

ESTUDOS UNIDIMENSIONAIS DO MOVIMENTO DE PARTÍCULAS DE SEDIMENTOS FINOS NOS ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE

Márcia Maria Guimarães¹ & Geraldo Wilson Júnior²

RESUMO – Este artigo apresenta os resultados de estudos unidimensionais do movimento em suspensão de sedimentos finos e poluentes, em escoamentos com superfície livre. Três casos são considerados: a dispersão longitudinal de um grupo de partículas injetadas instantânea e uniformemente através de uma seção transversal, a dispersão longitudinal de um grupo de partículas injetadas contínua e uniformemente através da seção, a dispersão longitudinal de um grupo de partículas injetadas num intervalo de tempo, na superfície livre, distribuídas uniformemente na largura. Para a calibração e validação dos modelos analíticos e numéricos elaborados, utilizaram-se dados de experiências realizadas em canais de laboratório, na Universidade do Colorado, USA, e no Laboratório Central de Hidráulica da França - LCHF, e um estudo do comportamento de sedimentos em decantadores. Os resultados mostraram em que condições experimentais as hipóteses da Teoria Fickiana são válidas. Nos modelos numéricos, discretizados pelo método das diferenças finitas, inseriram-se coeficientes de ponderação espacial e temporal, minimizando sensivelmente os problemas de oscilação e difusão numérica. Para as aplicações nos escoamentos naturais, os modelos poderão ser calibrados e validados com uso de traçadores, os coeficientes de dispersão e velocidades médias dos dispersantes sendo determinados em função da distância e do tempo.

ABSTRACT – One-dimensional studies of fine suspended sediments and pollutants movements in open channel flow are considered in this paper. Three cases are analyzed: the longitudinal dispersion of a group of sediment particles, instantaneously and uniformly injected in an open flow cross section, the longitudinal dispersion of a group of sediment particles, continuously and uniformly injected in a cross section, and the longitudinal dispersion of a sediment particle group injected during time period, transversally and uniformly distributed on the width of the water free surface. Laboratory experimental data from the Colorado State University – USA and from the French Hydraulic Central Laboratory (*LCHF – Laboratoire Central d’Hydraulique de France*) were used to calibrate and validate the conceived analytical and numerical models. In addition, a theoretical study of the sediment behavior in decanters was considered. Results showed for which experimental conditions the Fickian Theory hypotheses are valuable. In the numerical models, obtained by the Finite Difference Method, spatial and temporal calibration coefficients minimized sensibly the oscillations and numerical diffusion problems. For the natural open flows applications, models ought to be calibrated and validated by radiotracers, the dispersion coefficients and the dispersant median velocities being determined as function of distance and time.

Palavras-chave: Sedimentos Finos e Poluentes; Movimento em Suspensão; Traçadores Fluorescentes e Radioativos.

1) Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, Avenida José Cândido da Silveira, 2000, Horto. CEP:31.170-000, Belo Horizonte/MG. Fone: 55.31.34892382. Fax: 55.31.34892200. E-mail: marcia.guimaraes@cetec.br.

2) Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica, Centro de Tecnologia, Bloco C, Sala 209. CEP:21.945-970, Rio de Janeiro/RJ. Fone: 55.21.25628741. Fax: 55.21.25628755. E-mail: gwj@peno.coppe.ufrj.br.

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de substâncias dissolvidas e de partículas de sedimentos finos nos escoamentos com superfície livre têm sido pesquisados desde o Século XIX. Graf (1971), por exemplo, considera os trabalhos dos seguintes pioneiros: Dupuit, de 1865; Partiot e Lechalas, de 1871; Boussinesq 1872 e Kennedy de 1895. O avanço da teoria e as várias experiências realizadas relacionam-se, principalmente, com o estudo dos termos da equação de transferência de grandezas escalares em escoamentos turbulentos com superfície livre, e, em particular, com o estudo dos coeficientes de difusão turbulenta e de dispersão diferenciada.

Dentre as **teorias probabilísticas e determinísticas**, e suas combinações, adotadas para o estudo do movimento de substâncias dissolvidas e de partículas de sedimentos finos, destacam-se: (i) Teoria da difusão-dispersão Fickiana; (ii) Teoria de difusão por movimentos contínuos; (iii) Teoria de Kolmogoroff da similaridade da turbulência local; (iv) Teoria da dispersão longitudinal devido à advecção diferencial, provocada pelos gradientes de velocidade; (v) Teoria da difusão aplicada ao movimento de partículas de sedimentos finos em suspensão.

As **Teorias da Difusão-Dispersão Fickiana, da Dispersão Longitudinal devido à Advecção Diferencial e da Difusão-Dispersão Aplicada à Suspensão de Sedimentos Finos** fazem analogias entre os processos de difusão molecular, difusão turbulenta e de dispersão de partículas devida aos gradientes verticais de velocidade e de concentração. São ditas **Fickianas** porque são teorias oriundas de analogias com a **Lei da Difusão Molecular de Fick**.

2 TEORIA DA DIFUSÃO-DISPERSÃO FICKIANA

Consideram-se misturas de sedimentos e/ou poluentes em suspensão, tais que:

$$c_v \ll 1; \quad c = \rho_s c_v \ll 1 \quad (1)$$

onde os símbolos c , c_v e ρ_s representam, respectivamente, as concentrações mássicas, volumétricas e a densidade do grão de sedimento. Para essas condições, os valores das velocidades médias do líquido e do sedimento através da seção transversal são próximos. Considera-se, também, que os coeficientes de difusão turbulenta e a velocidade média temporal sejam constantes em todo o campo do escoamento. As partículas são transportadas em suspensão, não havendo retenção das que tocam o leito do escoamento. O movimento unidimensional médio das partículas é descrito pela **Equação do Movimento Unidimensional de uma Mistura de Sedimentos Finos num Escoamento Turbulento com Superfície Livre, sem Transferências Verticais**, onde se considera que o coeficiente de difusão-dispersão, K_{px} , é constante ou dependente unicamente do tempo,

$$\frac{\partial \bar{C}_m}{\partial t} + U \frac{\partial \bar{C}_m}{\partial x} = K_{px} \frac{\partial^2 \bar{C}_m}{\partial x^2} \quad (2)$$

$\bar{C}_m$ representa o valor médio da concentração mássica de sólidos dissolvidos ou poluentes líquidos através da seção transversal e U é a velocidade média do escoamento.

A solução analítica Euleriana dessa equação é dada por:

$$\bar{C}_m(t, x) = \frac{M}{B h} \frac{1}{U} q_x(t) \quad (3)$$

onde $q_x(t)$ é a função densidade de probabilidade do tempo de passagem das partículas de massa total M , através da seção molhada de largura B e altura h , situada à distância x da seção de injeção,

$$q_x(t) = \frac{U}{2 \sqrt{\pi K_{px} t}} \exp \frac{(x - Ut)^2}{4 K_{px} t} \quad (4)$$

Esta equação tem sido analisada por vários autores, desde Taylor (1953), Fischer (1967) e Sayre e Chang (1968), para aplicações em escoamentos em ambientes fluvial e estuarino.

3 EXPERIÊNCIAS COM TRANSFERÊNCIAS VERTICAIS

Serão considerados os seguintes trabalhos realizados em canais de laboratório: (i) ensaios realizados por Sayre e Chang (1968) na *Colorado State University*, com traçador fluorescente (rodamina B) e com partículas de sedimentos naturais (siltes); (ii) ensaios realizados no *Laboratoire Central d'Hydraulique de France – LCHF*, com o apoio da *Section d'Application des Radioéléments – SAR*, do *Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay*, do *Commissariat à l'Energie Atomique de France – CEA*. Nestas últimas experiências, utilizou-se um dispositivo original, projetado para o estudo simultâneo dos movimentos longitudinais por arraste e em suspensão, e verticais, de partículas líquidas ou sólidas, marcadas com traçadores radioativos, incluindo as transferências simultâneas de massa entre a suspensão e o leito (Wilson-Jr, 1987).

De forma didática, insere-se neste trabalho, importante estudo teórico realizado por Rojas (1995) para a estimativa da sedimentação e deposição de sedimentos em decantadores.

3.1 Experiências Realizadas por Sayre e Chang (1968)

Elas foram realizadas num canal prismático retangular de 46,0 m de comprimento, 2,40 m de largura e 0,61 m de profundidade, da Universidade do Estado do Colorado, EUA. A rugosidade do leito foi simulada por pequenos pedaços de madeira, uniformemente distribuídos no leito do canal. As características hidráulicas e sedimentológicas desses ensaios estão apresentadas na **Tabela 1**.

Consideram-se neste artigo os estudos sobre a dispersão longitudinal de traçador fluorescente, LO-D1 (*Longitudinal Dispersion – Dye*), e de partículas de silte natural em suspensão, na faixa de 15 a 40 μm , LO-FS1 (*Longitudinal Dispersion – Fine Sediment*). Os dispositivos elaborados para as injeções instantâneas de uma solução de traçador fluorescente ou de uma mistura líquido-sedimentos, distribuídos uniformemente na seção transversal, estão esquematizados na **Figura 1**.

As amostragens, contínuas nos ensaios com traçadores fluorescentes e integradas durante períodos curtos de tempo nos ensaios com sedimentos, foram realizadas no eixo do canal, a meia profundidade (0,5 h).

