



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2014

**Fábio André
Martins Ribeiro**

**Estudo Laboratorial de Sedimentos Coesivos
da Ria de Aveiro**



**Fábio André
Martins Ribeiro**

**Estudo Laboratorial de Sedimentos Coesivos
da Ria de Aveiro**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação do Doutor Luís Ivens Ferraz Saavedra Portela, Investigador Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

o júri

presidente

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Doutora Anabela Tavares Campos Oliveira
Geóloga Marinha do Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A todos os que estiveram presentes e que me acompanharam durante esta fase, e que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho, expresso aqui o meu agradecimento.

Aos meus pais, agradeço de uma forma especial, todo o apoio e carinho que me dedicaram, agradeço também a oportunidade que me deram de ter a melhor formação possível, não só como estudante, mas também como pessoa.

Ao meu orientador, professor Carlos Coelho, por todo o apoio e disponibilidade, e pela partilha de conhecimentos que contribuíram de forma positiva para a elaboração deste trabalho. Ao co-orientador, engenheiro Luís Portela, quero expressar o meu agradecimento pelos seus ensinamentos e pela ajuda prestada no LNEC.

À engenheira Sandra Costa, agradeço por todo o apoio, atenção e disponibilidade demonstrada.

Ao técnico Fernando Brito, quero agradecer pelo apoio e ajuda prestada durante a realização dos ensaios no LNEC.

Por último, mas não menos importante, queria agradecer a todos os meus amigos, em especial à Ana Carrilho e à Inês Filipe, que estiveram sempre presentes durante esta fase da minha vida e que me proporcionaram grandes momentos.

A todos os mencionados e aqueles que não mencionei fica aqui a minha sincera gratidão.

palavras-chave

Ria de Aveiro, sedimentos coesivos, velocidade de queda, tensão tangencial no fundo.

resumo

A Ria de Aveiro é um sistema costeiro de elevado valor económico, ambiental e social, que tem sofrido importantes modificações de origem antropogénica, mas que é também potencialmente sensível às alterações climáticas. Parte das transformações resultam do transporte de sedimentos que ocorre na Ria, pelo que a compreensão destes processos é importante. No que respeita à simulação do transporte sedimentar e da evolução morfológica, os modelos numéricos dependem de parâmetros de erosão, transporte e deposição ainda mal compreendidos, particularmente no caso do transporte sedimentar coesivo. O estudo dos processos que envolvem o transporte sedimentar deste tipo de sedimentos é complexo e de difícil avaliação, uma vez que lhe estão associados inúmeros fatores que condicionam o seu comportamento.

A avaliação do comportamento dos sedimentos coesivos incidiu essencialmente em ensaios laboratoriais efetuados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Os primeiros ensaios foram realizados na coluna de sedimentação, onde se fez variar tanto a concentração inicial de sedimentos em suspensão, como a salinidade das suspensões analisadas, de forma a perceber qual o efeito destas componentes sobre a velocidade de queda dos sedimentos coesivos. Os segundos ensaios foram realizados nouro tipo de equipamento (canal anular) cujo principal objetivo recaiu na caracterização dos processos de deposição e de erosão de uma amostra de sedimentos da Ria de Aveiro, mediante a aplicação de diferentes tensões de corte no fundo.

Este trabalho encontra-se dividido em sete capítulos, sendo realizada uma breve recolha bibliográfica sobre os processos de transporte sedimentar dos sedimentos coesivos, uma descrição dos ensaios laboratoriais, bem como uma análise e discussão dos resultados obtidos, fazendo uma comparação com valores propostos por outros autores. São ainda apresentadas as principais conclusões e possíveis propostas para trabalhos futuros.

keywords

Ria de Aveiro, cohesive sediments, settling velocity, bottom shear stress.

abstract

Ria de Aveiro is a coastal system of high economic, environmental and social value, which has undergone significant changes of anthropogenic origin, but it is also very sensitive to climate change. Part of the processing result of sediment transport that occurs in the Ria, so that understanding of these processes is important. Regarding to the simulation of sediment transport and morphological evolution, the numerical models depend on parameters of erosion, transport and deposition poorly understood, particularly in the case of cohesive sediment transport. The study of sedimentary processes involving transport of such sediments is complex and difficult to assess, since it is associated with numerous factors that influence their behavior.

The evaluation of the behavior of cohesive sediment primarily focused on laboratory tests conducted at the National Laboratory of Civil Engineering. The first trials were conducted in sedimentation column in which was varied the initial concentration of suspended sediment and salinity of the sample in order to understand the effect of these components on the settling velocity of cohesive sediments. The second tests were performed in another type of equipment (annular channel) whose main goal corresponded to the characterization of the processes of deposition and erosion of a sediment sample of the Ria de Aveiro, by applying different shear stresses at the bottom.

This work is divided into seven chapters, with a brief literature review conducted on sediment transport processes of cohesive sediments, a description of the laboratory tests as well as an analysis and discussion of the results, making a comparison with the values proposed by other authors. The main conclusions and possible proposals for future work are also presented.

ÍNDICE GERAL

1. Introdução	3
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Estrutura	6
2. Processos de Transporte Sedimentar.....	9
2.1. Velocidade de queda	9
2.1.1. Efeito da salinidade.....	11
2.1.2. Efeito da concentração.....	11
2.1.3. Estimativas de velocidade de queda.....	12
2.2. Tensão críticas de corte	15
2.2.1. Processo de erosão	15
2.2.2. Processo de deposição	19
3. Área de Estudo	23
3.1. Caracterização	23
3.2. Campanhas realizadas.....	26
3.2.1. Recolha de amostras de água	27
3.2.2. Recolha de amostras de sedimentos do fundo	29
4. Equipamentos e Métodos Laboratoriais	33
4.1. Coluna de sedimentação.....	33
4.1.1. Características gerais	33
4.1.2. Preparação laboratorial dos ensaios	34
4.1.3. Execução dos ensaios	37
4.2. Canal anular	39
4.2.1. Características gerais	39
4.2.2. Preparação laboratorial dos ensaios	40
4.2.3. Execução dos ensaios	41
4.3. Análise granulométrica	42
4.3.1. Características gerais do aparelho de difração.....	43
4.3.2. Execução da análise granulométrica.....	44

5. Análise dos Resultados	49
5.1. Coluna de sedimentação.....	49
5.1.1. Concentrações de sedimentos em suspensão	49
5.1.2. Velocidades de queda	52
5.1.3. Análise granulométrica.....	57
5.2. Canal anular	58
5.2.1. Concentrações de sedimentos em suspensão	60
5.2.2. Tensões de corte.....	62
5.2.3. Análise granulométrica.....	64
6. Discussão dos Resultados	69
6.1. Estimativa de velocidades de queda.....	69
6.1.1. Sedimentos coesivos – Formulações existentes	69
6.1.2. Sedimentos coesivos – Ajustes aos ensaios	72
6.1.3. Sedimentos não coesivos.....	74
6.2. Tensões críticas de corte	81
7. Considerações Finais	85
7.1. Conclusões.....	85
7.2. Desenvolvimentos futuros	88
Referências Bibliográficas	91
ANEXOS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

I CAPÍTULO

Figura 1.1 – Localização da Ria de Aveiro e seus principais canais: A – Canal de Ovar, B – Canal do Espinheiro; C – Canal de Ílhavo e D – Canal de Mira (adaptado de Pato *et al.*, 2008)4

II CAPÍTULO

Figura 2.1 - Ciclo de deposição e ressuspensão de sedimentos coesivos (adaptado de Maggi, 2005).....9

Figura 2.2 - Resultados de ensaios laboratoriais (adaptado de Mehta, 1984) 11

Figura 2.3 - Velocidade de queda em função da concentração de sedimentos em suspensão (adaptado de Van Rijn, 1993 in Huang *et al.*, 2006)..... 12

Figura 2.4 - Esquema representativo das tensões críticas num escoamento (Cunha, 2013)..... 15

Figura 2.5 - Processos que afetam a erodibilidade dos sedimentos (adaptado de Grabowski *et al.*, 2011)..... 16

III CAPÍTULO

Figura 3.1 - Localização da área de estudo e indicação das secções que a delimitam (retirada do Google Earth) 23

Figura 3.2 - Esquema do canal principal, indicando a distribuição do prisma de maré pelos diversos canais da Ria de Aveiro (Silva, 1994) 25

Figura 3.3 - Colheita das amostras de água..... 28

Figura 3.4 - Colheita de amostras de sedimentos do fundo..... 29

Figura 3.5 - Registo fotográfico das amostras de sedimentos do fundo..... 29

IV CAPÍTULO

Figura 4.1 - Coluna de sedimentação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil 34

Figura 4.2 - Seleção das amostras e diluição da amostra selecionada para os ensaios 35

Figura 4.3 - Colocação da amostra a ser ensaiada na coluna de sedimentação 36

Figura 4.4 - Aspeto da coluna e dos recipientes após um instante de abertura das válvulas.....	37
Figura 4.5 - Equipamento utilizado durante os ensaios.....	38
Figura 4.6 - Processo de filtração das amostras ensaiadas	38
Figura 4.7 - Canal anular do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.....	39
Figura 4.8 - Equipamentos de recolha e mudança de velocidade de rotação	41
Figura 4.9 – Equipamento para análise granulométrica por difração laser (Ramos, 2013).....	43

V CAPÍTULO

Figura 5.1 – Média vertical da concentração de sedimentos em suspensão ao longo dos ensaios 1, 2 e 4 (salinidade de 0, 15 e 30‰, respetivamente).....	49
Figura 5.2 – Média vertical da concentração de sedimentos em suspensão ao longo, dos ensaios 3, 4 e 5 com salinidade de 30‰ (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4)	50
Figura 5.3 – Média vertical da concentração de sedimentos em suspensão normalizada ao longo dos ensaios 1, 2 e 4 (salinidade de 0, 15 e 30‰, respetivamente)	51
Figura 5.4 – Média vertical da concentração de sedimentos em suspensão normalizada ao longo dos ensaios 3, 4 e 5, com salinidade de 30‰, (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4)	52
Figura 5.5 - Velocidade de queda dos sedimentos, em função da concentração (ensaio 1, 2 e 4, com uma salinidade de 0, 15 e 30‰, respetivamente)	53
Figura 5.6 - Velocidade de queda dos sedimentos, em função da concentração, ensaios 3, 4 e 5, com uma salinidade de 30‰ (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4)	55
Figura 5.7 - Percentagem de sedimentos em suspensão em função da velocidade de queda (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4)	56
Figura 5.8 - Variação temporal da granulometria. Ensaio na coluna de sedimentação.....	58
Figura 5.9 - Evolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão para o ensaio 1, com velocidade máxima do escoamento de 0,50 m/s (o primeiro ponto é distinto, pois apresentou valores anómalos)	60

Figura 5.10 - Evolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão para o ensaio 2, com velocidade máxima do escoamento de 0,35 m/s (o primeiro ponto é distinto, pois apresentou valores anómalos)..... 61

Figura 5.11 - Evolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão. Ensaio 1 e 2 (os primeiros pontos são distintos, pois apresentaram valores anómalos) 62

Figura 5.12 - Variação da concentração de sedimentos em suspensão em função da tensão tangencial, ou de corte, no fundo (os pontos iniciais de cada ensaio foram retirados, visto apresentarem valores anómalos)..... 63

Figura 5.13 – Variação temporal da granulometria. Ensaio no canal anular 64

VI CAPÍTULO

Figura 6.1 – Relação entre a velocidade de queda dos sedimentos em suspensão e a respectiva concentração de sedimentos 70

Figura 6.2 - Velocidade de queda dos sedimentos em suspensão em função da concentração obtidas nos ensaios de laboratório..... 73

Figura 6.3 - Relação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a velocidade de queda (d_{50} da amostra total)..... 76

Figura 6.4 - Relação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a velocidade de queda (d_{50} apenas da parte fina)..... 77

Figura 6.5 - Velocidade de queda, em função de diferentes valores de d_{50} 78

Figura 6.6 - Variação da velocidade de queda em função de diferentes valores de massa volúmica dos sedimentos 79

Figura 6.7 - Variação da velocidade de queda para diferentes valores de massa volúmica da água..... 80

ÍNDICE DE TABELAS

II CAPÍTULO

Tabela 2.1 - Valores típicos da velocidade de queda em alguns estuários e baías (Shi <i>et al.</i> , 2003; Costa e Coelho, 2011; Portela <i>et al.</i> , 2013).....	10
Tabela 2.2 - Valores estimados para a tensão tangencial crítica de erosão superficial	19
Tabela 2.3 - Valores estimados para a tensão tangencial crítica de deposição total	20

III CAPÍTULO

Tabela 3.1 - Valores estimados para a concentração de matéria particulada em suspensão (Cs).....	26
Tabela 3.2 - Propriedades da água da Ria de Aveiro (Costa e Coelho, 2011).....	26
Tabela 3.3 - Horário da recolha de amostras de água, com sedimentos em suspensão.....	28

IV CAPÍTULO

Tabela 4.1 - Massa das amostras recolhidas na campanha de campo	35
Tabela 4.2 - Condições iniciais dos ensaios da coluna de sedimentação	36
Tabela 4.3 - Condições iniciais dos ensaios do canal anular.....	41

V CAPÍTULO

Tabela 5.1 – Média vertical dos valores de concentração de sedimentos em suspensão normalizados, registados ao longo dos ensaios (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4).....	51
Tabela 5.2 - Valores utilizados na obtenção da velocidade de queda para cada intervalos de cada ensaio (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4) ...	54
Tabela 5.3 - Intervalos de tempo correspondentes à deposição de 50% em massa da suspensão estudada (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4).....	57
Tabela 5.4 - Resultados obtidos através da formulação 5.2, para as diferentes velocidades a impor ao canal	59

VI CAPÍTULO

Tabela 6.1 - Parâmetros admitidos no estudo das formulações de sedimentos coesivos	70
Tabela 6.2 - Média da diferença entre as velocidades de queda, obtidas das formulações e laboratorialmente, e correspondentes coeficiente de correlação.....	71
Tabela 6.3 - Média da diferença entre as velocidades de queda, obtidas das aproximações e laboratorialmente, e correspondentes coeficiente de correlação	73

ANEXOS

Tabela A.1 - Resultados obtidos para o ensaio 1	103
Tabela A.2 - Resultados obtidos para o ensaio 2	104
Tabela A.3 - Resultados obtidos para o ensaio 3	105
Tabela A.4 - Resultados obtidos para o ensaio 4	106
Tabela A.5 - Resultados obtidos para o ensaio 5	107
Tabela A.6 - Velocidade de queda mediana e percentagem de matéria em suspensão (no ensaio 3, os valores são referem-se apenas ao nível 4)	108
Tabela A.7 - Velocidade de queda ponderada em cada intervalo de tempo pela massa depositada (no ensaio 3, os valores são referem-se apenas ao nível 4)	109
Tabela A.8 - Resultados obtidos para a formulação 2.1 (A, B, C, D e E)	110
Tabela A.9 - Resultados obtidos para as formulações 2.1 e 2.2 (F, G, H, I e J) ..	111
Tabela A.10 - Resultados obtidos através das aproximações obtidas para os cinco ensaios	112

LISTA DE SIMBOLOS

A	Constante utilizada na formulação de Nicholson e O'Connor	$(\text{N}/\text{m}^{5/2}/\text{kg}^{3/2})$
A_1	Constante utilizada na formulação de Nicholson e O'Connor	$(\text{m}^4/\text{kg}/\text{s})$
A_2	Constante utilizada na formulação de Nicholson e O'Connor	(m^3/kg)
B	Constante utilizada na formulação de Nicholson e O'Connor	-
B_1	Constante utilizada na formulação de Nicholson e O'Connor	-
B_2	Constante utilizada na formulação de Nicholson e O'Connor	-
C_H	Concentração a partir da qual a velocidade de queda diminui	(g/l)
C_s	Concentração de sedimentos em suspensão	(g/l)
D_*	Parâmetro adimensional de dimensão dos sedimentos	-
K	Constante empírica	-
M_{es}	Constante da taxa de erosão superficial	$(\text{g}/\text{m}^2/\text{s})$
P_d	Probabilidade de deposição	-
Q_d	Taxa de deposição	$(\text{g}/\text{m}^2/\text{s})$
Q_{es}	Taxa de erosão superficial	$(\text{g}/\text{m}^2/\text{s})$
Te	Temperatura	$(^\circ\text{C})$
U	Velocidade média vertical	(m/s)
a_{es}	Constante utilizada na formulação de Hwang e Mehta	-
b	Largura da secção do canal	(m)
b_{es}	Constante utilizada na formulação de Hwang e Mehta	-
c_{es}	Constante de Hwang e Mehta	-
d_{10}	Dimensão máxima dos 10% de diâmetros mais baixos	(mm)
d_{50}	Diâmetro mediano dos sedimentos	(mm)
d_{90}	Dimensão máxima dos 90% de diâmetros mais baixos	(mm)
f	Coefficiente de atrito de Colebrook	-
g	Aceleração gravítica	(m/s^2)
h	Altura da secção do canal	(m)
h	Profundidade	(m)
m	Constante empírica	-
n	Coefficiente de Manning	$(\text{s m}^{-1/3})$
r	Raio médio do canal	(m)
r^2	Coefficiente de correlação	-

s	Relação entre as massas volúmicas dos sedimentos e fluido	-
u_*	Velocidade de atrito	(m/s)
$u_{av,b}$	Velocidade média do escoamento referida à base do canal	(m/s)
w_b	Velocidade angular da base	(rad/s)
w_s	Velocidade de queda	(mm/s)
w_{s50}	Velocidade de queda mediana	(mm/s)
w_t	Velocidade angular do anel	(rad/s)
z	Altura acima do fundo	(m)
Δt	Intervalo de tempo entre os instantes n e $n+1$	(min)
ρ	Massa volúmica	(kg/m ³)
ρ_l	Constante utilizada na formulação de Hwang e Mehta	(kg/m ³)
ρ_m	Massa volúmica molhada	(kg/m ³)
ρ_{rd}	Massa volúmica de uma camada recém-depositada	(kg/m ³)
ρ_w	Massa volúmica da água	(kg/m ³)
τ	Tensão tangencial no fundo	(Pa)
$\tau_{cr,es}$	Tensão tangencial crítica de erosão superficial	(Pa)
$\tau_{d,total}$	Tensão tangencial crítica de deposição total	(Pa)
τ_{rd}	Tensão tangencial crítica de uma camada recém-depositada	(Pa)
ν	Coefficiente de viscosidade cinemática	(m ² /s)

I CAPÍTULO

Introdução

1. Introdução

Neste primeiro capítulo é abordado o enquadramento do tema do trabalho desenvolvido, os principais objetivos e ainda a estrutura do presente documento.

1.1. Enquadramento

A Ria de Aveiro é uma massa de água costeira, delimitada por terra, com ligação ao mar, que pode ser considerada um sistema lagunar ou um estuário uma vez que ocorre diluição da água salgada pela água transportada pelos rios (Silva, 1994). Segundo Araújo (2005), a Ria define-se como sendo bastante alongada e ramificada, com um comprimento de 45 km segundo o seu eixo longitudinal e com cerca de 10 km de extensão na zona mais larga. Uma barreira extensa de areia separa o mar da laguna, sendo esta barreira de largura variável, dependendo de fenómenos como a erosão e deposição de sedimentos.

De acordo com Silva (1994), a Ria de Aveiro pode ser incluída no tipo morfológico de estuário fechado por barras de areia, representando um sistema de canais de grande desenvolvimento longitudinal e organizados em forma arborescente por ramificações sucessivas a partir do único ponto de comunicação com o mar (Figura 1.1). A estrutura arborescente formada por canais de grande desenvolvimento longitudinal pode ser dividida em ramos quase independentes que se ligam a um canal principal entre a Barra e Aveiro, designadamente o canal de Ovar, o canal de Espinheiro, o canal de Ílhavo e o canal de Mira.

A contribuição de água doce é derivada de dois rios principais, o Vouga e o Antuã, cuja via de saída é o lado leste da laguna. Estes rios contribuem com uma grande quantidade de sedimentos e detritos orgânicos para o equilíbrio sedimentar da laguna. A entrada de matéria seca total (inorgânicos e orgânicos) com base no fluxo médio do rio é estimada na ordem das mil toneladas por ano (Lopes *et al.*, 2001).

As formas atuais observadas na Ria de Aveiro resultam fundamentalmente dos processos hidrodinâmicos que intervêm no transporte, erosão e deposição de

sedimentos. Dos sedimentos comuns na Ria, as fracções granulométricas mais abundantes são as areias finas e os siltes, frequentemente com algumas argilas (Silva, 1994).

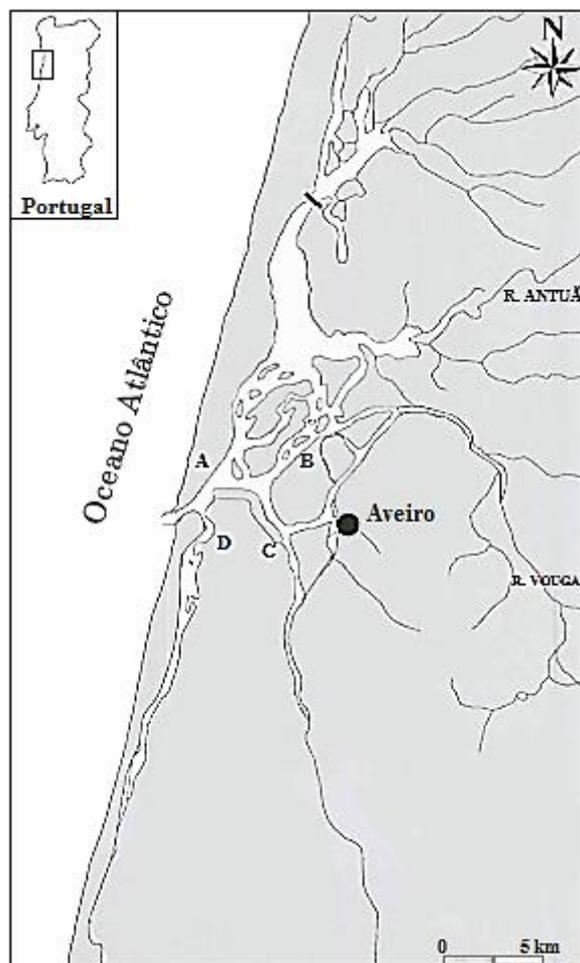


Figura 1.1 – Localização da Ria de Aveiro e seus principais canais: A – Canal de Ovar, B – Canal do Espinheiro; C – Canal de Ílhavo e D – Canal de Mira (adaptado de Pato *et al.*, 2008)

De acordo com Conde (2007), com uma formação recente e evolução rápida, a Ria de Aveiro é uma zona particularmente sensível, alvo de pressões de várias ordens e, desde cedo, muito intervencionada pelo Homem. A Ria de Aveiro é um sistema costeiro de elevado valor económico, ambiental e social, que tem sofrido importantes modificações de origem antropogénica, mas que é também potencialmente muito sensível às alterações climáticas. Os estudos de previsão dos efeitos das ações antropogénicas e das alterações climáticas no sistema são frequentemente baseados na aplicação de modelos numéricos. No entanto, no que respeita à simulação do transporte sedimentar e da evolução morfológica, estes

modelos dependem de parâmetros de erosão, transporte e deposição ainda mal compreendidos, particularmente no caso do transporte sedimentar coesivo.

1.2. Objetivos

O principal objetivo a atingir com a realização desta tese enquadra-se no estudo e caracterização dos processos de deposição de sedimentos coesivos e na avaliação das tensões de corte críticas (de deposição e de erosão) dos sedimentos da Ria de Aveiro. Para tal, foi necessário efetuar uma caracterização dos processos de deposição e de erosão de amostras de sedimentos da Ria de Aveiro, mediante a realização de ensaios no canal anular do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), sob a aplicação de diferentes tensões de corte no fundo. Pretendeu-se também realizar a análise do efeito da concentração da matéria em suspensão e da salinidade sobre a velocidade de queda de uma amostra de sedimentos, pelo que também foram desenvolvidos, ensaios na coluna de sedimentação do LNEC.

Para a obtenção dos sedimentos da Ria de Aveiro, utilizados nos ensaios efetuados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, foram realizadas duas campanhas de campo, desenvolvidas no âmbito de uma tese de doutoramento. Nestas campanhas, para além da recolha de amostras de sedimentos do fundo, foram ainda recolhidas amostras de água, tendo sido apenas utilizadas as amostras de sedimentos do fundo para a realização deste trabalho. Os ensaios no LNEC permitiram a realização da análise do comportamento dos sedimentos em estudo, bem como a caracterização dos mesmos.

Com o objetivo de perceber melhor o comportamento dos sedimentos coesivos, foi ainda realizada uma comparação dos resultados obtidos laboratorialmente, com os resultados obtidos através de formulações propostas por diferentes autores. As formulações utilizadas foram não só as formulações de sedimentos coesivos, mas também as de sedimentos não coesivos. A aplicação das formulações de sedimentos não coesivos em sedimentos coesivos foi efetuada com carácter acessório, com o objetivo de perceber melhor os resultados aplicados aos sedimentos da Ria.

1.3. Estrutura

Para atingir os objetivos propostos, foram desenvolvidas diversas tarefas, passando pela recolha de amostras de sedimentos através de campanhas de campo, ensaios laboratoriais, análise dos resultados obtidos, entre outros, pelo que para apresentar tudo o que foi realizado o presente documento está estruturado em sete capítulos. O presente capítulo é destinado à introdução do tema, onde é feito um breve enquadramento do trabalho e são apresentados os principais objetivos.

No segundo capítulo é apresentada uma breve recolha bibliográfica sobre os principais processos físicos associados ao transporte de sedimentos. É dada, inicialmente, ênfase aos processos relativos à velocidade de queda e posteriormente analisados os processos de erosão e deposição. São ainda abordadas, na primeira secção deste capítulo, as formulações propostas por diferentes autores para o cálculo da velocidade de queda de sedimentos coesivos e não coesivos.

No terceiro capítulo são apresentadas as principais características da área de estudo, com o objetivo de recolher informação para dar resposta ao analisado nos capítulos seguintes. Neste capítulo também são referidas as campanhas de campo realizadas para recolha de amostras, que foram ensaiadas em laboratório.

A metodologia dos ensaios laboratoriais é descrita no quarto capítulo, onde são abordados os ensaios realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) com especial atenção aos efetuados com o canal anular e com a coluna de sedimentação. O quinto capítulo, encontra-se destinado à apresentação e análise dos resultados obtidos através dos ensaios descritos no capítulo quatro.

A discussão dos resultados, obtidos laboratorialmente e através das formulações apresentadas no segundo capítulo, é abordada no sexto capítulo. No último capítulo são apresentadas as conclusões retiradas ao longo deste trabalho, bem como apresentadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

II CAPÍTULO

Processos de Transporte Sedimentar

2. Processos de Transporte Sedimentar

No processo de transporte sedimentar de sedimentos coesivos estão envolvidos diversos mecanismos, como a floculação, a agregação, a desagregação, a erosão, a deposição, entre outros (Figura 2.1). A velocidade de queda e a tensão de corte são duas grandezas importantes na caracterização dos fenômenos de erosão e deposição de sedimentos coesivos, fundamentais à compreensão dos processos de transporte sedimentar. Assim, este capítulo encontra-se dividido em duas seções, onde se apresenta em primeiro, uma recolha bibliográfica sobre os fenômenos relacionados com a velocidade de queda, e posteriormente uma recolha sobre o que caracteriza a tensão de corte de um escoamento e os valores críticos que limitam os comportamentos de erosão e deposição. É ainda abordado um conjunto de formulações propostas por diferentes autores, para o cálculo da velocidade de queda em sedimentos coesivos e não coesivos.

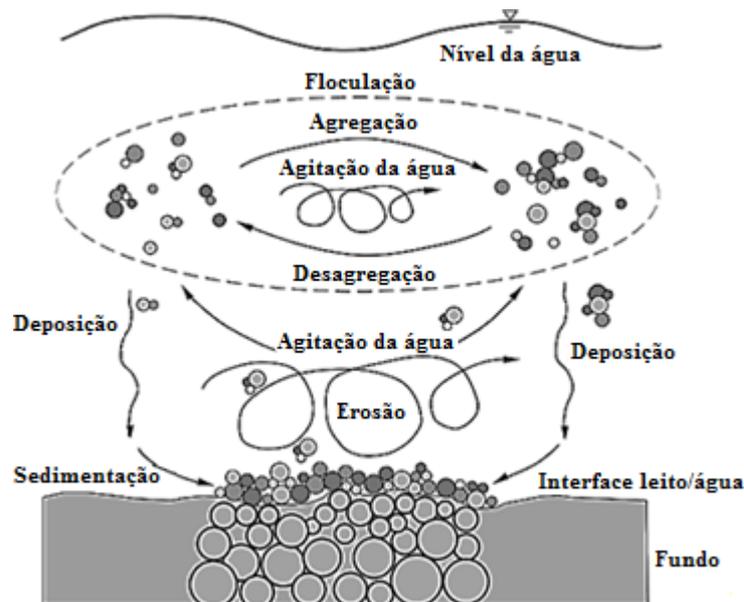


Figura 2.1 - Ciclo de deposição e ressuspensão de sedimentos coesivos (adaptado de Maggi, 2005)

2.1. Velocidade de queda

De acordo com You (2004), a velocidade de queda é um parâmetro muito importante na modelação do transporte de sedimentos coesivos em rios e estuários, uma vez que o seu valor afeta a estimativa das taxas de deposição. Em modelos

sedimentares, a velocidade de queda, ou de sedimentação, ainda é muitas vezes representada por um escalar cujo valor depende, principalmente, da concentração de sedimentos em suspensão local (Sanchez, 2006).

