

MODELO DE QUANTIFICAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO LONGITUDINAL DE PEQUENOS CURSOS DE ÁGUA NATURAIS

LONGITUDINAL DISPERSION COEFFICIENT QUANTIFICATION MODEL OF STREAMS

JULIMARA ALVES DEVENS

Engenheira Civil pela Escola de Minas/UFOP. Mestre em Engenharia Ambiental – Pró-Água/UFOP

ANTENOR RODRIGUES BARBOSA JÚNIOR

Engenheiro Civil. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Professor do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas/UFOP

GILBERTO QUEIROZ DA SILVA

Engenheiro Geológico e de Minas. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Professor do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas/UFOP

Recebido: 31/03/06 Aceito: 01/08/06

RESUMO

Nesse estudo, técnicas de campo são utilizadas para determinar o coeficiente de dispersão longitudinal, E_L , que é um parâmetro presente nos modelos Fickianos. Esses modelos explicam como a concentração de um poluente decai enquanto transportado pelo rio. No cálculo de E_L é aplicado o método da propagação (*routing procedure*) corrigido para considerar a perda do traçador. Uma equação semi-empírica de previsão de E_L é deduzida a partir de modelo de turbulência e da aplicação da análise dimensional. A equação é ajustada aos dados de campo pela técnica de regressão linear múltipla. A equação estima o coeficiente E_L com base nas características físicas e hidráulicas facilmente mensuráveis dos corpos de água naturais. São apresentados também resultados da aplicação do modelo proposto utilizando-se dados disponíveis na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Dispersão longitudinal, traçador, qualidade da água.

ABSTRACT

*In this study, field techniques are used to determine the longitudinal dispersion coefficient, E_L , which is a parameter of Fickian models. These models explain how the concentration of a pollutant decays while is carried by the river. In the calculation of E_L , the propagation method (*routing procedure*) corrected by tracer loss is applied. A semi-empirical equation that forecasts E_L is deduced from the turbulence model and dimensional analysis application. The equation is adjusted using multiple linear regression technique with field data. The equation estimates E_L based on easily measurable physical and hydraulic characteristics of natural water bodies. The paper also presents results on the application of the proposed model based on data available in the literature.*

KEYWORDS: Longitudinal dispersion, tracer, water quality.

INTRODUÇÃO

A utilização de modelos de qualidade da água em ambientes naturais é uma ferramenta de grande utilidade para o gerenciamento dos recursos hídricos. No caso do transporte de poluentes em cursos de água naturais, a equação da advecção-dispersão é amplamente utilizada na sua forma unidimensional para prever a distribuição espacial e temporal da substância dissolvida, quer o lançamento tenha ocorrido intencional ou acidentalmente. Entre os parâmetros importantes desses modelos está o coeficiente de dispersão longitudinal, E_L , que mede a maior ou menor facilidade encontrada

pelo curso de água natural para dispersar o poluente que em suas águas se dissolve. Nas aplicações com modelos de qualidade da água em que E_L deve ser conhecido, destacam-se os estudos voltados para a avaliação do impacto ambiental causado pelo lançamento de resíduos de natureza industrial ou de origem doméstica.

Equação da advecção-dispersão

No campo da modelagem da qualidade da água em rios, para descrever os mecanismos de transporte e dispersão de poluentes é necessário combinar o efeito da difusão molecular, responsá-

vel pela mistura devida ao movimento browniano das partículas, da difusão turbulenta, causada pela turbulência presente nos escoamentos naturais, e da advecção diferenciada, consequência da não uniformidade dos perfis de velocidade do escoamento. Apesar do grau de complexidade envolvido na consideração dos efeitos determinantes no processo de transporte de massa em cursos de água naturais, a formulação matemática diferencial é bastante simplificada pela introdução do conceito de dispersão longitudinal. O balanço de massa tem os fluxos regidos pela lei de Fick e produz a conhecida equação da advecção-dispersão que, na forma unidimensional se escreve como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = E_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

onde E_L = coeficiente de dispersão longitudinal; U e C = valores médios de velocidade e concentração, respectivamente; t = tempo em que o processo se desenvolve; x = direção do escoamento.

Uma solução da Eq.(1) de interesse para este estudo é decorrente de uma injeção instantânea da massa M de uma substância (traçador), uniformemente distribuída em uma seção transversal de área A , localizada na posição $x = 0$, para as seguintes condições iniciais e de contorno

$$\begin{aligned} C(x, 0) &= M\delta(x) \\ C(\pm\infty, t) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

em que $\delta(x)$ indica a função delta de Dirac, que possui as seguintes propriedades:

$$\begin{aligned} \delta(x) &= 0, \text{ exceto em } x = 0 \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Nessas condições, tem-se como solução fundamental da Eq.(1)

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi E_L t}} \exp\left[-\frac{(x - Ut)^2}{4E_L t}\right] \quad (4)$$

Método de determinação direta de E_L

Os procedimentos de obtenção direta do coeficiente de dispersão longitudinal baseiam-se no tratamento matemático das distribuições temporais da concentração, geradas em teste de campo conduzido com traçador artificialmente injetado no curso de água. Entre os procedimentos de obtenção direta do coeficiente de dispersão longitudinal destacam-se o método dos momentos, o método da propagação ou *routing procedure*, os métodos gráficos de Krenkel e de Chatwin, e dois outros métodos simples, que se baseiam nas propriedades da solução fundamental da equação da advecção-dispersão e são denominados método da concentração de pico e método da concentração de referência ou coroa de concentração. Em Barbosa Jr. et al (2005a, 2005b) é apresentada a metodologia de cálculo e aplicação.

