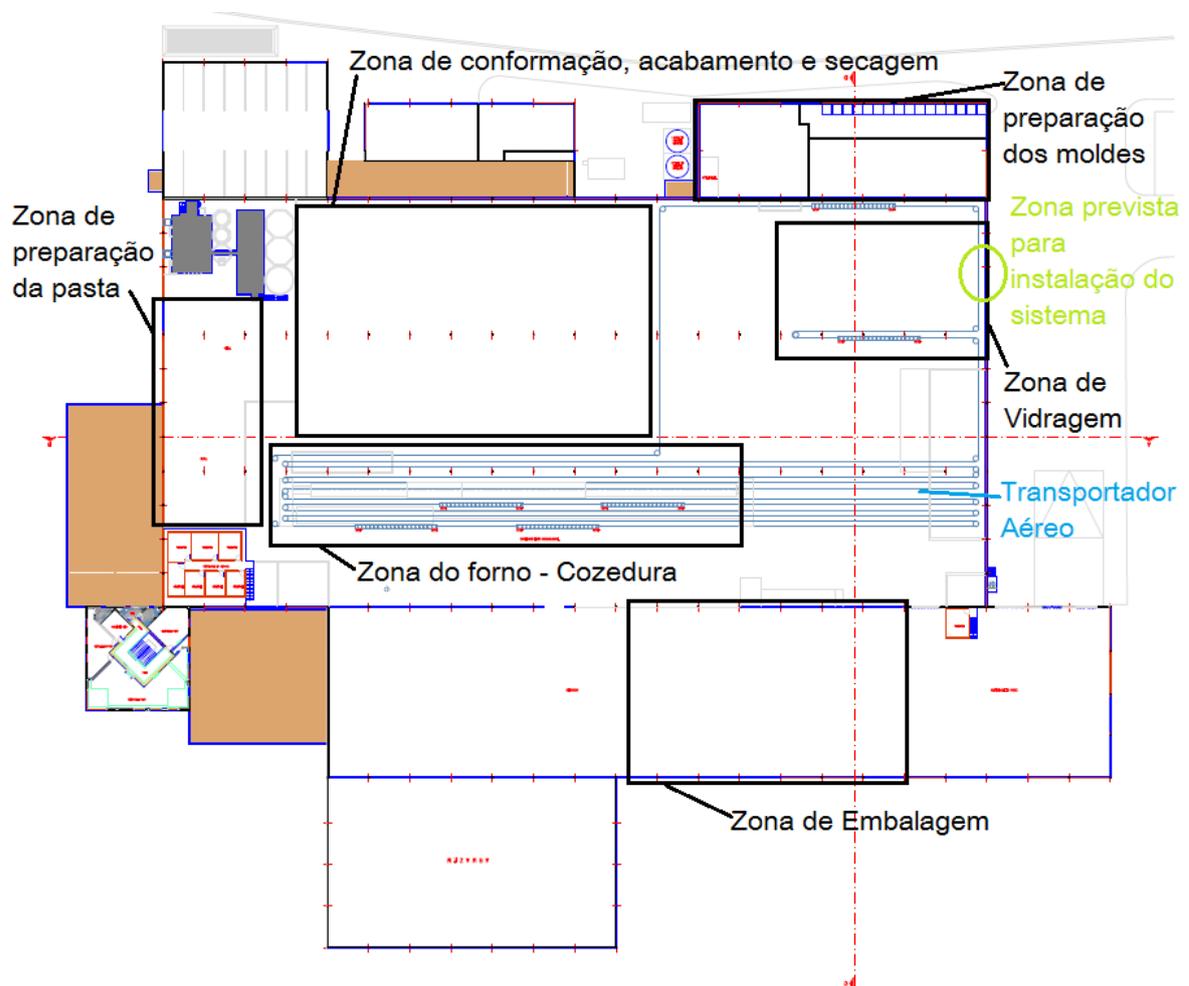


Figura A.1. Esquematização do mapa da fábrica.

APÊNDICE B

Catalogação das partículas

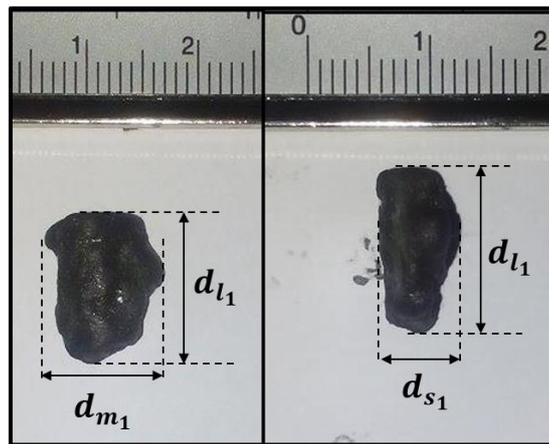


Figura B.1. Caracterização das dimensões da partícula um.