As concentrações dos corantes foram determinadas com um Fluorímetro Turner Modelo 111, e dos sedimentos, por filtração, evaporação e pesagens em laboratório. Os resultados foram apresentados em função do tempo, para cada uma das seções de amostragem situadas a jusante da imersão. As distâncias entre a seção de imersão e as de amostragem foram: 10, 20, 27 e 35 metros.

Tabela 1 – Condições hidráulicas e sedimentológicas das experiências de Sayre e Chang (1968)

Grandeza		Valores Experimentais	Descrição
Símbolo	Unidade		
B	m	2,40	Largura do canal
h	m	0,15	Tirante ou altura da coluna de água
L	m	46,00	Comprimento do canal
U	m/s	0,228	Velocidade média do escoamento
Q	l/s	82	Vazão líquida média do escoamento
$S_o \# S_f$	-	0,0001	Declividades longitudinais do leito e da superfície livre para o escoamento uniforme
θ	°C	20	Temperatura da água
u_*	cm/s	3,84	Velocidade média de atrito junto ao leito
τ_o	N/m ²	1,47	Tensão tangencial média do escoamento junto ao leito
ν	m ² /s	$1,00 \times 10^{-6}$	Viscosidade cinemática da água
Re	-	35.000	Número de Reynolds do escoamento
Fr	-	0,19	Número de Froude do escoamento
$C/\sqrt{g}$	-	11,33	Fator de resistência, sendo C o coeficiente de resistência de Chézy
K	m	0,013	Rugosidade do leito, considerada igual ao diâmetro médio do material do leito

Observações:
1) Injeção instantânea uniformemente distribuída na seção transversal do canal.
2) Leito artificialmente rugoso.

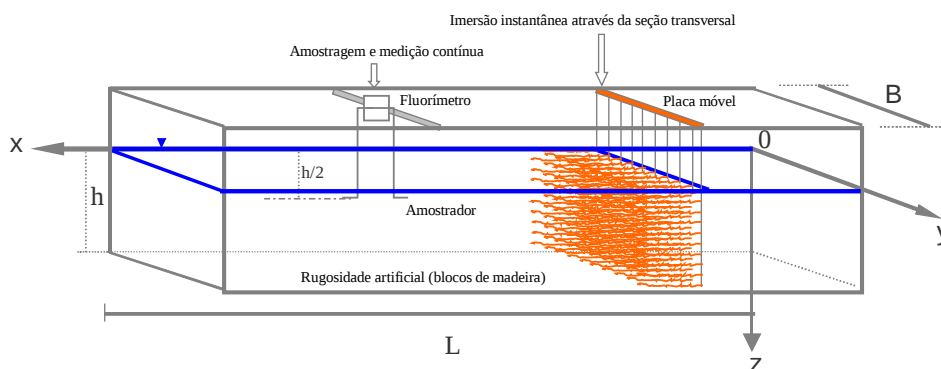


Figura 1 – Sistema esquemático de imersão, amostragem e medição do tempo de passagem do traçador fluorescente através de uma seção transversal. Sayre e Chang (1968)

3.2 Modelo Numérico de um Decantador Clássico Idealizado por Rojas (1995)

As hipóteses do modelo idealizado por Rojas (1995) para o estudo da sedimentação em decantadores foram as seguintes:

- Decantador constituído de um canal prismático largo e longo, de pequena declividade.

- Sistema de coordenadas (xyz) com origem na superfície livre. O eixo 0x tem a direção e o sentido do escoamento, e o eixo 0z, a direção e sentido da aceleração da gravidade. O eixo 0y tem a direção transversal.
- O decantador apresenta quatro zonas distintas: (i) *zona de entrada*: ou de transição do afluente para o escoamento uniforme do interior; (ii) *zona de decantação*: de escoamento uniforme, onde ocorre decantação das partículas; (iii) *zona de saída*: ou de transição do escoamento uniforme para o efluente; (iv) *zona de lodo*: ou de acumulação dos depósitos.
- Vazão líquida constante Q . Na zona de decantação, de comprimento L e profundidade h , o escoamento é permanente, turbulento e uniforme, bidimensional no plano x-z ($v = 0$), ou seja, com gradiente vertical de velocidade e perfis transversais uniformes de água e sedimento.
- Distribuição uniforme de concentração de sedimentos, C_0 , na zona de entrada do decantador.

3.3 Experiências Realizadas por Wilson-Jr. (1980, 1987)

Essas experiências foram realizadas num dos canais do Laboratório Central de Hidráulica da França – *LCHF*, apresentado na **Figura 2**, o qual foi adaptado para os estudos do movimento de sedimentos com transferências verticais. Trata-se de um canal prismático, de seções retangulares de 0,40 m de largura por 0,60 m de altura, de 12 m de comprimento. As paredes do canal são de vidro, possibilitando o acompanhamento visual do movimento das configurações de fundo. As adaptações esquematizadas na **Figura 3** permitiram a realização simultânea de medidas hidrodinâmicas e sedimentológicas, com métodos convencionais e radioisótopos. Entre estas, destacam-se as determinações: (i) do campo bidimensional de velocidades do líquido; (ii) do transporte e da dispersão por arraste de sedimentos não-coesivos injetados no leito do canal; (iii) dos perfis verticais e transversais de concentração de sedimentos coesivos e não-coesivos em suspensão; e (iv) determinação das evoluções temporal e espacial dos sedimentos depositados no leito do canal.

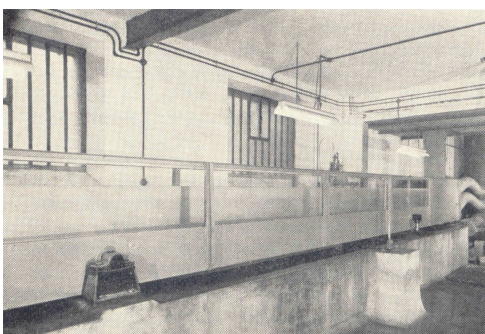


Figura 2 – Canal do Laboratório Central de Hidráulica da França (Wilson-Jr., 1980)

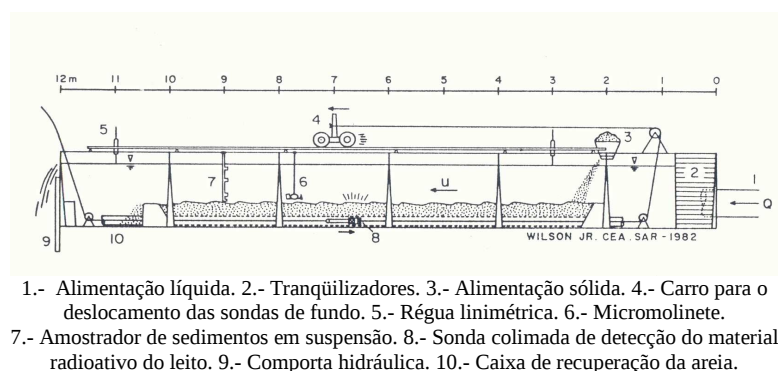


Figura 3 – Adaptações para os estudos do transporte por arraste e em suspensão de sedimentos com uso de traçadores radioativos (Wilson-Jr., 1980, 1987)

A **Tabela 2**, a seguir, apresenta os valores das variáveis hidráulicas, hidrodinâmicas e sedimentológicas características dos ensaios do *LCHF*.

Tabela 2 – Condições hidráulicas e sedimentológicas das experiências realizadas no canal do LCHF (Wilson-Jr., 1980, 1987)

Grandeza		Valores Experimentais	Descrição
Símbolo	Unidade		
B	m	0,40	Largura do canal
h	m	0,20	Tirante ou altura da coluna de água
L	m	12,00	Comprimento do canal
U	m/s	0,297	Velocidade média do escoamento
Q	l/s	23,78	Vazão líquida média do escoamento
$S_o \# S_f$	-	0,0007	Declividades longitudinais do leito e do nível d'água
θ	°C	20,7 a 27,3	Temperatura da água
R_H	m	0,10	Raio hidráulico
u_*	cm/s	2,621	Velocidade média de atrito junto ao leito
τ_o	N/m ²	0,687	Tensão tangencial média junto ao leito
ν	($\times 10^{-6}$) m ² /s	0,975 a 0,836	Viscosidade cinemática da água
Re	-	122.000 a 130.000	Número de Reynolds do escoamento
Fr	-	0,300	Número de Froude do escoamento
$C/\sqrt{g}$	-	11,33	Fator de resistência. C é o coeficiente de Chézy
D_m	mm	0,150	Diâmetro médio do material do leito
σ_1	-	1,37	Desvio-padrão logarítmico do material do leito
Observações: 1) Traçadores radioativos: vidro moído contendo <i>Ouro 198</i> e vasa marcada com <i>Índio 113</i> . 2) Leito do canal composto de areia fina. 3) Configurações de fundo do tipo rugas em equilíbrio dinâmico.			

As experiências consideradas neste artigo, para o estudo do movimento em suspensão, da decantação e evolução dos depósitos de sedimentos coesivos, consistiram da imersão durante um período de tempo, na superfície da linha d'água, e uniformemente distribuída na largura, de vasa marcada com *Índio 113*, na concentração 1,0 g/l. Utilizando-se um misturador elétrico, 10 l da mistura foram injetados com o uso de uma bomba peristáltica de sucção múltipla, como mostrado na **Figura 4** e esquematizado na **Figura 5**.