No caso de sedimentos coesivos, a definição de velocidade de queda não pode ser entendida como uma propriedade do sedimento, mas sim das partículas em suspensão. A velocidade de queda dos sedimentos coesivos depende também das propriedades das partículas (textura da superfície, densidade, tamanho e conteúdo orgânico), das propriedades do fluido (densidade, viscosidade e salinidade), dos níveis de turbulência do escoamento e da concentração da matéria particulada em suspensão (Costa e Coelho, 2011).

Como indicação da ordem de grandeza dos valores da velocidade de queda, na Tabela 2.1, encontram-se alguns valores obtidos ou estimados por diversos autores para o parâmetro em estudo neste subcapítulo.

Tabela 2.1 - Valores típicos da velocidade de queda em alguns estuários e baías (Shi *et al.*, 2003; Costa e Coelho, 2011; Portela *et al.*, 2013)

Referência	Localização	Método	w_s (mm/s)
Van Leussen e Cornelisse (1993)	Estuário Sem, Holanda	Tubo de Deposição <i>in situ</i>	0,56-2,82
Ten Brinke (1994)	Estuário Oosterschelde, Holanda	Tubo de Deposição <i>in situ</i>	$\leq 10,0$
Valeur <i>et al.</i> (1996)	Sound, Dinamarca e Suécia	Retenção de sedimentos	0,04
Plus <i>et al.</i> (1988)	Estuários Elbe e Weser, Alemanha	Tubos Owen <i>in situ</i>	0,01-3,50
Hill <i>et al.</i> (1998)	Baía Glacier, Alasca, Estados Unidos	Tubo de deposição <i>in situ</i>	2,21
Hill <i>et al.</i> (2000)	Estuário do Rio Eel, Estados Unidos	<i>Fitting method</i>	0,06-0,10
Van der Lee (2000)	Estuário Dollard, Holanda	Vídeo, <i>in situ</i>	2,70
Shi <i>et al.</i> (2003)	Estuário Changjiang, China	Equação de Rouse	0,4-4,1
Lopes e Dias (2007)	Ria de Aveiro, Portugal	Equação de Dyer	0,10-0,30
Costa e Coelho (2011)	Ria de Aveiro, Portugal	Equação de Stokes	0,03-0,06
Portela <i>et al.</i> (2013)	Estuário do Tejo	Coluna de sedimentação	0,10-0,65

2.1.1. Efeito da salinidade

Vários ensaios, quer de laboratório, quer de trabalho de campo, foram já realizados no passado para comprovar o efeito da salinidade na velocidade de sedimentação. Segundo Mehta (1984), alguns autores chegaram a diversos resultados, tendo sido verificado que apesar das diferenças entre eles, a velocidade de queda apresentava um comportamento linear para valores de salinidade entre 0 a 28‰, em todos os ensaios realizados (Figura 2.2). Durante os diversos estudos, foi ainda, observado que de água doce para água com salinidade de 5‰, a velocidade de sedimentação torna-se 30 vezes mais elevada e que a partir daí até aos 30‰ apenas duplica. Perante estes resultados, verifica-se que a salinidade afeta significativamente a velocidade de queda dos sedimentos finos, principalmente na gama das salinidades mais baixas.

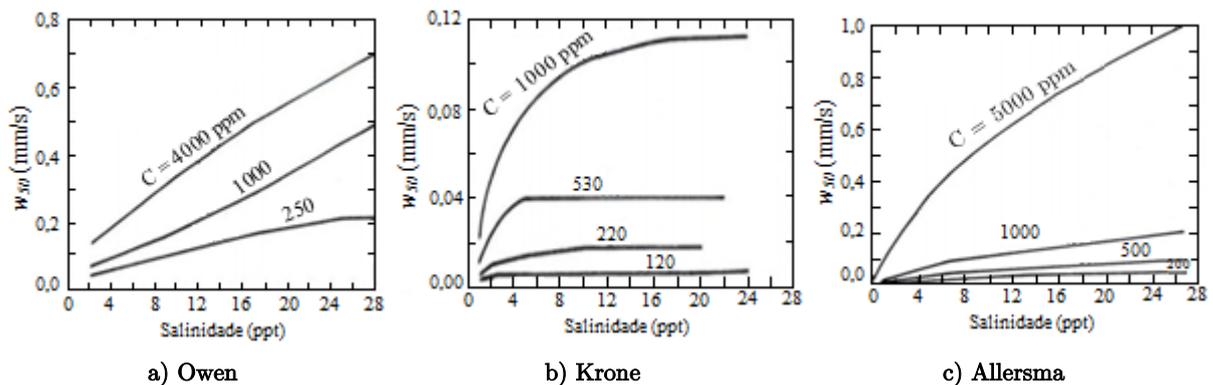


Figura 2.2 - Resultados de ensaios laboratoriais (adaptado de Mehta, 1984)

2.1.2. Efeito da concentração

A velocidade de queda é um parâmetro sedimentar muito importante que explica a deposição e distribuição vertical dos sedimentos em suspensão (Sanchez, 2006). Segundo Ramos (2013), a velocidade de queda pode corresponder à sedimentação livre, à sedimentação devido à floculação das partículas ou à sedimentação limitada pela interação entre partículas, devido a elevadas concentrações. Ross e Mehta (1989) sugeriram que, a sedimentação livre de sedimentos coesivos ocorria para concentrações baixas, menores que 0,4 g/l, onde as partículas não interagem umas com as outras e em que as forças resultam apenas da resistência do líquido e do peso aparente de cada sedimento, e a sedimentação limitada ocorria para concentrações mais altas, superiores a 2,0 g/l.

Mehta (1984), observou também que, para concentrações de sedimento em suspensão até aos 530 mg/l, a velocidade de sedimentação torna-se constante, e, portanto, independente do grau de salinidade da água, para salinidades superiores a 5‰. De acordo com Huang *et al.* (2006), Van Rijn (1993) resumiu num gráfico (Figura 2.3) a influência da concentração de sedimentos sobre a velocidade de queda das partículas.

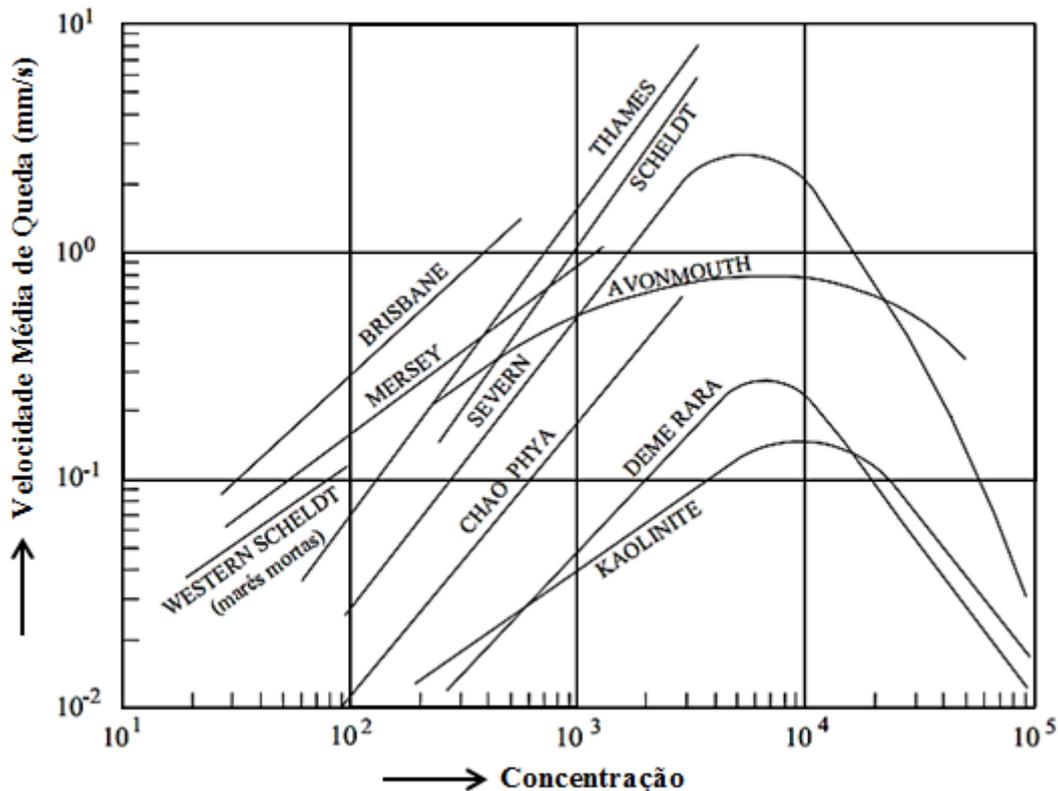


Figura 2.3 - Velocidade de queda em função da concentração de sedimentos em suspensão (adaptado de Van Rijn, 1993 in Huang *et al.*, 2006)

2.1.3. Estimativas de velocidade de queda

São apresentadas nesta secção, algumas formulações utilizadas por diversos autores para a estimativa da velocidade de queda de sedimentos em suspensão. Esta abordagem foi realizada tanto para sedimentos coesivos, como para sedimentos não coesivos.

Sedimentos coesivos

Na literatura podem ser encontrados diferentes valores para a velocidade de queda de sedimentos coesivos em ambientes costeiros e estuarinos. Esses valores têm

origem em trabalhos experimentais realizados por diversos autores, em várias partes do mundo.

Uma vez que a concentração de sedimentos em suspensão influencia a velocidade de queda, torna-se importante estudar as formulações que estimam este parâmetro, para isso existem expressões para velocidades de queda em situações de baixas concentrações e outras que se adequam a qualquer tipo de concentração de sedimentos. De acordo com Huang *et al.* (2006), as equações apresentadas por Cole e Miles (1983) e por Krone (1962), não são válidas para elevadas concentrações de sedimentos em suspensão. Para Cole e Miles (1983), a equação 2.1 deixa de ser válida para concentrações superiores a 5 g/l e para Van Rijn (1993), para valores superiores a 10 g/l.

Cole e Miles (1983), de acordo com Huang *et al.* (2006), bem como Van Rijn (1993) e Van Leussen (1999), segundo Trento (2005), utilizaram para o cálculo da velocidade de queda a fórmula seguinte:

$$w_s = KC_s^m \tag{2.1}$$

Na equação anterior, K e m variam consoante o local onde o estudo é realizado. Para Cole e Miles (1983), K pode tomar valores entre 0,001 e 0,002 e a variável m é igual a 1,00. Para Van Rijn (1993), o parâmetro m varia entre 1,00 e 2,00 e para Van Leussen (1999), m toma valores entre 0,50 e 3,50.

Krone (1962), segundo Huang *et al.* (2006), propôs uma relação semelhante à apresentada anteriormente para a determinação da velocidade de queda, sendo neste caso, o parâmetro m igual a 4/3. Nesta expressão, K é aproximadamente igual a 0,001 (dependendo do tipo de sedimento em análise).

De acordo com Huang *et al.* (2006), Nicholson e O'Connor (1986) propuseram, uma formulação (expressão 2.2) que depende também da concentração de sedimentos em suspensão.

$$\begin{aligned}
 w_s &= A_1 C_s^{B_1} & C_s \leq C_H \\
 w_s &= A_1 C_H^{B_1} \left[1,0 - A_2 (C_s - C_H) \right]^{B_2} & C_s > C_H
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Onde $C_H = 25$ g/l, $A_1 = 6,0 \times 10^{-4}$ m⁴/kg/s, $A_2 = 1,0 \times 10^{-2}$ m³/kg, $B_1 = 1,0$ e $B_2 = 5,0$. Estas variáveis foram determinadas experimentalmente e dependem do tipo de sedimentos e da salinidade.

Sedimentos não coesivos

Nos sedimentos não coesivos a velocidade de queda ou de sedimentação está normalmente relacionada com a dimensão das partículas em suspensão (lei de Stokes). As expressões que se apresentam foram propostas por três autores distintos, tendo como objetivo evitar o recurso a ábacos.

Hallermeier (1981):

$$\begin{aligned}
 w_s &= \frac{\nu D_*^3}{18d_{50}}, & D_*^3 < 39 \\
 w_s &= \nu \frac{D_*^{2,1}}{6d_{50}}, & 39 < D_*^3 < 10^4 \\
 w_s &= \frac{1,05\nu D_*^{1,5}}{d_{50}}, & 10^4 < D_*^3 < 10^6
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Rijn (1984):

$$\begin{aligned}
 w_s &= \frac{\nu D_*^3}{18d_{50}}, & D_*^3 < 16,187 \\
 w_s &= \frac{10\nu}{d_{50}} \left[\left(1 + 0,01D_*^3 \right)^{0,5} - 1 \right], & 16,187 < D_*^3 < 16187 \\
 w_s &= \frac{1,1\nu D_*^{1,5}}{d_{50}}, & D_*^3 > 16187
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Soulsby (1997):

$$w_s = \frac{\nu}{d_{50}} \left[\left(10,36^2 + 1,049 D_*^3 \right)^{0,5} - 10,36 \right], \quad \text{qualquer } D_* \quad (2.5)$$

As expressões apresentadas anteriormente desprezam o efeito da concentração de sedimentos em suspensão. Porém, a equação proposta por Soulsby (1997) pode ser afetada por um coeficiente que tem em conta a concentração de sedimentos. A equação da velocidade de queda poderia então ser da seguinte forma:

$$w_s = \frac{\nu}{d_{50}} \left[\left(10,36^2 + 1,049(1 - C)^{4,7} D_*^3 \right)^{0,5} - 10,36 \right], \quad (2.6)$$

Nas expressões apresentadas anteriormente, ν representa o coeficiente de viscosidade cinemática, d_{50} representa o diâmetro mediano dos sedimentos e D_* é o parâmetro característico adimensional dos sedimentos.

2.2. Tensão críticas de corte

Durante o escoamento, um sedimento coesivo pode passar por duas fases distintas, a deposição e a erosão. Como pode ser observado na Figura 2.4, cada uma das fases é caracterizada por dois tipos de tensão, uma tensão total e uma tensão parcial.

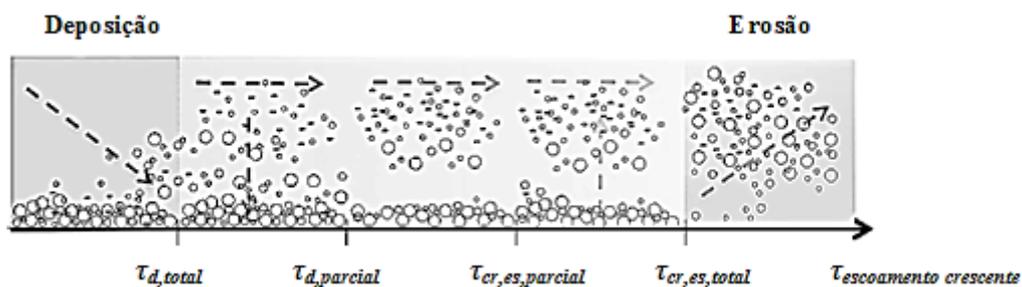


Figura 2.4 - Esquema representativo das tensões críticas num escoamento (Cunha, 2013)

2.2.1. Processo de erosão

Quando se refere o processo de erosão para sedimentos coesivos, este é muito mais complexo do que analisando o mesmo processo nos sedimentos não coesivos, uma vez que é necessária a inclusão de um equilíbrio entre as forças de coesão, de corte

e gravítica (Mehta e Lee, 1994). Os sedimentos coesivos resistem à erosão até certo ponto, mas quando deixam de resistir, a erosão pode ocorrer em massa (Kelly e Gularte, 1981).

Segundo Araújo (2004), o efeito da estrutura do fundo, a salinidade, a temperatura da água, a precipitação, a atividade biológica, o pH, a história de deposição, a composição sedimentar, o teor de água nos sedimentos, a força erosiva do fluido (tensão tangencial do fundo, ondas e correntes) e a concentração de matéria particulada em suspensão são os principais fatores que afetam a erosão dos sedimentos coesivos. Os fatores, mencionados anteriormente, foram apresentados por Young e Southard (1978), Mehta (1981), Nichols (1986), Amos *et al.* (1992), entre outros. Como pode ser analisado na Figura 2.5, os fatores referidos podem ser incluídos em três grupos principais: físicos, geoquímicos e biológicos.

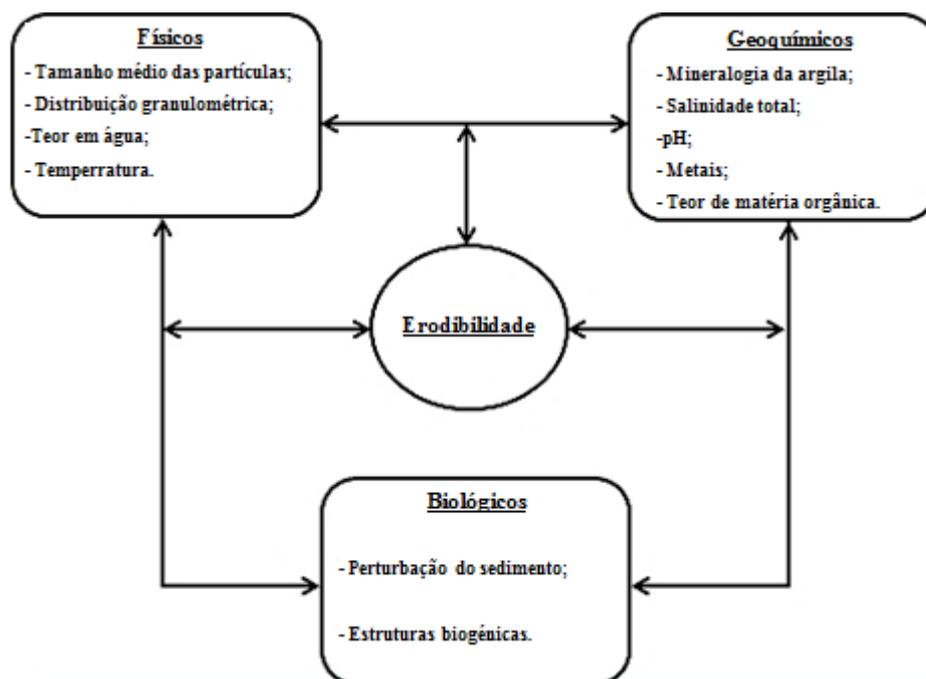


Figura 2.5 - Processos que afetam a erodibilidade dos sedimentos (adaptado de Grabowski *et al.*, 2011)

A erosão é caracterizada por um limite de erosão (que corresponde à velocidade do fluido ou tensão tangencial no fundo para a qual a erosão começa), e pela taxa de erosão, que representa a quantidade de sedimentos erodida num intervalo de tempo (Araújo, 2004). Segundo Johansen *et al.* (1997), ocorre erosão a partir do momento em que a tensão tangencial no fundo, ou tensão de corte no fundo, é superior à

tensão tangencial crítica de erosão superficial ($\tau_{cr,es}$). A erosão varia, de acordo com Mehta (1981 e 1991), com a magnitude da tensão tangencial no fundo, obtendo-se assim vários modos de erosão dos sedimentos coesivos, nomeadamente, erosão superficial de flóculos do fundo, erosão gravítica e arrastamento de lama fluida.

Como referido, a erosão dos sedimentos coesivos é um mecanismo complexo, levando a que as equações conhecidas sejam de natureza empírica (Alves, 2009). A taxa de erosão superficial (Q_{es}) poderá ser estimada através da equação (2.7), apresentada por Partheniades (1962) e Ariathurai (1974).

$$Q_{es} = \begin{cases} M_{es} \left(\frac{\tau - \tau_{cr,es}}{\tau_{cr,es}} \right), & \tau \geq \tau_{cr,es} \\ 0, & \tau < \tau_{cr,es} \end{cases} \quad (2.7)$$

Na equação (2.7), M_{es} representa a constante da taxa de erosão superficial, τ a tensão tangencial no fundo e $\tau_{cr,es}$ a tensão tangencial crítica de erosão superficial. De acordo com Trento (2005), a tensão tangencial no fundo pode ser expressa segundo a clássica distribuição na vertical:

$$\tau = \rho_w u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (2.8)$$

Onde, ρ_w corresponde à massa volúmica da água, u_* representa a velocidade de atrito, z a altura acima do fundo e h a profundidade. Para Ravens e Sindelar (2008), esta tensão tangencial de fundo pode ser estimada através da seguinte expressão:

$$\tau = \rho_w \frac{f}{8} U^2 \quad (2.9)$$

Em que f representa um fator de resistência que pode ser obtido através da fórmula de Colebrook e U a velocidade média vertical.

A constante da taxa de erosão superficial (M_{es}), de acordo com Araújo (2004), depende de parâmetros físico-químicos, que determinam as forças inter-partículas características dos sedimentos coesivos. Esta toma valores consoante a massa volúmica dos sedimentos, a qual pode variar em profundidade e no tempo (Huang *et al.*, 2006). Hwang e Mehta (1989) apresentaram uma fórmula para a estimativa da constante da taxa de erosão, equação (2.10).

$$\log_{10} M_{es} = 0,23e^{\left(\frac{0,198}{\rho_m - 1,0023}\right)} \quad (2.10)$$

O valor da massa volúmica húmida, ou massa volúmica natural, (ρ_m) pode ser estimado laboratorialmente.

A tensão tangencial crítica de erosão superficial ($\tau_{cr,es}$) pode ser determinada através de duas formulações. Uma das fórmulas foi desenvolvida por Nicholson e O'Connor (1986), expressão (2.11), e outra por Hwang e Mehta (1989), expressão (2.12).

$$\tau_{cr,es} = \tau_{rd} + A(\rho_s + \rho_{rd})^B \quad (2.11)$$

Segundo Huang *et al.* (2006), os valores utilizados por Nicholson e O'Connor (1986) foram: 0,08 N/m² para a tensão crítica de material recentemente depositado (τ_{rd}), 0,5 x 10⁻³ N/m^{5/2}/kg^{3/2} para o parâmetro A , 1,5 para o parâmetro B e 80 kg/m³ para a massa volúmica seca de material recentemente depositado (ρ_{rd}).

$$\tau_{cr,es} = a_{es} + (\rho_m + \rho_l)^{b_{es}} + c_{es} \quad (2.12)$$

De acordo com Huang *et al.* (2006), os valores padrão propostos por Hwang e Mehta (1989) para as várias parcelas utilizadas na formulação da equação (2.12) são os seguintes: $a_{es} = 0,883$, $b_{es} = 0,2$, $c_{es} = 0,05$ e $\rho_l = 1065$ kg/m³.

É importante referir que os parâmetros τ_{rd} , ρ_{rd} e ρ_l dependem do local em análise, podendo tomar valores diferentes dos referidos anteriormente. Na tabela seguinte podem ser observados alguns valores obtidos por diferentes autores para a tensão tangencial crítica de erosão superficial.

Tabela 2.2 - Valores estimados para a tensão tangencial crítica de erosão superficial

Referências	$\tau_{cr,es}$ (Pa)
Partheniades (1965)	0,057
Arulanandan <i>et al.</i> (1975)	0,05-3,8
Ariathurai e Arulanandan (1978)	1,2-2,6
Dennet <i>et al.</i> (1998)	0,36-0,77
Nachtergale e Poesen (2002)	0,57-1,65

2.2.2. Processo de deposição

Mehta e Partheniades (1973), segundo Huang *et al.* (2006), realizaram estudos laboratoriais, sobre o comportamento dos sedimentos coesivos durante o processo de deposição, e verificaram que este processo é controlado pela tensão tangencial no fundo, por processos de turbulência nas zonas próximas ao fundo, pela velocidade de queda, pelo tipo de sedimentos, pela altura do escoamento (ou profundidade), pela concentração de matéria em suspensão e pela constituição iónica do fluido da suspensão.

De acordo com Huang *et al.* (2006), a deposição de sedimentos coesivos pode ocorrer através de duas formas, deposição total e parcial. A deposição parcial dá-se quando a tensão tangencial no fundo é superior à tensão tangencial crítica de deposição total, mas inferior à tensão tangencial crítica de deposição parcial (Figura 2.4). Quando a tensão tangencial no fundo (τ) é inferior à tensão tangencial crítica de deposição total ($\tau_{d,total}$), todas as partículas de sedimentos e flóculos tendem a depositar.

No processo de quantificação da deposição, a taxa de deposição total (Q_d) pode ser obtida através da fórmula de Krone (1962), como pode ser observado na equação (2.13).

$$Q_d = C_s w_s P_d, \quad \tau \leq \tau_{d,total} \quad (2.13)$$

A equação apresentada anteriormente é composta por diversos parâmetros, designadamente a concentração da matéria particulada em suspensão (C_s), a velocidade de queda (w_s) e a probabilidade de deposição (P_d).

Segundo Krone (1962), a probabilidade de deposição (P_d) poderá ser estimada através da equação (2.14). A probabilidade de deposição indica a probabilidade das partículas aderirem ao fundo e não voltarem a ser mobilizadas pelo escoamento. Esta probabilidade é função da tensão tangencial no fundo e da tensão crítica de deposição total.

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,total}}, \quad \tau \leq \tau_{d,total} \quad (2.14)$$

Na equação (2.14) a grandeza τ representa a tensão tangencial no fundo e $\tau_{d,total}$ a tensão tangencial crítica para a deposição total.

Tabela 2.3 - Valores estimados para a tensão tangencial crítica de deposição total

Referência	Concentração (g/l)	$\tau_{d,total}$ (Pa)	Local
Krone (1962)	<0,3	0,06	São Francisco, Estados
	$\geq 0,3$ e $\leq 10,0$	0,08	Unidos da América
Mehta e Partheniades (1973)	-	0,15	-
Lopes e Dias (2007)	-	0,1	Ria de Aveiro

Muitos ensaios foram realizados para determinar valores de tensão tangencial crítica para a deposição total de sedimentos coesivos (Tabela 2.3). Estes valores, segundo Huang *et al.* (2006), variam entre 0,06 e 1,1 Pa, dependendo da concentração de partículas em suspensão.

III CAPÍTULO

Área de Estudo

3. Área de Estudo

No presente capítulo é feita uma apresentação da área de estudo, indicando as características da Ria de Aveiro, bem como informação ao nível da distribuição de caudais escoados nos canais, composições granulométricas dos sedimentos dos canais e propagação das marés. São ainda abordadas, neste capítulo, as campanhas de campo realizadas ao longo do trabalho, para a obtenção de sedimentos do fundo em quatro secções que definem a área de estudo e recolha de amostras de água para avaliação da concentração de sedimentos em suspensão.

3.1. Caracterização

A Ria de Aveiro localiza-se no litoral centro de Portugal (Figura 3.1), estando integrada na bacia hidrográfica do rio Vouga. De acordo com Dias *et al.* (2000) tem uma área variável entre 83 km², em preia-mar, e 66 km², em baixa-mar, uma largura máxima de 8,5 km na zona central, um comprimento de 45 km e uma profundidade média de cerca de 1 m, aproximadamente, exceto nos canais de navegação, onde as operações de dragagem são frequentemente realizadas, mantendo os canais com maiores profundidades. É uma laguna costeira de pequena profundidade, separada do mar por um cordão dunar, e que ocupa um sector litoral situado entre Ovar e a Barrinha de Mira, desenvolvendo-se paralelamente à linha de costa (Conde, 2007).



Figura 3.1 - Localização da área de estudo e indicação das secções que a delimitam (retirada do Google Earth)
A – Canal da Barra, B – Canal de S. Jacinto-Ovar, C – Canal de Espinheiro, D – Canal de Ílhavo

Existem indicações que esta Ria é um acidente natural relativamente recente. O processo iniciou-se com o aparecimento de uma restinga que se desenvolveu a norte de Aveiro, protegendo a parte interior da ação direta do mar e provocando a acumulação de sedimentos, que acabaram por ir formando pequenas ilhas, pântanos e zonas intermareais (Ribeiro *et al.*, 2006). Há documentos do século X, que nos permitem comprovar a existência de uma ampla baía onde se abria um estuário, o Vouga, profundamente penetrado pelas marés (Silva, 2001).

As massas de água da laguna ocupam inúmeros canais, separados por pequenas ilhas de origem aluvionar marinha e fluvial. Nos extremos interiores de alguns canais desaguam vários pequenos rios e também o rio Vouga, sendo este último responsável pela maior parte da água doce que aflui à laguna. Estes rios, nos canais onde confluem, formam pequenos estuários que acabam por se intercomunicar, prolongando-se até à proximidade da Barra (Conde, 2007).