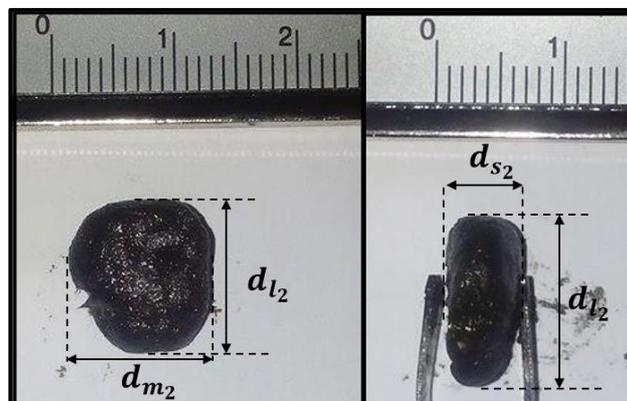


Figura B.2. Caracterização das dimensões da partícula dois.

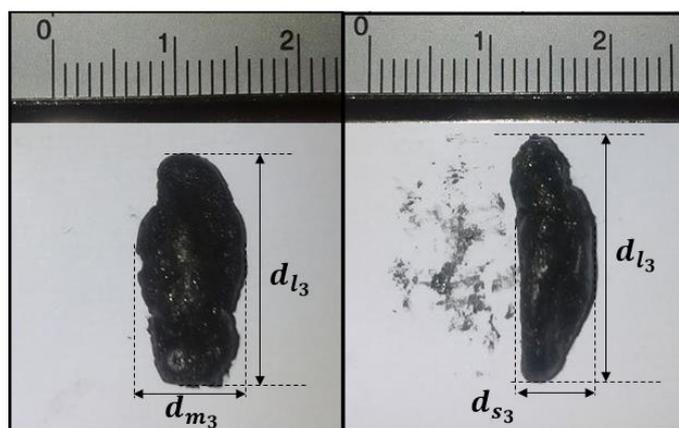


Figura B.3. Caracterização das dimensões da partícula três.

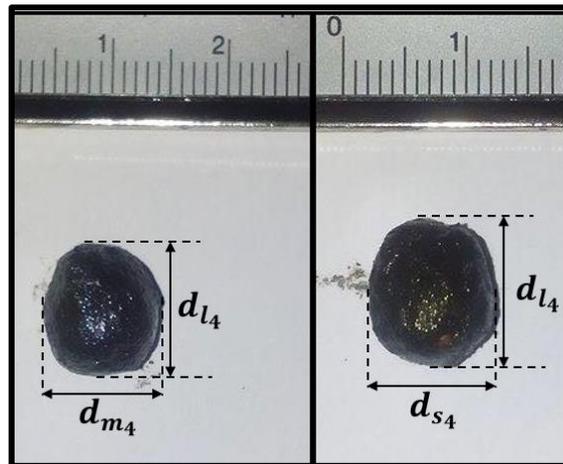


Figura B.4. Caracterização das dimensões da partícula quatro.

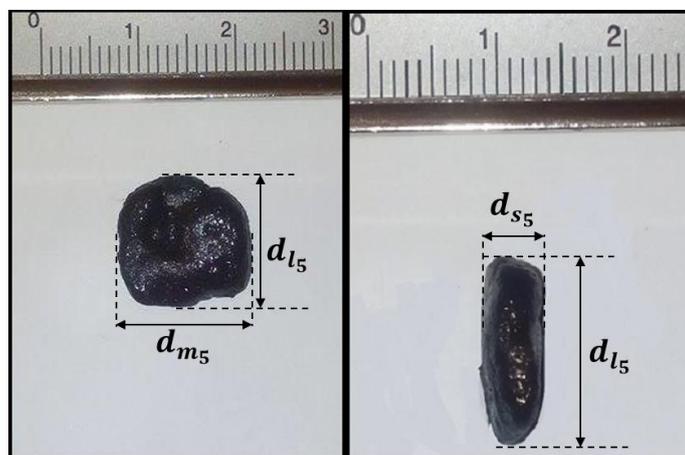


Figura B.5. Caracterização das dimensões da partícula cinco.

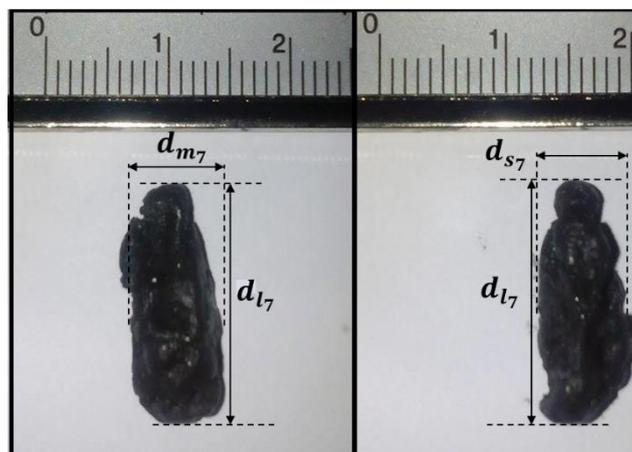


Figura B.6. Caracterização das dimensões da partícula sete.