Figura 4 – Injeção contínua do sedimento na superfície livre do canal do LCHF (Wilson-Jr., 1987)

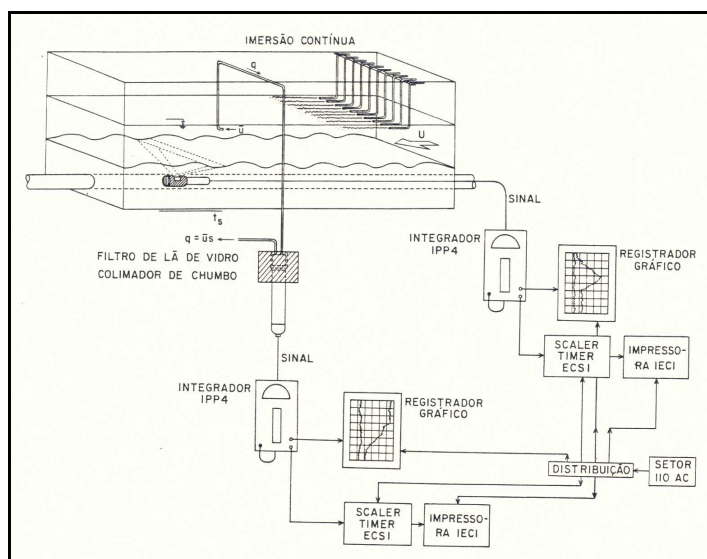


Figura 5 – Sistema de detecção dos movimentos por arraste e em suspensão dos sedimentos no canal do LCHF. (Wilson-Jr., 1980, 1987)

Durante esses estudos, foram determinados: (i) o tempo de passagem do traçador através de seções transversais ao escoamento; (ii) os perfis verticais e transversais de concentração através dessas seções; (iii) os perfis longitudinais dos depósitos no leito, e (iv) suas evoluções temporais.

Para amostragem dos sedimentos em suspensão, tubos de vidro foram distribuídos nas seções transversais do canal, conforme apresentado na **Figura 6**. Os tubos, que coletavam continuamente amostras da mistura líquido-sólido foram distribuídos de tal forma que se pudessem obter os perfis verticais no eixo do canal e transversais à meia altura, de concentração dos sedimentos finos marcados com traçadores radioativos. Cada tubo conduzia a mistura de sedimento para uma caixa de plástico cilíndrica, de cerca de 6 cm de diâmetro por 6 cm de altura, cheia de lã de vidro, colocada em cima de um detector de radiação, como no esquema da **Figura 5**.

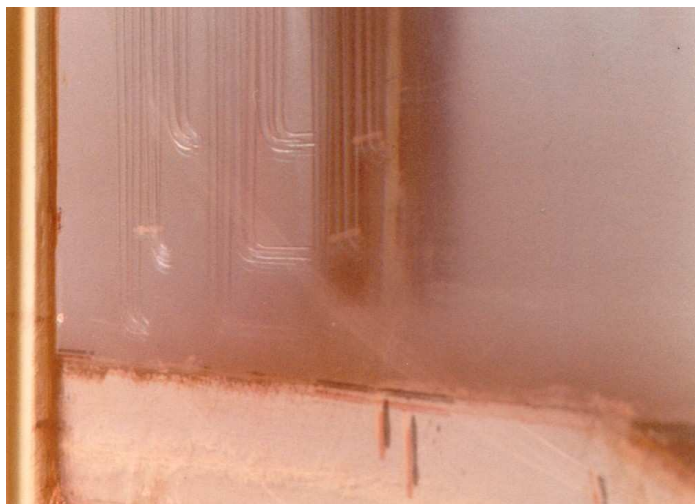


Figura 6 – Disposição dos tubos de vidro numa seção do canal do LCHF (Wilson-Jr., 1980, 1987)

A experiência foi concebida de modo a simular um escoamento natural permanente em equilíbrio hidrodinâmico e sedimentológico, no qual ocorrem injeções ou lançamentos de sólidos e contaminantes, ora no leito, ora em sua superfície livre.

4 APLICAÇÕES DOS MODELOS NUMÉRICOS

4.1 Caso da Injeção Contínua de um Grupo de Partículas Distribuídas Uniformemente na Seção Transversal

Rojas (1995) elaborou dois programas numéricos em linguagem FORTRAN, para solucionar a Equação 2, do movimento de uma mistura de sedimentos finos ou poluentes conservativos, pelo Método de Diferenças Finitas. Um dos programas utiliza o Esquema PTCE – **Progressivo no Tempo e Centrado no Espaço**, para a aproximação das derivadas (**Programa DISPER1**) e o outro utiliza o Esquema PTCE-UW – **Progressivo no Tempo e Centrado no Espaço** com o Esquema *UpWind* (**Programa DISPER2**). Para minimizar as oscilações numéricas, comuns nos esquemas PTCE, e simultaneamente, as dispersões numéricas, próprias dos esquemas PTCE-UW, foi desenvolvido o **Programa CDC-1D-N** (Coeficiente de Dispersão, injeção Contínua, 1 Dimensão, Numérico) (Guimarães, 2006). Esse programa utiliza o esquema de diferença central com ponderações temporais e espaciais, aqui denominado Esquema **LACROIX**. Permite o cálculo dos valores das concentrações em função do tempo ou da distância à seção de injeção, a partir de informações das características hidrodinâmicas dos escoamentos. Os resultados desses programas numéricos foram

comparados com a solução analítica da equação de advecção-difusão em escoamentos unidimensionais, utilizando-se o **Programa CDC-1D-A** (Coeficiente de Dispersão, injeção Contínua, 1 Dimensão, Analítico) (Guimarães, 2006).

Na **Tabela 3** apresentam-se os dados hidrodinâmicos utilizados. A partir desses dados, foi considerada uma faixa de valores do parâmetro adimensional $K_{px+} = K_{px} / K_{px0}$, onde K_{px0} é o valor de referência do coeficiente de dispersão longitudinal. Testou-se, também, a influência do **parâmetro de ponderação temporal**, para $\theta = 1,00; 0,95; 0,75$ e $0,50$ e uma faixa de valores do **parâmetro de ponderação espacial**, $\omega = 0,50; 0,55; 0,60; \dots; 1,00$.

Observa-se na **Figura 7**, uma oscilação típica do Esquema PTCE para pequenos valores do parâmetro K_{px+} . As curvas representadas pelas linhas verdes (NS = 41, Grupo 1) foram obtidas com malha mais espaçada, isto é, 3,125 vezes maior do que aquela utilizada para se obter os valores de cor rosa (NS = 126, Grupo 2). Pode-se verificar que as linhas rosa apresentam pouca oscilação em comparação com a solução analítica. Isto indica que o problema de oscilação numérica pode ser reduzido com o refinamento da malha espacial. Quanto à difusão ou dispersão numérica, ela decorre da discretização pelo método das diferenças finitas. A **Figura 8** (NS = 126, Grupo 2), mostra uma deformação própria dos esquemas *Upwind*, para pequenos valores de K_{px+} .

Tabela 3 – Dados de entrada para os Programas DISPER1 e DISPER2 (Rojas, 1995), CDC-1D-A e CDC-1D-N (Guimarães, 2006)

Grupo	L (m)	H (m)	B (m)	NS	Q (m ³ /s)	U (m/s)	K_{px} (m ² /s)	Δt_+	Δx_+	K_{px+}	Pe
1	20	2	5	41	1,00	0,1	$2,2781640 \times 10^{-3}$	1	0,025	0,001139	21,95
2	20	2	5	126	1,00	0,1	$2,2781640 \times 10^{-3}$	1	0,025	0,001139	7,02
3	20	2	5	41	1,00	0,1	$1,0 \times 10^{-6}$	1	0,025	0,050000	0,50
4	20	0,36	0,5	41	$1,8 \times 10^{-2}$	0,1	$1,333 \times 10^{-2}$	1	0,025	0,006670	3,75
5	20	0,36	0,5	41	$1,8 \times 10^{-2}$	0,1	0,020	1	0,025	0,010000	2,50

Observações: L = comprimento do decantador; H = profundidade; B = largura; NS = número de seções consideradas na direção longitudinal; Q = vazão líquida; U = velocidade média do escoamento; K_{px} = coeficiente de dispersão longitudinal; Δt_+ = incremento de tempo adimensional; Δx_+ = incremento longitudinal adimensional; K_{px+} = coeficiente de dispersão longitudinal adimensional; $Pe = \Delta x_+ / K_{px+}$ = número de Peclet da malha.

