

EFEITO DA SALINIDADE SOBRE A VELOCIDADE DE QUEDA DE SEDIMENTOS FINOS DA MARINA DO PARQUE DAS NAÇÕES

Susana Ramos^{1,2}, Luís Ivens Portela², António Trigo Teixeira¹

¹Instituto Superior Técnico, DECivil, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa

²Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. Brasil 101, 1700-066 Lisboa

Sumário

A deposição de sedimentos finos, silto-argilosos, numa bacia portuária pode reduzir a sua operacionalidade e, inclusivamente, provocar o seu encerramento, dado que os custos de manutenção associados à realização de dragagens frequentes são elevados. É por isso importante compreender o comportamento dos sedimentos finos ao projectar uma nova bacia portuária ou ao estudar medidas de mitigação numa bacia existente. Um número apreciável de bacias portuárias situa-se em estuários, em locais onde o gradiente de salinidade é significativo. Este factor pode ter influência nas taxas de sedimentação, não apenas devido a efeitos hidrodinâmicos resultantes de diferenças de densidade, mas também devido ao eventual efeito da salinidade sobre a floculação e, conseqüentemente, sobre a velocidade de queda dos sedimentos finos. Pretende-se com este trabalho analisar o efeito da salinidade na velocidade de queda de sedimentos finos colhidos na Marina do Parque das Nações, e verificar se efectivamente se trata de um factor a ter em conta. O estudo da amostra de sedimento colhida na Marina do Parque das Nações foi efectuado com recurso a uma coluna de sedimentação em condições laboratoriais. Realizaram-se cinco ensaios com concentração inicial de sedimento em suspensão constante ($1,5 \text{ g l}^{-1}$) e valores de salinidade diferentes (0, 5, 10, 15 e 30‰). Em cada ensaio, procedeu-se à determinação da concentração de sedimento em suspensão a 10 níveis, simultaneamente, e em 10 instantes de tempo. O cálculo da velocidade de queda foi realizado tendo por base a evolução temporal das concentrações de sedimento em suspensão. Utilizando a velocidade de queda média ponderada pela massa para descrever os fluxos de deposição, estima-se que o seu valor varie entre $0,10 \text{ mm s}^{-1}$ em meio fluvial e $0,65 \text{ mm s}^{-1}$ em meio marinho.

Introdução

Assoreamento de bacias portuárias

Os estuários apresentam frequentemente elevadas concentrações de sedimentos finos em suspensão, transportados por correntes fluviais e de maré. A deposição destes sedimentos apenas se verifica em zonas de correntes reduzidas, relativamente abrigadas da acção das ondas, de que são exemplo os rasos de maré presentes no sector superior de diversos estuários. A deposição também se pode verificar em bacias portuárias, constituindo, neste caso, um problema importante, dado obrigar a dragagens de manutenção dispendiosas para evitar o risco da sua obstrução e inoperacionalidade. Os custos de manutenção são um elemento crítico para a viabilidade económica de um porto.

A sedimentação em bacias portuárias é causada por diversos processos. No que respeita aos processos hidrodinâmicos, pode dever-se à enchente e vazante por efeito da maré; a vórtices formados na bacia, que vão transportar horizontalmente os sedimentos; e a gradientes de densidade, devido à variação da salinidade, que formam correntes de densidade. Na Figura 1 encontram-se representados estes processos.