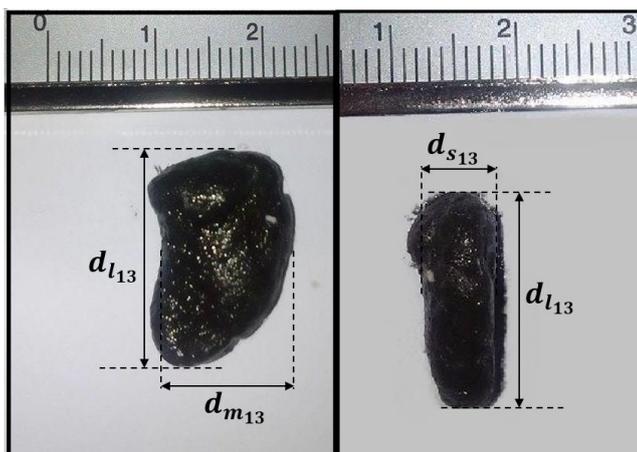


Figura B.7. Caracterização das dimensões da partícula treze.

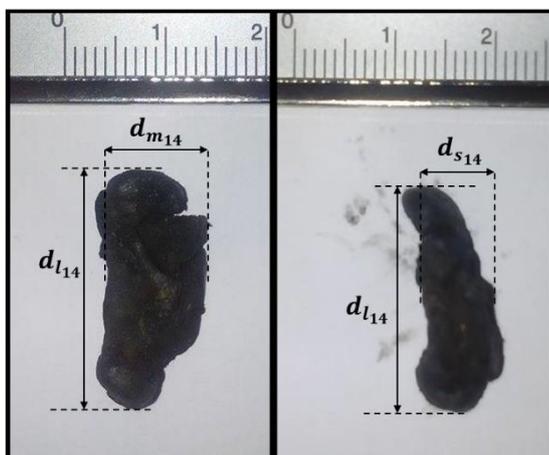


Figura B.8. Caracterização das dimensões da partícula catorze.

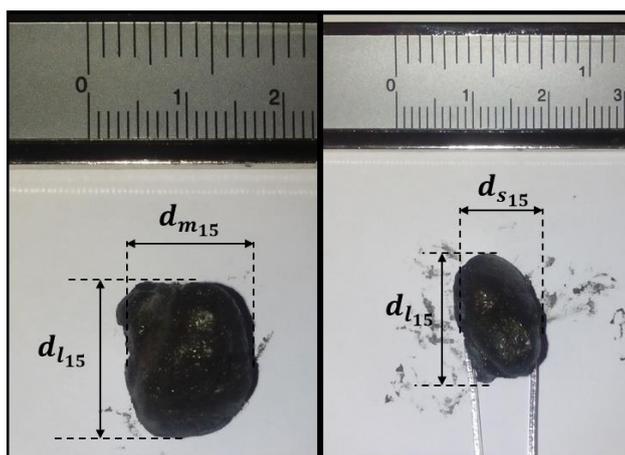


Figura B.9. Caracterização das dimensões da partícula quinze.

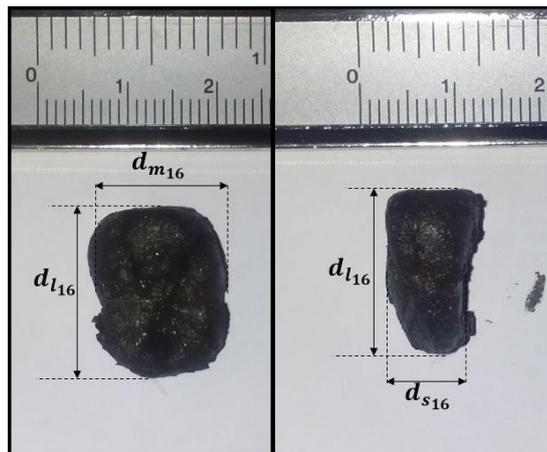


Figura B.10. Caracterização das dimensões da partícula dezasseis.

