



Revista de Gestão Costeira Integrada -  
Journal of Integrated Coastal Zone  
Management

E-ISSN: 1646-8872

rgci.editor@gmail.com

Associação Portuguesa dos Recursos  
Hídricos

Costa, S.; Coelho, C.

Concentração da matéria particulada em suspensão na estimativa da velocidade de  
queda de sedimentos coesivos

Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management,  
vol. 11, núm. 2, 2011, pp. 171-185  
Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos  
Lisboa, Portugal

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340133003>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

## Concentração da matéria particulada em suspensão na estimativa da velocidade de queda de sedimentos coesivos \*

*Suspended sediment concentration importance on cohesive sediment settling velocity*

S. Costa <sup>@,1</sup>, C. Coelho <sup>1</sup>

### RESUMO

A velocidade de queda é um parâmetro fundamental na modelação do transporte de sedimentos coesivos em ambientes costeiros, pois o seu valor afecta a estimativa da distribuição das taxas de erosão e deposição. A adopção de um valor adequado em modelos numéricos revela-se de extrema importância, na estimativa de balanços sedimentares fiáveis, podendo conduzir a variações importantes nos resultados. A concentração de sedimentos em suspensão é um dos factores com maior influência na velocidade de queda. Deste modo, em função da concentração de sedimentos em suspensão, podem definir-se três regimes de comportamento da velocidade de queda.

As formulações empíricas resultam do ajuste dos resultados obtidos em ensaios experimentais e permitem a determinação da velocidade de queda, sem recurso a medições *in situ*. Este trabalho reúne e analisa o comportamento de diferentes formulações para a determinação da velocidade de queda nos diferentes regimes de queda, bem como a sensibilidade dos resultados face aos parâmetros intervenientes. Os resultados obtidos revelaram que, para as mesmas condições de escoamento e gama de valores de concentrações, o valor da velocidade de queda apresenta grandes variações em função da formulação aplicada. O trabalho pretende ser um contributo na aplicação das formulações mais adequadas ao cálculo da velocidade de queda em ambientes costeiros. As formulações foram ainda aplicadas ao caso específico da Ria de Aveiro. Os valores obtidos foram comparados com os valores presentes na literatura e aplicados em modelos numéricos.

**Palavras-chave:** Velocidade de queda, Sedimentos coesivos, Concentração de sedimentos em suspensão, Regime de escoamento.

### ABSTRACT

*Settling velocity is an important parameter in cohesive sediments transport modelling in coastal environments, and its value is necessary to estimate erosion and deposition rates. The use of an appropriate value in numerical models is important for the reliable estimation of sediment transport rates. So, it should be considered carefully, because it can lead to significant variations in results. Suspended sediment concentration is one of the factors that most influence the settling velocity. Thus, depending on the concentration of suspended sediments, three settling velocity regimes can be defined.*

<sup>@</sup> - Autor correspondente / corresponding author: Sandra Costa <smcosta@mail.ua.pt>

1 - Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro, Portugal.

\* Submissão: 30 Julho 2010; Avaliação: 14 Setembro 2010; Recepção da versão revista: 14 Dezembro 2010; Aceitação: 10 Março 2011; Disponibilização on-line: 7 Abril 2011

*Empirical formulations have resulted from the adjustment of the obtained results in experimental studies and allow the determination of the settling velocity without in situ measurements. This work gathers different formulations to determine settling velocity in the different settling regimes and analyse its behaviour and the results' sensitivity to the variation of the involved parameters. The results showed that, for the same flow conditions and range of sediments concentrations, the settling velocity varies widely depending on the applied formulation. The work intends to contribute to the guidance of the use of most appropriate formulations in the estimation of the settling velocity at coastal environments. The formulations were also applied to the case of Ria de Aveiro. The results were compared to the values from the literature and currently applied in numerical models.*

**Keywords:** Settling velocity, Cohesive sediments, Suspended sediment concentration, Flow regime.

## 1. INTRODUÇÃO

A velocidade de queda é um parâmetro fundamental na descrição do transporte vertical dos sedimentos coesivos (Manning & Dyer, 2007). Uma melhoria nos métodos de aferição da velocidade de queda permite aumentar a fiabilidade e capacidade de estimativa dos modelos morfodinâmicos, amplamente usados no apoio à tomada de decisão no âmbito da gestão costeira. A sua quantificação é de extrema importância em várias temáticas relacionadas com a gestão das zonas costeiras nomeadamente, estudos ecológicos, obras de engenharia, qualidade da água e estimativa das taxas de erosão e deposição a curto e longo prazo.

A velocidade de queda corresponde à velocidade constante a que uma partícula cai através de um fluido em repouso, quando a resistência do fluido iguala a força de gravidade que actua na partícula (Mantovanelli & Ridd, 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. E tem de ser tratada do ponto de vista macroscópico, e considerada a sua dependência dos processos de floculação (Metha *et al.*, 1989). A velocidade de queda dos sedimentos coesivos depende das propriedades das partículas (textura da superfície, densidade, forma, esfericidade, estrutura, tamanho e conteúdo orgânico), das propriedades do fluido (densidade, viscosidade e salinidade), dos níveis de turbulência do escoamento e da matéria particulada em suspensão (You, 2004; Mantovanelli & Ridd, 2006; Cuthbertson *et al.*, 2008).

Para a determinação da velocidade de queda existem quatro possíveis procedimentos: (i) testes em coluna de deposição, (ii) testes em canais, em laboratório, (iii) uso de tubos *in situ* e (iv) comparação dos perfis de concentração dos sedimentos em suspensão com previsões analíticas (US Army Corps, 1991). No entanto, sempre que possível a velocidade deve ser medida *in situ* devido ao facto: (i) dos sedimentos coesivos serem uma combinação de partículas orgânicas e inorgânicas com microrganismos, (ii) dos agregados poderem facilmente quebrar ou serem destruídos durante a recolha das amostras, e (iii) da velocidade real ser bastante diferente da teórica, estimada para partículas esféricas inorgânicas (Mantovanelli & Ridd, 2008). Mantovanelli & Ridd (2006) mostraram que o tamanho das partículas e a respectiva velocidade de queda quando medidos em laboratório, podem apresentar uma ordem de 1 a 2 vezes menor, comparativamente aos valores medidos *in situ*.

A velocidade de queda foi analisada por vários autores, bem como a influência de outras variáveis. Estas análises

basearam-se em ensaios laboratoriais (Curran *et al.*, 2003; Maa & Kwon, 2007; Sanchez, 2005; You, 2004) e medições *in situ* (Shi *et al.*, 2003; Pejrup & Edelvang, 2003; Pejrup & Mikkelsen, 2010; van Wijngaarden & Roberti, 2007), das quais resultaram algoritmos que permitem a estimativa da velocidade de queda.

Este trabalho pretende agrupar diversas metodologias de estimativa da velocidade de queda existentes na literatura em função da concentração de sedimentos, para os diferentes regimes de queda. Pretende-se contribuir para a aferição da adequabilidade das metodologias a cada caso de estudo. O trabalho encontra-se estruturado em diversas secções, onde numa primeira parte são apresentadas várias formulações. Numa segunda secção é analisado o comportamento e a evolução da velocidade de queda para cada formulação, face à variação da concentração de partículas em suspensão. E ainda o impacto dos vários parâmetros intervenientes nos resultados obtidos. Por fim, foi analisado o caso específico da Ria de Aveiro, face aos valores observados para a concentração de sedimentos em suspensão.

## 2. VELOCIDADE DE QUEDA

### 2.1 Valores típicos

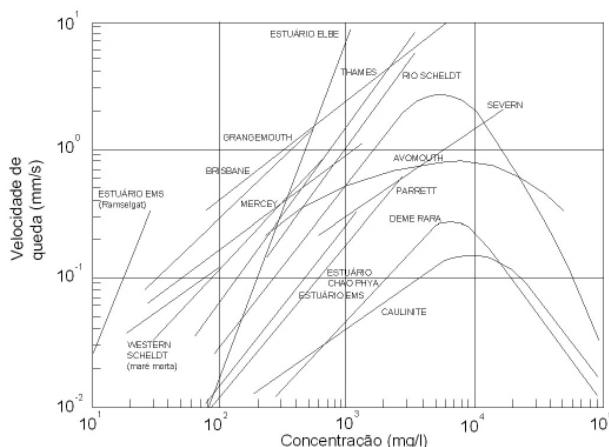
Na literatura encontram-se vários valores para a velocidade de queda de sedimentos coesivos em ambientes costeiros e estuarinos. Esses valores resultam de trabalhos experimentais realizados por diversos autores, por todo o mundo. Os intervalos de valores apresentados na Tabela 1 foram determinados com diferentes metodologias, e para diferentes tipos de sedimentos e condições de escoamento. Podem ainda referir-se outros autores como Portela (1997), que indica o intervalo de 0,01 a 10 mm/s. Para um intervalo de concentrações de 10 a 1000 mg/l, Mantovanelli & Ridd (2006) apresentam a gama de velocidades de 0,0001 a 10 mm/s. Shrestha & Blumberg (2005) indicam para estuários e zonas costeiras o intervalo de 0,0001 a 1 mm/s. van Rijn (1993) e van Leusen (1999) elaboraram gráficos com a relação da velocidade de queda medida *in situ* em função da concentração de sedimentos em suspensão (Figura 1).

### 2.2 Formulações numéricas

A dependência da velocidade de queda da concentração de sedimentos em suspensão pode ser dividida em três regimes diferentes, designados na literatura anglo-saxónica por *free*, *enhanced* e *hindered settling*. No regime *free settling*,

**Tabela 1.** Velocidade de queda ( $w$ ) em alguns estuários e baías (Shi *et al.*, 2003).**Table 1.** Settling velocity ( $w$ ) in some estuaries and bays (Shi *et al.*, 2003).

Referência	Localização	Método	$w$ (mm/s)
Plus <i>et al.</i> (1998)	Estuários Elbe e Weser, Alemanha	Tubos Owen, <i>in situ</i>	0,01-3,50
Van Leussen and 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 dos sedimentos	0,04
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	Fitting method	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

**Figura 1.** Velocidade de queda em função da concentração de sedimentos em suspensão (adaptado de van Leussen, 1999 e van Rijn, 1993).**Figure 1.** Influence of suspended sediment concentration on the settling velocity (adapted from van Leussen, 1999 and van Rijn, 1993).

o qual corresponde a baixas concentrações de sedimentos em suspensão, a velocidade de queda é independente da concentração de partículas no meio líquido. No entanto, se existir um aumento da concentração de sedimentos, inicia-se o regime *enhanced settling*, onde a velocidade de queda aumenta de forma não linear com a concentração de sedimentos em suspensão, até atingir um limite crítico. O aumento da velocidade de queda no regime *enhanced settling* dá-se pelo aumento das partículas em suspensão, as quais tendem a agrupar-se em unidades maiores, os flóculos. O limite crítico corresponde ao início do regime *hindered settling*, em que a velocidade de queda diminui devido às várias interações entre os flóculos e, entre estes e o fluxo vertical induzido (You, 2004).

O intervalo de concentrações que caracteriza os limites dos três regimes, com diferentes comportamentos de velocidade de queda varia de estudo para estudo (Tabela 2).

### 2.2.1 Free settling

A velocidade de queda no regime *free settling* pode ser determinada pela lei de Stokes. A equação de Stokes surge pelo equilíbrio de forças de uma partícula esférica de diâmetro  $d$  e densidade  $\rho$  que cai num fluido de densidade  $\rho'$ :

$$w = \left[ \frac{4g(\rho - \rho')d}{3C_q\rho'} \right]^{1/2} \quad (1)$$

Em que  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m s^{-2}$ ) e  $C_q$  é função do número de Reynolds, dado pela equação (2):

$$Re = \frac{wd}{\nu} \quad (2)$$

De acordo com as seguintes relações:

$$Re < 1: C_q = \frac{24}{Re}$$

$$1 < Re < 50: C_q = \frac{24}{Re^{3/4}}$$

$$50 < Re < 1600: C_q = \frac{4,7}{Re^{1/3}}$$

$$1600 < Re < 10^5: C_q \equiv 0,40$$

**Tabela 2.** Concentrações de sedimentos em suspensão para cada regime.**Table 2.** Suspended sediment concentration in each regime.

Autor	Free settling	Enhanced settling	Hindered settling
Dyer (1986)	-	-	>1,0 g/l
Metha (1993)	0,1-0,3 g/l	0,3-10 g/l	>10 g/l
Nicholson & O'Connor (1986)	-	-	>25,0 g/l
Ross & Metha (1989)	<0,4 g/l	0,4-2,0 g/l	>2,0 g/l
Sanchez (2005)	-	-	3,0-15,0 g/l
Shrestha (1996)	<0,3 g/l	0,3-10 g/l	>10 g/l
You (2004)	<0,3 g/l	0,3-4,3 g/l	>4,3 g/l
van Rijn (1993)	-	0,1-10 g/l	-

Assim, para  $Re < 1$  considerando a equação (1), temos para a velocidade de queda a equação (3):

$$w = \frac{1}{18} \frac{g}{v} \frac{\rho - \rho'}{\rho'} d^2 \quad (3)$$

Apesar desta equação ser válida para escoamentos com  $Re < 1$ , tem sido aplicada de forma bem sucedida em vários estudos, na determinação da velocidade de queda de sedimentos coesivos, mesmo quando não se verificam as condições de validade (Van der Lee, 2000; Liu *et al.*, 2002).

### 2.2.2 Enhanced settling

Estudos realizados por diversos autores verificaram que, a variação da velocidade de queda ( $w$ ) com a concentração ( $C$ ) no regime *enhanced settling*, pode ser descrita na forma da equação 4.

$$w = KC^m \quad (4)$$

$K$  e  $m$  são factores empíricos que dependem do tipo de sedimento, da turbulência do escoamento e salinidade, sendo propostos vários valores de acordo com a Tabela 3. Quando não existe flocação ou esta é muito débil,  $m$  toma um valor igual a 0. Nestes casos a velocidade de queda é constante, o que constitui um caso particular. van Leussen (1988) sugere que o valor de  $m$  pode variar entre 1,1 e 2,07. Por outro lado, van Leussen (1999) sugere o intervalo de 0,5 a 3,6 e, van Rijn (1993) o intervalo de 1 a 2, para concentrações no intervalo entre 0,1 e 10 g/l. Para outros autores,  $m$  varia entre 0,6 e 3,6, dependendo das partículas/características dos flóculos (Mantovanelli & Ridd, 2008).

O facto de existirem valores distintos para as constantes está relacionado com as condições dos ensaios, em que os algoritmos foram estabelecidos, bem como o tipo de sedimentos ensaiados. Krone (1962) estabeleceu a formulação tendo como base os resultados obtidos na

medição da velocidade de queda, dos sedimentos da baía de São Francisco, em tubos em repouso e num canal anular. Nicholson & O'Connor (1986) traduziu num algoritmo os resultados laboratoriais obtidos para os sedimentos do estuário de Severn.

### 2.2.3 Hindered settling

O regime *hindered settling* ocorre para altas concentrações de sedimentos em suspensão, sendo a determinação da velocidade de queda baseada sobretudo na observação visual. No entanto, existem formulações empíricas para a estimativa da velocidade de queda, como é o caso das formulações de Nicholson & O'Connor (1986) e de Burban *et al.* (1990) (Tabela 4). Na formulação de Nicholson & O'Connor (1986) a velocidade de queda é dependente da concentração, diminuindo com o aumento da quantidade de sedimentos em suspensão. Já a proposta de Burban *et al.* (1990) a velocidade depende da dimensão das partículas, e só indirectamente da concentração de sedimentos em suspensão.

## 3. ANÁLISE PARAMÉTRICA

Neste capítulo é analisado o comportamento das formulações e a sensibilidade dos parâmetros intervenientes, na estimativa da velocidade de queda. Para a avaliação do comportamento da velocidade de queda para as diferentes formulações, foram definidos intervalos de concentração de sedimentos em suspensão para os três regimes em estudo. Estes intervalos foram estabelecidos considerando a gama de valores observáveis em ambientes costeiros (Tabela 2):

- 0,1-0,4 g/l para o regime *free settling*;
- 0,4-10 g/l para o regime *enhanced settling*;
- 10-30 g/l para o regime *hindered settling*.