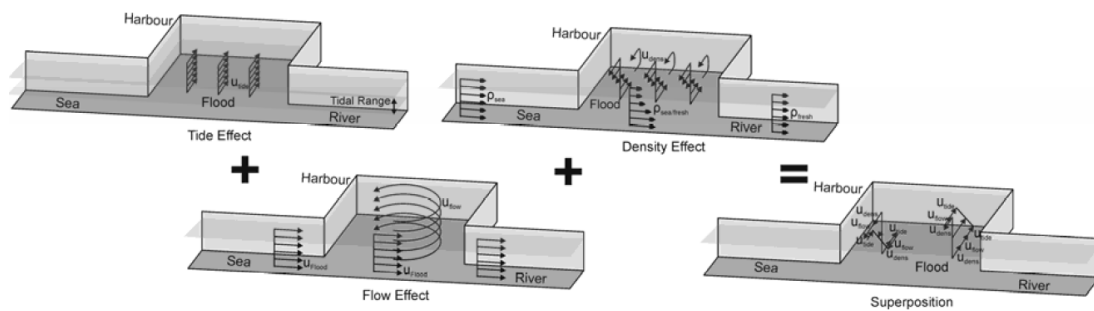


Fig. 1 – Efeitos da variação dos níveis de maré, das correntes e das diferenças de densidade nas trocas de água e sedimento de uma baía portuária (Stoschek, 2007).

O processo de deposição de sedimentos é também determinado pela geometria e pela dimensão da baía, pela orientação da entrada da mesma e pelas características dos sedimentos no estuário.

Durante a fase de projecto, é essencial a previsão de taxas de sedimentação e, se possível, a optimização das condições de transporte sedimentar, nomeadamente através da utilização de modelos numéricos. Numa baía já existente e que apresente problemas de assoreamento, pode recorrer-se a medidas de mitigação:

- Cortinas flutuantes ou cortinas de bolhas de ar, para redução das correntes de densidade. As cortinas flutuantes são constituídas por um flutuador com uma cortina geotêxtil. As cortinas de bolhas de ar resultam de fontes de ar comprimido provenientes de difusores, que se encontram no fundo e à entrada da baía.
- Linhas de colunas ou estacas (*pile rows*), instaladas perpendicularmente à direcção principal do escoamento, ou estruturas de desvio da corrente (*current deflecting walls*), de modo a reduzir a formação de vórtices na baía.
- Instalação de soleiras submersas ou transposição artificial de sedimentos (*by-passing dredging*), para protecção contra o transporte de sedimentos junto ao fundo. Para o bom funcionamento das soleiras, é necessário dragá-las regularmente. A transposição artificial de sedimentos consiste em dragar os sedimentos a montante da baía e repulsá-los a jusante (PIANC, 2004).

Dado que estas medidas de mitigação nem sempre produzem resultados satisfatórios, é importante prevenir os problemas de assoreamento durante a fase de projecto, sendo para isso necessário conhecer as características dos sedimentos.

Propriedades dos sedimentos finos

Os sedimentos coesivos ou lodos existentes em meio estuarino são misturas de argilas (diâmetro equivalente $<2\ \mu\text{m}$), siltes finos ($2\text{-}6\ \mu\text{m}$), siltes médios ($6\text{-}20\ \mu\text{m}$), siltes grosseiros ($20\text{-}63\ \mu\text{m}$) e matéria orgânica de natureza diversa (Costa, 1995). Estes sedimentos apresentam propriedades coesivas devido ao facto de as partículas de menores dimensões, principalmente as de natureza mineralógica argilosa, apresentarem uma área específica suficientemente elevada para que o efeito das forças físico-químicas entre elas seja tão importante quanto o efeito das forças gravíticas.

O processo de floculação é uma consequência da capacidade de as partículas finas se agruparem ou agregarem, produzindo partículas de maiores dimensões. O tamanho destes flocos ou agregados pode ser muito maior do que o das partículas individuais, resultando numa maior velocidade de queda e numa deposição mais rápida dos sedimentos.

Na análise dos processos de floculação, é frequente distinguir colisão, agregação e coesão (Van Leussen, 1988). A colisão entre partículas pode ser causada por três mecanismos: movimento das partículas devido ao efeito browniano, gradientes de velocidade do fluido, e diferentes velocidades de sedimentação das partículas e flocos. A agregação inclui a biofloculação (formação de agregados devido à presença de bactérias, fitoplâncton e polímeros naturais) e a peletização (formação de agregados por organismos filtradores que se alimentam da matéria particulada em suspensão). A coesão deve-se às forças electrostáticas de atracção, fortes a curtas distâncias. A coesão só ocorre quando estas forças são maiores do que as forças de repulsão, sendo o efeito da salinidade potencialmente importante.

