



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Pedro José de Maio Moura

ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS E TRANSPORTE
SÓLIDO EM SISTEMAS DE DRENAGEM DE ÁGUAS
RESIDUAIS COMUNITÁRIAS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de
Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor
Doutor António Manuel Abreu Freire Diogo e apresentada ao Departamento
de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra

Janeiro de 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Pedro José de Maio Moura

ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS E TRANSPORTE SÓLIDO EM SISTEMAS DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS COMUNITÁRIAS

MULTIPHASE FLOWS AND SEDIMENT TRANSPORT IN MUNICIPAL WASTEWATER SYSTEMS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor
Doutor António Manuel Abreu Freire Diogo

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Janeiro de 2022



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor António Manuel Abreu Freire Diogo, orientador desta dissertação, expresso os meus mais sinceros agradecimentos pelos conhecimentos transmitidos e pela infinita paciência e tempo dedicados em todas as fases da investigação e da elaboração desta dissertação. Não será demais dizer que sem a sua orientação e apoio esta dissertação não seria possível e por isso a ele devo os meus mais profundos agradecimentos.

Ao Sr. Joaquim, expresso o meu agradecimento pela construção e montagem de boa parte da instalação experimental utilizada no laboratório.

Aos meus pais e irmãos agradeço por serem o meu suporte todos estes anos, tanto financeiramente como emocionalmente.

A todos aqueles que me apoiaram durante todos os anos na Universidade de Coimbra e tornaram todos os dias um exercício de aprendizagem e companheirismo ofereço o meu mais sincero obrigado.

RESUMO

Devido às características das águas residuais comunitárias resultantes das contribuições domiciliárias, comerciais e industriais produzidas nos aglomerados urbanos, o transporte sólido, a ventilação natural ou artificial e os escoamentos multifásicos apresentam especial relevância nos sistemas de saneamento. O escoamento na rede geral de coletores que transportam águas residuais processa-se predominantemente por gravidade e com superfície livre. No entanto, instalações complementares com condutas com escoamento sob pressão que podem apresentar diversas especificidades e incorporar vários riscos associados ao seu normal funcionamento são normalmente indispensáveis, particularmente em sistemas de grandes dimensões. No caso de condutas ascendentes, a injeção de ar na base das mesmas em regime permanente poderá, não apenas facilitar o arejamento da massa líquida e prevenir a criação de condições de septicidade, como também melhorar o funcionamento hidráulico e o processo de elevação ou de transporte dos sólidos presentes nas águas residuais.

A presente dissertação insere-se num universo de trabalhos que têm vindo a ser desenvolvidos no âmbito de um projeto de investigação em curso no Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, LHRHA, do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, DEC-FCTUC, que pretende estudar e modelar as diversas particularidades dos escoamentos permanentes multifásicos em sistemas de saneamento. O principal foco de investigação neste caso centrou-se num trabalho predominantemente experimental de estabelecimento, medição e análise do transporte sólido que ocorre nos escoamentos em regime permanente de duas fases (água-areia) e de três fases (água-ar-areia) em condutas sob pressão ascendentes, de forma a poder avaliar os efeitos e possíveis benefícios no transporte sólido, causados pela injeção de ar comprimido na base de condutas ascendentes. Para o efeito, foi utilizada uma instalação experimental existente no LHRHA que permitiu a introdução, recolha e medição de caudais sólidos para vários caudais de água e de ar injetado, diferentes inclinações da conduta ascendente e diferentes diâmetros das partículas sólidas transportadas.

É analisada a possibilidade de aplicação de um modelo simplificado de duas fases (água-ar) proposto em trabalho anterior, para a caracterização do funcionamento hidráulico dos escoamentos de três fases (água-ar-sólidos) agora observados experimentalmente, considerando a fase sólida incluída na fase líquida, bem como uma primeira abordagem à modelação das condições críticas, ou de início do transporte sólido, nos escoamentos de duas e três fases observados. A introdução de ar na base de uma conduta ascendente em regime permanente, seja a conduta de impulsão de um sistema de bombagem, ou o ramo ascendente de um sifão invertido, mostra-se extremamente favorável no transporte sólido observado que surge

facilitado ou incrementado quando aumenta o caudal de ar introduzido, para uma dada geometria da instalação. As características do escoamento e o caudal sólido observado são muito influenciados pela inclinação da tubagem e pelo diâmetro das partículas transportadas. A aplicação do modelo simplificado água-ar anteriormente proposto permite uma razoável aproximação para a descrição do funcionamento hidráulico do escoamento de três fases na conduta ascendente; as condições críticas ou de início de transporte sólido aparentam poder ser descritas com boa aproximação com base nos números de Shields e de Reynolds, utilizando grandezas características adequadas.

Palavras-chave: Sistemas regionais de saneamento; Estações elevatórias; Sifões invertidos; Arejamento e septicidade; Escoamentos permanentes multifásicos; Bombagem por emulsão de ar; Transporte sólido.

ABSTRACT

Due to the characteristics of the wastewaters resulting from domestic, commercial and industrial effluents produced in urban agglomerations, the solid transport, natural or artificial ventilation and the multiphase flows have special relevance in sanitation systems. The flow in the general network of collectors carrying wastewater is processed predominantly by gravity and with a free surface. However, complementary installations with pipelines with flow under pressure that may have various specificities and incorporate various risks associated with their normal operation are usually indispensable, particularly in large systems. In the case of ascending pipelines, the air injection in steady flow at their base may, not only facilitate the aeration of the liquid mass and prevent the creation of septic conditions, but also improve the hydraulic operation and the process of lifting or transporting the solids present in the wastewater.

The current dissertation is part of a set of works that have been developed within the scope of an ongoing research project at the Laboratory of Hydraulics, Water Resources and Environment, LHRHA, of the Department of Civil Engineering of the Faculty of Sciences and Technology of Coimbra University, DEC-FCTUC, which aims to study and model the various particularities of steady multiphase flows in sanitation systems. The main focus of research in this case was centered on a predominantly experimental work of establishment, measurement and analysis of the solid transport that occurs in two-phase (water-sand) and three-phase (water-sand) steady (permanent) flows in under pressure ascending pipes, in order to be able to evaluate the effects and possible benefits on solid transport, caused by the injection of compressed air at the base of ascending ducts. For this purpose, an existing experimental installation at LHRHA was used, which allowed the introduction, collection and measurement of solid flow rates for various water and injected air flow rates, different inclinations of the ascending duct and different diameters of the transported solid particles. The possibility of applying a simplified two-phase (water-air) model proposed in previous work, for the characterization of the hydraulic functioning of the three-phase (water-air-solid) flows now experimentally observed, considering the solid phase included in the liquid phase, is analyzed, as well as a first approach to the modeling of the critical conditions, or of solid transport start, in the observed two and three-phase flows. The introduction of air at the base of an ascending duct in steady flow, whether it is the impulsion duct of a pumping system, or the ascending branch of an inverted siphon, shows to be extremely favorable in the observed solid transport, which is facilitated or incremented when the introduced air flow rate increases, for a given installation geometry. The characteristics of the flow and the observed solid flow rate are greatly influenced by the slope of the pipe and the diameter of the transported particles. The application of the simplified water-

air model previously proposed allows for a reasonable approximation for the description of the hydraulic functioning of the three-phase flow in the ascending duct; the critical or solid transport starting conditions appear to be describable to a good approximation based on Shields and Reynolds numbers, using appropriate characteristic quantities.

Keywords: Regional sewage systems; Pumping stations; Inverted siphons; Aeration and septicity; Steady multiphase flows; Air-lift pumping; Solid transport.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações gerais. Escoamentos multifásicos em condutas sob pressão de sistemas de saneamento	1
1.2. Objetivo do trabalho	3
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS E APROXIMAÇÃO PARA AS CONDIÇÕES DE INÍCIO DE TRANSPORTE SÓLIDO	5
3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E PROCEDIMENTO	10
3.1. Instalação, equipamento e processo de medição	10
3.2. Procedimento experimental	14
3.2.1. Transporte sólido em escoamento de duas fases água-areia.....	14
3.2.2. Transporte sólido em escoamento de três fases água-ar-areia	16
4. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE TRANSPORTE SÓLIDO	18
4.1. Escoamento de duas fases água-areia	18
4.2. Escoamento de três fases água-ar-areia	22
5. MODELO SIMPLIFICADO DE DUAS FASES ÁGUA-AR.....	29
5.1. Modelo Simplificado	29
5.2. Aplicação do modelo	33
6. TRANSPORTE SÓLIDO E CONDIÇÕES CRÍTICAS	40
6.1. Considerações gerais e parâmetros adimensionais	40
6.2. Condição de início de transporte sólido	41
7. CONCLUSÕES	45
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXO A – Dados obtidos nas medições experimentais em escoamentos permanentes de duas e três fases	A-1
ANEXO B – Pormenor das medições experimentais com escoamento de duas fases na zona de início de transporte sólido	B-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Padrão de escoamento slug com três fases na tubagem (adaptado de Fabre, 2003).	3
Figura 3.1- Representação esquemática da instalação experimental.....	10
Figura 4.1 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	18
Figura 4.2 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	19
Figura 4.3 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	20
Figura 4.4 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial, $U_{w0} = 0,30$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	22
Figura 4.5 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	23
Figura 4.6 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	23
Figura 4.7 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,30$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	24
Figura 4.8 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	25
Figura 4.9 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	25
Figura 4.10 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,30$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	26
Figura 4.11 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	26

Figura 4.12 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	27
Figura 5.1 – Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,30$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.....	35
Figura 5.2 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.....	35
Figura 5.3 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.....	36
Figura 5.4 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,30$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.....	36
Figura 5.5 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.....	37
Figura 5.6 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.....	37
Figura 5.7 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,30$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.....	38
Figura 5.8 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.....	38
Figura 5.9 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.....	39

Figura 6.1 – Variação do número de Shields com o número de Reynolds para a condição crítica de início do transporte sólido em escoamentos permanentes multifásicos de condutas ascendentes para diferentes inclinações (Adaptado de Diogo e Moura, não datado).....	44
Figura B. 1 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) na zona de início de transporte sólido para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	B-1
Figura B. 2 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) na zona de início de transporte sólido para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	B-2
Figura B. 3 - Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) na zona de início de transporte sólido para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.....	B-3

ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 3.1 – Gama de diâmetros dos grãos e massa total húmida de aproximadamente 1 L, sob condições de humidade comparáveis, das amostras de areia utilizadas.....	14
Tabela A. 1 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cotas piezométricas medidas no ponto de injeção de ar e a montante e temperatura da água no reservatório principal, para escoamentos de água e areia e inclinação de 30°	A-1
Tabela A. 2 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cotas piezométricas medidas no ponto de injeção de ar e a montante e temperatura da água no reservatório principal, para escoamentos de água e areia e inclinação de 46°	A-2
Tabela A. 3 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cotas piezométricas medidas no ponto de injeção de ar e a montante e temperatura da água no reservatório principal, para escoamentos de água e areia e inclinação de 58°	A-3
Tabela A. 4 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 30° e velocidade de água inicial de 0,30 m/s.....	A-4
Tabela A. 5 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 30° e velocidade de água inicial de 0,45 m/s.	A-5
Tabela A. 6 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 30° e velocidade de água inicial de 0,60 m/s.	A-6
Tabela A. 7 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 46° e velocidade de água inicial de 0,30 m/s.	A-7

sistemas de drenagem de águas residuais comunitárias

- Tabela A. 8 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 46° e velocidade de água inicial de 0,45 m/s. A-8
- Tabela A. 9 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 46° e velocidade de água inicial de 0,60 m/s. A-9
- Tabela A. 10 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 58° e velocidade de água inicial de 0,30 m/s. A-10
- Tabela A. 11 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 58° e velocidade de água inicial de 0,45 m/s. A-11
- Tabela A. 12 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 58° e velocidade de água inicial de 0,60 m/s. A-12

SIMBOLOGIA

- A – Área da secção transversal [L^2];
 A_1 – Área da secção mais estreita do bocal convergente a jusante do compressor [L^2];
 A_{Acr} – Área da secção transversal do tubo acrílico [L^2];
 A_{PEBD} – Área da secção transversal da tubagem de PEBD [L^2];
 a – Coeficiente de lei de potência [-];
 b – Coeficiente de lei de potência [-];
 C – Parâmetro de distribuição [-];
 C_{wa} – Constante obtida experimentalmente dependente dos regimes da fase líquida e gasosa [-];
 c – Coeficiente de lei de potência [-];
 D – Diâmetro interno da tubagem [L];
 D_{Acr} – Diâmetro interno da tubagem de acrílico [L];
 D_{PEBD} – Diâmetro interno do tubo de PEBD [L];
 D_s – Diâmetro característico das partículas sólidas [L];
 D_{S50} – Diâmetro mediano das partículas sólidas [L];
 FA – Factor de aceleração [-];
 f – Factor de atrito [-];
 f_a – Fração média ocupada dentro da tubagem pelo ar [-];
 f_s – Fração média ocupada dentro da tubagem pelos sólidos [-];
 f_w – Fração média ocupada dentro da tubagem pela água [-];
 f_{wh} – Fração de fluido no ponto de injeção de ar admitindo uma mistura homogénea [-];
 f_{wsh} – Fração de fluido no ponto de descarga admitindo uma mistura homogénea [-];
 f_{wMed} – Fração média de água na conduta ascendente [-];
 f_{wMedh} – Fração média de fluido na conduta ascendente admitindo uma mistura homogénea [-];
 g – Aceleração da gravidade [$L T^{-2}$];
 H – Carga total [L];
 H_I – Carga total na secção de injeção I [L];
 H_M – Carga total na secção de montante M [L];
 H_S – Carga total na secção de saída S [L];
 h – Altura de água no tanque de descarga [L];
 J – Perda de carga unitária [-];
 J_a – Perda de carga unitária do escoamento de ar [-];
 J_m – Perda de carga unitária da mistura [-];
 J_{PEBD} – Perda de carga unitária que ocorre no tubo de PEBD entre as tomadas de pressão estática 1 e 2 [-];
 J_w – Perda de carga unitária do escoamento da fase líquida [-];

- K – Coeficiente de perda de carga singular [-];
- K1 – Coeficiente de perda de carga localizada na redução e ligações nas imediações da junta flexível [-];
- K2 – Coeficiente de perda de carga localizada no leito de areia [-];
- K3 – Coeficiente de perda de carga localizada nos acessórios utilizados na descarga [-];
- $K_{m\acute{a}x}$ – Média dos valores de K calculados para os ensaios com velocidades de escoamento mais baixas e onde o leito de areia é máximo [-];
- $K_{m\acute{i}n}$ – Média dos valores de K calculados em ensaios sem a presença de leito de areia na base da conduta [-];
- k – Constante adiabática [-]; Rugosidade absoluta equivalente da tubagem [L];
- L – Comprimento entre os pontos A e B na conduta ascendente [L];
- $L_{Ac\acute{r}}$ – Comprimento da conduta ascendente em acrílico [L];
- L_{PEBD} – Comprimento do tubo de PEBD entre as tomadas de pressão estática 1 e 2 [L];
- M_s – Caudal mássico sólido [$M T^{-1}$]
- mmh – Massa recolhida no cesto, medida em peso húmido [M];
- mth – Massa total húmida de uma amostra de areia [M];
- mts – Massa total seca de uma amostra de areia [M];
- p – Pressão na secção de um tubo de fluxo em escoamento permanente [$M L^{-1} T^{-2}$];
- p_{atm} – Pressão atmosférica local absoluta [$M L^{-1} T^{-2}$];
- $p_{atm,norm}$ – Pressão atmosférica normal [$M L^{-1} T^{-2}$];
- p_I – Pressão absoluta do ar no ponto de injeção de ar [$M L^{-1} T^{-2}$];
- p_0 – Pressão absoluta do ar na câmara de saída do compressor [$M L^{-1} T^{-2}$];
- p/γ – Altura piezométrica [L];
- p_I/γ_w – Altura piezométrica absoluta no ponto de injeção de ar [L];
- Q_a – Caudal de ar [$L^3 T^{-1}$];
- Q_{aMed} – Caudal médio de ar na conduta ascendente [$L^3 T^{-1}$];
- Q_{aI} – Caudal de ar no ponto de injeção [$L^3 T^{-1}$];
- Q_{aS} – Caudal médio de ar no ponto de saída para a atmosfera [$L^3 T^{-1}$];
- Q_s – Caudal de areia seca [$L^3 T^{-1}$];
- Q_w – Caudal de água [$L^3 T^{-1}$];
- R – Constante dos gases ideais [$L^2 T^{-2}/(K)$];
- Re – Número de Reynolds [-];
- Re_{mc} – Número de Reynolds calculado com a velocidade média crítica da mistura [-];
- s – Densidade da areia [-];
- T_0 – Temperatura do ar na câmara de saída do compressor (K ou °C);
- T_w – Temperatura da água no tanque principal da instalação experimental (K ou °C);
- t_L – Tempo de duração do ensaio [T];
- U – Velocidade média do escoamento [$L T^{-1}$];

-
- U_a – Velocidade média real do ar [$L T^{-1}$];
 U_{a0} – Velocidade média do ar num líquido em repouso dentro de um tubo vertical [$L T^{-1}$];
 U_m – Velocidade média da mistura [$L T^{-1}$];
 U_{mc} – Velocidade média crítica da mistura [$L T^{-1}$];
 U_s – Velocidade média real dos sólidos [$L T^{-1}$];
 U_w – Velocidade média da água [$L T^{-1}$];
 U_{w0} – Velocidade média inicial de água no interior do tubo acrílico [$L T^{-1}$];
 X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 – Grandezas físicas do teorema fundamental da análise dimensional;
 Z – Cota geométrica [L];
 Z_I – Cota geométrica na secção I [L];
 Z_S – Cota geométrica do ponto pressão nula na secção S [L];
 $(Z + p/\gamma)_1$ – Cota piezométrica medida na secção 1 [L];
 $(Z + p/\gamma)_2$ – Cota piezométrica medida na secção 2 [L];
 α – Coeficiente de Coriolis [-]; Ângulo com a horizontal da conduta ascendente em graus ($^\circ$);
 $\alpha \times \frac{U^2}{2g}$ – Altura cinética [L];
 γ – Peso volúmico do fluido [$M L^{-2} T^{-2}$];
 γ_m – Peso volúmico da mistura água-ar [$M L^{-2} T^{-2}$];
 γ_s – Peso volúmico das partículas sólidas [$M L^{-2} T^{-2}$];
 γ_w – Peso volúmico da água [$M L^{-2} T^{-2}$];
 $(\gamma_s - \gamma_m)$ – Peso volúmico submerso [$M L^{-2} T^{-2}$];
 ΔH – Perda de carga total entre as duas tomadas de pressão estática [L];
 ν – Viscosidade cinemática do fluido [$L^2 T^{-1}$];
 ν_a – Viscosidade cinemática do ar [$L^2 T^{-1}$];
 ν_m – Viscosidade da mistura água-ar [$L^2 T^{-1}$];
 ν_w – Viscosidade cinemática da água [$L^2 T^{-1}$];
 π_1, π_2 – Parâmetros adimensionais do teorema fundamental da análise dimensional [-];
 ρ_a – Massa volúmica do ar [$M L^{-3}$];
 ρ_m – Massa volúmica da mistura [$M L^{-3}$];
 ρ_w – Massa volúmica da água [$M L^{-3}$];
 τ_c – Tensão tangencial média crítica na fronteira sólida [$M L^{-1} T^{-2}$];
-

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais. Escoamentos multifásicos em condutas sob pressão de sistemas de saneamento

Os sistemas convencionais de saneamento funcionam predominantemente por gravidade no sentido da topografia descendente e com escoamento com superfície livre, permitindo a recolha gravítica das águas residuais coletadas, através de ramais domiciliários, o transporte dos sólidos em suspensão e dissolvidos presentes nas mesmas e a ventilação natural das tubagens. No entanto, dificuldades topográficas dos traçados, em geral substancialmente aumentadas em sistemas de grandes dimensões, podem obrigar à utilização de condutas com escoamento sob pressão para travessia de obstáculos ou elevação pontual das águas residuais para cotas superiores (ver por exemplo Metcalf & Eddy, 1981; Metcalf & Eddy, 2003).

Como principais benefícios da utilização de condutas com escoamento sob pressão em sistemas de saneamento, podem-se citar os relacionados com os custos de primeiro investimento, devido à utilização de tubagens com diâmetros de menores dimensões que podem ser instaladas a menores profundidades (Davis, 2010), e a sua melhor adaptabilidade a condições topográficas desfavoráveis, permitindo a travessia de obstáculos naturais ou artificiais, quer por gravidade, quer com utilização de sistemas elevatórios. Os principais inconvenientes resultam da falta de arejamento das águas residuais, o que pode conduzir à criação de condições de septicidade com a produção de compostos tóxicos, corrosivos e/ou inflamáveis, sendo digno de particular destaque no Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de agosto o gás sulfídrico, e também a possibilidade de deposição de materiais sólidos transportados especialmente em escoamentos governados por gravidade. Estas condicionantes conduzem, em geral, a maiores custos de operação e manutenção que os que normalmente ocorrem nos escoamentos com superfície livre. No caso de sistemas elevatórios, para além da necessidade de importantes custos de energia, condições de funcionamento inadequadas podem ainda provocar maior desgaste e corrosão de equipamentos.

As principais instalações complementares dos sistemas de saneamento com funcionamento sob pressão são sistemas elevatórios e sifões invertidos. O elemento fundamental de um sifão invertido é uma tubagem em forma de U que é utilizada para conduzir as águas residuais na travessia de uma depressão topográfica ou de um obstáculo, passando a canalização por uma cota mais baixa, com a utilização de um ramo descendente, e posterior recuperação parcial da cota inicial a jusante, através de um ramo ascendente (ver por exemplo, ASCE, 2007; Metcalf & Eddy, 1981). São estruturas frequentemente utilizadas para transpor depressões naturais do solo e obstáculos, sem perdas significativas de energia, quando existe a impossibilidade de a

travessia ocorrer em linha reta mantendo a continuidade do escoamento com superfície livre (como por exemplo com a utilização de pontes hospedeiras ou mesmo estruturas ponte-canal) em desvios que normalmente implicariam a necessidade de bombeamento de modo a evitar profundidades elevadas de instalação dos coletores a jusante.

Apesar da sua boa adequação, os sifões invertidos são sistemas muito vulneráveis à deposição dos sólidos em suspensão presentes nas águas residuais que neles circulam. Este inconveniente pode ser particularmente relevante e mais frequente durante os períodos de tempo de menor afluência à rede e, portanto, quando o caudal escoado seja insuficiente para garantir a velocidade mínima de autolimpeza no ramo ascendente (Butler et al., 2003). Com o objetivo de promover o arejamento da massa líquida e prevenir a ocorrência de septicidade, e de melhorar o funcionamento hidráulico do processo de transporte de águas residuais e dos sólidos em suspensão, foi sugerido em estudos anteriores a esta dissertação (ver por exemplo Diogo e Oliveira, 2008; Oliveira, 2009; Apóstolo, 2011; Diogo e Gomes, 2011; Diogo e Apóstolo, 2012; Diogo e Oliveira, 2016) a injeção de ar na base da tubagem ascendente, permitindo mobilizar e maximizar o processo de mistura ar-água e o correspondente efeito de bombagem causado na instalação (conhecido na literatura anglo-saxónica como efeito *air-lift*).

O efeito de bombagem por emulsão de ar ou efeito *air-lift* (Reinemann, 1987; Nenes et al., 1996) baseia-se na mobilização de um gradiente de pressão, ou de carga total, provocado pelas bolhas de gás injetadas na base do tubo ascendente, devido ao menor peso volúmico da emulsão ar-água da coluna dentro do tubo, comparativamente com o peso volúmico da coluna líquida que a precede a montante. Não obstante o ar deslocar-se normalmente a uma velocidade superior à da água no movimento ascendente, a interposição ar-água torna a densidade média da mistura dentro do tubo menor do que a do fluido a montante, sendo o gradiente de pressão provocado responsável pela ação de bombagem que é tanto mais eficiente quanto menor o deslizamento observado entre as fases.

Nos escoamentos de duas fases gás-líquido podem ocorrer diversos padrões de escoamento que dependem basicamente dos caudais de gás e de líquido e da geometria das tubagens. Os padrões de escoamento mais frequentemente observados na conduta ascendente de teste da instalação experimental utilizada neste trabalho de investigação, quando injetado ar na sua base foram, de acordo com a literatura da especialidade, os chamados *slug* e *slug-churn*. Um escoamento *slug* é caracterizado por grandes bolhas de gás de formato balístico e comprimento significativo que se desenvolvem transversalmente até às paredes do tubo, em toda a sua extensão, particularmente no caso de tubos verticais, frequentemente designadas por *gas slugs*, bolhas de Taylor ou bolhas longas (Fabre, 2003), intercaladas por grandes espaços preenchidos maioritariamente por tampões de líquido, que incluem pequenas bolhas dispersas de menores dimensões, frequentemente designados por *liquid slugs* (Figura 1.1).

Aumentando o caudal de ar até um determinado valor, as bolhas longas de um escoamento *slug* tendem a descolar da parede, alternando-se o padrão para *slug-churn* cujo aspecto é similar ao de um escoamento *slug* de certo modo intermitente, ou seja, onde as *slugs* de gás são intercaladas por um escoamento *churn* sendo este último um padrão extremamente instável caracterizado pela existência de múltiplas bolhas de gás de grandes e pequenas dimensões que interagem aleatoriamente com e no seio do líquido (Nicklin, 1962 e Kassab et al., 2009).