### 3.1 Free settling

No regime *free settling* a velocidade de queda foi determinada recorrendo à lei de Stokes, sendo independente da concentração de sedimentos em suspensão. No entanto, a velocidade depende da

**Tabela 3.** Formulações para a estimativa da velocidade de queda, no regime *enhanced settling*.  
**Table 3.** Formulations to estimate settling velocity in enhanced settling regime.

Autor	K	m	Observações
Krone (1962)	0,001	4/3	$w$ – velocidade de queda (m/s) $C$ – concentração (g/l)
Cole & Miles (1983)	0,001 0,002	1	$w$ – velocidade de queda (m/s) $C$ – concentração (g/l)
Nicholson & O'Connor (1986)	0,006	1	$w$ – velocidade de queda (m/s) $C$ – concentração (g/l) $C$ é limitado a $C_H$ (MPS para hindered settling)
van Leussen (1994)	-	0,5-3,5	$w$ – velocidade de queda (mm/s) $C$ – concentração (mg/l) Factor adicional $\frac{1+aG}{1+bG^2}$ $a, b$ – constantes determinadas experimentalmente $G$ – parâmetro de dissipação ( $s^{-1}$ )

**Tabela 4.** Formulações para a estimativa da velocidade de queda, no regime *hindered settling*.

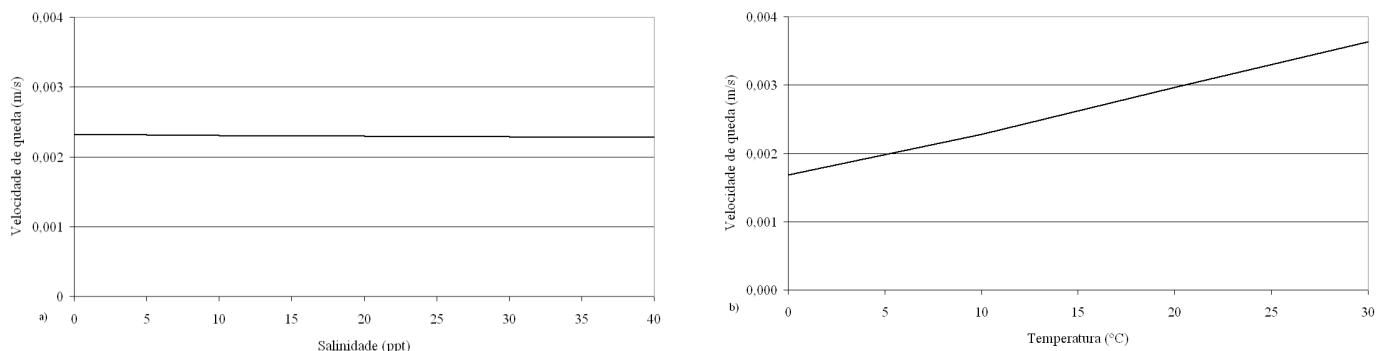
**Table 4.** Formulations to estimate settling velocity in hindered settling regime.

Autor	Equação	Parâmetros
Nicholson & O'Connor (1986)	$w = KC^m [1 - A_2(C - C_H)]^{B_2}, C > C_H$	$w$ – velocidade de queda (m/s) $C$ – concentração (g/l) $C_H$ – concentração para o início de hindered settling $A_2 = 1,0 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{kg}$ $B_2 = 5,0$
Burban <i>et al.</i> (1990), Lick & Lick (1988) e Gailani <i>et al.</i> (1991)	$w = ad_m^b$ $a = B_1(C\tau)^{-0,85}$ $b = -[0,8 + 0,5 \times \log(C\tau - B_2)]$ $d_m = (\frac{\alpha_0}{C\tau})^{1/2}$	$w$ – velocidade de queda (cm/s) $C$ – concentração (g/cm <sup>3</sup> ) $\tau$ – tensão de arrastamento (dyne/cm <sup>2</sup> ) $d_m$ – diâmetro mediano dos flóculos $B_1 = 9,6 \times 10^{-4}, B_2 = 7,5 \times 10^{-6}$ $\alpha_0 = 10^{-8} \text{ g}^2/\text{cm}^3/\text{s}^2$ , constantes determinadas experimentalmente

densidade do fluido (influenciada pela temperatura e salinidade), do diâmetro da partícula (que neste caso se considerou igual a 0,063 mm, correspondente à dimensão máxima dos sedimentos coesivos) e da viscosidade dinâmica da água (Figura 2).

Da análise da Figura 2 verifica-se que a velocidade de queda diminui ligeiramente com o aumento da salinidade, e aumenta de forma mais significativa com o aumento da temperatura. Para uma temperatura de 20 °C, quando a salinidade aumenta de 0 a 35 ppt, a velocidade diminui cerca de 2%. Por outro lado, para uma salinidade de 30 ppt, um aumento de 15 °C na temperatura, provoca um aumento de cerca de 50% na velocidade de queda. Por exemplo, para um estuário onde se verifica uma forte

influência marítima (salinidade=30 ppt) e pouco profundo, em que o gradiente de temperaturas varie entre 15 °C e 25 °C, tem-se a velocidade de queda, de acordo a lei de Stokes, a variar entre 2,80 e 3,60 mm/s. Por outro lado, supondo temperaturas constantes e uma variação da salinidade entre 15 e 30 ppt, por efeito de marés e afluência de água doce, a velocidade apresenta um valor praticamente constante. Ou seja, apesar da salinidade ter um maior impacto que a temperatura na variação da densidade da água, no cálculo da velocidade de queda o impacto da temperatura na viscosidade, é mais relevante que a salinidade. Assim, a variação da temperatura conduz a maiores variações da velocidade de queda, relativamente à salinidade.



**Figura 2.** Velocidade de queda, de acordo com a lei de Stokes. a) Em função da salinidade, para uma temperatura de 20 °C; b) Em função da temperatura, para uma salinidade de 30 ppt.

**Figure 2.** Settling velocity, according to Stokes' law. a) Different salinity (temperature of 20 °C); b) Different temperature (salinity of 30 ppt).

### 3.2 Enhanced settling

No regime *enhanced settling*, a velocidade de queda foi determinada através de quatro formulações: Krone (1962), Cole & Miles (1983), Nicholson & O'Connor (1986) e van Leussen (1994), considerando a expressão 4 e os valores de  $K$  e  $m$  presentes na Tabela 3. No caso da formulação de van Leussen adoptaram-se os valores obtidos no Rio Tamar (Inglaterra):  $a=0,12$ ,  $b=0,02$ ,  $K=0,715$  e  $m=0,202$  (Trento, 2005).

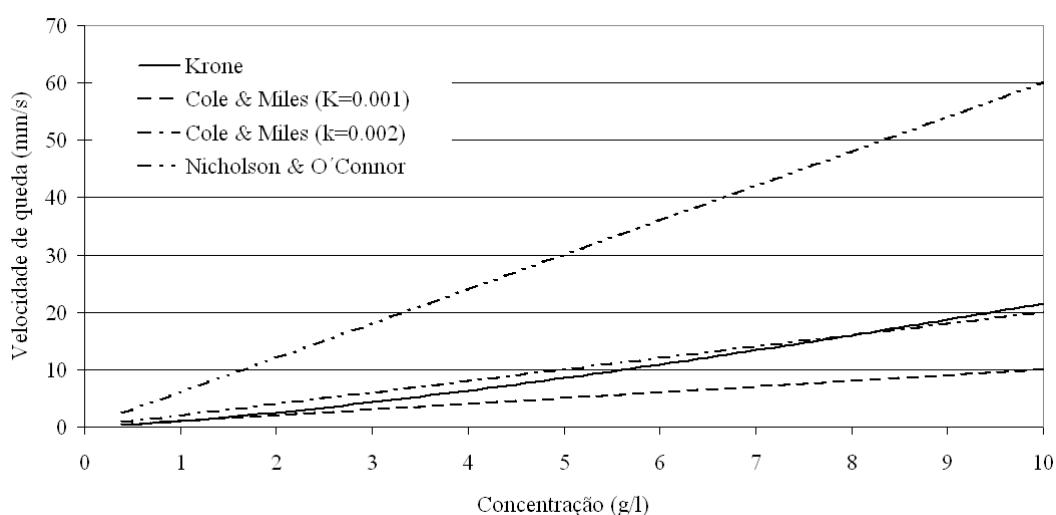
A Figura 3 apresenta os resultados obtidos, para o intervalo de valores de matéria particulada em suspensão de 0,4 a 10 g/l para as diversas formulações, com a excepção da formulação de van Leussen (1994), já que esta considera a turbulência do escoamento, tendo esta formulação sido analisada posteriormente.