Em geral, as partículas de argila apresentam carga negativa. Na água doce, existe uma reduzida concentração de iões positivos. No entanto, com o aumento da salinidade da água, verifica-se um aumento da presença de catiões Na^+ (Van Rijn, 1993). Segundo a Teoria da Dupla Camada, cada partícula de argila está envolvida por uma nuvem de catiões. Quando duas partículas se encontram, têm comportamento repulsivo devido às respectivas nuvens iónicas, que apresentam o mesmo sinal, e atractivo, devido às forças de Van der Waals. Quanto maior a concentração de iões positivos na água, mais comprimida se torna a nuvem de iões positivos a envolver cada partícula. Isto favorece que as forças atractivas se sobreponham às repulsivas, aumentando a floculação das partículas.

Embora a velocidade de queda seja um parâmetro importante nos estudos de sedimentação, a influência da salinidade sobre a floculação e conseqüentemente sobre a velocidade de queda é avaliada de forma muito diversa por diferentes autores (Van Leussen, 1988). Pretende-se com este trabalho estudar o efeito da salinidade sobre a velocidade de queda e verificar se se trata efectivamente de um factor a ter em conta.

Caso de estudo

A Marina do Parque das Nações localiza-se no estuário do Tejo, entre a foz do Trancão e a doca do Poço do Bispo. A salinidade média nesta zona do estuário é de cerca de 30‰, mas varia em função do caudal fluvial e da situação de maré. Trata-se de uma zona onde, na margem, se verifica a deposição de sedimentos finos, que levam à formação de banquetas de lodos de largura variável, visíveis em baixa-mar (Figura 2).

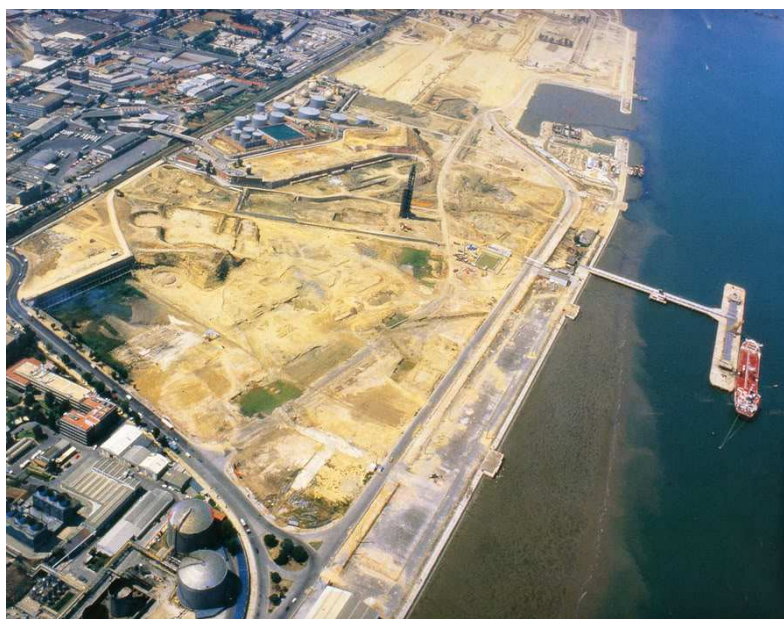


Fig. 2 – Início das obras da EXPO'98 na zona da ponte-cais de Cabo Ruivo. Note-se a presença de uma banquetta de lodos junto à margem do estuário.

As infra-estruturas portuárias existentes no local antes da EXPO'98 eram a doca dos Olivais, construída nos anos 40, e a ponte-cais de Cabo Ruivo, construída nos anos 60. A marina projectada para a EXPO'98 resultou da reconversão da ponte-cais e área vizinha.