Em termos práticos, quando se empregam os métodos diretos em estudos de campo, tem-se o problema de definição do comprimento da zona advectiva, L_x , dentro da qual a mistura lateral ainda não é completa e, rigorosamente, a Eq.(4) ainda não se aplica. Somente após uma distância suficientemente grande da seção de injeção do traçador é que a mistura torna-se completa, quando então a equação da advecção-dispersão torna-se válida e os métodos diretos de quantificação de E_L são aplicáveis. O comprimento L_x é estimado pela Eq.(5), adaptada de Fischer et al (1979), *apud* Barbosa Jr., Silva & Giorgetti (1999):

$$L_x = 0,160 \frac{U \cdot B^2}{H^{3/2} \cdot S^{1/2}} \quad (5)$$

em que U = velocidade média; B = largura média do trecho de mistura; H = profundidade média do escoamento; S = declividade do canal, para as grandezas escritas no Sistema Internacional de Unidades.

Fórmulas práticas de estimativa de E_L

Embora os métodos de determinação direta do coeficiente de dispersão longitudinal produzam os valores mais confiáveis do parâmetro, razões associadas ao custo de realização dos ensaios de campo e necessidade de pessoal técnico qualificado, fazem com que se utilizem formulações práticas de previsão de E_L . Estas formulações são equações simples de natureza empírica e semi-empírica, que relacionam o coeficiente E_L com quantidades físicas facilmente mensuráveis, como a profundidade e a largura média, a declividade e a velocidade média do escoamento. Entre as fórmulas práticas encontradas na literatura, destacam-se as equações de Elder, McQuivey & Keefer, Fischer, Liu, Beltaos, Nikora & Sukhodolov, Vargas & Mellado, Seo & Cheong, Koussis & Rodrigues-Mirasol e Kasherfipour & Falconer. Algumas aplicações com as fórmulas práticas foram realizadas por Devens (2006).

METODOLOGIA

Estudos de campo

O objetivo do presente trabalho foi implementar a técnica de campo

de quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal, com o uso de traçador salino, para produzir os dados necessários à construção de um modelo matemático de previsão deste coeficiente. Para isso, quinze testes de campo foram realizados em pequenos cursos de água naturais da região de Ouro Preto – MG: onze testes no córrego da Capela, num trecho localizado aproximadamente em torno das coordenadas 43°40' de longitude Oeste e 20°22' de latitude Sul; dois testes no Córrego da Chapada, em um trecho próximo ao distrito da Chapada e em torno das coordenadas 43°33' de longitude Oeste e 20°29' de latitude Sul; e dois outros testes no córrego do Maracujá, num trecho aproximadamente em torno das coordenadas 43°23' de longitude Oeste e 20°12' de latitude Sul. No processamento e análise dos dados de campo, constatou-se que nos últimos dois testes o comprimento reservado para a mistura lateral do traçador foi insuficiente, razão pela qual os resultados destes estudos não foram empregados na construção do modelo matemático de regressão.

Nos testes de campo, o traçador utilizado foi o cloreto de sódio, tendo sido explorada a medida da condutividade elétrica do meio hídrico na obtenção dos valores da concentração. Em todos os testes, como forma de reduzir o comprimento de mistura, o traçador foi lançado sempre no eixo do canal. Para o lançamento, duas variações da técnica foram utilizadas: 1) injeção instantânea, que é o simples derramamento de uma solução concentrada no ponto de injeção; e 2) injeção contínua de curta duração, que é o lançamento a uma taxa constante e mediante o emprego de um vaso de Mariotte. A amostragem da nuvem em dispersão foi realizada em duas estações a jusante do ponto de despejo, distanciadas entre si de uma extensão que definiu o comprimento do trecho de teste. Com base na amostragem realizada em cada estação, foram construídas as curvas de concentração versus tempo (curvas de resposta), que retratam a passagem da nuvem do traçador pelos postos de amostragem. No planejamento do teste, a distância do ponto de lançamento até a primeira seção de amostragem foi estimada com base na Eq.(5).

Para a obtenção das características geométricas do escoamento, foram feitos os levantamentos batimétricos

e altimétricos dos trechos de testes. As medidas de vazão foram realizadas com o uso de vertedor de soleira fina e método da diluição, método este detalhadamente apresentado em Barbosa Jr., Silva & Giorgetti (1999). A velocidade média foi obtida com base nas medidas da distância entre as seções e dos tempos característicos das curvas de resposta.

