



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE  
Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Proc. 0604/14/16599

## **CANAL ANULAR**

### **Deposição e erosão de sedimentos do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro**

Estudo realizado no âmbito do projecto "Murano – Muros das Marinhas de Sal da Ria de Aveiro", co-financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia

Lisboa • Novembro de 2010

**I&D** HIDRÁULICA E AMBIENTE

**RELATÓRIO 350/2010 – NEC**



## **CANAL ANULAR**

**Deposição e Erosão de Sedimentos do Esteiro dos  
Frades, Ria de Aveiro**

## **ANNULAR FLUME**

**Deposition and Erosion of Sediments from Esteiro dos  
Frades, Ria de Aveiro**

## **CANAL CIRCULAIRE**

**Déposition et Erosion de Sédiments du Esteiro dos  
Frades, Ria de Aveiro**



# CANAL ANULAR

## Deposição e Erosão de Sedimentos do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro

### ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	MATERIAL E MÉTODOS .....	1
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	3
3.1.	ENSAIOS DE CURTA DURAÇÃO .....	3
3.2.	ENSAIOS DE LONGA DURAÇÃO.....	4
4.	CONCLUSÕES.....	5
	ANEXO I: FIGURAS .....	9
	ANEXO II: QUADROS .....	17

## Índice de Figuras

Figura 1:	Aspecto do canal anular no início dos ensaios.....	2
Figura A.1:	Evolução da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de curta duração. Ensaio 1: velocidade máxima 0,65 m/s.....	11
Figura A.2:	Evolução da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de curta duração. Ensaio 2: velocidade máxima 0,50 m/s.....	11
Figura A.3:	Evolução da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de curta duração. Ensaio 3: velocidade máxima 0,35 m/s.....	12
Figura A.4:	Evolução da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de curta duração. Ensaios 1, 2 e 3.....	12
Figura A.5:	Variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo. Ensaio 1.....	13
Figura A.6:	Variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo. Ensaio 2.....	13
Figura A.7:	Variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo. Ensaio 3.....	14
Figura A.8:	Variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo. Ensaios 1, 2 e 3.....	14
Figura A.9:	Variação da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de longa duração. Ensaios 4 e 5: velocidade máxima 0,66 m/s.....	15
Figura A.10:	Variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo. Ensaios 4 e 5.....	15

## Índice de Quadros

Quadro I:	Condições de ensaio.....	3
Quadro A.I:	Resultados do Ensaio 1.....	19
Quadro A.II:	Resultados do Ensaio 2.....	19
Quadro A.III:	Resultados do Ensaio 3.....	20
Quadro A.IV:	Resultados do Ensaio 4.....	21
Quadro A.V:	Resultados do Ensaio 5.....	21

# CANAL ANULAR

## Deposição e Erosão de Sedimentos do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro

### 1. INTRODUÇÃO

O presente Relatório descreve ensaios laboratoriais de deposição e de erosão de sedimentos, predominantemente finos, colhidos no Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro. Em cada ensaio, foi determinada a evolução das concentrações de sedimento em suspensão para diferentes condições de velocidade média do escoamento e de tensão de corte no fundo.

Os ensaios foram realizados no canal anular da Estação Experimental de Sedimentos Coesivos do LNEC, no âmbito do projecto “Murano – Muros das Marinhas de Sal da Ria de Aveiro”, co-financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

### 2. MATERIAL E MÉTODOS

O sedimento superficial foi colhido num esteiro da Ria de Aveiro, ao nível da superfície livre, no talude de uma marinha de sal abandonada (Costa, 2009; Portela & Freire, 2009; Portela & Brito, 2009). A análise granulométrica indicou ser constituído em 80% por material fino, silto-argiloso ( $<63 \mu\text{m}$ ) e em 20% por material grosseiro. Os ensaios foram realizados a partir de uma amostra com 2,6 kg de massa total (partículas sólidas e água), que foi passada por um peneiro de 1 mm de modo a remover o material muito grosseiro e a obter uma suspensão de concentração elevada.

Os canais anulares ou circulares, constituídos por um canal-base e por um anel superior, evitam as singularidades de entrada e de saída dos canais rectangulares, sendo especialmente adequados para o estudo dos processos de transporte de sedimentos finos. O canal anular do LNEC (Fig. 1) tem um diâmetro médio de 3,70 m (diâmetro exterior de 4,00 m), uma secção de 0,30 m de largura por 0,40 m de altura e um volume líquido de  $1395 \text{ dm}^3$ . De modo a minimizar a importância das circulações secundárias, o canal-base e o anel superior têm movimentos de rotação independentes, em sentidos opostos. Neste estudo, adoptou-se uma relação entre as velocidades angulares do anel ( $w_t$ ) e da base ( $w_b$ ) de  $w_t$  igual a  $-3 w_b$ .