De acordo com Vicente (1985), a circulação no interior da laguna é dominada pela maré, cuja amplitude varia entre 3,3 m em maré viva e 1,0 m em maré morta. O prisma de maré para uma amplitude de 2,48 m é de cerca de $70 \times 10^6 \text{ m}^3$, com um caudal médio na Barra de cerca de $4700 \text{ m}^3/\text{s}$. Segundo Silva (1994), o prisma de maré em cada um dos canais principais em relação ao seu valor na boca é de cerca de 38% para o canal de Ovar, 26% para o canal do Espinheiro, 10% para o canal de Mira e 8% para o canal de Ílhavo, como pode ser observado na Figura 3.2.

O canal de Mira tem uma forma rasa alongada, de aproximadamente 20 km de comprimento, recebendo água doce de um pequeno sistema de lagoas e rios (Dias *et al.*, 1999). De acordo com Moreira *et al.* (1993), este canal comporta-se como um estuário, apresentando uma gama de salinidade que varia entre 0,0 a 35,1‰. No que diz respeito à temperatura da água, esta toma valores entre os 8,5 e os 24,7 °C. Já o canal de S. Jacinto apresenta uma extensão de 29 km e é o canal mais importante em termos de largura e comprimento médio. O canal de Ílhavo é o mais estreito e mais curto dos canais principais, com um comprimento de aproximadamente 15 km. Finalmente, o canal do Espinheiro é um pequeno canal

com um comprimento de aproximadamente 17 km que apresenta uma complexa rede de braços “mortos” (Dias *et al.*, 1999).

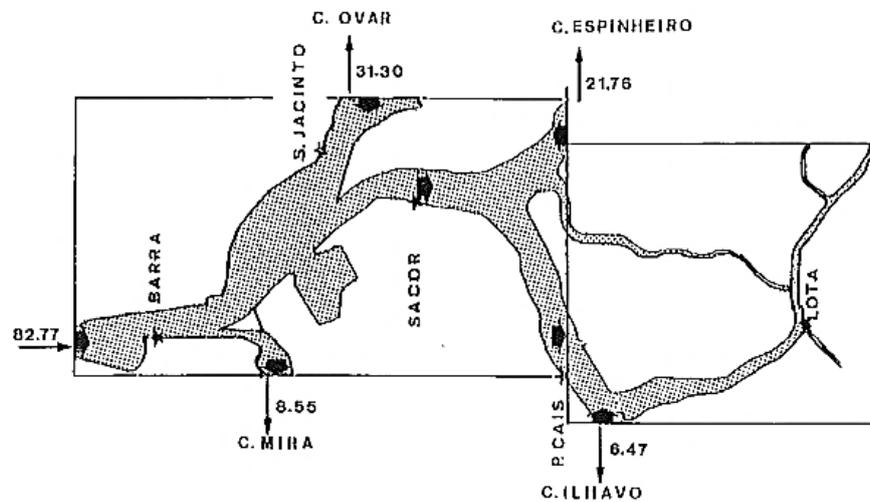


Figura 3.2 - Esquema do canal principal, indicando a distribuição do prisma de maré pelos diversos canais da Ria de Aveiro (Silva, 1994)

Na costa ocidental de Portugal a onda de maré propaga-se de Sul para Norte. A maré penetra no interior da Ria através do canal da Barra e propaga-se a baixa velocidade ao longo dos canais. A velocidade de propagação é tão baixa que em alguns locais o estado de fase pode ser oposto àquele que se verifica no oceano. Os atrasos de fase são maiores em maré baixa podendo atingir cinco horas, nos extremos dos canais de S. Jacinto-Ovar e de Mira. Na enchente, os caudais máximos estão associados a níveis de maré sensivelmente superiores aos níveis associados aos caudais máximos de vazante (Vicente, 1985).

Segundo Lopes *et al.* (2001), a natureza e a distribuição dos sedimentos do fundo são extremamente variáveis, havendo uma grande diferença entre a composição dos sedimentos do Norte e do Sul da Ria. Em termos de composição granulométrica, esta varia entre 20 a 90% de areias nos canais do Sul, para 10 a 80% em lodos, em outros canais. Em suma, os canais do Norte (S. Jacinto e Ovar) são caracterizados principalmente por sedimentos finos coesos, enquanto as areias predominam nos canais do Sul. Abrantes (2005) determinou a concentração de sedimentos em suspensão em sete estações de amostragem. Na tabela seguinte podem ser observados alguns valores obtidos para este parâmetro.

Tabela 3.1 - Valores estimados para a concentração de matéria particulada em suspensão (C_s)

Referência	C_s (mg/l)	Local da Ria de Aveiro
Abrantes (2005)	2,36 a 74,96	Sete pontos distintos
	13,21 a 23,96	Canal de Espinheiro e São Jacinto
Silva (1994)	4,8 a 43,4	Zona da Murtosa e Canal do Espinheiro
Lopes <i>et al.</i> (2006)	40 (média), 160 (máx.)	Baía do Laranjo e Canal de Ovar
Portela e Freire (2009)	13,5 a 24,0	Superfície
	16,0 a 31,1	Fundo

Os valores mencionados em Portela e Freire (2009) são valores médios, obtidos em duas campanhas de campo.

Quanto à salinidade, esta é variável ao longo de toda a extensão da laguna, diminuindo à medida que a distância aumenta em relação à embocadura. Sofre alterações com a mudança das estações e com a quantidade de precipitação ocorrida (Peixoto e Moreira, 1998). Na tabela seguinte, são apresentados valores de salinidade para a Ria de Aveiro, obtidos no projeto Murano (Costa e Coelho, 2011), ao longo de duas campanhas de trabalhos de campo, realizadas em 2009, junto à antiga lota de Aveiro.

Tabela 3.2 - Propriedades da água da Ria de Aveiro (Costa e Coelho, 2011)

Campanha	Salinidade média (‰)	Temperatura média (°C)	Massa volúmica da água (kg/m ³)	Viscosidade dinâmica η ($\times 10^{-4}$ kg/m/s)
1ª Campanha: 02/07/2009	33,4	25,6	1022	9,11
2ª Campanha: 09/07/2009	34,4	20,0	1024	14,40

3.2. Campanhas realizadas

As campanhas de campo, concretizadas nos dias 7 de Outubro de 2013 e 17 de Março de 2014, foram realizadas no âmbito de uma tese de doutoramento e tiveram como objetivo principal a recolha de amostras de água e de sedimentos do fundo nas secções definidas na área de estudo (Figura 3.1c). As campanhas foram efetuadas junto à zona portuária, sendo que a maré prevista pelo Instituto

Hidrográfico para o dia 7 de Outubro de 2013 correspondia a uma baixa-mar às 10h56, com a cota da superfície livre da água a atingir os 0,56 m e uma preia-mar às 17h31, com cota de 3,34 m. Para o dia 17 de Março de 2014 foi prevista uma maré, correspondente a uma baixa-mar às 09h21 de 0,67 m e uma preia-mar às 15h49 de 3,26 m. Nas campanhas dos dias 7 de Outubro de 2013 e 17 de Março de 2014, foi registado um coeficiente de marés igual a 93, sendo este coeficiente indicador da amplitude de maré (diferença de altura entre as consecutivas preia-mares e baixa-mares). Este valor de coeficiente de maré é considerado bastante elevado, uma vez que o máximo possível é de 118.

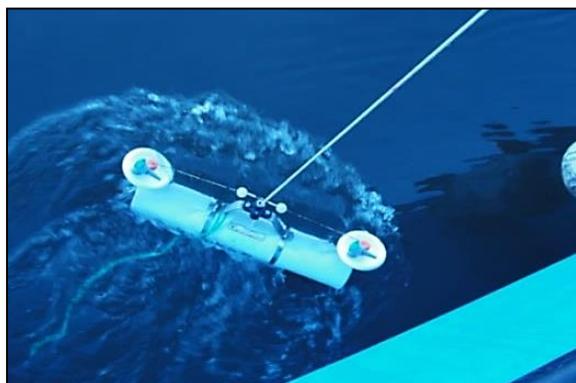
A recolha das amostras foi efetuada nos quatro canais da área de estudo (Barra, Espinheiro, Ílhavo e São Jacinto), tendo sido definidas previamente as secções em análise. A colheita de amostras de água teve como principal função a caracterização dos sedimentos em suspensão, ou seja, tentar perceber melhor a gama de concentrações da matéria particulada em suspensão e ainda a sua granulometria. No caso das amostras do fundo, a recolha serviu para caracterizar as dimensões e o peso volúmico dos sedimentos de fundo dos canais em análise. As amostras de sedimentos do fundo recolhidas nestas campanhas de campo foram utilizadas nos ensaios realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Dos sedimentos recolhidos em ambas as campanhas de campo, apenas foi utilizada a fracção fina das amostras, tendo sido utilizadas apenas as amostras do canal de Ílhavo, visto serem as que apresentavam na sua composição material com granulometrias menores.

3.2.1. Recolha de amostras de água

A recolha das amostras de água foi efetuada com uma garrafa *Van Dorn*, colocada lateralmente à embarcação, de forma a diminuir a perturbação no escoamento causada pela própria embarcação (Figura 3.3).

Inicialmente, pretendia-se a recolha das amostras de água a cerca de 1 m de distância do fundo. No entanto, devido às velocidades de corrente, verificadas na primeira campanha, dificultarem as operações, optou-se por recolher amostras de

água a cerca de 0,5 m da superfície, permitindo assim um melhor controlo da posição da garrafa.



a) Garrafa de *Van Dorn*



b) Recolha das amostras de água

Figura 3.3 - Colheita das amostras de água

As amostras de água foram recolhidas com um intervalo de duas horas na parte da manhã, tendo-se optado por uma recolha de hora a hora na parte da tarde. Este procedimento teve como objetivo caracterizar o comportamento das concentrações de sedimentos e respetivas propriedades ao longo do ciclo de maré. Foram recolhidas cinco amostras em cada secção, perfazendo por isso um total de vinte amostras de água em cada campanha. Na tabela seguinte poderá ser observada a hora de recolha de cada amostra na respetiva secção.

Tabela 3.3 - Horário da recolha de amostras de água, com sedimentos em suspensão

Campanha de campo	Secção	Amostras de água
		Horário de recolha das amostras
1ª Campanha	S1	08:50/ 12:02/ 13:56/ 15:37/ 16:21
	S2	09:10/ 11:52/ 14:03/ 15:27/ 16:13
	S3	09:35/ 11:19/ 14:16/ 15:10/ 15:58
	S4	09:43/ 10:53/ 14:23/ 15:04/ 15:49
2ª Campanha	S1	09:07/ 10:33/ 13:10/ 13:51/ 15:26
	S2	09:17/ 10:4/ 13:16/ 13:56/ 15:15
	S3	09:33/ 10:50/ 13:26/ 14:06/ 15:00
	S4	09:44/ 10:55/ 13:32/ 14:12/ 14:54

3.2.2. Recolha de amostras de sedimentos do fundo

A recolha das amostras de fundo foi realizada com uma draga *Petit Ponar*. O uso da draga foi feito com recurso a um pórtico colocado no barco, que possuía um sistema hidráulico de forma a facilitar a respectiva operacionalidade (Figura 3.4).

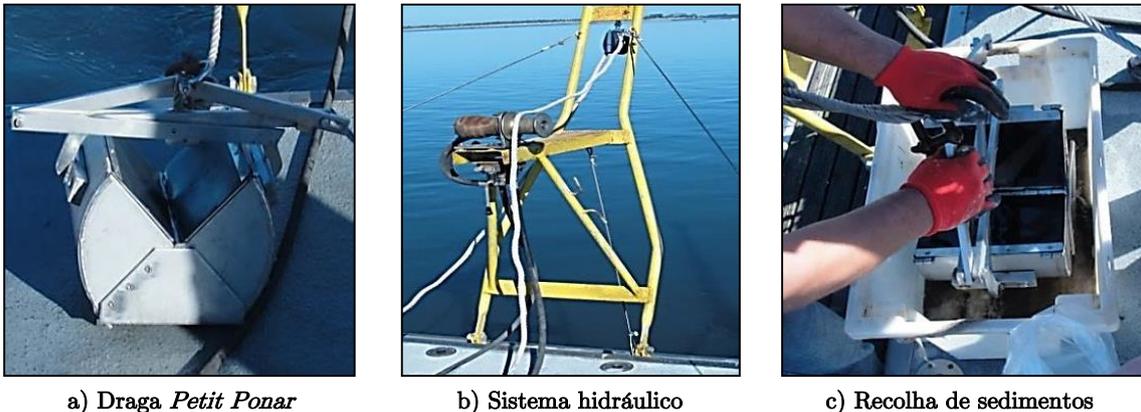


Figura 3.4 - Colheita de amostras de sedimentos do fundo

Relativamente às amostras de sedimentos do fundo, a sua colheita foi realizada, na primeira campanha, em estofa de maré (em baixa-mar), por volta das 12 horas, tendo em cada uma das secções da área de estudo sido recolhidas três amostras (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Registo fotográfico das amostras de sedimentos do fundo

Na figura anterior, encontram-se os registos fotográficos dos sedimentos de fundo das quatro secções analisadas, sendo estes sedimentos referentes à primeira campanha (7 de Outubro de 2013). Os sedimentos recolhidos na segunda campanha (17 de Março de 2014) foram idênticos aos apresentados anteriormente.

Depois de concluída a recolha de todas as amostras nas várias secções, por simples análise visual, verificou-se desde logo que as secções S1, S2 e S3 apresentavam um material grosseiro, em oposição à secção S4, em que as amostras eram constituídas em grande parte por material fino.

IV CAPÍTULO

Equipamentos e Métodos Laboratoriais

4. Equipamentos e Métodos Laboratoriais

Uma vez que o principal objetivo deste trabalho consistiu no estudo e caracterização dos processos de deposição de sedimentos coesivos e das tensões de corte críticas na Ria de Aveiro, torna-se fundamental a realização de estudos laboratoriais para conhecer melhor estes comportamentos. Neste capítulo são apresentados os ensaios efetuados em laboratório, tanto na coluna de sedimentação como no canal anular. Na coluna de sedimentação foram realizados cinco ensaios, onde se fez variar tanto a concentração de sedimentos em suspensão, como a salinidade das suspensões ensaiadas. No canal anular foram concretizados dois ensaios, representativos de dois ciclos de maré, um de marés-vivas e outro de marés-mortas.

4.1. Coluna de sedimentação

Nesta secção são apresentadas as características gerais da coluna de sedimentação existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil e descrito o processo utilizado nos cinco ensaios realizados neste equipamento, incluindo a sua preparação e execução.

4.1.1. Características gerais

De acordo com LNEC (2013), a coluna de sedimentação possui 2,6 m de altura, 0,11 m de diâmetro interno e capacidade efetiva de ensaio de 21 litros (Figura 4.1a). Ao longo da altura, a coluna apresenta 10 válvulas eletromagnéticas, dispostas a diferentes cotas (0,05, 0,15, 0,30, 0,55, 0,80, 1,05, 1,30, 1,55, 1,80 e 2,05 m), comandadas por um autómato programável. As saídas das eletroválvulas são posicionadas sobre recipientes para recolha das amostras de água, onde existem sedimentos em suspensão, instalados numa plataforma de recolha de amostras (Figura 4.1b).

As eletroválvulas são abertas simultaneamente, de modo a recolher amostras nos diferentes níveis da coluna. A recolha das amostras foi efetuada em 10 instantes de tempo pré-definidos (0, 1, 6, 16, 36, 66, 106, 156, 216 e 306 minutos após o início

do ensaio). A mistura inicial, de água e sedimentos, foi homogeneizada através da rotação da coluna em 180 graus em torno de um eixo horizontal.



a) Vista geral da coluna de sedimentação



b) Colocação dos recipientes nos respectivos níveis

Figura 4.1 - Coluna de sedimentação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

A determinação da concentração de sedimentos em suspensão foi efetuada por método gravimétrico, sendo as amostras recolhidas durante os ensaios filtradas com uma membrana de porosidade $0,45 \mu\text{m}$, secas a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ e posteriormente pesadas numa balança de precisão. A velocidade de queda das partículas foi obtida com base na evolução das concentrações de sedimentos em suspensão, para diferentes concentrações iniciais e para diferentes salinidades.

4.1.2. Preparação laboratorial dos ensaios

Como referido, foram executados cinco ensaios na coluna de sedimentação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para a determinação de velocidades de queda de sedimentos coesivos, recolhidos junto ao fundo do Canal de Ílhavo na campanha de campo realizada a 7 de Outubro de 2013. Para a Estação Experimental de Sedimentos Coesivos do LNEC foram levadas três amostras de material fino (Figura 4.2a), secas e passadas previamente por um peneiro de $63 \mu\text{m}$. A necessidade da passagem das amostras pelo peneiro reside no facto de as amostras recolhidas conterem na sua composição diferentes tipos de granulometrias, bem como alguns materiais de composição orgânica e inorgânica.

Neste tipo de ensaios são utilizadas apenas as fracções mais finas das amostras, por isso também a necessidade da peneiração do material recolhido.



a) Amostras recolhidas no Canal de Ílhavo



b) Amostra diluída

Figura 4.2 - Seleção das amostras e diluição da amostra selecionada para os ensaios

As três amostras foram pesadas, mas apenas uma foi selecionada para ser submetida aos ensaios, correspondendo à que apresentava uma massa maior (amostra 4.2). Na tabela seguinte encontram-se os valores obtidos para a massa de cada amostra.

Tabela 4.1 - Massa das amostras recolhidas na campanha de campo

Amostras	Massa (g)
4.1	77,4
4.2	159,8
4.3	126,0

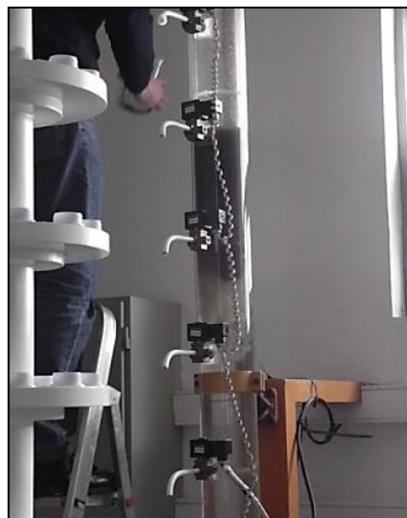
Após a seleção da amostra, foi realizado o processo de diluição dos sedimentos em 4 dm³ de água (Figura 4.2b). Com o intuito de realizar diferentes ensaios com diferentes concentrações, foi necessário retirar da amostra diluída as quantidades necessárias, correspondendo a 800 ml, para a realização do primeiro, segundo e quarto ensaios. No terceiro ensaio foram utilizados 400 ml de amostra e no quinto, e último ensaio, foram utilizados 1200 ml de amostra.

A preparação da coluna de sedimentação para os ensaios obrigou a inserir água até certo nível da coluna, para posteriormente ser colocada a amostra. Durante este

processo foram também colocados todos os recipientes de recolha nos respetivos níveis (Figura 4.1b). Para a colocação da amostra na coluna de sedimentação foi utilizado um funil (Figura 4.3).



a) Colocação da amostra



b) Pormenor da amostra na coluna

Figura 4.3 - Colocação da amostra a ser ensaiada na coluna de sedimentação

Depois da colocação da amostra na coluna, foi introduzida mais água doce, para que a altura inicial de líquido na coluna fosse a desejada.

Nos ensaios em que a salinidade da água tomou valores diferentes de zero, foi necessário adicionar também uma solução contendo a quantidade desejada de sal. As condições iniciais dos ensaios encontram-se apresentadas na tabela seguinte.

Tabela 4.2 - Condições iniciais dos ensaios da coluna de sedimentação

Ensaio	Concentração inicial (g/l)	Salinidade (‰)	Altura inicial de água (m)
1	1,50	0	2,250
2	1,50	15	2,261
3	0,75	30	2,250
4	1,50	30	2,255
5	2,25	30	2,248

Na tabela apresentada anteriormente, os valores correspondentes à concentração inicial dizem respeito às concentrações iniciais “objetivo”, ou seja, aquelas que se pretendiam atingir nos instantes iniciais dos ensaios, no entanto, as concentrações iniciais efetivas, foram relativamente inferiores.

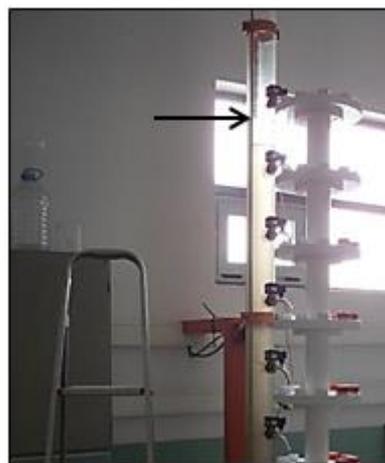
Os ensaios iniciaram-se após a rotação da coluna, para tentar homogeneizar a amostra com a água existente.

4.1.3. Execução dos ensaios

Os ensaios tiveram uma duração total de aproximadamente 5 horas, sendo recolhidas diversas amostras da coluna ao longo do tempo, em intervalos mais reduzidos. A cada intervalo de tempo, estipulado previamente, as válvulas da coluna foram acionadas e foi libertada uma quantidade de solução para os recipientes previamente instalados (Figura 4.4a). Após cada abertura foi registado o valor do nível da água na coluna (Figura 4.4b).



a) Recipientes após abertura das válvulas



b) Nível de água após abertura das válvulas

Figura 4.4 - Aspeto da coluna e dos recipientes após um instante de abertura das válvulas

No decorrer do ensaio foram iniciadas as filtrações das primeiras recolhas. Os filtros foram colocados numa estufa a 40 °C durante uma hora e depois foram colocados num exsiccador (Figura 4.5b) durante aproximadamente 3 a 4 minutos. Este processo é aconselhado, uma vez que o filtro pode arrefecer (ficar à temperatura ambiente) sem absorver a humidade do meio envolvente. Em paralelo

foi realizada a leitura do volume de solução que se encontrava no recipiente, com o auxílio de uma pipeta graduada de 50 ml e de um pompete ou pera de sucção.

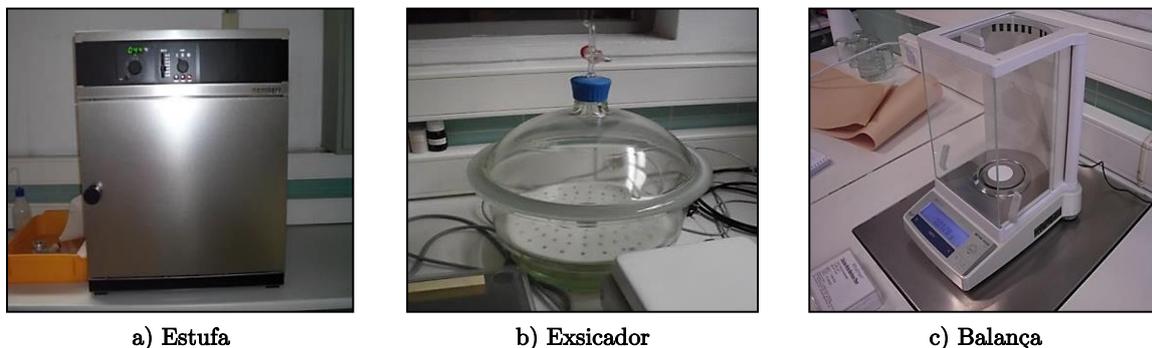


Figura 4.5 - Equipamento utilizado durante os ensaios

Depois de retirado do exsicador o filtro foi pesado (Figura 4.5c) e colocado no equipamento de filtração (Figura 4.6a), onde foi molhado ligeiramente, para uma melhor retenção dos sedimentos.



Figura 4.6 - Processo de filtração das amostras ensaiadas

Acabada a filtração da amostra, o filtro com os sedimentos foi colocado novamente na estufa a 40 °C, pelo menos durante 1 hora. Posteriormente procedeu-se à pesagem dos filtros, passando primeiro pelo exsicador. Depois de retirado o valor da massa dos filtros com os sedimentos, estes foram colocados novamente na estufa por mais 1 hora a 40 °C, repetindo-se novamente a passagem pelo exsicador e a pesagem. O procedimento descrito foi realizado para todos os recipientes dos níveis em análise.

É ainda importante referir que durante o terceiro ensaio existiram alguns problemas com as válvulas da coluna, principalmente na válvula do sétimo nível, uma vez que no decorrer do ensaio esta válvula perdeu algumas das suas capacidades de fecho e começou a libertar a suspensão mesmo depois do tempo de fecho. Este incidente poderá ter levado a alguma perda de matéria em suspensão, uma vez que alguns dos recipientes transbordaram.

4.2. Canal anular

Nesta secção do presente capítulo são apresentadas as características gerais do canal anular do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, bem como a preparação laboratorial e a descrição da execução dos ensaios realizados neste equipamento.

4.2.1. Características gerais

Segundo LNEC (2013), o canal anular é constituído por um canal circular, ou base, de paredes transparentes e por uma tampa, ou anel superior (Figura 4.7), com possibilidade de serem animados de movimentos de rotação independentes, em sentidos opostos. O diâmetro médio do conjunto apresenta um valor de 3,7 m. A secção retangular do canal tem uma largura de 0,30 m e uma altura regulável entre 0,39 e 0,47 m.



a) Vista geral do canal anular



b) Pormenor da rotação do canal anular

Figura 4.7 - Canal anular do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

O canal anular do LNEC está equipado com um instrumento ótico para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão (OSLIM). O objetivo dos ensaios, a realizar neste equipamento, é a determinação de tensões críticas de

erosão e de deposição do sedimento. Para esse efeito, monitoriza-se continuamente a concentração de sedimentos em suspensão através do sensor ótico ou da recolha de amostras (LNEC, 2013).

Os ensaios de erosão iniciam-se com um leito de sedimento colocado no fundo do canal, e consistem na monitorização da evolução da concentração de sedimentos em suspensão, à medida que se impõem valores crescentes de tensão tangencial no fundo. Nos ensaios de deposição procede-se à homogeneização de uma suspensão e impõem-se tensões de corte no fundo sucessivamente decrescentes, de modo a favorecer a deposição de sedimento (LNEC, 2013).

4.2.2. Preparação laboratorial dos ensaios

Executaram-se dois ensaios no canal anular do LNEC, representativos de duas situações de ciclos de maré, para a determinação de concentrações de sedimentos em suspensão em função das tensões tangenciais no fundo. Os sedimentos utilizados foram recolhidos na campanha de campo realizada a 17 de Março de 2014, sendo estes também originários das amostras recolhidas junto ao fundo da secção do Canal de Ílhavo.

Os ensaios foram realizados a partir de uma amostra de cerca de 4,6 kg de massa total (incluindo água), tendo sido passada por um peneiro de 63 μm , e posteriormente diluída em água, obtendo-se um volume final de cerca de 9,5 dm^3 . Foram retirados 10 ml da amostra inicial para saber qual a concentração inicial introduzida no canal, tendo-se chegado a um valor de 107,46 g/l.

A amostra foi introduzida na sua totalidade no canal anular, tendo servido para os dois ensaios realizados. Inicialmente o canal já se encontrava com água, sendo necessário adicionar mais após a introdução da amostra, para garantir o contacto da solução em análise com a parte superior do canal (tampa ou anel superior). As condições iniciais dos dois ensaios realizados encontram-se apresentadas na tabela seguinte.

Tabela 4.3 - Condições iniciais dos ensaios do canal anular

Ensaio	Duração	Velocidade inicial (m/s)	Tensão de corte inicial (Pa)
1	6,5 horas	0,50	0,40
2	6,5 horas	0,35	0,20

A velocidade média do escoamento a impor ao canal foi estimada através da expressão analítica proposta por Booij (1994), e a tensão tangencial no fundo foi obtida através da admissão de uma relação quadrática com a velocidade de queda média do escoamento e uma lei de resistência semi-empírica. As expressões para a obtenção destes dois parâmetros encontram-se mais pormenorizadas no capítulo seguinte.

4.2.3. Execução dos ensaios

Cada um dos ensaios teve uma duração total de aproximadamente 6 horas e 30 minutos, sendo este tempo total dividido em intervalos de 30 minutos. A cada intervalo de tempo, foram recolhidas duas amostras, de 150 e 200 ml, da solução em suspensão, sendo esta recolha realizada através de saídas implantadas na parede lateral do canal (Figura 4.8a). A recolha das amostras de 150 ml destinou-se ao estudo da concentração de sedimentos em suspensão e a recolha dos 200 ml de solução foi destinada ao estudo da granulometria.



a) Equipamento de recolha



b) Equipamento de alteração de velocidade

Figura 4.8 - Equipamentos de recolha e mudança de velocidade de rotação

No fim da recolha de cada amostra, a velocidade de rotação do canal foi alterada, diminuindo até chegar ao valor de zero e aumentando posteriormente até atingir a velocidade inicial do ensaio (0,50 m/s no primeiro ensaio e 0,35 m/s no segundo ensaio), proporcionando assim o estudo de um ciclo de maré. A alteração da velocidade de rotação do canal foi realizada através de um dispositivo de variadores (Figura 4.8b).

