



ENSAIO DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS CONTAMINADOS EM CANAL ANULAR

Luís Ivens Portela¹, Carlos Vale², Inês Silva¹, Miguel Quintans²

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. Brasil 101, 1700-066 Lisboa

²Instituto de Investigação das Pescas e do Mar (IPIMAR), Av. Brasília, 1449-006 Lisboa

Sumário

Descrivem-se os resultados de um ensaio de deposição em canal anular, com sedimentos finos recolhidos na Cala de Samora, no estuário do Tejo, em área onde se verifica uma intensa ressuspensão de material do fundo e a formação de uma zona de elevada turbidez. Foram estudadas as evoluções da concentração de sedimento em suspensão (por via gravimétrica), da dimensão das partículas (por difracção laser) e da sua composição elementar (por análise química). O ensaio foi efectuado com uma concentração inicial de sedimento em suspensão superior a 600 mg L^{-1} e uma velocidade média inicial estimada de $0,45 \text{ m s}^{-1}$. Durante o ensaio, impuseram-se valores decrescentes da velocidade e da tensão de corte no fundo em 6 períodos sucessivos de 24 horas, permanecendo a suspensão em repouso por um período adicional de 72 horas. Verificou-se, ao longo do ensaio, uma diminuição progressiva da concentração de sedimento em suspensão, acompanhada por uma diminuição do diâmetro mediano (D_{50}) e dos diâmetros característicos D_{10} e D_{90} . Estes resultados parecem ser representativos da deposição de um sedimento não-uniforme, como o que participa nos ciclos de erosão-deposição da zona de turbidez máxima do estuário do Tejo. Os resultados relativos à evolução da composição elementar do sedimento em suspensão indicam que as partículas de menores diâmetros apresentam menores teores de contaminantes (Cd e Pb) do que as partículas maiores, ressuspendidas quando a intensidade das correntes é mais elevada.

Introdução

O estuário do Tejo é um dos grandes estuários da costa atlântica europeia. Como sucede na generalidade destes sistemas, apresenta uma zona de elevada turbidez ("turbidity maximum"), cuja extensão é determinada por ciclos de deposição e de ressuspensão de sedimentos finos, relacionados, em grande parte, com a intensidade das correntes de maré. Em marés de maior amplitude, a concentração de sedimento em suspensão na zona interior do estuário do Tejo pode exceder 500 mg L^{-1} (Vale, 1986; Vale & Sundby, 1987).

Esta zona de elevada turbidez tem uma grande influência sobre o ambiente estuarino, condicionando numerosos processos físicos, químicos e biológicos. Do ponto de vista da engenharia portuária, o transporte e a deposição de sedimentos finos colocam diversos problemas, relacionados com o assoreamento de bacias portuárias e de canais de navegação, mas também com o facto de estes sedimentos poderem estar associados a substâncias contaminantes, o que condiciona eventuais operações de dragagem e de imersão de dragados. O volume de dragagem médio anual de sedimentos finos e de areias no estuário do Tejo é da ordem de $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Vale *et al.*, 1989).

Os processos de transporte e de deposição de sedimentos finos, e a sua relação com as condições hidrodinâmicas, podem ser estudados em laboratório em canais anulares. Refiram-se, por exemplo, os estudos de Partheniades *et al.* (1966), Mehta & Partheniades (1973), Delo (1988), Verbeek *et al.* (1993), Krishnappan & Engel (1997) e Portela & Freire (1998). Este tipo

de trabalho experimental, embora apresente limitações, pode fornecer indicações importantes sobre parâmetros (p. ex., tensão crítica de deposição) utilizados em estudos de modelação matemática (Portela & Neves, 1994; Portela, 2000).

Descrivem-se, nesta comunicação, os resultados de um ensaio de deposição de sedimento proveniente da zona central do estuário do Tejo (constituído em 71% por material da fracção fina), efectuado no canal anular do LNEC. Foram estudadas as evoluções, em função da velocidade e da tensão de corte no fundo, da concentração de sedimento em suspensão, da dimensão das partículas em suspensão e da sua composição química elementar. Este último aspecto é inovador neste tipo de ensaios e tem grande relevância para a avaliação da dispersão de contaminantes durante as operações de dragagem.

Material e métodos

Amostra de sedimento

Cerca de 5 kg de sedimento superficial (camada de 1 cm de espessura) foram recolhidos na zona central do estuário do Tejo, na Cala de Samora, junto da Ponte Vasco da Gama, em 19 de Julho de 2000.