Inicialmente, a marina apresentava quebra-mares flutuantes, que, em episódios de agitação, sofreram importantes danos. A quase inexistência de abrigo às correntes e à agitação colocava em risco as embarcações, o que levou a uma primeira reformulação. Nesta reformulação, optou-se por substituir os quebra-mares flutuantes por quebra-mares convencionais de talude em enrocamento. Com a escolha desta solução, ficaram resolvidas as questões relacionadas com as correntes e a agitação. Contudo, a redução das velocidades veio agravar a taxa de envasamento, que anteriormente já era um problema significativo.

Para mitigar este problema, foram analisadas várias intervenções possíveis, tendo acabado por ser escolhida uma solução de comportas. Esta solução permite o encerramento da marina, nomeadamente durante a noite, reabrindo-a para entrada e saída de embarcações quando o nível de maré for semelhante ao que se verificava aquando do encerramento. A taxa de envasamento reduziu bastante, cerca de 60%, sendo que os custos de manutenção da marina associados às dragagens também reduziram significativamente. Contudo, a sedimentação no anteporto mantém-se muito elevada.

Metodologia

Recolha e caracterização da amostra

A amostra de sedimento utilizada no trabalho experimental foi colhida no anteporto da Marina do Parque das Nações, numa zona de acumulação de sedimentos finos, silto-argilosos. Como preparação da amostra para os ensaios, fez-se a sua passagem por um peneiro de 63 μm , de modo a extrair materiais de maiores dimensões, entre os quais algas e folhas. Juntou-se água à amostra para facilitar a peneiração, resultando uma suspensão, utilizada como base para os ensaios, com concentração de 113,3 g l⁻¹.

Para caracterização da amostra, foram realizadas análises mineralógicas, granulométricas e do teor de matéria orgânica.

Tabela 1 – Composição mineralógica (%) da “amostra global” (Silva, 2011).

Compostos cristalinos identificados	Fracção <63 μm
Quartzo	41
Feldspatos	4
Calcite	4
Filossilicatos	51

Tabela 2 – Composição mineralógica (%) da “fracção fina” (Silva, 2011).

Compostos cristalinos identificados	Fracção <2 μm
Quartzo	24
Feldspatos	9
Calcite	5
Caulinite	17
Clorite	5
Mica	24
Esmectite	17

A análise mineralógica por difração de raios X foi realizada no Departamento de Materiais do LNEC, tendo envolvido duas amostras. A primeira, designada amostra global, continha todos os sedimentos de dimensão até 63 µm. A segunda, designada fracção fina, continha apenas a fracção de dimensão inferior a 2 µm. Para a obtenção da segunda amostra, realizou-se uma separação por pipetagem no Instituto Hidrográfico da Marinha. As Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados da análise semi-quantitativa de ambas as amostras (Silva, 2011).

A análise granulométrica por difração laser foi realizada no Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC. Utilizou-se um analisador de partículas Malvern Mastersizer Micro. O tratamento com ultra-sons foi efectuado com uma intensidade de 10 durante 150 s, sendo a velocidade de rotação do misturador 2650 rpm. Obteve-se um diâmetro mediano volumétrico D_{50} de 9,07 µm.

A determinação do teor em matéria orgânica foi realizada pelo método da perda ao rubro (*loss on ignition*), tendo sido estimado um teor de 11%. Porém, é necessário ter em conta que neste método pode haver perda de água estrutural pelos minerais de argila, o que provoca uma sobrestimação do teor em matéria orgânica.

Descrição do equipamento e dos ensaios

Os ensaios para estudar o efeito da salinidade sobre a velocidade de queda foram realizados na coluna de sedimentação do LNEC. A coluna tem cerca de 2,6 m de altura e 0,11 m de diâmetro interno. A suspensão que se pretende analisar é introduzida pela extremidade superior, sendo posteriormente homogeneizada por rotação da coluna. A coluna apresenta 10 válvulas, que fazem a recolha de amostras simultaneamente e que se encontram dispostas a 10 diferentes alturas (0,05, 0,15, 0,30, 0,55, 0,80, 1,05, 1,30, 1,55, 1,80 e 2,05 m).