No que diz respeito às filtrações das amostras, estas foram realizadas após cada recolha, sendo o processo de filtração idêntico ao descrito anteriormente para os ensaios realizados na coluna de sedimentação.

É importante referir, que no decorrer dos ensaios foi necessário ter em conta alguns cuidados, como por exemplo, a introdução de água no canal, na mesma quantidade que a recolhida. Este processo permite manter a suspensão em contato com o anel superior do canal, assegurando a velocidade do escoamento pretendida. Outro aspecto relevante incide no facto da primeira recolha de cada ensaio não ser aproveitada, por corresponder a uma forma de limpeza do tubo de silicone através do qual era feita a recolha, sendo a amostra introduzida novamente no canal anular. Este procedimento foi realizado, porque o canal anular ficou em funcionamento durante toda a noite, e por isso poderia existir acumulação de sedimentos no dispositivo de recolha. No entanto, apesar deste cuidado, esta ação não foi suficiente, visto que o resultado obtido para a primeira recolha de cada ensaio, em termos de concentrações de sedimentos em suspensão, foi elevado.

4.3. Análise granulométrica

Para a análise granulométrica dos sedimentos, nos ensaios realizados na coluna de sedimentação e no canal anular, recorreu-se à difração laser, tendo o procedimento sido realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Na realização desta análise foi utilizado um analisador de partículas *Mastersizer Micro* do fabricante *Malvern Instruments* (Figura 4.9a).

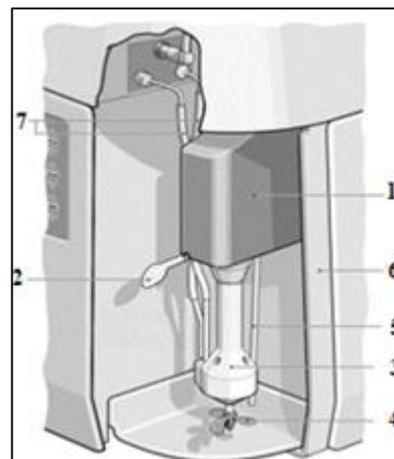
4.3.1. Características gerais do aparelho de difração

De acordo com Freire (2003), o aparelho de difração laser tem como objetivo analisar a granulometria de partículas dispersas num líquido, sendo a sua gama de medição entre 0,31 e 301 μm . É constituído por uma unidade óptica e um computador onde está instalado o *software Mastersizer Micro v2.19*, que vai servir de comando do aparelho e permitir obter e processar os dados.

A unidade óptica é constituída por uma unidade de amostragem, um painel de controlo e uma célula de medição. É nesta unidade de amostragem, que se realiza o processo de dispersão e homogeneização da suspensão e é ainda promovida a circulação da amostra na célula de medição (Freire, 2003). Segundo Ramos (2013), e como pode ser observado na Figura 4.9b, a unidade óptica é ainda constituída por: um misturador (4), que permite a circulação da mistura na célula de medição e a dispersão das partículas; uma bomba (3), para permitir a rotação do misturador; uma sonda de ultra-sons (5), que ajuda na dispersão da amostra quebrando os aglomerados; um braço de bombagem (1), que suporta a bomba, o misturador e a sonda de ultra-sons; e uma alavanca do braço de bombagem (2), que permite mover verticalmente o braço de bombagem. É constituída também por dois tubos (7), que fazem o transporte da amostra entre a célula de medição e o frasco que suporta a amostra.



a) Unidade óptica



b) Componentes da unidade de amostragem

Figura 4.9 – Equipamento para análise granulométrica por difração laser (Ramos, 2013)

4.3.2. Execução da análise granulométrica

Para a execução da análise granulométrica, foram utilizadas as amostras recolhidas ao longo dos ensaios, tanto da coluna de sedimentação, como do canal anular. A solução utilizada na análise tinha na sua constituição a amostra e um dispersante, água destilada.

A adequada dispersão da amostra é um importante passo para garantir a confiança e a reprodutibilidade da análise granulométrica por difração laser. A dispersão da amostra pode ser atingida através de dispersão mecânica (ultra-sons, agitação) ou química (estabilização do pH, adição de agentes dispersantes). Seja qual for o método utilizado, é necessário garantir que não se formem bolhas de ar no sistema e que não ocorra a fragmentação ou aglomeração das partículas. Após a dispersão da amostra é necessário garantir a estabilização da dispersão até à medição, o que pode ser controlado através do valor de obscuração (Freire, 2003). O difractor laser mede em tempo real a obscuração do feixe óptico pela amostra, ou seja, a parte da luz não transmitida, sendo expressa em percentagem. Esta é definida pela seguinte relação:

$$\text{Obscuração} = 100 (1 - \text{transmissão}) \quad (4.1)$$

Segundo Freire (2003), a concentração da suspensão a ser medida deverá ser superior ao valor mínimo que permite produzir um sinal aceitável no detector e uma representação estatística válida, e ser inferior a um valor máximo que favoreça a dispersão múltipla. Esta surge geralmente para os grandes ângulos de difração, sobrestimando a quantidade de partículas finas. Embora o fabricante indique que a gama de obscuração ideal seja entre 10 e 30%, os testes realizados com sedimentos silto-argilosos e para diferentes concentrações, mostram que a obscuração deverá situar-se entre 10 e 15%.

Antes de se colocar a amostra no equipamento de análise, é realizado um *background* com água destilada, que serve para comparar, posteriormente, com as partículas existentes na amostra em estudo. De seguida adiciona-se uma quantidade de suspensão no recipiente com a água destilada e misturam-se estes

dois componentes, dando-se então início à análise. Foram realizadas três medições para cada amostra de cada ensaio, obtendo-se assim três resultados, para assegurar a respectiva estabilidade.

V CAPÍTULO

Análise de Resultados

5. Análise de Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios realizados na coluna de sedimentação e no canal anular, equipamentos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

5.1. Coluna de sedimentação

Foram escolhidos para análise dois dos dez níveis existentes na coluna de sedimentação, visto serem os que se apresentavam em melhores condições de funcionamento. Os níveis analisados foram o quarto e o sétimo, localizados a 130 e 55 cm de altura, respetivamente (Figura 4.1), no entanto todos os resultados apresentados para o terceiro ensaio são referentes apenas ao quarto nível, devido a problemas com o sétimo nível neste ensaio. Importa sublinhar que, tendo sido utilizada uma amostra de sedimento seco, devido às dificuldades na desagregação do sedimento e na homogeneização da suspensão, as concentrações iniciais efetivas são diferentes das concentrações iniciais pretendidas.

5.1.1. Concentrações de sedimentos em suspensão

Desenvolveu-se a análise dos resultados dos ensaios para três valores diferentes de salinidade (Figura 5.1) e para três valores diferentes de concentração inicial (Figura 5.2).

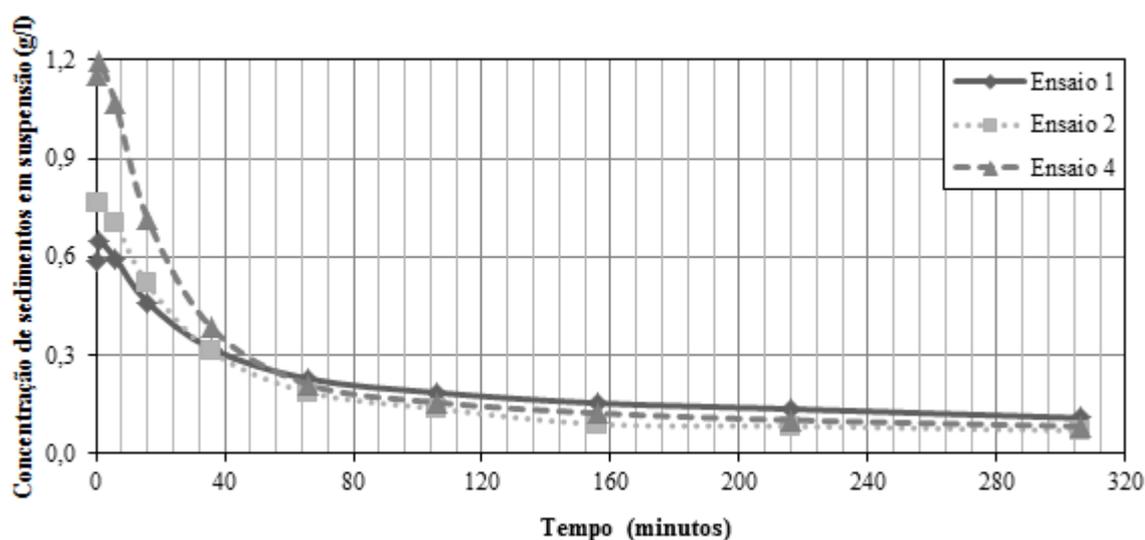


Figura 5.1 – Média vertical da concentração de sedimentos em suspensão ao longo dos ensaios 1, 2 e 4 (salinidade de 0, 15 e 30%, respetivamente)

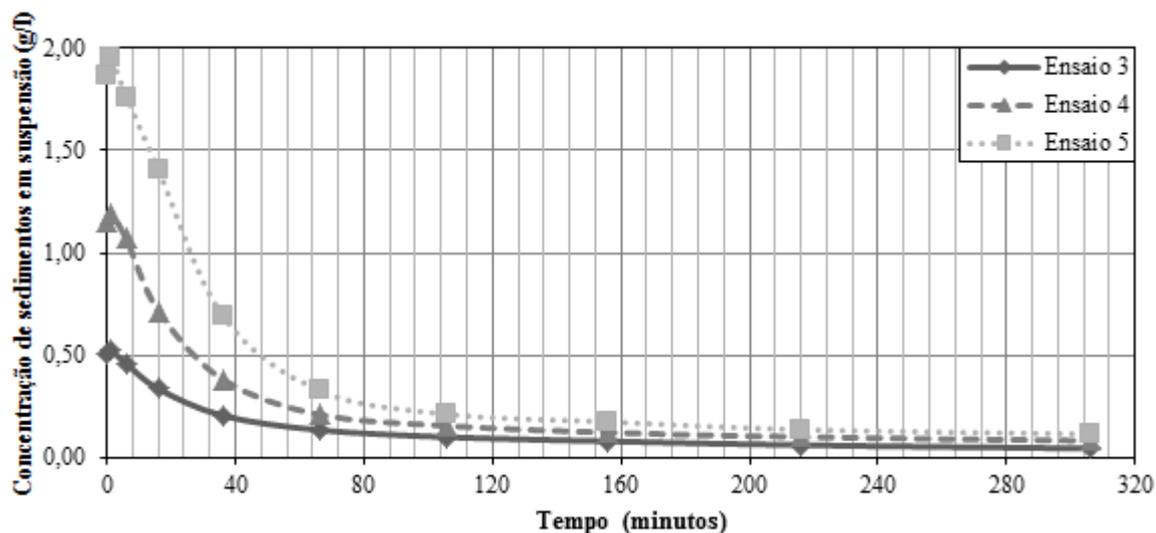


Figura 5.2 – Média vertical da concentração de sedimentos em suspensão ao longo, dos ensaios 3, 4 e 5 com salinidade de 30% (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4)

A análise permitiu avaliar o efeito que a concentração e a salinidade provocam na velocidade de queda das partículas, de acordo com as condições iniciais dos ensaios, referidas na Tabela 4.2. Os resultados obtidos encontram-se sintetizados nas tabelas em anexo (Tabela A.1 à Tabela A.5).

Uma vez analisados os resultados obtidos, foi possível verificar que ao fim de algum tempo (aproximadamente entre 60 a 80 minutos), as concentrações resultantes parecem ser praticamente independentes, tanto da concentração inicial como da salinidade. Uma vez atingido este intervalo a diferença observada entre os resultados, varia entre os 0,014 e os 0,064 g/l para os ensaios com as mesmas concentrações iniciais objetivo. No caso dos ensaios com salinidades iguais, esta diferença entre resultados, para o mesmo intervalo de tempo, apresenta valores que variam entre os 0,004 e os 0,070 g/l. É ainda visível, através das representações gráficas, que após o intervalo mencionado anteriormente, as concentrações originadas durante os ensaios continuam a tender para valores menores, mas apresentando uma evolução muito lenta.

Conclui-se ainda, que as concentrações iniciais obtidas no instante zero são inferiores às concentrações apresentadas na Tabela 4.2, sendo que a relação das concentrações atinge aproximadamente 40% das concentrações previstas inicialmente para o primeiro ensaio e 80% para o quinto ensaio. Devido a este

facto, as concentrações foram normalizadas, tendo sido divididas as concentrações resultantes dos ensaios pelas concentrações de referência (concentrações médias dos minutos zero e um). Os valores obtidos encontram-se apresentados na tabela seguinte.

Tabela 5.1 – Média vertical dos valores de concentração de sedimentos em suspensão normalizados, registados ao longo dos ensaios (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4)

Tempo (minutos)	$C/C_{ref.}$ (adimensional)				
	Ensaio				
	1	2	3	4	5
0	0,952	1,001	0,979	0,982	0,976
1	1,048	0,999	1,021	1,018	1,024
6	0,965	0,920	0,894	0,911	0,923
16	0,747	0,675	0,654	0,609	0,736
36	0,517	0,404	0,399	0,325	0,363
66	0,369	0,243	0,263	0,179	0,171
106	0,300	0,178	0,195	0,132	0,111
156	0,249	0,116	0,155	0,104	0,091
216	0,219	0,108	0,119	0,086	0,072
306	0,175	0,090	0,086	0,070	0,060

As variações das novas concentrações ao longo do tempo encontram-se representadas graficamente nas figuras seguintes. A Figura 5.3 é representativa dos ensaios em que a concentração inicial objetivo seria igual e na Figura 5.4 são comparados os ensaios com a mesma salinidade.

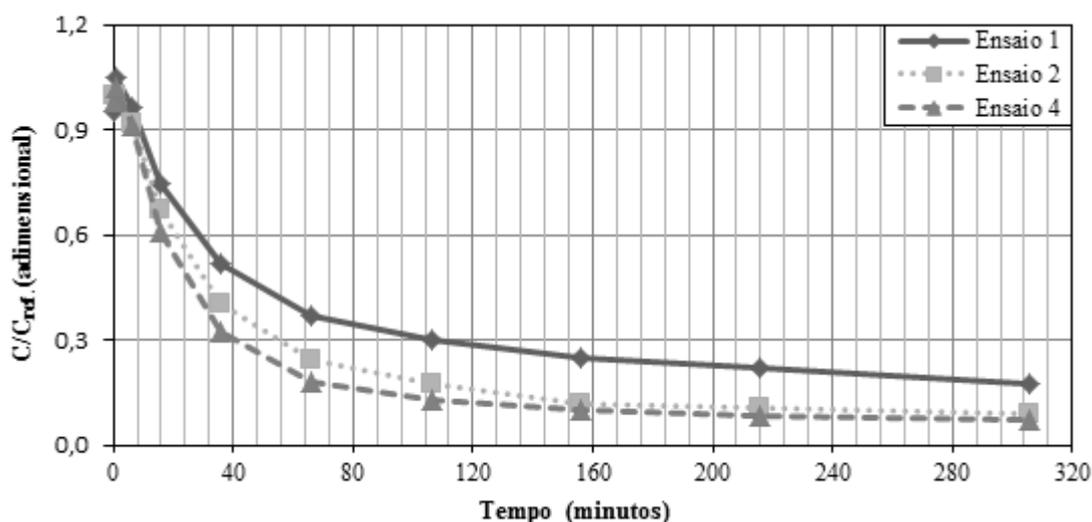


Figura 5.3 – Média vertical da concentração de sedimentos em suspensão normalizada ao longo dos ensaios 1, 2 e 4 (salinidade de 0, 15 e 30%, respetivamente)

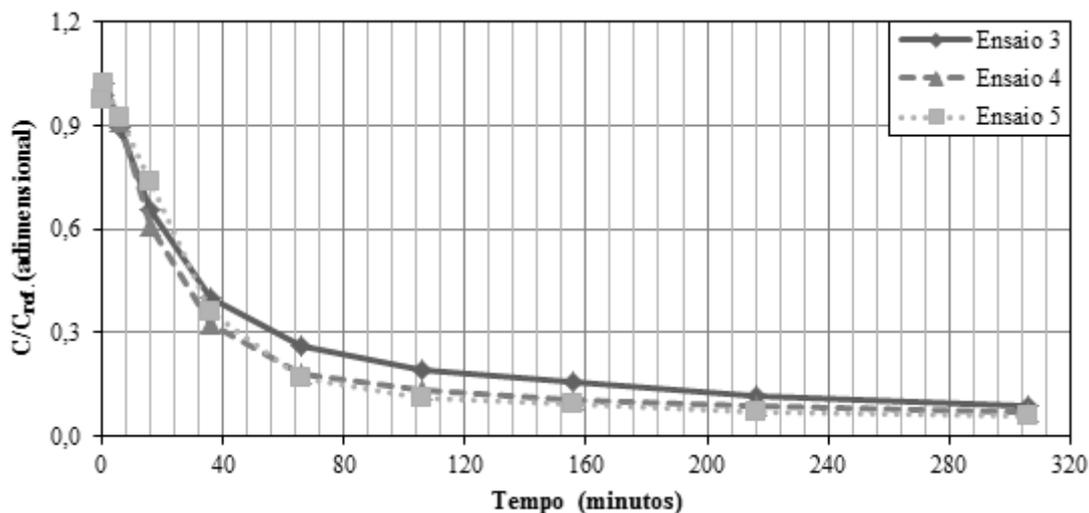


Figura 5.4 – Média vertical da concentração de sedimentos em suspensão normalizada ao longo dos ensaios 3, 4 e 5, com salinidade de 30%, (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4)

Observando as figuras anteriores, verifica-se que os valores obtidos apresentam uma evolução regular, diminuindo as concentrações de sedimentos em suspensão ao longo do tempo. Em ambos os casos a concentração de sedimentos em suspensão apresenta uma variação mais lenta nos intervalos de tempo finais. As diferenças entre ensaios não são muito acentuadas. Uma possível explicação pode encontrar-se na preparação da amostra, uma vez que o sedimento já se encontrava seco e a desagregação das partículas de argila terá sido certamente deficiente.

Da Figura 5.3, conclui-se que quanto maior a salinidade da solução analisada, menor é a concentração de matéria particulada em suspensão no final do ensaio. No primeiro ensaio a concentração diminui mais lentamente comparativamente com os outros ensaios, sendo uma possível causa a inexistência de sal na solução ensaiada. Da Figura 5.4, retira-se que quanto menor for a concentração inicial, maior a concentração normalizada durante o ensaio, no entanto os resultados apresentam um comportamento e valores muito próximos para as concentrações maiores. A partir dos 72 minutos, aproximadamente, os ensaios 4 e 5 têm um comportamento quase idêntico, apresentando valores muito próximos entre si.

5.1.2. Velocidades de queda

As velocidades de queda foram calculadas com base na análise da evolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão que foi avaliada na secção

anterior. Para o seu cálculo foi utilizada a seguinte equação sugerida por Portela e Brito (2009):

$$w_s^n = - \left(\frac{C^{n+1} - C^n}{C^n} \right) \frac{H^n}{\Delta t^n} \quad (5.1)$$

Na expressão anterior, w_s^n corresponde à velocidade de queda média no instante n , C^{n+1} e C^n são as concentrações médias na vertical de sedimentos em suspensão nos instantes $n+1$ e n . H^n corresponde à altura da coluna líquida após colheita de amostras no instante n e Δt^n é o intervalo de tempo entre os instantes n e $n+1$. Da aplicação desta expressão foram obtidos sete valores de velocidade de queda para cada ensaio.

Para o estudo da velocidade de queda apenas foi considerado o intervalo de tempo entre os instantes 6 e 306 minutos, uma vez que nos primeiros minutos existe alguma turbulência originada pela rotação da coluna na preparação do ensaio.

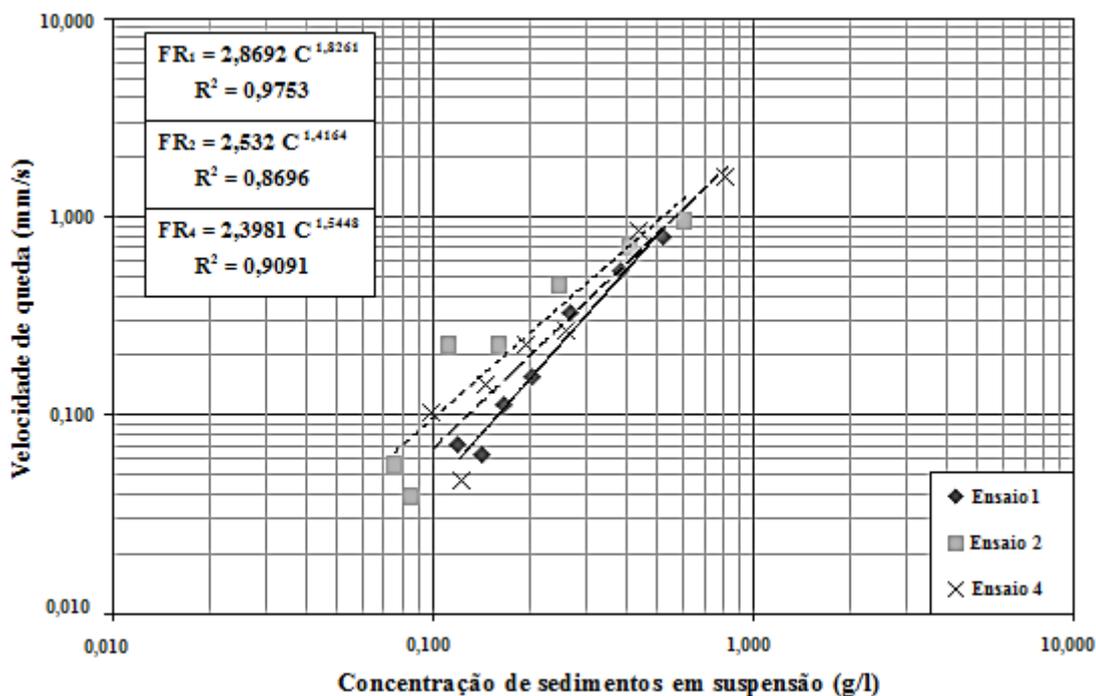


Figura 5.5 - Velocidade de queda dos sedimentos, em função da concentração (ensaios 1, 2 e 4, com uma salinidade de 0, 15 e 30%, respetivamente)

Observou-se uma diminuição da velocidade de queda ao longo do tempo, podendo ser visualizada na Tabela 5.2, apresentada em seguida. Por outro lado, verifica-se um aumento da velocidade de queda com o aumento da salinidade (Figura 5.5).

Tabela 5.2 - Valores utilizados na obtenção da velocidade de queda para cada intervalo de cada ensaio (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4)

Ensaio	t^n (minutos)	t^{n+1} (minutos)	C^n (g/l)	C^{n+1} (g/l)	w_s (mm/s)
1	6	16	0,595	0,528	0,803
	16	36	0,460	0,389	0,536
	36	66	0,319	0,273	0,327
	66	106	0,227	0,206	0,153
	106	156	0,185	0,169	0,113
	156	216	0,153	0,144	0,064
	216	306	0,135	0,121	0,071
2	6	16	0,703	0,610	0,949
	16	36	0,516	0,413	0,702
	36	66	0,309	0,247	0,457
	66	106	0,186	0,161	0,225
	106	156	0,136	0,112	0,229
	156	216	0,089	0,085	0,039
	216	306	0,082	0,076	0,057
3	6	16	0,459	0,398	0,958
	16	36	0,336	0,271	0,681
	36	66	0,205	0,170	0,391
	66	106	0,135	0,118	0,217
	106	156	0,100	0,090	0,129
	156	216	0,080	0,070	0,116
	216	306	0,061	0,053	0,090
4	6	16	1,070	0,828	1,608
	16	36	0,586	0,441	0,859
	36	66	0,297	0,262	0,264
	66	106	0,228	0,197	0,228
	106	156	0,166	0,147	0,143
	156	216	0,129	0,124	0,047
	216	306	0,118	0,100	0,104
5	6	16	1,764	1,585	0,718
	16	36	1,406	1,050	0,879
	36	66	0,693	0,510	0,598
	66	106	0,328	0,270	0,296
	106	156	0,212	0,193	0,114
	156	216	0,175	0,156	0,114
	216	306	0,137	0,126	0,056

Os resultados médios da velocidade de queda do ensaio de menor concentração inicial (ensaio 3) e do ensaio de maior concentração inicial (ensaio 5) foram relativamente próximos, pelo que a concentração inicial não apresenta grandes efeitos na velocidade de queda dos sedimentos. O quarto ensaio originou valores de velocidade de queda mais elevados inicialmente, quando comparados com os outros dois ensaios. Os resultados obtidos para os ensaios com diferentes concentrações iniciais, mas com a mesma salinidade, encontram-se traduzidos na figura seguinte.

Tanto na Figura 5.5 como na Figura 5.6, podem ser ainda observadas as retas de aproximação aos pontos de cada ensaio, bem como as respectivas equações que serão analisadas com mais detalhe no capítulo posterior.

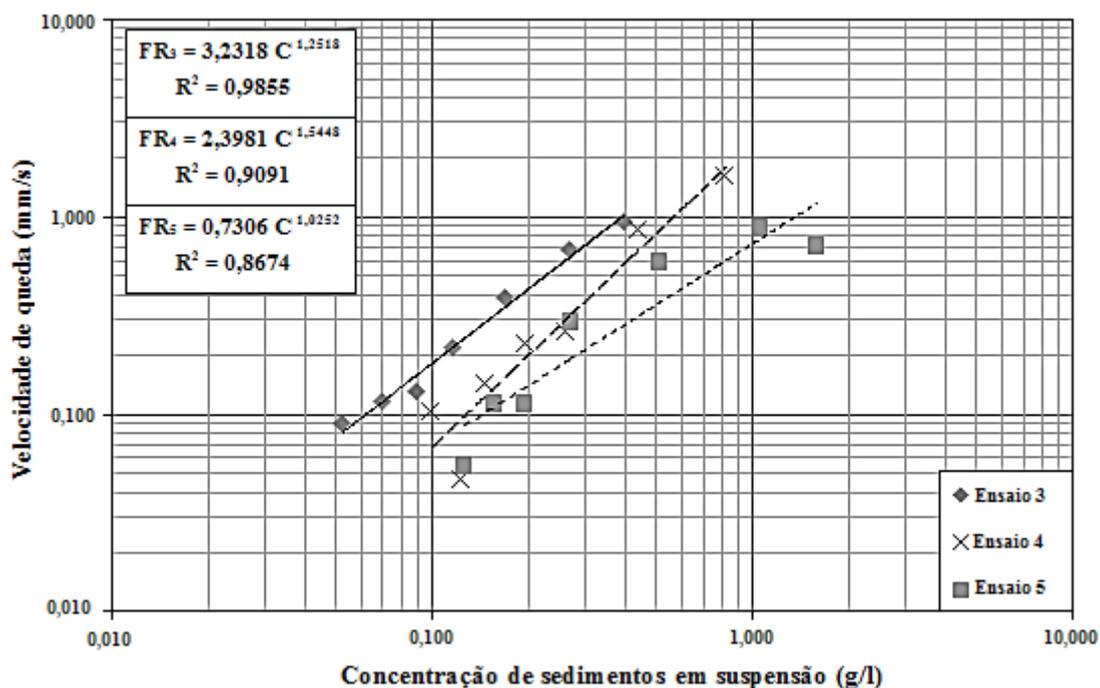


Figura 5.6 - Velocidade de queda dos sedimentos, em função da concentração, ensaios 3, 4 e 5, com uma salinidade de 30% (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4)

Como complemento aos valores médios da velocidade de queda foi também efetuado o cálculo de valores aproximados de uma velocidade de queda mediana (w_{s50}), representados na Figura 5.7, e de uma velocidade de queda ponderada pela massa. Esta velocidade de queda ponderada em cada intervalo de tempo pela massa depositada é mais representativa dos fluxos de deposição do que a média

simples, no entanto, requer hipóteses sobre os períodos iniciais, até aos 6 minutos (devido à turbulência), e finais, depois dos 306 minutos (Portela *et al.*, 2013). Os resultados obtidos para estas duas velocidades, mediana e ponderada pela massa, encontram-se mais detalhados na Tabela A.6 e Tabela A.7, respetivamente, em anexo.