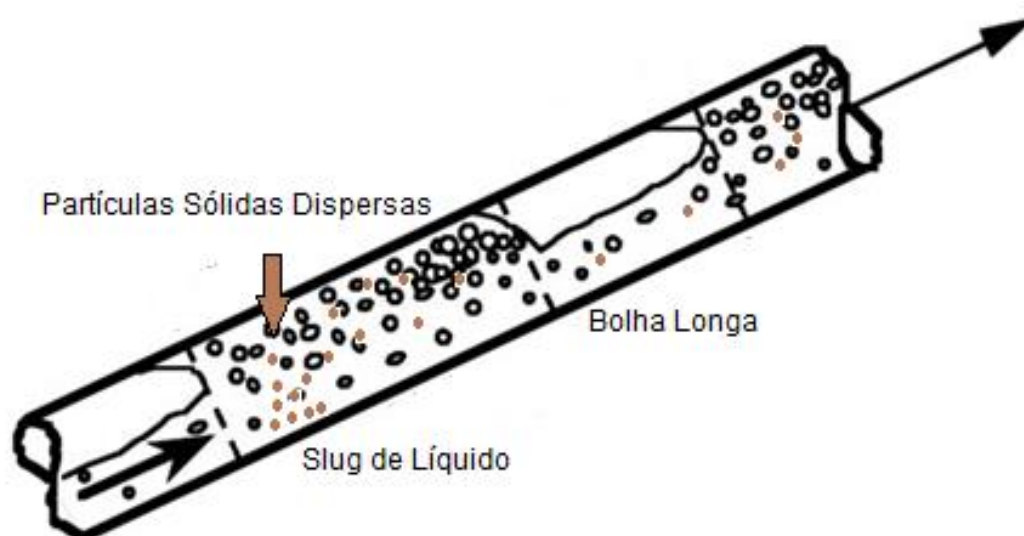


Figura 1.1 – Padrão de escoamento slug com três fases na tubagem (adaptado de Fabre, 2003).

1.2. Objetivo do trabalho

Pretende-se efetuar um estudo predominantemente experimental de estabelecimento, medição e análise do transporte sólido nas condições particulares de escoamentos ascendentes contendo duas fases (água e sólidos) e três fases (água, ar e sólidos) em regime permanente em condutas inclinadas sob pressão. O trabalho de investigação utiliza uma instalação experimental existente no LHRHA na qual são efetuadas medições laboratoriais de grandezas que permitem caracterizar o funcionamento hidráulico da instalação e o transporte sólido com e sem injeção de ar numa conduta de teste ascendente de diâmetro nominal de 90 mm em material transparente em acrílico. A instalação permite a realização de ensaios para diversas inclinações da conduta de teste, caudais de água e de ar e diferentes diâmetros das partículas da fase sólida.

Propõe-se ainda analisar a possibilidade de aplicação de um modelo simplificado de duas fases (água-ar) desenvolvido em Diogo e Oliveira (2016), para simular o funcionamento hidráulico dos escoamentos de três fases (água-ar-sólidos) em regime permanente, considerando a fase

sólida incluída na fase líquida, bem como efetuar uma primeira abordagem à modelação das condições críticas, ou de início do transporte sólido, com base nos escoamentos de duas e três fases observados na instalação experimental.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, sendo descritas no primeiro capítulo algumas considerações gerais relativas aos escoamentos multifásicos em condutas sob pressão de sistemas de saneamento, bem como os principais objetivos do trabalho. No segundo capítulo são abordados alguns aspetos fundamentais dos escoamentos multifásicos pertinentes para análise efetuada, e as aproximações consideradas para a determinação das condições críticas de início de transporte sólido.

No terceiro capítulo, é descrita a instalação experimental e o equipamento utilizado, bem como o procedimento adotado para a obtenção de dados experimentais, dedicando-se o quarto capítulo à apresentação e análise dos resultados das medições experimentais efetuadas, de acordo com a metodologia exposta no capítulo anterior.

No quinto capítulo, é adaptado e aplicado o modelo numérico simplificado desenvolvido em Diogo e Oliveira (2016) para caracterização do escoamento de uma mistura água-ar-areia numa conduta elevatória ou ramo ascendente de sifão simulados na instalação experimental utilizada. No sexto capítulo é apresentada uma primeira aproximação para previsão das condições críticas de início de transporte sólido em condutas sob pressão ascendentes baseada no número de Shields e no número de Reynolds que poderá permitir o desenvolvimento de um modelo matemático para descrever o fenómeno físico em análise.

Conclui-se esta dissertação com o sétimo capítulo, onde se sintetizam os trabalhos realizados, se apresentam os principais resultados obtidos da fase experimental e se estabelecem as principais conclusões relativamente à aplicação efetuada dos modelos considerados.

2. ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS E APROXIMAÇÃO PARA AS CONDIÇÕES DE INÍCIO DE TRANSPORTE SÓLIDO

Analisam-se neste capítulo os aspetos fundamentais dos escoamentos multifásicos relacionados com o deslizamento entre fases, as leis de resistência dos escoamentos turbulentos utilizadas, a adaptação dos termos da equação de energia em escoamentos de três fases e as condições críticas de transporte sólido. Do mesmo modo que nas aplicações hidráulicas correntes, devido à baixa viscosidade cinemática da água, ν , o escoamento de fase única, que ocorre nas tubagens da instalação experimental utilizada, e de duas fases, que ocorre na sua conduta ascendente de teste, é turbulento. A vorticidade e flutuações de velocidade característicos dos regimes turbulentos resultam bastante aumentados quando se procede à injeção de ar em regime permanente na base da conduta ascendente, no escoamento de três fases.

A distinção entre escoamentos laminares e turbulentos é normalmente efetuada com base no número de Reynolds, Re , que é um parâmetro adimensional proporcional à relação entre as forças de inércia e as forças de viscosidade. Nos escoamentos sob pressão numa conduta com diâmetro interno, D , e velocidade média, U , é frequentemente definido por:

$$Re = \frac{U \times D}{\nu} \quad (1)$$

Em escoamentos de fase única, para Re superiores a valores de ordem de 2000 a 3000, normalmente o escoamento é turbulento.

As velocidades médias reais do ar, U_a , água, U_w , e sólidos, U_s , numa tubagem inclinada de diâmetro interno, D , e área da secção transversal, A , podem ser aproximadas por (Yoshinaga e Sato, 1996; Kassab et al., 2007; Diogo e Oliveira, 2016):

$$U_a = \frac{Q_a}{f_a \times A} \quad (2)$$

$$U_w = \frac{Q_w}{f_w \times A} \quad (3)$$

$$U_s = \frac{Q_s}{f_s \times A} \quad (4)$$

Onde Q_a , Q_w e Q_s , são, respetivamente, os caudais de ar, água e sólidos, e f_a , f_w e f_s são as frações médias ocupadas dentro da tubagem pela água, ar e sólidos, respetivamente. É possível observar experimentalmente que estas fases se deslocam com velocidades médias diferentes numa conduta ascendente, apresentando um deslizamento entre si. O ar desloca-se com uma velocidade média superior à velocidade média da mistura, U_m :

$$U_m = \frac{Q_w + Q_a + Q_s}{A} \quad (5)$$

($U_a > U_m$) e as fases líquida e sólida com velocidades médias inferiores ($U_w < U_m$ e $U_s < U_m$).

Existem diversas alternativas propostas para descrever fisicamente este deslizamento entre fases. Admite-se nesta dissertação, para a velocidade média do ar, uma aproximação similar à considerada em Diogo e Oliveira (2016), para escoamentos de duas fases água-ar, assumindo simplifadamente que a fase sólida do escoamento de três fases pode ser incluída na fase líquida. Ou seja, considera-se o caudal sólido como praticamente desprezável no cálculo do funcionamento hidráulico das instalações, para uma dada gama de valores em que o mesmo seja suficientemente pequeno quando comparado com os caudais de água e de ar. A velocidade média do ar é então aproximada por:

$$\frac{Q_a}{f_a \times A} = C \times \frac{Q_w + Q_a}{A} + U_{a0} \times FA \quad (6)$$

Esta equação pode ser considerada como uma extensão do conhecido “drift flux model” (e.g. Ibiki e Ishii, 2002; Kato et al., 1975; Nicklin et al., 1962; Nicklin et al., 1963;) da literatura anglo-saxónica (i.e., modelo de deslizamento entre fases), onde C é frequentemente designado por parâmetro de distribuição e U_{a0} é originalmente a velocidade média do ar num líquido em repouso dentro de um tubo vertical, admitindo neste caso um factor de aceleração, FA , (Krishna et al., 1999) tal como utilizado e determinado experimentalmente em Diogo e Oliveira (2016). U_{a0} é aproximado por $U_{a0} = 0,35 \times \sqrt{g \times D}$, onde g é a aceleração da gravidade, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, e C é frequentemente assumido como tomando o valor de 1,2, particularmente para escoamentos *slug*, por associação com o quociente entre as velocidades máxima e média do perfil de velocidades na secção transversal de um escoamento turbulento (Diogo e Oliveira, 2013).

Como a relação entre as frações de água e de ar pode ser expressa por $f_w = 1 - f_a$, substituindo na Equação (6) e resolvendo, resulta para a fração líquida, f_w :

$$f_w = 1 - \frac{Q_a}{C \times (Q_w + Q_a) + A \times U_{a0} \times FA} \quad (7)$$

A determinação das perdas de carga num escoamento turbulento de três fases água-ar-sólidos é um processo complexo. É, no entanto, possível utilizar fórmulas empíricas aproximadas para escoamentos de duas fases como a de Chisholm e Laird (1958) adaptadas de forma a determinar as perdas de carga por unidade de comprimento de tubo para a mistura de três fases admitindo que a fase sólida está incluída na fase líquida. Nesse caso a perda de carga unitária da mistura, J_m , pode ser determinada em função da perda de carga unitária da fase líquida, J_w , e da perda de carga unitária do escoamento de ar, J_a , como se se escoassem isoladamente na tubagem, com utilização de uma constante obtida experimentalmente dependente dos regimes da fase líquida e gasosa, $C_{wa}=21$, que aparenta ser aplicável mesmo para pequenas frações de fluido,

$$J_m = J_w + C_{wa} \times (J_w \times J_a)^{\frac{1}{2}} + J_a \quad (8)$$

J_w e J_a podem ser calculados com base em leis empíricas dos escoamentos uniformes de fase única. No presente trabalho, para a fase líquida, foi utilizada a fórmula de Scimemi para tubos lisos, ou seja, para tubos novos de fibrocimento liso,

$$J_w = \left(\frac{Q_w}{50,5 \times D^{2,68}} \right)^{\frac{1}{0,56}} \quad (9)$$

De facto, segundo Diogo e Vilela (2014), esta fórmula demonstrou ser bem adequada para tubagens de plástico, tais como as tubagens existentes na instalação experimental utilizada. Para as fases líquida e gasosa, foi utilizada a fórmula de Blasius que é válida para tubos lisos até números de Reynolds da ordem de 10^5 e que pode ser expressa sob a forma adimensional por:

$$f = 0,3164 \times Re^{-0,25} \quad (10)$$

Onde f é o factor de resistência ou factor de atrito, definido por:

$$f = \frac{JD}{\frac{U^2}{2g}} \quad (11)$$

Sendo J a perda de carga por unidade de comprimento de tubo, ou perda de carga unitária.

Substituindo as expressões de Re e de f na Equação (10) resulta:

$$J = 0,3164 \times \left(\frac{4}{\pi}\right)^{1,75} \times \frac{v^{0,25} \times Q^{1,75}}{2g \times D^{4,75}} \quad (12)$$

Ou simplificando:

$$J = \frac{0,2414 \times v^{0,25}}{g} \times D^{-4,75} \times Q^{1,75} \quad (13)$$

A viscosidade cinemática da água, ν_w , foi aproximada em função da temperatura, T (°C), utilizando a seguinte expressão (Diogo e Vilela, 2014):

$$\nu_w = \frac{1,78 \times 10^{-6}}{1 + 0,0337 \times T + 0,000221 \times T^2} \quad (14)$$

No caso da viscosidade cinemática do ar, ν_a , foi considerado, por simplificação, sempre um valor constante de 15×10^{-6} .

A energia mecânica total por unidade de peso de líquido, ou carga total, H , medida em relação a um plano horizontal de referência, vem dada pelo trinómio de Bernoulli que inclui a cota geométrica, z , a altura piezométrica, p/γ , a altura cinética, $\alpha \times \frac{U^2}{2g}$, para uma dada secção de um tubo de fluxo em escoamento permanente é dada por (Quintela, 2014):

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \times \frac{U^2}{2g} \quad (15)$$

Onde p é a pressão, γ peso volúmico do fluido, e α o coeficiente de Coriolis.

Admite-se nesta dissertação para a obtenção dos escoamentos multifásicos por simplificação, uma lei hidrostática de pressões na secção transversal ($z + p/\gamma \approx \text{constante}$). A altura cinética é obtida simplifadamente admitindo um valor do coeficiente de Coriolis aproximadamente igual a 1 (velocidade aproximadamente constante na secção transversal). É assumido, no entanto, um agravamento deste valor, utilizando uma fração de fluido, f_w , menor, como se a mistura de duas ou três fases fosse homogénea, isto é, considerando um valor inferior à fração de fluido que se verifica na realidade devido ao desfasamento entre fases.

As condições de início de transporte sólido por arrastamento, ou críticas, em escoamentos com superfície livre foram aproximadas por Shields que relacionou experimentalmente um parâmetro adimensional:

$$\frac{\tau_c}{(Y_s - Y_w) \times D_{S_{50}}} \quad (16)$$

frequentemente designado por parâmetro ou número de Shields, com o número de Reynolds de atrito, calculado com base na velocidade de atrito e no diâmetro das partículas sólidas, por:

$$Re = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho_w}} \times \frac{D_{S_{50}}}{\nu} \quad (17)$$

Onde τ_c é a tensão tangencial média na fronteira sólida, calculada para a velocidade crítica, ou tensão crítica de arrastamento, $D_{S_{50}}$ o diâmetro mediano das partículas sólidas, Y_s o peso volúmico das partículas sólidas e Y_w e ρ_w são, respectivamente, o peso volúmico e a massa volúmica da água.

A relação experimental obtida foi representada por Shields num gráfico com eixos graduados em escalas logarítmicas comumente conhecido como diagrama de Shields (Quintela, 2014). A curva obtida experimentalmente apresenta um ramo inicial descendente seguido de um ramo ascendente, sendo que, para valores de Re críticos superiores a 500, o número de Shields atinge um valor constante no diagrama de aproximadamente 0,06. Este valor foi posteriormente reduzido para diferentes granulometrias e diferentes condições experimentais consideradas por diversos autores, podendo atingir valores da ordem de 0,03.

O número de Shields é utilizado em Peysson et al. (2009) para estudar a condição crítica de início de transporte sólido em escoamentos sob pressão em condutas horizontais. No trabalho de investigação que tem vindo a ser desenvolvido nesta área (Diogo e Moura, não datado) propõe-se igualmente a utilização do número de Shields para a determinação da condição de início do transporte sólido no caso de escoamentos ascendentes em condutas inclinadas que são objeto do estudo da presente dissertação (condutas elevatórias de sistemas de bombagem ou ramos ascendentes de sifões invertidos).

3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E PROCEDIMENTO

3.1. Instalação, equipamento e processo de medição

A instalação experimental utilizada encontra-se representada esquematicamente na Figura 3.1.

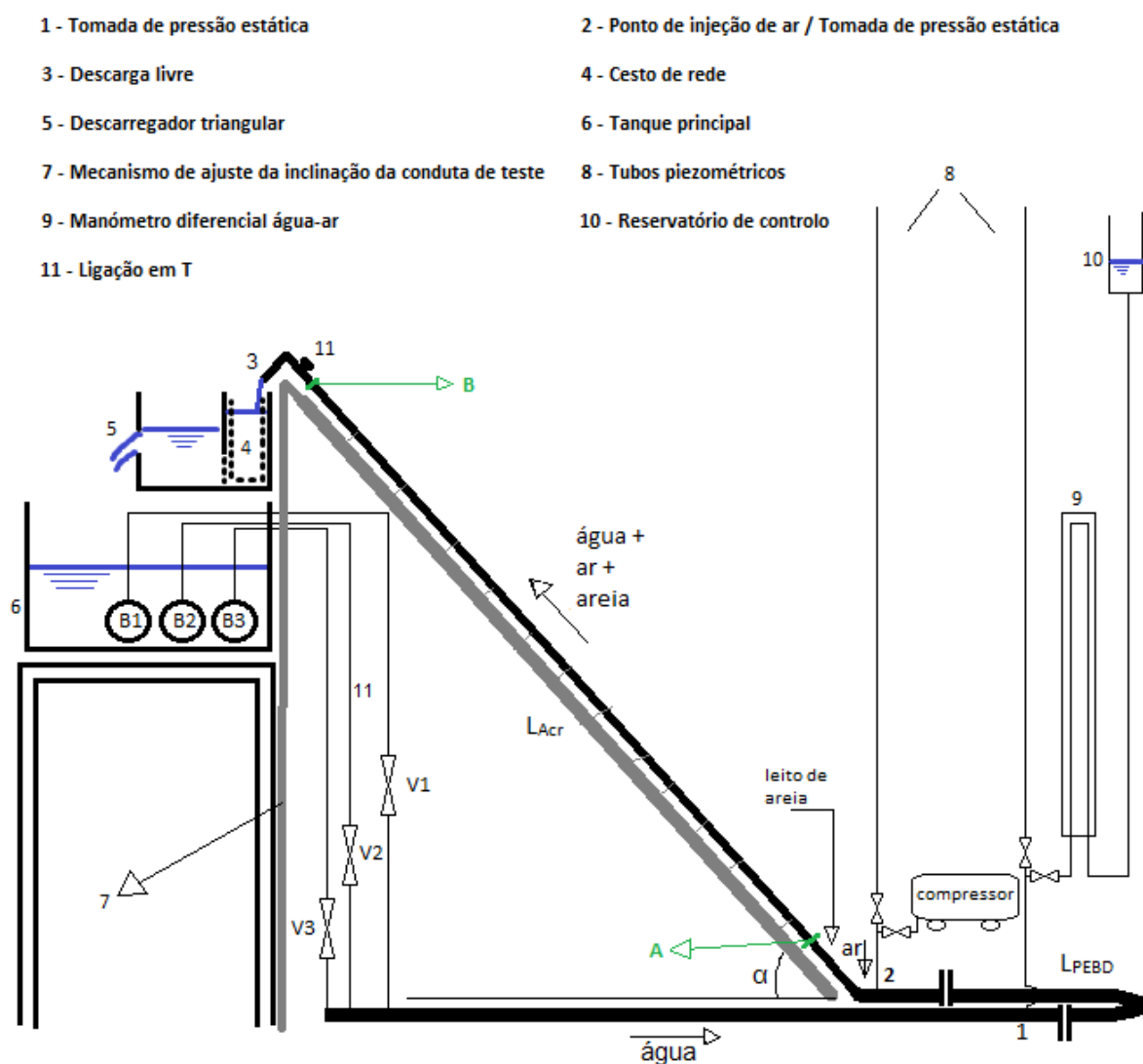


Figura 3.1- Representação esquemática da instalação experimental.

A instalação é constituída por um circuito fechado e inclui duas condutas principais instaladas em série. A primeira conduta é em polietileno de baixa densidade (PEBD), tem um diâmetro nominal de 110 mm, um diâmetro interno de 94,5 mm e contém na sua parte final um trecho

com comprimento, L_{PEBD} , de 16,64 m, representado esquematicamente na figura, entre as tomadas nas secções 1 e 2, e que permite simular indiretamente o escoamento permanente de um ramo descendente de um sifão. A segunda conduta, ligada a jusante da primeira, após a secção 2, por intermédio de um acessório de redução e de uma tubagem flexível, tem uma descarga livre a jusante (3), é transparente, permite simular o ramo ascendente de um sifão, ou de uma conduta elevatória e é a conduta principal de teste da instalação. O trecho ascendente é em acrílico, tem um comprimento, L_{Acr} , de 6,125 m, um diâmetro nominal de 90 mm e um diâmetro interno de 84 mm. As duas tubagens principais ligadas em série são alimentadas por três bombas submersíveis instaladas em paralelo no reservatório principal da instalação, bombas B1, B2 e B3 representadas na Figura 3.1. O tubo acrílico descarrega de forma livre num tanque secundário que inclui dois compartimentos em série separados por uma placa estabilizadora e que está munido de um cesto de rede (4) para recolha da areia transportada, instalado no primeiro. O segundo compartimento alimenta o reservatório principal através de um descarregador triangular de soleira delgada (5), fechando assim o circuito.

As três bombas, cada uma com 1 kW de potência, uma altura total de elevação máxima (em vazio) de 9 m e um caudal máximo (em curto-circuito) de $18 \text{ m}^3/\text{h}$, estão imersas no reservatório principal de alimentação da instalação (6) que tem 1 m^3 de capacidade total. O equipamento elevatório introduz a água no circuito por intermédio de três condutas de policloreto de vinilo (PVC) plastificado com 35 mm de diâmetro interno, instaladas imediatamente a jusante das secções de descarga das bombas, e que conduzem a água até à conduta comum de PEBD, de diâmetro nominal de 110 mm, que alimenta a conduta ascendente de teste. O caudal de água escoado no circuito hidráulico é regulado por três válvulas instaladas nas condutas de PVC plastificado à saída das bombas (válvulas V1, V2 e V3 da Figura 3.1) que permitem obter as diversas velocidades de escoamento pretendidas nos ensaios experimentais.

O tubo acrílico é apoiado numa viga de 6 m de comprimento, cuja extremidade de jusante é possível deslocar na direção vertical, através de um dispositivo constituído por um sistema de dois tubos concêntricos (7), um interno móvel e o outro externo fixo ligado à estrutura de suporte do tanque. Este dispositivo torna possível a modificação da inclinação do tubo acrílico de teste, de acordo com o ângulo de inclinação, α , pretendido.

Em ambas as secções 1 e 2 da conduta de PEBD existe um orifício que, no caso da secção de montante, 1, funciona sempre como tomada de pressão estática que pode ser ligada alternativamente a um tubo piezométrico (8) ou, para cargas totais elevadas, a um manómetro diferencial água-ar (9). Para escoamentos de três fases água-ar-areia, o orifício existente na secção de jusante, 2, funciona como meio de entrada do ar comprimido nas condutas da instalação proveniente do compressor. Para escoamentos de duas fases água-sólidos, o orifício instalado na secção 2 funciona como tomada de pressão estática ligado igualmente a um tubo

piezométrico (8), ou alternativamente, para grandes cargas totais, a um manómetro diferencial de mercúrio. Em conjunto com o conhecimento do caudal escoado, medido através do descarregador triangular, os tubos piezométricos ligados às tomadas de pressão estática permitem determinar diretamente a carga total nas respetivas secções, bem como a perda de carga contínua que ocorre entre as mesmas, em regime permanente, na tubagem de PEBD de 94,5 mm de diâmetro. Para cargas totais elevadas, é utilizado, em substituição do tubo piezométrico de montante, um manómetro diferencial água/ar, ligado à tomada de pressão estática 1 e a um reservatório de controlo de cota pré-determinada (10). No caso do escoamento de duas fases água/sólidos, para cargas totais elevadas, foi ainda utilizado exceccionalmente um manómetro diferencial de mercúrio ligado às duas tomadas de pressão estática que permite determinar a perda de carga ocorrida na tubagem entre as duas tomadas, bem como, consequentemente, a carga total na secção de jusante, 2, conhecida a carga total na secção de montante, 1.

Na parte superior da conduta de acrílico encontra-se instalado um T, com a mesma secção e munido de uma tampa em rosca, que permite a introdução manual de areia na conduta (11) numa situação de repouso, previamente à execução dos ensaios. A areia introduzida desloca-se por gravidade, com o líquido em repouso, para cotas inferiores, formando um pequeno leito de areia no interior do tubo acrílico na proximidade da junta flexível.

O tanque secundário de descarga tem uma área de base $1,25 \times 0,6 \text{ m}^2$ e altura 0,475 m. A divisão em dois compartimentos que é efetuada através de uma placa com duas aberturas munidas de malha de rede permite manter estável o nível de água no compartimento de jusante, possibilitando leituras fiáveis da altura de água após garantido o regime permanente no circuito, e prevenindo adicionalmente a passagem de resíduos abrasivos inconvenientes para o bom funcionamento das bombas. O descarregador triangular que se encontra instalado na parede vertical do compartimento de jusante tem um ângulo de abertura de 90 graus, apresenta contração completa e tem a sua crista localizada 100 mm acima da base horizontal do tanque (Diogo e Gomes, 2011). Duas réguas graduadas localizadas em lados opostos da parede lateral do compartimento de jusante permitem efetuar a leitura da altura de água h (m) medida acima da crista do descarregador, o que possibilita a determinação do caudal escoado, Q_w (m^3/s), uma vez calibrado o descarregador. Segundo Diogo e Oliveira (2013), a lei de vazão do descarregador pode ser aproximada pela equação:

$$Q_w = 1,40 \times h^{2,5} \quad (18)$$

O ar é fornecido através de um compressor de 2,250 kW de potência de entrada que inclui um tanque de 50 litros. Este passa depois por uma câmara que possui um manómetro, um termómetro e uma válvula de entrada que permite a regulação da pressão na câmara, e da qual

é enviado por uma tubagem de ligação de PVC plastificado de diâmetro relativamente pequeno e que tem imbutido um de quatro bocais (constituídos por tubos metálicos de diâmetro interno na secção mais estreita de 1,05 mm, 1,5 mm, 2 mm e 2,5 mm) antes de ser inserido no sistema através de uma ligação em T com aumento de secção, efetuada ligeiramente antes da junta flexível.