**Figura 1: Aspecto do canal anular no início dos ensaios.**

As velocidades angulares a impor ao canal-base ( $w_b$ ) e ao anel superior ( $w_t$ ) para obter uma determinada velocidade média do escoamento referida à base do canal ( $u_{av,b}$ ) foram estimadas pela expressão analítica (Booij, 1994):

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

em que  $r$  é o raio médio do canal e  $b$  e  $h$  são, respectivamente, a largura e a altura da secção. A validade desta expressão foi verificada por medições (Portela & Reis, 2002, 2005).

A tensão de corte no fundo foi estimada admitindo uma relação quadrática com a velocidade média do escoamento e uma lei de resistência semi-empírica (p.ex. Manning):

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

Na equação (2),  $\tau$  é a tensão de corte no fundo,  $\rho$  é a massa volúmica da água,  $u_*$  é a velocidade de atrito,  $n$  é o coeficiente de Manning e  $g$  é a aceleração da gravidade. Considerou-se um coeficiente de Manning igual a  $0,011 \text{ s m}^{-1/3}$  (equivalente a um coeficiente de Chézy de  $78 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ ; Portela & Reis, 2002, 2005).



**Quadro I: Condições de ensaio.**

<b>Ensaio</b>	<b>Duração</b>	<b>Velocidade máxima (m/s)</b>	<b>Tensão de corte máxima (Pa)</b>
1	7,5 horas	0,65	0,68
2	7,5 horas	0,50	0,40
3	7,5 horas	0,35	0,20
4	11dias	0,66	0,70
5	11dias	0,66	0,70

Efectuaram-se 3 ensaios de curta duração (7 horas e 30 minutos), com evolução da velocidade do escoamento comparável a condições observáveis num ciclo de maré, mas com diferentes valores máximos atingidos (0,65, 0,50 e 0,35 m/s; Quadro I).

Efectuou-se também um ensaio de longa duração (11dias), com alteração da velocidade ao fim de períodos sucessivos de 24 horas, de forma a permitir o estabelecimento de concentrações de equilíbrio para cada uma dessas velocidades. Este ensaio foi repetido com o objectivo de avaliar a robustez dos resultados.

Os ensaios foram realizados com água doce. Durante os ensaios, foram colhidas amostras para determinação da concentração de sedimento em suspensão por via gravimétrica. Em cada colheita, foi repostado no canal um volume equivalente de água e, nos ensaios de longa duração, um volume adicional para compensar perdas por evaporação.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Ensaios de curta duração**

A evolução temporal da concentração de sedimento em suspensão nos três ensaios de curta duração encontra-se representada nas Figs. A.1-4 do Anexo I. Refira-se que:

- As concentrações máximas têm valores claramente distintos, mais elevados no ensaio 1, em que a velocidade máxima é maior, intermédios no ensaio 2 e menos elevados no ensaio 3, em que a velocidade máxima é menor;
- As concentrações mínimas, embora também mais elevadas no ensaio 1 e mais reduzidas no ensaio 3, têm valores situados num intervalo muito mais estreito;

- Uma parte significativa do sedimento permanece continuamente em suspensão (cerca de 40% no ensaio 1), devido à baixa velocidade de sedimentação das partículas e ao curto período de tempo em que a velocidade do escoamento é muito baixa ou nula.

No que respeita à evolução relativamente às condições de maré, verifica-se que

- Os resultados parecem evoluir correctamente, notando-se no ensaio 1 que as concentrações têm um andamento côncavo na fase de velocidade decrescente (deposição) e convexo na fase de velocidade crescente (erosão);
- Ocorre um desfasamento temporal entre a “estofa da maré” e a concentração mínima (a concentração mínima é observada 30 minutos após a imposição do primeiro patamar de velocidade crescente e 1 hora após a anulação da velocidade);
- O período de erosão tem uma duração mais curta do que o de deposição, ocorrendo uma variação mais acentuada das concentrações no período de erosão (para velocidades da ordem de 0,45 m/s nos ensaios 1 e 2).

A variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo, nos 3 ensaios de curta duração, encontra-se representada nas Figs. A.5-8:

- Em cada ensaio, ocorre um fenómeno de histerese entre as fases de velocidade decrescente e de velocidade crescente, mas pouco acentuado, provavelmente devido ao curto período de tempo em que a velocidade é muito baixa ou nula.