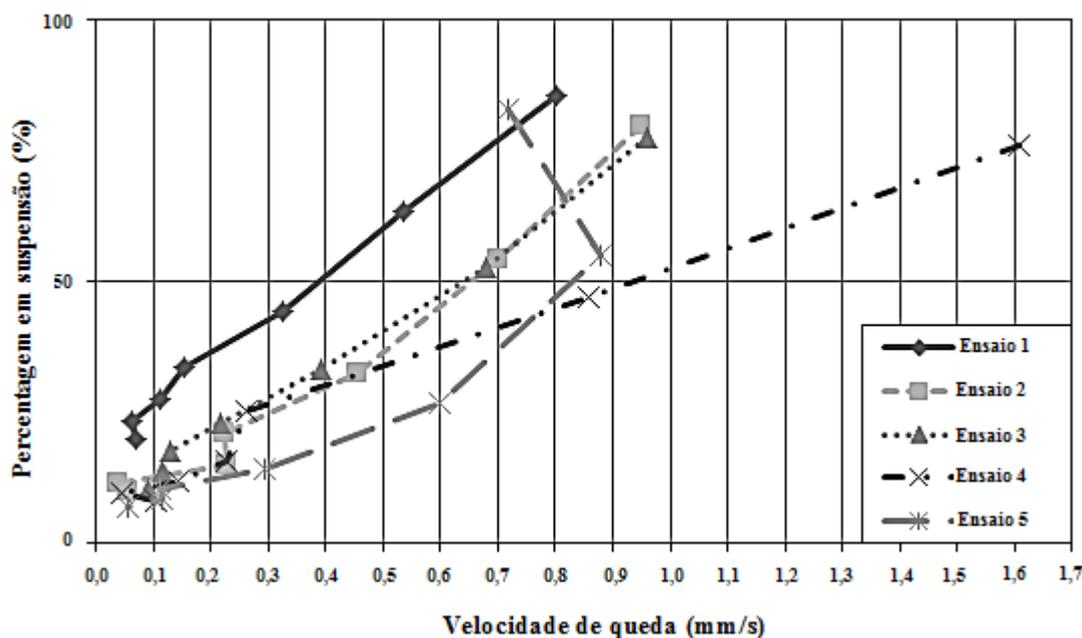


Figura 5.7 - Percentagem de sedimentos em suspensão em função da velocidade de queda (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4)

A velocidade de queda mediana é traduzida através do valor da velocidade correspondente à deposição de 50% em massa da suspensão analisada, ou seja, uma vez determinado o intervalo de tempo em que a concentração se reduz a metade do valor inicial é possível descobrir qual o valor da velocidade correspondente.

Na tabela seguinte encontram-se os intervalos de tempo, para cada ensaio, correspondentes à redução de 50% da concentração inicial, bem como o valor correspondente da velocidade de queda.

Tabela 5.3 - Intervalos de tempo correspondentes à deposição de 50% em massa da suspensão estudada (no ensaio 3, os valores referem-se apenas ao nível 4)

Ensaio	Intervalo (minutos)	w_{50} (mm/s)
1	36-66	0,42
2	16-36	0,66
3	16-36	0,64
4	16-36	0,95
5	16-36	0,83

No fim dos ensaios existia ainda matéria particulada em suspensão, apresentando valores na ordem dos 20% para o primeiro ensaio e 10% para os restantes ensaios. Estas percentagens são relativas às concentrações iniciais, ou seja, existia ainda uma certa percentagem de sedimentos em suspensão, no fim do ensaio, relativamente à concentração inicial.

5.1.3. Análise granulométrica

Para a execução da análise granulométrica, foram utilizadas as amostras recolhidas dos restantes níveis da coluna de sedimentação, que não foram utilizados para o estudo das concentrações de sedimentos em suspensão e da velocidade de queda. Como referido anteriormente no quarto capítulo, utilizou-se na análise granulométrica a amostra e um dispersante (água destilada). A análise das amostras foi realizada através de um aparelho de difração laser.

Da análise realizada aos resultados obtidos, admite-se que embora não tenham sido aplicados ultra-sons, as ligações mais fracas entre as partículas encontram-se quebradas, possivelmente devido à homogeneização da amostra no misturador do difractómetro. A análise envolve a dispersão da amostra em água destilada, o que também altera as propriedades da solução. Os resultados obtidos foram traduzidos graficamente (Figura 5.8), estando aí representada a variação temporal dos parâmetros d_{10} , d_{50} e d_{90} . Foi ainda representada a evolução temporal da obscuração. Na figura seguinte, as escalas verticais dos diferentes gráficos diferem umas das outras, pelo que deve ser tido em conta para possíveis comparações.

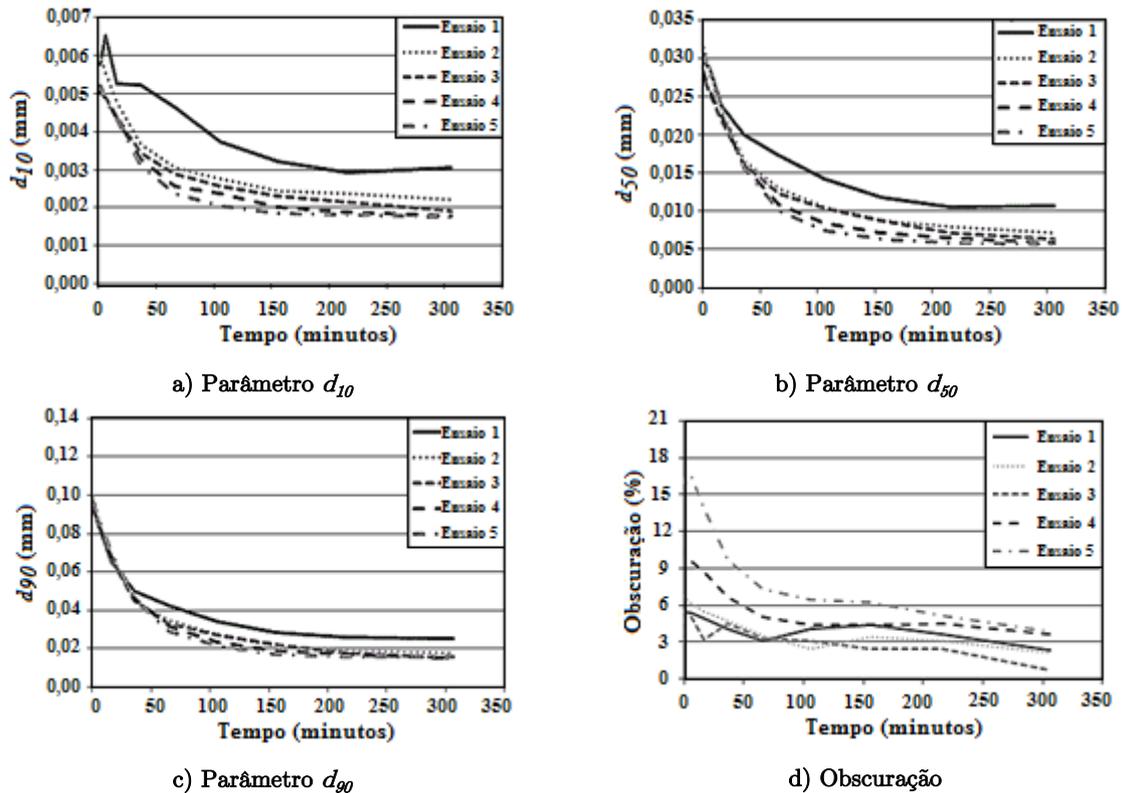


Figura 5.8 - Variação temporal da granulometria. Ensaio na coluna de sedimentação

Relativamente à obscuração, intensidade da luz absorvida pelo material, esta apresentou valores inferior a 10%, valor mínimo recomendado (Freire, 2003), em quase todas as medições, possivelmente por insuficiente concentração de sedimentos. O valor de d_{50} diminui mais lentamente no ensaio com água doce, presumivelmente porque a sedimentação se verifica também mais lentamente neste ensaio.

5.2. Canal anular

Como referido no capítulo quatro, foram realizados no canal anular dois ensaios de curta duração, para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão associada a condições distintas de escoamento. Na presente secção é realizada uma análise de todos os resultados obtidos para os diferentes parâmetros em estudo.

Com o objetivo de determinar a velocidade média do escoamento referida à base do canal ($u_{av,b}$), as velocidades angulares a impor ao canal, tanto para a base como

para o anel, foram estimadas pela expressão analítica (5.2), proposta por Booij (1994) e apresentada em Portela e Brito (2010).

$$u_{av,b} \cong \left(w_t \frac{r}{1 + \sqrt{\frac{b+2h}{b}}} + w_b \frac{r \sqrt{\frac{b+2h}{b}}}{1 + \sqrt{\frac{b+2h}{b}}} \right) - w_b r \quad (5.2)$$

Na expressão anterior, r representa o raio médio do canal e b e h são, respectivamente, a largura e a altura da secção. As variáveis w_b e w_t representam, respectivamente, as velocidades angulares da base e do anel, sendo que nestes ensaios a velocidade da base do canal foi nula.

As velocidades médias do escoamento referidas à base do canal, bem como as velocidades angulares a impor ao anel, obtidas através da expressão (5.2), encontram-se apresentadas na tabela seguinte. Nesta tabela são discriminadas as velocidades obtidas de acordo com os respetivos ensaios.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos através da formulação 5.2, para as diferentes velocidades a impor ao canal

Ensaio	Tempo (minutos)	w_t (rad/s)	$u_{av,b}$ (m/s)
1	0	0,79	0,50
	30	0,76	0,48
	60	0,68	0,43
	90	0,56	0,35
	120	0,39	0,25
	150	0,20	0,13
	180	0,00	0,00
	210	0,20	0,13
	240	0,39	0,25
	270	0,56	0,35
	300	0,68	0,43
	330	0,76	0,48
	360	0,79	0,50
	390	0,58	0,37
2	0	0,55	0,35
	30	0,53	0,34
	60	0,48	0,30
	90	0,39	0,25
	120	0,28	0,18
	150	0,14	0,09
	180	0,00	0,00
	210	0,14	0,09
	240	0,28	0,18
	270	0,39	0,25
	300	0,48	0,30
	330	0,53	0,34
	360	0,55	0,35
	390	0,35	0,22

5.2.1. Concentrações de sedimentos em suspensão

Como mencionado anteriormente noutro capítulo, para a realização do estudo da concentração de sedimentos em suspensão foram utilizadas as amostras de 150 ml recolhidas durante os dois ensaios.

Em cada ensaio, foi determinada a evolução, ao longo do tempo, da concentração de sedimentos em suspensão, à medida que as condições de velocidade média do escoamento iam sendo alteradas. Estes resultados encontram-se representados na Figura 5.9, para o primeiro ensaio (realizado com maiores velocidades máximas de escoamento), e na Figura 5.10, para o segundo ensaio (com menores velocidades máximas do escoamento).

O primeiro ensaio tentou ser representativo de um ciclo de maré viva, apresentando também concentrações de sedimentos em suspensão mais elevadas do que o segundo ensaio, onde as velocidades por serem inferiores, representariam um ciclo de maré morta.

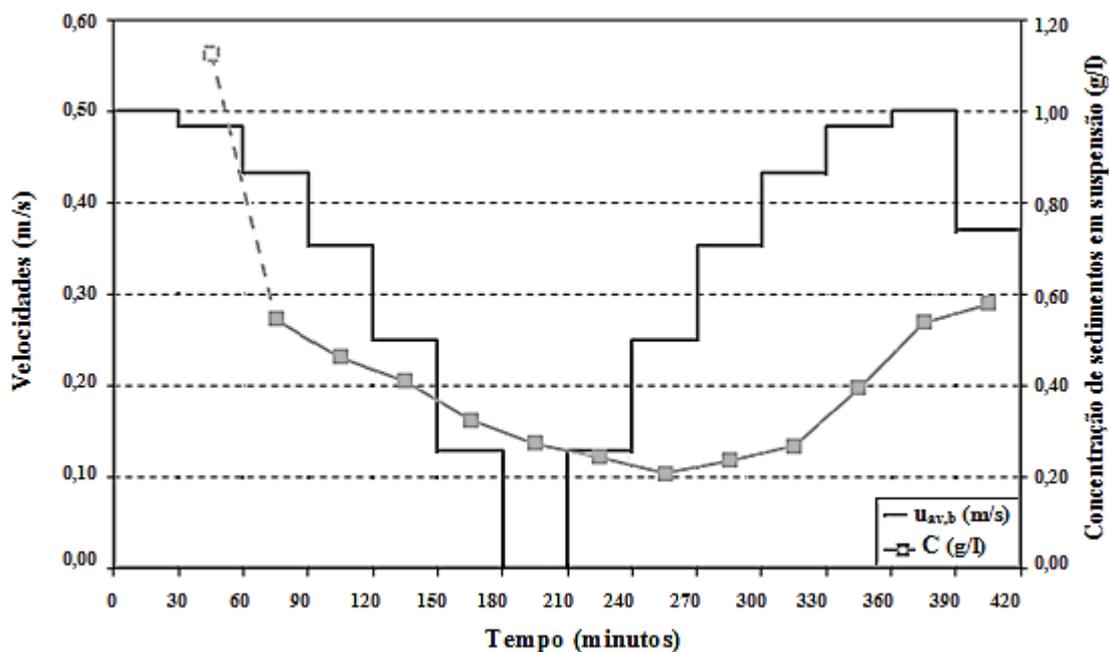


Figura 5.9 - Evolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão para o ensaio 1, com velocidade máxima do escoamento de 0,50 m/s (o primeiro ponto é distinto, pois apresentou valores anómalos)

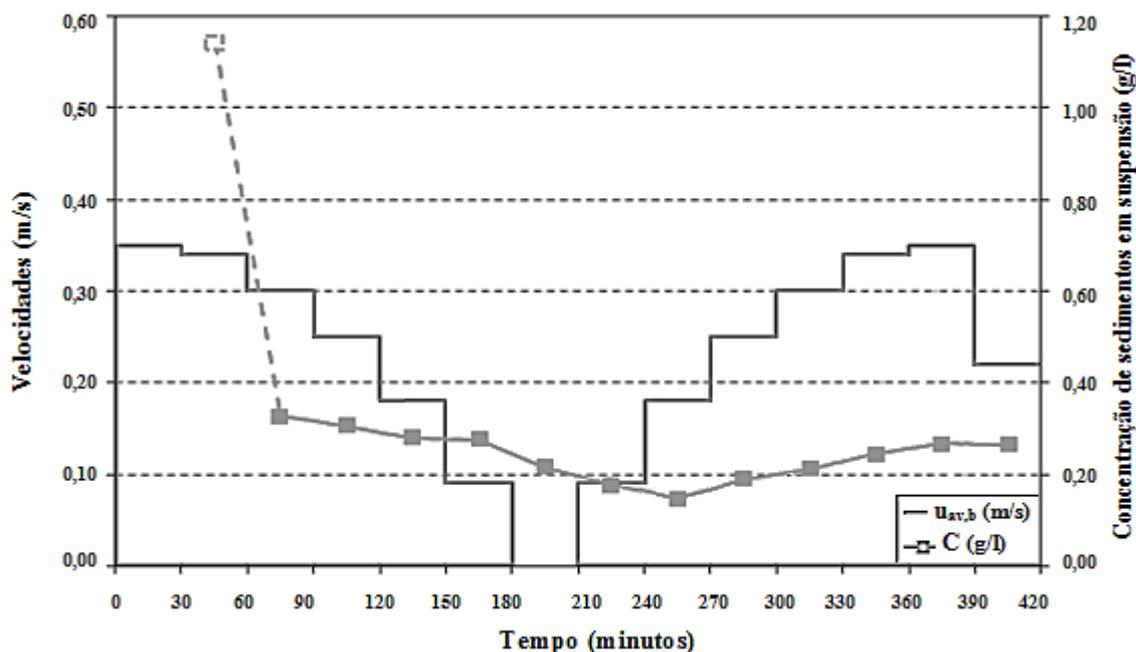


Figura 5.10 - Evolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão para o ensaio 2, com velocidade máxima do escoamento de 0,35 m/s (o primeiro ponto é distinto, pois apresentou valores anómalos)

É possível observar que as concentrações iniciais, em ambos os ensaios, apresentam valores relativamente elevados e próximos, claramente anómalos, o que leva a supor que a recolha das primeiras amostras, de cada ensaio, e a sua colocação no canal, não foram suficientes para retirar os sedimentos que se encontravam acumulados no dispositivo de recolha.

Ocorre um desfasamento temporal, em ambos os ensaios, entre a estufa de maré (velocidade de escoamento nula) e a concentração mínima, sendo que a concentração mínima é obtida trinta minutos após o primeiro patamar de velocidade crescente e uma hora depois da anulação da velocidade. O período de deposição, correspondendo a uma redução da quantidade de sedimentos em suspensão e ao período de velocidades decrescentes, apresenta uma duração maior do que o de erosão, que ocorre com o período de velocidades crescentes.

Na Figura 5.11 podem ser observados os resultados de ambos os ensaios, com a evolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão. No primeiro ensaio, em comparação com o segundo, existe um comportamento mais linear e homogêneo durante o período de velocidades decrescentes, onde a diminuição das

concentrações vai ocorrendo a uma taxa aproximadamente constante, apresentando em média uma diminuição de 0,07 g/l. Quando se trata do período de velocidades crescentes, este apresenta um comportamento mais acentuado no primeiro ensaio, tendo um crescimento menor e mais ligeiro no segundo ensaio.

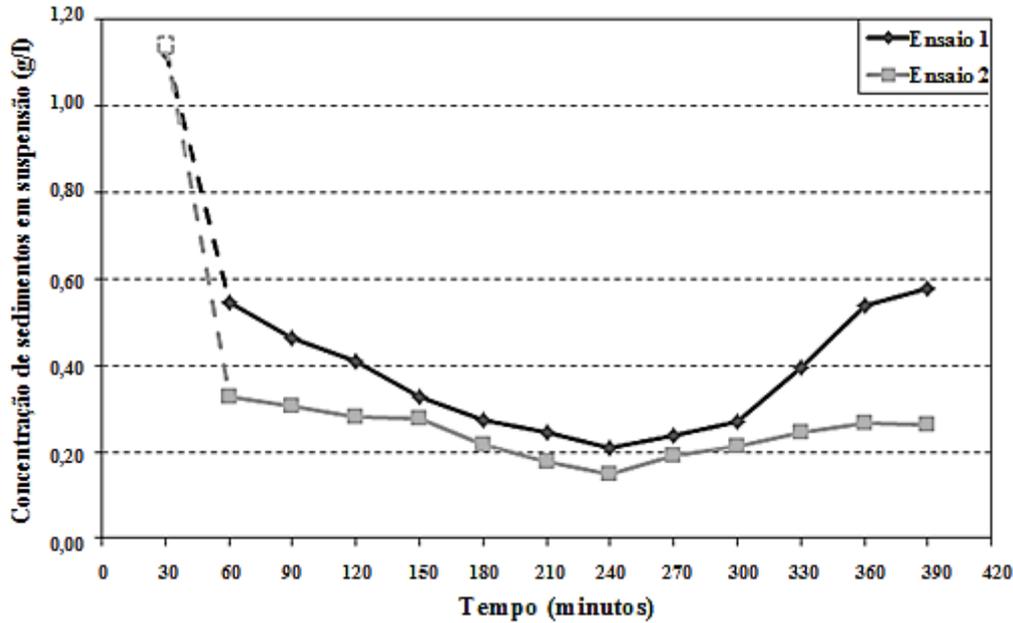


Figura 5.11 - Evolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão. Ensaios 1 e 2 (os primeiros pontos são distintos, pois apresentaram valores anómalos)

5.2.2. Tensões de corte

As tensões de corte no fundo foram estimadas, através de uma relação quadrática entre a velocidade média do escoamento e uma lei de resistência semi-empírica, neste caso a de Manning. A expressão utilizada foi a seguinte (Portela e Brito, 2010):

$$\tau = \rho u_*^2, \quad \text{onde } u_* = u_{av,b} \frac{ng^{1/2}}{h^{1/6}} \quad (5.3)$$

Na equação (5.3), τ representa a tensão tangencial no fundo, ρ a massa volúmica da água, u_* a velocidade de atrito, n o coeficiente de Manning e g a aceleração gravítica. O coeficiente de Manning considerado foi igual a 0,011 s m^{-1/3}.

A variação da concentração de sedimentos em suspensão em função da tensão tangencial no fundo encontra-se representada na Figura 5.12. Para facilitar a discussão e comparação entre os ensaios, os seus resultados foram colocados na mesma figura.

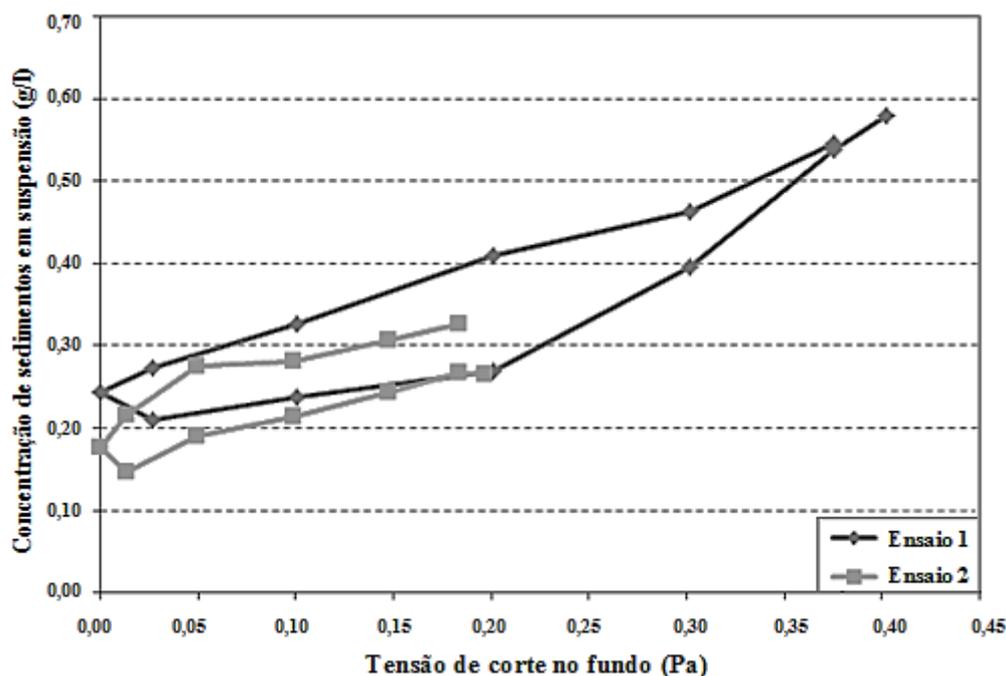


Figura 5.12 - Variação da concentração de sedimentos em suspensão em função da tensão tangencial, ou de corte, no fundo (os pontos iniciais de cada ensaio foram retirados, visto apresentarem valores anómalos)

Verifica-se que na zona de tensões de corte crescentes, coincidente com a zona de velocidades crescentes, ambos os ensaios apresentam, inicialmente, um comportamento semelhante, sendo que depois do terceiro aumento de tensão tangencial no fundo (correspondente ao intervalo entre os 270 e os 300 minutos) este comportamento deixa de ser verificado. Para este último intervalo, o primeiro ensaio apresenta um aumento nas concentrações de sedimentos em suspensão muito maior que o aumento observado no segundo ensaio.

Enquanto que no primeiro ensaio, após uma pequena diminuição de concentração entre os 0,00 e os 0,03 Pa, se observa um aumento contínuo da concentração de sedimentos em suspensão até ao final da execução do ensaio, o mesmo não é verificado no segundo ensaio. Na fase final do segundo ensaio observa-se uma diminuição da concentração de sedimentos em suspensão, mesmo com o aumento

da tensão tangencial no fundo, possivelmente devido a deficiências nas condições de ensaio ou no processo de amostragem.

Em cada ensaio é observado um fenómeno de diminuição de concentração entre as duas fases de velocidade (decrecente e crescente), mas com um comportamento pouco acentuado, devido, provavelmente, à curta duração em que a velocidade toma valores muito baixos ou mesmo nulos.

5.2.3. Análise granulométrica

Para a execução da análise granulométrica, foram utilizadas as amostras de 200 ml recolhidas ao longo dos dois ensaios realizados no canal anular. Como referido anteriormente, a análise granulométrica foi realizada, também, com o auxílio de um aparelho de difração laser. Na Figura 5.13 encontram-se traduzidos graficamente os resultados obtidos da análise granulométrica, representando a variação temporal dos parâmetros d_{10} , d_{50} , d_{90} e ainda a evolução temporal da obscuração.

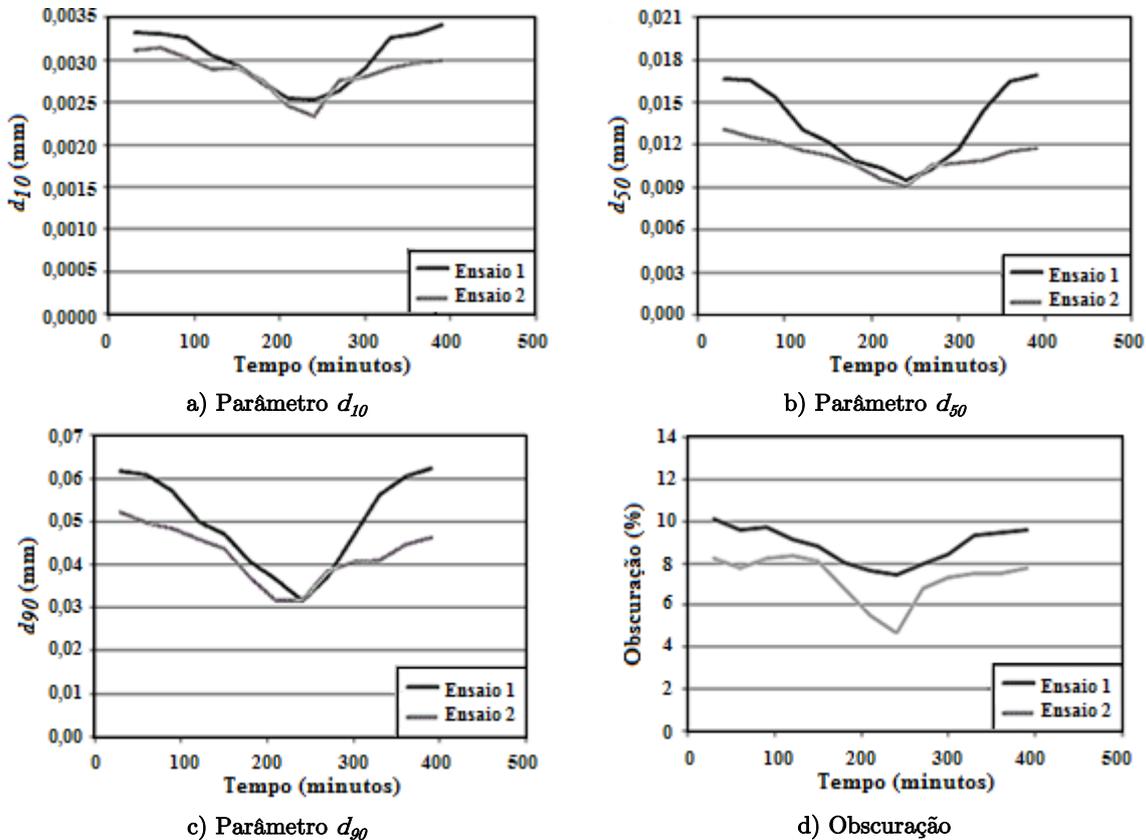


Figura 5.13 – Variação temporal da granulometria. Ensaios no canal anular

Tal como na análise granulométrica realizada às amostras obtidas dos ensaios da coluna de sedimentação, verifica-se também que a obscuração foi inferior a 10% em quase todas as medições.

Quanto aos parâmetros representativos da granulometria das amostras analisadas, é visível que o primeiro ensaio é o que obteve maiores dimensões dos sedimentos, tendo quase sempre valores superiores aos do segundo ensaio. O parâmetro d_{50} apresentou uma variação, ao longo do tempo, maior no primeiro ensaio, originando por isso uma diferença entre os valores mais elevados e os valores menores, superior à diferença verificada no segundo ensaio. Os resultados obtidos indicam que, para velocidades mais elevadas, se obtêm diâmetros do sedimento em suspensão também mais elevados.

VI CAPÍTULO

Discussão dos Resultados

6. Discussão dos Resultados

Neste capítulo é realizada a discussão dos resultados obtidos, tanto em laboratório como através das formulações presentes no segundo capítulo. Nesta discussão, são comparados os valores observados no trabalho desenvolvido com valores propostos por outros autores, permitindo avaliar a adequabilidade dessas propostas.

6.1. Estimativa de velocidades de queda

Nesta secção do presente documento é feita uma análise de todas as formulações apresentadas no segundo capítulo para a estimativa de velocidades de queda. Em primeiro lugar são analisadas as expressões propostas para os sedimentos coesivos, e posteriormente são observadas as expressões adequadas aos sedimentos não coesivos. É importante salvaguardar, novamente, que a aplicação das formulações de sedimentos não coesivos em sedimentos coesivos foi efetuada com carácter acessório, apenas com o objetivo de perceber melhor os resultados aplicados aos sedimentos da Ria.