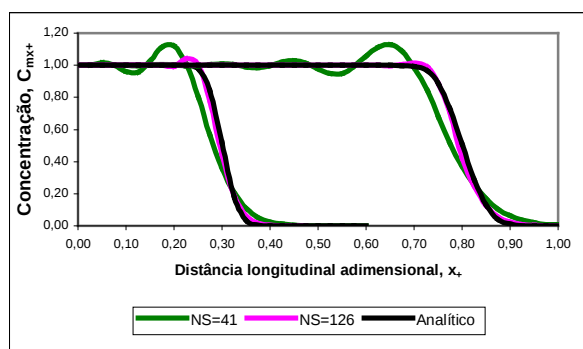


Figura 7 – Concentração em função da distância longitudinal. Esquema PTCE, Grupos 1 e 2.
($K_{px+} = 0,001139$; $Pe = 21,95$; $\theta = 0,5$)

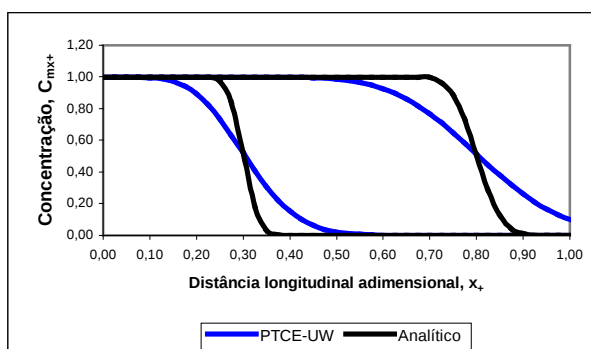


Figura 8 – Concentração em função da distância longitudinal. Esquema PTCE-UW, Grupo 2.
($K_{px+} = 0,001139$; $Pe = 7,02$; $\theta = 0,5$)

A análise da ocorrência de oscilações e dispersões numéricas mostrou que ao se aumentar o valor do parâmetro K_{px+} , tanto a oscilação quanto a difusão numérica diminuam, melhorando a precisão do esquema numérico. Entretanto, os esquemas PTCE e PTCE-UW mostraram-se pouco sensíveis ao parâmetro θ . A precisão do esquema PTCE melhorou um pouco para $\theta = 0,5$, o mesmo não ocorrendo com o PTCE-UW, que permaneceu praticamente invariável, para qualquer valor de θ .

Verificou-se que a introdução do **fator de ponderação espacial, ω** , proposto por Wang e Lacroix (1997) não melhorou os resultados obtidos por Rojas (1995) para valores reduzidos de K_{px+} . Para $\omega = 0,65$ tem-se uma solução intermediária entre os Esquemas PTCE e PTCE-UW, ou seja, menores valores para a oscilação e para a difusão, respectivamente. Porém, o aumento do valor de K_{px+} , produziu melhorias significativas, tanto na oscilação do Esquema PTCE, quanto na difusão numérica do Esquema PTCE-UW, melhorando ainda mais a precisão do Esquema LACROIX, conforme ilustrado na **Figura 9**.

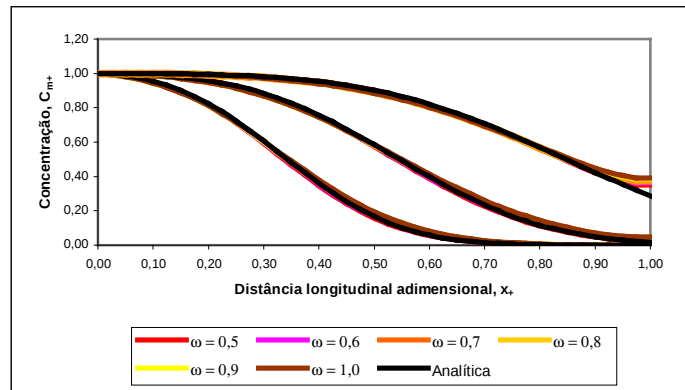


Figura 9 – Concentração em função da distância longitudinal. Esquema LACROIX, Grupo 3 ($K_{px+} = 0,05000$; $Pe = 0,5$; $\theta = 0,5$)

4.2 Caso da Injeção Instantânea de um Grupo de Partículas Distribuídas Uniformemente na Seção Transversal

Foram comparados entre si, os dados dos ensaios de Sayre e Chang (1968), com traçador fluorescente e silte natural, realizados sob as mesmas condições hidrodinâmicas e sedimentológicas.

4.2.1 Determinação da velocidade média de transporte

Os tempos médios de passagem do grupo de partículas pelas seções distantes 10, 20, 27 e 35 m da seção de imersão, estão apresentados na **Tabela 4**, juntamente com suas velocidades médias de trânsito. Para a distância 35 m da seção de imersão, foram realizadas duas experiências com traçador fluorescente, 35 e 35(A) e levantadas duas curvas de passagem.

Tabela 4 – Tempos e velocidades médias de trânsito das partículas de traçador fluorescente e sedimentos finos (Sayre e Chang, 1968)

Distância à seção de imersão, x (m)	EXPERIÊNCIAS COM TRAÇADOR FLUORESCENTE, LO-D1		EXPERIÊNCIAS COM SEDIMENTOS FINOS, LO-FS1	
	Tempo médio de passagem (s)	Velocidade média das partículas U_{px} (m/s)	Tempo médio de passagem (s)	Velocidade média das partículas U_{px} (m/s)
10	41,1	0,242	48,62	0,206
20	85,5	0,235	87,46	0,229
27	116,9	0,230	114,70	0,235
35	153,6	0,228	155,71	0,225
35 (A)	150,4	0,232	—	—

Os valores das velocidades médias das partículas, constantes ao longo do canal, foram obtidos ajustando-se uma reta aos pontos da **Figura 10** (traçador fluorescente) e da **Figura 11** (siltes), onde as distâncias à seção de injeção foram plotadas em função dos tempos médios de passagem das partículas através das seções de medições. A velocidade média das partículas é dada pelo coeficiente angular da reta, que obrigatoriamente passa pela origem, como mostrado nas figuras.

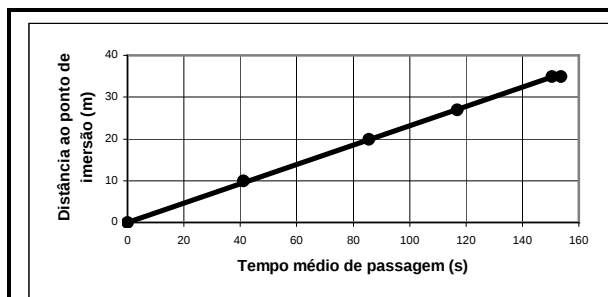


Figura 10 – Distâncias percorridas pelas partículas em função do tempo médio de passagem do traçador fluorescente. Experiências LO-D1 de Sayre e Chang (1968)

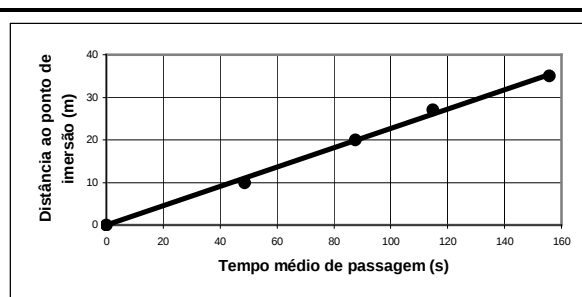


Figura 11 – Distâncias percorridas em função do tempo médio de passagem das partículas de sedimentos finos. Experiências LO-FS1 de Sayre e Chang (1968)

É interessante observar que o valor da velocidade média das partículas de traçador fluorescente, $U_{px} = 0,232$ m/s, é superior à velocidade média do fluido, $U = 0,228$ m/s. Isso significa que a injeção do traçador não foi distribuída instantânea e uniformemente na seção transversal, como idealizado. Na realidade, a constatação visual realizada por Sayre e Chang (1968) em seus ensaios não é suficiente para comprovar a uniformidade do traçador através da seção transversal de injeção. Amostragens através dessa seção, ou nas seções próximas a jusante, teriam sido mais conclusivas. Por outro lado, o valor medido da velocidade média das partículas de sedimentos finos, $U_{px} = 0,227$ m/s, é praticamente equivalente à velocidade média do fluido, $U = 0,228$ m/s.

4.2.2 Coeficiente de dispersão

Os dois programas denominados **CDI-1D-A** e **CDI-1D-N** (Guimarães, 2006), selecionam o valor de K_{px} tal que a soma dos desvios quadráticos entre os valores teóricos e experimentais (**CDI-1D-A**) e numéricos e experimentais (**CDI-1D-N**), das funções densidade ou de distribuição de probabilidade do tempo de trânsito das partículas seja mínima.

Foram realizados três tipos de ajustes das funções densidade de probabilidade teórica, os quais consideram: 1º) a velocidade média do traçador igual à velocidade média do fluido, ou seja, $U_{px} = U$, e um único valor do coeficiente de dispersão K_{px} ; 2º) a velocidade média do traçador igual à velocidade média do fluido, $U_{px} = U$, com valores do coeficiente de dispersão determinados para cada seção de medidas, ou seja, para cada experiência, separadamente; 3º) os valores da velocidade média de trânsito das partículas e do coeficiente de dispersão, determinados para cada experiência.

Os valores das funções objetivo e os respectivos coeficientes de dispersão em função da velocidade média do escoamento, calibrados através do **Programa CDI-1D-A**, para as condições do **1º ajuste**, estão apresentados na **Tabela 5**.