Procedimento de cálculo do coeficiente de dispersão longitudinal

Para este estudo, na obtenção do coeficiente de dispersão longitudinal foi adotado o método da propagação (*routing procedure*), que é o mais preciso dos métodos diretos de determinação de E_L a partir de dados de campo, e que apresenta a vantagem de independer da forma de injeção do traçador e é capaz de superar as dificuldades associadas às longas caudas nas distribuições de concentração. Por se basear numa equação diferencial linear (Eq.1), o método utiliza o princípio da superposição para gerar, por meio da aplicação de uma integral de convolução da distribuição inicial, a distribuição da concentração na seção de jusante. No procedimento, que utiliza a “hipótese da nuvem congelada”, vista em Rutherford (1994), cada elemento de massa da distribuição da concentração de montante, $C(x_A, \tau) \cdot U \cdot d\tau$, produz uma solução elementar do tipo da Eq.(4): a soma das soluções elementares produz a distribuição da concentração de jusante, $C(x_B, t)$. De acordo com French (1985), a concentração na seção x_B de jusante, num instante t , é escrita conforme a equação (6), em que τ = variável temporal auxiliar de integração; \bar{t}_A e \bar{t}_B = tempos médios de passagem da nuvem do traçador pelas seções de montante e jusante, respectivamente, contados a partir do instante da injeção do traçador; e U = velocidade média do escoamento.

Na pesquisa do valor de E_L , a integração é efetuada para diferentes valores deste coeficiente. O valor procurado de E_L é o que minimiza o quadrado médio das diferenças entre os valores medidos, $\hat{C}(x_B, t)$, e os estimados, $C(x_B, t)$, que é o erro médio quadrado, emq , definido na equação (7)

$$C(x_B, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{U \cdot C(x_A, \tau)}{\sqrt{4\pi E_L (\bar{t}_B - \bar{t}_A)}} \exp \left\{ -\frac{[U(\bar{t}_B - \bar{t}_A - t + \tau)]^2}{4E_L (\bar{t}_B - \bar{t}_A)} \right\} d\tau \quad (6)$$

$$emq = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} [\hat{C}(x_B, t) - C(x_B, t)]^2 \quad (7)$$

sendo N o número de leituras da concentração na seção x_B .

Como em situações reais de campo sempre é verificada uma perda de traçador, as concentrações foram corrigidas para a massa de traçador recuperada, $m_{rec} = Q \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{C} dt$, sendo Q a vazão do escoamento. No trecho de teste, durante todo o tempo de realização do ensaio de campo a vazão manteve-se constante. Por isso, na aplicação do método da propagação foi suficiente dividir a concentração $C(x,t)$ pela área sob a curva de resposta, $A_C(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{C} dt$, definindo-se assim a variável normalizada $y(x, t) = C(x, t) / A_C(x)$, que na Eq.(6) substitui a concentração. O uso da variável normalizada torna as áreas sob as curvas y versus t das seções de montante e jusante iguais à unidade, à semelhança de uma função densidade de probabilidade.

No gráfico da Figura 1(a), referido ao teste 5, são representadas as curvas de y versus t para as seções de montante e de jusante. Na seção de jusante, a linha contínua é o resultado da aplicação da integral de convolução com o valor de E_L resultante do melhor ajuste. Este E_L foi encontrado por tentativa e erro, apoiando-se ainda no gráfico da Figura 1(b), que mostra o comportamento do erro médio quadrado, emq , em função do E_L . O valor de E_L que produz o melhor ajuste é aquele para o qual o valor de emq é mínimo, que se obtém de $d(emq)/dE_L = 0$.

Análise dimensional

Para o problema da mistura do traçador ou poluente no escoamento turbulento da água, procurou-se inicialmente fazer a identificação dos parâmetros intervenientes no fenômeno da dispersão. Para isso, considerou-se a importância das escalas de comprimento da turbulência no processo de mistura. Estas escalas, que têm papéis distintos, são baseadas no conceito de que grandes turbilhões são os portadores de energia, ao passo que pequenos turbilhões são responsáveis pela sua

dissipação. De acordo com Brodkey (1967), para as escalas assumiu-se que os grandes turbilhões são da ordem da dimensão geométrica do escoamento, enquanto os pequenos turbilhões seriam representados pela microescala de comprimento de Kolmogoroff. Assim, o processo de mistura do traçador ou poluente seria influenciado pelas características geométricas, definidas pela largura (B) e profundidade do escoamento (H), ou pelo raio hidráulico (R_H), e pela velocidade média do escoamento (U), massa específica da água (ρ), viscosidade cinemática da água (ν) e velocidade de cisalhamento ($u_* = \sqrt{gR_H S} \cong \sqrt{gHS}$). Com base nessas quantidades, para E_L como variável dependente, exprimiou-se a relação

$$E_L = \phi(U, B, H, u_*, \rho, \nu) \quad (8)$$

Com base em Fox & McDonald (1981), para aplicar o teorema π ou de Buckingham as dimensões L , M e T foram tomadas como fundamentais na especificação das dimensões de cada um dos sete parâmetros envolvidos: $[E_L] = L^2 T^{-1}$; $[U] = L T^{-1}$; $[B] = L$; $[H] = L$; $[u_*] = L T^{-1}$; $[\rho] = L^{-3} M$; $[\nu] = L^2 T^{-1}$. Escolhidos ρ , u_* e H como parâmetros repetitivos, com sete parâmetros dimensionais e três parâmetros repetitivos, restaram quatro grupos adimensionais a determinar:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4) \quad (9)$$