Os bocais convergentes sob um suficiente gradiente de pressões permitem manter o escoamento em regime sónico no estrangulamento, possibilitando a medição do caudal de ar em regime permanente, uma vez regulada a pressão na câmara, através da seguinte expressão (Franzini e Finnemore, 1997; Diogo e Gomes, 2011), admitindo um escoamento sem atrito, isotrópico e adiabático:

$$\rho_a \times Q_a = \sqrt{\frac{k}{R} \times \left(\frac{2}{(k+1)}\right)^{\frac{(k+1)}{(k-1)}}} \times A_1 \times \frac{p_0}{\sqrt{T_0}} \quad (19)$$

Onde R é a constante dos gases ideais (287 Nm/kg/K, para o ar), k a constante adiabática (que toma o valor de 1,4 para o ar), A_1 a secção mais estreita do bocal em m^2 , p_0 a pressão absoluta em N/m^2 e T_0 a temperatura do ar em graus Kelvin no ponto de estagnação (câmara de regulação a montante do bocal). O caudal de ar injetado, Q_a (em m^3/s), referido a uma temperatura de $20^\circ C$ e à pressão atmosférica normal ($p_{atm, norm} = 101234 N/m^2$), ou seja, correspondente a uma massa volúmica do ar, $\rho_a \approx 1.205 kg/m^3$, de acordo com Diogo e Gomes (2011), vem dado por:

$$Q_a = 0,03354 \times \frac{A_1 \times p_0}{\sqrt{T_0 + 273,15}} \quad (20)$$

Com T_0 em graus Celsius. A pressão absoluta p_0 foi calculada somando a pressão relativa medida no manómetro instalado na câmara de montante (ponto de estagnação) com a pressão atmosférica local admitida, simplificadamente, constante e igual a $100700 N/m^2$.

Para a execução dos ensaios, foram inseridas na conduta amostras de areia com um volume estimado em cerca de 1 L, densidade, s , de aproximadamente 2,65 e uma massa seca, mts , que foi inicialmente medida numa balança de precisão e posteriormente fixada num valor constante de 1618,3 g. A gama de diâmetros característicos dos grãos, D_s , e a massa total húmida, mth , para cada amostra medida, segundo condições análogas de compactação e preenchimento dos vazios, por forma a obter teores de humidade comparáveis, são apresentadas na Tabela 3.1. As amostras, para os correspondentes diâmetros D_s limite, foram obtidas através da passagem de uma areia de rio por peneiros graduados com diâmetros sucessivamente inferiores de malha 9,52, 4,76, 2,36, 1,18 e 0,425. Após calibração de todos os elementos, uma vez regulados os

órgãos de controlo da instalação e antes de cada novo ensaio, cada amostra de areia foi colocada diretamente na tubagem de acrílico por intermédio da ligação em T munida com tampa em rosca.

Tabela 3.1 – Gama de diâmetros dos grãos e massa total húmida de aproximadamente 1 L, sob condições de humidade comparáveis, das amostras de areia utilizadas.

amostra	A	B	C	D
Diâmetro das partículas sólidas Ds (mm)	0,425 a 1,18	1,18 a 2,36	2,36 a 4,76	4,76 a 9,52
Massa húmida mth (g)	1860,9	1778,8	1676,4	1660,3

Concluído cada ensaio, a areia recolhida no cesto de rede foi pesada húmida na balança de precisão sob condições análogas de humidade que as estabelecidas aquando das medições apresentadas na Tabela 3.1. Admitindo um teor de humidade constante para cada amostra nos diferentes ensaios, o caudal mássico sólido (seco), M_s , correspondente à massa recolhida no cesto medida em peso húmido, mmh , pode assim ser aproximado por:

$$M_s = \left[mmh \times \frac{mts}{mth} \right] / t_L \quad (21)$$

Onde t_L é o tempo de duração do ensaio, ou seja, o tempo que demorou a ser transportada, a areia recolhida no cesto de rede. Na maior parte dos ensaios com escoamento de duas fases água-areia, este tempo é equivalente ao que a amostra de areia demorou a percorrer um comprimento, L , de 6 m, no ramo ascendente, entre dois pontos predefinidos (pontos A e B da Figura 3.1).

3.2. Procedimento experimental

3.2.1. Transporte sólido em escoamento de duas fases água-areia

Previamente a qualquer ensaio efetuado para escoamentos de duas fases e de três fases, foram efetuados testes preliminares, quer na instalação experimental, quer nos diversos equipamentos utilizados e nos equipamentos de medição, para verificação do seu adequado funcionamento. O nivelamento do tanque de descarga, o “zero” do descarregador triangular e o funcionamento da balança de precisão, manómetro de ar, cronómetro e termómetros foram devidamente verificados. Os tubos piezométricos foram purgados previamente à execução dos ensaios e foi verificado frequentemente o seu funcionamento adequado relativamente à existência de ar a ser removido proveniente das tubagens.

Antes de iniciar um conjunto de ensaios, a inclinação do tubo em acrílico que funciona como conduta de teste é regulada através do mecanismo existente na extremidade da viga de aço que suporta o tubo. Para cada uma das três inclinações estudadas ($\alpha=30^\circ$, 46° ou 58°) são marcados os pontos A e B na base e no topo da base da tubagem de acrílico, com um espaçamento de 6 metros entre eles. É então selecionada uma das quatro areias de diferentes granulometrias para estudo e pesada na balança de precisão uma massa seca de 1618,3 g da mesma. Após pesagem, a amostra é introduzida na conduta de teste depois de aberta a tampa em rosca presente no topo da ligação em T. Concluída a introdução da areia, é fechada a tampa e são ligadas as bombas com as válvulas de controlo de caudais fechadas, ou seja, funcionando em vazio. O escoamento no circuito hidráulico da instalação é iniciado abrindo as válvulas de modo a ser obtido o valor de caudal desejado. Uma vez estabelecido o regime permanente, é iniciado o transporte sólido na conduta de teste, movendo-se normalmente a totalidade da amostra de areia em conjunto ou por partes, seja por arrastamento ao longo do leito, seja predominantemente por saltação e suspensão. Quando a totalidade da amostra de areia passa o ponto A, é iniciado o cronómetro, e é contabilizado o intervalo de tempo que a mesma demora a ultrapassar na totalidade o ponto B, ou até que o tempo do ensaio atinja uma duração máxima de cerca de 600 segundos, momento em que as válvulas são fechadas e a contagem do tempo é dada por terminada. O saco de rede instalado no cesto que contém a areia no tanque de descarga é então retirado e levemente sacudido por forma a garantir uma taxa de humidade praticamente constante em todas as amostras de areia retiradas da instalação, sendo a areia pesada húmida numa balança de precisão.

No decorrer dos ensaios, são medidos a temperatura da água, T_w , no tanque principal (utilizando um termómetro colocado na parede interna do mesmo), a altura de água no tanque de descarga, h , através das régua de medição presentes nas laterais desse tanque e o valor da cota piezométrica nas duas tomadas de pressão estática criadas para o efeito (pontos 1 e 2 da Figura 3.1) quer através de tubos piezométricos, quer de um manómetro diferencial água-ar ligado a um recipiente de cota piezométrica constante para cargas mais elevadas. Estas medições permitem a determinação do caudal de água, Q_w , (Equação (18)), do caudal mássico sólido, M_s , (equação (21)), bem como da perda de carga total, ΔH , entre as duas tomadas de pressão estática, $\Delta H = (Z + p/\gamma)_1 - (Z + p/\gamma)_2$, onde $(Z+p/\gamma)_1$ e $(Z+p/\gamma)_2$ são, respetivamente, a cota piezométrica nas secções 1 e 2. A perda de carga unitária, J_{PEBD} , que ocorre no tubo de PEBD de comprimento, L_{PEBD} , entre as tomadas 1 e 2, vem dada por $J_{PEBD} = \Delta H/L_{PEBD}$. Conhecida a lei de resistência do escoamento aplicável na tubagem de PEBD (previamente determinada como podendo ser aproximada pela equação (9)), o valor de J_{PEBD} assim calculado

experimentalmente pôde então servir como elemento adicional de controlo das experiências e medições efetuadas.

Concluído o ensaio, novas amostras de areias são sucessivamente sujeitas a um controlo de pesagem e inseridas no tubo de teste para a realização de novos ensaios com velocidades médias de escoamento sucessivamente superiores, até se atingir o caudal máximo que é possível escoar na instalação em função da capacidade das bombas. Este procedimento é então repetido para novos conjuntos de ensaios, cada um para uma determinada amostra de areia das restantes granulometrias. Ensaçadas todas as amostras, uma nova inclinação do ramo ascendente é selecionada, repetindo-se assim o procedimento, até todos os ângulos serem testados.

3.2.2. Transporte sólido em escoamento de três fases água-ar-areia

Do mesmo modo que para o estudo do transporte sólido do escoamento de duas fases, é selecionada inicialmente uma inclinação do tubo acrílico, atuando no mecanismo existente na extremidade da viga de aço que serve de suporte ao tubo. São então efetuados três conjuntos completos de testes para três velocidades médias iniciais de água estabelecidas na conduta ascendente de respetivamente 0,3 m/s, 0,45 m/s e 0,60 m/s, e, para cada velocidade, são testadas as quatro amostras de areia, de granulometria definida na Tabela 3.1, para caudais de ar introduzidos na base da conduta ascendente de teste sucessivamente crescentes até ser atingida a capacidade máxima do compressor. Concluído o conjunto completo de ensaios para uma inclinação, é repetido o procedimento, até serem testadas todas as três inclinações pretendidas (30°, 46° e 58°).

Fixada uma inclinação da conduta ascendente, são previamente reguladas as válvulas de controlo de caudal à saída das bombas, de modo a obter um caudal inicial de água correspondente a uma de três velocidades médias iniciais no interior do tubo acrílico, U_{w0} , pré-fixadas em 0,30m/s; 0,45m/s ou 0,60m/s. Regulada a velocidade pretendida, as bombas são então desligadas. Na situação de repouso, a amostra de areia a utilizar é sujeita a controlo de pesagem (com uma massa seca de 1618,3g e massa húmida de acordo com o estabelecido na Tabela 3.1) e a areia é introduzida na instalação após a abertura da tampa em rosca existente na ligação em T, sendo depois novamente fechada. É colocado o bocal a ser utilizado à saída do compressor com as válvulas do compressor e de seccionamento do ar fechadas. As bombas são ligadas atingindo o regime permanente com um circuito *bypass* ou de retorno ao reservatório de alimentação e a pressão de ar na câmara é aproximada para o caudal de ar pretendido com a válvula de seccionamento de ar fechada. O circuito de *bypass* é fechado, a válvula de seccionamento de ar é aberta e a pressão na câmara de regulação ajustada com maior precisão ao caudal de ar pretendido, dando-se início ao escoamento multifásico e à cronometragem do tempo com caudais de água e de ar introduzidos e escoados a uma taxa constante.

O tempo de duração dos ensaios foi fixado em geral em 600 segundos, excetuando-se a situação de se ter verificado visualmente o transporte sólido de toda a areia existente no tubo num intervalo de tempo inferior, sendo então parado o cronómetro. A duração foi fixada em valores suficientemente grandes, de modo a minimizar eventuais erros nas medições, ou atenuar pequenas variações de regime de funcionamento que podem eventualmente ocorrer no início e fim de cada ensaio, como por exemplo o tempo de reação no acionamento do cronómetro, flutuações no nível dos tubos piezométricos, ou, eventualmente, do nível de água no tanque onde está instalado o descarregador triangular. Durante a experiência é efetuada a medição da altura de água, h , nas régua graduadas existentes no tanque de descarga, cota piezométrica na tomada de pressão estática a montante do ponto de injeção de ar, $(Z+p/\gamma)_1$, (no ponto 1 da Figura 3.1) através do equipamento montado para o efeito, temperatura da água no tanque principal, T_w , e pressão e temperatura do ar na câmara de saída do compressor (p_0 e T_0 respetivamente). Com a conclusão do ensaio, a válvula de seccionamento do ar é fechada e as bombas são desligadas. Tal como para o escoamento de duas fases, o saco de rede com areia é retirado do tanque de descarga e levemente sacudido. A areia é retirada do saco com um teor de humidade admitido praticamente constante entre ensaios da mesma amostra e pesada numa balança de precisão. No final de cada ensaio, a cota piezométrica no ponto de injeção de ar, $(Z + p/\gamma)_2$, pode ser estimada a partir da cota piezométrica na secção 1 a montante, $(Z + p/\gamma)_1$, por aplicação da equação de energia $(Z + p/\gamma)_2 = (Z + p/\gamma)_1 - J_{PEBD} \times L_{PEBD}$, onde D_{PEBD} é o diâmetro interno do tubo de PEBD.

Uma vez concluído o procedimento anteriormente descrito, passa-se ao caudal de ar seguinte e repete-se o processo, até serem ensaiados todos os caudais de ar pretendidos, todas as amostras de areia, todas as velocidades de água pré-estabelecidas e todas as inclinações de tubagem desejadas. Ciclicamente é efetuada uma limpeza da instalação, de modo a eliminar quaisquer porções de ar ou de areia que possam ter permanecido indevidamente no seu interior.

4. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE TRANSPORTE SÓLIDO

4.1. Escoamento de duas fases água-areia

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os resultados das medições experimentais efetuadas do caudal mássico sólido transportado em função do caudal de água estabelecido no escoamento de duas fases, tendo como parâmetro os diâmetros das partículas sólidas das amostras de areia testadas constantes na Tabela 3.1, respetivamente para os ângulos de inclinação da conduta ascendente de teste de $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 46^\circ$ e $\alpha = 58^\circ$ (dados constantes na Tabela A.1 do Anexo A). Para todos os ângulos e diâmetros dos grãos das amostras, é possível observar que o caudal sólido aumenta significativamente quando aumenta o caudal de água escoado e consequentemente a velocidade média do escoamento na conduta ascendente, aparentando as curvas resultantes seguir uma lei de potência, a partir da condição crítica de início do transporte sólido, com expoente superior a um.

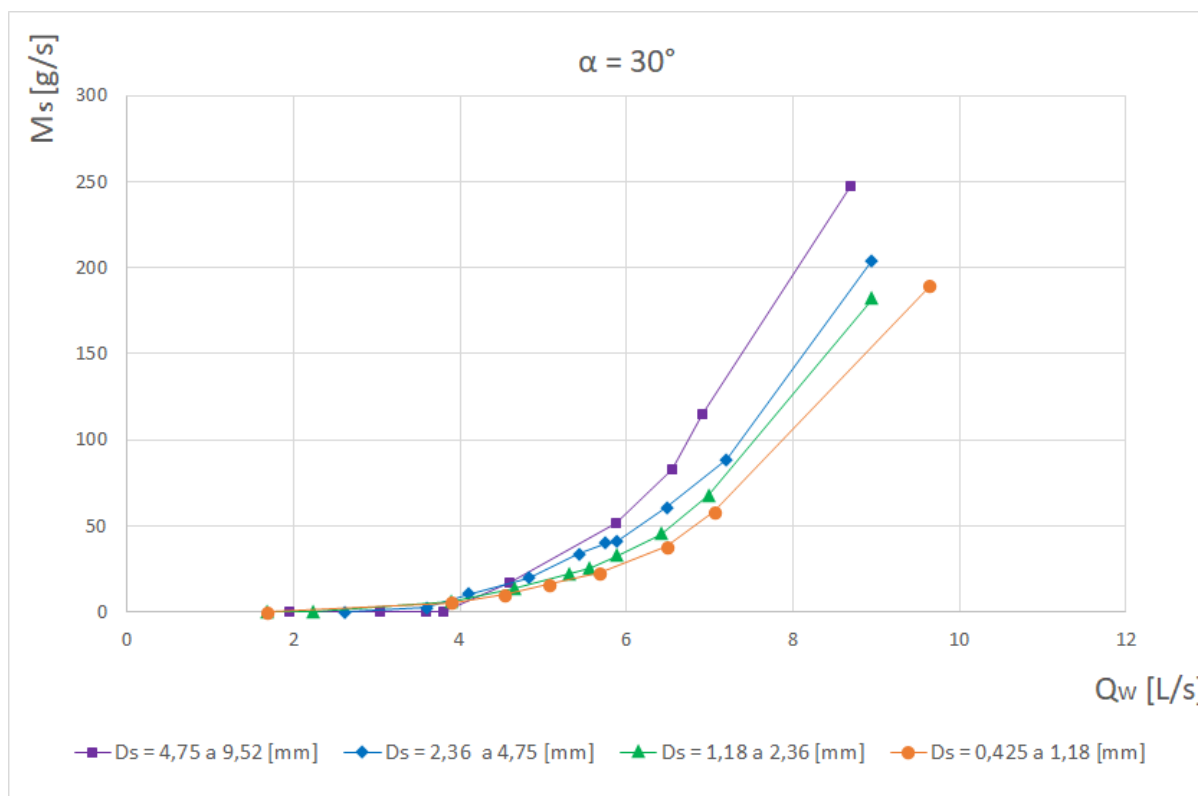


Figura 4.1 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

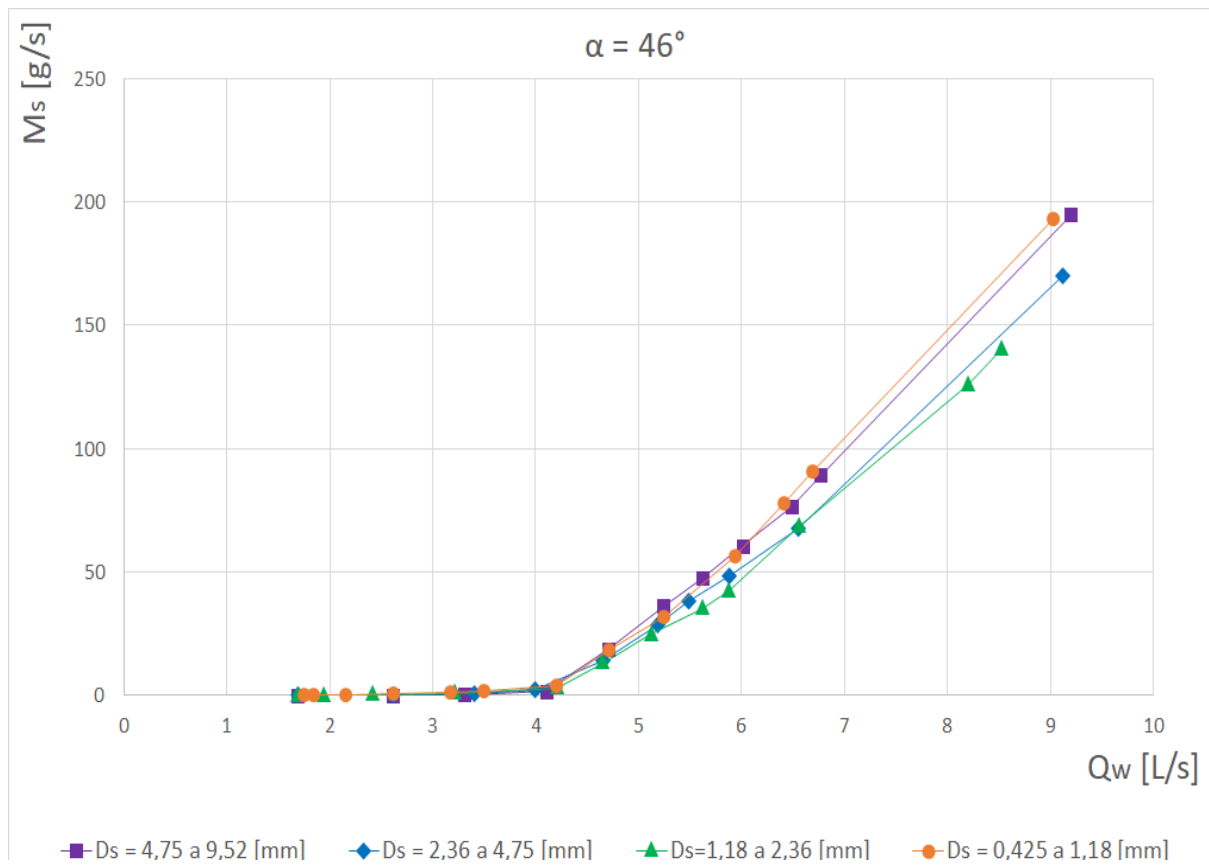


Figura 4.2 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

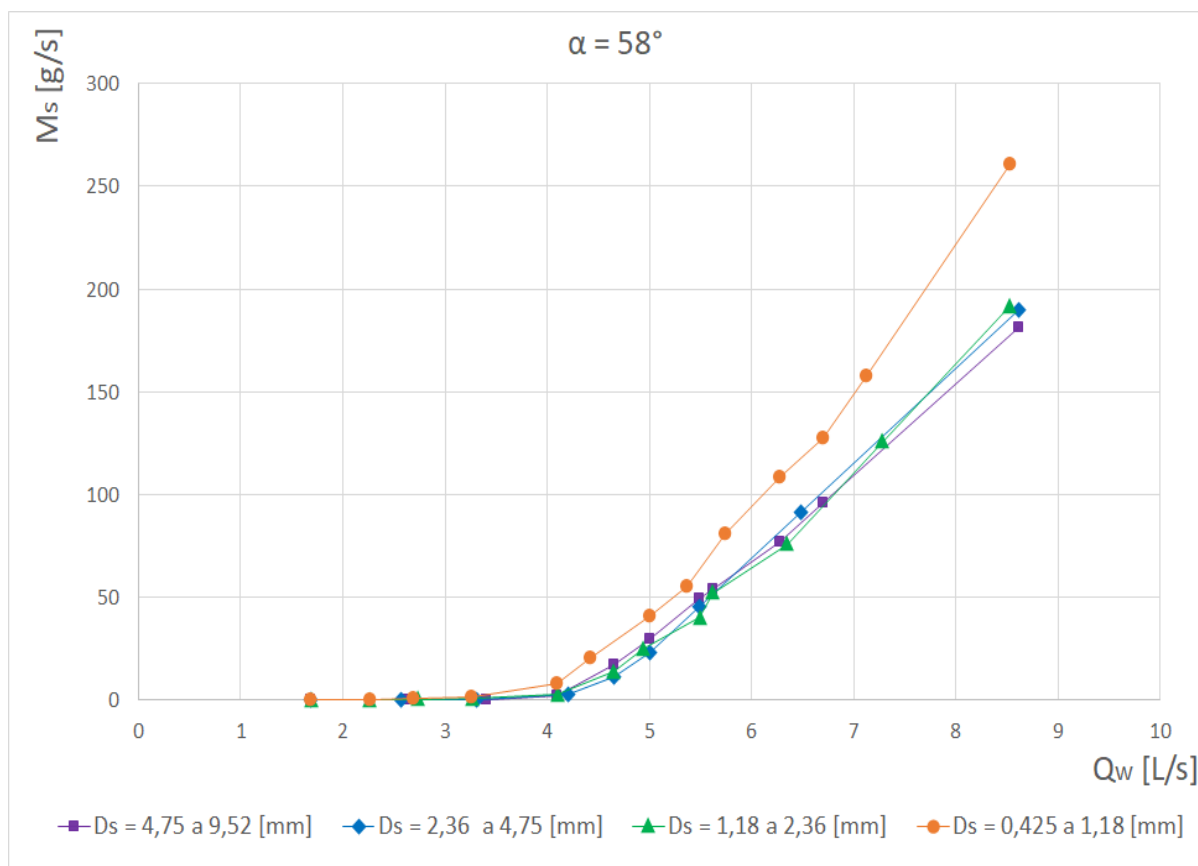


Figura 4.3 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

Como se pode ver nas figuras, a influência da inclinação da tubagem e principalmente da granulometria das amostras testadas para uma dada inclinação da conduta ascendente no caudal sólido transportado não parece, contudo, trivial, ocorrendo zonas nos gráficos onde amostras de maiores diâmetros aparentam ter caudais sólidos superiores.

De acordo com a observação efetuada durante os ensaios experimentais, para as diferentes inclinações da conduta ascendente e granulometrias testadas, foi possível distinguir dois processos básicos de transporte sólido ao longo do eixo longitudinal da conduta; o primeiro efetuado totalmente ou predominantemente por arrastamento, com uma movimentação em conjunto do leito de areia da amostra, com as partículas localizadas na sua parte anterior a serem impulsionadas sobre o corpo da amostra até à sua parte posterior, num movimento contínuo similar ao de uma lagarta; e um segundo efetuado predominantemente por intermédio de um escoamento mais caótico de saltação e suspensão dos grãos de areia, alternado pontualmente com o arrastamento ao longo do leito de grãos de maiores dimensões.

Para granulometrias maiores e inclinações da conduta menores, o processo predominante de transporte sólido observado foi por arrastamento em lagarta. Inversamente, para diâmetros de areia mais pequenos e inclinações maiores o processo predominante foi por saltação e suspensão. Para velocidades médias de escoamento suficientemente acima da condição crítica de início do transporte sólido (ao contrário do observado para velocidades do escoamento relativamente pequenas), no primeiro processo de transporte por lagarta, a velocidade das partículas de maiores dimensões era substancialmente superior à velocidade das partículas mais finas, pelo que o transporte sólido observado quando a inclinação da conduta é de 30° é claramente superior para as amostras de maiores diâmetros, como pode ser visualizado através do andamento das curvas representadas na Figura 4.1. Deste modo, as amostras com areia de grão mais grosso, para caudais de água suficientemente elevados, demonstram ter o escoamento favorecido para inclinações menores. Quando a inclinação da conduta aumenta e o processo de transporte sólido se torna predominantemente o de saltação e suspensão, os caudais sólidos das partículas mais finas tendem a ser progressivamente superiores aos das partículas mais grossas para todos os caudais de água escoados, como se pode observar comparando o andamento e a posição relativa das curvas das Figuras 4.1 a 4.3.