Tabela 5 – Valores do coeficiente de dispersão para o conjunto das experiências de Sayre e Chang (1968)

	EXPERIÊNCIAS COM TRAÇADOR FLUORESCENTE, LO-D1	EXPERIÊNCIAS COM SEDIMENTOS FINOS, LO-FS1
Velocidade média do escoamento, U (m/s)	0,228	0,228
Função objetivo, χ	0,005905	0,002753
Coeficiente de dispersão, K_{px} (m ² /s)	0,0343	0,0299

A **Tabela 6** apresenta os resultados do 2º **ajuste**. Observa-se que os ajustes foram melhores que o anterior, tendo em vista que os valores das funções objetivo foram menores. Na **Tabela 7** são apresentados os resultados do 3º **ajuste**. Os valores das funções objetivo mostram que essa calibração produziu resultados ainda melhores do que os dois ajustes anteriores, ou seja, os melhores ajustes foram obtidos quando as experiências foram consideradas e analisadas de forma independente, embora sob as mesmas condições hidrodinâmicas médias temporais.

Tabela 6 – Coeficientes de dispersão obtidos do 2º ajuste para cada experiência de Sayre e Chang (1968), considerando a velocidade média das partículas igual à do escoamento

	EXPERIÊNCIAS COM TRAÇADOR FLUORESCENTE, LO-D1		EXPERIÊNCIAS COM SEDIMENTOS FINOS, LO-FS1	
Distância à seção de imersão, x (m)	Função objetivo, χ	Coeficiente de dispersão, K_{px} (m ² /s)	Função objetivo, χ	Coeficiente de dispersão, K_{px} (m ² /s)
10	0,002930	0,0463	0,000914	0,0323
20	0,001164	0,0364	0,000421	0,0207
27	0,000437	0,0278	0,000743	0,0425
35	0,000062	0,0289	0,000036	0,0301
35 (A)	0,000758	0,0275	—	—

Tabela 7 – Valores do coeficiente de dispersão de cada experiência LO-D1 e LO-FS1 de Sayre e Chang (1968)

	EXPERIÊNCIAS COM TRAÇADOR FLUORESCENTE, LO-D1			EXPERIÊNCIAS COM SEDIMENTOS FINOS, LO-FS1		
Distância à seção de imersão, x (m)	Velocidade média U_{px} (m/s)	Função objetivo χ	Coeficiente de dispersão K_{px} (m ² /s)	Velocidade média U_{px} (m/s)	Função objetivo χ	Coeficiente de dispersão K_{px} (m ² /s)
10	0,242	0,000649	0,0387	0,219	0,000374	0,0284
20	0,235	0,000199	0,0327	0,232	0,000053	0,0203
27	0,230	0,000195	0,0272	0,237	0,000018	0,0400
35	0,228	0,000062	0,0289	0,227	0,000025	0,0299
35 (A)	0,232	0,000146	0,0247	—	—	—

4.2.3 Funções densidade de probabilidade das experiências LO-D1 de Sayre e Chang (1968)

Utilizando-se o **Programa CDI-1D-N** e os resultados obtidos no 3º **ajuste teórico** obteve-se o coeficiente de dispersão que melhor ajustava as curvas numéricas e experimentais. Os valores das funções objetivo mostram que essa calibração produziu bons resultados (**Tabela 8**).

A **Figura 12** apresenta as curvas de passagem do dispersante pelas seções de medidas. Verifica-se que os modelos teórico e numérico reproduziram, com boa precisão, as funções densidade de probabilidade do movimento do traçador fluorescente em suspensão das experiências

LO-D1 de Sayre e Chang (1968), quando se consideraram os valores das velocidades médias de trânsito das partículas e dos coeficientes de dispersão para cada experiência, separadamente.

Tabela 8 – Coeficiente de dispersão LO-D1 determinado numericamente por experiência (Sayre e Chang, 1968)

Distância à seção de imersão, x (m)	Fator de ponderação espacial, ω	Velocidade média, U_{px} (m/s)	Função objetivo, χ	Coeficiente de dispersão, K_{px} (m ² /s)
10	0,65	0,242	0,000093	0,040000
20	0,65	0,235	0,000032	0,032700
27	0,65	0,228	0,000034	0,027800
35	0,65	0,228	0,000036	0,028800
35 (A)	0,65	0,230	0,000029	0,024500

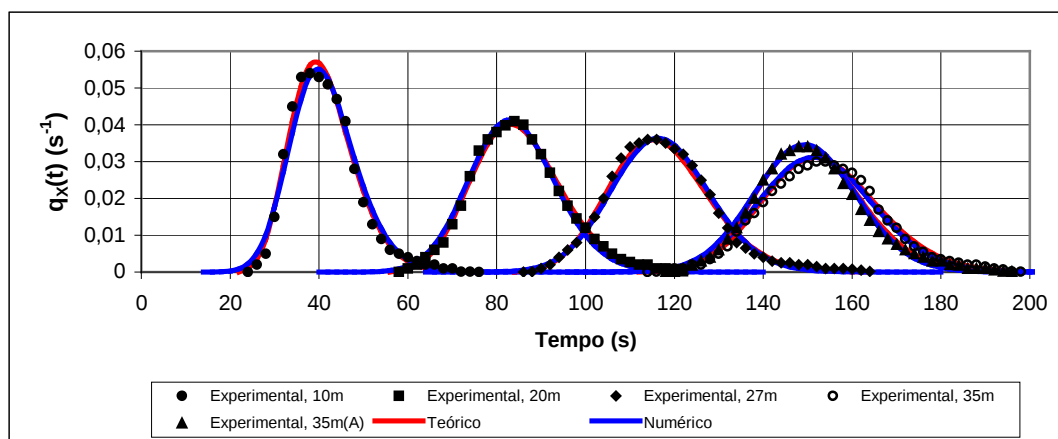


Figura 12 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem do traçador fluorescente pelas seções de medidas das experiências LO-D1 de Sayre e Chang (1968). Aplicações dos Modelos Teórico e Numérico

4.2.4 Funções densidade de probabilidade das experiências LO-FS1 de Sayre e Chang (1968)

Analogamente, obteve-se o coeficiente de dispersão que melhor ajustava as curvas numéricas e experimentais dos ensaios LO-FS1. Os valores das funções objetivo mostram que essa calibração também produziu bons resultados, conforme apresentado na **Tabela 9**. A **Figura 13** apresenta as curvas de passagem das partículas de sedimentos finos pelas seções de medidas. Verifica-se que o modelo numérico reproduziu tão bem as curvas das funções densidade de probabilidade do tempo de passagem dos sedimentos em suspensão das experiências LO-FS1, consideradas separadamente, quanto o modelo analítico.

Tabela 9 – Valores do coeficiente de dispersão de cada experiência LO-FS1 de Sayre e Chang (1968), determinados numericamente

Distância à seção de imersão, x (m)	Fator de ponderação espacial, ω	Velocidade média, U_{px} (m/s)	Função objetivo, χ	Coeficiente de dispersão, K_{px} (m ² /s)
10	0,65	0,206	0,001753	0,0695
20	0,65	0,228	0,000145	0,0355
27	0,65	0,220	0,000533	0,0345
35	0,65	0,226	0,000015	0,0288

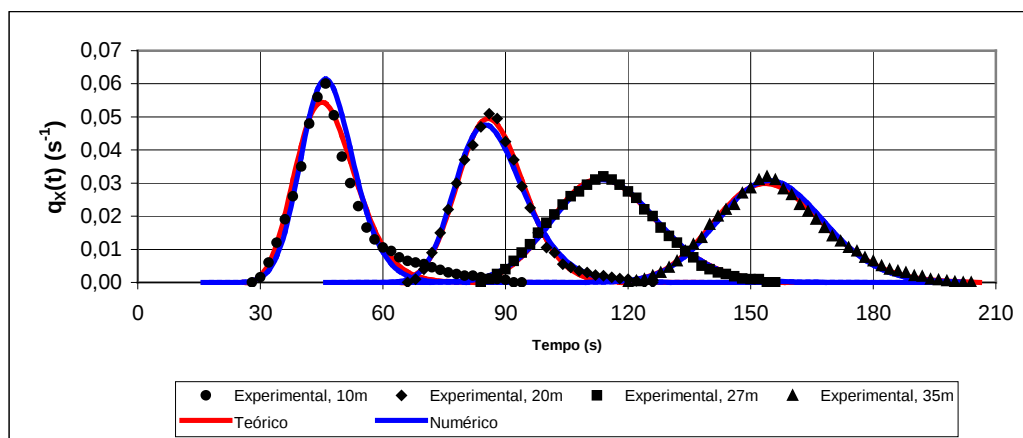


Figura 13 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem das partículas do sedimento pelas seções de medidas das experiências LO-FS1 de Sayre e Chang (1968). Aplicações dos Modelos Teórico e Numérico

4.3 Caso de uma Injeção na Superfície Livre, num Intervalo de Tempo, de um Grupo de Partículas Distribuídas Uniformemente na Largura do escoamento

4.3.1 Aplicações dos Modelos Analíticos aos Dados das Experiências Realizadas no LCHF por Wilson-Jr. (1980, 1987)

Para o estudo unidimensional foi necessário calcular os valores da concentração mássica média temporal de sedimento, $\bar{C}_m(x, y, t)$, em função do tempo:

$$\bar{C}_m(x, y, t) = \frac{1}{h} \int_0^h \bar{c}(x, y, z', t) dz' \quad (5)$$

➤ Ajustes dos dados das experiências com Vasa de concentração 1,0 g/l, utilizando-se os Programas Analíticos LCHF-1D-A e LCHF-1D-AT

Para a análise desses dados foram utilizados dois programas em linguagem FORTRAN, LCHF-1D-A (LCHF - 1 Dimensão, programa Analítico) e LCHF-1D-AT (LCHF - 1 Dimensão, programa Analítico que considera Todas as seções de medidas, simultaneamente) (Guimarães, 2006). Esses programas selecionam um valor do coeficiente de dispersão, K_{px} , tal que seja mínima a soma dos desvios quadráticos entre os valores teóricos e experimentais das funções de distribuição ou das funções densidade de probabilidade do tempo de passagem das partículas pelas seções de medidas. Foram realizados dois tipos de ajustes, cujos resultados são resumidos na **Tabela 10**, para as experiências dos dias 12 e 13/08/1980, os quais consideram: (1º) A velocidade média do traçador igual à velocidade média do fluido, $U_{px} = U = 0,297$ m/s, mas com valores do coeficiente de dispersão determinados para cada seção de medidas (**Programa LCHF-1D-A**). (2º) A velocidade média do traçador igual à do fluido, $U_{px} = U = 0,297$ m/s, e um único valor do coeficiente de dispersão, K_{px} , tendo em vista que se trata de uma mesma experiência (**Programa LCHF-1D-AT**).