Foram realizados cinco ensaios com uma concentração inicial de sedimento em suspensão de 1,5 g/l e diferentes valores de salinidade: 0, 5, 10, 15 e 30‰.

Cada ensaio teve a duração de 306 minutos, com 10 instantes de recolha de amostras (0, 1, 6, 16, 36, 66, 106, 156, 216 e 306 min). Terminado cada um dos ensaios, mediu-se o volume de amostra que se encontra em cada recipiente de recolha. Estas amostras foram depois filtradas em filtros de 0,45 µm de porosidade, secadas em estufa a 40°C e pesadas, para determinar a concentração de sedimento.

Resultados e discussão

Concentração de sedimento em suspensão

Os resultados da evolução da concentração de sedimento em suspensão ao longo do tempo em cada um dos ensaios, a 10 diferentes alturas, são apresentados em Ramos (2013). Apesar de alguma dispersão nos primeiros instantes, verifica-se que a concentração apresenta uma distribuição relativamente uniforme na vertical. Assim, traçou-se um gráfico com os valores médios na vertical da concentração ao longo do tempo para os cinco ensaios (Figura 3). Observa-se que os ensaios mantêm a concentração inicial até ao instante $t_3=16$ min, por efeito da turbulência associada à homogeneização inicial da mistura. A partir daí, inicia-se a diminuição das concentrações. Comparando os ensaios, verifica-se que os sedimentos depositam mais rapidamente à medida que aumenta a salinidade.

Velocidade de sedimentação

Para determinar a velocidade de sedimentação, recorreu-se à equação diferencial de conservação da massa:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (W_s C)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

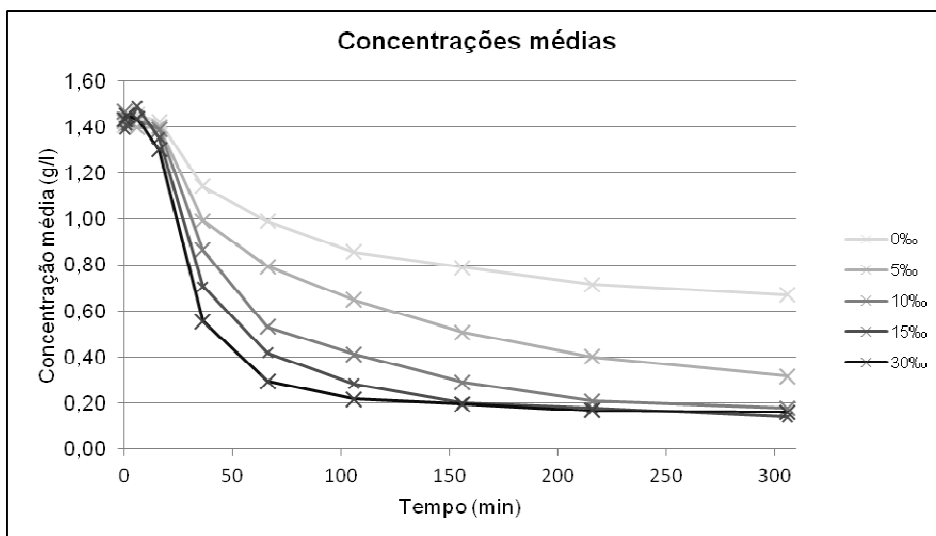


Fig. 3 – Evolução temporal das concentrações médias nos cinco ensaios.