que após serem escritos e resolvidos produziram $\pi_1 = E_L / u_* H$, $\pi_2 = U / u_*$, $\pi_3 = B / H$ e $\pi_4 = \nu / u_* H = 1 / Re_*$. A Eq.(9) foi, então, reescrita na forma

$$\pi_4 = f\left(\frac{U}{u_*}, \frac{B}{H}, \frac{1}{Re_*}\right) \quad (10)$$

ou

$$\frac{E_L}{u_* H} = f_1\left(\frac{u_*}{U}, \frac{B}{H}, Re_*\right) \quad (11)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de regressão

Considerando a relação definida pela análise dimensional, conforme a Eq.(11), foi adotado um modelo de potência para descrever a relação de dependência entre as variáveis, segundo

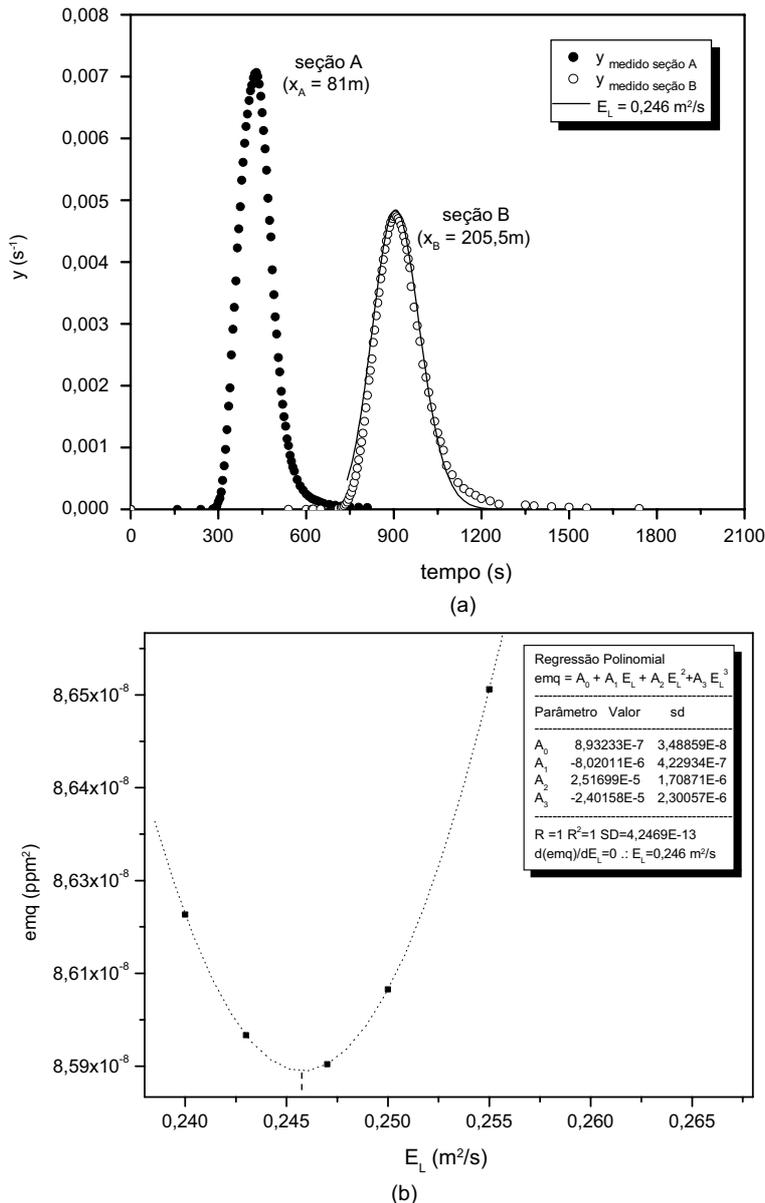


Figura 1 – (a) Valores medidos das concentrações normalizadas (y) nas estações de montante e jusante e estimados pelo método da propagação. (b) Valores de emq x E_L empregados para encontrar o E_L pelo método da propagação (Teste 5, Córrego da Capela, em 12 de outubro de 2000)

$$\frac{E_L}{u_*H} = K \cdot \left(\frac{B}{H}\right)^a \cdot \left(\frac{u_*}{U}\right)^b \cdot (Re_*)^c \quad (12)$$

Para a aplicação da técnica numérica de regressão linear múltipla, a Eq.(12) foi reescrita na forma logarítmica

$$\log\left(\frac{E_L}{u_*H}\right) = \log K + a \cdot \log\left(\frac{B}{H}\right) + b \cdot \log\left(\frac{u_*}{U}\right) + c \cdot \log(Re_*) \quad (13)$$

que é do tipo:

$$Y = k + a \cdot X + b \cdot Z + c \cdot W \quad (14)$$

sendo K = 10^k, a, b e c os quatro coeficientes a determinar.

