

MODELO POISSONIANO BIDIMENSIONAL DO MOVIMENTO EM SUSPENSÃO DE SEDIMENTOS E POLUENTES EM ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE

Geraldo Wilson Júnior^{1} & Cid da Silva Garcia Monteiro²*

Resumo – Os movimentos de sedimentos ou poluentes em suspensão em escoamentos com superfície livre caracterizam processos aleatórios cujos eventos elementares são as trajetórias das partículas individuais envolvidas. A trajetória bidimensional de uma partícula resulta da combinação de duas séries cronológicas de deslocamentos: (i) uma série de deslocamentos longitudinais no sentido do escoamento intercalados por períodos de tempo em que a partícula deixa de progredir neste sentido, e (ii) uma série de deslocamentos verticais no sentido da aceleração da gravidade, intercalados por períodos em que a partícula deixa de decantar. Estas duas séries são interdependentes. Quando as séries unidimensionais são descritas por Processos Aleatórios Poissonianos Homogêneos, o modelo bidimensional resultante também será Poissoniano Homogêneo, definido por quatro funções densidades de mobilidade, que caracterizam os movimentos das partículas. Os objetivos deste trabalho são: (i) apresentar os modelos bidimensionais longitudinais e verticais; (ii) calibrar e validá-los, usando dados obtidos em canais de laboratório com utilização de radioisótopos. Os resultados mostram que a Teoria dos Processos Aleatórios descreve com precisão os movimentos bidimensionais de sedimentos e poluentes em escoamentos com superfície livre.

Palavras-Chave – Sedimentos e poluentes em suspensão, Modelo bidimensional, Processos aleatórios.

BIDIMENSIONAL POISSONIAN MODEL OF SUSPENDED SEDIMENT AND CONTAMINANT MOVEMENTS IN OPEN CHANNEL FLOWS

Abstract – Suspended sediment or pollutant movements in open channel flows characterize random process whose elementary events are the individual particles' trajectories. The two-dimensional trajectory of single particle results from two chronological displacements series: (i) an alternate series of longitudinal downstream steps intercalated with periods of time when the particle does not move in this sense, and (ii) an alternate series of vertical steps in the direction of gravity, intercalated with periods of time when the grain does not move vertically. These two series are interdependent. As the one-dimensional series are described by Homogeneous Poissonian Random Process, the resultant two-dimensional model will be also Homogeneous Poissonian, defined by four mobility density functions, which characterize the particles' movements. The objectives of this work are: (i) to present the longitudinal and vertical two-dimensional models; (ii) to calibrate and validate them, using radiotracers data from laboratory channels experiments. The results show that the Random Theory may be applied to evaluate the 2D sediment and pollutant movements in open-channel flows.

Keywords – Suspended sediments and contaminants, Two-dimensional Model, Random Process.

¹ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Programa de Engenharia Oceânica. Área de Engenharia Costeira. Fone: (21) 25628741. jrwilson@gmail.com

² Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Fundação COPPETEC. Fone: (21) 25627393. csgm25@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

Vários projetos de Engenharia se relacionam com os movimentos de sedimentos em escoamentos com superfície livre. Destacam-se no Brasil: os projetos hidrelétricos; a manutenção de canais, reservatórios e vias navegáveis; rejeitos industriais e domésticos; extrações de material para a construção civil e a gestão de bacias hidrográficas. Torna-se necessário compreender e descrever o mecanismo que governa estes movimentos, cuja importância torna-se ainda maior, devido à propriedade dos sedimentos finos de fixar e transportar poluentes tóxicos. Se as dispersões transversais e longitudinais dos sedimentos reduzem as concentrações de poluentes num escoamento líquido, elas também produzem reconcentrações e depósitos nocivos ao Ecossistema.

Quando se estuda o movimento de sedimentos a partir das equações bifásicas clássicas, surgem problemas relacionados com a não-linearidade das equações, a complexidade das interações líquido-sólido e com a falta de conhecimentos sobre as trocas de energia entre o escoamento e o sedimento. A Teoria dos Processos Aleatórios evita tais problemas e propõe uma análise cinemática do movimento das partículas, ao mesmo tempo que explora o caráter turbulento do escoamento.

Como todo modelo, os aleatórios contêm hipóteses que devem ser verificadas na natureza, e parâmetros que devem ser ajustados em função das condições hidráulicas do escoamento. Os traçadores – radioativos, corantes, químicos e bióticos – fornecem as informações estatísticas sobre os movimentos, tanto de um grão isolado, quanto de uma população, seja em canal de laboratório, seja na natureza. Desta forma, este trabalho baseia-se nos seguintes tópicos: Processos Aleatórios e Traçadores; o primeiro para a descrição analítica do movimento sedimentar – a Teoria – o segundo para caracterizar as aplicações práticas de Engenharia Civil e Ambiental – a Experiência.

2. MOVIMENTOS EM SUSPENSÃO COMO PROCESSOS ALEATÓRIOS

Os movimentos por arraste e em suspensão de partículas de sedimentos e contaminantes em escoamentos com superfície livre caracterizam processos aleatórios, cujos eventos elementares são as trajetórias dos grãos individuais. As trajetórias ou realizações de uma partícula ou grupo de partículas em suspensão, por exemplo, podem ser analisadas por descrições Lagrangeana e Euleriana e pela Teoria dos Processos Aleatórios. Dois processos são considerados:

$$\bar{R}(t, \omega) = [X(t, \omega), Y(t, \omega), Z(t, \omega)] = X_{ti}(\omega); i=1, 2, 3 \quad (1)$$

que caracteriza a evolução do vetor posição da partícula em função do tempo. Seus componentes $X(t, \omega)$, $Y(t, \omega)$, $Z(t, \omega)$, são processos aleatórios que caracterizam a evolução das posições longitudinal, lateral e vertical da partícula em função do tempo, respectivamente.

O segundo processo aleatório:

$$T(x, y, z, \omega) = [T(x, \omega), T(y, \omega), T(z, \omega)] = T_{xi}(\omega); i=1, 2, 3 \quad (2)$$

caracteriza o tempo de passagem da partícula pelo ponto (x, y, z) . $T(x, \omega)$, $T(y, \omega)$ e $T(z, \omega)$ são os tempos gastos para que a partícula percorra as distâncias Ox , Oy e Oz , respectivamente. ω representa a trajetória ou realização da partícula, como ilustrado na Figura 1, a seguir.

$X_{ti}(\omega)$ e $T_{xi}(\omega)$ são definidos por suas Funções de Distribuição de Probabilidades:

$$F_t(x_i) = P\{X_i(t, \omega) \leq x_i\}; \quad x_i \geq 0; \quad i=1, 2, 3 \quad (3)$$

$$Q_x(t) = P\{T(x_i, \omega) \leq t\}; \quad t \geq 0; \quad i=1, 2, 3 \quad (4)$$

A trajetória ω resulta da combinação de três séries cronológicas de deslocamentos: (i) uma série alternada de deslocamentos longitudinais no sentido do escoamento, intercalados por períodos de tempo em que a partícula deixa de progredir neste sentido; (ii) uma série de deslocamentos verticais no sentido da gravidade, intercalados por períodos em que a partícula deixa de decantar; (iii) uma série de deslocamentos laterais, intercalados por períodos em que a partícula deixa de se mover lateralmente, como mostrado na Figura 1.

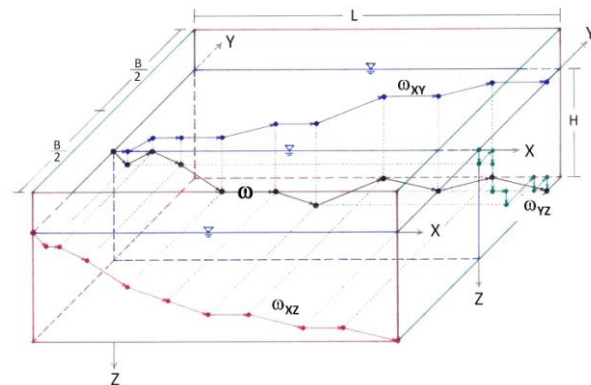


Figura 1- Trajetória ω da partícula em suspensão e suas componentes ω_{XY} , ω_{XZ} e ω_{YZ} (Wilson-Jr., 2004)

Constata-se que: (i) quando a partícula deixa de progredir no sentido do escoamento, ela pode estar se decantando ou se movendo lateralmente; (ii) quando a partícula deixa de se decantar, ela pode estar se movendo nas direções longitudinal ou lateral; (iii) quando ela deixa de progredir na direção das paredes laterais, ela pode estar se decantando ou se movendo no sentido do escoamento. Desta forma, as três séries são interdependentes e devem ser analisadas em conjunto.

3. PROCESSOS ALEATÓRIOS LAGRANGEANOS 3D

Apesar de não ser a descrição mais adequada para a aquisição de dados do movimento de sedimentos em suspensão, a descrição Lagrangeana do Processo Aleatório $X_{i_i}(\omega)$, $i=1,2,3$, é a que melhor ilustra as trajetórias das partículas (Figuras 1 a 4) e será adotada nas ilustrações deste artigo.

3.1. Funções densidade de probabilidade $f_t(x,y,z)$

Admitindo-se a independência dos Processos Aleatórios $X_i(t,\omega)$, $i=1,2,3$, a equação da Função de Distribuição de Probabilidade da posição das partículas em função do tempo se simplifica, e é descrita pela equação seguinte (Sayre e Conover, 1967; Wilson-Jr., 1987 e 2004):

$$F_t(x,y,z) = \sum_{n=0}^{\infty} P \left\{ \sum_{j=0}^{N(t)} X_j \leq x, \sum_{j=0}^{N(t)} Y_j \leq y, \sum_{j=0}^{N(t)} Z_j \leq z, N(t)=n \right\} \quad (5)$$

onde $N(t)$ representa o número de deslocamentos da partícula no tempo t .

A Função Densidade de Probabilidade da posição da partícula no tempo t é dada por:

$$f_t(x,y,z) = \frac{\partial^3 F_t(x,y,z)}{\partial x \partial y \partial z} = f_t(x)f_t(y)f_t(z) P \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} N(t)=n \right\} = f_t(x)f_t(y)f_t(z) \quad (6)$$

No desenvolvimento analítico dos processos $X_{i_i}(\omega)$ e $T(x_i,\omega)$, surgem três pares de funções λ_{1i} e λ_{2i} , $i=1,2,3$, chamadas funções de mudança do estado cinemático da partícula, que caracterizam seus movimentos temporal e espacial, respectivamente (Wilson-Jr., 1987; Monteiro, 2004).

Quando os deslocamentos da partícula, nos intervalos $[t, t+\Delta t]$ e $[x, x+\Delta x]$, são independentes do tempo, de sua posição e de seus deslocamentos prévios, ou seja, de sua história, o movimento da partícula é chamado de “sem memória”. Neste caso, as funções de mobilidade λ_1 e λ_2 são constantes positivas e as funções densidade de probabilidade $f_t(x_i)$, $i = 1,2,3$, são descritas por Processos Aleatórios Possonianos Homogêneos.

Para o modelo 3D resulta:

$$f_t(x_i) = \lambda_{2i} e^{-\lambda_{1i}t - \lambda_{2i}x_i} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda_{1i}t)^{k+1}}{(k+1)!} \frac{(\lambda_{2i}x_i)^k}{k!}; \quad i=1,2,3 \quad (7)$$

Para ilustrar a performance do modelo 3D, são apresentados nas Figuras 2, 3 e 4, a seguir, gráficos das funções densidade de probabilidade, para pares de valores das funções de mobilidade λ_{1i} e λ_{2i} , $i = 1,2,3$ (Wilson-Jr., 2004). Os valores das funções de mobilidade são obtidos comparando-se as variações experimental e teórica dos momentos das posições das partículas em função do tempo, e/ou dos momentos de seus tempos de passagem através de seções transversais ao escoamento. Nas figuras, T^{-1} e L^{-1} correspondem às unidades de λ_{1i} e λ_{2i} , $i = 1,2,3$, ou seja, correspondem aos inversos das unidades de tempo e de comprimento, respectivamente.

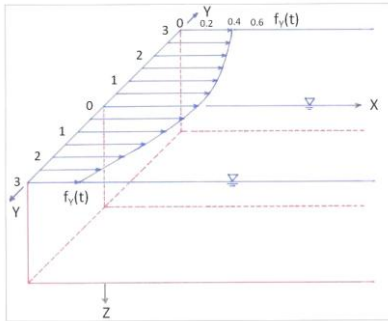


Figura 2- Função densidade de probabilidade do deslocamento lateral no tempo t. $\lambda_{1y} = 0,07T^{-1}$; $\lambda_{2y} = 0,09L^{-1}$ (Wilson-Jr., 2004)

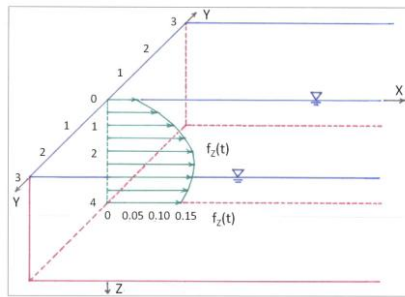


Figura 3- Função densidade de probabilidade do deslocamento vertical no tempo t. $\lambda_{1z} = 0,15T^{-1}$; $\lambda_{2z} = 1,15L^{-1}$ (Wilson-Jr., 2004)

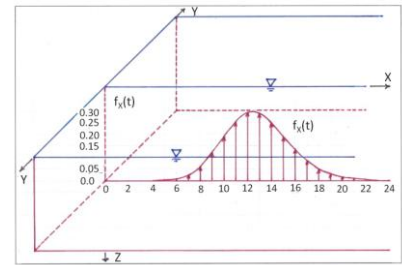


Figura 4- Função densidade de probabilidade do deslocamento longitudinal no tempo t. $\lambda_{1x} = 1,50T^{-1}$; $\lambda_{2x} = 3,50L^{-1}$ (Wilson-Jr., 2004)

Na determinação das funções densidades de probabilidade $f_t(x)$, $f_t(y)$ e $f_t(z)$, foi utilizado o software PAICON (Processos Aleatórios com injeção Intantânea e CONTínua), elaborado em linguagem DELPHI da Inprise Corporation (Monteiro e Wilson-Jr., 2002; Monteiro, 2004). Essas curvas foram ajustadas aos resultados experimentais de trabalhos sobre o transporte e dispersão de sedimentos e poluentes, com uso de traçadores: radioativos, fluorescentes e químicos, entre outros.

3.2. Funções intensidade de mobilidade das partículas

No desenvolvimento analítico dos processos aleatórios, as funções λ_{1i} e λ_{2i} explicam a mobilidade dos sedimentos e poluentes, nas direções $0x$, $0y$ e $0z$. Vários modelos são obtidos das expressões matemáticas que definem estas funções de mobilidade, as quais consideram as características hidrodinâmicas do escoamento e das partículas de sedimentos e poluentes.

Dependendo do caso considerado, os movimentos de sedimentos por arraste e em suspensão são descritos por funções de mobilidade mais elaboradas (Wilson-Jr., 1987, 2012), que contem dois grupos de fatores: (i) o primeiro grupo considera a dependência do tempo ou da distância, $\lambda_1(t)$ e $\lambda_2(x)$, respectivamente, e (ii) o segundo grupo, $\lambda_1(n)$ e $\lambda_2(k)$, considera a dependência do número de deslocamentos ou realizações da partícula, no tempo (n) e espaço (k):

$$\begin{cases} \lambda_{1i}(t,n) = \lambda_{1i}(t)\lambda_{2i}(n) \\ \lambda_{2i}(x_i,k) = \lambda_{2i}(x_i)\lambda_{1i}(k) \\ i = 1,2,3 \end{cases} \quad (8)$$

Como os períodos dos deslocamentos positivos, longitudinal e vertical, são desprezíveis quando comparados com os períodos dos deslocamentos nulos ou negativos, as séries aleatórias são

mais adequadas para descrever os movimentos longitudinal e vertical que para os laterais, onde os deslocamentos negativos não são desprezíveis. Por isto, nas aplicações, calibrações, e validações dos modelos analíticos; os sedimentos marcados com radioisótopos foram distribuídos lateral e uniformemente na superfície livre, a uma taxa constante durante um período de tempo $[0, t_d]$: o processo aleatório se simplificou e se tornou bidimensional:

$$\bar{R}(t, \omega) = [X(t, \omega), Z(t, \omega)]; \quad i=1e3 \quad (9)$$

4. PROCESSOS ALEATÓRIOS LAGRANGEANOS 2D

As principais propriedades estatísticas do Processo Aleatório Lagrangeano 2D, $X_t(x, z)$, para os casos de imersões instantânea e contínua, são descritas pelas seguintes expressões analíticas:

4.1. Caso duma imersão instantânea

4.1.1. Função densidade de probabilidade $f_t(x, z)$

$$f_t(x, z) = \lambda_{21} \lambda_{23} e^{-\lambda_{11}t - \lambda_{21}x} e^{-\lambda_{13}t - \lambda_{23}z} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda_{11}t)^{n+1}}{(n+1)!} \frac{(\lambda_{21}x)^n}{n!} \frac{(\lambda_{13}t)^{k+1}}{(k+1)!} \frac{(\lambda_{23}z)^k}{k!} \quad (10)$$

4.1.2. Função de distribuição de probabilidade $F_t(x, z)$

$$F_t(x, z) = e^{-\lambda_{11}t - \lambda_{21}x} e^{-\lambda_{13}t - \lambda_{23}z} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=n}^{\infty} \frac{(\lambda_{11}t)^n}{n!} \frac{(\lambda_{21}x)^k}{k!} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{p=m}^{\infty} \frac{(\lambda_{13}t)^m}{m!} \frac{(\lambda_{23}z)^p}{p!} \quad (11)$$

4.1.3. Posição média das partículas

$$[M_{xz}(t)]_{\text{Inst.}} = E[F_t(x, z)] = \left(\frac{\lambda_{11}}{\lambda_{21}} \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{23}} \right) t^2 \quad (12)$$

4.1.4. Variância da posição das partículas

$$[S_{xz}^2(t)]_{\text{Inst.}} = \frac{2\lambda_{11}\lambda_{13}t^2(\lambda_{11}t + \lambda_{13}t + 2)}{(\lambda_{21})^2(\lambda_{23})^2} \quad (13)$$

4.2. Caso duma imersão contínua

Consiste da injeção uniforme de traçadores, contínua durante o período $[0, t_d]$, distribuída lateralmente na superfície livre duma seção do escoamento, como mostrada nas Figuras 5 e 6. Nas equações, $t_o > t_d$ representa o tempo de registro do traçador numa seção de amostragem.

4.2.1. Função densidade de probabilidade $h_{t_o}(x, z)$

$$h_{t_o}(x, z) = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} f_{t_o-\tau}(x) f_{t_o-\tau}(z) d\tau \quad (14)$$

4.2.2. Função de distribuição de probabilidade $H_{t_o}(x, z)$

$$H_{t_o}(x, z) = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} F_{t_o-\tau}(x) F_{t_o-\tau}(z) d\tau \quad (15)$$

4.2.3. Posição média das partículas (momento de primeira ordem)

$$[M_{xz}^1(t_o)]_{\text{Cont.}} = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} M_x^1(t_o - \tau) M_z^1(t_o - \tau) d\tau \quad (16)$$