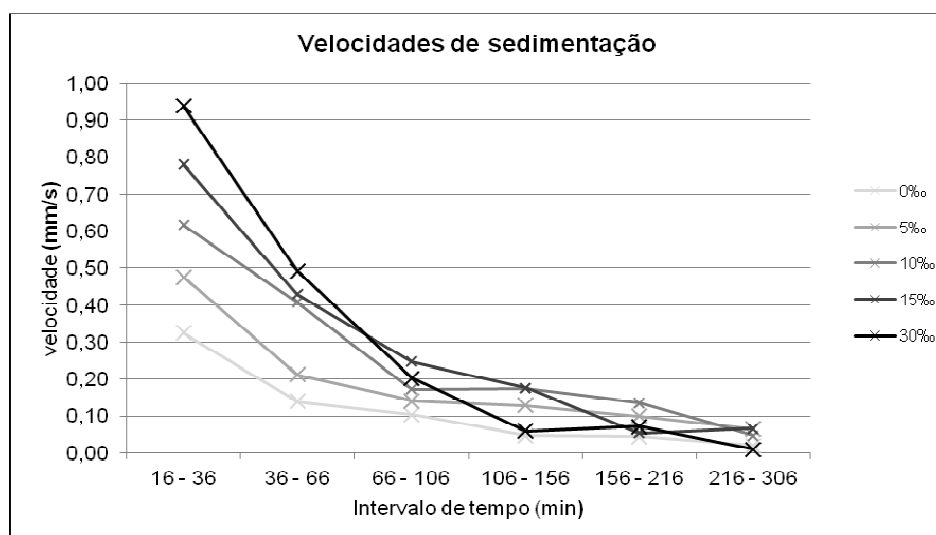


Fig. 4 – Evolução temporal das velocidades de sedimentação nos cinco ensaios.

em que C (kg m^{-3}) é a concentração de sedimento em suspensão, t (s) é o tempo, W_s (m s^{-1}) é a velocidade de queda e z (m) é a coordenada vertical (Portela *et al.*, 2013).

Esta equação conduz, por diferenças finitas, a:

$$W_s = \frac{(C^n - C^{n+1}) \times h}{\Delta t \times C^n} \quad (2)$$

A Figura 4 apresenta as velocidades de sedimentação ao longo do tempo nos cinco ensaios a partir do instante $t_3=16$ min. Pode observar-se que, numa fase inicial, os ensaios com menor salinidade registam menores valores da velocidade de sedimentação do que os restantes

ensaios. Numa fase posterior, quando grande parte do sedimento inicial já se encontra depositada, os valores da velocidade de sedimentação nos ensaios com maior salinidade diminuem significativamente. Verifica-se, assim, uma alteração significativa no comportamento dos sedimentos finos para diferentes valores de salinidade.

Velocidade de sedimentação pela lei de Stokes

Vai-se comparar esta velocidade de sedimentação “real” com uma velocidade teórica, calculada recorrendo à lei de Stokes:

$$W_s = \frac{g \cdot D^2}{18 \cdot \nu} \cdot \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (3)$$

em que g é a gravidade, D é o diâmetro da partícula, ν é a viscosidade cinemática, γ_s é o peso volúmico da partícula sólida e γ é o peso volúmico do fluido (Quintela, 1985). O diâmetro utilizado é o diâmetro mediano obtido na análise granulométrica da amostra.

A Tabela 3 apresenta as velocidades de sedimentação calculadas pela lei de Stokes com os diferentes valores de salinidade que afectam a viscosidade e o peso volúmico do fluido. Como se pode observar, a velocidade de sedimentação estimada pela lei de Stokes diminui com a salinidade, o que não se verificou nos ensaios em laboratório. Com efeito, na lei de Stokes foi utilizado o diâmetro mediano do sedimento, sem ter em conta a floculação das partículas de argila provocada pela salinidade, que aumenta o tamanho e consequentemente a velocidade de queda das partículas.