Por outro lado, na parte esquerda das Figuras 4.1 a 4.3, ou seja, na zona de intersecção das curvas com o eixo das abcissas, a condição de início de transporte sólido, ou de velocidade crítica, e consequentemente a tensão tangencial crítica aumentam quando aumenta o diâmetro dos grãos de areia, para todas as inclinações da conduta ascendente (ver também Anexo B).

De notar que os resultados obtidos para os ensaios efetuados com grandes caudais de água em regime permanente e elevados transportes sólidos, próximos dos limites da parte direita das figuras, onde o tempo demorado pela amostra de areia a percorrer a totalidade do comprimento predefinido foi muito curto, com valores de ordem de grandeza inferior a 30 s, não obstante terem sido ratificados e apresentados nas figuras, devem ser vistos com alguma prudência, devido aos inerentes erros relativos superiores e a possíveis erros adicionais, quer no estabelecimento do escoamento permanente pretendido, quer na rapidez necessária para a realização das respetivas medições.

A influência do volume de areia introduzido na instalação (para a formação do leito de areia na tubagem de teste) no transporte sólido observado foi também preliminarmente estudada no escoamento de duas fases, para a amostra de areia intermédia C da Tabela 3.1. Foram testados volumes de 2 e 3 litros, tendo-se verificado que, uma vez iniciado o ensaio, o aumento de volume inicial não aparentou corresponder a diferenças significativas no comportamento do transporte sólido observado ao longo da tubagem de acrílico, não tendo sido, portanto, prosseguida essa via de experimentação no presente trabalho de investigação, para além desse ponto.

4.2. Escoamento de três fases água-ar-areia

As Figuras 4.4 a 4.12 apresentam o traçado gráfico dos resultados obtidos para o transporte sólido observado nos escoamentos de três fases, estabelecidos experimentalmente (dados constantes nas Tabelas A.2 a A.4 do Anexo A). Nas figuras, para cada ângulo de inclinação da tubagem ascendente de acrílico ascendente ($\alpha=30^\circ$, $\alpha=46^\circ$ e $\alpha=58^\circ$) e velocidade de água média inicial ($U_{w0}= 0,30$ m/s, $U_{w0}= 0,45$ m/s e $U_{w0}= 0,60$ m/s), o caudal sólido mássico é grafado em função do caudal volumétrico de ar tendo como parâmetro os diferentes diâmetros de amostras de areia testadas.

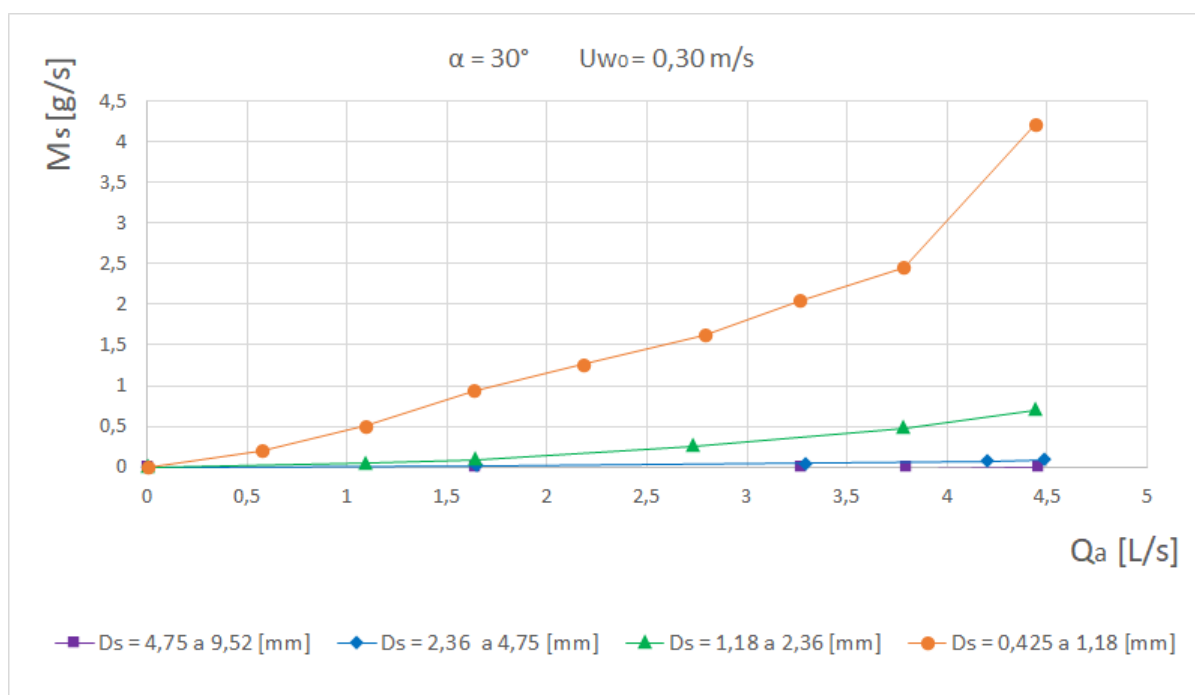


Figura 4.4 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial, $U_{w0} = 0,30$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

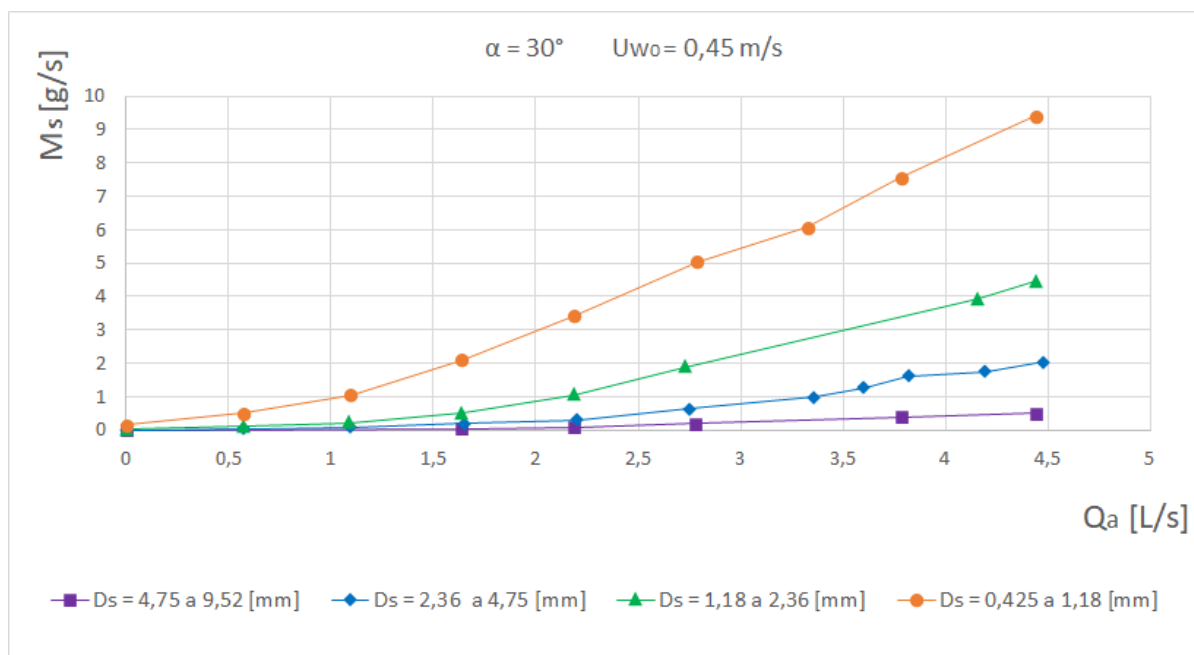


Figura 4.5 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45 \text{ m/s}$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

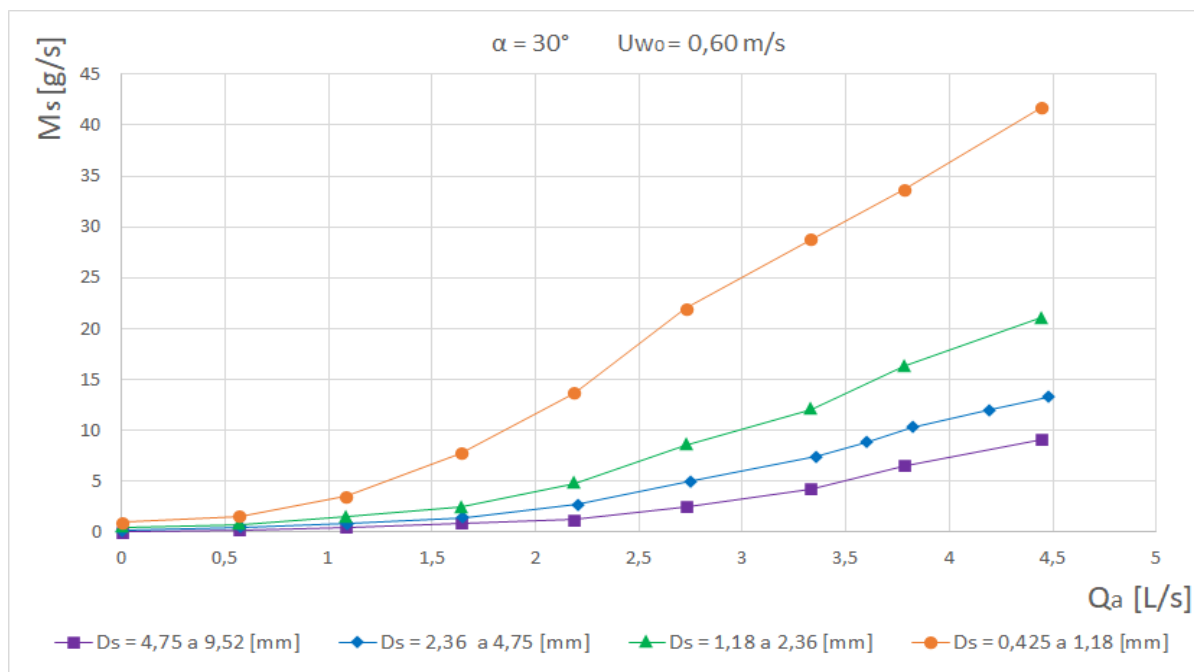


Figura 4.6 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60 \text{ m/s}$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

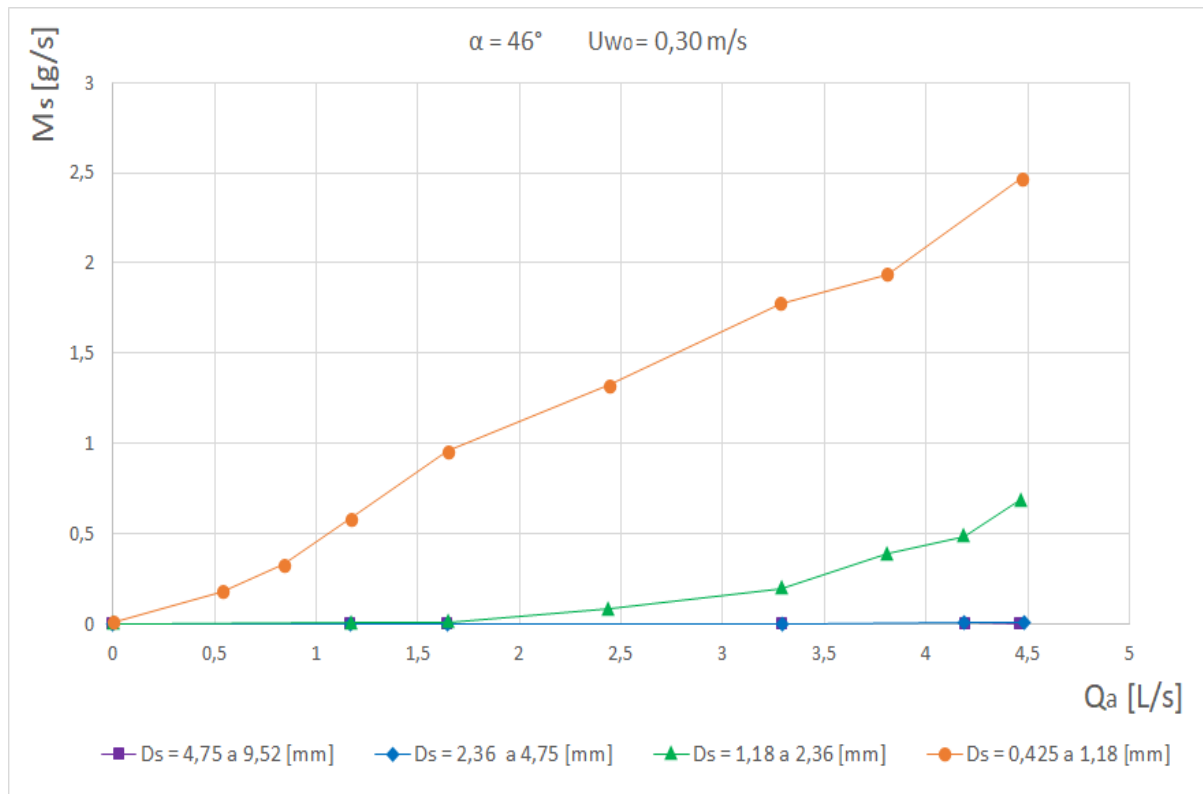


Figura 4.7 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,30$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

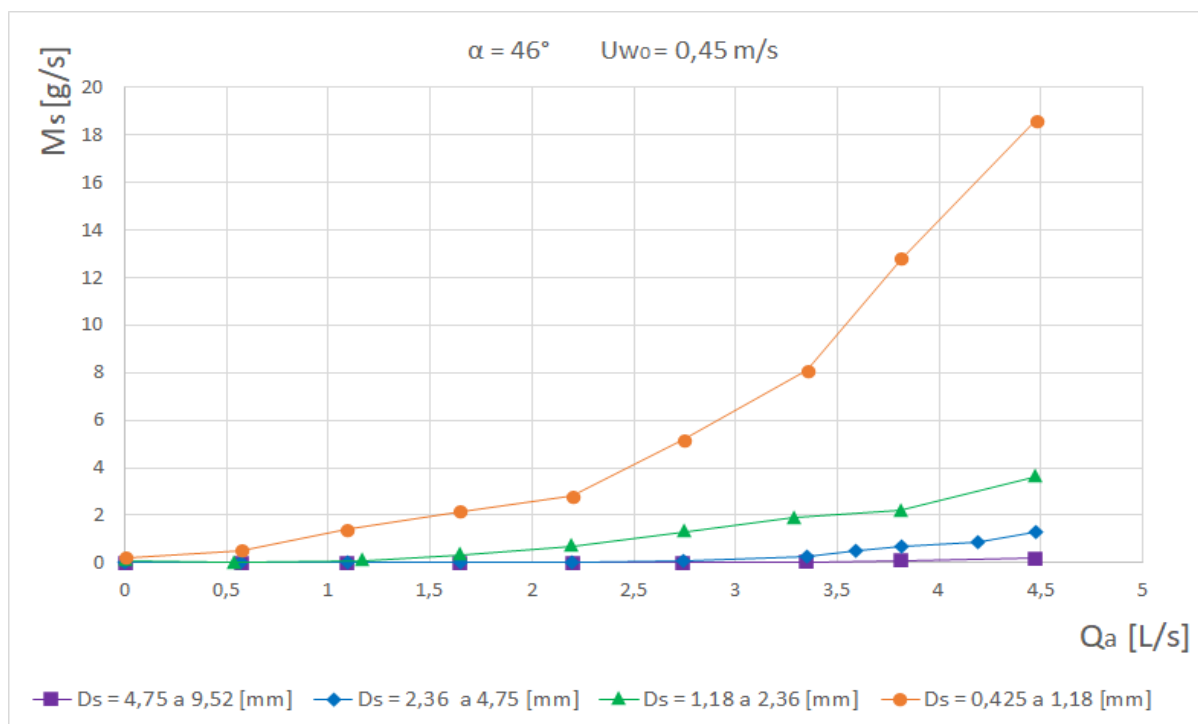


Figura 4.8 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

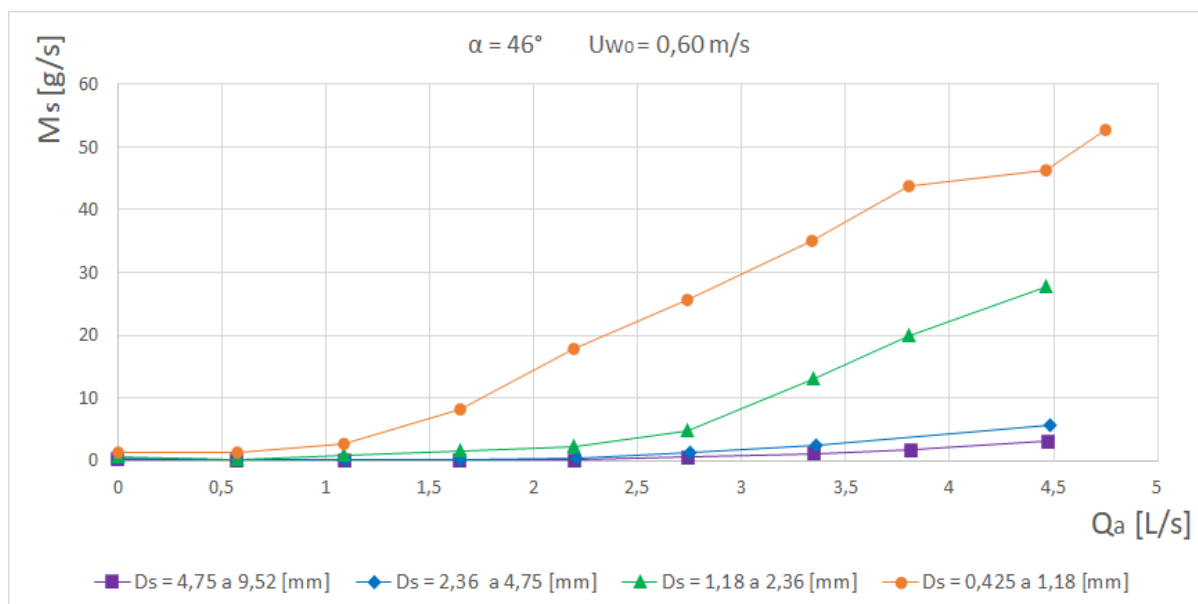


Figura 4.9 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

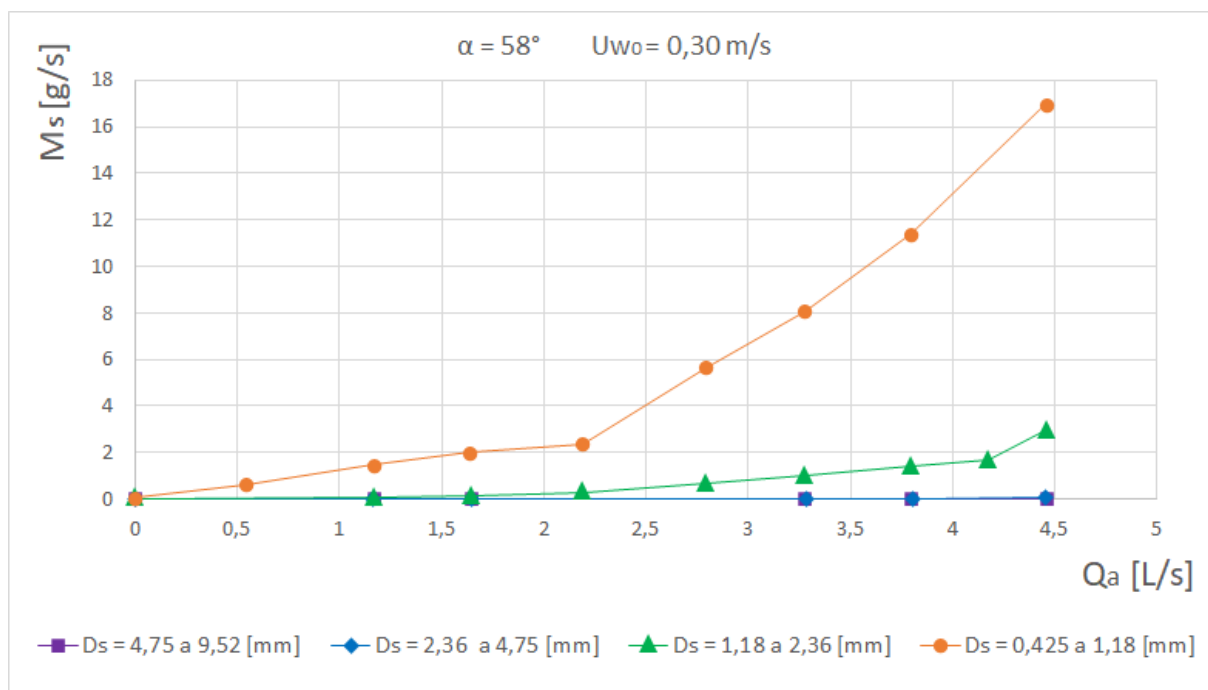


Figura 4.10 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,30$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

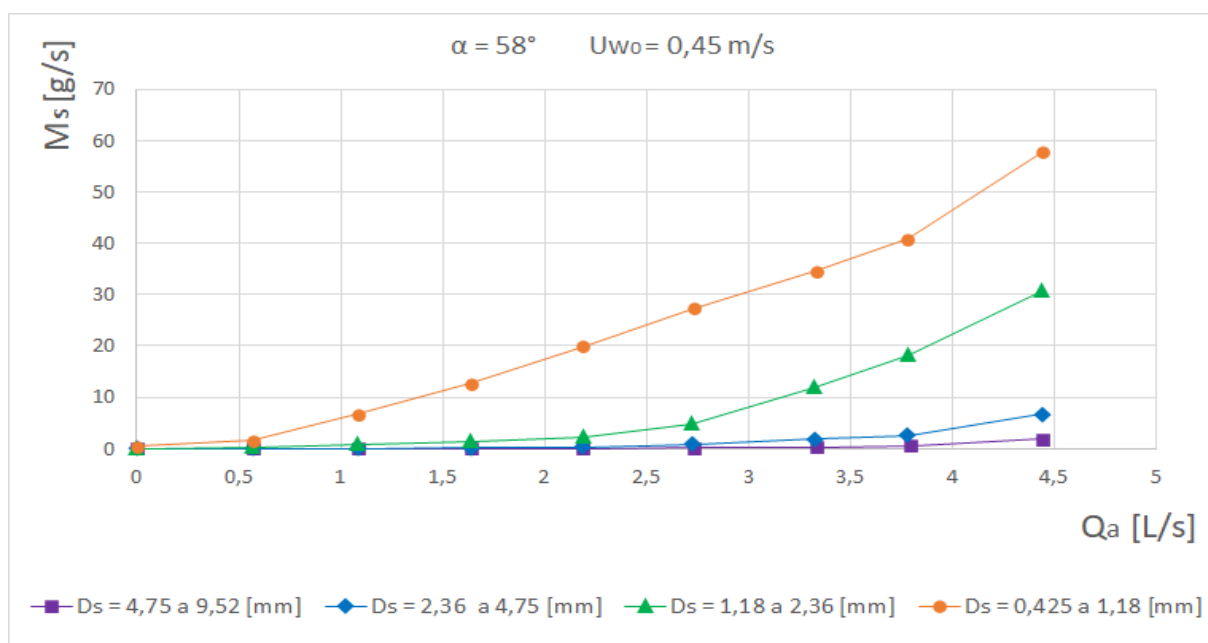


Figura 4.11 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

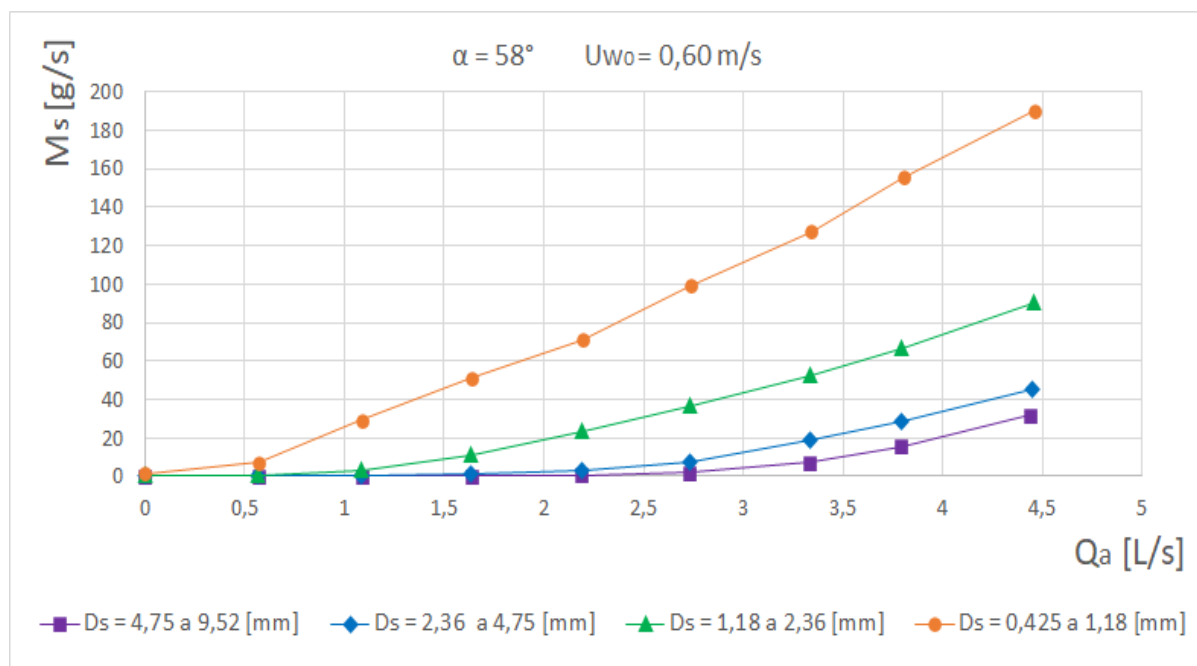


Figura 4.12 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de ar (Q_a) para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60$ m/s e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

Para todos os ângulos, velocidades iniciais e diâmetros dos grãos de areia, à medida que o caudal de ar aumenta, normalmente ocorre um aumento do caudal sólido transportado. A esse aumento, pode-se associar uma lei de variação potencial com expoente superior a 1, o que pode ser visualizado pela simples observação do andamento das curvas $M_S = M_S(Q_a)$ apresentadas nas figuras. Para um mesmo ângulo, velocidade da água inicial e caudal de ar injetado, o caudal sólido mássico é claramente superior para grãos de areia de menores diâmetros (curvas localizadas a um nível superior nas figuras). À medida que a velocidade média inicial da fase líquida do escoamento aumenta, também aumenta consideravelmente o transporte sólido observado, o que parece demonstrar a grande importância que apresenta a velocidade líquida aparente no transporte sólido. De notar, no entanto, que uma maior velocidade inicial do escoamento de água diminui a eficiência hidráulica do efeito *air-lift*, conforme observado em Diogo e Gomes (2011).