As funções densidade de probabilidade do tempo de passagem do traçador pelas seções $x = 1,0$ m e $x = 5,0$ m, do ensaio do dia 12/08, e pelas seções $x = 3,0$ m e $x = 5,0$ m, do ensaio do dia 13/08/1980, obtidas do 1º ajuste teórico, estão apresentadas nas **Figuras 14 a 17**, a seguir.

Tabela 10 – Valores do coeficiente de dispersão, calculados pelos Programas LCHF-1D-A e LCHF-1D-AT (Guimarães, 2006), para as experiências realizadas por Wilson-Jr. (1980, 1987)

Ajuste	Seção de medidas	Distância à seção de imersão, x (m)	Função objetivo χ	Coeficiente de dispersão K_{px} (m ² /s)
Experiência do dia 12/08/1980				
1º	1 m	1	0,000016	0,002299
1º	5 m	5	0,000013	0,002299
2º	1 e 5 m	1 e 5 (simultâneas)	0,000030	0,002300
Experiência do dia 13/08/1980				
1º	3 m	3	0,000008	0,009000
1º	5 m	5	0,000010	0,008937
2º	3 e 5 m	3 e 5 (simultâneas)	0,000018	0,009000

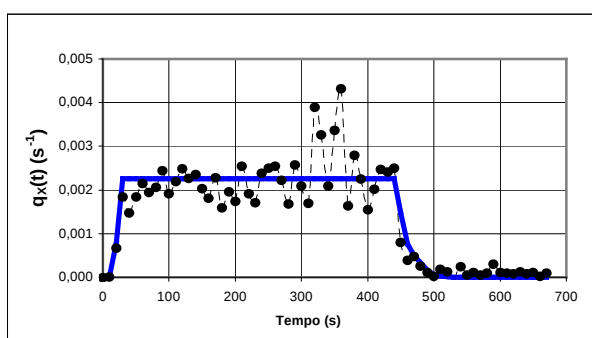


Figura 14 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pela seção $x = 1,0$ m

1º Ajuste Teórico. Experiência realizada em 12/08/1980 por Wilson-Jr.

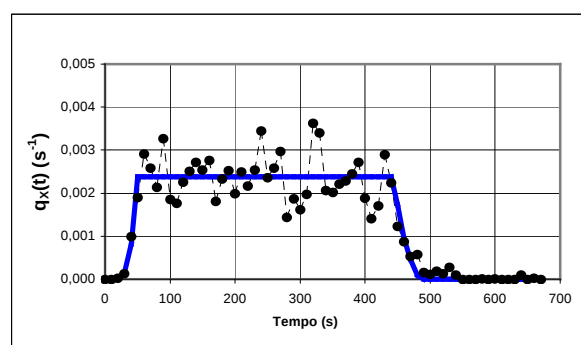


Figura 15 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pela seção $x = 5,0$ m

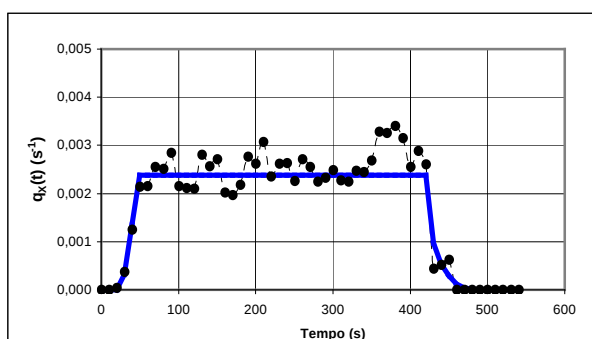


Figura 16 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pela seção $x = 3,0$ m

1º Ajuste Teórico. Experiência realizada em 13/08/1980 por Wilson-Jr.

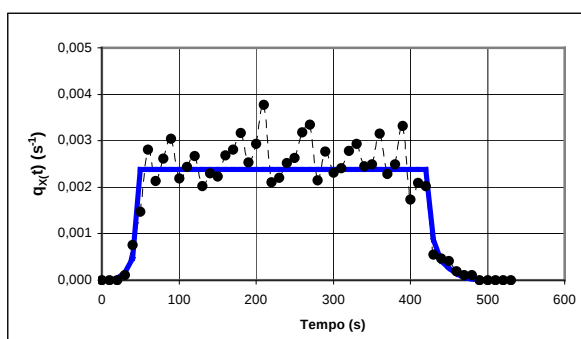


Figura 17 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pela seção $x = 5,0$ m

As funções densidade de probabilidade do tempo de passagem do traçador pelas seções $x = 1,0$ m e $x = 5,0$ m, da primeira experiência e $x = 3,0$ m e $x = 5,0$ m, da segunda, relativas ao 2º ajuste teórico, estão apresentadas nas Figuras 18 e 19, respectivamente.

Conclui-se que o modelo teórico descreveu bem as funções densidade de probabilidade do movimento da vasa em suspensão. As aproximações foram boas, tanto quando se consideraram os valores da velocidade média do traçador iguais ao da velocidade média do fluido e se calcularam coeficientes de dispersão para cada seção de medidas (Figuras 14 a 17), quando se utilizou um único valor do coeficiente de dispersão para as duas seções (Figuras 18 e 19).

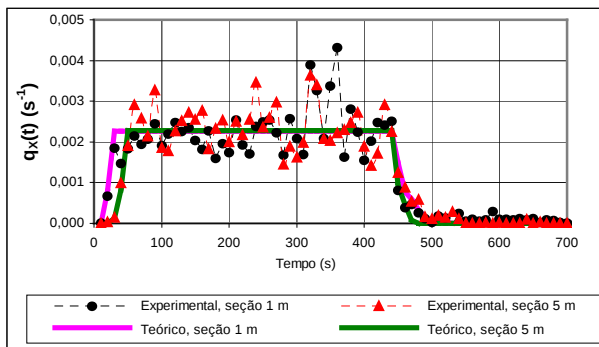


Figura 18 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pelas seções $x = 1,0 \text{ m}$ e $x = 5,0 \text{ m}$. 2º Ajuste Teórico. Ensaio de 12/08/1980. Wilson-Jr. (1980)

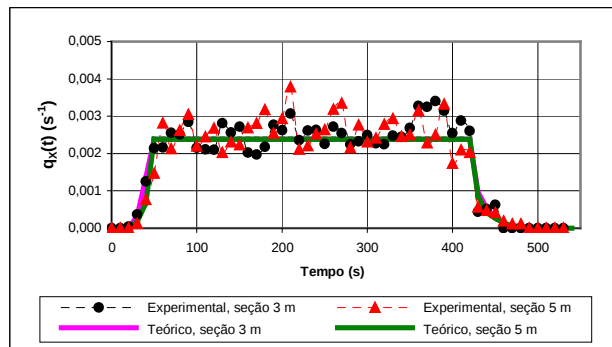


Figura 19 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pelas seções $x = 3,0 \text{ m}$ e $x = 5,0 \text{ m}$. 2º Ajuste Teórico. Ensaio de 13/08/1980. Wilson-Jr. (1980)

4.3.2 Aplicações dos Modelos Numéricos aos Dados das Experiências Realizadas no LCHF por Wilson-Jr. (1980, 1987)

Para a análise numérica dos dados foi utilizado o Método das Diferenças Finitas, e os programas em linguagem FORTRAN: **LCHF-1D-N** (**LCHF**, **1 Dimensão**, programa Numérico), e **LCHF-1D-NT** (**LCHF**, **1 Dimensão**, programa Numérico que considera Todas as seções de medidas, simultaneamente) (Guimarães, 2006). Esses programas selecionam um valor do coeficiente de dispersão, K_{px} , de modo que seja mínima a soma dos desvios quadráticos entre os valores numéricos e experimentais das funções de distribuição ou de densidade de probabilidade do tempo de passagem das partículas pelas seções de medidas.

Os programas solucionam a equação do transporte unidimensional de uma mistura de sedimentos finos ou poluentes conservativos, através do Método da Dupla Varredura com Alternância de Direção Implícito – Método ADI. Utilizam o Esquema LACROIX: progressivo no tempo, centrado no espaço com o Esquema *Upwind*, com ponderações temporais e espaciais, conforme proposto por Wang e Lacroix (1997). Além da seleção do valor de K_{px} , os programas calculam os valores das concentrações em função do tempo ou da distância à seção de injeção, a partir de informações das características hidrodinâmicas dos escoamentos.