As fracções granulométricas fina e grosseira foram determinadas por via húmida com um peneiro de 63 μm , encontrando-se expressas, em relação ao peso seco total, no Quadro I. A amostra analisada corresponde ao tipo sedimentar "vasa arenosa", segundo a classificação proposta por Rodrigues & Quintino (1985).

A distribuição granulométrica da fracção da amostra compreendida entre 0,3 e 300 μm (materiais silto-argilosos e areias finas) foi analisada por difracção laser. O diâmetro mediano D_{50} e os diâmetros característicos D_{10} e D_{90} encontram-se indicados no Quadro II. A fracção fina parece ser predominantemente constituída por siltes.

Quadro I - Distribuição granulométrica da amostra de sedimento, obtida por peneiração.

Fracção < 63 μm	71%
Fracção > 63 μm	29%

Quadro II - Diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} da fracção 0,3-300 μm , obtidos por difracção.

D_{10}	1,32 μm
D_{50}	7,61 μm
D_{90}	28,52 μm

Equipamento

Os canais anulares são mais adequados ao estudo dos sedimentos finos do que os canais rectangulares tradicionais, por evitarem mecanismos de recirculação que alterariam as características da suspensão. Apresentam todavia circulações secundárias, cujo efeito em ensaios de deposição deve ser tido em conta (Booij, 1994).



Fig. 1 - Canal anular.

O canal anular existente no LNEC (Fig. 1), constituído por um canal-base e por um anel superior, apresenta um raio médio de 1,86 m, uma secção de 0,30 m de largura por 0,40 m de altura e um volume líquido de 1,4 m³. De modo a minimizar a importância das circulações secundárias, o canal-base e o anel superior têm movimentos de rotação independentes, em sentidos opostos. De acordo com um estudo anterior (Voisin, 1997), adoptou-se uma relação entre as velocidades angulares da base e do anel (em módulo) de 1 : 3.

Utilizaram-se duas abordagens distintas para o cálculo da tensão de corte no fundo do canal, fundamentadas, a primeira, numa relação empírica de Mehta & Partheniades (1973) e, a segunda, numa relação quadrática entre a tensão e a velocidade (Portela, *in litt.*).

Relação de Mehta & Partheniades (1973). Mehta & Partheniades (1973) observaram que a tensão de corte no fundo, num canal anular com uma altura de água de 0,30 m, poderia ser estimada pela expressão:

$$\tau_b = 0,275 \cdot (|w_t - w_b| r)^{1,37} \quad (1)$$

em que τ_b é a tensão de corte no fundo (Pa), w_t é a velocidade angular do anel (rad s⁻¹), w_b é a velocidade angular da base (rad s⁻¹) e r é o raio médio do canal anular (m). Esta relação empírica, obtida na Universidade da Florida, tem sido adoptada noutras instalações, nomeadamente em Delft Hydraulics (Verbeek *et al.*, 1993). No entanto, o facto de a tensão de corte no fundo não resultar proporcional ao quadrado da velocidade média do escoamento é de difícil justificação teórica. Ao cálculo por este método será atribuído o símbolo τ_b^A .

Relação quadrática entre a tensão e a velocidade. Num escoamento turbulento, a tensão de corte no fundo é normalmente definida pela relação:

$$t_b = r u_*^2 \quad (2)$$

em que r é a massa volúmica do fluido (kg m^{-3}) e a grandeza u_* é designada por velocidade de atrito (m s^{-1}). Dos vários métodos possíveis para estabelecer uma relação entre a velocidade de atrito e a velocidade média do escoamento, um dos mais simples e amplamente utilizados é a aproximação empírica baseada no coeficiente de Manning:

$$u_* = u_{av,b} \frac{n g^{1/2}}{h^{1/6}} \quad (3)$$

em que $u_{av,b}$ é a velocidade média do escoamento referida à base do canal (m s^{-1}), n é o coeficiente de rugosidade de Manning, que se pode supor ser igual a $0,011 \text{ s m}^{-1/3}$ (valor típico em canais de fundo liso), g é a aceleração devida à gravidade (m s^{-2}) e h é a altura de água (m). Para além da escolha do coeficiente de Manning, a única dificuldade do cálculo reside na determinação da velocidade média do escoamento referida à base do canal. Em regime permanente, esta variável pode ser estimada por via analítica, admitindo-se ser nulo o momento das forças de contacto em relação ao eixo do canal. Segundo Boij (1994):