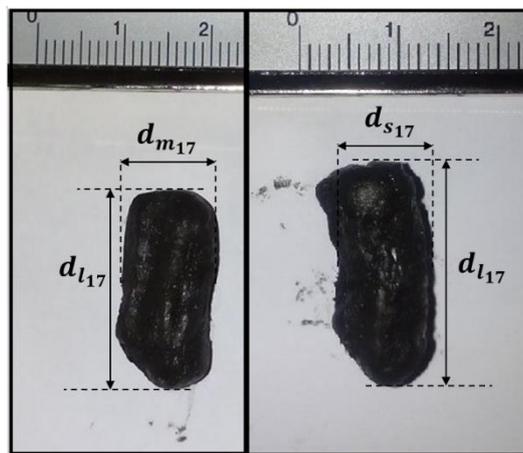


Figura B.11. Caracterização das dimensões da partícula dezassete.



Figura B.12. Caracterização das dimensões da partícula dezoito.

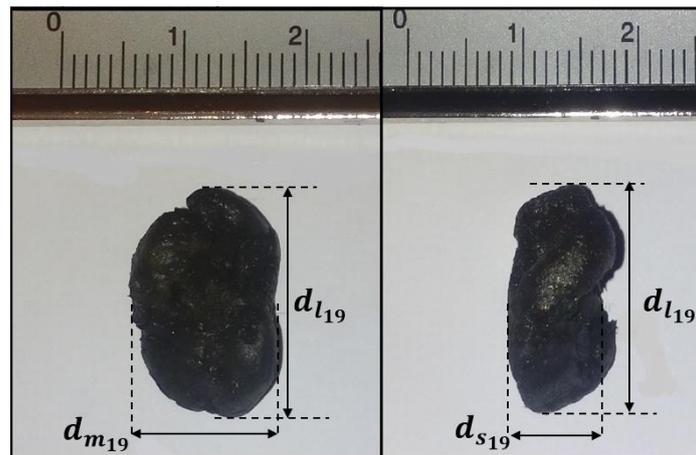


Figura B.13. Caracterização das dimensões da partícula dezanove.



Figura B.14. Caracterização das dimensões da partícula vinte.

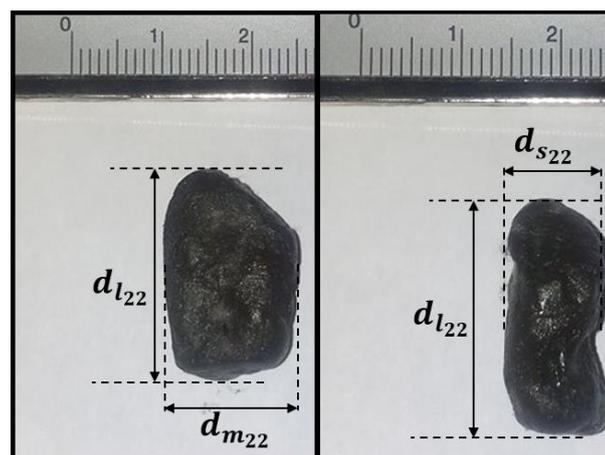


Figura B.15. Caracterização das dimensões da partícula vinte e dois.

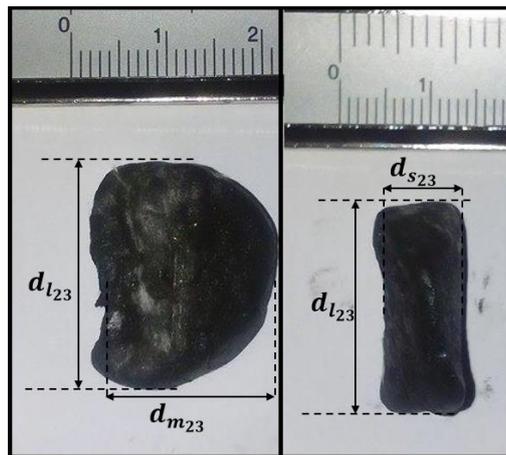


Figura B.16. Caracterização das dimensões da partícula vinte e três.

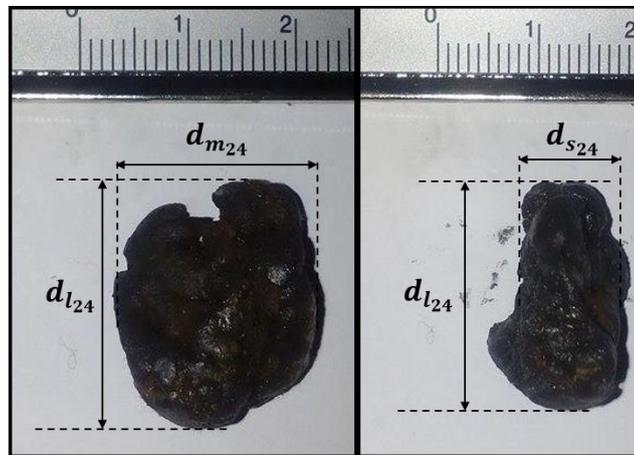


Figura B.17. Caracterização das dimensões da partícula vinte e quatro.