4.2.4. Variança da posição das partículas

$$[M_{xz}^1(t_o)]_{Cont} = \frac{\lambda_{11}}{\lambda_{21}} \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{23}} \left(t_o^2 - t_o t_d + \frac{t_d^2}{3} \right) \quad (17)$$

$$[M_{xz}^2(t_o)]_{Cont} = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} M_x^2(t_o - \tau) M_z^2(t_o - \tau) d\tau \quad (18)$$

$$[S_{xz}^2(t_o)]_{Cont} = [M_{xz}^2(t_o)]_{Cont} - [M_{xz}^1(t_o)]_{Cont}^2 \quad (19)$$

5. MOVIMENTOS EM SUSPENSÃO EM CANAIS DE LABORATÓRIO

O dispositivo experimental, apresentado nas Figuras 5 e 6, foi concebido para o estudo dos movimentos por arraste e em suspensão, com transferências verticais. O esquema permite medições simultâneas, hidrodinâmicas, sedimentológicas e o uso de radioisótopos. Entre as medições realizadas, destacam-se as determinações: (i) do campo 3D de velocidades; (ii) do transporte e da dispersão dos sedimentos por arraste; (iii) dos perfis transversais de concentração dos sedimentos em suspensão, e (iv) das evoluções temporal e espacial dos depósitos de sedimentos no leito móvel.

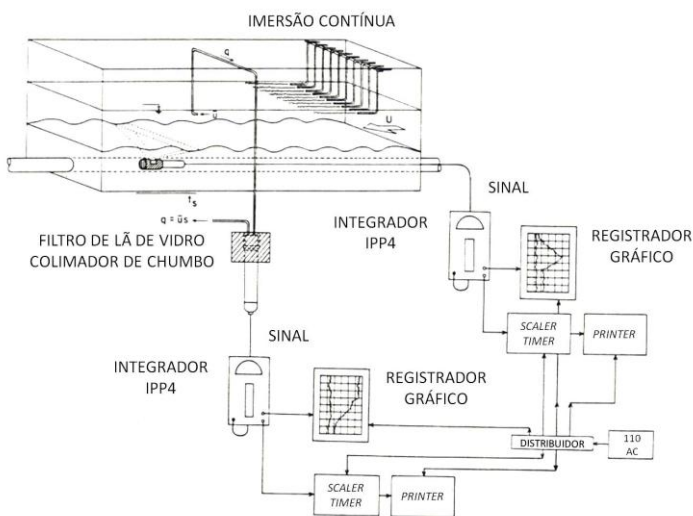


Figura 5- Sistema de detecção do movimento de sedimentos por arraste e em suspensão com transferências verticais, em canais de laboratório (Wilson-Jr., 1987)



Figura 6- Imersão contínua de sedimentos na superfície livre. Canal do LCHF, França (Wilson-Jr., 1987)

Os ensaios sobre o movimento em suspensão de sedimentos e poluentes consistiram de imersões contínuas na superfície livre (Figuras 5 e 6) durante períodos de tempo t_d , que variaram de 7 a 13 minutos, de: (i) vasas de origem marinha, marcadas com In^{113} , e, (ii) partículas de vidro moído contendo Au^{198} , de granulometria uniforme e peso específico iguais aos da areia, simulando os sedimentos não coesivos (Wilson-Jr., 1987).

Nas Figuras 7 e 8 estão apresentados perfis verticais de concentração de sedimentos coesivos e não-coesivos obtidos através de seções transversais do canal do LCHF. Na Figura 9 estão apresentadas curvas teóricas obtidas das funções de densidade de probabilidade, $f_t(x,z)$, para condições iniciais e de contorno semelhantes. A comparação destas curvas teóricas e experimentais indicam que os modelos aleatórios 2D são tão promissores, quanto os modelos 1D que os autores tem aplicado em canais de laboratório e na natureza, em projetos e pesquisas de Engenharia.