A regressão foi realizada com base nos dados gerados dos experimentos de campo, resumidos na Tabela 1. Para os quinze testes de campo realizados, a tabela apresenta os valores de E_L calculados pelo método da propagação, bem como as características geométricas e hidrodinâmicas dos cursos de água e as grandezas adimensionais consideradas relevantes. A aplicação da técnica numérica de regressão múltipla produziu

$$\frac{E_L}{u_*H} = 4,4216 \times 10^6 \cdot \left(\frac{B}{H}\right)^{0,739} \cdot \left(\frac{u_*}{U}\right)^{0,793} \cdot \left(\frac{u_*H}{\nu}\right) \quad (15)$$

com $u_*H/\nu = Re_*$.

Para verificar a qualidade do modelo ajustado à base de dados resumida na Tabela 1, foi feita uma avaliação do coeficiente de determinação, r², e aplicado o teste estatístico F. No ajuste, foi encontrado um coeficiente de determinação r² = 0,98, o que sugere que a função linear da Eq.(13), ou (14), é adequada. O valor calculado da estatística F foi igual 318,96, que deve ser comparado com a distribuição teórica. No nível de significância α = 0,1%, com p = 3 variáveis independentes, para N = 13, o número de graus de liberdade é ν = N – p – 1 = 9. Conforme Box, Hunter & Hunter (1978), para α = 0,1%, ν = 9 e p = 3, o valor de F da distribuição teórica é igual a 129,9, o que indica que a regressão pode ser aceita com 100·(1-α)% = 99,9% de confiança.

Extensão da aplicação do modelo de regressão a outros estudos

A fim de testar a aplicabilidade do modelo de regressão proposto através da Eq.(15), foram considerados os dados de outros estudos de campo realizados por Barbosa Jr. (1997), em cursos de água naturais da bacia do rio Jacaré-Guaçu, na região de São Carlos, SP, e também em um canal urbano na cidade de Poços de Caldas, MG. A Tabela 2 apresenta um resumo das características geométricas e hidrodinâmicas dos trechos de teste, bem como as grandezas adimensionais correspondentes.

Os gráficos da Figura 2 servem para a visualização da qualidade das previsões feitas pela Eq.(15), bem como para avaliar a capacidade do modelo em descrever o comportamento do coeficiente de dispersão em outros cursos de água. Os gráficos mostram os resultados de E_L/(u_{*}H) em termos dos adimensionais B/H, u_{*}/U e Re_{*} = u_{*}H/ν, para os dados da Tabela 1 (este estudo) e da Tabela 2 (estudos de Barbosa Jr., 1997). A linha pontilhada corresponde à linha de tendência construída com o modelo da Eq.(15). A Figura sugere uma razoável adequação do modelo da Eq.(15) aos dados de Barbosa Jr., quando os gráficos do coeficiente de

dispersão longitudinal adimensional são construídos para os adimensionais B/H (Figura 2a) e u_* / U (Figura 2b) nas abscissas. Contudo, quando $E_L / (u_* H)$ é plotado em função de Re_* , nota-se um sensível afastamento de alguns pontos da linha de tendência. Os pontos que mais se afastaram dessa linha de tendência foram identificados como referidos aos testes realizados em um canal urbano. Assim, excluídos os dados do canal urbano, e a despeito das características geométricas e hidrodinâmicas dos cursos de água naturais ensaiados por Barbosa Jr. extrapolar em intervalos deste estudo, os gráficos da Figura 2 ainda sugerem a aplicabilidade do modelo adimensional de regressão da Eq.(15) também para aqueles cursos de água naturais.

Modelo escrito em termos de quantidades facilmente mensuráveis

Considerando o valor da viscosidade cinemática da água em temperaturas próximas a 20°C, isto é, $\nu \cong 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, a Eq.(15) pôde ser reescrita. Em unidades SI, explicitando para E_L ,

$$E_L = 3,772 \times 10^{-4} \frac{U^{-0,793} \cdot B^{0,739}}{u_*^{0,052} \cdot H^{1,5842}} \quad (16)$$

Ainda, em termos de variáveis facilmente mensuráveis,

$$u_* \cong \sqrt{gHS} \quad (17)$$

e

$$E_L = 3,55 \times 10^{-4} \frac{U^{-0,793} \cdot B^{0,739}}{H^{1,610} \cdot S^{0,026}} \quad (18)$$

A Eq.(18) parece sugerir uma fraca relação de dependência entre o coeficiente de dispersão e a declividade da linha da água, S . Isto, provavelmente, decorre do fato das variáveis do segundo membro da Eq.(18) não serem independentes. Com efeito, da equação de Manning, conforme Chow (1973),

$$U = \frac{1}{n} R_H^{2/3} \sqrt{S} \quad (19)$$

em que n = coeficiente de rugosidade de Manning. Combinando as Eqs.(18) e (19), e considerando o interesse em expressar a relação em termos das variáveis mais facilmente obtíveis, temos:

$$E_L = 3,55 \times 10^{-4} \frac{n^{0,793} \cdot B^{0,739}}{H^{2,277} \cdot S^{0,526}} \quad (20)$$

que é uma forma alternativa de estabelecer a equação do coeficiente de dispersão longitudinal em termos de quantidades geométricas, a exceção do coeficiente de rugosidade de Manning. Na forma em que são apresentadas as Eqs.(18) ou (20), tem-se uma expressão que se propõe que seja útil para a realização de previsões do coeficiente de dispersão longitudinal de pequenos cursos de água naturais. Dada a natureza semi-empírica do modelo construído, e para maior confiança dos resultados, a aplicação da equação deve, naturalmente, se restringir aos cursos de água de características físicas semelhantes àqueles aqui estudados.