Os resultados revelam que a velocidade de queda aumenta com a concentração de sedimentos em suspensão, para

todas as formulações. As formulações de Krone e de Cole & Miles ( $K=0,002$ ) apresentam valores próximos, em que para concentrações até 3 g/l, a formulação de Cole & Miles apresenta valores ligeiramente superiores. A formulação de Nicholson & O'Connor apresenta os maiores valores da velocidade de queda. Pois, o coeficiente  $K$  é superior ao das restantes formulações, tendo sido determinado com base em ensaios laboratoriais, onde se verificaram velocidades de queda na ordem dos 0,08 m/s, para concentrações de 5,5 g/l.

O parâmetro de dissipação ( $G$ ) da formulação de van Leussen está relacionado com a taxa de dissipação de energia cinética da turbulência ( $\varepsilon$ ) e com a viscosidade do fluido ( $\nu$ ), através da equação (5):

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (5)$$



**Figura 3.** Velocidade de queda para as formulações de Krone, Cole & Miles e Nicholson & O'Connor.

**Figure 3.** Settling velocity according to the formulations of Krone, Cole & Miles and Nicholson & O'Connor.

Com o parâmetro de dissipação em  $s^{-1}$ , a taxa de dissipação da energia em  $m^2s^{-3}$  e considerando a viscosidade cinemática da água igual a  $1 \times 10^{-6} m^2s^{-1}$ . Nezu & Nakagawa (1993) propuseram uma relação para a determinação da taxa de dissipação de energia cinética:

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{kh} \frac{1 - \left(\frac{z}{h}\right)}{\left(\frac{z}{h}\right)} \quad (6)$$

Na equação (6),  $u_*$  representa a velocidade de atrito no fundo ( $ms^{-1}$ ),  $k$  é a constante de von Karman (0,40),  $h$  a altura do escoamento (m) e  $z$  a altura da partícula acima do fundo (m). Nos cálculos apresentados considerou-se  $z$  a meio da coluna de água, ou seja igual a  $h/2$ .

A velocidade de atrito foi estimada recorrendo a três formulações distintas: Manning, von Karman-Prandtl e Chézy. A formulação de Manning é dada pela equação:

$$u_* = U \frac{ng^{1/2}}{h^{1/6}} \quad (7)$$

Na equação (7),  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning ( $m^{-1/3}s^1$ ),  $U$  a velocidade vertical média ( $ms^{-1}$ ) e  $g$  a aceleração da gravidade ( $ms^{-2}$ ). A formulação de von Karman-Prandtl é dada pela equação (8):

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (8)$$

Em que  $U$  é a velocidade vertical ( $ms^{-1}$ ) para a altura  $z=0,3h$  (m) e  $z_0$  a rugosidade do fundo (m). Por fim, a lei de Chézy:

$$u_* = C \sqrt{hi} \quad (9)$$

Na equação (9),  $C$  é o coeficiente de Chézy ( $m^{1/2}s^{-1}$ ) e  $i$  a inclinação. O coeficiente de Chézy foi determinado de acordo com a expressão de Bazim:

$$C = \frac{87\sqrt{h}}{\gamma + \sqrt{h}} \quad (10)$$

Em que  $\gamma$  depende da natureza do leito, tendo sido considerado igual a  $1,30 m^{1/2}$  (terra irregular com vegetação). Foram assumidas diferentes condições de escoamento, de acordo com a Tabela 5. As situações seleccionadas tentaram caracterizar situações verificadas em ambiente costeiros.

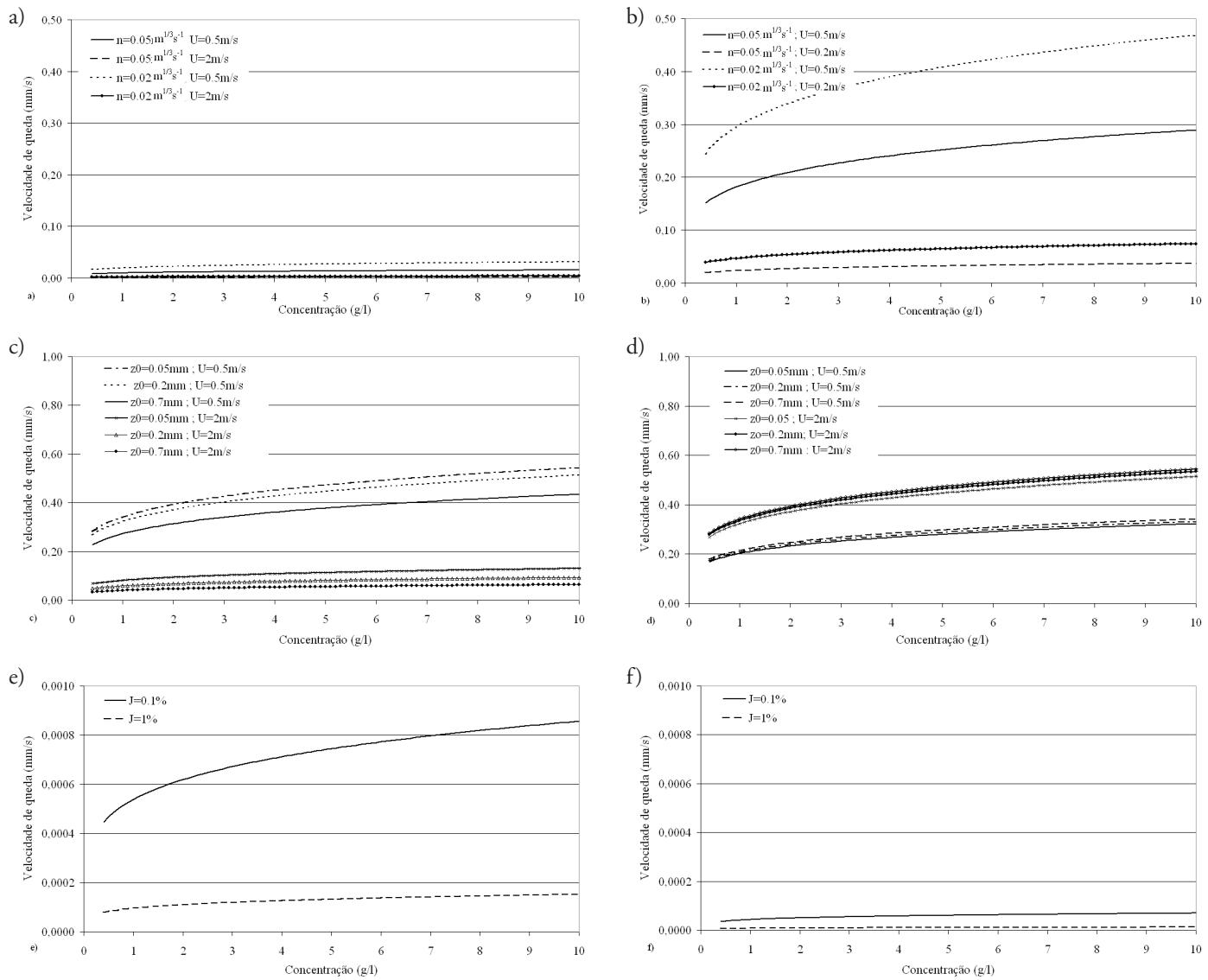
A Figura 4 apresenta os valores obtidos para a velocidade de queda, em função de escoamentos com 0,20 m e 10 m de altura de água, para diferentes rugosidades do fundo, velocidades médias do escoamento e concentração de sedimentos em suspensão.