$$u_{av,b} \cong \left(w_i \frac{r}{1 + \sqrt{\frac{b+2h}{b}}} + w_b \frac{r \sqrt{\frac{b+2h}{b}}}{1 + \sqrt{\frac{b+2h}{b}}} \right) - w_b r \quad (4)$$

em que b é a largura da secção do canal (m). A medição de velocidades efectuada por Voisin (1997) no canal anular do LNEC parece confirmar a validade desta expressão. Ao cálculo por este método será atribuído o símbolo t_b^B .

O difractómetro laser Malvern Mastersizer Micro, utilizado na determinação da dimensão do sedimento em suspensão, permite obter distribuições granulométricas na gama compreendida entre $0,3$ e $300 \mu\text{m}$. De acordo com um estudo anterior (Silva, 2000), adoptaram-se na utilização do difractómetro uma velocidade de agitação de 2400 rpm , uma intensidade de ultra-sons de 100% e um tempo de dispersão de 10 minutos. Embora os sedimentos finos em suspensão estejam sujeitos a processos de agregação, supõe-se que os resultados obtidos correspondam essencialmente à dimensão das partículas elementares.

Metodologia de ensaio

O sedimento a introduzir no canal anular foi passado previamente por um peneiro de 1 mm , para remover fragmentos de conchas de maiores dimensões. O meio líquido no canal anular foi constituído por água com uma salinidade de cerca de 5‰ .

Durante o ensaio, após a introdução do sedimento, impuseram-se valores decrescentes da velocidade e da tensão de corte no fundo em 6 períodos sucessivos de 24 horas, permanecendo a suspensão em repouso por um período adicional de 72 horas (Quadro III). O ensaio foi iniciado com uma velocidade média do escoamento referida à base do canal, estimada pela Eq. (4), de $0,45 \text{ m s}^{-1}$.

Efectuou-se a colheita diária de amostras, após cada período de 24 horas (ou de 72 horas), para determinação da concentração de sedimento em suspensão por via gravimétrica, da distribuição granulométrica por difracção laser e da composição elementar por análise química. A metodologia adoptada pressupõe que, 24 horas após a alteração das condições de ensaio, se encontram praticamente estabelecidas novas situações de equilíbrio.

Quadro III - Condições de ensaio.

Tempo (dias)	t_b^A (Pa)	$u_{av,b}^B$ (m s ⁻¹)	t_b^B (Pa)
1	0,400	0,45	0,327
2	0,200	0,27	0,119
3	0,100	0,16	0,043
4	0,050	0,10	0,016
5	0,025	0,06	0,006
6	0,012	0,04	0,002
7-9	0	0	0

Resultados e discussão

Concentração de sedimento em suspensão e dimensão das partículas

Os resultados relativos à evolução da concentração de sedimento em suspensão e à evolução da dimensão das partículas encontram-se reunidos no Quadro IV.

Verificou-se uma diminuição progressiva da concentração de sedimento em suspensão ao longo do ensaio (Fig. 2), o que, segundo a interpretação de Mehta & Lott (1987), parece corresponder a um processo de deposição representativo de um sedimento não-uniforme. Com efeito, se o sedimento fosse praticamente uniforme, seria de admitir que a deposição do sedimento ocorresse para uma gama relativamente estreita de valores da tensão de corte no fundo (tensão crítica de deposição) (Krone, 1962). Os resultados obtidos sugerem que, na realidade, se verificam deposições parciais da fracção fina do sedimento para diferentes valores da tensão de corte no fundo.

Quadro IV - Evolução da concentração de sedimento em suspensão (C_{ss}) (mg L⁻¹) e dos diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} (μm).