6.1.1. Sedimentos coesivos – Formulações existentes

Para complementar o estudo da relação entre a velocidade de queda e a concentração de matéria particulada em suspensão, em sedimentos coesivos, recorreu-se a diferentes formulações para estimativa dos valores de velocidade de queda. O estudo destas formulações permite a discussão sobre qual a que se ajusta melhor aos resultados obtidos laboratorialmente, para os cinco ensaios realizados, comparando também as aproximações feitas aos resultados de cada ensaio. Na Tabela 6.1 encontra-se um resumo dos valores de todas as variáveis utilizadas nas formulações em análise neste capítulo, bem como a nomenclatura definida para a tradução gráfica dos resultados obtidos.

Uma proposta de Van Rijn (1993) apresenta parâmetros (K e m) iguais aos primeiramente apresentados por Cole e Miles (1983), tendo sido feita por isso uma junção dessas formulações. As expressões originadas foram a 2.1A e 2.1B, onde a variável que sofre alteração é a variável K .

Tabela 6.1 - Parâmetros admitidos no estudo das formulações de sedimentos coesivos

Autor	Equação	Designação	Variáveis		
			K	m	
Cole e Miles (1983)	2.1	A	0,0010	1,00	
Van Rijn (1993)		B	0,0020		
Van Rijn (1993)		C	0,0010	2,00	
		D	0,0020		
Van Leussen (1999)		E	0,0010	0,50	
		F	0,0020		
		G	0,0010	3,50	
		H	0,0020		
Krone (1962)		2.2	I	0,0010	1,33
Nicholson e O'Connor (1986)			J	0,0006	1,00

Procedeu-se à representação gráfica da relação entre a concentração de sedimentos coesivos em suspensão e a respetiva velocidade de queda, estimada pelas diferentes expressões e comparada com o resultado dos ensaios (Figura 6.1).

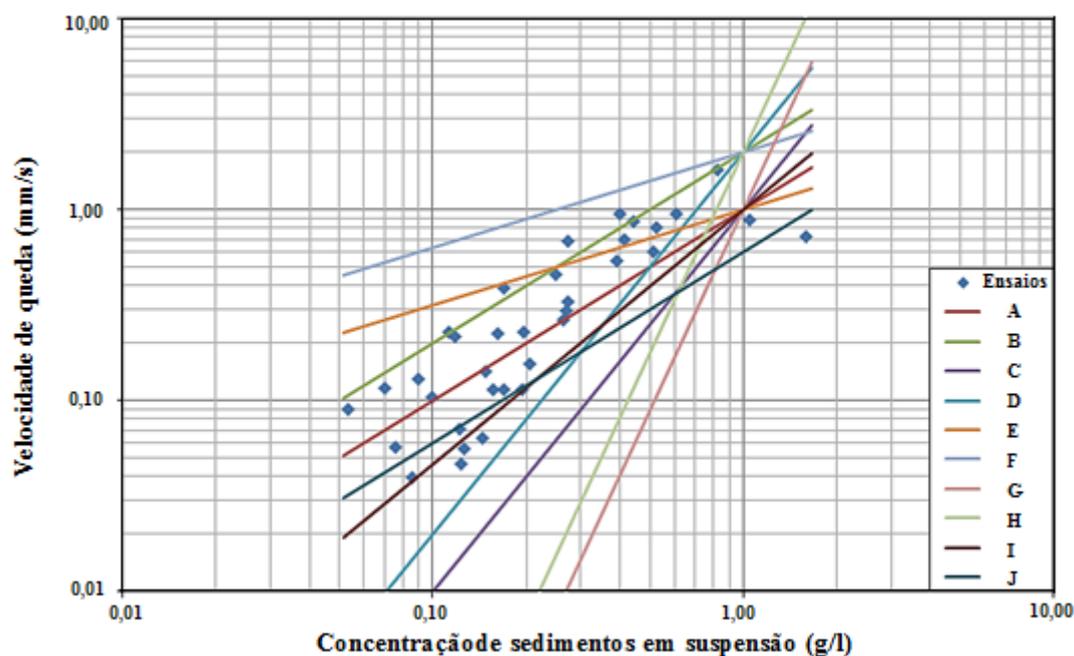


Figura 6.1 – Relação entre a velocidade de queda dos sedimentos em suspensão e a respetiva concentração de sedimentos

Na tabela seguinte, encontra-se um resumo dos valores obtidos, para cada formulação, da média da diferença entre as velocidades de queda obtidas nos ensaios, com as velocidades de queda estimadas pelas formulações. É ainda possível observar, na seguinte tabela, que o valor de r^2 não depende da constante K , sendo este afetado apenas pelo expoente (m) da concentração de sedimentos em suspensão.

Tabela 6.2 – Média da diferença entre as velocidades de queda, obtidas das formulações e laboratorialmente, e correspondentes coeficiente de correlação

Formulação	Média (%)	r^2
2.1A	49,2	0,513
2.1B	115,5	0,513
2.1C	82,6	0,240
2.1D	76,6	0,240
2.1E	162,5	0,651
2.1F	406,8	0,651
2.1G	108,5	0,085
2.1H	128,4	0,085
2.1I	48,7	0,408
2.2J	47,5	0,513

Avaliando a diferença entre as velocidades de queda obtidas nos ensaios, com as velocidades de queda estimadas para a expressão 2.1A, para os mesmos valores de concentração, verificam-se diferenças que se situam na ordem dos 49%, em relação ao resultado dos ensaios. Relativamente à expressão 2.1B, foi obtida uma diferença entre as velocidades de queda, resultantes dos ensaios e da expressão, de 116% e um valor de r^2 igual a 0,513.

Comparando todas as expressões propostas por Van Rijn (1993) e por Van Leussen (1999), são as expressões 2.1C e 2.1D as que apresentam uma diferença entre as velocidades, originadas pelas formulações e obtidas laboratorialmente, menor, na ordem dos 83 e 77%, respectivamente. No entanto existem outras duas expressões, propostas por outros autores, que conseguem apresentar valores ainda mais baixos (expressões 2.1I e 2.2J). Os valores obtidos, para a velocidade de queda, pela expressão 2.1E apresentam uma diferença de 163% em relação aos valores obtidos laboratorialmente. Analiticamente, é possível

verificar que as restantes expressões sugeridas por Van Leussen (1999) não se adequam à gama de valores de concentração em estudo, visto que os valores obtidos pelas expressões 2.1F, 2.1G e 2.1H, são os que originam diferenças maiores entre as velocidades de queda.

As expressões 2.1I, proposta por Krone (1962), e 2.2J, proposta por Nicholson e O'Connor (1986), são visualmente, as que se ajustam melhor às gamas de concentrações mais baixas. A diferença entre as velocidades obtidas e as medidas laboratorialmente é de aproximadamente 48% para ambas as formulações, sendo que a expressão proposta por Krone (1962) apresentou um valor de r^2 ligeiramente inferior ao valor obtido para a expressão de Nicholson e O'Connor (1986), aproximadamente 0,41 para a primeira e 0,51 para a segunda.

6.1.2. Sedimentos coesivos – Ajustes aos ensaios

Além das formulações mencionadas anteriormente, foram analisadas outras expressões conseguidas pela aproximação aos pontos de cada ensaio. A estas expressões foi dada a designação de FR, seguida do número do ensaio em questão. Estas expressões estão representadas nas Figura 5.5 e Figura 5.6, bem como o valor de r^2 correspondente. Foi realizada ainda uma aproximação ao conjunto total de valores dos cinco ensaios, tendo-se obtido a seguinte expressão, designada por FR6:

$$w_s = 1,378 C^{1,22} \tag{6.1}$$

Das seis expressões obtidas, a que melhor se ajusta à globalidade dos ensaios é naturalmente a expressão FR6, apresentando uma disparidade entre as velocidades de queda de cerca de 19% e um valor de r^2 de aproximadamente 0,99. Relativamente às outras expressões, observa-se que existem duas que são muito parecidas (FR2 e FR3), ajustando-se praticamente à mesma gama de valores uma da outra, mas são estas duas que se afastam mais dos valores de todos os ensaios, tendo um valor de r^2 igual a 0,40 e uma diferença entre as velocidades de queda, obtidas dos ensaios e resultantes das expressões, de 70% para a primeira e 140% para a segunda aproximadamente.

Os resultados obtidos para as seis formulações abordadas anteriormente encontram-se representados graficamente na figura seguinte. Na Tabela 6.3 encontram-se os valores da média da diferença entre as velocidades de queda obtidas laboratorialmente e através das aproximações, bem como o valor do coeficiente de correlação para cada aproximação.

A expressão FR5 é a que apresenta uma disparidade menor, entre as velocidades de queda (cerca de 45%) e um valor de r^2 maior (cerca de 0,50). A formulação FR1 aproxima-se de uma série de valores (Figura 6.2), contudo origina uma diferença entre as velocidades de queda, obtidas laboratorialmente e pelas formulações, de aproximadamente 65% e um r^2 de cerca de 0,28.

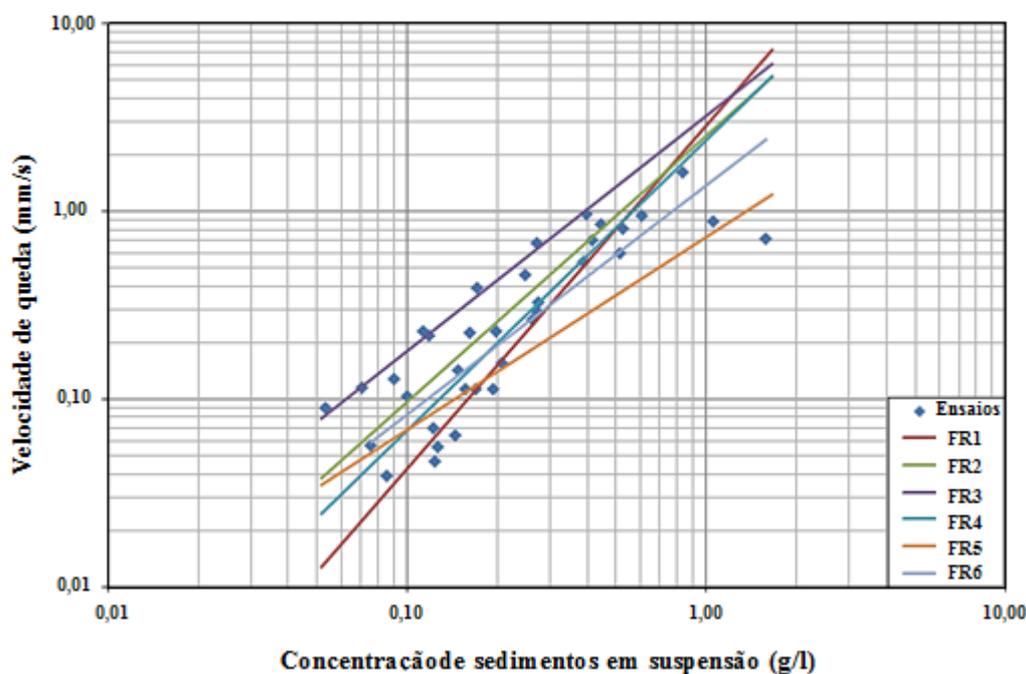


Figura 6.2 - Velocidade de queda dos sedimentos em suspensão em função da concentração obtidas nos ensaios de laboratório

Tabela 6.3 – Média da diferença entre as velocidades de queda, obtidas das aproximações e laboratorialmente, e correspondentes coeficiente de correlação

Aproximações	Média (%)	r^2
FR1	65,3	0,276
FR2	71,2	0,383
FR3	137,3	0,433
FR4	58,2	0,346
FR5	45,5	0,505
FR6	19,5	0,992

Em suma, da análise realizada anteriormente a todas as formulações, observa-se que as expressões que melhor se ajustam aos resultados obtidos para os cinco ensaios, são as expressões 2.1I, 2.2J e FR6. Estas expressões apresentam valores de m que variam entre 1,00 e 1,33, e valores para a variável K que podem ir de aproximadamente 0,001 (expressões 2.1I e 2.2J) a 1,378, no caso da expressão FR6, sendo esta última o melhor dos ajustes.

Os resultados obtidos para todas as formulações mencionadas neste ponto encontram-se apresentados de uma forma mais detalhada nas tabelas em anexo (Tabela A.8, Tabela A.9 e Tabela A.10).

Como nota final, refira-se que os resultados das análises granulométricas realizadas (Figura 5.8) mostram uma diminuição da granulometria do sedimento em suspensão ao longo de cada ensaio. Assim, a relação entre a velocidade de queda e os valores de concentração será em grande medida aparente, podendo corresponder, efetivamente, a uma relação entre a velocidade de queda e a granulometria do sedimento em suspensão.

6.1.3. Sedimentos não coesivos

Com o objetivo de aprofundar a discussão sobre os resultados obtidos laboratorialmente, foi ainda realizado um estudo onde foram utilizadas formulações de estimativa das velocidades de queda adequadas a sedimentos não coesivos. Estas formulações poderão não ser as mais adequadas aos sedimentos em análise, mas permitem uma comparação de desempenhos entre expressões baseadas na concentração e na granulometria.

As expressões utilizadas foram as apresentadas no segundo capítulo, propostas por autores diferentes. A escolha da formulação é condicionada pelo fator D_*^3 . Na obtenção do parâmetro adimensional de dimensão dos sedimentos (D_*), foi utilizada a seguinte expressão:

$$D_* = d_{50} \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6.2)$$

Nesta expressão, d_{50} representa o diâmetro mediano das partículas em análise e s representa a relação entre as massas volúmicas dos sedimentos e do fluido (água neste caso). O parâmetro g representa a aceleração da gravidade, tomando o valor de $9,80 \text{ m/s}^2$ e ν representa o coeficiente de viscosidade cinemática da água.

Este coeficiente de viscosidade é função da temperatura, tendo sido obtido através da seguinte fórmula:

$$\nu = \left[1,14 - 0,031(Te - 15) + 0,00068(Te - 15)^2 \right] \times 10^{-6} \quad (6.3)$$

O parâmetro Te , presente na expressão anterior, representa o valor da temperatura da água expressa em graus centígrados. O valor utilizado para este parâmetro de temperatura resultou da média das temperaturas dos cinco ensaios, tomando o valor de $13,20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Da expressão (6.3) foi obtido um valor de $1,20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para o coeficiente de viscosidade cinemática da água.

Foram realizadas duas abordagens das formulações, uma com o valor do d_{50} da amostra total, e outra apenas com o d_{50} para a fração mais fina (ensaiada em laboratório). Na primeira abordagem foi utilizado um d_{50} de $0,29 \text{ mm}$, uma massa volúmica da água (ρ) de 1027 kg/m^3 e uma massa volúmica dos sedimentos (ρ_s) igual a 2650 kg/m^3 . De acordo com a equação (6.2), e utilizando os parâmetros mencionados anteriormente, foi obtido um valor para o D_* igual a $6,52$. O parâmetro D_*^3 para esta abordagem tomou o valor de $276,75$, obtendo-se valores para a velocidade de queda de $34,68 \text{ mm/s}$ para a formulação de Hallermeier (1981), $38,23 \text{ mm/s}$ para a expressão de Rijn (1984) e $38,92 \text{ mm/s}$ para a expressão proposta por Soulsby (1997).

Uma vez que a formulação de Soulsby (1997) poderia ser alterada através de um parâmetro que tivessem em consideração a concentração de sedimentos em suspensão, esta foi aplicada às concentrações em estudo obtendo-se um valor para a velocidade de queda de aproximadamente $38,88 \text{ mm/s}$. Este valor de velocidade é

um valor médio de todas as velocidades obtidas para as diferentes concentrações, que oscilaram entre 38,70 mm/s e 38,91 mm/s.

Os resultados obtidos através das quatro formulações para sedimentos não coesivos, utilizando o d_{50} da amostra total, podem ser observados na Figura 6.3. É visível que quando utilizadas as dimensões médias dos sedimentos da amostra total, os valores resultantes para a velocidade de queda são bastante superiores aos obtidos laboratorialmente.

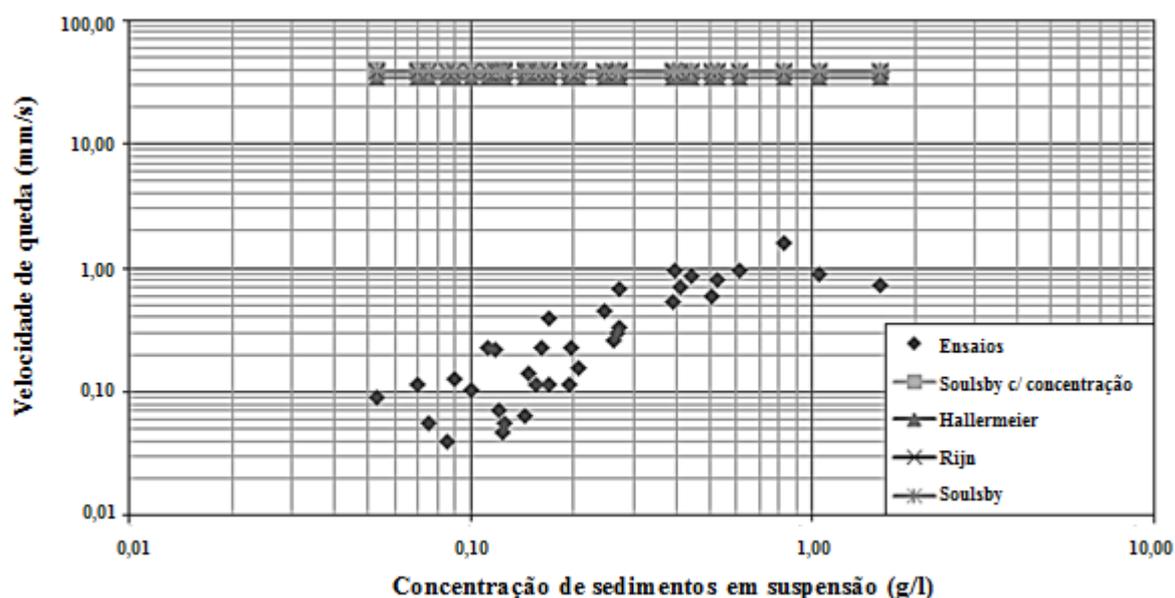


Figura 6.3 - Relação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a velocidade de queda (d_{50} da amostra total)

Na segunda abordagem, o único parâmetro que foi alterado em relação à abordagem inicial, foi o d_{50} , tomando agora um valor de 0,029 mm (representativo da parte fina da amostra). Foi obtido então, um D_* igual a 0,65 e um D_*^3 de 0,27. Uma vez que o valor obtido para o parâmetro de dimensão das partículas foi relativamente mais baixo que o anterior, as formulações de Hallermeier (1981) e de Rijn (1984) sofreram algumas alterações, tendo-se obtido um valor de velocidade de queda igual a 0,612 mm/s para ambos os autores.

A equação de Soulsby (1997) foi exatamente a mesma, apresentado uma velocidade de queda de 0,558 mm/s. Quando a concentração de sedimentos em suspensão é

tida em conta, a formulação de Soulsby (1997) original, em média, velocidades de queda na ordem dos 0,557 mm/s.

Quando se utilizam os valores correspondentes à parte fina das amostras nas formulações de sedimentos não coesivos, estas originam uma gama de resultados que se aproxima, em certo intervalo, dos valores obtidos laboratorialmente. Esta aproximação dá-se para as maiores concentrações, como pode ser observado na figura seguinte.

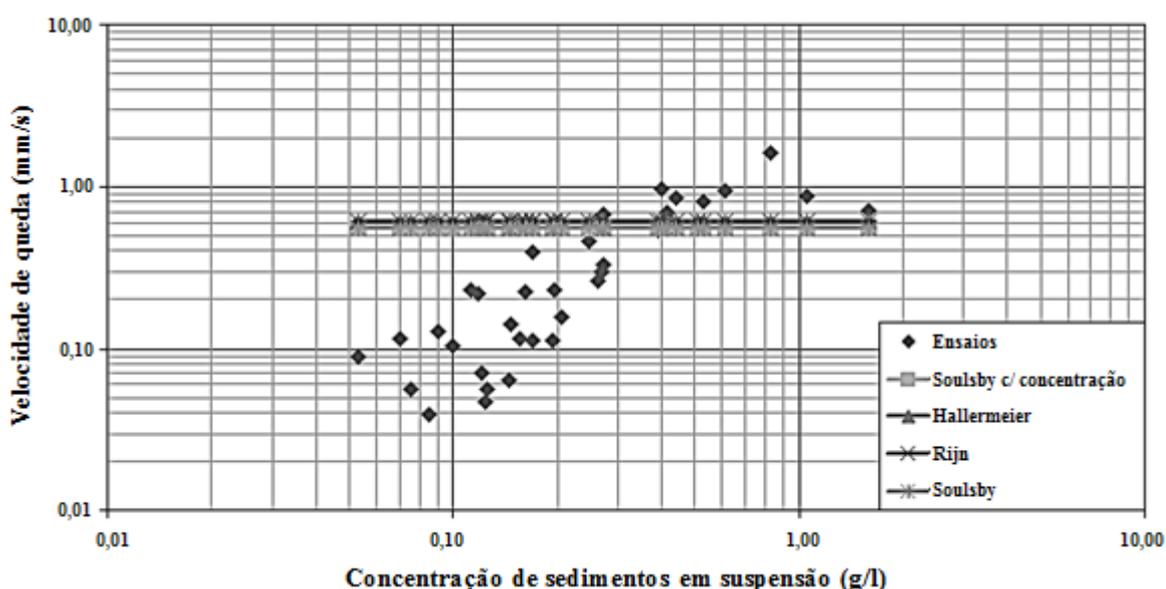


Figura 6.4 - Relação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a velocidade de queda (d_{50} apenas da parte fina)

Para complementar a informação sobre a obtenção da velocidade de queda usando formulações de sedimentos não coesivos, foi realizada uma análise gráfica onde se fez variar o parâmetro d_{50} , a massa volúmica dos sedimentos e a massa volúmica da água. Esta análise foi realizada para as formulações dos três autores mencionados anteriormente.

O comportamento que a velocidade de queda toma para diferentes valores de d_{50} encontra-se ilustrado na Figura 6.5. É visível que para gamas de concentrações mais baixas os resultados da velocidade de queda são praticamente idênticos entre as três formulações estudadas. Estes resultados mantêm-se análogos até certo valor

de d_{50} , apresentado um comportamento diferente no intervalo de 0,10 a 0,20 mm, aproximadamente. Neste intervalo de valores, a expressão proposta por Hallermeier (1981) toma valores de velocidade de queda superiores aos obtidos pelas formulações dos outros autores. No entanto, no intervalo de 0,20 a 0,30 mm, esta mesma expressão inverte o comportamento mencionado anteriormente e apresenta valores de velocidade mais baixos que as outras expressões. Na Figura 6.5 existe uma chamada de atenção para dois valores de d_{50} que representam o valor médio da dimensão das partículas finas ensaiadas em laboratório e outro o valor médio da dimensão das partículas recolhidas na amostra total da Ria.

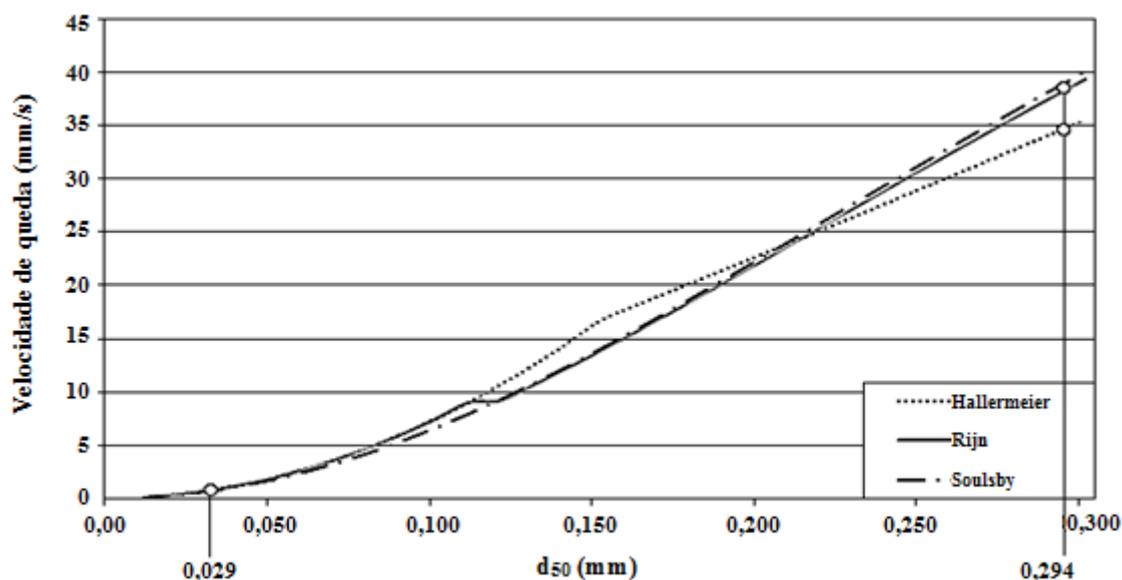


Figura 6.5 - Velocidade de queda, em função de diferentes valores de d_{50}

No que diz respeito ao estudo da variação da velocidade de queda em função de diferentes valores de massa volúmica dos sedimentos, é possível referir que todas as formulações apresentam um comportamento crescente. A análise foi realizada para um intervalo de massa volúmica entre os 1580 e os 2660 kg/m³, permitindo avaliar a influência do tipo de sedimentos.

As formulações tomam praticamente os mesmos valores de velocidade de queda quando comparadas para gamas mais baixas da massa volúmica (Figura 6.6). No entanto com o aumento da massa volúmica dos sedimentos, a formulação de Hallermeier (1981) vai produzindo valores de velocidade inferiores aos obtidos

pelas outras duas formulações. Esta diferença apresenta um valor próximo dos 4 mm/s para os valores mais altos da massa volúmica. As expressões adotadas por Rijn (1984) e Soulsby (1997) têm um comportamento muito semelhante ao longo de toda a variação da massa volúmica adotada. Contudo, é a formulação de Soulsby (1997) que apresenta valores de velocidade de queda maiores.

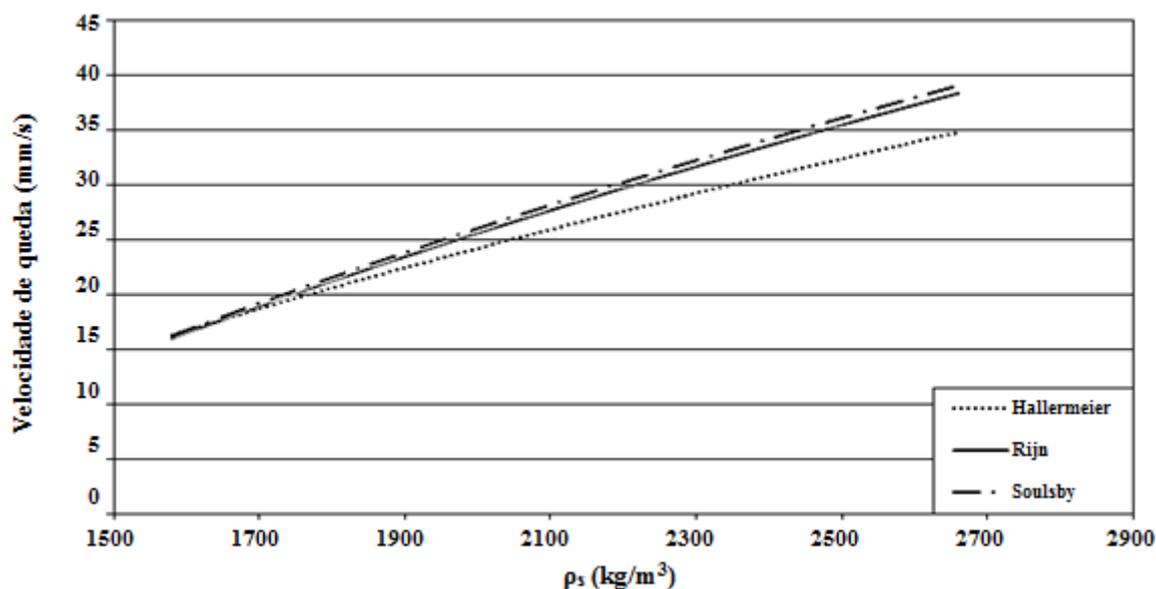


Figura 6.6 - Variação da velocidade de queda em função de diferentes valores de massa volúmica dos sedimentos

Por último, obteve-se uma representação gráfica do comportamento da velocidade de queda para diferentes valores de massa volúmica da água. Na Figura 6.7 encontram-se os resultados adquiridos para a relação descrita anteriormente, observando-se que a velocidade de queda diminui com o aumento da massa volúmica da água para ambas as expressões em análise.

Comparando os valores de velocidade de queda obtidos, para a água doce (com uma massa de 1000 kg/m³) e para água salgada (com uma massa de aproximadamente 1027 kg/m³), é visível que, com o aumento da salinidade, a velocidade de queda vai sendo menor, tendo esta diminuição um comportamento lento.