### **3.2. Ensaio de longa duração**

Relativamente aos ensaios de longa duração, a evolução temporal da concentração de sedimento em suspensão e a variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo encontram-se representadas nas Figs. A9-10:

- Os resultados obtidos são consistentes com a hipótese do estabelecimento de concentrações próximas do equilíbrio ao fim de 24 horas (apenas cerca de 10% do material permanece em suspensão 24 horas após a anulação da velocidade);
- Verifica-se uma deposição parcial do sedimento em suspensão para diferentes valores de velocidade, sendo este comportamento não-uniforme possivelmente condicionado pela distribuição granulométrica inicial;
- Verifica-se um fenómeno de histerese bem definido, que se traduz, para os mesmos valores de tensão de corte no fundo, por concentrações claramente inferiores na fase de velocidade crescente às registadas na fase de velocidade decrescente.

Relativamente à robustez dos resultados, considera-se que:

- Diversos factores podem afectar a precisão dos resultados (por exemplo, o contacto do anel superior com o volume líquido e as condições de colheita das amostras);
- No entanto, a fiabilidade e a replicabilidade dos ensaios são razoavelmente satisfatórias, verificando-se uma variação média normalizada ( $\Sigma \Delta O_i / \Sigma \overline{O}_i$ ) de 7,8% entre as observações dos ensaios 4 e 5.

#### **4. CONCLUSÕES**


Apresentam-se as seguintes conclusões:

1. Os ensaios de curta duração permitem simular a evolução das concentrações de sedimento em suspensão em função da maré.
2. Os ensaios de longa duração, com velocidade do escoamento constante, permitem analisar o estabelecimento de concentrações próximas do equilíbrio.
3. Verifica-se a deposição parcial do sedimento em suspensão para diferentes valores de tensão de corte no fundo, estando este comportamento possivelmente relacionado com a distribuição granulométrica do sedimento inicial.
4. Nos ensaios de longa duração, o valor de tensão de corte para o qual se verifica a deposição de cerca de 50% do sedimento inicial é da ordem de 0,17 Pa.
5. A erosão apenas se inicia para um valor crítico de tensão de corte no fundo, que, nos ensaios de longa duração (com velocidade nula durante 24 horas), se situa entre 0,1 e 0,2 Pa, observando-se para 0,2 Pa a erosão parcial do sedimento depositado.
6. Nos ensaios de longa duração, o valor de tensão de corte para o qual se verifica a erosão de cerca de 50% do sedimento inicial é da ordem de 0,28 Pa.

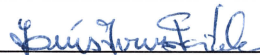
Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Novembro de 2010

**VISTOS**

**AUTORIA**



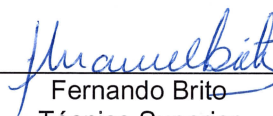
André Fortunato  
Chefe do Núcleo de Estuários e  
Zonas Costeiras



Luís Ivens Portela  
Investigador Auxiliar



Rafaela de Saldanha Matos  
Directora do Departamento de  
Hidráulica e Ambiente



Fernando Brito  
Técnico Superior

## **BIBLIOGRAFIA**

- BOOIJ, R.; 1994 – Measurements of the flow field in a rotating annular flume. Report 94-2, Delft University of Technology.
- COSTA, S.M.S.; 2009 – Projecto Murano. Relatório da campanha de campo, 11 de Março de 2009. Universidade de Aveiro.
- PORTELA, L.I.; BRITO, F.; 2009 – Coluna de sedimentação. Velocidade de queda de sedimentos do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro. Relatório 350/2009-NEC, LNEC, Lisboa.
- PORTELA, L.I.; FREIRE, P.; 2009 – Caracterização hidrodinâmica e sedimentar do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro. Observações em 2009. Relatório 388/2009-NEC, LNEC, Lisboa.
- PORTELA, L.I.; REIS, M.M.; 2002 – Mecanismos de transporte de sedimentos coesivos em estuários. Velocidade média e tensão de corte no fundo em canal anular. Relatório 308/02-NET, LNEC, Lisboa.
- PORTELA, L.I.; REIS, M.M.; 2005 – Analysis of cohesive sediment transport in decelerating and accelerating flow. In: J.M. Smith (ed.), Coastal Engineering 2004 - Proceedings of the 29th International Conference, Volume 2: 1818-1829. World Scientific, Singapore.