É importante referir que, com a injeção de ar na base da conduta ascendente de teste, ocorre uma diminuição importante da carga total, H , na conduta a montante do ponto de injeção, e em particular na secção 1 onde é medida a cota piezométrica, devido ao efeito *air-lift*. Deste modo, as bombas passam a elevar um caudal em regime permanente ligeiramente superior ao inicialmente estabelecido, de acordo com a velocidade média inicial fixada para a fase líquida

na conduta de teste. A redução da carga a montante e o subsequente aumento do caudal de água bombeado em regime permanente aumentam quando aumenta o caudal de ar injetado. No entanto, este aumento de caudal de água é, em geral, meramente residual, não tendo sido atingido nos ensaios efetuados acréscimos superiores a cerca de 3 mm na leitura da régua graduada do descarregador triangular. Este acréscimo máximo de 3 mm na régua graduada é em tudo análogo à situação anteriormente observada e descrita em Diogo e Apóstolo (2012) para um escoamento gravítico simulando um sifão invertido, entre uma câmara de montante instalada numa secção a jusante das bombas e alimentada por estas (cujo nível de água pode ser simulado na presente instalação experimental por intermédio da cota piezométrica atingida na secção 1 de medição) e uma secção de descarga na extremidade de jusante do ramo ascendente.

Para analisar sumariamente a influência da carga a montante no transporte sólido com injeção de ar na base da conduta ascendente em regime permanente, foi efetuado um teste expedito, introduzindo um determinado caudal de ar e mantendo sensivelmente a carga a montante na secção 1 da conduta de alimentação, atuando nas válvulas de controlo de caudal da instalação. Com a introdução do caudal de ar, ocorreu um importante aumento do caudal de água e consequentemente da velocidade média do escoamento da fase líquida, o que fez aumentar ainda mais o caudal sólido transportado relativamente à situação em que existe uma importante diminuição de carga a montante, ocorrendo um extraordinário aumento relativamente ao escoamento de duas fases água-sólidos previamente estabelecido.

Em todos os ensaios, particularmente nas areias de menores diâmetros, o transporte sólido ocorreu predominantemente por suspensão e saltação. Para a areia mais fina, é possível observar que, à medida que o ângulo, α , aumenta, para uma mesma velocidade inicial de 0,45 m/s ou de 0,60 m/s, e mesmo caudal de ar injetado o caudal sólido transportado é claramente superior. Essa situação pode ser devida ao facto de as partículas sólidas serem incrementalmente transportadas com uma maior componente de suspensão à medida que o ângulo aumenta.

Deve-se notar que todos os tempos considerados para determinação dos caudais médios sólidos observados nos ensaios experimentais foram tão grandes quanto possível e frequentemente da ordem de dez minutos, de modo a garantir ser atingido o regime permanente do escoamento multifásico e a evitar erros residuais nas medições. Em geral, mesmo em condições excepcionais de elevado transporte sólido, os tempos foram sempre bastante superiores a 30 segundos, à exceção dos referentes ao ângulo de 58°, velocidade de 0,60 m/s, areias de menores dimensões e elevados caudais de ar em regime permanente, onde atingiram, em alguns ensaios, valores particularmente baixos. Nestes casos particulares de caudais sólidos extremamente elevados, a interpretação dos resultados obtidos deve ter em consideração a maior aproximação considerada em função do menor rigor que foi possível obter das medições efetuadas.

5. MODELO SIMPLIFICADO DE DUAS FASES ÀGUA-AR

5.1. Modelo Simplificado

Para a caracterização do funcionamento hidráulico dos escoamentos de três fases observados experimentalmente no presente trabalho de investigação, foi aplicado o modelo numérico simplificado proposto em Diogo e Oliveira (2016), com as necessárias adaptações. Este modelo foi inicialmente desenvolvido para escoamentos de duas fases água-ar, admitindo simplificada que qualquer eventual presença de uma fase sólida pudesse ser incluída na fase líquida. Tendo em consideração a geometria particular da presente instalação e a presença de um leito de areia na tubagem ascendente, ocorrem perdas de carga adicionais localizadas não desprezáveis neste caso que se assumem poder ser determinadas aproximadamente com base em coeficientes de perda de carga singular. Foi admitido preliminarmente que estes coeficientes possam manter aproximadamente os seus valores sob condições geométricas análogas nos escoamentos de duas e três fases realizados. A adequabilidade da aplicação do modelo com as inerentes adaptações foi testada com base nas medições efetuadas de caudal de água e de ar e das correspondentes cotas piezométricas atingidas nas secções de medição a montante, referência M ou (1), no caso de escoamentos de três fases água-ar-sólidos, e a montante, referência M ou (1), e jusante, referência I ou (2), no caso de escoamentos de duas fases água-sólidos (dados constantes nas tabelas do Anexo A).

Os coeficientes de perda de carga singular, K , definidos do modo convencional, para cada inclinação testada de conduta e para os escoamentos de duas fases observados, foram determinados diretamente por aplicação da equação de energia entre a secção I (2), onde vai ser injetado o ar na situação de escoamento de três fases, e a secção de descarga ou saída S (3). Tomando como velocidade média de referência a velocidade média da água no tubo acrílico ascendente, Q_w/A_{Acr} , onde A_{Acr} representa a área da secção transversal do tubo acrílico, e considerando o coeficiente de Coriolis, α , aproximadamente igual a 1, resulta:

$$H_I = H_S + J_w \times L_{Acr} + K \times \frac{(Q_w/A_{Acr})^2}{2g} \quad (22)$$

ou

$$K = \frac{H_I - H_S - J_w \times L_{Acr}}{\frac{(Q_w/A_{Acr})^2}{2g}} \quad (23)$$

H_I e H_S representam a carga total nas secções I e S, respetivamente, J_w a perda de carga unitária da fase líquida no tubo acrílico ascendente e L_{Acr} o seu comprimento. O coeficiente de perda de carga singular, K , pressupõe incluídas todas as perdas localizadas entre a secção I e a secção de descarga S, nomeadamente na redução e ligações nas imediações da junta flexível ($K1$), no leito de areia ($K2$) e nos acessórios utilizados na descarga ($K3$), assumindo a mesma velocidade de referência (i.e., $K=K1+K2+K3$).

Substituindo as expressões da carga total nas secções I e S vem diretamente:

$$K = \frac{\left(\left(Z + \frac{p}{\gamma} \right)_2 + \left(\frac{(Q_w/A_{PEBD})^2}{2g} \right) \right) - \left(Z_S + \left(\frac{(Q_w/A_{Acr})^2}{2g} \right) \right) - J_w \times L_{Acr}}{\frac{(Q_w/A_{Acr})^2}{2g}} \quad (24)$$

Onde A_{PEBD} representa a área da secção transversal do tubo de polietileno de baixa densidade e Z_S é a cota geométrica do ponto de pressão nula na secção S de saída para a atmosfera, medida em relação ao mesmo plano horizontal de referência, PHR, que a cota piezométrica na secção 2.

De acordo com o modelo proposto em Diogo e Oliveira (2016), e as inerentes simplificações e adaptações necessárias consideradas, o funcionamento hidráulico da instalação experimental utilizada pode ser descrito com base em quatro equações principais. Para o efeito, admite-se simplificar, como aproximação básica, uma variação linear de pressões entre o ponto de injeção de ar I e o de saída S que se encontra à pressão atmosférica, pelo que o caudal médio de ar na tubagem ascendente, Q_{aMed} , pode ser determinado por:

$$Q_{aMed} = \frac{p_{atm}}{p_I - p_{atm}} \times Q_{aS} \times \ln \left(\frac{p_I}{p_{atm}} \right) \quad (25)$$

Onde, p_{atm} é a pressão atmosférica local absoluta, p_I é a pressão absoluta do ar na secção de injeção de ar, Q_{aS} é o caudal de ar referido à temperatura da água e à pressão atmosférica local. Admite-se um escoamento isotérmico (a temperatura constante) no interior da tubagem e que a temperatura do ar é aproximadamente igual à temperatura da água.

Por simplificação considera-se que a fração média de água na conduta ascendente, f_{wMed} , atendendo ao deslizamento entre fases, pode ser calculada com base na Equação (7), para o caudal médio de ar determinado de acordo com a aproximação anterior:

$$f_{wMed} = 1 - \frac{Q_{aMed}}{C \times (Q_w + Q_{aMed}) + A_{Acr} \times 0,35 \times \sqrt{g} \times D_{Acr} \times FA} \quad (26)$$

onde D_{Acr} é o diâmetro interno da tubagem de acrílico. Os valores considerados no presente trabalho para o parâmetro de distribuição C e o factor de aceleração, FA , tal como definidos no Capítulo 2 e correspondentes aos resultados apresentados na secção 5.2 foram, 1,2 e 2,5, respetivamente.

A pressão absoluta em I pode ser determinada pela equação da energia entre I e S por:

$$\left(\frac{p_I}{\gamma_w}\right) = Z_S \times f_{wMed} - \frac{(Q_w/A_{PEBD})^2}{2g} \times \frac{1}{f_{wIh}} + \frac{p_{atm}}{\gamma_w} + J_{mist} \times L_{Acr} + \frac{(Q_w/A_{Acr})^2}{2g} \times \left(\frac{1}{f_{wSh}} + \frac{K}{f_{wMedh}}\right) \quad (27)$$

Onde γ_w representa o peso volúmico da água, Z_s é referida em relação a um plano horizontal de referência que passa no eixo da secção no ponto I ($Z_I=0$) e f_{wIh} , f_{wSh} e f_{wMedh} são respetivamente as frações de fluido no ponto de injeção de ar, no ponto de descarga e a fração média na conduta ascendente, admitindo uma mistura homogénea (alturas cinéticas calculadas de acordo com o explicado no Capítulo 2): $f_{wIh} = \left(\frac{Q_w + Q_{aLoc}}{Q_w + Q_{aI}}\right)$; $f_{wSh} = \left(\frac{Q_w}{Q_w + Q_{aS}}\right)$; $f_{wMedh} = \left(\frac{Q_w}{Q_w + Q_{aMed}}\right)$.

O caudal de ar na secção de saída à pressão atmosférica local e à temperatura da água, T_w , (em graus °C), Q_{aS} , é calculado em função do caudal de ar medido, referido à pressão atmosférica normal e a uma temperatura padrão de 20°C ($\rho=1,205 \text{ kg/m}^3$) por intermédio de $Q_{aS} = Q_a \times \rho_a \times R \times (T_w + 273,15)/p_{atm}$. O caudal de ar no ponto de injeção I à pressão absoluta p_I é determinado por $Q_{aI} = Q_{aS} \times p_{atm}/p_I$.

Para o cálculo da perda de carga unitária da mistura, J_m , na conduta ascendente é utilizada a fórmula de Chisholm & Laird (Equação (8)) e a fórmula de Blasius (equação (12)) para as fases líquida e gasosa, utilizando, neste último caso, o caudal médio de ar na conduta ascendente estimado com base na Equação (25). Para aplicação da Equação (8), a perda de carga unitária calculada para o ar é convertida a metros de coluna de água pela fração, ρ_{aMed}/ρ_w , com $\rho_{aMed} = \rho_{aS} \times Q_{aS}/Q_{aMed}$.

A carga total a montante, H_M , pode ser determinada aplicando a equação de energia entre a secção de montante M e o ponto de injeção de ar I, com a perda de carga unitária, J_w , no tubo

de PEBD calculada em função do caudal da fase líquida, Q_w , utilizando como lei de resistência a Equação (9) exposta no Capítulo 2:

$$H_M = Z_I + \left(\frac{p_I}{\gamma_w} - \frac{p_{atm}}{\gamma_w} \right) + \left(\frac{(Q_w/A_{PEBD})^2}{2g} \right) \times \left(\frac{1}{f_{wIh}} \right) + J_w \times L_{PEBD} \quad (28)$$

Com $Z_I=0$, caso o PHR considerado passe no eixo da tubagem de PEBD na secção I. Nas quatro equações apresentadas (Equações (25) a (28)) é possível encontrar seis incógnitas, designadamente o caudal de água, Q_w , o caudal de ar à saída, Q_{aS} , o caudal médio de ar na conduta ascendente, Q_{aMed} , a fração média de água na conduta ascendente, f_{wMed} , a pressão absoluta no ponto de injeção de ar, p_I e a carga a montante, H_M . Na simulação efetuada no presente trabalho, são fixadas duas variáveis medidas experimentalmente nos ensaios, Q_{aS} (determinada através de Q_a) e Q_w , pelo que resulta num sistema de quatro equações a quatro incógnitas. A resolução deste sistema é efetuada em ordem a H_M depois de calculado Q_{aMed} , f_{wMed} e p_I utilizando um método iterativo numérico, tendo sido utilizado o método das aproximações sucessivas, considerando para o início da iteração $Q_{aMed} = Q_{aS}$.

A metodologia seguida para o cálculo da carga a montante, H_M , conhecidos os caudais de água, Q_w , e de ar, Q_a , pode ser descrita sumariamente em cinco passos, do seguinte modo:

1. Calculam-se as velocidades da água dentro das tubagens de PEBD e de acrílico pela equação de continuidade $U=Q/A$, as alturas cinéticas, $U^2/2g$, e os valores do caudal de ar, Q_{aS} , para p_{atm} ($p_{atm} \approx 100700 \text{ N/m}^2$) e T_w . Determinam-se as perdas de carga unitária para a água, nos tubos de PEBD (equação (9)) e de acrílico (equação (12)).
2. Utilizando, para o valor inicial da primeira iteração $Q_{aMed}=Q_{aS}$, calcula-se o valor de f_{wMed} , a perda de carga unitária para o ar, (equação (12)), considerando $\nu_a = 15 \times 10^{-6}$, a perda de carga unitária da mistura, J_m (Equação (8)) e a altura piezométrica absoluta no ponto de injeção de ar, p_I/γ_w , pela Equação (27), com as frações de fluido para o cálculo das alturas cinéticas presentes na equação aproximadas para uma mistura homogénea e com a constante de perda de carga singular, K , pré-fixada, para as condições particulares de inclinação e de velocidade média inicial de água consideradas.
3. A partir dos valores obtidos na iteração anterior, calculam-se os novos valores para Q_{aMed} , f_{wMed} , J_m , f_{wIh} e p_I/γ_w , na nova iteração.
4. Utilizando um método de aproximações sucessivas, repete-se sucessivamente o passo anterior até não ocorrerem praticamente alterações perceptíveis, de acordo com a aproximação pretendida, nos valores de Q_{aMed} (ou p_I/γ_w) calculados.

5. Atingida a convergência do processo iterativo e com base nos valores obtidos de p_l/γ_w e f_{wl} calcula-se finalmente a carga a montante H_M (Equação (28)).

O modelo numérico foi aplicado para todos os ensaios efetuados com amostras de areia com granulometria intermédia de $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm e os valores de H_M resultantes foram comparados com os obtidos experimentalmente (soma da cota observada no tubo piezométrico, ligado à secção de montante 1, com a altura cinética no tubo de PEBD, para o caudal medido no descarregador triangular),

$$H_M = \left(Z + \frac{p}{\gamma} \right)_1 + \frac{(Q_w/A_{PEBD})^2}{2g} \quad (29)$$

Os resultados desta comparação são apresentados na secção seguinte. Embora possíveis, não foram efetuadas simulações para todas as granulometrias ensaiadas, atendendo ao elevado número de medições experimentais e limitação de tempo.

5.2. Aplicação do modelo

Para a aplicação do modelo simplificado, foram primeiramente determinados os limites máximo e mínimo que o coeficiente de perda de carga singular, K , em escoamento permanente de duas fases água-areia na conduta ascendente pode tomar, de acordo com as medições efetuadas experimentalmente, admitindo que K mantém os seus valores em condições geométricas semelhantes para os escoamentos de três fases. O limite superior, $K_{máx}$, foi obtido pela média dos valores de K calculados para os ensaios com velocidades de escoamento mais baixas, onde o leito de areia (localizado na base da conduta ascendente) é máximo e para a cota do ponto de pressão nula Z_S admitida como mínima (cota do eixo do tubo de descarga na secção de saída). O limite inferior, $K_{mín}$, foi obtido pela média dos valores de K calculados em ensaios sem a presença de leito de areia na base da conduta e para a cota Z_S admitida como máxima (cota do eixo do tubo do acessório de descarga no ponto mais alto). Para cada ângulo de inclinação do ramo ascendente estudado, é $K_{mín} \leq K \leq K_{máx}$, tendo-se observado $2 \leq K \leq 14$, para $\alpha = 30^\circ$, $1,4 \leq K \leq 12$, para $\alpha = 46^\circ$, e $2 \leq K \leq 14$, para $\alpha = 58^\circ$, pelo que os valores de K a utilizar no cálculo hidráulico dos escoamentos de três fases (água-ar-areia) deverão situar-se dentro destes limites previamente determinados.

Os valores de K considerados no modelo para cada inclinação da conduta ascendente e velocidade média inicial de água, U_{w0} , que permitiram obter empiricamente o melhor ajuste aos dados experimentais observados, foram: para uma inclinação $\alpha = 30^\circ$, respetivamente, $K = 8$, $K = 5$ e $K = 4$, para $U_{w0} = 0,3\text{m/s}$, $U_{w0} = 0,45\text{m/s}$ e $U_{w0} = 0,60\text{m/s}$; para uma inclinação $\alpha = 46^\circ$,

$K = 6$ para as três velocidades iniciais; e para $\alpha = 58^\circ$, $K = 10$ para U_{w0} de 0,3 e 0,45 m/s e $K = 4$ para $U_{w0} = 0,60$ m/s.

Embora fosse de esperar, em primeira análise, a utilização de um valor de K aproximadamente constante para cada inclinação da conduta de teste nos escoamentos de três fases, tal só se mostrou adequado para o ângulo de 46° . Deve-se notar que os valores de K aparentam ser relativamente elevados, particularmente para $U_{w0}=0,30$ m/s, mas parecem diminuir, em geral, quando aumenta a velocidade média inicial do escoamento. A cota geométrica do ponto de pressão nula na descarga para cada ângulo de inclinação foi admitida constante. É muito provável que esta cota aumente quando diminui a velocidade média inicial do escoamento, mas esse estudo de elevado grau de complexidade em escoamentos multifásicos não foi efetuado. Por outro lado, as cotas piezométricas atingidas na tubagem de PEBD no escoamento permanente de três fases apresentaram grandes oscilações para caudais de ar relativamente elevados, devido à instabilidade do escoamento, pelo que alguns valores médios da carga total a montante podem apresentar uma margem de erro não desprezável. Adicionalmente, para esta areia testada, o diâmetro dos grãos é relativamente elevado, pelo que, principalmente para U_{w0} baixas o transporte sólido é muito pequeno e o leito de areia permanece praticamente na base do tubo ao longo de todo o ensaio.

Os valores de Q_a , Q_w , T_w e $(z+p/\gamma)_1$ medidos para aplicação do modelo podem ser encontrados no Anexo A. A cota geométrica do ponto de pressão nula na saída para a atmosfera do escoamento de três fases foi admitida como sendo $Z_s = 3,3$ m, para $\alpha = 30^\circ$, $Z_s = 4,792$ m, para $\alpha = 46^\circ$ e $Z_s = 5,295$ m, para $\alpha = 58^\circ$. Todos os valores das cotas geométricas, cotas piezométricas e cargas totais apresentadas nesta secção e no Anexo A são referidas em relação a um plano horizontal de referência que passa num ponto da superfície do pavimento localizado na vertical da secção de descarga (0,08 m abaixo da cota do eixo da tubagem na secção de injeção de ar, I, correspondentes à soma de um desnível de cerca de 2,5 cm no pavimento entre os dois pontos e metade do diâmetro exterior do tubo de PEBD).

Os resultados da comparação efetuada entre os valores da carga total a montante, H_M , estimada por aplicação do modelo simplificado e os valores de H_M observados, para cada inclinação da conduta ascendente de teste e velocidade média inicial de água pré-fixada, de acordo com o mencionado no final da secção anterior, encontram-se representados nas Figuras 5.1 a 5.9. Nestas figuras, os valores de H_M são apresentados em função dos valores do caudal de ar, Q_a (referidos à pressão atmosférica normal e temperatura de 20°C , i.e., para $\rho = 1,205$ kg/m³).

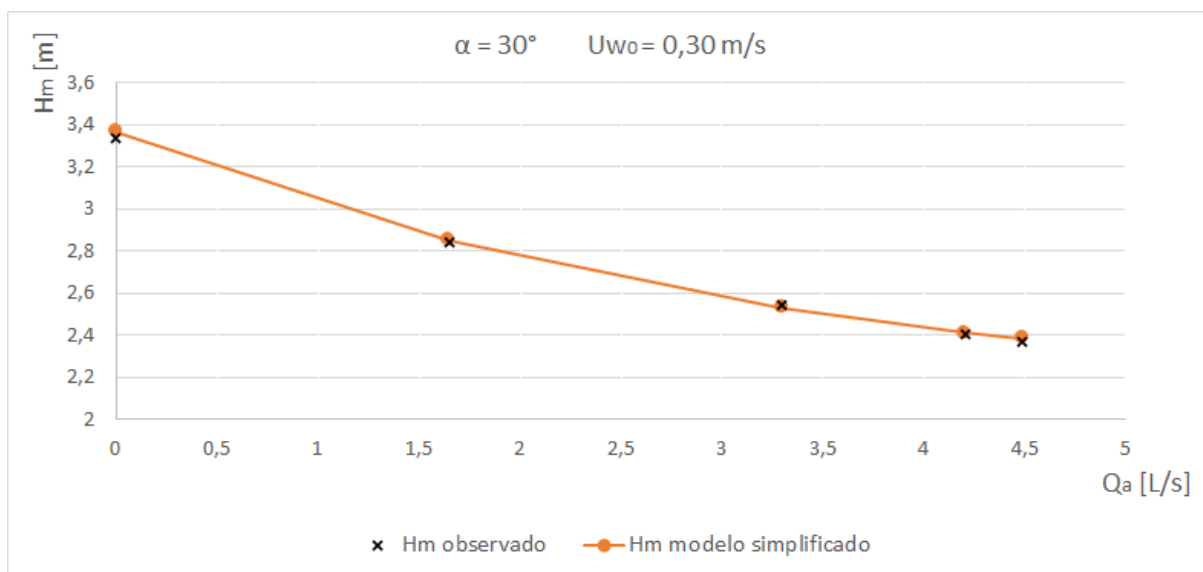


Figura 5.1 – Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,30$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.

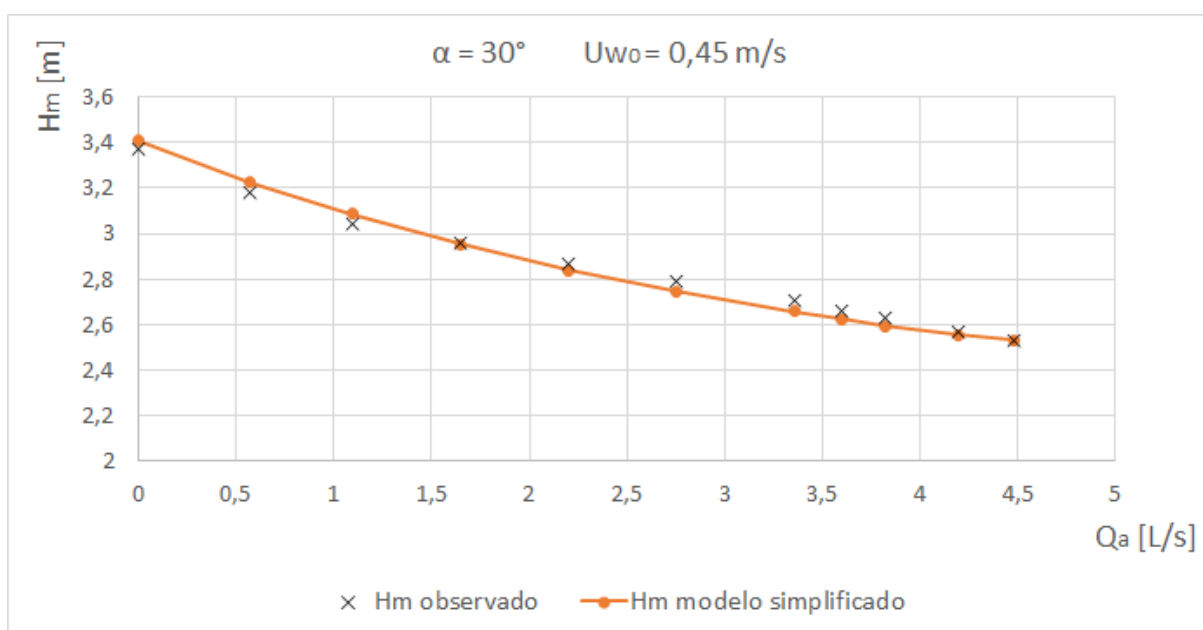


Figura 5.2 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.