➤ Ajustes dos dados das experiências com Vasa de concentração 1,0 g/l, utilizando-se os Programas Numéricos LCHF-1D-N e LCHF-1D-NT

Na calibração das experiências do **LCHF** foram realizados os dois ajustes anteriores: no primeiro considerou-se a velocidade média do traçador igual à velocidade média do fluido e os valores do coeficiente de dispersão determinados para cada seção de medidas separadamente, utilizando-se o **Programa LCHF-1D-N**, e, no segundo, a velocidade média do traçador também foi considerada igual à velocidade média do fluido mas, desta vez, adotou-se um único valor para o coeficiente de dispersão, K_{px} , utilizando-se o **Programa LCHF-1D-NT**. Esses valores estão apresentados na **Tabela 11**, onde também são apresentados os valores dos parâmetros θ e ω .

Tabela 11 – Valores do coeficiente de dispersão, calculados pelos Programas LCHF-1D-N e LCHF-1D-NT (Guimarães, 2006), para as experiências realizadas por Wilson-Jr. (1980, 1987)

Ajuste	Seção de medidas	Distância à seção de imersão x (m)	Parâmetro θ	Parâmetro ω	Função objetivo χ	Coeficiente de dispersão K_{px} (m ² /s)
Experiência do dia 12/08/1980						
1º	1 m	1	0,99	0,65	0,000018	0,002294
1º	5 m	5	0,50	0,65	0,000014	0,002296
2º	1 e 5 m	1 e 5 (simultâneas)	0,50	0,77	0,000083	0,002304
Experiência do dia 13/08/1980						
1º	3 m	3	0,98	0,85	0,000012	0,008951
1º	5 m	5	0,98	0,77	0,000009	0,009053
2º	3 e 5 m	3 e 5 (simultâneas)	0,65	0,95	0,000044	0,009070

As funções densidade de probabilidade do tempo de passagem do traçador pelas seções transversais $x = 1,0$ m e $x = 5,0$ m, da primeira experiência e $x = 3,0$ m e $x = 5,0$ m, da segunda, obtidas do 1º ajuste numérico, estão apresentadas nas **Figuras 20 a 23**, respectivamente.

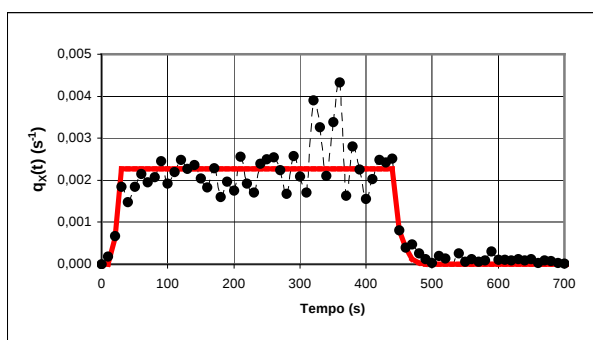


Figura 20 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pela seção $x = 1,0$ m

1º Ajuste Numérico. Experiência realizada em 12/08/1980 por Wilson-Jr.

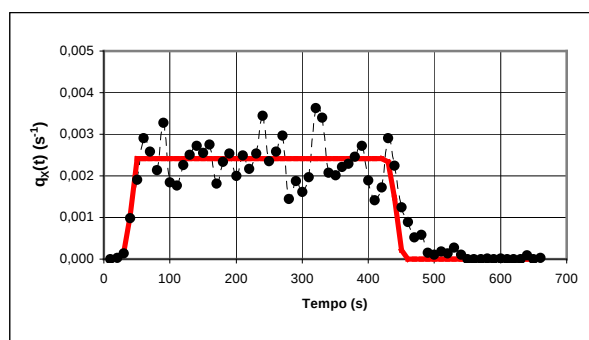


Figura 21 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pela seção $x = 5,0$ m

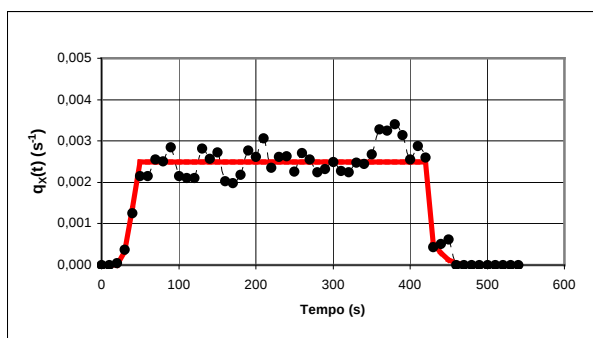


Figura 22 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pela seção $x = 3,0$ m

1º Ajuste Numérico. Experiência realizada em 13/08/1980 por Wilson-Jr.

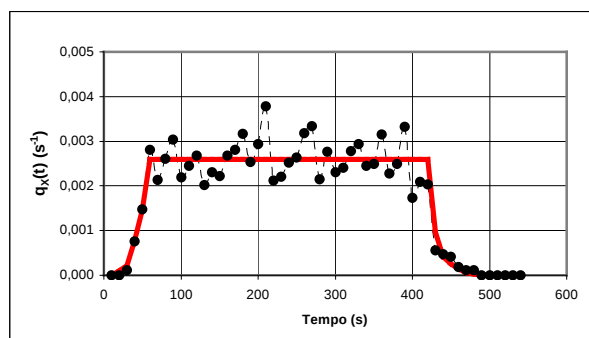


Figura 23 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pela seção $x = 5,0$ m

Analogamente, as funções densidade de probabilidade do tempo de passagem do traçador pelas seções de medidas, obtidas do 2º ajuste numérico, estão apresentadas nas **Figuras 24 e 25**.

Conclui-se das **Figuras 20 a 25**, que o modelo numérico também fez uma boa descrição das funções densidade de probabilidade, para a vasa em suspensão, para os dois ensaios e dois ajustes.

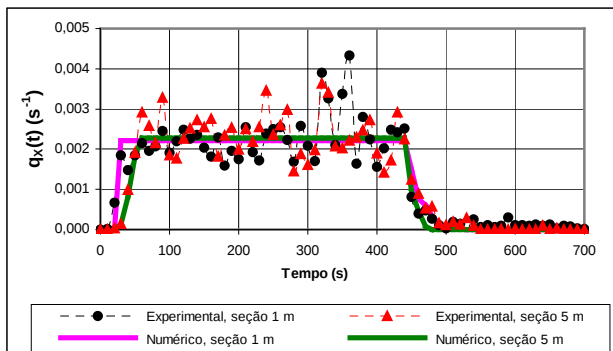


Figura 24 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pelas seções $x = 1,0$ m e $x = 5,0$ m. 2º Ajuste Numérico. Ensaio de 12/08/1980. Wilson-Jr. (1980)

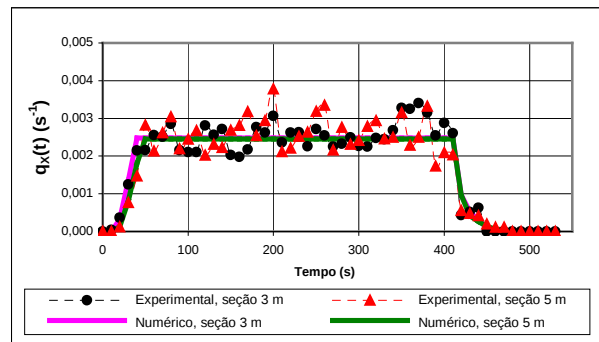


Figura 25 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pelas seções $x = 3,0$ m e $x = 5,0$ m. 2º Ajuste Numérico. Ensaio de 13/08/1980. Wilson-Jr. (1980)

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Caso da Injeção Contínua de um Grupo de Partículas Distribuídas Uniformemente através da Seção Transversal

Este estudo baseou-se na análise da solução numérica, pelo Método das Diferenças Finitas, da equação unidimensional de advecção-dispersão. Utilizando-se os **Programas DISPER1** (Esquema PTCE) e **DISPER2** (Esquema PTCE-UW), Rojas (1995) verificou a existência das duas maiores dificuldades associadas a uma solução numérica: a oscilação, típica do Esquema PTCE, e a difusão numérica, característica do Esquema PTCE-UW.

Para reduzir esses problemas, e, seguindo uma metodologia proposta por Wang e Lacroix (1997), elaborou-se o **Programa CDC-1D-N** (Guimarães, 2006), através do qual melhoraram-se os resultados obtidos por Rojas (1995). Algumas observações a respeito desses esquemas e programas numéricos são apresentadas a seguir: (i) quando o parâmetro de ponderação espacial $\omega = 0,5$, obtém-se o Esquema PTCE e, quando $\omega = 1,0$, obtém-se o Esquema PTCE-UW; (ii) os Esquemas PTCE e PTCE-UW não se mostraram sensíveis ao parâmetro de ponderação temporal, θ , embora a precisão do Esquema PTCE tenha melhorado ligeiramente para $\theta = 0,5$; (iii) a introdução do parâmetro ω não melhorou os resultados obtidos por ROJAS (1995) com os Esquemas PTCE e PTCE-UW, para valores pequenos de K_{px+} ; (iv) para $\omega = 0,65$ obteve-se uma solução intermediária entre os Esquemas PTCE e PTCE-UW, ou seja, com menores oscilações do que as obtidas com o Esquema PTCE e com menores dispersões do que as obtidas com o Esquema PTCE-UW; (v) o aumento do valor de K_{px+} , produziu melhorias significativas, tanto na oscilação quanto na difusão numérica, melhorando ainda mais a precisão do Esquema LACROIX.