## **CANAL ANULAR**

### **Deposição e Erosão de Sedimentos do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro**

#### **ANEXO I: FIGURAS**





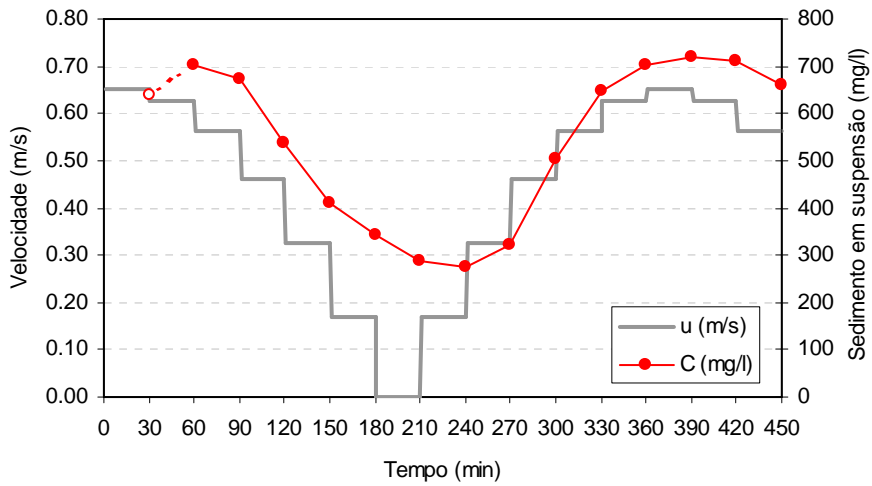


Figura A.1 – Evolução da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de curta duração. Ensaio 1: velocidade máxima 0,65 m/s.

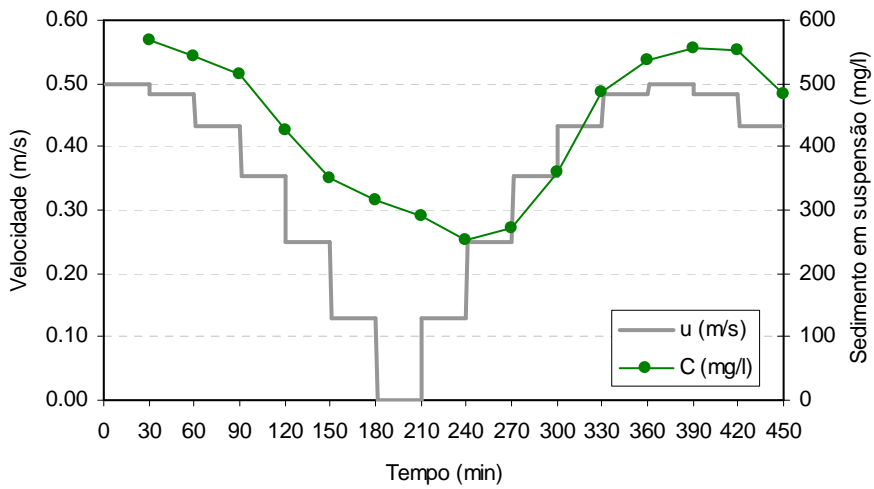


Figura A.2 – Evolução da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de curta duração. Ensaio 2: velocidade máxima 0,50 m/s.

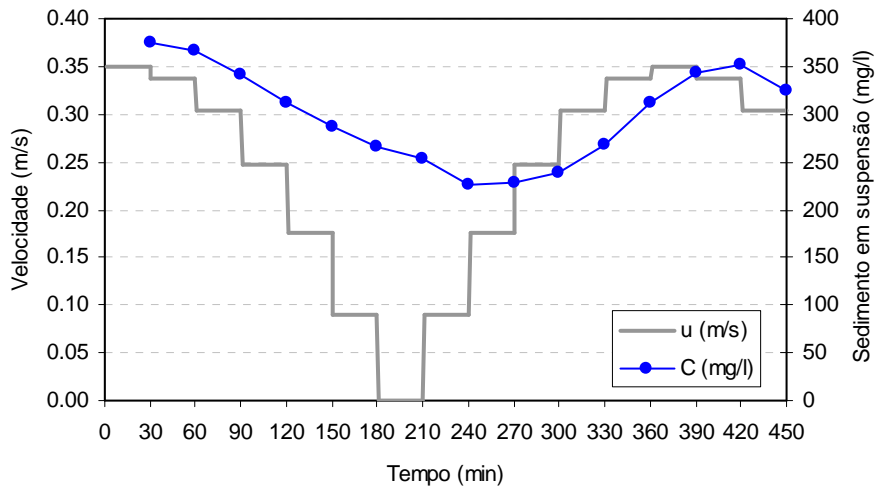


Figura A.3 – Evolução da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de curta duração. Ensaio 3: velocidade máxima 0,35 m/s.