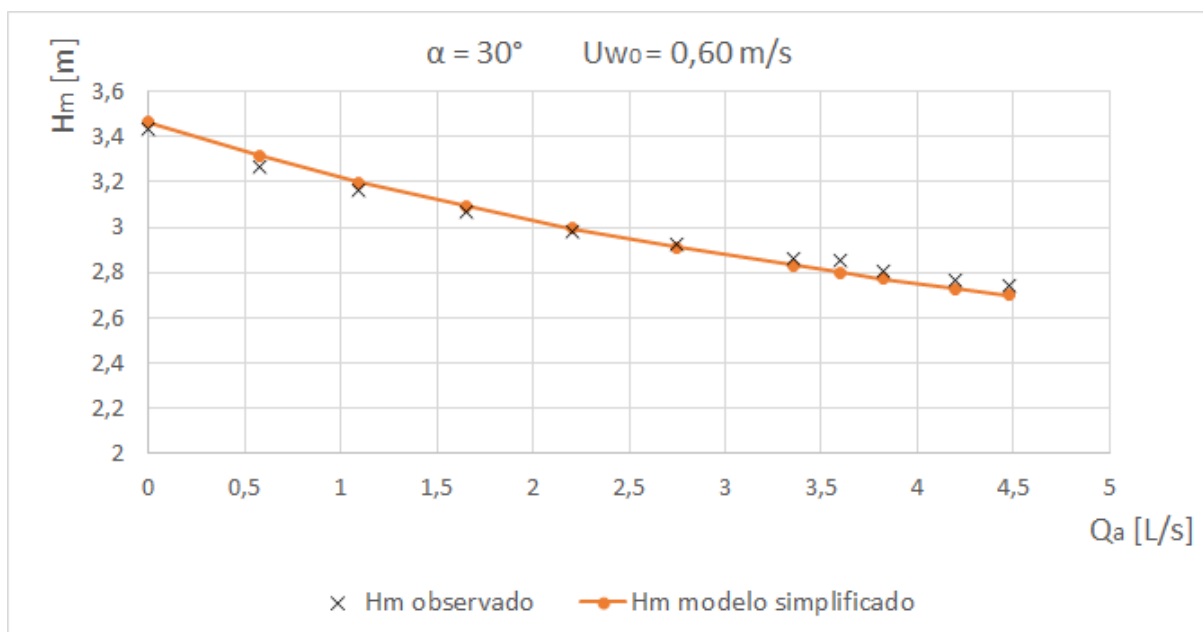


Figura 5.3 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60 \text{ m/s}$, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76 \text{ mm}$.

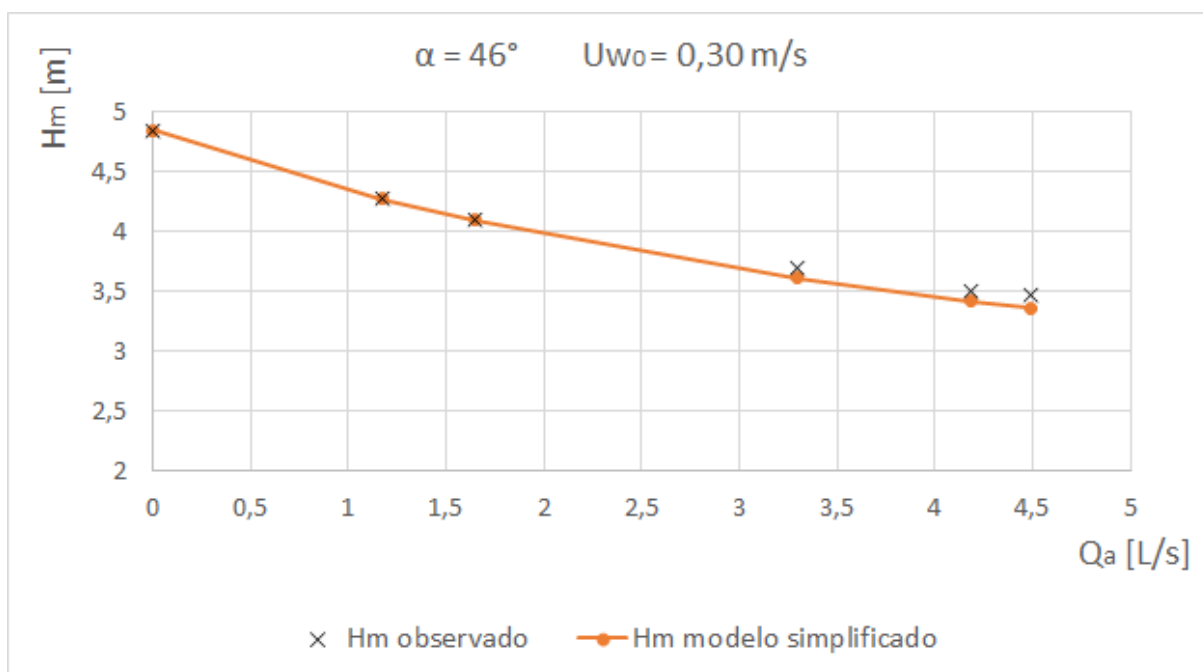


Figura 5.4 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,30 \text{ m/s}$, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76 \text{ mm}$.

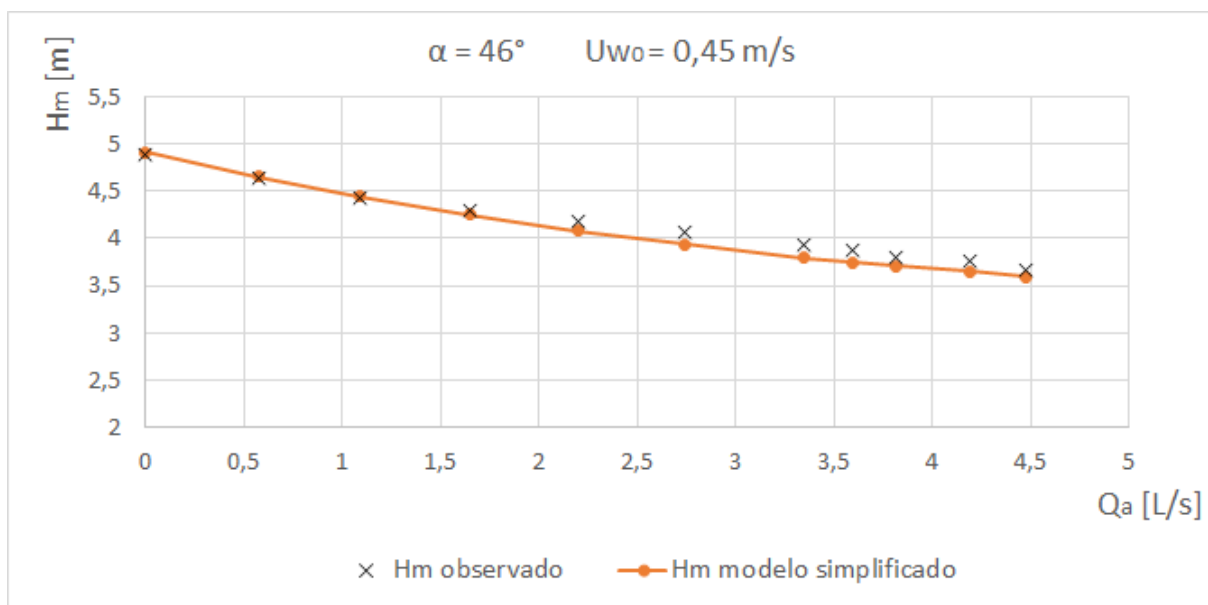


Figura 5.5 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45 \text{ m/s}$, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76 \text{ mm}$.

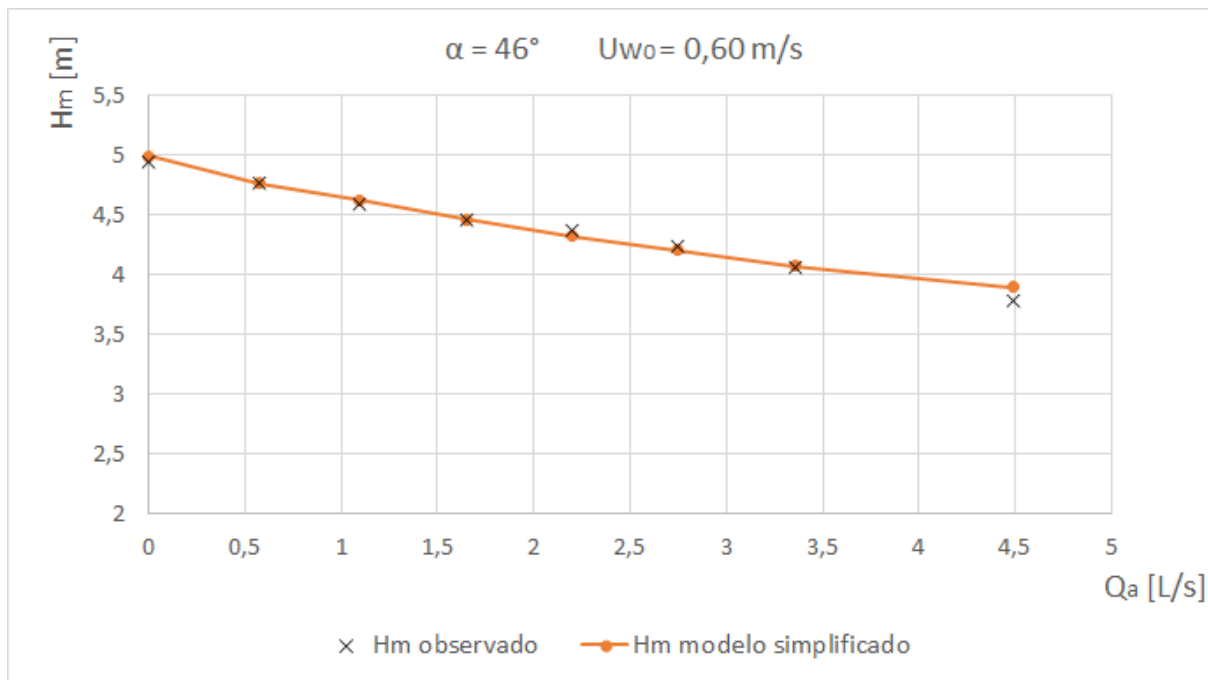


Figura 5.6 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60 \text{ m/s}$, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76 \text{ mm}$.

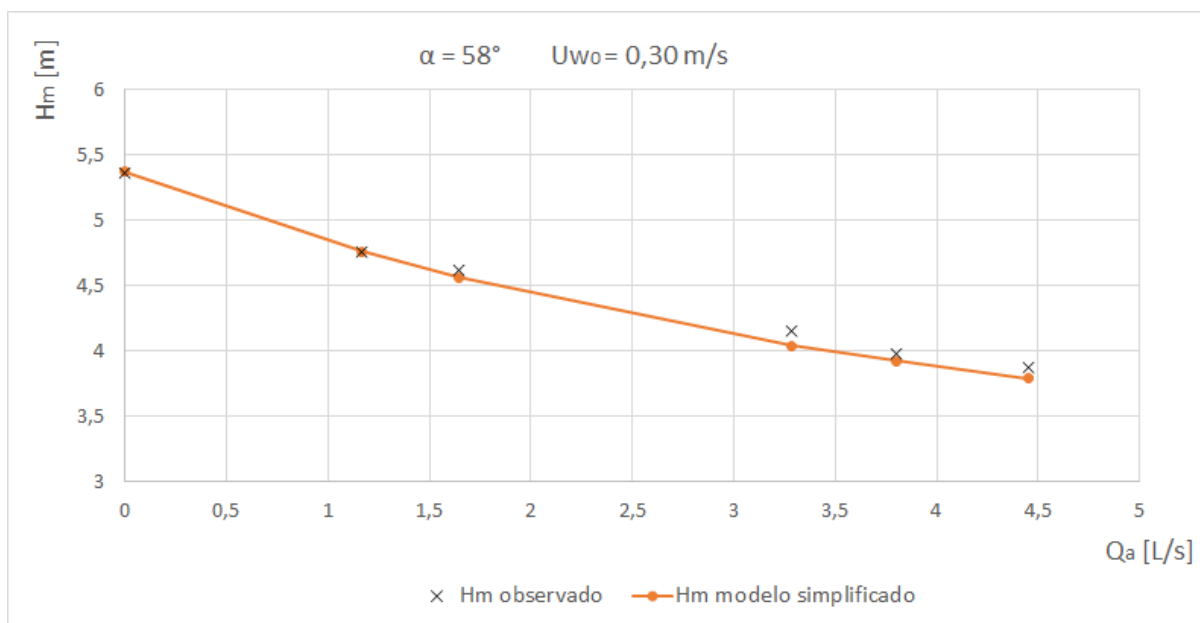


Figura 5.7 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,30 \text{ m/s}$, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76 \text{ mm}$.

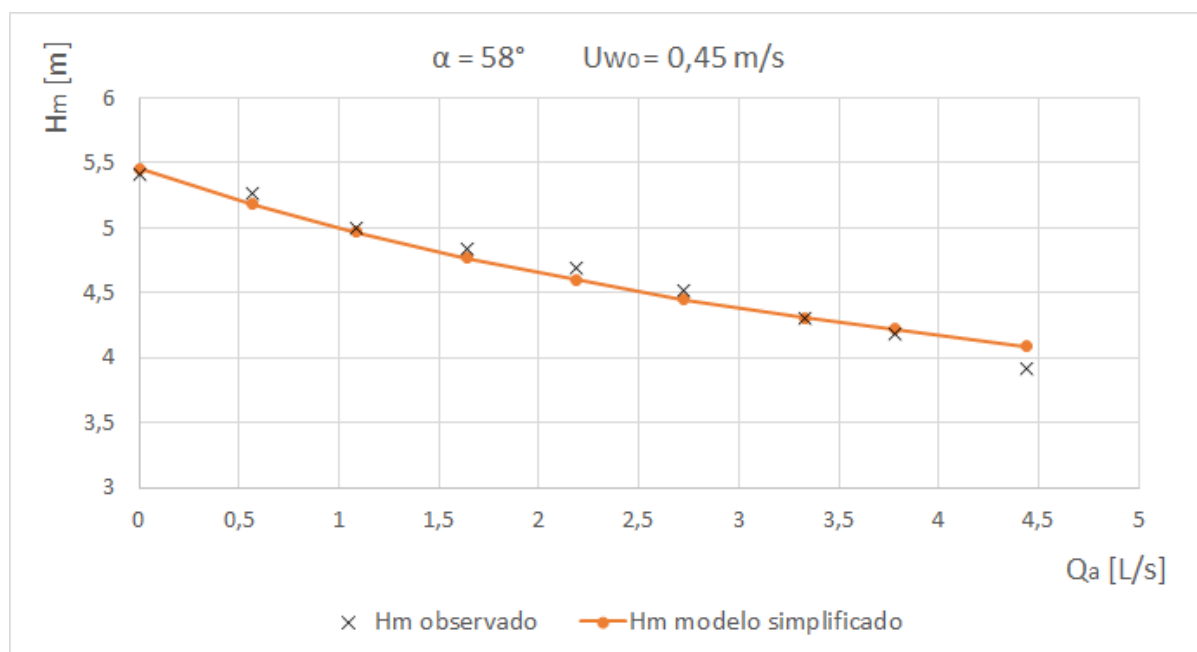


Figura 5.8 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,45 \text{ m/s}$, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76 \text{ mm}$.

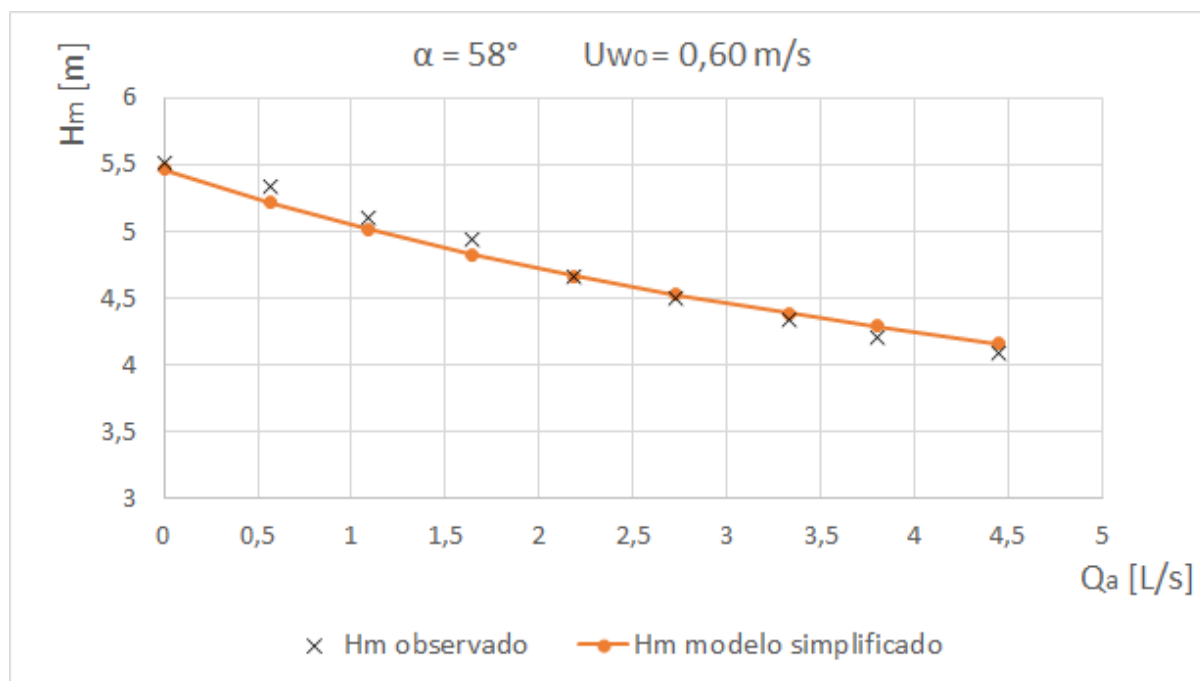


Figura 5.9 - Variação da carga total a montante, H_M , observada e estimada, por aplicação do modelo simplificado, com o caudal de ar, Q_a , para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$, velocidade de água inicial $U_{w0} = 0,60$ m/s, para areia de granulometria $D_s = 2,36$ a $4,76$ mm.

Como se pode verificar, existe uma boa aproximação entre as medições experimentais efetuadas e os resultados obtidos por aplicação do modelo simplificado com o coeficiente de perda de carga singular, K , ajustado do modo anteriormente indicado. Estes resultados devem, no entanto, ser observados com alguma prudência particularmente no que respeita à sua generalização para aplicação a outras instalações, laboratoriais ou de campo, pois, não obstante terem sido determinados com base numa componente teórica e experimental, foram aproximados empiricamente de modo a produzir resultados aceitáveis. A identificação e adaptação dos valores a utilizar para os parâmetros do modelo, em especial, para diferentes padrões de escoamentos multifásicos pode ser fundamental, particularmente em condutas de grande diâmetro. A aplicação do modelo simplificado proposto em Diogo e Oliveira (2016) para descrever o comportamento hidráulico de escoamentos permanentes sob pressão de três fases em condutas ascendentes de sistemas de saneamento, efetuada com as necessárias adaptações, pode assim ser entendida como uma primeira aproximação numérica que poderá constituir uma base sólida para futuros desenvolvimentos nesta área.

6. TRANSPORTE SÓLIDO E CONDIÇÕES CRÍTICAS

6.1. Considerações gerais e parâmetros adimensionais

No decurso do trabalho de investigação experimental apresentado nesta dissertação, foi iniciado um estudo com o objetivo de desenvolver uma primeira aproximação para a determinação das condições críticas de início de transporte sólido num escoamento permanente de três fases água-areia em condutas ascendentes de sistemas de saneamento, considerando que o escoamento de três fases pode ser tratado como um desenvolvimento e extensão da modelação do caso particular do escoamento de duas fases água-sólidos em que o caudal de ar não é nulo. Para o efeito, com base no teorema fundamental da Análise Dimensional, foram considerados como parâmetros que podem ser fundamentais para descrever o fenómeno físico, o número de Reynolds, calculado para a velocidade crítica de início de transporte sólido, e o parâmetro de Shields, calculado com base na tensão tangencial crítica de arrastamento (Diogo e Moura, não datado). Como leis de resistência, são utilizadas a fórmula de Chisholm & Laird para escoamentos multifásicos e a fórmula de Blasius para os regimes turbulentos lisos da fase líquida e da fase gasosa.

Para a aplicação do teorema fundamental da análise dimensional, ou teorema de Vaschy-Buckingham, é considerado um conjunto de cinco grandezas físicas ($n=5$) que intervêm no fenómeno, $\{(\gamma_s - \gamma_m); U_{mc}; D_s; \tau_c; \nu_m\}$, onde $(\gamma_s - \gamma_m)$ representa o peso volúmico submerso (com γ_s o peso volúmico das partículas sólidas e γ_m o peso volúmico da mistura água-ar), U_{mc} a velocidade de autolimpeza ou velocidade média crítica da mistura água-ar, D_s o diâmetro das partículas sólidas, τ_c a tensão tangencial média crítica na fronteira sólida e ν_m a viscosidade da mistura água-ar. O peso volúmico da mistura, γ_m , é calculado por $\gamma_m = \gamma_w \times f_w + g \times \rho_{as} \times (1 - f_w)$ e a viscosidade da mistura, ν_m , por $\nu_m = (\rho_w \times \nu_w \times f_w + \rho_{as} \times \nu_a \times (1 - f_w)) / \rho_m$, com a massa volúmica da mistura dada por $\rho_m = \gamma_m / g$. A velocidade média crítica da mistura é determinada pela expressão $U_{mc} = (Q_w + Q_{as}) / A_{Acr}$, com os caudais Q_w e Q_{as} referentes à condição de início de transporte sólido. A tensão tangencial crítica é determinada por $\tau_c = \gamma_m \times J_m \times R_h$, onde R_h é o raio hidráulico ($R_h = D/4$) e J_m é calculada pela fórmula de Chisolm&Laird, (Equação (8)) com Q_{as} .

Admite-se que a rugosidade absoluta equivalente da tubagem, k , pode ser considerada aproximadamente nula devido à utilização de um tubo liso. Genericamente, é possível escrever uma equação do tipo:

$$\emptyset(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = 0 \quad (30)$$

Neste conjunto de variáveis, podem ser seleccionadas no máximo três grandezas dimensionalmente independentes consideradas como fundamentais ($p=3$), tendo sido escolhidas neste caso $X_1 = (\gamma_s - \gamma_m)$, $X_2 = U_{mc}$ e $X_3 = D_s$. Da aplicação do teorema, é possível obter $n-p=2$ parâmetros adimensionais, π_1 e π_2 , que são determinados com base nos parâmetros remanescentes pela condição de serem adimensionais e que podem ser relacionados entre si por intermédio de uma função Ψ que substitui a equação \emptyset anterior:

$$\Psi(\pi_1, \pi_2) = 0 \quad (31)$$

Ou seja:

$$\pi_1 = f(\pi_2) \quad (32)$$

Para π_1 , com a utilização de τ_c , resulta o parâmetro de Shields e para π_2 , com a utilização de v_m , o número de Reynolds, calculado com a velocidade média crítica ou de autolimpeza, Re_{mc} :

$$\pi_1 = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_m) \times D_s} \quad (33)$$

e

$$\pi_2 = Re_{mc} = \frac{U_{mc} \times D_s}{v_m} \quad (34)$$

pelo que é possível escrever:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_m) \times D_s} = f\left(\frac{U_{mc} \times D_s}{v_m}\right) \quad (35)$$

6.2. Condição de início de transporte sólido

Os caudais de água e de ar escoados na conduta ascendente na região da condição de início do transporte sólido correspondentes à zona de intersecção das curvas $M_s=M_s(Q_w)$ com o eixo das abcissas das Figuras 4.1 a 4.3 no caso do caudal de água no escoamento de duas fases, e à zona de intersecção das curvas $M_s=M_s(Q_a)$ com o eixo das abcissas das Figuras 4.4 a 4.12 no caso do caudal de ar e do caudal de água correspondentes ao escoamento de três fases, foram considerados seguir aproximadamente uma lei potencial do tipo:

$$y = a + b \times x^c \quad (36)$$

Para a determinação dos coeficientes a , b e c da equação anterior, foram obtidas curvas que passam exatamente em três pontos medidos experimentalmente (P1, P2 e P3), tendo sido selecionados normalmente os pontos mais próximos do eixo das abcissas. Foi então aplicada a equação anterior para um valor residual do caudal mássico sólido transportado, selecionado de tal modo que pudesse refletir, com a maior aproximação possível, a condição crítica pretendida (ou seja de início de transporte sólido por arrastamento), eliminando eventuais erros residuais resultantes da bem conhecida e bem reportada dificuldade em estabelecer o critério de início de transporte das partículas sólidas. Com base nas experiências efetuadas e em particular na observação do comportamento do movimento das partículas no leito de areia do tubo acrílico transparente, foi admitido como sendo de 0,05 g/s o valor residual do caudal mássico sólido a considerar correspondente à condição crítica pretendida. Deste modo, estimaram-se valores de velocidades críticas para cada ângulo de inclinação do tubo ascendente acrílico e diâmetro das partículas das amostras de areia, para os caudais medidos nos ensaios anteriormente descritos e apresentados nas Figuras 4.1 a 4.12 realizados com duas e três fases.