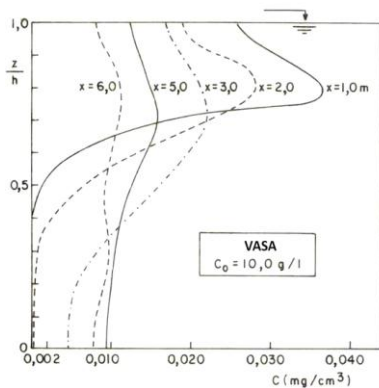


Figura 7- Perfis de concentração vertical de sedimentos coesivos. Ensaio no (Wilson-Jr., 1987)

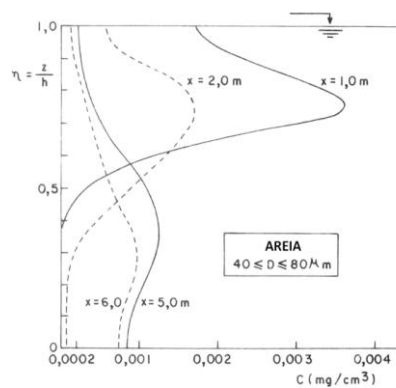


Figura 8- Perfis de concentração vertical de sedimentos não coesivos. Ensaio no LCHF. (Wilson-Jr., 1987)

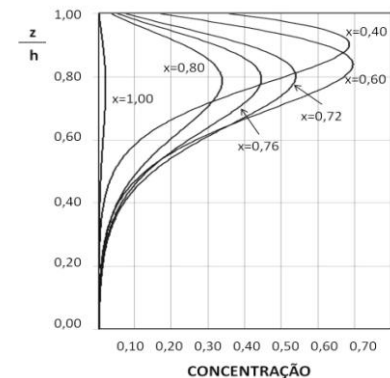


Figura 9- Perfis de concentração vertical, teóricos de sedimentos em suspensão. Modelo aleatório 2D.

6. RESULTADOS DE ESTUDOS SOBRE OS MOVIMENTOS EM SUSPENSÃO

Mendes e Wilson-Jr. (1998) e Wilson-Jr. e Monteiro (2004) mostraram que os Modelos Unidimensionais Poissonianos Homogêneos descrevem com precisão os tempos de passagem de sedimentos e poluentes através de seções de escoamentos naturais. Consideraram-se dados de trabalhos realizados no Brasil e na França, para determinação: (i) do transporte e da dispersão de poluentes solúveis, num trecho de 39,6 km do Rio Paraíba do Sul, entre as cidades de Volta Redonda e Barra do Pirai (RJ); (ii) do tempo médio de residência de poluentes líquidos num trecho de 7,0 km do Rio Arrudas, na região urbana de Belo Horizonte (MG); e (iii) determinação da capacidade de transporte de sedimentos finos em suspensão no Rio Loire, num trecho de 70,0 km a jusante da Barragem de Grangent até a cidade de Villerest. Neste trabalho, foram realizadas imersões simultâneas de água marcada com Rodamina B, e sedimentos finos marcados com Au¹⁹⁸.

Como exemplo, apresentam-se nas Figuras 10 e 11, curvas teóricas ajustadas aos dados experimentais das funções densidade de probabilidade dos tempos de passagem da Rodamina B por seções do Rio Paraíba do Sul, com aplicação do Programa PAICON (Wilson-Jr. e Monteiro, 2004).

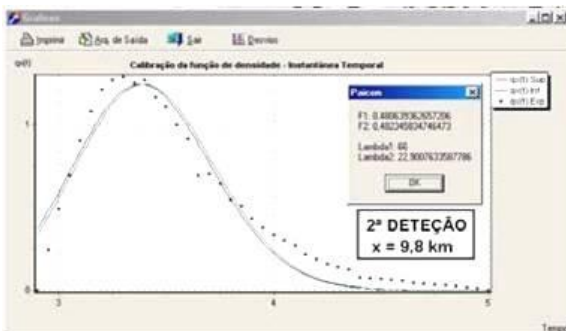


Figura 10- Curvas do tempo de passagem do corante, teórica e experimental, através da seção $x = 9,8$ km, do Rio Paraíba do Sul (Wilson-Jr e Monteiro, 2004).



Figura 11- Curvas do tempo de passagem do corante, teórica e experimental, através da seção $x = 28,3$ km, no Rio Paraíba do Sul (Wilson-Jr e Monteiro, 2004).