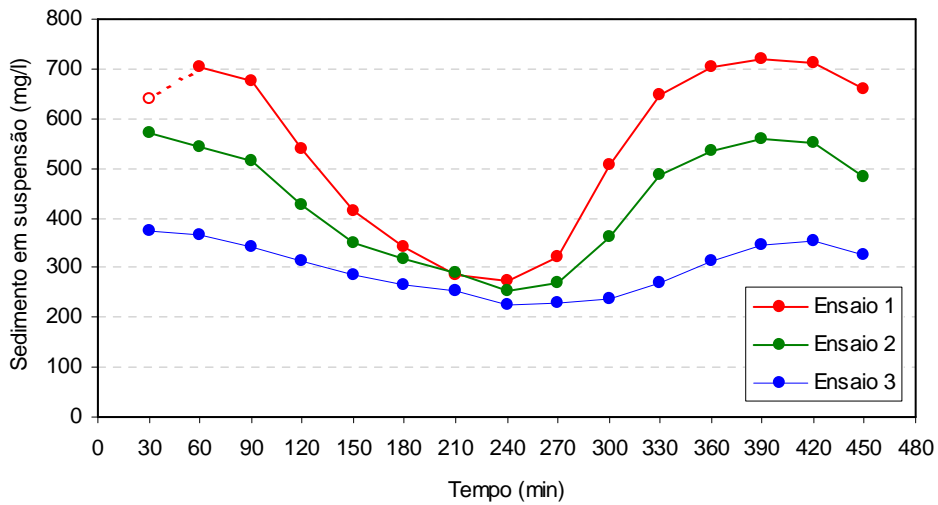


Figura A.4 – Evolução da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de curta duração. Ensaio 1, 2 e 3.

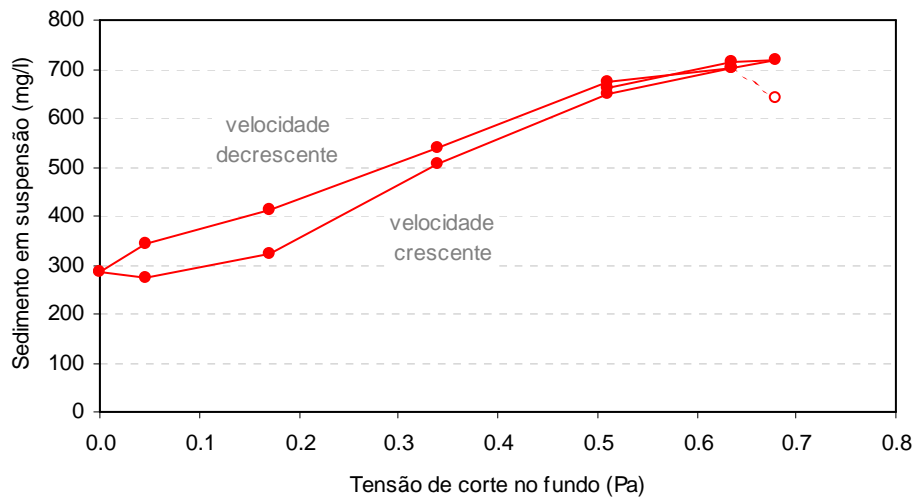


Figura A.5 – Variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo. Ensaio 1.

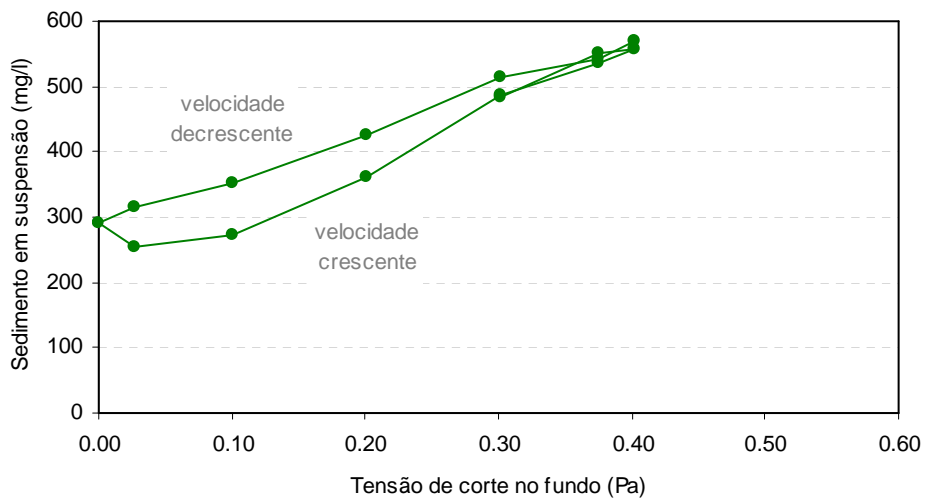


Figura A.6 – Variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo. Ensaio 2.