Tempo (dias)	C_{ss} (mg L ⁻¹)	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)
1	603	1,23	7,48	26,75
2	330	0,91	4,49	13,14

3	213	0,82	4,05	12,59
4	62	0,60	2,26	6,11
5	39	0,55	1,85	5,75
6	22	0,50	1,40	3,99
7-9	11	0,45	0,92	2,48

A diminuição da concentração de sedimento em suspensão foi acompanhada por uma diminuição progressiva do diâmetro mediano (D_{50}) e dos diâmetros D_{10} e D_{90} (Fig. 3). Note-se que embora parte do sedimento em suspensão possa formar agregados, e que, portanto, o processo de deposição não seja unicamente determinado pela granulometria das partículas elementares, a análise por difracção reflecte sobretudo a dimensão destas partículas. A diminuição do diâmetro mediano observada é consistente com os resultados obtidos em ensaios de deposição por Kuijper *et al.* (1990) e Lau & Krishnappan (1992), sendo de referir que neste tipo de ensaios nem sempre se verifica uma tendência clara (Delo, 1988).

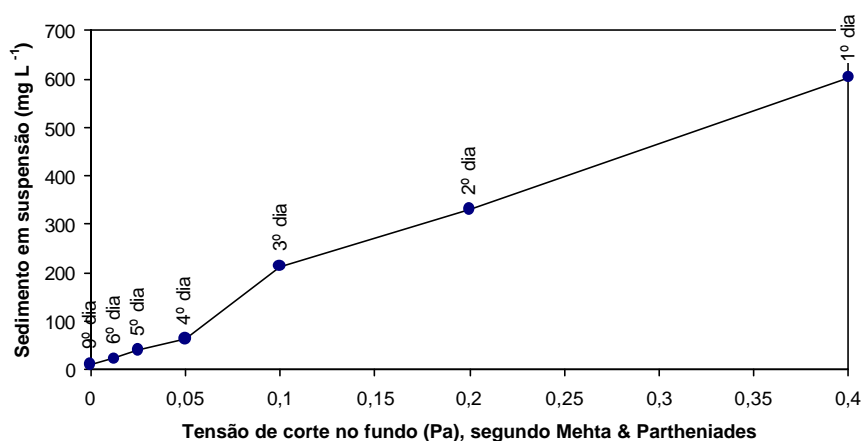


Fig. 2 - Evolução da concentração de sedimento em suspensão (mg L^{-1}) em função da tensão de corte no fundo (Pa), calculada pela relação de Mehta & Partheniades.

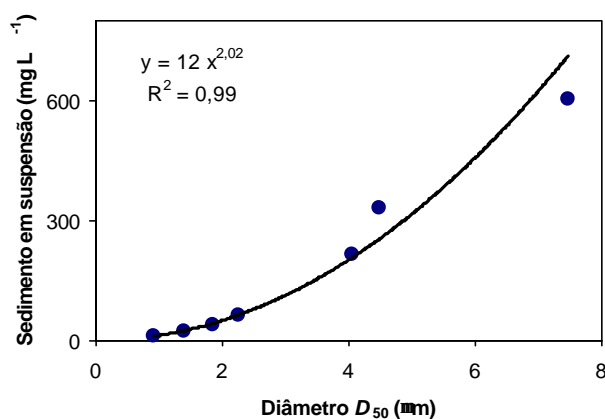


Fig. 3 - Relação entre a concentração de sedimento em suspensão (mg L^{-1}) e o diâmetro mediano (μm).

Composição elementar do sedimento em suspensão

Os resultados referentes à composição elementar encontram-se no Quadro V, expressos em termos de razões mássicas para o alumínio (exceptuando a amostra colhida no final do 3º dia, não incluída nesta análise). A concentração de Al aumentou ao longo do ensaio indicando que as partículas de menores dimensões são mais ricas neste elemento devido a uma maior percentagem de aluminossilicatos por unidade de massa. Pelo contrário, a razão Si/Al diminui com o diâmetro da partícula o que confirma a validade deste cociente na estimativa do tamanho da partícula (Fig. 4).

Quadro V – Evolução do diâmetro mediano (μm), da concentração de Al (%) e das razões Si/Al, Fe/Al, Mn(10^{-4})/Al, Pb(10^{-4})/Al e Cd(10^{-4})/Al do sedimento em suspensão.