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A Teoria dos Processos Aleatórios mostra que as trajetórias bidimensionais das partículas de sedimentos e poluentes resultam da combinação de séries de deslocamentos longitudinal e vertical, definidas por funções de intensidade de mobilidade: $\lambda_{x1}(t,n)$, $\lambda_{z1}(t,n)$, $\lambda_{x2}(x,n)$ e $\lambda_{z2}(z,n)$. Esta teoria

é tão abrangente, que as equações da difusão e dispersão clássicas Fickianas dos movimentos em suspensão, são apenas casos particulares destes processos, caracterizados por valores constantes das funções de mobilidade, ou seja, por Processos Poissonianos Homogêneos.

Em ambientes fluviais, quando as dimensões e concentrações dos sedimentos são reduzidas (areia fina, siltes e vasas), as partículas sólidas se comportam como as do fluido, e seus movimentos em suspensão são descritos por Modelos Poissonianos Homogêneos Unidimensionais. Este resultado não é surpreendente, uma vez que para grandes valores de x e t , os Modelos Poissonianos se aproximam do Gaussiano, solução da Equação Clássica da Difusão-Dispersão. Entretanto, quando a mobilidade do grão não for constante, modelos mais complexos deverão ser utilizados, tais como os Poissonianos Não Homogêneos e os Não Poissonianos (Wilson-Jr., 1987, 2012).

Surgem duas linhas de pesquisas: (i) o estudo do movimento de sedimentos e/ou poluentes descritos por funções de mobilidade que variam com o tempo, a distância e o número de deslocamentos no tempo e espaço, isto é, movimento de partículas “com memória”; (ii) a descrição do movimento de sedimentos por processos aleatórios 2D e 3D. Para estas pesquisas, dispõe-se dum acervo de dados sobre o movimento de sedimentos e poluentes obtidos em canais de laboratório e na natureza, com o uso de traçadores radioativos, corantes e químicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN), ao Centro de Estudos Nucleares de Saclay do Commissariado de Energia Atômica da França (CENS/CEA), ao CNPq, FAPERJ, CAPES e à COPPE/UFRJ, sem os quais este trabalho não poderia ser realizado.

REFERÊNCIAS

- MENDES, M.F.A. e WILSON-JR., G. (1998). Homogeneous one-dimensional Poissonian model applied to the suspended movement of pollutant and fine sediments in open channel flow. *Off-print of the paper presented at the VII International Symposium on River Sedimentation*, Hong Kong, December 16-18, China.
- MONTEIRO, C.S.G. (2004). *Processos Aleatórios com Injeções Instantânea e Contínua, Aplicados ao Movimento de Sedimentos e Poluentes em Escoamentos com Superfície Livre*. Tese de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 294 p., Brasil.
- MONTEIRO, C.S.G. e WILSON-JR., G. (2002). Descrição do movimento de sedimentos e de poluentes, com uso de microcomputadores e da teoria dos Processos Aleatórios. *XIX Congreso Nacional del Agua*, Provincia de Córdoba, Argentina.
- SAYRE, W.W. and CONOVER, W.J., (1967). General two-dimension stochastic model for the transport and dispersion of bed material sediment particles. *Proceedings of 12th Congress of International Association for Hydraulic Research*. Fort Collins, Colorado, USA.
- WILSON-JR., G. (1987). *Etude du Transport et de la Dispersion des Sédiments en tant que Processus Aléatoires*. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Physiques. Université Paris VI, France.
- WILSON-JR., G., (2004). Modelo Poissoniano homogêneo tridimensional do movimento de sedimentos em suspensão em escoamentos com superfície livre. *VI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (VI ENES)*. Vitória, Espírito Santo, Brasil.
- WILSON-JR., G., (2012). Funciones de intensidad de mudanza del estado cinemático del movimiento de los sedimentos en los cursos de agua. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica San José, Costa Rica*.
- WILSON-JR., G. and MONTEIRO, C.S.G. (2004). Sediment and pollutant movements in open channel flows as stochastic processes. *6th International Conference on Hydro-informatics*. Singapore.