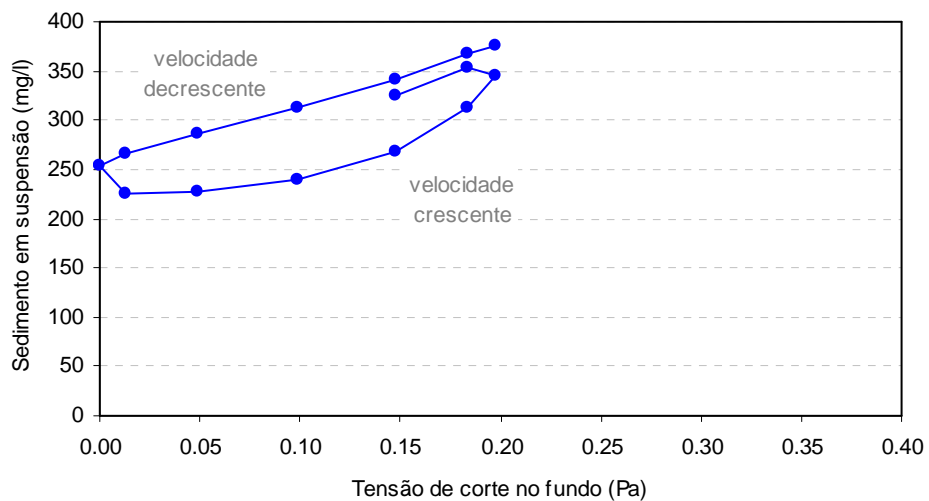


Figura A.7 – Variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo. Ensaio 3.

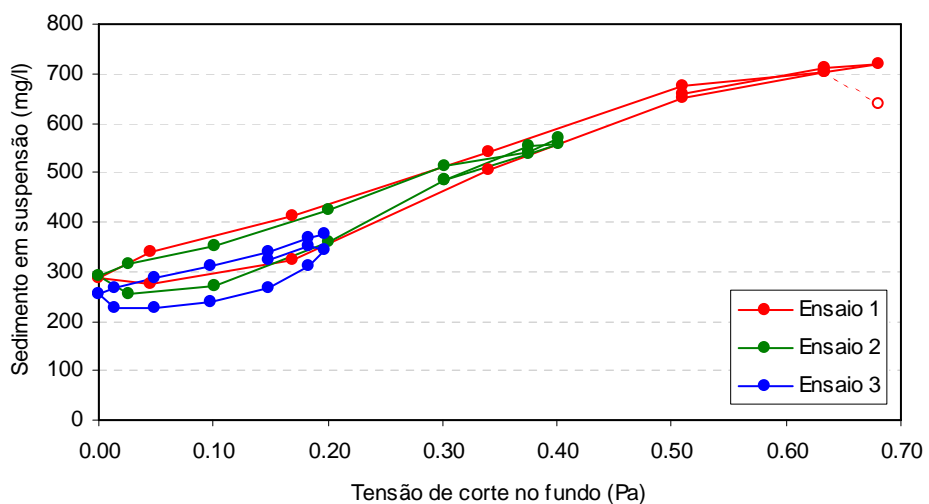


Figura A.8 – Variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo. Ensaios 1, 2 e 3.

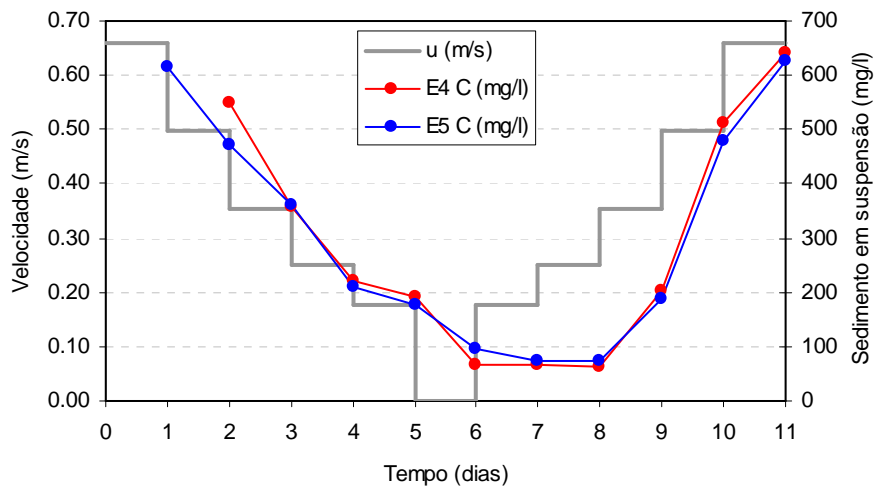


Figura A.9 – Variação da concentração de sedimento em suspensão nos ensaios de longa duração. Ensaios 4 e 5: velocidade máxima 0,66 m/s.