Independentemente da formulação utilizada na determinação da velocidade de atrito, em ambas as profundidades consideradas, a variação da velocidade de queda revela um padrão de comportamento semelhante. A velocidade de queda varia mais rapidamente, para baixas concentrações de sedimentos em suspensão, e com o aumento da concentração tende para um valor constante.

**Tabela 5.** Situações do escoamento ( $n$ ,  $h$ ,  $U$ ,  $z_0$  e  $J$ ).

**Table 5.** Adopted flow conditions combinations ( $n$ ,  $h$ ,  $U$ ,  $z_0$  e  $J$ ).

Nezu & Rodi			von Karman-Prandtl					Lei de Chézy	
$b$ (m)	$n$ ( $m^{1/3}/s$ )	$U$ (m/s)	$b$ (m)	$z$ (m)	$z_0$ (mm)	$U$ (m/s)	$b$ (m)	$i$ (%)	
0,2	0,05	0,5	0,2	0,06	0,2	0,5	0,2	0,1	
0,2	0,05	2	0,2	0,06	0,7	0,5	10	0,1	
0,2	0,02	0,5	0,2	0,06	0,05	0,5	0,2	1	
0,2	0,02	2	10	3,00	0,2	0,5	10	1	
10	0,05	0,5	10	3,00	0,7	0,5			
10	0,05	2	10	3,00	0,05	0,5			
10	0,02	0,5	0,2	0,06	0,2	2,0			
10	0,02	2	0,2	0,06	0,7	2,0			
			0,2	0,06	0,05	2,0			
			10	3,00	0,2	2,0			
			10	3,00	0,7	2,0			
			10	3,00	0,05	2,0			



**Figura 4.** Velocidade de queda, de acordo com a formulação de van Leussen, dependendo do método de estimativa da velocidade de atrito. a) Manning ( $h=0.2\text{ m}$ ); b) Manning ( $h=10\text{ m}$ ); c) von Karman-Prandlt ( $h=0.2\text{ m}$ ); d) von Karman-Prandlt ( $h=10\text{ m}$ ); e) Chézy ( $h=0.2\text{ m}$ ); f) Chézy ( $h=10\text{ m}$ ).

**Figure 4.** Settling velocity according to van Leussen's formulation, depending on shear velocity estimation method. a) Manning ( $h=0.2\text{ m}$ ); b) Manning ( $h=10\text{ m}$ ); c) von Karman-Prandlt ( $h=0.2\text{ m}$ ); d) von Karman-Prandlt ( $h=10\text{ m}$ ); e) Chézy ( $h=0.2\text{ m}$ ); f) Chézy ( $h=10\text{ m}$ ).

A maior velocidade de queda corresponde a uma profundidade de 10 m, quando se aplica a formulação de Manning no cálculo da velocidade de atrito. Para esta profundidade, a maior velocidade de queda verifica-se para uma menor rugosidade ( $n=0,05\text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ ) e a velocidade do escoamento igual a 0,5 m/s. Nas Figuras 4a e 4b fica evidente que a velocidade de queda aumenta com a profundidade, mas diminui com o aumento da rugosidade e da velocidade do escoamento. As Figuras 4c e 4d representam a variação da velocidade de queda, de acordo com o cálculo da velocidade de atrito pela formulação de von Karman-Prandtl. Para uma altura de escoamento de 0,2 m a maior velocidade de queda ocorre para menor velocidade vertical média e rugosidade do fundo. Por outro lado, para uma altura de escoamento de 10 m verifica-se o inverso, em que a maior velocidade de queda se verifica para a maior velocidade vertical média e

rugosidade do fundo. Nas Figuras 4e e 4f são apresentados os resultados obtidos para a velocidade de queda, utilizando a velocidade de atrito estimada pela lei de Chézy. Neste caso, ao contrário das restantes formulações, a maior velocidade de queda corresponde à menor profundidade ( $h=0,2\text{ m}$ ). Para a mesma profundidade do escoamento, a velocidade de queda aumenta com a diminuição da inclinação. As condições estudadas revelam que a velocidade do escoamento é a variável com maior impacto no valor da velocidade de queda, seguindo-se a rugosidade do fundo e por fim, a altura do escoamento. A aplicação de diferentes formulações na determinação da velocidade de atrito resulta em valores de velocidade de queda distintos, com diferentes ordens de grandeza. No entanto, os resultados estão de acordo com o esperado no regime *enhanced settling*, em que o aumento das partículas na suspensão conduz à sua flocação, pelo

aumento das colisões e consequente aumento da velocidade de queda. A floculação é afectada pela turbulência, sendo que o aumento desta conduz à destruição dos flóculos e consequente redução da velocidade de queda. O aumento da turbulência dá-se com o aumento da velocidade e a diminuição da altura do escoamento e atrito no fundo.

A Figura 5 apresenta os valores médios das situações analisadas, obtidos para as diferentes formulações em regime *enhanced settling*. Verifica-se que as formulações apresentam valores de velocidade de queda com a mesma ordem de grandeza, à excepção da formulação de van Leussen, que apresenta os menores valores. O comportamento das formulações assemelha-se, com a velocidade de queda a aumentar com a concentração de sedimentos em suspensão, com a excepção da formulação de van Leussen, em que a velocidade de queda tende para um valor constante, com o aumento da concentração.

### 3.3 Hindered settling

A velocidade de queda no regime *hindered settling* pode ser estimada pelas formulações propostas por Nicholson & O'Connor (1986) e Burban *et al.* (1990). A Figura 6 apresenta os resultados obtidos, considerando como concentração limite na formulação de Nicholson & O'Connor para o início do regime *hindered settling*, os valores de 10 g/l e de 25 g/l.

As formulações exibem comportamentos distintos, já que os resultados da aplicação da expressão de Burban *et al.* (1990) apresentam uma evolução oposta ao que teoricamente se verifica no regime *hindered settling*, com a velocidade de queda a aumentar com a concentração. Já a formulação de Nicholson & O'Connor (1986) descreve o comportamento estudado (correspondente aos resultados apresentados na Figura 1). A velocidade de queda aumenta até um valor limite

de concentração, correspondente ao início do regime *hindered settling*, a partir do qual decresce. O valor de concentração para o início do regime *hindered settling* é variável, tendo na análise efectuada sido definidos os valores de 10 e de 25 g/l. A velocidade de queda máxima obtida é de 150 mm/s, para um limite de concentração correspondente ao início de *hindered settling* de 25 g/l. Verifica-se que, quanto maior o limite de concentração, maior a velocidade de queda (Figura 6a).

No caso da formulação de Burban *et al.* (1990), a velocidade de queda depende da dimensão da partícula, que por sua vez depende da tensão de arrastamento e da concentração de sedimentos. A concentração de sedimentos em suspensão está relacionada com a tensão de arrastamento. No entanto, não foi considerada a dependência entre estas variáveis na análise efectuada, o que possivelmente influenciou os resultados obtidos, pois apesar de se ter altas tensões de arrastamento, não se alterou os valores das concentrações de sedimentos. Os resultados obtidos revelam que a tensão de arrastamento é determinante no valor da velocidade de queda. Para baixas tensões de arrastamento ( $0,05 \text{ N/m}^2$ ) a velocidade de queda apresenta um valor praticamente constante de 0,15 mm/s. Enquanto que para uma tensão de arrastamento de  $1,20 \text{ N/m}^2$ , a velocidade de queda é significativamente maior, na ordem dos 3,50 mm/s (Figura 6b).

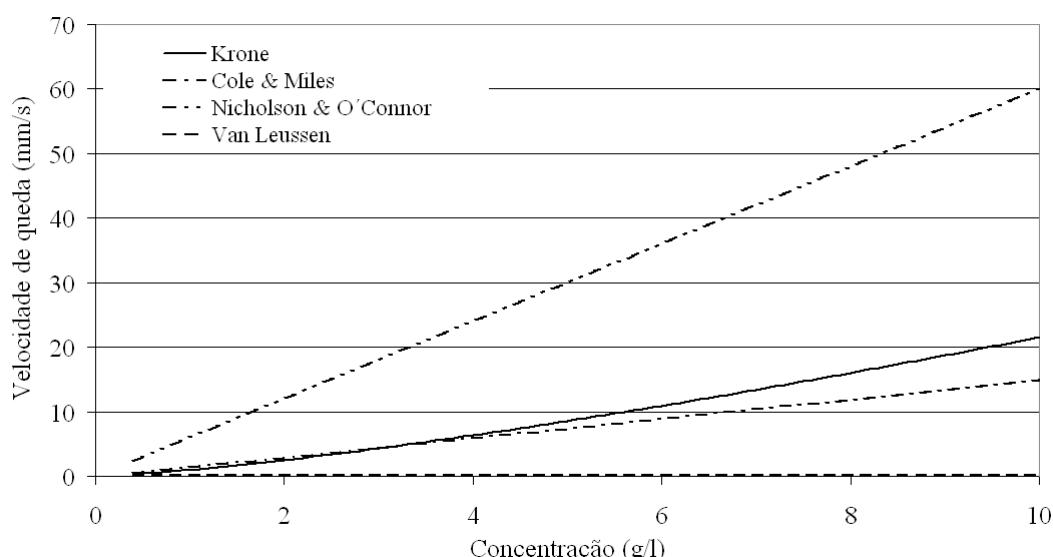
## 4. CASO DE ESTUDO – RIA DE AVEIRO

Nesta secção aplicou-se as formulações apresentadas para a estimativa da velocidade de queda ao caso da Ria de Aveiro, considerando os valores que caracterizam os diversos parâmetros, obtidos em campanhas de campo numa área de estudo.

A Ria de Aveiro localiza-se na costa ocidental portuguesa, possuindo um único canal de ligação ao Oceano Atlântico (embocadura) e ocupando uma área de cerca de  $83 \text{ km}^2$

**Figura 5.** Velocidade de queda, de acordo com Krone, Cole & Miles, Nicholson & O'Connor e van Leussen.

**Figure 5.** Settling velocity according to the formulations of Krone, Cole & Miles, Nicholson & O'Connor and van Leussen.

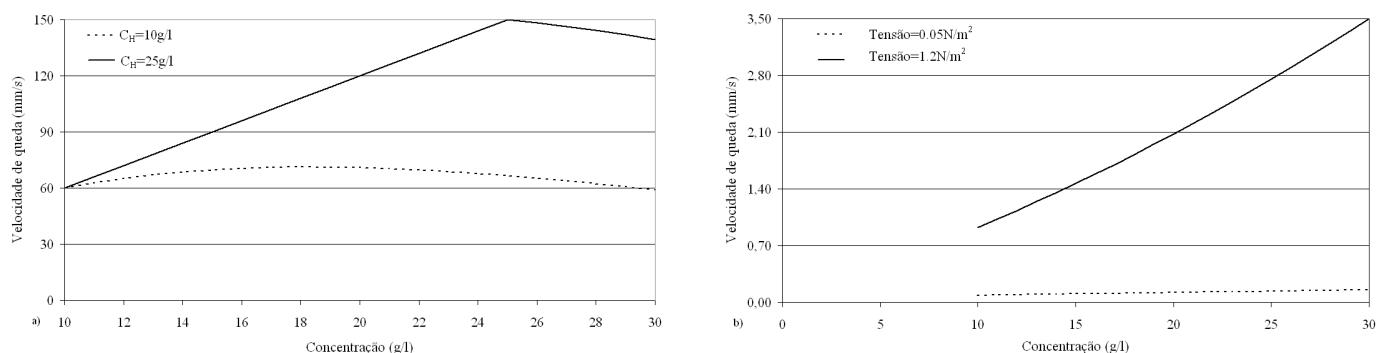


em situação de preia-mar (Figura 7). Esta apresenta uma geometria irregular, caracterizada por canais estreitos e extensa área entre-marés (Picado *et al.*, 2009). Relativamente à hidrodinâmica, a maré é semidiurna, com uma pequena componente diurna, verificando-se também a ocorrência de marés quinzenais. A influência da amplitude da maré vai diminuindo com o aumento da distância à embocadura. Deste modo, nos canais mais afastados da embocadura, a amplitude da maré é menor, e a sua fase apresenta valores mais elevados (Dias *et al.*, 1999). A amplitude da maré tem sofrido profundas alterações ao longo dos anos. Medições da velocidade da corrente realizadas no Canal de São Jacinto e Espinheiro, onde se verificam as maiores velocidades (excluindo o canal da embocadura), indicam que esta é da ordem dos 2 m/s (Lopes & Dias, 2007).

#### 4.1 Metodologia e instrumentação

No âmbito do projecto MURANO, foram realizadas campanhas de amostragem numa zona específica da Ria (área de estudo assinalada na Figura 7), em situação de marés mortas (2 de Julho de 2009) e de marés vivas (9 de Julho de 2009). Nestas campanhas foram recolhidas amostras de água, com recurso a uma garrafa de *Von Dorn* horizontal, no Esteiro dos Frades (Figura 8). Estas amostras foram recolhidas junto à superfície e próximo do fundo, a cada hora, para monitorização da variação da concentração de sedimentos e salinidade da água ao longo do ciclo de maré.

A concentração de sedimentos foi determinada por método gravimétrico, sendo as amostras de água filtradas com membranas de 0,45 µm, e posteriormente secas e pesadas (Portela & Freire, 2009). A salinidade foi determinada com recurso a um condutivímetro WTW LF -196, sobre as amostras de água



**Figura 6.** Velocidade de queda no regime *hindered settling*. a) Formulação de Nicholson & O'Connor; b) Formulação de Burban *et al.*

**Figure 6.** Settling velocity in hindered settling regime. a) Nicholson & O'Connor formulation; b) Burban *et al.* formulation.



**Figura 7.** Localização da Ria de Aveiro (Google Earth).

**Figure 7.** Aveiro lagoon location (Google Earth).

recolhidas. A temperatura foi monitorizada em contínuo ao longo do ciclo da maré através de um sensor de pressões Level Troll 500. Também foram recolhidas três amostras de solo do talude do muro da marinha de sal ( $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ ). Dadas as difíceis condições de permanência no local, estas foram recolhidas com recurso a um “amostrador manual”. Após secagem foi realizada a análise granulométrica, sendo a fracção fina (inferior a 0,063 mm) analisada por difracção de raios X. Relativamente ao peso volúmico do solo, este foi determinado de acordo com o procedimento apresentado por Bardet (1997) para solos coesivos. Assim, foi pesada uma amostra de solo ao ar e, esta foi posteriormente envolvida em parafina e pesada novamente ao ar e dentro de água.

#### 4.2 Concentração de sedimentos em suspensão

Na literatura, encontram-se registos de valores medidos para a concentração de sedimentos em suspensão em vários locais da Ria de Aveiro (Tabela 6).

Os valores mínimos, médios e máximos obtidos para a concentração de sedimentos em suspensão, à superfície e junto ao fundo, nas campanhas do MURANO, apresentam-se na Tabela 7. Os valores médios consideram a média dos valores obtidos em cada ponto da coluna de água (superfície e fundo), ao longo do tempo.

Os valores obtidos nas campanhas estão de acordo com a gama de valores apresentada na Tabela 6, e revelam que a quantidade de sedimentos em suspensão é baixa na zona de amostragem, comparativamente a outros estuários. Assim, será de supor a verificação do regime *free settling*, onde a velocidade de queda é independente da concentração de sedimentos em suspensão.

#### 4.3 Velocidade de queda

Como a concentração de sedimentos em suspensão na zona em análise da Ria de Aveiro é baixa, a estimativa da velocidade de queda pode ser efectuada através da lei de Stokes. Para a sua aplicação, consideraram-se os valores médios da salinidade e temperatura da água ao longo do tempo em cada um dos dias das campanhas, permitindo determinar o correspondente peso volúmico e viscosidade dinâmica da água (Tabela 8). A opção pelos valores médios da salinidade e temperatura justifica-se pelo facto destes

parâmetros não apresentarem uma variação significativa ao longo do período de amostragem. Foi ainda determinado a massa volúmica média e o respectivo diâmetro mediano,  $d_{50}$  de cada uma das amostras recolhidas ao nível do talude dos muros. Para ambos os dias e para os três diferentes diâmetros das amostras dos sedimentos, o número de Reynolds obtido é inferior a 1. Os valores obtidos para a velocidade de queda em ambas as campanhas apresentam-se na Tabela 9.