Considerando genericamente $x=Q_w$ ou $x=Q_a$, consoante os caudais pretendidos, e $y=M_s$ vem:

$$\begin{cases} P1 = (x1, y1) \\ P2 = (x2, y2) \\ P3 = (x3, y3) \end{cases} \quad (37)$$

Como a curva representativa da Equação (36) passa nos pontos P1, P2 e P3:

$$\begin{cases} y1 = a + b \times x1^c \\ y2 = a + b \times x2^c \\ y3 = a + b \times x3^c \end{cases} \quad (38)$$

Resolvendo a primeira equação do sistema em ordem a a , $a = y_1 - b \times x_1^c$, e eliminando a por substituição nas outras duas equações:

$$\begin{cases} y_2 = y_1 - b \times x_1^c + b \times x_2^c \\ y_3 = y_1 - b \times x_1^c + b \times x_3^c \end{cases} \quad (39)$$

A segunda equação do sistema pode ser resolvida em ordem a b , $y_2 - y_1 = b \times (x_2^c - x_1^c)$, podendo b ser eliminado por substituição na terceira equação:

$$b = \frac{y_2 - y_1}{x_2^c - x_1^c} \quad (40)$$

$$y_3 - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2^c - x_1^c} \times (x_3^c - x_1^c) \quad (41)$$

A equação resultante pode ser resolvida em ordem a x_3 :

$$x_3^c = x_1^c + \frac{(y_3 - y_1) \times (x_2^c - x_1^c)}{y_2 - y_1} \quad (42)$$

Logaritmizando vem:

$$c \times \log x_3 = \log \left(x_1^c + \frac{y_3 - y_1}{y_2 - y_1} \times (x_2^c - x_1^c) \right) \quad (43)$$

Esta equação, resolvida em ordem a c , permite determinar o c , por aproximações sucessivas:

$$c_{n+1} = \frac{\log \left(x_1^{c_n} + \frac{y_3 - y_1}{y_2 - y_1} \times (x_2^{c_n} - x_1^{c_n}) \right)}{\log x_3} \quad (44)$$

Calculado o expoente c , a determinação dos coeficientes b (Equação (40)) e a (Equação (38)) presentes na Equação (36) é imediata.

A Figura 6.1 apresenta o traçado gráfico do número de Shields em função do número de Reynolds, correspondentes às velocidades estimadas para a condição de início de transporte sólido de acordo com os critérios anteriormente descritos. Os valores das grandezas presentes nos parâmetros adimensionais foram calculados a partir das medições experimentais efetuadas e da definição das grandezas apresentada na secção anterior.

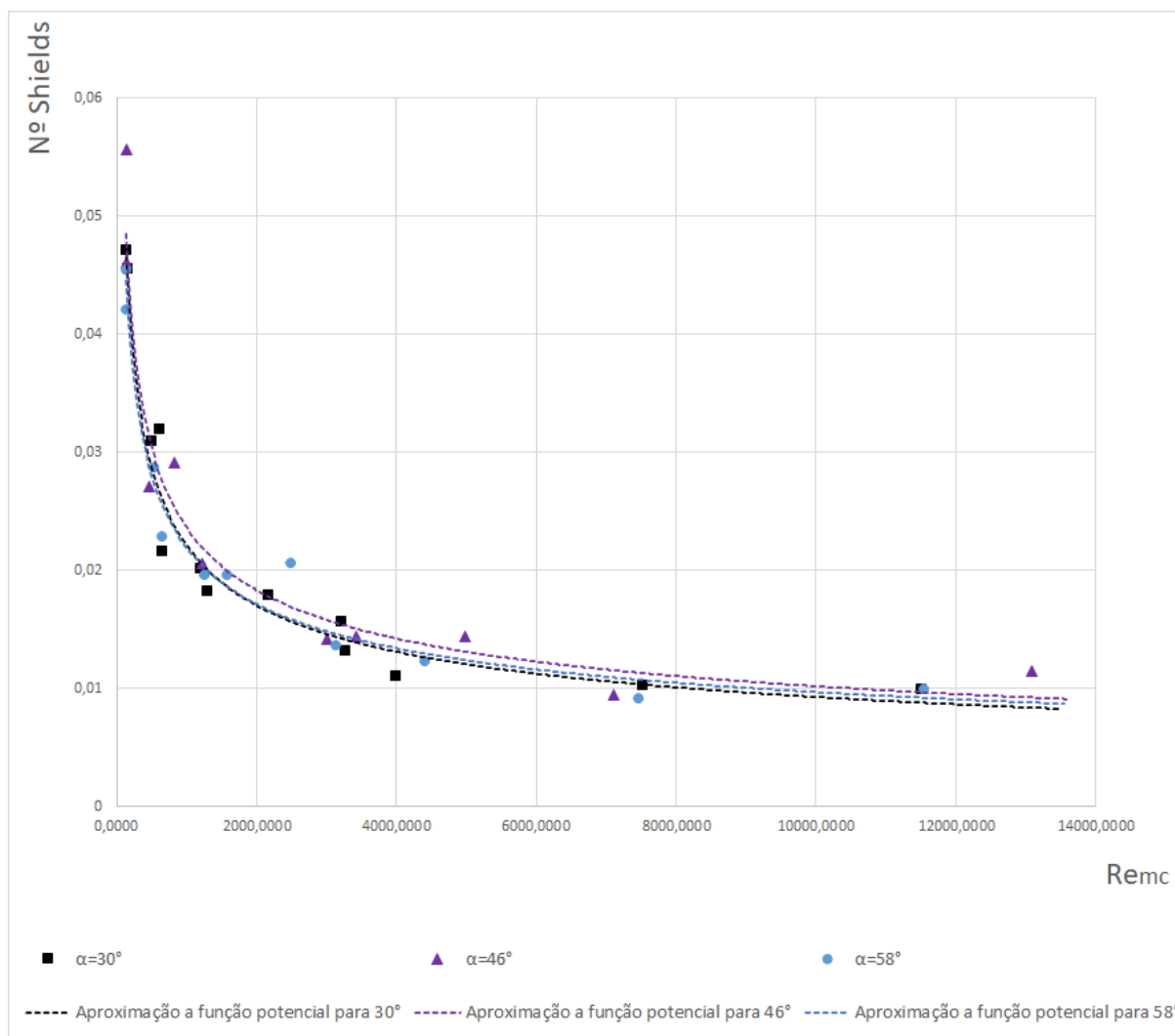


Figura 6.1 – Variação do número de Shields com o número de Reynolds para a condição crítica de início do transporte sólido em escoamentos permanentes multifásicos de condutas ascendentes para diferentes inclinações (Adaptado de Diogo e Moura, não datado).

Na figura foram adicionadas três linhas de tendência, uma para cada ângulo de inclinação de conduta testado, admitindo que as curvas obtidas experimentalmente variam segundo uma lei de potência do tipo $y = b \times x^c$. Os coeficientes b e c obtidos foram, para 30°, $b = 0,300$ e $c = -0,377$, para 46°, $b = 0,293$ e $c = -0,365$ e, para 58°, $b = 0,254$ e $c = -0,354$. Todas as curvas apresentam coeficientes de determinação R^2 bem acima de 90%, o que demonstra um excelente ajuste às medições experimentais efetuadas. Este estudo tem vindo a ser desenvolvido no artigo em preparação anteriormente mencionado (Diogo e Moura, não datado).

7. CONCLUSÕES

Nesta dissertação de mestrado, foi desenvolvido um estudo de investigação experimental de observação, medição e análise de escoamentos permanentes com duas fases água-areia e três fases água-ar-areia para ramos ascendentes de sifões ou condutas elevatórias. Foi analisada a influência nas condições do transporte sólido de amostras de areia com diferentes granulometrias, aquando da variação das condições experimentais relativas à inclinação da conduta ascendente, caudal de ar injetado e caudais de água transportados. Para tal, foram realizadas experiências laboratoriais numa instalação existente no LHRHA montada para o efeito que possibilitou a observação e medição de um conjunto de variáveis que permitem contemplar os diversos aspetos relativos ao comportamento do ar, água e sólidos em escoamentos em duas e três fases em condutas ascendentes. Foi desenvolvida uma análise metódica da aplicação de uma adaptação do modelo simplificado proposto em Diogo e Oliveira (2016), para escoamentos permanentes com duas fases água-ar, de modo a permitir caracterizar o funcionamento hidráulico de escoamentos permanentes com três fases, bem como uma abordagem inicial relacionando o número de Shields com o número de Reynolds crítico para previsão das condições de início do transporte sólido em escoamentos de três fases sob pressão.

Foi observado experimentalmente que numa conduta ascendente com inclinação constante com escoamento em regime permanente, o caudal sólido aumenta significativamente com a velocidade média do líquido, no escoamento de duas fases, e com o aumento de caudal de ar injetado na base da conduta, num escoamento de três fases, mesmo ocorrendo, neste último caso, apenas um pequeno aumento da velocidade média da fase líquida e uma redução significativa da carga a montante devido ao efeito air-lift. Foi também possível observar num ensaio de teste que quando a carga a montante é mantida constante, pode ocorrer um extraordinário aumento do transporte sólido com a injeção de ar, devido ao significativo aumento das velocidades médias da fase líquida e da mistura. Para todos os ângulos de inclinação da conduta ascendente de 30°, 46° e 58°, velocidades médias iniciais de água de 0,30, 0,45 e 0,60 m/s testadas e caudais de ar injetados, o transporte sólido aumentou com a redução do diâmetro dos grãos no escoamento de três fases. No escoamento de duas fases, no entanto, apesar da velocidade média e o caudal necessário para o início do transporte sólido aumentar sempre com o diâmetro das partículas, para todas as inclinações da conduta, foi observado que o caudal sólido também pode aumentar com o diâmetro dos grãos a partir de determinados caudais de água, principalmente para inclinações inferiores, em que o transporte foi efetuado predominantemente por arrastamento. A aplicação do modelo simplificado utilizado para simular o funcionamento hidráulico da instalação no escoamento de três fases produziu uma boa aproximação aos dados obtidos experimentalmente. A abordagem apresentada para

previsão das condições de início do transporte sólido em escoamentos permanentes sob pressão de três fases em condutas ascendentes parece permitir um bom ajuste às medições experimentais quando considerada uma variação segundo uma lei de potência, tendo-se obtido em todos os casos um coeficiente de determinação R^2 amplamente superior a 90%.

Por fim, esta dissertação constituiu apenas um pequeno, mas seguro contributo para a investigação e desenvolvimento do conhecimento do transporte sólido em escoamentos permanentes sob pressão multifásicos, particularmente em condutas ascendentes. Admite-se que o modelo de previsão das condições críticas, ou de início do transporte sólido, em escoamentos permanentes sob pressão de três fases, em condutas ascendentes (Diogo e Moura, não datado), que foi iniciado no âmbito do projeto de investigação em curso no LHRHA, no domínio dos escoamentos multifásicos, projeto no qual se insere o trabalho de investigação que conduziu à elaboração da presente dissertação, venha a ser desenvolvido e concluído a curto prazo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apóstolo, A. S. (2011). "Arejamento e elevação em sistemas de saneamento por injeção de ar comprimido", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- ASCE. (2007). "*Gravity sanitary sewer design and construction*". Asce Manuals and reports on engineering practice no. 60 Wef Manual of Practice No. Fd-5. 2ª edição, American Society of Civil Engineers, Virginia.
- Butler, D., May, R. e Ackers, J. (2003), "Self-cleansing sewer design based on sediment transport principles", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, Issue 4, pp. 276-282.
- Chisholm, D. e Laird, A.D.K. (1958). "Two-phase flow in rough tubes". *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 80, pp. 276-286.
- Davis M.L. (2010), "*Water and wastewater engineering: Design principles and practice*", McGraw-Hill, New York.
- Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de agosto. Diário da República n.º 194/1995, I Série B, páginas 5284 – 5319. Ministério das obras públicas, transportes e comunicações. Lisboa.
- Diogo, A. F. e Apóstolo, A. S. (2012). "Experimental gain of hydraulic head by air injection in inverted siphons", *Proceedings of the 1st International Congress on Water, Waste and Energy Management*, Salamanca, Spain.
- Diogo, A. F., e Gomes, C. C. (2011). "Estudo experimental de injeção de ar em sifões invertidos." *Proc., 6th CLME—Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Simpósio Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente*, FEUP, FEUEM, Maputo, Mozambique, (CDROM 14 p.), 751–752. (in Portuguese).
- Diogo, A. F. e Moura, P.M. (não datado). "Self-cleaning velocity in upward three-phase steady pipe-flow", Título actual, Artigo em preparação.
- Diogo A.F. e Oliveira M.C. (2016). "A simplified approach for the computation of steady two-phase flow in inverted siphons", *Journal of Environmental Management*, Vol. 166, pp. 294-308.
- Diogo, A.F., Oliveira, M.C. (2013). "A preliminary numerical approach for the study of compressed air injection in inverted siphons". *ASCE-Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, Issue 7, pp. 772-784.
- Diogo, A.F. e Oliveira, A.L. (2008), "Sistemas de drenagem e reutilização de águas residuais comunitárias da Zona Sudoeste do Município da Praia, Cabo Verde, um caso de estudo", 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo, Setembro 2008.
- Diogo, A. F., e Vilela, F. A. (2014) "Head losses and friction factors of steady turbulent flows in plastic pipes", *Urban Water Journal*, Volume 11, Issue 5, pp. 414-425.

- Fabre J. (2003) "Gas-liquid slug flow" In: Bertola V. "*Modelling and experimentation in two-phase flow*", International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures), vol 450. Springer, Vienna.
- Franzini, J. B. e Finnemore, E. J. (1997). "*Fluid mechanics with engineering applications*". 9ª edição, WCB/McGraw-Hill, Boston.
- Ibiki, T. e Ishii, M. (2002). "Distribution parameter and drift velocity of drift-flux model in bubbly flow". *Heat and Mass Transfer*, Vol 45, pp. 707-721.
- Kassab, S.Z., Kandil, H.A., Warda, H.A. e Ahmed, W.H. (2009). "Air-lift pumps characteristics under two-phase flow conditions". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, Issue 1, pp. 88-98.
- Kassab, S.Z., Kandil, H.A., Warda, H.A. e Ahmed, W.H. (2007). "Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow". *Chemical Engineering Journal*, Vol. 131, Issues 1-3, pp. 273-281.
- Kato, H., Miyazawa, T., Timaya, S. e Iwasaki, T. (1975). "A study of an air-lift pump for solid particles". *Bulletin of the JSME*, Vol. 18, Issue 117, pp. 286-294.
- Krishna, R., Urseanu, M.I., Baten, J.M. e Ellenberger, J. (1999). "Rise velocity of a swarm of large gas bubbles in liquids", *Chemical Engineering Science*, Vol. 54, Issue 2, pp. 171-183.
- Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Tsuchihashi, R., e Stensel, H. D. (2003). "*Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*". 4th edition, McGraw-Hill, New York.
- Metcalf & Eddy Inc. (1981). "*Wastewater engineering: Collection and pumping of wastewater*". McGraw-Hill, New York.
- Nenes, A., Assimacopoulos, D., Markatos, N. e Mitsoulis, E. (1996). "Simulation of airlift pumps for deep water wells". *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 74, Issue 4, pp. 448-456.
- Nicklin, D. J. (1963). "The air-lift pump: Theory and optimisation." *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol 41, Issue 1, pp. 29-39.
- Nicklin, D.J., Wilkes, J.O. e Davidson, J.F. (1962). "Two-phase flow in vertical tubes", *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol 40, Issue 1, pp. 61-68.
- Oliveira, M. C. (2009). "Órgãos acessórios especiais de sistemas de saneamento. contribuição para o estudo de sifões invertidos", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Peysson, Y., Ouriemi, M., Medale, M., Aussillous, P., Guazzelli, É. (2009) "Threshold for sediment erosion in pipe flow", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 35, Issue 6, pp. 597-600.
- Quintela, A.C. (2014). "*Hidráulica*", 13ª ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Reinemann, D.J. (1987). "A theoretical and experimental study of airlift pumping and aeration with reference to aquacultural applications". Tese de Doutorado, "Faculty of the Graduate School of Cornell University".

Yoshinaga, T. e Sato, Y. (1996). "Performance of an air-lift pump for conveying coarse particles". *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 22, Issue 2, pp. 223-238.

ANEXO A – Dados obtidos nas medições experimentais em escoamentos permanentes de duas e três fases

Tabela A. 1 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cotas piezométricas medidas no ponto de injeção de ar e a montante e temperatura da água no reservatório principal, para escoamentos de água e areia e inclinação de 30°.

$\alpha = 30^\circ$							
$D_s = 4,76 \text{ a } 9,52 \text{ (mm)}$				$D_s = 2,36 \text{ a } 4,76 \text{ (mm)}$			
$T_w = 20 \text{ }^\circ\text{C}$				$T_w = 19 \text{ }^\circ\text{C}$			
Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	$(Z+P/\gamma)_2$ (mm)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	$(Z+P/\gamma)_2$ (mm)
1,95	0	3353	3333	1,69	0	3337	3323
3,04	0	3393	3353	2,61	0,006	3363	3333
3,59	0,003	3425	3372	3,59	2,34	3456	3394
3,79	0,004	3435	3380	4,10	10,47	3450	3385
4,60	16,83	3487	3398	4,82	19,58	3510	3425
5,88	51,24	3630	3500	5,43	33,71	3595	3485
6,56	83,07	3720	3570	5,75	40,10	3626	3505
6,91	114,94	3810	3635	5,88	40,96	3625	3505
8,70	247,07	4265	3940	6,49	60,77	3715	3575
-	-	-	-	7,20	88,63	3825	3640
-	-	-	-	8,95	204,07	4260	3937
$D_s = 1,18 \text{ a } 2,36 \text{ (mm)}$				$D_s = 0,425 \text{ a } 1,18 \text{ (mm)}$			
$T_w = 18 \text{ }^\circ\text{C}$				$T_w = 19 \text{ }^\circ\text{C}$			
Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	$(Z+P/\gamma)_2$ (mm)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	$(Z+P/\gamma)_2$ (mm)
1,69	0	3330	3315	1,69	0,001	3325	3315
2,23	0,01	3354	3333	3,89	5,38	3420	3360
3,89	5,75	3420	3360	4,54	10,16	3475	3400
4,65	13,24	3475	3400	5,06	16,02	3550	3450
5,30	21,69	3550	3450	5,68	22,86	3610	3490
5,55	25,22	3585	3475	6,49	37,71	3695	3545
5,88	32,33	3635	3505	7,06	58,21	3795	3615
6,42	45,10	3710	3560	9,64	189,27	4295	3955
6,98	67,65	3795	3615	-	-	-	-
8,95	181,83	4270	3935	-	-	-	-

Tabela A. 2 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cotas piezométricas medidas no ponto de injeção de ar e a montante e temperatura da água no reservatório principal, para escoamentos de água e areia e inclinação de 46°.

$\alpha = 46^\circ$							
Ds = 4,76 a 9,52 (mm)				Ds = 2,36 a 4,76 (mm)			
T_w = 19,5 °C				T_w = 19 °C			
Q_w (L/s)	M_s (g/s)	(Z+P/Υ)₁ (mm)	(Z+P/Υ)₂ (mm)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	(Z+P/Υ)₁ (mm)	(Z+P/Υ)₂ (mm)
1,69	0	4841	4828	1,69	0	4848	4833
2,61	0	4880	4842	2,61	0,005	4890	4858
3,31	0,10	4910	4860	3,40	0,61	4945	4895
4,10	1,57	4970	4907	4,00	2,11	4960	4897
4,71	18,60	4990	4902	4,65	14,02	4985	4909
5,24	36,00	5035	4934	5,18	28,28	5030	4929
5,62	47,39	5050	4937	5,49	38,15	5050	4937
6,01	60,57	5045	4919	5,88	48,14	5065	4926
6,49	76,33	5105	4966	6,56	67,49	5120	4956
6,77	89,21	5135	4971	9,12	170,17	5500	5210
9,20	194,74	5495	5344	-	-	-	-
Ds = 1,18 a 2,36 (mm)				Ds = 0,425 a 1,18 (mm)			
T_w = 18 °C				T_w = 19,5 °C			
Q_w (L/s)	M_s (g/s)	(Z+P/Υ)₁ (mm)	(Z+P/Υ)₂ (mm)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	(Z+P/Υ)₁ (mm)	(Z+P/Υ)₂ (mm)
1,69	0,0002	4842	4829	1,75	0,02	4850	4837
1,95	0,002	4848	4823	1,85	0,03	4862	4849
2,42	0,11	4885	4847	2,16	0,11	4890	4865
3,22	0,66	4932	4894	2,61	0,39	4915	4890
4,21	2,82	4980	4917	3,17	0,87	4935	4897
4,65	13,10	4985	4897	3,50	1,59	4950	4900
5,12	24,43	5030	4929	4,21	3,95	4940	4877
5,62	35,05	5005	4892	4,71	18,28	4990	4914
5,88	42,34	5035	4909	5,24	31,69	4970	4882
6,56	68,14	5125	4974	5,94	56,49	5035	4922
8,21	125,84	5325	5098	6,42	77,69	5110	4971
8,53	140,23	5370	5131	6,70	90,86	5134	4983
-	-	-	-	9,03	193,11	5493	5216

Tabela A. 3 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cotas piezométricas medidas no ponto de injeção de ar e a montante e temperatura da água no reservatório principal, para escoamentos de água e areia e inclinação de 58°.

$\alpha = 58^\circ$							
Ds = 4,76 a 9,52 (mm)				Ds = 2,36 a 4,76 (mm)			
T_w = 22 °C				T_w = 21 °C			
Q_w (L/s)	M_s (g/s)	(Z+P/Υ)₁ (mm)	(Z+P/Υ)₂ (mm)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	(Z+P/Υ)₁ (mm)	(Z+P/Υ)₂ (mm)
1,69	0	5340	5327	1,69	0,003	5360	5347
2,61	0,003	5373	5348	2,57	0,01	5390	5365
3,40	0,30	5460	5422	3,31	0,36	5480	5442
4,10	1,94	5537	5474	4,21	2,84	5515	5452
4,65	16,96	5476	5413	4,65	11,31	5478	5415
5,00	29,79	5510	5434	5,00	22,84	5550	5474
5,49	49,07	5553	5465	5,49	45,31	5563	5475
5,62	53,89	5565	5464	6,49	91,22	5665	5526
6,28	77,14	5636	5510	8,61	189,94	5950	5723
6,70	95,64	5703	5564	-	-	-	-
8,61	181,22	5975	5748	-	-	-	-
Ds = 1,18 a 2,36 (mm)				Ds = 0,425 a 1,18 (mm)			
T_w = 22 °C				T_w = 23 °C			
Q_w (L/s)	M_s (g/s)	(Z+P/Υ)₁ (mm)	(Z+P/Υ)₂ (mm)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	(Z+P/Υ)₁ (mm)	(Z+P/Υ)₂ (mm)
1,69	0,0009	5372	5359	1,69	0,03	5375	5362
2,27	0,02	5390	5377	2,27	0,28	5392	5379
2,74	0,15	5431	5406	2,70	0,72	5445	5420
3,26	0,66	5490	5440	3,26	1,65	5471	5421
4,10	2,68	5538	5475	4,10	7,87	5430	5380
4,65	13,65	5478	5415	4,43	20,27	5453	5390
4,94	24,93	5497	5421	5,00	40,53	5500	5424
5,49	39,83	5540	5452	5,37	55,57	5535	5447
5,62	52,07	5565	5464	5,75	80,79	5580	5479
6,35	75,69	5645	5519	6,28	108,18	5641	5515
7,28	125,74	5769	5605	6,70	127,73	5698	5559
8,53	191,51	5947	5720	7,13	157,88	5745	5594
-	-	-	-	8,53	261,02	5942	5715

Tabela A. 4 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 30° e velocidade de água inicial de 0,30 m/s.

$\alpha = 30^\circ$							
$U_{w0} = 0,30 \text{ m/s}$							
$D_s = 4,76 \text{ a } 9,52 \text{ (mm)}$				$D_s = 2,36 \text{ a } 4,76 \text{ (mm)}$			
$T_w = 23^\circ\text{C}$				$T_w = 19^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	1,69	0	3323	0	1,69	0	3333
1,64	1,75	0	2835	1,65	1,78	0,01	2838
3,27	1,81	0	2550	3,30	1,81	0,04	2540
3,80	1,81	0	2445	4,20	1,85	0,07	2403
4,46	1,88	0,0005	2365	4,49	1,88	0,09	2366
$D_s = 1,18 \text{ a } 2,36 \text{ (mm)}$				$D_s = 0,425 \text{ a } 1,18 \text{ (mm)}$			
$T_w = 23^\circ\text{C}$				$T_w = 23^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	1,69	0	3314	0	1,69	0,0009	3314
1,09	1,72	0,05	2972	0,57	1,69	0,20	3095
1,64	1,75	0,09	2841	1,09	1,72	0,51	2965
2,73	1,78	0,26	2605	1,63	1,75	0,94	2835
3,78	1,81	0,48	2406	2,18	1,75	1,26	2715
4,44	1,88	0,70	2335	2,79	1,78	1,62	2592
-	-	-	-	3,26	1,81	2,05	2530
-	-	-	-	3,78	1,81	2,46	2396
-	-	-	-	4,44	1,88	4,21	2330

Tabela A. 5 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 30° e velocidade de água inicial de 0,45 m/s.