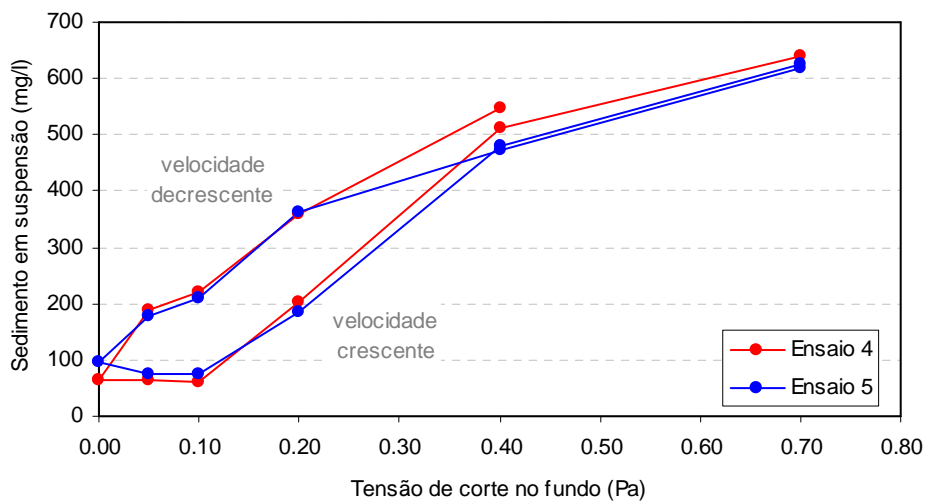


Figura A.10 – Variação da concentração de sedimento em suspensão em função da tensão de corte no fundo. Ensaios 4 e 5.



## **CANAL ANULAR**

### **Deposição e Erosão de Sedimentos do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro**

#### **ANEXO II: QUADROS**





**Quadro A.I: Resultados do Ensaio 1** / Data: 20 Setembro 2010 / Velocidade máxima estimada: 0,65 m/s /  
Velocidade antes do início do ensaio: 0 m/s / Salinidade: 0‰

$t_{inic}$ (min)	$u_{av,b}$ (m/s)	$\tau$ (Pa)	$t_{amost}$ (min)	Amostra	Volume (l)	$C$ (g/l)
0	0,65	0,68	30	1	0,415	(0,640)
30	0,63	0,63	60	2	0,422	0,702
60	0,56	0,51	90	3	0,436	0,674
90	0,46	0,34	120	4	0,467	0,540
120	0,33	0,17	150	5	0,445	0,412
150	0,17	0,05	180	6	0,466	0,341
180	0,00	0,00	210	7	0,428	0,287
210	0,17	0,05	240	8	0,423	0,274
240	0,33	0,17	270	9	0,425	0,322
270	0,46	0,34	300	10	0,423	0,505
300	0,56	0,51	330	11	0,420	0,648
330	0,63	0,63	360	12	0,423	0,703
360	0,65	0,68	390	13	0,407	0,718
390	0,63	0,63	420	14	0,431	0,712
420	0,56	0,51	450	15	0,428	0,660

Notas:  $t_{inic}$  - instante de tempo inicial;  $u_{av,b}$  - velocidade média do escoamento;  $\tau$  - tensão de corte no fundo;  $t_{amost}$  - instante de colheita de amostra;  $C$  - concentração de sedimento em suspensão. Devido à presença de instrumentos no canal, a amostra 1 não é representativa de condições normais.

**Quadro A.II: Resultados do Ensaio 2** / Data: 21 Setembro 2010 / Velocidade máxima estimada: 0,50 m/s /  
Velocidade antes do início do ensaio: 0,56 m/s / Salinidade: 0‰

$t_{inic}$ (min)	$u_{av,b}$ (m/s)	$\tau$ (Pa)	$t_{amost}$ (min)	Amostra	Volume (l)	$C$ (g/l)
0	0,50	0,40	30	1	0,200	0,569
30	0,48	0,38	60	2	0,200	0,542
60	0,43	0,30	90	3	0,200	0,513
90	0,35	0,20	120	4	0,200	0,425
120	0,25	0,10	150	5	0,200	0,351
150	0,13	0,03	180	6	0,200	0,316
180	0,00	0,00	210	7	0,200	0,291
210	0,13	0,03	240	8	0,200	0,253
240	0,25	0,10	270	9	0,200	0,271
270	0,35	0,20	300	10	0,200	0,361
300	0,43	0,30	330	11	0,200	0,486
330	0,48	0,38	360	12	0,200	0,536
360	0,50	0,40	390	13	0,200	0,557
390	0,48	0,38	420	14	0,200	0,552
420	0,43	0,30	450	15	0,200	0,484

Nota:  $t_{inic}$  - instante de tempo inicial;  $u_{av,b}$  - velocidade média do escoamento;  $\tau$  - tensão de corte no fundo;  $t_{amost}$  - instante de colheita de amostra;  $C$  - concentração de sedimento em suspensão.