5.2 Caso da Injeção Instantânea de um Grupo de Partículas Distribuídas Uniformemente através da Seção Transversal

Sayre e Chang (1968) aplicaram a Teoria de Difusão Fickiana na análise dos resultados de suas experiências, considerando valores constantes para os coeficientes de dispersão e velocidade

média do escoamento. Admitiram também, que $U_{px} = U = \text{constante}$. Entretanto, constatou-se que o valor medido da velocidade média das partículas de traçador fluorescente (LO-D1), $U_{px} = 0,232 \text{ m/s}$, foi superior à velocidade média do fluido, $U = 0,228 \text{ m/s}$, em todas as seções. Isso indicou que a distribuição inicial do traçador, aparentemente, não foi uniforme na seção de imersão.

O valor medido da velocidade média das partículas de sedimento (LO-FS1), $U_{px} = 0,227 \text{ m/s}$, foi ligeiramente inferior à velocidade média do fluido, $U = 0,228 \text{ m/s}$. Essas experiências foram realizadas com sedimentos extremamente finos, na faixa dos sedimentos pelíticos, de modo que o efeito da gravidade não fosse sentido de forma significativa, o que pode não ter ocorrido. Teoricamente, depois de misturados através da seção transversal, os sedimentos pelíticos são transportados com velocidade média igual à do escoamento. Entretanto, na prática, o valor de U_{px} foi ligeiramente menor do que U , o que pode ser devido aos seguintes fatores, entre outros: (i) maior densidade da mistura água-sedimento; (ii) eficiência do misturamento do dispersante durante a injeção; (iii) ação da gravidade e sedimentação; (iv) ação dos componentes verticais da turbulência; (v) dispositivo e técnica de misturamento e injeção dos sedimentos.

A hipótese Fickiana de coeficiente de dispersão constante em todos os ensaios não foi confirmada, nem nas experiências com traçador fluorescente nem com silte natural. Isso pode ser justificado pelo fato de ter-se utilizado somente um sistema de amostragem contínua, tornando-se necessário repetir as operações de imersão e de medida de concentração em cada uma das seções estudadas nas mesmas condições hidrodinâmicas médias.

De acordo com Fischer (1967) e Sayre e Chang (1968), a teoria Fickiana apresenta melhores resultados com o aumento do tempo de dispersão, ou da distância ao ponto de imersão. Com efeito, verificou-se que, somente nos ensaios relacionados às seções 27 e 35 m, o transporte e a dispersão do traçador fluorescente não foram influenciados pelas condições de imersão do traçador. Constatação também verificada para as seções 20, 27 e 35 m, nos ensaios com sedimentos finos. Isso significa que para essas distâncias ocorreu bom misturamento do traçador na seção transversal. Observou-se, também, que os menores valores das funções objetivos foram obtidos quando se consideraram os valores da velocidade média de trânsito das partículas e do coeficiente de dispersão, para cada experiência, conforme apresentado na **Tabela 7**.

Quanto às funções densidade probabilidade, as curvas apresentadas nas **Figuras 12 e 13**, relacionadas ao estudo do traçador fluorescente e silte natural, respectivamente, mostram que os modelos teórico e numérico se ajustam perfeitamente aos dados experimentais, quando se consideram os valores das velocidades médias de trânsito das partículas e dos coeficientes de dispersão, por experiência, conforme realizado no 3º ajuste.

5.3 Caso da Injeção na Superfície Livre, num Intervalo de Tempo, de um Grupo de Partículas Distribuídas Uniformemente na Largura

Os dois tipos de ajustes realizados com os dados das experiências do *LCHF*, em que o coeficiente de dispersão foi calculado para cada seção de medidas (1º ajuste), e, para as duas seções de uma mesma experiência (2º ajuste), utilizando-se tanto os **Programas Analíticos LCHF-1D-A e LCHF-1D-AT**, quanto os **Programas Numéricos LCHF-1D-N e LCHF-1D-NT**, foram precisos. Os valores experimentais e teóricos das funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pelas seções de medidas, atestam a boa qualidade dos ajustes (**Figuras 14 a 25**).

Vários fatores contribuíram para que se obtivessem esses bons resultados, destacando-se os critérios e dispositivos experimentais originais elaborados para os ensaios no canal do *LCHF*, com o estabelecimento e manutenção das condições de equilíbrio hidrodinâmico e sedimentológico, e com os sistemas precisos de imersão e detecção do traçador.

Consequentemente, através das aplicações realizadas, verificaram-se: (i) a uniformidade da injeção do traçador através da largura do canal; (ii) que somente nas seções transversais mais distantes ($x = 5$ m), o transporte e a dispersão não foram influenciados pelas condições de imersão; (iii) que os dispositivos experimentais permitiram medir, com precisão, o transporte e a dispersão das partículas; (iv) a hipótese Fickiana de coeficientes de dispersão e velocidade média do escoamento, constantes nas seções transversais, mesmo para instantes logo após a imersão do traçador e seção muito próxima à imersão, $x = 1$ m, por exemplo; (v) a hipótese de que os sedimentos pelíticos, após misturados através da seção transversal, são transportados com velocidade igual à velocidade média do escoamento, e dispersos pela ação combinada da difusão turbulenta e da advecção diferencial devida às variações espaciais de velocidades.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Na **Figura 26**, foram plotadas as curvas das funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pela seção $x = 5$ m, relativas aos dois ensaios realizados no *LCHF*. Constataram-se a eficiência dos dispositivos e cuidados experimentais pois, embora os ensaios tenham sido realizados em dias diferentes, eles puderam ser tratados como se tivessem sido realizados simultaneamente.

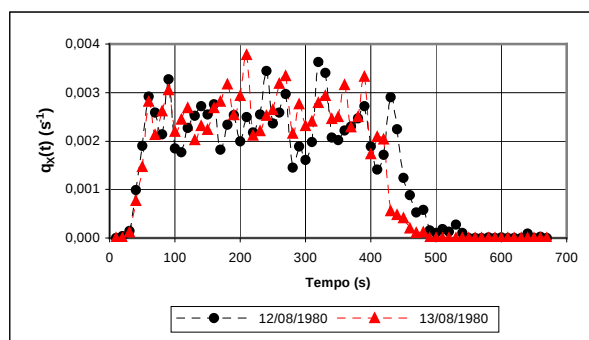


Figura 26 – Funções densidade de probabilidade do tempo de passagem da vasa pela seção $x = 5,0$ m. Experiências realizadas por Wilson-Jr. (1980, 1987)

Os modelos analítico e numérico mostraram-se capazes de prever os tempos de passagem de uma nuvem de poluentes ou de sedimentos finos do tipo “wash load” através das seções

transversais de canais de laboratório. Dessa forma, eles são recomendados para o estudo do transporte, da dispersão, e, conseqüentemente, da poluição de cursos d'água naturais.

O Esquema LACROIX, com ponderações temporal e espacial, melhorou o ajuste e minimizou o problema de oscilações e difusão numérica em todos os casos considerados. Recomenda-se sua adoção para o estudo bidimensional do movimento de partículas de sedimentos finos nos escoamentos com superfície livre.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fischer H.B., 1967, "The mechanics of dispersion in natural streams". *Journal of the Hydraulics Division*. Vol.93, nº HY6 (Jun), pp.187-216.
- Graf, W. H., 1971. "*Hydraulics of sediment transport*". McGraw-Hill Book Company. New York, 513 p.
- Guimarães, M. M., 2006. Estudo do movimento de partículas de sedimentos finos nos escoamentos com superfície livre com transferências verticais. *Tese de doutorado em ciências em engenharia civil/recursos hídricos*. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, 436 p.il.
- Rojas, B.P.S., 1995, *Modelo numérico para o cálculo da sedimentação em um decantador clássico*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, 200p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Sayre, W.W., Chang, F.M., 1968, *A laboratory investigation of open-channel dispersion processes for dissolved, suspended, and floating dispersants. Transport of Radionuclides by Streams*. Geological Survey, Professional Paper 433-E, 71p. Washington.
- Taylor, G.I., 1921, "Diffusion by continuous movements". *London Math. Society Proceeding*, Ser. 2, Vol. 20, pp.196-211.
- _____, 1953, "Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube". *Proceedings of the Royal Society of London*. Vol. 219. Series A, nº 1137, pp.186-203.
- Wang, H.Q., Lacroix, M., 1997, "Optimal weighting in the finite difference solution of the convection-dispersion equation". *Journal of Hydrology*. Vol. 200, pp.228-242.
- Wilson-Jr, G., 1980, *Programme d'études expérimentales sur le comportement des sédiments fins dans des écoulements à surface libre*. Rapport SAR/S/80/6W11/GW.
- _____, 1987, Etude du transport et de la dispersion des sédiments en tant que Processus Aléatoires. *Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Physiques*. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 419 p.il, Paris, France.