D_{50} (μm)	Al (%)	Si/Al	Fe/Al	Mn(10^{-4})/Al	Pb(10^{-4})/Al	Cd(10^{-4})/Al
7,48	5,0	3,51	0,89	91	35	0,15
4,49	5,4	3,46	0,83	102	29	0,12
2,26	6,2	2,90	0,73	74	20	0,12
1,85	5,9	2,89	0,86	75	22	0,05
1,40	5,8	2,75	0,75	69	29	0,05
0,92	6,4	2,81	0,71	66	25	0,03

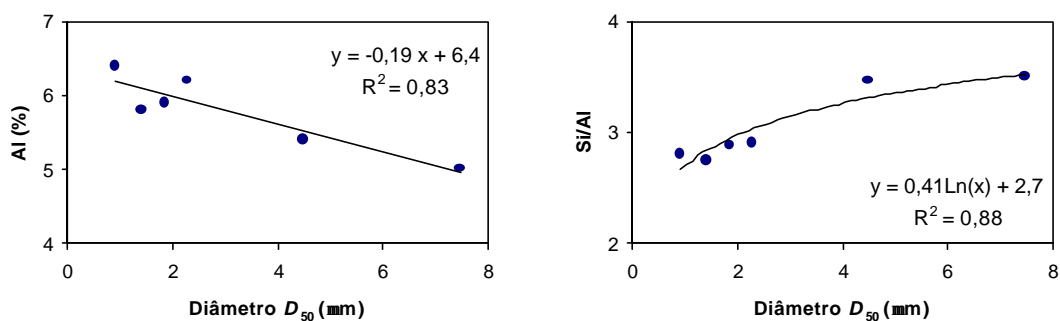
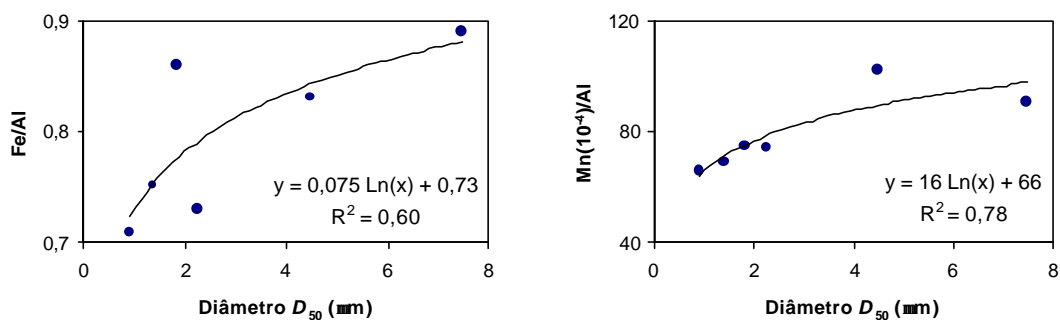


Fig. 4 – Relações entre o teor de Al (%) e a razão Si/Al e o diâmetro mediano (μm) do sedimento em suspensão.

As razões para o Al de Fe, Mn e Cd apresentam padrões semelhantes em que os valores diminuem com o tamanho da partícula (Fig. 5). Estas relações significam que as partículas que são ressuspensas naquela zona do estuário em períodos de maior intensidade de corrente tendem a apresentar uma maior contaminação. A razão Cd/Al, por exemplo, varia 5 vezes entre as duas situações extremas do ensaio e apresenta uma relação logarítmica com o tamanho da partícula ($r^2 = 0,85$). Este padrão, semelhante ao do ferro e do manganês, sugere que a ressuspensão do material de fundo nesta zona do estuário nos períodos de maior intensidade de corrente coloca na coluna de água partículas mais ricas nestes elementos.



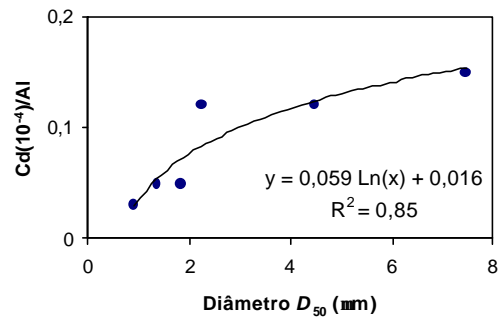


Fig. 5 – Relações entre as razões Fe/Al, Mn/Al e Cd/Al e o diâmetro mediano (μm) do sedimento em suspensão.

Considerações finais

O ensaio de deposição de sedimentos apresentado proporciona indicações interessantes sobre os processos de transporte de sedimentos finos e de distribuição de contaminantes em meio estuarino. Tratando-se de processos bastante complexos, afigura-se recomendável o prosseguimento e o aprofundamento deste tipo de estudos.