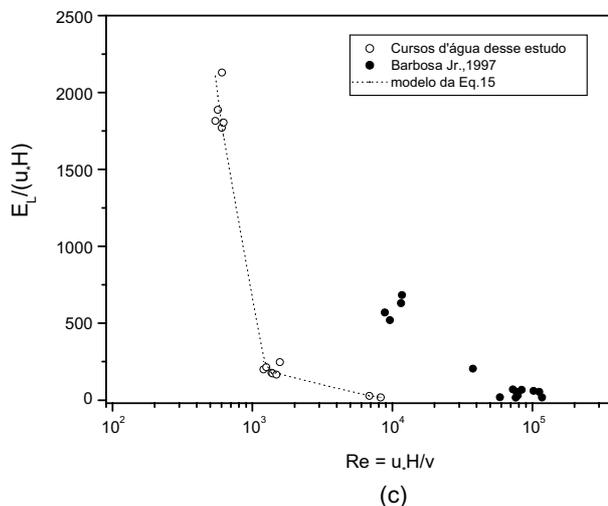
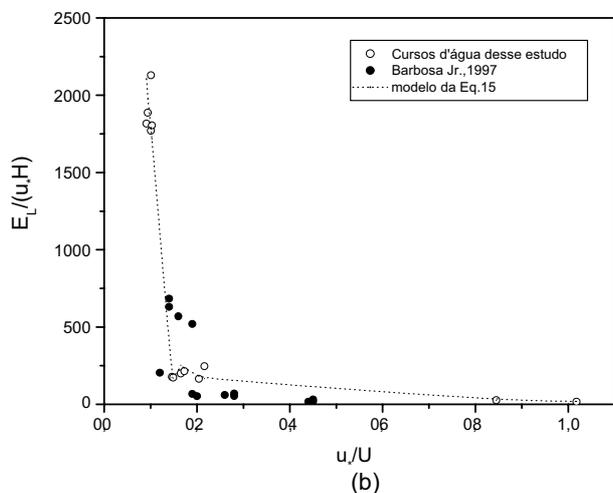
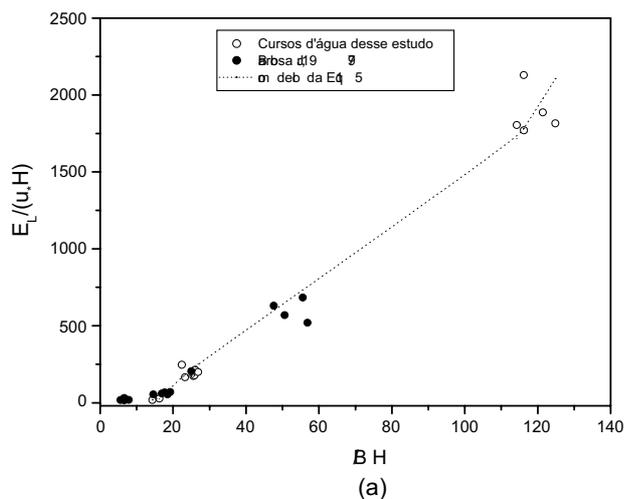


Figura 2 - Visualização gráfica dos resultados de $E_L / (u_* H)$ em função de: (a) B/H ; (b) u_* / U e (c) Re_* .

Tabela 1 – Valores de E_L calculados pelo método da propagação e características geométricas e hidrodinâmicas utilizadas no cálculo das grandezas adimensionais