$\alpha = 30^\circ$							
$U_{w0} = 0,45 \text{ m/s}$							
$D_s = 4,76 \text{ a } 9,52 \text{ (mm)}$				$D_s = 2,36 \text{ a } 4,76 \text{ (mm)}$			
$T_w = 23^\circ\text{C}$				$T_w = 19^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	2,49	0	3358	0	2,49	0,006	3364
1,63	2,57	0,03	2952	0,57	2,53	0,05	3175
2,18	2,57	0,09	2855	1,09	2,57	0,08	3040
2,78	2,61	0,19	2775	1,65	2,57	0,19	2950
3,78	2,65	0,39	2610	2,20	2,57	0,31	2863
4,44	2,74	0,51	2490	2,75	2,61	0,64	2783
-	-	-	-	3,36	2,65	0,99	2700
-	-	-	-	3,60	2,65	1,26	2655
-	-	-	-	3,82	2,65	1,61	2623
-	-	-	-	4,19	2,70	1,74	2560
-	-	-	-	4,48	2,74	2,03	2520
$D_s = 1,18 \text{ a } 2,36 \text{ (mm)}$				$D_s = 0,425 \text{ a } 1,18 \text{ (mm)}$			
$T_w = 23^\circ\text{C}$				$T_w = 23^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	2,49	0,03	3357	0	2,49	0,15	3357
0,57	2,49	0,10	3175	0,57	2,49	0,50	3167
1,09	2,53	0,21	3028	1,09	2,53	1,06	3045
1,64	2,57	0,49	2935	1,64	2,57	2,11	2920
2,18	2,57	1,04	2858	2,18	2,57	3,42	2833
2,73	2,61	1,87	2770	2,79	2,61	5,05	2755
4,16	2,70	3,93	2510	3,33	2,65	6,07	2655
4,44	2,74	4,46	2485	3,78	2,65	7,57	2500
-	-	-	-	4,44	2,74	9,40	2417

Tabela A. 6 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 30° e velocidade de água inicial de 0,60 m/s.

$\alpha = 30^\circ$							
$U_{w0} = 0,60 \text{ m/s}$							
$D_s = 4,76 \text{ a } 9,52 \text{ (mm)}$				$D_s = 2,36 \text{ a } 4,76 \text{ (mm)}$			
$T_w = 23^\circ\text{C}$				$T_w = 19^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	3,31	0,002	3400	0	3,31	0,11	3425
0,57	3,40	0,17	3290	0,57	3,40	0,48	3257
1,09	3,45	0,44	3160	1,09	3,45	0,82	3150
1,64	3,50	0,84	3070	1,65	3,52	1,42	3056
2,19	3,55	1,21	2980	2,20	3,55	2,66	2970
2,73	3,55	2,50	2915	2,75	3,57	5,01	2910
3,33	3,59	4,27	2860	3,36	3,59	7,44	2850
3,78	3,59	6,51	2765	3,60	3,59	8,85	2840
4,44	3,59	9,09	2705	3,82	3,59	10,28	2795
-	-	-	-	4,19	3,59	11,98	2750
-	-	-	-	4,48	3,59	13,28	2725
$D_s = 1,18 \text{ a } 2,36 \text{ (mm)}$				$D_s = 0,425 \text{ a } 1,18 \text{ (mm)}$			
$T_w = 23^\circ\text{C}$				$T_w = 23^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	3,31	0,44	3420	0	3,31	0,96	3420
0,57	3,40	0,77	3265	0,57	3,40	1,52	3265
1,09	3,45	1,51	3145	1,09	3,45	3,52	3144
1,64	3,50	2,41	3060	1,64	3,50	7,75	3058
2,19	3,55	4,79	2990	2,19	3,55	13,71	3010
2,73	3,55	8,57	2917	2,73	3,55	21,94	2910
3,33	3,59	12,06	2840	3,33	3,59	28,80	2755
3,78	3,59	16,31	2755	3,78	3,59	33,71	2675
4,44	3,59	20,99	2695	4,44	3,59	41,73	2570

Tabela A. 7 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 46° e velocidade de água inicial de 0,30 m/s.

$\alpha = 46^\circ$							
$U_{w0} = 0,30 \text{ m/s}$							
$D_s = 4,76 \text{ a } 9,52 \text{ (mm)}$				$D_s = 2,36 \text{ a } 4,76 \text{ (mm)}$			
$T_w = 20^\circ\text{C}$				$T_w = 18,5^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	1,69	0	4845	0	1,69	0	4845
1,17	1,75	0	4280	1,17	1,75	0	4280
1,65	1,78	0	4075	1,65	1,81	0	4103
3,30	1,81	0	3640	3,30	1,88	0,001	3691
4,19	1,88	0	3428	4,19	1,91	0,0047	3503
4,46	1,88	0,0004	3395	4,49	1,95	0,0052	3468
$D_s = 1,18 \text{ a } 2,36 \text{ (mm)}$				$D_s = 0,425 \text{ a } 1,18 \text{ (mm)}$			
$T_w = 19^\circ\text{C}$				$T_w = 19^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	1,69	0	4840	0	1,69	0,01	4845
1,17	1,75	0,005	4307	0,54	1,69	0,18	4557
1,65	1,78	0,009	4101	0,84	1,72	0,33	4415
2,44	1,81	0,08	3910	1,17	1,75	0,58	4297
3,29	1,81	0,19	3700	1,65	1,78	0,96	4123
3,81	1,85	0,39	3590	2,44	1,81	1,32	3900
4,19	1,88	0,49	3474	3,28	1,85	1,78	3644
4,46	1,91	0,68	3446	3,81	1,85	1,94	3490
-	-	-	-	4,47	1,88	2,47	3384

Tabela A. 8 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 46° e velocidade de água inicial de 0,45 m/s.

$\alpha = 46^\circ$							
$U_{w0} = 0,45 \text{ m/s}$							
$D_s = 4,76 \text{ a } 9,52 \text{ (mm)}$				$D_s = 2,36 \text{ a } 4,76 \text{ (mm)}$			
$T_w = 19^\circ\text{C}$				$T_w = 19^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	2,49	0,0003	4880	0	2,49	0,0006	4885
0,57	2,53	0,0008	4618	0,57	2,53	0,0008	4635
1,09	2,53	0,00097	4413	1,09	2,53	0,005	4430
1,65	2,57	0,001	4290	1,65	2,57	0,017	4280
2,20	2,61	0,004	4173	2,20	2,57	0,02	4175
2,74	2,61	0,01	3990	2,74	2,57	0,09	4065
3,35	2,65	0,03	3770	3,35	2,61	0,27	3930
3,81	2,65	0,10	3674	3,59	2,61	0,49	3860
4,47	2,70	0,20	3525	3,81	2,65	0,72	3793
-	-	-	-	4,19	2,70	0,86	3745
-	-	-	-	4,48	2,70	1,31	3665
$D_s = 1,18 \text{ a } 2,36 \text{ (mm)}$				$D_s = 0,425 \text{ a } 1,18 \text{ (mm)}$			
$T_w = 20^\circ\text{C}$				$T_w = 19^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	2,49	0,11	4900	0	2,49	0,23	4895
0,54	2,49	0,02	4655	0,57	2,49	0,54	4630
1,17	2,53	0,11	4457	1,09	2,53	1,41	4400
1,65	2,53	0,36	4287	1,65	2,57	2,18	4210
2,20	2,57	0,72	4167	2,20	2,57	2,79	4175
2,75	2,57	1,33	3990	2,74	2,61	5,18	3938
3,28	2,61	1,90	3831	3,35	2,61	8,08	3762
3,81	2,61	2,20	3694	3,81	2,65	12,78	3676
4,47	2,65	3,63	3586	4,48	2,65	18,59	3526

Tabela A. 9 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 46° e velocidade de água inicial de 0,60 m/s.

$\alpha = 46^\circ$							
$U_{wo} = 0,60 \text{ m/s}$							
$D_s = 4,76 \text{ a } 9,52 \text{ (mm)}$				$D_s = 2,36 \text{ a } 4,76 \text{ (mm)}$			
$T_w = 20^\circ\text{C}$				$T_w = 18,5^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	3,31	0,202	4927	0	3,31	0,30	4940
0,57	3,35	0,04	4715	0,57	3,31	0,07	4755
1,09	3,40	0,08	4570	1,09	3,35	0,11	4585
1,64	3,45	0,09	4449	1,65	3,40	0,22	4445
2,20	3,45	0,13	4336	2,20	3,45	0,44	4355
2,74	3,50	0,54	4198	2,75	3,50	1,38	4225
3,35	3,55	1,17	4064	3,36	3,50	2,39	4055
3,81	3,55	1,72	3954	4,49	3,59	5,61	3765
4,47	3,55	3,11	3841	-	-	-	-
$D_s = 1,18 \text{ a } 2,36 \text{ (mm)}$				$D_s = 0,425 \text{ a } 1,18 \text{ (mm)}$			
$T_w = 20^\circ\text{C}$				$T_w = 20^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	3,31	0,64	4950	0	3,31	1,23	4935
0,57	3,31	0,24	4728	0,57	3,31	1,33	4705
1,09	3,35	0,72	4565	1,09	3,35	2,64	4460
1,64	3,40	1,40	4397	1,64	3,45	8,18	4318
2,20	3,40	2,21	4288	2,20	3,50	17,81	4190
2,74	3,45	4,84	4130	2,74	3,55	25,72	4060
3,35	3,45	13,12	3925	3,34	3,59	35,10	3930
3,80	3,55	19,87	3814	3,80	3,59	43,81	3820
4,46	3,59	27,77	3726	4,46	3,59	46,39	3730
-	-	-	-	4,75	3,59	52,67	3610

Tabela A. 10 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 58° e velocidade de água inicial de 0,30 m/s.

$\alpha = 58^\circ$							
$U_{wo} = 0,30 \text{ m/s}$							
$D_s = 4,76 \text{ a } 9,52 \text{ (mm)}$				$D_s = 2,36 \text{ a } 4,76 \text{ (mm)}$			
$T_w = 20^\circ\text{C}$				$T_w = 20^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	1,69	0	5347	0	1,69	0	5354
1,16	1,81	0	4840	1,17	1,78	0,0002	4753
1,64	1,81	0	4640	1,64	1,81	0,0005	4617
3,27	1,95	0,001	4170	3,28	1,88	0,004	4151
3,80	1,95	0,002	3989	3,80	1,91	0,03	3980
4,46	1,95	0,003	3830	4,46	1,95	0,07	3870
$D_s = 1,18 \text{ a } 2,36 \text{ (mm)}$				$D_s = 0,425 \text{ a } 1,18 \text{ (mm)}$			
$T_w = 22^\circ\text{C}$				$T_w = 22^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	1,69	0,0008	5370	0	1,69	0,05	5375
1,16	1,75	0,04	4840	0,54	1,72	0,61	5120
1,64	1,81	0,12	4650	1,17	1,78	1,47	4800
2,19	1,85	0,30	4480	1,64	1,81	1,98	4560
2,79	1,88	0,67	4250	2,19	1,85	2,37	4387
3,27	1,88	0,98	4124	2,79	1,88	5,65	4172
3,80	1,91	1,40	3930	3,27	1,88	8,08	3989
4,17	1,91	1,65	3838	3,80	1,91	11,40	3814
4,46	1,95	2,92	3805	4,46	1,95	16,95	3681

Tabela A. 11 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 58° e velocidade de água inicial de 0,45 m/s.

$\alpha = 58^\circ$							
$U_{wo} = 0,45 \text{ m/s}$							
$D_s = 4,76 \text{ a } 9,52 \text{ (mm)}$				$D_s = 2,36 \text{ a } 4,76 \text{ (mm)}$			
$T_w = 22^\circ\text{C}$				$T_w = 22^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	2,49	0,001	5385	0	2,49	0,007	5405
0,57	2,53	0,002	5260	0,57	2,53	0,02	5260
1,09	2,57	0,006	4995	1,09	2,57	0,06	4990
1,64	2,57	0,01	4835	1,64	2,61	0,19	4835
2,19	2,61	0,03	4675	2,18	2,65	0,35	4685
2,73	2,70	0,11	4510	2,73	2,65	0,89	4510
3,33	2,70	0,27	4359	3,33	2,70	1,85	4300
3,80	2,74	0,66	4210	3,78	2,74	2,56	4176
4,44	2,74	1,82	4095	4,44	2,74	6,64	3905
$D_s = 1,18 \text{ a } 2,36 \text{ (mm)}$				$D_s = 0,425 \text{ a } 1,18 \text{ (mm)}$			
$T_w = 22^\circ\text{C}$				$T_w = 23^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	2,49	0,07	5430	0	2,49	0,45	5440
0,57	2,53	0,13	5230	0,57	2,53	1,60	5190
1,09	2,57	0,74	4965	1,09	2,57	6,65	4845
1,64	2,61	1,46	4785	1,64	2,61	12,62	4642
2,19	2,65	2,29	4671	2,19	2,65	19,95	4480
2,72	2,70	4,73	4318	2,73	2,70	27,25	4331
3,32	2,70	11,91	4180	3,33	2,70	34,54	4146
3,78	2,74	18,24	3990	3,78	2,74	40,85	3988
4,44	2,74	30,78	3890	4,44	2,74	57,73	3827

Tabela A. 12 – Resultados das medições experimentais efetuadas: caudal de ar injetado, caudal de água à saída do descarregador, caudal mássico sólido transportado, cota piezométrica medida a montante do ponto de injeção de ar e temperatura da água no reservatório principal, em escoamentos de água, ar e areia para a inclinação de 58° e velocidade de água inicial de 0,60 m/s.

$\alpha = 58^\circ$							
$U_{wo} = 0,60 \text{ m/s}$							
$D_s = 4,76 \text{ a } 9,52 \text{ (mm)}$				$D_s = 2,36 \text{ a } 4,76 \text{ (mm)}$			
$T_w = 23^\circ\text{C}$				$T_w = 23^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	3,31	0,24	5460	0	3,31	0,32	5492
0,57	3,35	0,09	5310	0,57	3,35	0,20	5325
1,09	3,40	0,20	5100	1,09	3,40	0,66	5090
1,64	3,50	0,41	4965	1,64	3,45	1,55	4920
2,19	3,50	0,84	4795	2,19	3,50	3,07	4650
2,73	3,55	1,88	4645	2,73	3,55	7,51	4485
3,33	3,55	7,26	4420	3,33	3,59	18,48	4325
3,79	3,64	15,46	4185	3,80	3,64	28,97	4194
4,44	3,64	31,78	4077	4,45	3,64	45,31	4081
$D_s = 1,18 \text{ a } 2,36 \text{ (mm)}$				$D_s = 0,425 \text{ a } 1,18 \text{ (mm)}$			
$T_w = 23^\circ\text{C}$				$T_w = 23^\circ\text{C}$			
Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)	Q_a (L/s)	Q_w (L/s)	M_s (g/s)	$(Z+P/\gamma)_1$ (mm)
0	3,31	0,73	5495	0	3,31	1,70	5485
0,57	3,40	0,75	5315	0,57	3,40	7,07	5185
1,09	3,45	3,13	5010	1,09	3,45	29,11	4942
1,64	3,50	11,25	4820	1,64	3,50	51,31	4815
2,19	3,55	23,31	4655	2,19	3,55	70,94	4665
2,73	3,55	36,55	4485	2,74	3,59	99,26	4490
3,33	3,59	52,60	4329	3,34	3,59	127,33	4340
3,80	3,64	66,16	4190	3,80	3,64	155,46	4208
4,46	3,67	90,49	4086	4,46	3,64	190,29	4090

ANEXO B – Pormenor das medições experimentais com escoamento de duas fases na zona de início de transporte sólido

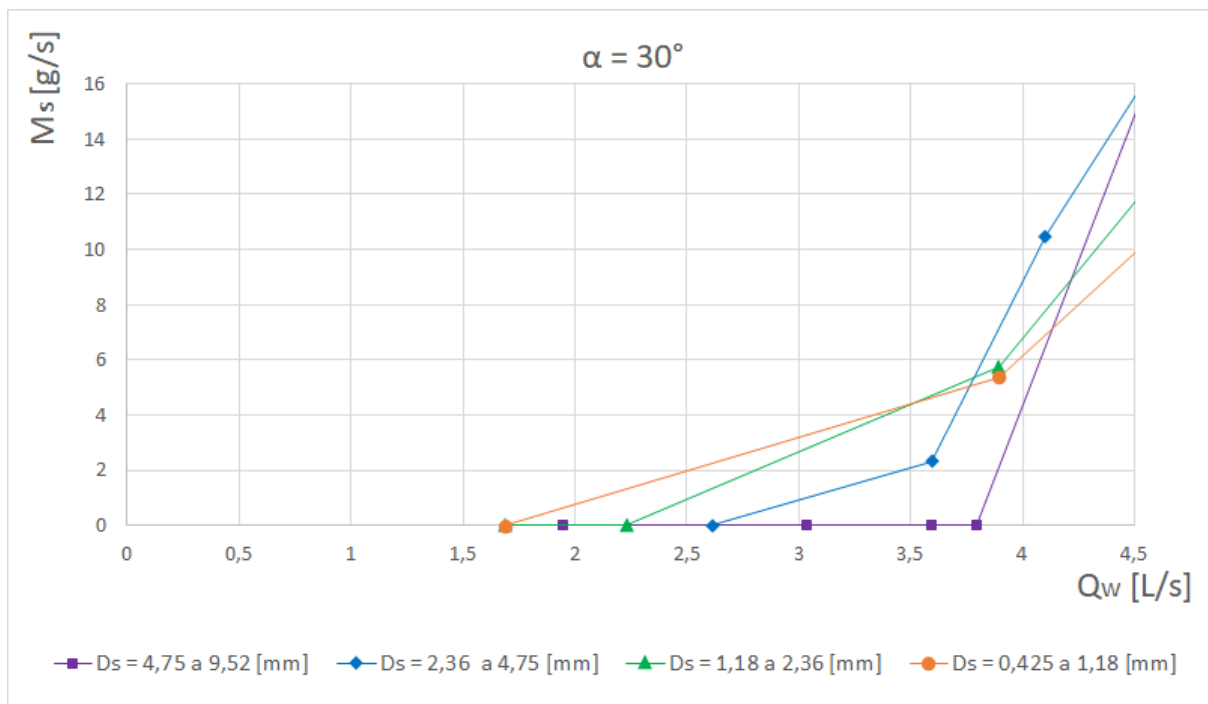


Figura B. 1 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) na zona de início de transporte sólido para um ângulo de inclinação $\alpha = 30^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

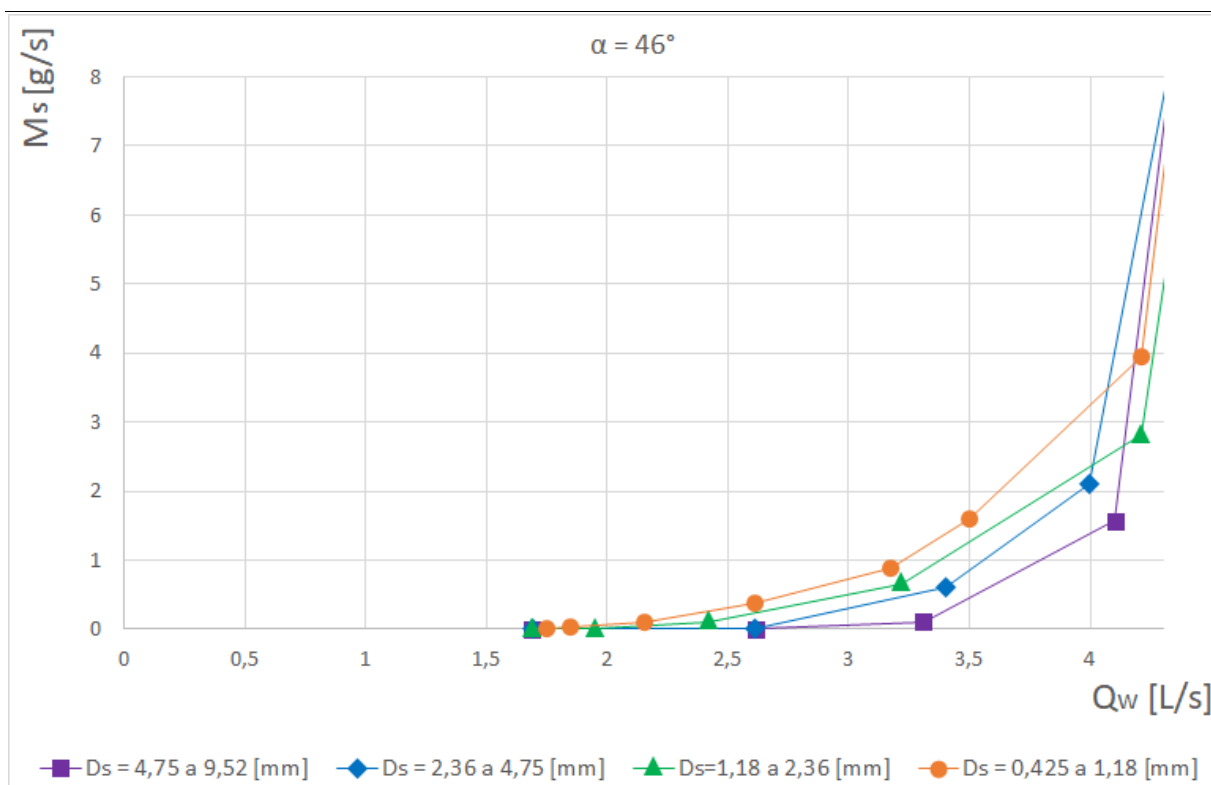


Figura B. 2 – Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) na zona de início de transporte sólido para um ângulo de inclinação $\alpha = 46^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.

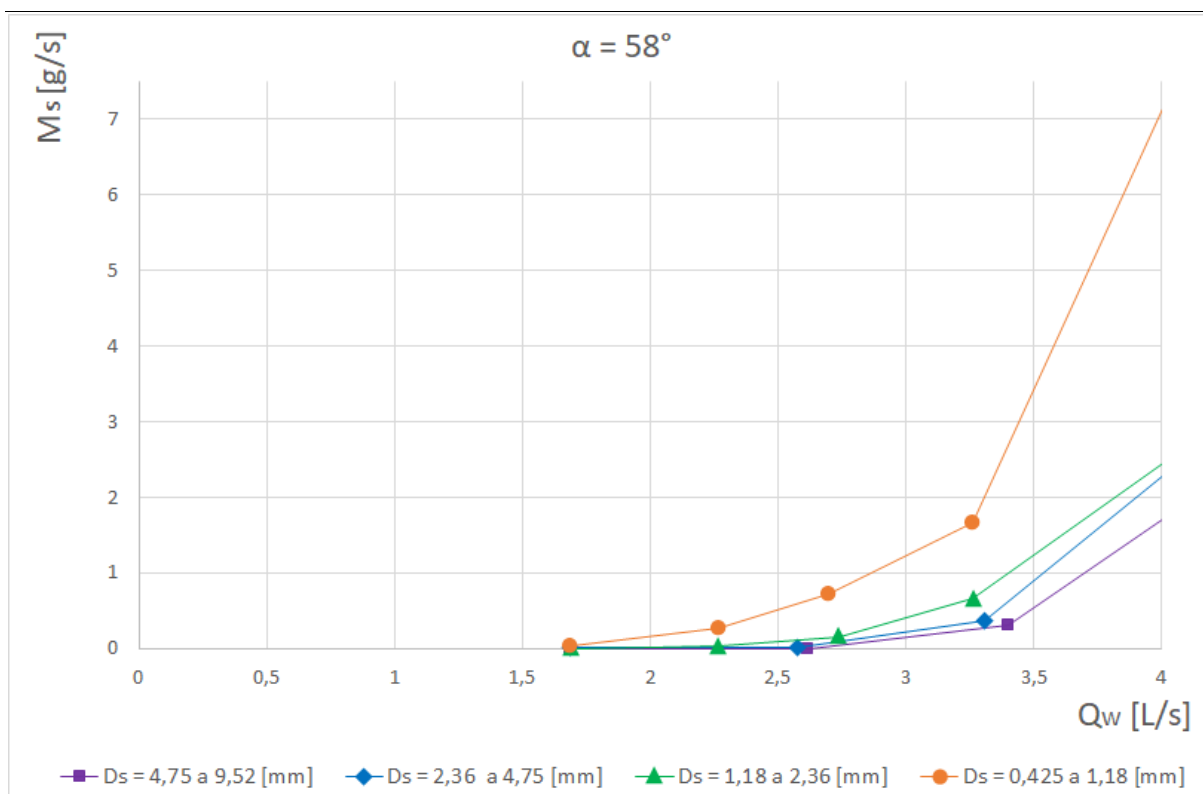


Figura B. 3 - Variação do caudal mássico sólido (M_s) com o caudal de água (Q_w) na zona de início de transporte sólido para um ângulo de inclinação $\alpha = 58^\circ$ e partículas sólidas de diferentes diâmetros.