**Quadro A.III: Resultados do Ensaio 3** / Data: 22 Setembro 2010 / Velocidade máxima estimada: 0,35 m/s /

Velocidade antes do início do ensaio: 0,43 m/s / Salinidade: 0‰

$t_{inic}$ (min)	$u_{av,b}$ (m/s)	$\tau$ (Pa)	$t_{amost}$ (min)	Amostra	Volume (l)	$C$ (g/l)
0	0,35	0,20	30	1	0,200	0,375
30	0,34	0,18	60	2	0,200	0,367
60	0,30	0,15	90	3	0,200	0,340
90	0,25	0,10	120	4	0,200	0,313
120	0,18	0,05	150	5	0,200	0,287
150	0,09	0,01	180	6	0,200	0,266
180	0,00	0,00	210	7	0,200	0,254
210	0,09	0,01	240	8	0,200	0,226
240	0,18	0,05	270	9	0,200	0,228
270	0,25	0,10	300	10	0,200	0,239
300	0,30	0,15	330	11	0,200	0,268
330	0,34	0,18	360	12	0,200	0,313
360	0,35	0,20	390	13	0,200	0,344
390	0,34	0,18	420	14	0,200	0,353
420	0,30	0,15	450	15	0,200	0,324

Nota:  $t_{inic}$  - instante de tempo inicial;  $u_{av,b}$  - velocidade média do escoamento;  $\tau$  - tensão de corte no fundo;  $t_{amost}$  - instante de colheita de amostra;  $C$  - concentração de sedimento em suspensão.

**Quadro A.IV: Resultados do Ensaio 4** / Data: 23 Setembro 2010 (dia 1) a 4 Outubro 2010 (dia 11) /

Velocidade máxima estimada: 0,66 m/s / Salinidade: 0‰

$t_{inic}$ (dia)	$u_{av,b}$ (m/s)	$\tau$ (Pa)	$t_{amost}$ (dia)	Amostra	Volume (l)	$C$ (g/l)
0	0,66	0,70	1	1	0,387	-
1	0,50	0,40	2	2	0,441	0,549
2	0,35	0,20	3	3	0,434	0,359
3	0,25	0,10	4	4	0,427	0,220
4	0,18	0,05	5	5	0,418	0,190
5	0,00	0,00	6	6	0,445	0,066
6	0,18	0,05	7	7	0,444	0,066
7	0,25	0,10	8	8	0,438	0,061
8	0,35	0,20	9	9	0,415	0,203
9 (10)	0,50	0,40	10 (11)	10	0,437	0,512
10 (11)	0,66	0,70	11 (12)	11	0,425	0,640

Notas:  $t_{inic}$  - instante de tempo inicial;  $u_{av,b}$  - velocidade média do escoamento;  $\tau$  - tensão de corte no fundo;  $t_{amost}$  - instante de colheita de amostra;  $C$  - concentração de sedimento em suspensão. Verificou-se um resultado de concentração anómalo na amostra 1, tendo esse resultado sido excluído. A 2 de Outubro não foi colhida amostra, por motivo de falha de electricidade; o ensaio foi reiniciado com as condições de velocidade previamente fixadas e a amostra foi colhida 24 horas depois.

**Quadro A.V: Resultados do Ensaio 5** / Data: 5 Outubro 2010 (dia 1) a 15 Outubro 2010 (dia 11) /

Velocidade máxima estimada: 0,66 m/s / Salinidade: 0‰

$t_{inic}$ (dia)	$u_{av,b}$ (m/s)	$\tau$ (Pa)	$t_{amost}$ (dia)	Amostra	Volume (l)	$C$ (g/l)
0	0,66	0,70	1	1	0,442	0,617
1	0,50	0,40	2	2	0,521	0,471
2	0,35	0,20	3	3	0,440	0,363
3	0,25	0,10	4	4	0,440	0,210
4	0,18	0,05	5	5	0,453	0,178
5	0,00	0,00	6	6	0,432	0,097
6	0,18	0,05	7	7	0,454	0,075
7	0,25	0,10	8	8	0,460	0,074
8	0,35	0,20	9	9	0,460	0,187
9	0,50	0,40	10	10	0,465	0,479
10	0,66	0,70	11	11	0,456	0,626

Nota:  $t_{inic}$  - instante de tempo inicial;  $u_{av,b}$  - velocidade média do escoamento;  $\tau$  - tensão de corte no fundo;  $t_{amost}$  - instante de colheita de amostra;  $C$  - concentração de sedimento em suspensão.