Teste nº	Curso de água	data	Injeção	E_L (m^2/s)	Q (m^3/s)	B (m)	U (m/s)	H (m)	S (m/m)	u_* (m/s)	$E^L/(u_*H)$	B/H	u_*/U	Re_*
1	Capela	01-09-2000	instantânea	0,242	0,00706	0,75	0,317	0,030	0,00772	0,0472	173,66	25,57	0,149	1393,49
2	Capela	01-09-2000	instantânea	0,243	0,00706	0,75	0,321	0,029	0,00772	0,0470	177,55	25,88	0,146	1368,65
3	Capela	12-10-2000	instantânea	0,270	0,00521	0,72	0,264	0,028	0,00772	0,0457	214,61	26,01	0,173	1258,07
4	Capela	12-10-2000	contínua - 1min	0,240	0,00521	0,72	0,272	0,027	0,00772	0,0449	200,08	26,85	0,165	1199,53
5	Capela	12-10-2000	contínua - 2min	0,246	0,00521	0,72	0,236	0,031	0,00772	0,0482	165,13	23,30	0,204	1483,68
6	Capela	12-10-2000	contínua - 30min	0,387	0,00521	0,72	0,227	0,032	0,00772	0,0492	246,44	22,43	0,216	1570,34
7	Capela	17-02-2001	instantânea	1,070	0,01317	2,20	0,317	0,019	0,00552	0,0320	1770,65	116,24	0,101	604,30
8	Capela	17-02-2001	instantânea	1,290	0,01317	2,20	0,316	0,019	0,00552	0,0320	2129,76	116,21	0,101	605,70
9	Capela	17-02-2001	instantânea	1,119	0,01317	2,20	0,312	0,019	0,00552	0,0322	1804,95	114,27	0,103	619,96
10	Capela	17-02-2001	instantânea	0,986	0,01317	2,20	0,340	0,018	0,00552	0,0309	1815,83	124,83	0,091	543,00
11	Capela	17-02-2001	instantânea	1,068	0,01317	2,20	0,331	0,018	0,00552	0,0313	1887,20	121,44	0,094	565,92
12	Chapada	07-04-2001	instantânea	0,185	0,01134	1,40	0,094	0,086	0,00745	0,0794	27,02	16,23	0,845	6846,62
13	Chapada	07-04-2001	instantânea	0,143	0,01134	1,40	0,083	0,098	0,00745	0,0844	17,34	14,34	1,018	8245,48
14	Maracujá	21-04-2005	instantânea	1,235	0,1763	7,50	0,308	0,076	0,00221	0,0406	(398,2)	(98,3)	(0,13)	(398,2)
15	Maracujá	21-04-2005	instantânea	1,165	0,1579	7,50	0,290	0,073	0,00221	0,0396	(405,5)	(103,4)	(0,14)	(405,5)

() Valores não confiáveis, não utilizados na construção do modelo de regressão.
 Q= vazão; B= largura média; U= velocidade média; H= profundidade média; S= declividade; u_* =velocidade de cisalhamento.

Tabela 2 – Valores de E_L calculados pelo método da propagação, características geométricas e hidrodinâmicas dos cursos de água e cálculo das grandezas adimensionais – Estudos de Barbosa Jr. (1997)

Teste nº	Curso de água	data	Injeção	EL (m ² /s)	Q (m ³ /s)	B (m)	U (m/s)	H (m)	S (m/m)	u_* (m/s)	EL/(u_*H)	B/H	u_*U	Re_*
1	Ribeirão do Feijão	22/10/93	Contínua - 15min	5,050	2,64	10	0,509	0,52	0,00387	0,14	69,4	19,2	0,28	$7,28 \times 10^4$
2	Cor. Laranja Azeda	09/11/93	Contínua - 15min	1,300	0,68	4,0	0,281	0,61	0,00265	0,125	17,0	6,6	0,44	$7,63 \times 10^4$
3	Cor. Laranja Azeda	26/04/94	Contínua - 32min	2,420	0,70	4,0	0,282	0,62	0,00265	0,127	30,7	6,6	0,45	$7,87 \times 10^4$
4	Ribeirão do Feijão	16/05/94	instantânea	4,220	2,80	10	0,519	0,54	0,00387	0,143	54,6	18,5	0,28	$7,72 \times 10^4$
5	Cor. Laranja Azeda	21/06/94	instantânea	1,100	0,52	4,0	0,255	0,51	0,00265	0,115	18,8	7,8	0,45	$5,87 \times 10^4$
6	Rio Jacaré-Guacu	17/08/94	instantânea	6,000	11,25	20	0,412	1,37	0,0005	0,0818	53,5	14,6	0,20	$1,12 \times 10^5$
7	Rib. Caldas – trecho 1-2	30/08/94	Contínua - 31min	5,080	0,45	9,1	0,317	0,16	0,00231	0,06	519,4	56,9	0,19	$9,60 \times 10^3$
8	Rib. Caldas – trecho 2-3	30/08/94	Contínua - 31min	5,020	0,48	9,1	0,302	0,18	0,00143	0,049	569,2	50,6	0,16	$8,82 \times 10^3$
9	Rio Jacaré-Guacu	20/09/94	instantânea	5,640	9,00	20	0,400	1,13	0,005	0,0743	67,2	17,7	0,19	$8,40 \times 10^4$
10	Cor. Laranja Azeda	06/03/95	instantânea	2,010	1,20	4,5	0,329	0,81	0,00265	0,145	17,1	5,6	0,44	$1,17 \times 10^5$
11	Rib. Caldas – trecho 1-2	21/03/95	instantânea	7,690	3,00	10	0,760	0,40	0,00231	0,094	204,5	25,0	0,12	$3,76 \times 10^4$
12	Ribeirão do Feijão	11/04/95	instantânea	6,090	4,30	11	0,598	0,65	0,00387	0,157	59,7	16,9	0,26	$1,02 \times 10^5$
13	Rib. Caldas trecho 1-2	27/06/95	instantânea	8,000	0,80	10	0,456	0,18	0,0231	0,065	683,8	55,6	0,14	$1,17 \times 10^4$
14	Rib. Caldas – trecho 2-3	27/06/95	instantânea	7,280	0,84	10	0,393	0,21	0,00143	0,055	630,3	47,6	0,14	$1,16 \times 10^4$