Verifica-se que os valores se encontram dentro da gama de valores observados noutros estuários (Tabela 1). No entanto, os valores apresentados por Lopes *et al.* (2006) indicam valores superiores, na ordem dos 0,0001 e 0,0003 m/s, resultados de um teste de sensibilidade para a Ria de Aveiro para dois tipos de sedimentos finos.

### CONCLUSÕES

Para a estimativa da velocidade de queda em ambientes costeiros e estuarinos existem diversas formulações empíricas, que resultam de resultados obtidos no campo ou em ensaios laboratoriais. Estas permitem a determinação do valor da velocidade de queda das partículas coesivas, sem recurso a medições em laboratório ou *in situ*.

O trabalho apresenta diferentes algoritmos para a estimativa da velocidade de queda, nos diferentes regimes de queda, em função da concentração das partículas em suspensão. Foi analisado o comportamento das diferentes formulações face à variação da concentração de sedimentos em suspensão, e a sensibilidade face às variáveis intervenientes. A análise efectuada revelou que para o regime *free settling*, a velocidade de queda pode ser determinada recorrendo à lei de Stokes. Para o intervalo de valores analisado, a variação da salinidade não altera de forma significativa o valor de velocidade de queda. Por outro lado, a variação da temperatura da água tem um impacto importante no valor da velocidade de queda. Note-se que a lei de Stokes apresenta algumas limitações, mas permite a estimativa de um valor para a velocidade de queda, na impossibilidade da realização de ensaios. Permite ainda aferir sobre alguns aspectos relativos à deposição dos sedimentos, apesar de depender de outras condições do escoamento. Assim, os valores obtidos devem ser encarados com algum cuidado, sendo necessário para validação dos valores obtidos a realização de medições *in situ*, para a melhor compreensão dos processos envolvidos.

**Tabela 6.** Concentração de sedimentos em suspensão em diversos locais na Ria de Aveiro.

**Table 6.** Suspended sediment concentration in several places in Aveiro lagoon.

Autor	Localização	Concentração de sedimentos em suspensão ( $10^{-3}$ g/l)
Silva (1994)	Baía do Laranjo e ligação entre o Canal da Murtosa e o do Espinheiro	4,8 – 43,4
Abrantes (2005)	Canal do Espinheiro e Canal de São Jacinto	13,21 – 23,96
Lopes <i>et al.</i> (2006)	Baía do Laranjo e Canal de Ovar	40 - 160

**Tabela 7.** Concentração de sedimentos em suspensão na área de estudo.**Table 7.** Suspended sediment concentration in the study area.

Campanha	Período de amostragem	Altura	Concentração de sedimentos em suspensão ( $10^{-3}$ g/l)	
			Min.	Max.
2/07/2009	8:00-20:00	Superfície	3,9	
			46,8	
			13,5	
	9:00-21:00	Fundo	5,5	
			44,6	
			16,0	
9/07/2009	9:00-21:00	Superfície	12,5	
			78,5	
			24,0	
	9:00-21:00	Fundo	14,3	
			66,1	
			31,1	

**Tabela 8.** Propriedades da água. na área de estudo.  
**Table 8.** Water properties in the study area.

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

**Tabela 9.** Velocidade de queda dos sedimentos na área de estudo.  
**Table 9.** Settling velocity in the study area.

Amostra	Massa volúmica do solo (kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro mediano $d_{50}$ (mm)	Velocidade de queda (mm/s)	
			Campanha 2/07/09	Campanha 9/07/09
C1		0,014	0,062	0,039
C2	1580	0,012	0,045	0,029
C3		0,014	0,062	0,039

No regime *enhanced settling* verificou-se que a maioria das formulações apresentavam um comportamento semelhante, com a velocidade de queda a aumentar com a concentração. Com excepção da formulação de van Leussen (1994), em que para maiores concentrações de sedimentos a velocidade de queda tende para um valor constante. Os resultados obtidos vão de encontro ao esperado em que a floculação das partículas conduz ao aumento da velocidade de queda. No entanto, elevados níveis de turbulência do escoamento pode levar à desagregação dos flóculos e, consequente diminuição da velocidade de queda. Verificou-se que a diminuição da altura do escoamento e atrito junto ao fundo e o aumento da velocidade média vertical conduzem a maiores níveis de turbulência.

Para o regime *hindered settling*, a formulação de Burban *et al.* (1990) apresenta valores bastante superiores comparativamente com a formulação de Nicholson & O'Connor (1986). No caso da formulação de Nicholson & O'Connor (1986) a velocidade aumenta até um limite de concentração de sedimentos correspondente ao início do regime *hindered settling*, e a partir daí decresce devido ao aumento da quantidade de partículas em suspensão.

Foi analisado o caso específico da Ria de Aveiro, considerando as características do escoamento e dos

sedimentos ao nível dos muros dos canais. O valor da velocidade de queda é baixo, estando de acordo com os valores da concentração de sedimentos em suspensão, também baixos, quando comparados com outros estuários.

A análise efectuada revelou a evidente necessidade de ponderação, na adopção dos valores de velocidade de queda obtidos por formulações empíricas. Algumas das constantes presentes nas formulações foram determinadas para locais específicos, exigindo cuidados aquando da sua aplicação em locais com diferentes características. O comportamento dos sedimentos coesivos em ambientes costeiros é complexo, dependente de uma série de factores e da interacção entre eles. Assim, cada local exige uma caracterização completa das propriedades dos sedimentos e do fluído, e conveniente determinação da variação da concentração de partículas em suspensão. Torna-se também imprescindível a realização de medições *in situ*, para a determinação de um valor para a velocidade de queda mais fiável.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia através do Projecto MURANO – Muros das Marinhais da Sal (PTDC/ECM/65589/2006), sobre o qual este trabalho foi realizado.

**BIBLIOGRAFIA**

- Abrantes, M.I. (2005): *Os sedimentos da margem continental, sector Espinho-Cabo Mondego*. Tese de Doutoramento, 221p., Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. (disponível em <http://biblioteca.sinbad.ua.pt/Teses/2005001690>).
- Bardet, J.P (1997) - *Experimental Soil Mechanics*. 583p., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, Estados Unidos da América. ISBN: 0-13-374935-5.
- Burban, P.Y.; Xu, Y.U.; McNeil, J.; Lick, W. (1990) - Settling speeds of flocs in fresh water and seawater. *Journal of Geophysical Research*, 95(C10):18213-18220. DOI:10.1029/JC095iC10p18213.
- Cole, P.; Miles, G.V. (1983) - Two dimensional Model of Mud Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(1):1-12. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(1).
- Curran, K.J.; Hill, P.S.; Milligan, T.G. (2003): Time variation of floc properties in a settling column. *Journal of Sea Research*, 49(1):1-9. DOI:10.1016/S1385-1101(02)00195-8.
- Cuthbertson, A.; Dong, P.; King, S.; Daves, P. (2008) - Hindered settling velocity of cohesive/non cohesive sediment mixtures. *Coastal Engineering*, 55(12):1197-1208. DOI:10.1016/j.coastaleng.2008.05.001.
- Dias, J.M.; Lopes, J.F.; Dekeyser, I. (1999) - Hydrological Characterisation of Ria de Aveiro, Portugal, In Early Summer. *Oceanologica Acta*, 22(5):473-485. DOI:10.1016/S0399-1784(00)87681-1.
- Dyer, K.R. (1986) - *Coastal and Estuarine sediment dynamics*. 342p., Wyley- Interscience, Nova York, Estados Unidos da América. ISBN: 978-0471908760.
- Gailani, J.; Ziegler, C.K.; Lick, W. (1991) - Transport of Suspended Solids in the Lower Fox River. *Journal of Great Lakes Research*, 17(4):479-494. DOI:10.1016/S0380-1330(91)71384-1.
- Hill, P.S.; Syvinski, J.P.; Cowan, E.A.; Powell, R.D. (1998) - In situ observations of floc settling velocities in Glacier Bay, Alaska. *Marine Geology*, 145(1-2):85-94. DOI:10.1016/S0025-3227(97)00109-6.
- Hill, P.S.; Milligan, T.G.; Geyer, R. (2000) - Controls on effective settling velocity of suspended sediment in the Eel River flood plume. *Continental Shelf Research*, 20:2095-2111. DOI:10.1016/S0278-4343(00)00064-9.
- Krone, R.B. (1962) - *Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes*. 110p., Technical Report, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley, Estados Unidos da América.
- Lick, W.; Lick, J. (1988) - Aggregation and Disaggregation of Fine-Grained Lake Sediments. *Journal of Great Lakes Research*, 14(4):514-523. DOI:10.1016/S0380-1330(88)71583-X.
- Liu, W.-C.; Hsu, M.-H.; Kuo, A. (2002) - Modelling of hydrodynamics and cohesive sediment transport in Tanshui River estuarine system, Taiwan. *Marine Pollution Bulletin*, 44(10):1076-1088. DOI:10.1016/S0025-326X(02)00160-1.
- Lopes, J.F.; Dias, J.M. (2007) - Residual circulation and sediment distribution in the Ria de Aveiro lagoon, Portugal. *Journal of Marine Systems*, 68(3-4):507-528. DOI:10.1016/j.jmarsys.2007.02.005.
- Lopes, J.F.; Dias, J.M.; Dekeyser, I. (2006) - Numerical modelling of cohesive sediments transport in the Ria de Aveiro lagoon. *Journal of Hydrology*, 319(1-4):176-198. DOI:10.1016/j.jhydrol.2005.07.019.
- Maa, J.P.-Y.; Kwon, J.-I. (2007) - Using ADV for cohesive sediment settling velocity measurements. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73(1-2):351-354. DOI:10.1016/j.ecss.2007.01.008.
- Manning, A.; Dyer, K. (2007) - Mass settling flux of fine sediments in Northern European Estuaries: Measurements and predictions. *Marine Geology*, 245(1-4):107-122. DOI:10.1016/j.margeo.2007.07.005.
- Mantovanelli, A.; Ridd, P. (2006) - Devices to measure settling velocity of cohesive sediment aggregates: a review of the in situ technology. *Journal of Sea Research*, 56(3):199-226. DOI:10.1016/j.seares.2006.05.002.
- Mantovanelli, A.; Ridd, P.V. (2008) - SEDVEL: An underwater balance for measuring in situ settling velocities and suspended cohesive sediment concentrations. *Journal of Sea Research*, 60(4):235-245. DOI:10.1016/j.seares.2008.10.001.
- Metha, A.J.; Hayter, E.J.; Parker, W.R.; Krone, R.B.; Teeter, A.M. (1989) - Cohesive Sediment Transport I: Process description. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(8):1076-1093. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:8(1076).
- Nezu, I.; Nakagawa, H. (1993) - *Turbulence in Open-Channel Flows*. 286p., International Association of Hydraulic Research (Monograph), AA Balken, Roterdão, Holanda. ISBN: 9789054101185.
- Nicholson, J.; O'Connor, B.A. (1986) - Cohesive sediment Transport Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(7):621-640. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:7(621).
- Pejrup, M.; Edelvang, K. (2003) - Measurements of in situ settling velocities in the Elbe Estuary. *Journal of Sea Research*, 36(1-2):109-113. DOI:10.1016/S1385-1101(96)90779-0.
- Pejrup, M.; Mikkelsen, O.A. (2010) - Factors controlling the field settling velocity of cohesive sediment in estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(2):177-185. DOI:10.1016/j.ecss.2009.09.028.
- Picado, A.; Dias, J.M.; Fortunato, A.B. (2009) - Effect of flooding the salt pans in the Ria de Aveiro. *Journal of Coastal Research*, SI 56:1395-1399.
- 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. (eds), *Physical Processes in Estuaries*, pp.404-424, Springer, Berlim, Alemanha. ISBN: 0387192662.
- Portela, L. (1997) - Effect of settling velocity on the modelling of suspended sediment transport. In: Acinas, J.R. & Brebbia, C.A. (eds.), *Computer Modelling of Seas and Coastal Regions III*, pp.381-390, Computational Mechanics Publications, Southampton, Reino Unido. ISBN: 1-85312-499-0.
- Portela, L.; Freire, P. (2009) - *Caracterização Hidrodinâmica e Sedimentar do Esteiro dos Frades, Ria de Aveiro*. 28p., Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Processo 0604/14/6549, Lisboa, Portugal. (Não Publicado).

- Ross, M.A. & Metha, A.J. (1989) - On the mechanics of lutoclines and fluid mud. *Journal of Coastal Research*, SI 5:51-61.
- Sanchez, M. (2005) - Settling velocity of the suspended sediment in three high-energy environments. *Ocean Engineering*, 33(5-6):665-678. DOI:10.1016/j.oceaneng.2005.05.009.
- Shi, Z.; Zhou, H.J.; Eittrein, S.L.; Winterwerp, J.C. (2003) - Settling velocities of fine suspended particles in the Changjiang Estuary, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(3):245-251. DOI:10.1016/S1367-9120(03)00067-1.
- Shrestha, P.L.; Blumberg, A.F. (2005) - Cohesive Sediment Transport. In: Schwartz, M.L. (ed.), *Encyclopedia of Coastal Science*, pp.327-330, Springer, Holanda. ISBN: 978-1-4020-1903-6.
- Silva, J.F. (1994) - *Circulação da água na Ria de Aveiro - Contribuição para o estudo da qualidade da água*. Tese de Doutoramento, 158 p., Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Ten Brinke, W.B.M. (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):549-564. DOI:10.1016/S0272-7714(06)80009-0.
- Trento, A.E. (2005) – *Dinâmica da Floculação no Transporte de Sedimentos Finos*. Dissertação de Doutoramento, 170p., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil (disponível em [http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=1294](http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=1294)).
- US Army Corps of Engineers (1991) - *Tidal Hydraulics – Engineer Manual*. 154p., Washington, D.C., Estados Unidos da América.(disponível em <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-1607/toc.htm>).
- Valeur, J.R.; Pejrup, M.; Jensen, A. (1996): Particle dynamics in the Sound between Denmark and Sweden. In: Dally, W.R. & Zeidler, R.B. (eds), *Coastal Dynamics '95, Proceedings of the International Conference on Coastal Research in Terms of Large Scale Experiments*, pp.951-962, Gdańsk, Polónia, American Society of Civil Engineers (ASCE), Nova York, Estados Unidos da América. ISBN: 0-7844-0154-3.
- Van der Lee, W.T. (2000) – Temporal variation of the floc size and settling velocity in the Dollard Estuary. *Continental Shelf Research*, 20(12-13):1495-1511. DOI:10.1016/S0278-4343(00)00034-0.
- van Leussen, W. (1988) - Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs: a review. In: Dronkers, P.J.T. & van Leussen, W. (eds.), *Physical Processes in Estuaries*, pp.405-424, Berlim, Alemanha. ISBN 978-0387192666.
- van Leussen, W. (1994) – *Estuarine Macroflocs and Their Role in Fine-Grained Sediment Transport*. Ph.D. thesis, 488p., Utrecht University, Utrecht, Holanda.
- van Leussen, W. (1999) – The variability of settling velocities of suspended fine-grained sediment in the Ems Estuary. *Journal of Sea Research*, 41(1-2):109-118. DOI:10.1016/S1385-1101(98)00046-X.
- van Leussen, W.; Cornelisse, J.M. (1993): The role of large aggregates in estuarine fine-sediment dynamics. In: Metha, A.J. (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 Rijn, L.C. (1993) – *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. 715p., Aqua Publications, Amesterdão, Holanda. ISBN: 90-800356-2-9.
- van Wijngaarden, M.; Roberti, J.R. (2007) – In situ measurements of the settling velocity and particle size distribution with the LISST-ST. *Proceedings in Marine Sciences*, 5:295-311. DOI:10.1016/S1568-2692(02)80023-7.
- 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.