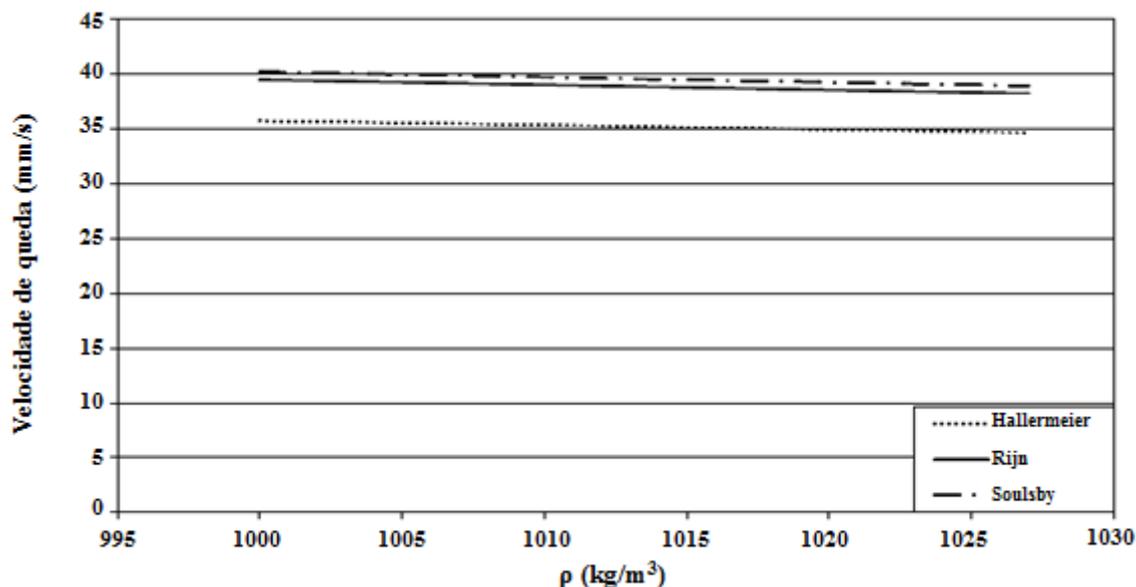


Figura 6.7 - Variação da velocidade de queda para diferentes valores de massa volúmica da água

Das três formulações em análise, a que apresenta resultados menores para a velocidade de queda é a proposta por Hallermeier (1981), estando ligeiramente abaixo das outras formulações, quando comparadas graficamente. As formulações propostas por Rijn (1984) e Soulsby (1997), geraram valores muito próximos entre as duas, no entanto foi a expressão proposta por Soulsby (1997) que apresentou resultados superiores a todas.

Em resumo, da aplicação das formulações propostas para sedimentos não coesivos, verifica-se que apresentam um comportamento diferente do observado em formulações de sedimentos coesivos (baseadas na concentração). Quando aplicadas ao tipo de sedimento em estudo, utilizando unicamente o diâmetro mediano da fracção fina da amostra, originaram valores de velocidades de queda próximos dos obtidos laboratorialmente (nomeadamente dos valores das velocidades de queda médias ponderadas pela massa; Tabela A.7). Não foi, todavia realizada uma análise pormenorizada ao longo dos ensaios, com base nos resultados da variação temporal da granulometria (Figura 5.8). É importante reforçar que a aplicação de fórmulas de sedimentos não coesivos, baseadas exclusivamente na granulometria, não permite ter em conta efeitos sobre a velocidade de queda que resultem da concentração e da salinidade.

6.2. Tensões críticas de corte

Com o objetivo de compreender melhor os resultados alcançados laboratorialmente nos ensaios em canal anular, apresentam-se em seguida algumas considerações. Em primeiro lugar, convém ter presente que a evolução das velocidades e das tensões de corte, ao longo de um ciclo de maré, não permite o estabelecimento de concentrações de equilíbrio para cada velocidade e tensão de corte, dado que a deposição dos sedimentos finos se verifica muito lentamente. Este facto dificulta a interpretação dos resultados e a identificação de tensões de corte críticas de deposição e de erosão dos sedimentos.

Em relação ao processo de deposição, parece verificar-se, em ambos os ensaios, a deposição parcial do sedimento em suspensão para uma gama muito ampla de valores de velocidade e de tensão de corte no fundo. Não é possível identificar um valor crítico correspondente à deposição total do sedimento (para uma tensão de corte nula, observam-se ainda, ao fim de 30 minutos, concentrações significativas de matéria em suspensão). Conforme se referiu anteriormente, os valores da tensão crítica de deposição total propostos por Krone (1962), para sedimento da baía de São Francisco nos Estados Unidos da América, foram 0,06-0,08 Pa.

Em relação ao processo de erosão, no ensaio 1, em que se tem uma tensão de corte máxima estimada de 0,4 Pa, e no ensaio 2, em que se tem uma tensão de corte máxima de 0,2 Pa, a relação entre concentrações máximas atingidas é aproximadamente de 2:1. Este resultado indica que 0,2 Pa é um valor para o qual se verifica apenas uma erosão parcial do sedimento, sendo 0,4 Pa um valor mais próximo da tensão crítica de erosão total.

VII CAPÍTULO

Considerações Finais

7. Considerações Finais

Este capítulo traduz uma síntese de todo o trabalho desenvolvido, referindo as principais conclusões retiradas de cada etapa realizada, bem como possíveis desenvolvimentos para futuros estudos de investigação.

7.1. Conclusões

As formas atuais da Ria de Aveiro resultam, em parte, de processos hidrodinâmicos que intervêm no transporte, erosão e deposição de sedimentos. Dos sedimentos comuns na Ria, as fracções granulométricas mais abundantes são as areias finas e os siltes, podendo estes sedimentos ser agrupados em dois grupos, os coesivos (argilas e siltes) e os não coesivos (areias). O comportamento/transporte dos sedimentos coesivos é condicionado por determinados processos que acontecem de forma cíclica, nomeadamente, a floculação, a deposição, a consolidação e a erosão.

Devido à complexidade do comportamento dos sedimentos coesivos, foi realizado um estudo que incidiu, principalmente, sobre os processos de erosão e deposição, avaliando-se as características associadas à velocidade de queda e às tensões de corte críticas de erosão e deposição. Para a concretização deste estudo, foi necessária a realização de duas campanhas de campo para a recolha de amostras de sedimentos do fundo dos canais da Ria, sendo esta recolha efetuada em quatro secções distintas (Canais da Barra, São Jacinto, Espinheiro e Ílhavo), junto à zona portuária de Aveiro.

Durante o escoamento, um sedimento coesivo pode passar por duas fases distintas, a deposição e a erosão, sendo cada uma das fases caracterizada por dois tipos de tensão de corte crítica, uma tensão total e uma tensão parcial. As tensões críticas de deposição e de erosão são utilizadas na modelação do transporte de sedimentos coesivos. A velocidade de queda também é um parâmetro muito importante na modelação do transporte de sedimentos coesivos, uma vez que o seu valor afeta a estimativa das taxas de deposição.

No que diz respeito à velocidade de queda, esta pode sofrer alterações devido à salinidade do meio e à concentração de sedimentos em suspensão. O efeito da salinidade sobre a velocidade de queda verifica-se principalmente para gamas de salinidades mais baixas, tendo sido observado que da passagem de água doce para água com uma salinidade de 5‰ a velocidade de queda se torna significativamente mais elevada, e que a partir daí até aos 30‰ o efeito é menos acentuado. Como consequência do diferente comportamento da velocidade de queda em função da concentração de sedimentos em suspensão, esta pode ser obtida através de diferentes formulações. Existem, por isso, formulações que permitem obter a velocidade de queda para baixas concentrações de sedimentos em suspensão (em que w_s aumenta com a concentração) e outras que são mais adequadas a valores muito elevados de concentração de sedimentos em suspensão (em que o efeito é o oposto).

Os sedimentos coesivos resistem à erosão até certo nível, mas quando essa resistência é ultrapassada, a erosão pode ocorrer em massa. A erosão varia com a magnitude da tensão tangencial no fundo, distinguindo-se diferentes tipos de erosão, nomeadamente, a erosão superficial de flóculos do fundo, a erosão gravítica e o arrastamento de lamas fluidas. Diferentes autores realizaram ensaios para determinar valores de tensões tangenciais críticas para a erosão e a deposição total de sedimentos coesivos. Segundo Huang *et al.* (2006), as tensões tangenciais críticas de deposição total variam entre 0,06 e 1,1 N/m².

Para analisar a velocidade de queda de sedimentos da Ria de Aveiro, realizaram-se ensaios na coluna de sedimentação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Foram realizados cinco ensaios onde se fez variar dois parâmetros, a concentração inicial de sedimentos em suspensão e a salinidade (tendo sido utilizada uma amostra de sedimento seco, verificaram-se dificuldades na homogeneização da suspensão, sendo as concentrações iniciais diferentes das pretendidas). Em ambos os casos foi verificado que a percentagem de matéria particulada em suspensão diminuía ao longo do tempo. Relativamente à salinidade, observou-se que quanto maior fosse este parâmetro, menor era a percentagem de matéria particulada em suspensão no final do ensaio.

As velocidades de queda foram obtidas com base na análise da evolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão. Para o estudo deste parâmetro, foi considerado um intervalo de tempo mais curto do que a duração total dos ensaios, uma vez que nos primeiros instantes, existia alguma turbulência originada pela rotação da coluna na preparação dos ensaios. Da análise realizada aos resultados obtidos laboratorialmente, relativamente à velocidade de queda, verificou-se que ao longo do tempo, esta vai diminuindo com a diminuição da concentração de sedimentos em suspensão, e aumentando com o aumento da salinidade.

Os sedimentos utilizados nos ensaios da coluna de sedimentação apresentaram uma granulometria com um valor médio inicial para o d_{50} de aproximadamente 0,029 mm. A variação deste parâmetro deu-se de uma forma mais lenta no ensaio de água doce, possivelmente porque a sedimentação também se verificou mais lenta neste ensaio. Relativamente à obscuração, esta apresentou-se em quase todas as medições inferior a 10%, deveria situar entre os 10 e os 15%, mas os resultados parecem admissíveis

Ao analisar as diversas formulações propostas por diferentes autores para a estimativa da velocidade de queda, verificou-se que no caso das formulações propostas por Cole e Miles (1983), por Van Rijn (1993) e por Van Leussen (1999), para baixas concentrações, o parâmetro que mais influencia os resultados é a constante K e não o expoente que corresponde à constante empírica m . De todas as formulações analisadas, propostas para sedimentos coesivos, as que se ajustaram melhor aos resultados obtidos laboratorialmente para os cinco ensaios foram as expressões 2.1I, 2.2J e FR6. Estas três formulações apresentaram valores para a constante m que variam entre 1,00 e 1,33 e valores para a variável K que podem ir de aproximadamente 0,001, para as primeiras expressões (2.1I e 2.2J), a 1,378 no caso da última expressão (FR6). No que diz respeito às formulações propostas para sedimentos não coesivos, verificou-se que quando é utilizado o d_{50} da parte fina da amostra, é originada uma gama de valores que se aproxima, num curto intervalo, dos resultados laboratoriais.

Nos ensaios realizados no canal anular do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, as tensões de corte no fundo foram obtidas através da aplicação de uma relação quadrática entre a velocidade média do escoamento e uma lei de resistência semi-empírica. Verificou-se que em ambos os ensaios as concentrações de sedimentos em suspensão apresentaram um comportamento semelhante, sendo que no ensaio com maior valor máximo da tensão de corte no fundo foram também atingidas concentrações mais elevadas. A curta duração dos ensaios dificulta a identificação de valores críticos da tensão de corte no fundo. No entanto, a deposição e a erosão parciais parecem ocorrer para uma gama ampla de valores de tensão de corte no fundo.

Tal como na coluna de sedimentação, a granulometria dos sedimentos ensaiados no canal anular diminuiu ao longo do tempo na fase de deposição, aumentando porém na fase de erosão, apresentando um valor médio do d_{50} , para os dois ensaios, de aproximadamente 0,012 mm. No ensaio com velocidades mais elevadas, obtiveram-se também valores de d_{50} mais elevados.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Com a realização deste trabalho foi comprovada a dificuldade associada ao estudo/compreensão do comportamento dos sedimentos coesivos.

Os ensaios laboratoriais são ferramentas importantes, que permitem reproduzir e entender o comportamento dos sedimentos no seu meio natural, mas com incertezas associadas aos equipamentos, às medições, etc. Seria importante a realização de novos ensaios onde poderiam ser estudadas novas concentrações iniciais e diferentes salinidades, tentando perceber melhor o efeito destes parâmetros sobre os sedimentos em causa, corrigindo algumas deficiências dos presentes ensaios e realizando uma análise mais aprofundada dos seus resultados.

Sugere-se também, após uma análise mais aprofundada, a aplicação dos resultados obtidos neste trabalho em modelos numéricos, tentando reproduzir observações feitas em campanhas de campo. Seria interessante a realização de trabalhos *in situ*,

ou seja, a realização de medições de concentrações de sedimentos em suspensão e de salinidades em diferentes dias, e em diferentes períodos de tempo, para um amplo leque de situações.

Por último, e uma vez que este estudo incidiu sobre o canal de Ílhavo, sugere-se a avaliação dos mecanismos estudados neste trabalho utilizando amostras de outros canais da Ria de Aveiro, permitindo assim perceber se os sedimentos dos outros canais apresentam um comportamento semelhante aos do canal de Ílhavo.

Referências Bibliográficas

A

Abrantes, M. (2005), “Os Sedimentos Superficiais da Margem Continental, Sector Espinho – Cabo Mondego: a utilização das fracções finas como traçadores de dinâmica sedimentar actual”, PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 239 p.

Alves, M. (2009), “Mecanismos de Erosão e Deposição de Sedimentos”, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 91 p.

Amos, C., Grant, J., Daborn, G. e Black, K. (1992), “Sea Carousel - A benthic, annular flume”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 34, pp. 557-577.

Araújo, I. (2005), “Sea Level Variability: Examples from the Atlantic Coast of Europe”, PhD Thesis, Faculty of Science – School of Ocean & Earth Science, University of Southampton, 411 p.

Araújo, M. (2004), “Erosion Mechanisms In Marine Sediments”, PhD Thesis, Universidade do Minho, 284 p.

Ariathurai, R. (1974), “A Finite Element Model for Sediment Transport in Estuaries”, PhD Dissertation, Univ. of California, Davis, California. Citado em Huang *et al.* (2006).

Ariathurai, R. e Arulanandan, K. (1978), “Erosion Rates of Cohesive Soils”, *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE*, vol. 104, no. HY2, February, pp. 279-283. Citado em Huang *et al.* (2006).

Arulanandan, K., Loganathan, P. e Krone, R. (1975), “Pore and Eroding Influences on Surface Erosion of Soil”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the ASCE*, vol. 101 (GTI), pp. 51-66. Citado em Huang *et al.* (2006).

B

Booij, R. (1994), “Measurements of the flow field in a rotating annular flume”, Report no. 94-2, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, The Netherlands, 155p.

C

Cole, P. e Miles, G. (1983), “Two-Dimensional Model of Mud Transport”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 109, no. 1, pp. 1-12.

Conde, B. (2007), “A caracterização e delimitação das áreas fundamentais da ZPE e o Ordenamento e Gestão da Ria de Aveiro”, Tese de Mestrados, Universidade de Aveiro, 272p.

Costa, S. e Coelho, C. (2011), “Suspended Sediment Concentration Importance on Cohesive Sediment Settling Velocity”, Journal of Integrated Coastal Zone Management, n° 11, pp. 171-185.

Cunha, R. (2013), “Avaliação do Transporte Sedimentar Coesivo e Misto”, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 92 p.

D

Dennett, K., Sturm, T., Amirtharajah, A. e Mahmood, T. (1998), “Effects of Adsorbed Natural Organic Matter on the Erosion of Kaolinite Sediments”, Water Environment Research, vol. 70, no. 3, pp. 268-275. Citado em Huang *et al.* (2006).

Dias J., Lopes J. e Dekeyser I. (1999), “Hydrological characterisation of Ria de Aveiro, Portugal, in early summer”, Oceanologica Acta – Vol. 22 – N°5, pp. 473-485

Dias J., Lopes J. e Dekeyser I. (2000), “Tidal Propagation in Ria de Aveiro Lagoon, Portugal”, Physics and Chemistry of the Earth, pp. 369-374.

F

Freire, P. (2003), “Análise Granulométrica por Difraccção Laser de Sedimentos Silto-Argilosos: Procedimentos de ensaio”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

G

Grabowski, R., Droppo, I. e Wharton, G. (2011), “Erodibility of Cohesive Sediment: The Importance of Sediment Properties”, *Earth-Science Reviews*, nº 105, pp. 101-120.

H

Hallermeier, R. (1981), “Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains”, *Sedimentology* 28, pp. 859–865.

Hill, P., Syyiski, J., Cowan, E. e Powell, R. (1998), “In situ observations of floc settling velocities in Glacier Bay, Alaska”, *Marine Geology*, pp. 85-94.

Hill, P., Milligan, T. e Geyer, R. (2000), “Controls on effective settling velocity of suspended sediment in the Eel River flood plume”, *Continental Shelf Research*, 20:2095-2111.

Huang, J., Hilldale, R. e Greimann, B. (2006), “Erosion and Sedimentation Manual”; U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Service Center Sedimentation and River Hydraulics Group, Denver, Colorado.

Hwang, K. e Mehta, A. (1989), “Fine Sediment Erodibility in Lake Okeechobee”, Coastal and Oceanographic Engineering Dept., University of Florida, Report UFLICOEL -891019, Gainesville, Florida.

J

Johansen, C., Larsen, T. e Peterson, O. (1997), “Experiments on Erosion of Mud from the Danish Wadden Sea”, *Cohesive Sediments Nearshore and Estuarine*

Cohesive Sediment Transport Conference, INTERCOH'94, John Wiley & Sons, 21, pp. 305-314.

K

Kelly, W. e Gularte, R. (1981), "Erosion resistance of cohesive soils", Journal of Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 107 (HY10), pp. 1211-1224. Citado em Araújo (2004).

Krone, R. (1962), "Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes"; Final Report, Hydraulic Engineering Laboratory, University of Califórnia, Berkeley, California.

L

LNEC (2013) - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, consultado em Novembro 2013:

http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nec/laboratorios_equipamentos/canal_anular

Lopes, J., Dias, J. e Dekeyser, I. (2001), "Influence of tides and rivers input in the suspended sediment transport in Ria de Aveiro lagoon, Portugal". Physical and Chemistry of the Earth (B) 26, pp. 729–734.

Lopes, J., Dias, J. e Dekeyser, I. (2006), "Numerical modelling of cohesive sediments transport in the Ria de Aveiro lagoon, Portugal", Journal of Hydrology, volume 319, pp. 176-198.

Lopes, J. e Dias, J. M. (2007), "Residual and Sediment Distribution in the Ria de Aveiro lagoon, Portugal"; Journal of Marine Systems n° 68, pp. 507-528.

M

Maggi, F. (2005), "Flocculation Dynamics of Cohesive Sediment", PhD Thesis, Politecnico di Torino, Itália, 136 p.

Mehta, A. e Partheniades, E. (1973), “Depositional Behaviour of Cohesive Sediments”, Technical Report, no.16, University of Florida, Gainesville, Florida. Citado em Huang *et al.* (2006).

Mehta, A. (1981), “Review of erosion function for cohesive sediment beds”, Proceedings of the First Indian Conference on Ocean Engineering, Indian Institute of Technology, Madras, India, 1, pp. 122-130.

Mehta, A. (1984), “Estuarine Cohesive Sediment Dynamics”. Springer-Verlag, Berlin.

Mehta, A. (1991), “Review notes on cohesive sediment erosion”, in: Coastal sediments, Krauss, N. C. *et al.*, pp. 40-53.

Mehta, A. e Lee, S. (1994), “Problems in linking the threshold condition for the transport of cohesionless and cohesive sediment grain”, Journal of Coastal Research, 10, pp. 170-177.

Moreira, M., Queiroga, H., Machado, M. e Cunha, M. (1993), “Environmental gradients in a southern estuarine system: Ria de Aveiro, Portugal, Implications for soft bottom macrofauna colonization”, Netherland, Journal of Aquatic Ecology, 27, pp. 465-482.

N

Nachtergaele, J. e Poesen, J. (2002), “Spatial and Temporal Variations in Resistance of Loess-Derived Soils to Ephemeral Gully Erosion”, European Journal of Soil Science, vol. 53, September, pp. 449-463. Citado em Huang *et al.* (2006).

Nichols, M. (1986), “Effects of fine sediment resuspension in estuaries”, in: Estuarine cohesive sediment dynamics, Lecture notes on coastal and estuarine studies, Mehta, A. J., Springer-Verlag, Berlin, pp. 5-42.

Nicholson, J. e O'Connor, B. (1986), "Cohesive Sediment Transport Model", *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 112, no. 7, pp. 621-640.

P

Partheniades, E. (1962), "A Study of Erosion and Deposition of Cohesive Soils in Silt Water", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley. Citado em Huang *et al.* (2006).

Partheniades, E. (1965), "Erosion and Deposition of Cohesive Soils", *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE*, vol. 91, no. HY1, January, pp. 105-139. Citado em Huang *et al.* (2006).

Pato, P., Válega, M., Pereira, E., Vale, C. e Duarte, A. (2008), "Inputs from a Mercury-contaminated lagoon: impact on the nearshore Waters of the Atlantic Ocean." *Journal of Coastal Research*, 24 (2B), 28-38. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208, 12p.

Peixoto, E. e Moreira, S. (1998), "Salgado de Aveiro: actualização e Análise da sua situação", Projecto final de curso de planeamento regional e urbano, Departamento de ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. Citado em Silva (2007).

Plus, W., Kuehl, H., Heymann, K. (1988), "Settling velocity of mudflocs: results of field measurements in the Elbe and the Wesser Estuary". In: Dronkers, J. & van Leussen, W., *Physical Processes in Estuaries*, Springer, Berlim, Alemanha, pp.404-424.

Portela, L. e Brito, F. (2009), "Coluna de Sedimentação. Velocidade de Queda de Sedimentos do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro", Relatório 350/2009-NEC, LNEC, Lisboa, 30p.

Portela, L. e Brito, F. (2010), "Canal Anular. Deposição e Erosão de Sedimentos do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro", Relatório 350/2010-NEC, LNEC, Lisboa.

Portela, L. e Freire, P. (2009), “Caracterização Hidrodinâmica e Sedimentar do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro”. Relatório 388/2009-NEC, LNEC, Lisboa.

Portela, L., Ramos, S., Trigo-Teixeira, A. (2013), “Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin”, In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O’Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 1188-1193.

R

Ramos, S. (2013), “Efeito da salinidade sobre a velocidade de queda de sedimentos finos de uma bacia portuária”, Tese de Mestrado, Técnico de Lisboa, 96p.

Ravens, T. e Sindelar, M. (2008), “Flume Test Section Length and Sediment Erodibility”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 134, n^o 10, pp. 1503-1506.

Ribeiro, A., Puga, J., Nobre, M., Morgado, R. (2006), “Importância das salinas activas na gestão e conservação de aves (Limícolas e Larídeos) na Ria de Aveiro”, Relatório de projecto do curso de Biologia, Departamento de Biologia, Universidade de Aveiro. Aveiro. Citado em Silva (2007).

Ross, M. e Metha, A. (1989), “On the mechanics of lutoclines and fluid mud”, Journal of Coastal Research, pp. 51-61.

S

Sanchez, M. (2006), “Settling velocity of the suspended sediment in three high-energy environments”, Ocean Engineering 33, pp. 665-678.

Shi, Z., Zhou, H., Eitrein, S. e Winterwerp, J. (2003), “Settling velocities of fine suspended particles in the Changjiang Estuary, China”, Journal of Asian Earth Sciences, 22: pp. 245-251.

Silva, J. (1994), “Circulação da água na Ria de Aveiro – contribuição para o estudo da qualidade da água”, PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 167p.

Silva, J. (2001), “Aveiro, onde a Ria namora o mar”, 1ª Edição, Anégia Editores, Paços de Ferreira. Citado em Silva (2007).

Silva, M. (2007), “O Salgado de Aveiro: Importância conservacionista e perspectivas de uso futuro” Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 106p.

T

Ten Brinke, W. (1994), “Settling velocity of mud aggregates in the oosterschelde tidal basin (The Netherlands), determined by a submersible video system”, *Estuarine, Coastal and Shelf Research*, 39 (6), pp. 549-564.

Trento, A. (2005), “Dinâmica da Flocculação no Transporte de Sedimentos Finos”, PhD Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 170 p.

V

Valeur, J., Pejrup, M. e Jensen, A. (1996), “Particle dynamics in the Sound between Denmark and Sweden”. In: Dally, W.R. & Zeidler, R.B., *Coastal Dynamics '95, Proceedings of the International Conference on Coastal Research in Terms of Large Scale Experiments*, pp.951-962, Gdansk, Polónia, American Society of Civil Engineers (ASCE), Nova York, Estados Unidos da América. ISBN: 0-7844-0154-3.

Van der Lee, W. (2000), “Temporal variation of the floc size and settling velocity in the Dollard Estuary”, *Continental Shelf Research*, 20, pp. 1495-1511.

van Leussen, W. e Cornelisse, J. (1993), “The role of large aggregates in estuarine fine sediment dynamics”. In: Mehta, A. (eds), *Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, pp.75-91, *Coastal and estuarine Studies* 42, American Geophysical Union (AGU), Nova York, Estados Unidos da América. ISBN: 0733-9569.

van Leussen, W. (1999), "The variability of settling velocities of suspended fine-grained sediment in the Ems estuary", *Journal of Sea Research*, v. 41, pp. 109-118.

van Rijn, L. (1993), "Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas", Aqua Publications, The Netherlands. Citado em Huang *et al.*, 2006.

Vicente, C. (1985), "Caracterização hidráulica e aluvionar da Ria de Aveiro, Utilização de Modelos hidráulicos no estudo de problemas da Ria", in: *Jornadas da Ria de Aveiro, III, Edição da Câmara Municipal de Aveiro, Aveiro, Portugal*, pp. 41-58.

Y

You, Z. (2004), "The effect of suspended sediment concentration on the settling velocity of cohesive sediment in quiescent water", *Ocean Engineering*, 31 (16): 1955-1965 DOI: 10.1016/j.oceaneng. 2004.05.005.

Young, R. e Southard, J. (1978), "Erosion of fine-grained marine sediments: seafloor and laboratory experiments", *Geological Society of American Bulletin*, 89, pp. 663-672.

ANEXOS

Tabela A.1 - Resultados obtidos para o ensaio 1

Hora	H final (cm)	t (min)	Níveis		
				130 cm	55 cm
12:05	220,80	0	Volume (ml)	66,40	73,20
			Mf (g)	0,0935	0,0951
			Mfs (g)	0,1320	0,1385
			C (g/l)	0,58	0,59
12:06	216,80	1	Volume (ml)	60,60	76,80
			Mf (g)	0,0926	0,0937
			Mfs (g)	0,1324	0,1424
			C (g/l)	0,66	0,63
12:11	213,10	6	Volume (ml)	61,60	66,40
			Mf (g)	0,0934	0,0927
			Mfs (g)	0,1281	0,1344
			C (g/l)	0,56	0,63
12:21	208,80	16	Volume (ml)	72,40	67,60
			Mf (g)	0,0931	0,0932
			Mfs (g)	0,1233	0,1273
			C (g/l)	0,42	0,50
12:41	205,00	36	Volume (ml)	62,20	68,20
			Mf (g)	0,0936	0,0892
			Mfs (g)	0,1112	0,1134
			C (g/l)	0,28	0,35
13:11	201,10	66	Volume (ml)	58,40	64,20
			Mf (g)	0,0893	0,0884
			Mfs (g)	0,1012	0,1045
			C (g/l)	0,20	0,25
13:51	197,30	106	Volume (ml)	59,80	55,40
			Mf (g)	0,0889	0,0885
			Mfs (g)	0,0981	0,1005
			C (g/l)	0,15	0,22
14:41	193,40	156	Volume (ml)	57,20	52,00
			Mf (g)	0,0886	0,0888
			Mfs (g)	0,0959	0,0982
			C (g/l)	0,13	0,18
15:41	189,10	216	Volume (ml)	57,20	51,20
			Mf (g)	0,0888	0,0906
			Mfs (g)	0,0950	0,0988
			C (g/l)	0,11	0,16
17:11	185,00	306	Volume (ml)	55,00	53,40
			Mf (g)	0,0896	0,0900
			Mfs (g)	0,0945	0,0968
			C (g/l)	0,09	0,13

Nota: H final – Altura de água após a colheita de amostras; t – Instante de tempo; Mf – Massa do filtro; Mfs – Massa do filtro e dos sedimentos; C – Concentração de sedimentos em suspensão.