CONCLUSÕES

Considerada a importância prática de se conhecer um modelo confiável de previsão do coeficiente de dispersão longitudinal para pequenos cursos de água naturais, foi proposta uma equação simples que relaciona o coeficiente com as características geométricas e hidrodinâmicas do escoamento. Apoiando-se na análise dimensional, o modelo foi ajustado baseando-se em 13 dos 15 testes de campo realizados por Devens (2006) em pequenos cursos de água naturais da região de Ouro Preto/MG.

Na aplicação do teorema de Buckingham, algumas considerações foram feitas no sentido de incorporar ao modelo as grandezas relevantes no processo de mistura do traçador ou poluente. Uma vez que os escoamentos em cursos de água naturais são francamente turbulentos, as grandezas foram escolhidas tomando-se por base a importância da macro e da microescala de comprimento da turbulência no processo de mistura.

A estimativa dos parâmetros do modelo foi feita pela aplicação da técnica numérica de regressão linear múltipla, empregando-se a transformação logarítmica do modelo proposto. A qualidade do ajuste da equação foi medida pelo coeficiente de correlação ($r^2 = 0,98$), sugerindo que a função transformada linear é adequada. A aplicação do teste F comprovou a adequabilidade do modelo, tendo sido rejeitada a hipótese de nulidade dos parâmetros no nível de significância $\alpha = 0,1\%$, o que indicou que a regressão pode ser aceita com 99,9% de confiança.

Os resultados de campo, ilustrados nos gráficos da Figura 2, comprovaram a dependência do coeficiente de dispersão adimensional $E_L/(u_*H)$ da razão de aspecto, B/H , de um

fator de velocidade, u_*H/U , e de uma definição do número de Reynolds referido à velocidade de cisalhamento, $Re_* = u_*H/\nu$. Uma tentativa foi feita no sentido de estender a aplicação do modelo de regressão deste estudo a outros cursos de água. Os testes escolhidos para a verificação da aplicabilidade do modelo foram aqueles relatados nos estudos realizados por Barbosa Jr. (1997), em cursos de água naturais e em um canal urbano. Os cursos de água ensaiados por Barbosa Jr. (1997) possuem características geométricas e hidrodinâmicas que extrapolam aquelas do presente estudo, mas os gráficos da Figura 3 sugeriram, excetuado o caso do canal urbano, que o modelo da Eq.(15) ainda é razoavelmente aplicável.

As Eqs.(18) e (20) foram escritas em termos de quantidades facilmente mensuráveis. Para uso prático dessas equações, sugere-se observar os limites impostos pelas condições de campo de escoamentos similares às dos corpos de água aqui estudados.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA Jr., A.R. *Uso de traçadores na determinação de parâmetros de qualidade em escoamentos naturais de água*. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.
- BARBOSA Jr., A.R.; SILVA, G.Q. da; GIORGETTI, M.F. *Medida da vazão em cursos d'água naturais com o emprego de traçador fluorescente*. Revista Escola de Minas, 52(3): p. 209-214. 1999.
- BARBOSA Jr., A.R.; SILVA, G.Q. da; GIORGETTI, M.F. *Medida da vazão em cursos d'água naturais com o emprego de traçador fluorescente - Aplicação*. Revista Escola de Minas, 52(4): p. 291-297. 1999.
- BARBOSA Jr., A.R. et al. *Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d'água naturais. Parte 1 - Fundamentos teóricos*. Revista Escola de Minas, 58(1): p. 27-32. 2005.

BARBOSA Jr., A.R. et al. *Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d'água naturais. Parte 2 - Aplicação e comparação dos métodos*. Revista Escola de Minas, 58(2): p. 139-145. 2005.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G. & HUNTER, J.S. *Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis, and model building*. John Wiley & Sons, Toronto, 1978.

BRODKEY, R.S. *The phenomena of fluid motions*. Addison - Wesley Publishing Company, USA, 1967.

CHOW, V.T. *Open-channel hydraulics*. International Edition, McGraw-Hill Book Co. Singapura, 1973.

DEVENS, J.A. *Quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal em pequenos cursos d'água naturais com o uso de traçador ambientalmente neutro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Núcleo Pró-Água, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 2006.

FOX E McDONALD. *Introdução à mecânica dos fluidos*. Ed. Guanabara Dois, 1981.

FRENCH, R. H. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Co., USA, 1985

RUTHEFORD, J.C. *River mixing*. National Institute of Water and Atmospheric Research Hamilton. New Zealand, 1994.

Endereço para correspondência:

Julimara Alves Devens
Instituto de Ciências Exatas e
Biológicas da UFOP
Campus Morro do Cruzeiro
35400-000 - Ouro Preto
MG - Brasil
Tel.: (31) 3559-1725
E-mail: julimaradevens@yahoo.