Agradecimentos

A actividade desenvolvida foi financiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito dos Projectos "Valorização e Protecção da Zona Costeira Portuguesa: Mecanismos de Transporte de Sedimentos Coesivos em Estuários" no LNEC e "Monitorização e Avaliação da Contaminação no Ambiente Costeiro: Processos Biogeoquímicos e Interacção com o Biota" no IPIMAR.

Bibliografia

- Booij, R., 1994. *Measurements of the flow field in a rotating annular flume*. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report no. 94-2, Delft University of Technology, Delft.
- Delo, E.A., 1988. *Deposition of cohesive sediment from flowing water*. Report SR 152, Hydraulics Research, Wallingford.
- Krishnappan, B.G., Engel, P., 1997. Critical shear stresses for erosion and deposition of fine suspended sediments of the Fraser river. In: Burt, N., Parker, R., Watts, J. (Eds.), *Cohesive Sediments*. Wiley, Chichester, pp. 279-288.
- Krone, R.B., 1962. *Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes*. Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Laboratory, University of California, Berkeley.
- Kuijper, C., Cornelisse, J.M., Winterwerp, J.C., 1990. *Erosion and deposition characteristics of natural muds. Sediments from the Westerschelde (near Breskens)*. Cohesive Sediments, Report 29, Rijkswaterstaat, Delft Hydraulics.

- Lau, Y.L., Krishnappan, B.G., 1992. Size distribution and settling velocity of cohesive sediments during settling. *Journal of Hydraulic Research* **30**, 673-684.
- Mehta, A.J., Lott, J.W., 1987. Sorting of fine sediment during deposition. In: Kraus, N.C. (Ed.), *Coastal Sediments '87*. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 348-362.
- Mehta, A.J., Partheniades, E., 1973. *Depositional behavior of cohesive sediments*. Coastal and Oceanographic Engineering Laboratory, Technical Report No. 16, University of Florida, Gainesville.
- Partheniades, E., Kennedy, J.F., Etter, R.J., Hayer, R.P., 1966. *Investigations of the depositional behaviour of fine cohesive sediments in an annular rotating channel*. Hydrodynamics Laboratory, Rep. no. 96, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Portela, L.I., 2000. Non-uniform modelling of suspended sediment transport in the Tagus estuary. In: Blain, W.R., Brebbia, C.A. (Eds.), *Hydraulic Engineering Software VIII*. WIT Press, Southampton, pp. 199-206.
- Portela, L.I., Freire, P., 1998. Deposição de sedimentos coesivos do Sapal de Corroios: estudo em canal anular. In: Carvalho, G.S., Gomes, F.V., Pinto, F.T. (Eds.), *Seminário sobre Dragagens, Dragados e Ambientes Costeiros*. Associação Eurocoast-Portugal, Porto, pp. 71-78.
- Portela, L.I., Neves, R., 1994. Numerical modelling of suspended sediment transport in tidal estuaries: a comparison between the Tagus (Portugal) and the Scheldt (Belgium-The Netherlands). *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* **28**, 329-335.
- Rodrigues, A.M., Quintino, V., 1985. Estudo granulométrico e cartografia dos sedimentos superficiais da Lagoa de Óbidos (Portugal). *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal* **71**(2), 231-242.
- Silva, M.I., 2000. *Optimização da utilização do difractor de luz laser em ensaios de sedimentos coesivos*. Relatório, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Vale, C., 1986. Transport of particulate metals at different fluvial and tidal energies in the Tagus River estuary. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer.*, **186**, 306-312.
- Vale, C., Sundby, B., 1987. Suspended sediment fluctuations in the Tagus estuary on semi-diurnal and fortnightly time scales. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **25**, 495-508.
- Vale, C., Gaudêncio, M.J., Guerra, M.T., 1989. Evaluation of the ecological impact. In: Alzieu, C., Gallene, B. (Eds.), *Proceedings of the International Seminar on the Environmental Aspects of Dredging Activities*. Nantes, pp. 119-128.
- Verbeek, H., Kuijper, C., Cornelisse, J.M., Winterwerp, J.C., 1993. Deposition of graded natural muds in The Netherlands. In: Mehta, A.J. (Ed.), *Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport*. American Geophysical Union, Washington DC, pp. 185-204.
- Voisin, O., 1997. *Caractérisation expérimentale de la vitesse de chute de sédiments et étalonnage en vitesse d'un canal circulaire*. Mémoire en vue de l'obtention du titre d'ingénieur (Ets: Laboratório Nacional de Engenharia Civil), Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand 2.