Tabela A.2 - Resultados obtidos para o ensaio 2

Hora	H final (cm)	t (min)	Níveis		
			130 cm	55 cm	
12:44	222,00	0	Volume (ml)	58,80	64,60
			Mf (g)	0,0897	0,0878
			Mfs (g)	0,1332	0,1390
			C (g/l)	0,74	0,79
12:45	218,00	1	Volume (ml)	55,40	64,80
			Mf (g)	0,0895	0,0884
			Mfs (g)	0,1318	0,1379
			C (g/l)	0,76	0,76
12:50	214,20	6	Volume (ml)	55,80	54,20
			Mf (g)	0,0906	0,0884
			Mfs (g)	0,1269	0,1294
			C (g/l)	0,65	0,76
13:00	209,80	16	Volume (ml)	67,40	73,20
			Mf (g)	0,0893	0,0910
			Mfs (g)	0,1200	0,1334
			C (g/l)	0,45	0,58
13:20	205,80	36	Volume (ml)	56,20	60,20
			Mf (g)	0,0885	0,0891
			Mfs (g)	0,1030	0,1108
			C (g/l)	0,26	0,36
13:50	202,20	66	Volume (ml)	56,40	56,80
			Mf (g)	0,0880	0,0887
			Mfs (g)	0,0973	0,1004
			C (g/l)	0,16	0,21
14:30	198,10	106	Volume (ml)	52,60	52,60
			Mf (g)	0,0877	0,0883
			Mfs (g)	0,0941	0,0961
			C (g/l)	0,12	0,15
15:20	193,90	156	Volume (ml)	51,00	93,60
			Mf (g)	0,0874	0,0896
			Mfs (g)	0,0921	0,0976
			C (g/l)	0,09	0,09
16:20	188,50	216	Volume (ml)	49,80	71,60
			Mf (g)	0,0874	0,0872
			Mfs (g)	0,0914	0,0933
			C (g/l)	0,08	0,09
17:50	182,10	306	Volume (ml)	50,00	62,00
			Mf (g)	0,0889	0,0878
			Mfs (g)	0,0920	0,0925
			C (g/l)	0,06	0,08

Nota: H final – Altura de água após a colheita de amostras; t – Instante de tempo; Mf – Massa do filtro; Mfs – Massa do filtro e dos sedimentos; C – Concentração de sedimentos em suspensão.

Tabela A.3 - Resultados obtidos para o ensaio 3

Hora	H final (cm)	t (min)	Níveis		
			130 cm	55 cm	
11:02	222,20	0	Volume (ml)	41,60	63,00
			Mf (g)	0,0886	0,0890
			Mfs (g)	0,1095	0,1225
			C (g/l)	0,50	0,53
11:03	218,20	1	Volume (ml)	57,80	73,40
			Mf (g)	0,0879	0,0893
			Mfs (g)	0,1183	0,1273
			C (g/l)	0,52	0,52
11:08	214,20	6	Volume (ml)	60,00	63,20
			Mf (g)	0,0870	0,0887
			Mfs (g)	0,1146	0,1219
			C (g/l)	0,46	0,52
11:18	209,80	16	Volume (ml)	72,40	67,50
			Mf (g)	0,0883	0,0896
			Mfs (g)	0,1126	0,1201
			C (g/l)	0,34	0,45
11:38	205,80	36	Volume (ml)	61,40	95,40
			Mf (g)	0,0882	0,0903
			Mfs (g)	0,1008	0,1147
			C (g/l)	0,21	0,26
12:08	201,10	66	Volume (ml)	59,60	90,00
			Mf (g)	0,0886	0,0886
			Mfs (g)	0,0967	0,1107
			C (g/l)	0,14	0,25
12:48	190,20	106	Volume (ml)	56,80	91,20
			Mf (g)	0,0917	0,0911
			Mfs (g)	0,0974	0,1078
			C (g/l)	0,10	0,18
13:38	179,50	156	Volume (ml)	49,60	64,60
			Mf (g)	0,0862	0,0897
			Mfs (g)	0,0902	0,0984
			C (g/l)	0,08	0,13
14:38	174,90	216	Volume (ml)	53,40	59,20
			Mf (g)	0,0895	0,0901
			Mfs (g)	0,0928	0,0980
			C (g/l)	0,06	0,13
16:08	164,20	306	Volume (ml)	41,20	93,40
			Mf (g)	0,0905	0,0892
			Mfs (g)	0,0923	0,0971
			C (g/l)	0,04	0,08

Nota: H final – Altura de água após a colheita de amostras; t – Instante de tempo; Mf – Massa do filtro; Mfs – Massa do filtro e dos sedimentos; C – Concentração de sedimentos em suspensão.

Tabela A.4 - Resultados obtidos para o ensaio 4

Hora	H final (cm)	t (min)	Níveis		
			130 cm	55 cm	
14:44	221,50	0	Volume (ml)	57,60	44,80
			Mf (g)	0,0897	0,0914
			Mfs (g)	0,1531	0,1454
			C (g/l)	1,10	1,21
14:45	217,50	1	Volume (ml)	57,20	44,00
			Mf (g)	0,0905	0,0899
			Mfs (g)	0,1565	0,1443
			C (g/l)	1,15	1,24
14:50	213,40	6	Volume (ml)	59,20	44,80
			Mf (g)	0,0932	0,0897
			Mfs (g)	0,1536	0,1398
			C (g/l)	1,02	1,12
15:00	208,90	16	Volume (ml)	67,60	93,80
			Mf (g)	0,0901	0,0907
			Mfs (g)	0,1389	0,1574
			C (g/l)	0,72	0,71
15:20	204,60	36	Volume (ml)	56,80	68,40
			Mf (g)	0,0902	0,0900
			Mfs (g)	0,1094	0,1191
			C (g/l)	0,34	0,43
15:50	200,40	66	Volume (ml)	54,60	82,00
			Mf (g)	0,0902	0,0902
			Mfs (g)	0,1017	0,1074
			C (g/l)	0,21	0,21
16:30	195,20	106	Volume (ml)	60,20	78,40
			Mf (g)	0,0913	0,0905
			Mfs (g)	0,1002	0,1032
			C (g/l)	0,15	0,16
17:20	189,00	156	Volume (ml)	58,40	84,20
			Mf (g)	0,0898	0,0934
			Mfs (g)	0,0970	0,1036
			C (g/l)	0,12	0,12
18:20	182,70	216	Volume (ml)	53,40	58,00
			Mf (g)	0,0887	0,0906
			Mfs (g)	0,0941	0,0964
			C (g/l)	0,10	0,10
19:50	176,30	306	Volume (ml)	52,40	44,80
			Mf (g)	0,0901	0,0908
			Mfs (g)	0,0943	0,0946
			C (g/l)	0,08	0,09

Nota: H final – Altura de água após a colheita de amostras; t – Instante de tempo; Mf – Massa do filtro; Mfs – Massa do filtro e dos sedimentos; C – Concentração de sedimentos em suspensão.

Tabela A.5 - Resultados obtidos para o ensaio 5

Hora	H final (cm)	t (min)	Níveis		
				130 cm	55 cm
10:11	220,50	0	Volume (ml)	71,00	45,00
			Mf (g)	0,0905	0,0922
			Mfs (g)	0,2204	0,1778
			C (g/l)	1,83	1,90
10:12	216,30	1	Volume (ml)	70,20	42,20
			Mf (g)	0,0913	0,0872
			Mfs (g)	0,2272	0,1706
			C (g/l)	1,94	1,98
10:17	212,40	6	Volume (ml)	68,40	42,80
			Mf (g)	0,0905	0,0881
			Mfs (g)	0,2083	0,1654
			C (g/l)	1,72	1,81
10:27	208,10	16	Volume (ml)	42,80	54,60
			Mf (g)	0,0892	0,0874
			Mfs (g)	0,1439	0,1711
			C (g/l)	1,28	1,53
10:47	204,10	36	Volume (ml)	69,00	40,20
			Mf (g)	0,0875	0,0871
			Mfs (g)	0,1238	0,1217
			C (g/l)	0,53	0,86
11:17	200,20	66	Volume (ml)	65,00	52,80
			Mf (g)	0,0873	0,0876
			Mfs (g)	0,1081	0,1053
			C (g/l)	0,32	0,34
11:57	196,00	106	Volume (ml)	62,00	90,00
			Mf (g)	0,0875	0,0886
			Mfs (g)	0,1012	0,1067
			C (g/l)	0,22	0,20
12:47	189,70	156	Volume (ml)	58,20	62,20
			Mf (g)	0,0914	0,0887
			Mfs (g)	0,1020	0,0992
			C (g/l)	0,18	0,17
13:47	184,30	216	Volume (ml)	55,60	73,80
			Mf (g)	0,0882	0,0878
			Mfs (g)	0,0964	0,0972
			C (g/l)	0,15	0,13
15:17	178,10	306	Volume (ml)	54,60	46,40
			Mf (g)	0,0899	0,0896
			Mfs (g)	0,0960	0,0950
			C (g/l)	0,11	0,12

Nota: H final – Altura de água após a colheita de amostras; t – Instante de tempo; Mf – Massa do filtro; Mfs – Massa do filtro e dos sedimentos; C – Concentração de sedimentos em suspensão.

Tabela A.6 - Velocidade de queda mediana e percentagem de matéria em suspensão (no ensaio 3, os valores são referem-se apenas ao nível 4)

Ensaio	Intervalo (min)	w_s (mm/s)	Dep. Relat. %/100	Dep. Acum. %/100	Susp. (%)	w_{s50} (valor aproxim.)
1	Até 6		0,035	0,035	98,3	0,417
	6-16	0,803	0,218	0,253	85,6	
	16-36	0,536	0,230	0,483	63,2	
	36-66	0,327	0,148	0,631	44,3	
	66-106	0,156	0,068	0,700	33,4	
	106-156	0,113	0,052	0,751	27,4	
	156-216	0,064	0,030	0,781	23,4	
	216-306	0,071	0,044	0,825	19,7	
	Após 306		0,175	1,000	8,7	
2	Até 6		0,080	0,080	96,0	0,657
	6-16	0,949	0,245	0,325	79,7	
	16-36	0,702	0,271	0,596	54,0	
	36-66	0,457	0,161	0,757	32,3	
	66-106	0,225	0,065	0,822	21,0	
	106-156	0,229	0,062	0,884	14,7	
	156-216	0,039	0,008	0,892	11,2	
	216-306	0,057	0,018	0,910	9,9	
	Após 306		0,090	1,000	4,5	
3	Até 6		0,106	0,106	94,7	0,641
	6-16	0,958	0,240	0,346	77,4	
	16-36	0,681	0,255	0,601	52,7	
	36-66	0,391	0,136	0,737	33,1	
	66-106	0,217	0,068	0,805	22,9	
	106-156	0,129	0,040	0,845	17,5	
	156-216	0,116	0,036	0,881	13,7	
	216-306	0,090	0,033	0,914	10,2	
	Após 306		0,086	1,000	4,3	
4	Até 6		0,089	0,089	95,5	0,949
	6-16	1,608	0,301	0,391	76,0	
	16-36	0,859	0,284	0,675	46,7	
	36-66	0,264	0,147	0,821	25,2	
	66-106	0,228	0,047	0,868	15,5	
	106-156	0,143	0,028	0,896	11,8	
	156-216	0,047	0,018	0,914	9,5	
	216-306	0,104	0,016	0,930	7,8	
	Após 306		0,070	1,000	3,5	
5	Até 6		0,077	0,077	96,2	0,830
	6-16	0,718	0,187	0,264	83,0	
	16-36	0,879	0,373	0,637	54,9	
	36-66	0,598	0,191	0,829	26,7	
	66-106	0,296	0,061	0,889	14,1	
	106-156	0,114	0,019	0,909	10,1	
	156-216	0,114	0,020	0,928	8,2	
	216-306	0,056	0,012	0,940	6,6	
	Após 306		0,060	1,000	3,0	

Tabela A.7 - Velocidade de queda ponderada em cada intervalo de tempo pela massa depositada (no ensaio 3, os valores são referem-se apenas ao nível 4)

Ensaio	Intervalo (min)	<i>ws</i> (mm/s)	<i>ws</i> (mm/s)		Dep. Relat. %/100	<i>wsp</i> (mm/s)	
			Hipóteses			Mín	Máx
			Mín	Máx			
1	Até 6		0,803	0,803	0,035	0,028	0,028
	6-16	0,803	0,803	0,803	0,218	0,175	0,175
	16-36	0,536	0,536	0,536	0,230	0,123	0,123
	36-66	0,327	0,327	0,327	0,148	0,048	0,048
	66-106	0,156	0,156	0,156	0,068	0,011	0,011
	106-156	0,113	0,113	0,113	0,052	0,006	0,006
	156-216	0,064	0,064	0,064	0,030	0,002	0,002
	216-306	0,071	0,071	0,071	0,044	0,003	0,003
	Após 306		0,000	0,071	0,175	0,000	0,012
		Soma			1,000	0,396	0,409
2	Até 6		0,949	0,949	0,080	0,076	0,076
	6-16	0,949	0,949	0,949	0,245	0,232	0,232
	16-36	0,702	0,702	0,702	0,271	0,190	0,190
	36-66	0,457	0,457	0,457	0,161	0,074	0,074
	66-106	0,225	0,225	0,225	0,065	0,015	0,015
	106-156	0,229	0,229	0,229	0,062	0,014	0,014
	156-216	0,039	0,039	0,039	0,008	0,0003	0,0003
	216-306	0,057	0,057	0,057	0,018	0,001	0,001
	Após 306		0,000	0,057	0,090	0,000	0,005
		Soma			1,000	0,603	0,608
3	Até 6		0,958	0,958	0,106	0,102	0,102
	6-16	0,958	0,958	0,958	0,240	0,230	0,230
	16-36	0,681	0,681	0,681	0,255	0,173	0,173
	36-66	0,391	0,391	0,391	0,136	0,053	0,053
	66-106	0,217	0,217	0,217	0,068	0,015	0,015
	106-156	0,129	0,129	0,129	0,040	0,005	0,005
	156-216	0,116	0,116	0,116	0,036	0,004	0,004
	216-306	0,090	0,090	0,090	0,033	0,003	0,003
	Após 306		0,000	0,090	0,086	0,000	0,008
		Soma			1,000	0,586	0,593
4	Até 6		1,608	1,608	0,089	0,144	0,144
	6-16	1,608	1,608	1,608	0,301	0,485	0,485
	16-36	0,859	0,859	0,859	0,284	0,244	0,244
	36-66	0,264	0,264	0,264	0,147	0,039	0,039
	66-106	0,228	0,228	0,228	0,047	0,011	0,011
	106-156	0,143	0,143	0,143	0,028	0,004	0,004
	156-216	0,047	0,047	0,047	0,018	0,001	0,001
	216-306	0,104	0,104	0,104	0,016	0,002	0,002
	Após 306		0,000	0,104	0,070	0,000	0,007
		Soma			1,000	0,928	0,935
5	Até 6		0,718	0,718	0,077	0,055	0,055
	6-16	0,718	0,718	0,718	0,187	0,134	0,134
	16-36	0,879	0,879	0,879	0,373	0,328	0,328
	36-66	0,598	0,598	0,598	0,191	0,114	0,114
	66-106	0,296	0,296	0,296	0,061	0,018	0,018
	106-156	0,114	0,114	0,114	0,019	0,002	0,002
	156-216	0,114	0,114	0,114	0,020	0,002	0,002
	216-306	0,056	0,056	0,056	0,012	0,001	0,001
	Após 306		0,000	0,056	0,060	0,000	0,003
		Soma			1,000	0,655	0,658

Tabela A.8 - Resultados obtidos para a formulação 2.1 (A, B, C, D e E)

Medido no ensaio		A		B		C		D		E					
C	Ws	Ws	\Delta												
(g/l)	(mm/s)	(mm/s)	(%)												
0,528	0,803	0,528	34,3	1,055	31,5	0,278	65,3	0,557	30,6	0,726	9,5				
0,389	0,536	0,389	27,4	0,779	45,3	0,152	71,7	0,303	43,4	0,624	16,4				
0,273	0,327	0,273	16,5	0,546	67,0	0,074	77,2	0,149	54,4	0,522	59,8				
0,206	0,156	0,206	32,4	0,412	164,8	0,042	72,7	0,085	45,4	0,454	191,7				
0,169	0,113	0,169	49,5	0,338	199,0	0,029	74,7	0,057	49,5	0,411	263,6				
0,144	0,064	0,144	125,3	0,288	350,7	0,021	67,5	0,041	35,1	0,380	493,7				
0,121	0,071	0,121	72,1	0,243	244,2	0,015	79,1	0,029	58,2	0,348	394,0				
0,610	0,949	0,610	35,8	1,220	28,5	0,372	60,8	0,744	21,7	0,781	17,8				
0,413	0,702	0,413	41,2	0,825	17,6	0,170	75,7	0,341	51,5	0,642	8,5				
0,247	0,457	0,247	45,9	0,495	8,3	0,061	86,6	0,122	73,2	0,497	8,9				
0,161	0,225	0,161	28,7	0,322	42,6	0,026	88,5	0,052	77,1	0,401	77,9				
0,112	0,229	0,112	51,0	0,225	2,0	0,013	94,5	0,025	89,0	0,335	46,1				
0,085	0,039	0,085	117,7	0,171	335,5	0,007	81,4	0,015	62,8	0,292	644,7				
0,076	0,057	0,076	33,0	0,151	166,0	0,006	89,9	0,011	79,9	0,275	383,9				
0,398	0,958	0,398	58,5	0,796	16,9	0,158	83,5	0,317	66,9	0,631	34,1				
0,271	0,681	0,271	60,2	0,542	20,4	0,073	89,2	0,147	78,4	0,521	23,6				
0,170	0,391	0,170	56,5	0,340	13,0	0,029	92,6	0,058	85,2	0,412	5,5				
0,118	0,217	0,118	45,6	0,236	8,8	0,014	93,6	0,028	87,2	0,344	58,3				
0,090	0,129	0,090	30,2	0,180	39,5	0,008	93,7	0,016	87,4	0,300	132,6				
0,070	0,116	0,070	39,7	0,140	20,7	0,005	95,8	0,010	91,6	0,265	128,1				
0,053	0,090	0,053	41,1	0,106	17,8	0,003	96,9	0,006	93,8	0,230	155,8				
0,828	1,608	0,828	48,5	1,655	2,9	0,685	57,4	1,370	14,8	0,910	43,4				
0,441	0,859	0,441	48,6	0,883	2,8	0,195	77,3	0,390	54,6	0,664	22,7				
0,262	0,264	0,262	0,7	0,525	98,6	0,069	73,9	0,138	47,9	0,512	93,9				
0,197	0,228	0,197	13,7	0,393	72,5	0,039	83,0	0,077	66,1	0,444	94,5				
0,147	0,143	0,147	3,3	0,295	106,6	0,022	84,8	0,043	69,5	0,384	169,0				
0,124	0,047	0,124	164,2	0,247	428,4	0,015	67,4	0,031	34,7	0,351	651,8				
0,100	0,104	0,100	4,0	0,199	92,0	0,010	90,4	0,020	80,9	0,316	204,1				
1,585	0,718	1,585	120,9	3,170	341,7	2,512	250,1	5,024	600,1	1,259	75,4				
1,050	0,879	1,050	19,4	2,100	138,8	1,102	25,3	2,204	150,7	1,025	16,5				
0,510	0,598	0,510	14,6	1,021	70,7	0,261	56,4	0,521	12,9	0,714	19,5				
0,270	0,296	0,270	8,8	0,539	82,4	0,073	75,4	0,145	50,8	0,519	75,7				
0,193	0,114	0,193	70,0	0,386	240,1	0,037	67,2	0,075	34,3	0,439	286,9				
0,156	0,114	0,156	36,6	0,312	173,3	0,024	78,7	0,049	57,4	0,395	246,1				
0,126	0,056	0,126	125,2	0,251	350,4	0,016	71,7	0,032	43,4	0,355	535,1				
<i>Média</i>			49,2			115,5			82,6			76,6			162,5

Tabela A.9 - Resultados obtidos para as formulações 2.1 e 2.2 (F, G, H, I e J)

Medido no ensaio		F		G		H		I		J	
C (g/l)	Ws (mm/s)	Ws (mm/s)	\Delta (%)								
0,528	0,803	1,453	81,0	0,107	86,7	0,213	73,4	0,426	46,9	0,317	60,6
0,389	0,536	1,248	132,8	0,037	93,1	0,074	86,2	0,284	47,0	0,234	56,4
0,273	0,327	1,045	219,6	0,011	96,8	0,021	93,5	0,177	45,9	0,164	49,9
0,206	0,156	0,908	483,4	0,004	97,4	0,008	94,9	0,122	21,8	0,124	20,6
0,169	0,113	0,822	627,2	0,002	98,2	0,004	96,5	0,093	17,3	0,101	10,3
0,144	0,064	0,759	1087,5	0,001	98,2	0,002	96,5	0,076	18,1	0,086	35,2
0,121	0,071	0,697	888,0	0,001	99,1	0,001	98,2	0,060	14,8	0,073	3,3
0,610	0,949	1,562	64,5	0,177	81,3	0,354	62,7	0,517	45,5	0,366	61,5
0,413	0,702	1,285	83,1	0,045	93,6	0,090	87,1	0,307	56,2	0,248	64,7
0,247	0,457	0,995	117,7	0,008	98,4	0,015	96,7	0,155	66,0	0,148	67,5
0,161	0,225	0,802	255,7	0,002	99,3	0,003	98,5	0,087	61,2	0,096	57,2
0,112	0,229	0,670	192,3	0,000	99,8	0,001	99,6	0,054	76,4	0,067	70,6
0,085	0,039	0,585	1389,3	0,000	99,5	0,000	99,1	0,038	4,1	0,051	30,6
0,076	0,057	0,550	867,8	0,000	99,8	0,000	99,6	0,032	43,8	0,045	20,2
0,398	0,958	1,262	31,7	0,040	95,8	0,080	91,7	0,293	69,4	0,239	75,1
0,271	0,681	1,041	52,9	0,010	98,5	0,021	97,0	0,175	74,2	0,163	76,1
0,170	0,391	0,825	110,9	0,002	99,5	0,004	99,0	0,094	75,9	0,102	73,9
0,118	0,217	0,687	216,6	0,001	99,7	0,001	99,5	0,058	73,3	0,071	67,4
0,090	0,129	0,600	365,1	0,000	99,8	0,000	99,7	0,040	68,7	0,054	58,1
0,070	0,116	0,529	356,2	0,000	99,9	0,000	99,8	0,029	75,1	0,042	63,8
0,053	0,090	0,460	411,6	0,000	100,0	0,000	99,9	0,020	77,9	0,032	64,7
0,828	1,608	1,820	13,1	0,516	67,9	1,032	35,8	0,777	51,7	0,497	69,1
0,441	0,859	1,329	54,7	0,057	93,4	0,114	86,7	0,336	60,9	0,265	69,2
0,262	0,264	1,024	287,9	0,009	96,5	0,018	93,0	0,168	36,4	0,157	40,4
0,197	0,228	0,887	289,0	0,003	98,5	0,007	97,0	0,114	49,8	0,118	48,2
0,147	0,143	0,768	437,9	0,001	99,1	0,002	98,3	0,078	45,4	0,088	38,0
0,124	0,047	0,703	1403,6	0,001	98,6	0,001	97,2	0,062	31,6	0,074	58,5
0,100	0,104	0,631	508,1	0,000	99,7	0,001	99,4	0,046	55,5	0,060	42,4
1,585	0,718	2,518	250,9	5,013	598,5	10,026	1297	1,848	157,5	0,951	32,5
1,050	0,879	2,049	133,1	1,185	34,8	2,370	169,6	1,067	21,4	0,630	28,4
0,510	0,598	1,429	138,9	0,095	84,1	0,190	68,2	0,408	31,8	0,306	48,8
0,270	0,296	1,038	251,3	0,010	96,6	0,020	93,1	0,174	41,1	0,162	45,3
0,193	0,114	0,879	673,8	0,003	97,2	0,006	94,4	0,112	1,7	0,116	2,0
0,156	0,114	0,790	592,3	0,001	98,7	0,003	97,4	0,084	26,5	0,094	18,0
0,126	0,056	0,709	1170,1	0,001	98,7	0,001	97,5	0,063	12,8	0,075	35,1
Média		406,8		108,5		128,4		48,7		47,5	

Tabela A.10 - Resultados obtidos através das aproximações obtidas para os cinco ensaios

Medido no ensaio		FR1		FR2		FR3		FR4		FR5		FR6	
C (g/l)	Ws (mm/s)	Ws (mm/s)	Δ (%)										
0,53	0,80	0,89	11,2	1,02	27,5	1,05	30,4	0,89	11,3	0,38	52,7	1,05	31,3
0,39	0,54	0,51	4,4	0,67	24,2	0,67	25,4	0,56	4,2	0,28	48,2	0,64	20,1
0,27	0,33	0,27	18,1	0,40	23,1	0,40	22,5	0,32	1,3	0,19	41,0	0,35	7,8
0,21	0,16	0,16	3,0	0,27	73,7	0,27	71,0	0,21	34,3	0,14	7,0	0,14	8,5
0,17	0,11	0,11	1,2	0,20	80,6	0,20	76,3	0,15	36,1	0,12	4,4	0,10	14,7
0,14	0,06	0,08	30,4	0,16	154	0,16	147	0,12	88,0	0,10	56,8	0,05	24,7
0,12	0,07	0,06	13,5	0,13	81,0	0,12	74,5	0,09	30,8	0,08	19,2	0,05	23,1
0,61	0,95	1,16	22,5	1,26	32,4	1,29	36,1	1,12	17,6	0,44	53,7	1,29	36,2
0,41	0,70	0,57	18,8	0,72	3,0	0,73	4,3	0,61	12,9	0,29	58,0	0,89	27,5
0,25	0,46	0,22	51,0	0,35	23,4	0,35	24,0	0,28	39,3	0,17	61,8	0,53	16,0
0,16	0,23	0,10	54,8	0,19	15,6	0,19	17,8	0,14	36,8	0,11	50,2	0,22	0,7
0,11	0,23	0,05	76,9	0,11	50,1	0,11	52,1	0,08	64,3	0,08	66,1	0,23	0,3
0,09	0,04	0,03	18,1	0,08	98,0	0,07	88,1	0,05	36,7	0,06	49,5	0,03	32,4
0,08	0,06	0,03	54,8	0,07	14,9	0,06	8,6	0,04	21,9	0,05	8,9	0,04	26,6
0,40	0,96	0,53	44,3	0,69	28,3	1,02	6,5	0,58	39,7	0,28	70,3	1,31	36,5
0,27	0,68	0,26	61,2	0,40	41,5	0,63	7,4	0,32	53,1	0,19	71,9	0,86	26,6
0,17	0,39	0,11	71,1	0,21	47,4	0,35	10,1	0,15	60,3	0,12	69,6	0,44	12,1
0,12	0,22	0,06	73,3	0,12	43,5	0,22	2,6	0,09	59,3	0,08	62,4	0,21	1,5
0,09	0,13	0,03	72,6	0,08	35,2	0,16	23,0	0,06	54,9	0,06	52,0	0,11	12,2
0,07	0,12	0,02	80,8	0,06	49,5	0,12	0,2	0,04	66,0	0,05	58,8	0,10	14,2
0,05	0,09	0,01	85,1	0,04	56,1	0,08	9,2	0,03	71,5	0,04	60,0	0,07	18,8
0,83	1,61	2,03	26,3	1,94	20,4	2,02	25,4	1,79	11,3	0,60	62,6	2,46	53,0
0,44	0,86	0,64	25,0	0,79	7,5	0,81	6,0	0,68	21,1	0,32	63,2	1,14	33,3
0,26	0,26	0,25	5,7	0,38	44,1	0,38	43,2	0,30	14,9	0,19	29,8	0,27	2,8
0,20	0,23	0,15	35,4	0,25	11,0	0,25	9,1	0,19	14,7	0,14	39,5	0,23	0,4
0,15	0,14	0,09	39,0	0,17	17,8	0,16	14,5	0,12	12,7	0,10	28,1	0,13	10,2
0,12	0,05	0,06	34,7	0,13	180	0,13	170	0,09	102	0,09	83,1	0,03	29,7
0,10	0,10	0,04	59,0	0,10	6,9	0,09	11,0	0,07	34,4	0,07	33,8	0,09	16,2
1,58	0,72	6,65	827	4,86	577,	5,20	624	4,88	580	1,17	63,2	0,92	28,1
1,05	0,88	3,14	256	2,71	208,	2,85	224	2,58	194	0,77	12,7	1,18	33,9
0,51	0,60	0,84	40,5	0,98	63,3	1,00	66,8	0,85	41,9	0,37	38,7	0,74	23,1
0,27	0,30	0,26	11,4	0,40	33,8	0,39	33,2	0,32	7,1	0,19	35,5	0,31	5,4
0,19	0,11	0,14	25,4	0,25	117	0,24	113	0,19	66,5	0,14	19,2	0,10	14,6
0,16	0,11	0,10	15,6	0,18	59,6	0,18	55,3	0,14	19,0	0,11	4,7	0,10	14,5
0,13	0,06	0,07	16,5	0,13	140	0,13	132,	0,10	74,5	0,09	56,1	0,04	26,9
<i>Média</i>			65,3		71,2		137,3		58,2		45,5		19,5