Velocidade de sedimentação média ponderada

O cálculo da velocidade de queda em cada intervalo de tempo pode ser realizado a partir das concentrações de sedimento em suspensão pela equação (2). Embora também tenha sido calculada uma média simples dos valores obtidos em cada intervalo de tempo, considera-se que a forma mais adequada de estimar uma velocidade de queda média, em cada ensaio, consiste em ponderar as velocidades obtidas em cada intervalo de tempo pela massa depositada nesse intervalo de tempo. Esta abordagem requer hipóteses sobre a velocidade de queda do material que permanece em suspensão ao fim de 306 min (Portela *et al.*, 2013). Utilizando a velocidade de queda média ponderada para descrever os fluxos de deposição, estima-se que o seu valor varie entre 0,10 mm s⁻¹ em meio fluvial (salinidade 0‰) e 0,65 mm s⁻¹ em meio marinho (salinidade 30‰).

Tabela 3 – Velocidade de sedimentação: (a) estimada pela lei de Stokes; (b) média simples dos 6 valores obtidos entre os minutos 16 e 306 a partir da equação diferencial de conservação da massa; (c) média ponderada.

Ensaio	W_s Stokes (mm/s)	W_s média simples (mm/s)	W_s média ponderada (mm/s)
1	0,079	0,113	0,10
2	0,076	0,187	0,22
3	0,073	0,259	0,38
4	0,069	0,292	0,51
5	0,068	0,296	0,65

Conclusões

Muitos estuários apresentam elevadas concentrações de sedimento em suspensão, sendo importante considerar o risco de assoreamento por sedimentos finos no projecto das bacias portuárias neles situadas.

Os sedimentos finos em suspensão possuem propriedades coesivas, nomeadamente a capacidade de, por floculação, se agregarem, produzindo partículas de maiores dimensões. A salinidade é um dos factores potencialmente importantes para a floculação, dado que a água salgada aumenta a coesão entre as partículas de argila.

A amostra de sedimento colhida na Marina do Parque das Nações apresenta um diâmetro mediano de 9 μm e uma elevada percentagem de minerais de argila. Confirmou-se nos ensaios realizados em coluna de sedimentação que a velocidade de queda deste sedimento aumenta com a salinidade. Nos ensaios com salinidades diferentes de zero, foram obtidas velocidades de queda significativamente superiores às estimadas pela lei de Stokes.

Assim, considera-se que o efeito da salinidade sobre a velocidade de queda deve ser tido em conta nos estudos de sedimentação em estuários.

Agradecimentos

À Doutora Anabela Oliveira e ao Instituto Hidrográfico pelo apoio laboratorial, ao Doutor António Santos Silva (LNEC-DM/NMM), pela execução da análise mineralógica, e à Doutora Paula Freire (LNEC-DHA/NEC), pela execução da análise granulométrica.

Bibliografia

- Costa, R.G. (1995). Three-dimensional modelling of cohesive sediment transport in estuarine environments. Ph.D. thesis, University of Liverpool.
- PIANC (2004). Dredging of marinas. RecCom report of Working Group 13, International Navigation Association, Brussels.
- Portela, L.I., Ramos, S., Teixeira, A.T. (2013). Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin. *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65*, 1188-1193.
- Quintela, A.C. (2005). Hidráulica, 9ª edição. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Ramos, S. (2013). Efeito da salinidade sobre a velocidade de queda de sedimentos finos de uma bacia portuária. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico.
- Silva, A.S (2011). Análise mineralógica quantitativa e semiquantitativa por difractometria de raios X de sedimentos. Nota Técnica 60/2011-DM, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Stoschek, O (2007). Possibilities of minimizing sedimentation in harbours in a brackish tidal environment. In: 4th International Conference Port Development and Coastal Environment. Black Sea Coastal Association, Varna, 25-28 September 2007, pp. 1-10.
- Van Leussen, W. (1988). Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs: a review. In: Dronkers, J. and Van Leussen, W. (eds.), *Physical Processes in Estuaries*. Berlin, Springer Verlag, pp. 347-403.
- Van Rijn, L.C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam.