



XI SILUBESA

Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

I-037 – MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE MISTURA EM UNIDADES DE CONTATO UTILIZADAS PARA A DESINFECÇÃO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO

Renato do Nascimento Siqueira⁽¹⁾

Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Mestre em Engenharia Ambiental pela UFES. Doutor em Engenharia Civil pela Loughborough University of Technology (Reino Unido). Professor Visitante do Departamento de Engenharia Ambiental da UFES.

Edmilson Costa Teixeira

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Bahia. Mestre em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Engenharia Civil pela University of Bradford (Reino Unido). Professor adjunto do Departamento de Engenharia Ambiental da UFES.

Endereço⁽¹⁾: GEARH – CT – UFES; Cx. Postal 01-9011 –Vitória – ES – CEP 29.060-970 – Brasil. Tele-fax: +55 (27) 3335-2675

 renatons@npd.ufes.br.

RESUMO

Procedimentos errôneos de projeto e operação inadequada estão entre as principais causas que levam a maioria das unidades de tratamento de água e efluentes (UTAE) a apresentarem eficiência de tratamento abaixo da esperada. As unidades de tratamento são normalmente projetadas com base em escoamentos ideais, não considerando aspectos importantes do escoamento, como por exemplo, a ocorrências de curto-circuito e zonas mortas. Outros fatores como a configuração da unidade e a ausência de dispositivos de injeção adequados, que permitam uma distribuição uniforme dos constituintes na seção de entrada, também contribuem para as discrepâncias entre o desempenho medido e previsto durante a fase de projeto. Para que os projetos de UTAE possam ser concebidos de maneira mais racional, tem-se buscado a incorporação de parâmetros geométricos e da dinâmica do escoamento nas fórmulas utilizadas para a determinação da eficiência de tratamento. Um exemplo disto é a equação proposta por Wehner and Wilhelm (1956) que relaciona a eficiência de desinfecção (N/N_0) com o coeficiente de cinética reacional (k) e o coeficiente adimensional de mistura (d), que tem sido o parâmetro mais utilizado para representar os efeitos da dinâmica do escoamento em unidades de contato. Devido à falta de critérios consolidados para a determinação do coeficiente adimensional de mistura (d) em unidades de tratamento, este trabalho busca verificar a aplicabilidade dos métodos desenvolvidos para a determinação do coeficiente de dispersão em canais para a determinação do coeficiente de mistura neste tipo de unidades. Entre os métodos avaliados, o método da propagação de Fischer foi o que apresentou o melhor desempenho.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência Hidráulica, Hidrodinâmica de Reatores, Tratamento de Água e Efluentes, Coeficiente de mistura, Técnica de traçadores.

INTRODUÇÃO

Entre as principais causas que levam a maioria das Unidades de Tratamento de Água e Efluentes (UTAE) a apresentarem eficiência de tratamento abaixo da esperada estão os procedimentos errôneos de projeto e operação inadequada deste tipo de unidades (Almeida, 1997).

Durante a fase de projeto, o escoamento na unidade é tido como ideal, embora os escoamentos reais sejam bem mais

complexos, devido a parcelas significativas de curto-circuito e zonas mortas. Além disso, a negligência dos efeitos da configuração da unidade e a ausência de dispositivos de injeção adequados, que permitam uma distribuição uniforme dos constituintes na seção de entrada, contribuem para as discrepâncias entre os valores medidos e previstos durante a fase de projeto (Teixeira & Shiono, 1994).

Para que os projetos de UTAE possam ser concebidos de maneira mais racional, tem-se buscado a incorporação de parâmetros geométricos e da dinâmica do escoamento nas fórmulas utilizadas para a determinação da eficiência de tratamento. Um exemplo disto é a equação (1) proposta por Wehner and Wilhelm (1956) que relaciona a eficiência de desinfecção (N/N_0) com o coeficiente de cinética reacional (k) e o coeficiente adimensional de mistura (d). O coeficiente adimensional de mistura (d) tem sido o parâmetro mais utilizado para representar os efeitos da dinâmica do escoamento em unidades de contato e pode ser obtido a partir das curvas de passagem (distribuição de tempo de residência).

$$N/N_0 = 4a \exp(1/2d) / [(1 + a)^2 \exp(a/2d) - (1 - a)^2 \exp(1/2d)] \quad \text{equação (1)}$$

Onde: $a = (1 + 4 k T d)^{1/2}$; d é o coeficiente adimensional de mistura; e T é o tempo teórico de detenção.

Devido à falta de critérios consolidados para a determinação do coeficiente adimensional de mistura (d) em unidades de tratamento, este trabalho busca verificar a aplicabilidade dos métodos desenvolvidos para a determinação do coeficiente de dispersão longitudinal (D_L) em canais, para a determinação do coeficiente de mistura (d) neste tipo de unidades.

Métodos de Determinação do Coeficiente de dispersão longitudinal

A equação diferencial unidimensional que governa o processo de dispersão em um canal é dada por:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} \quad \text{equação (2)}$$

onde, $\bar{C}$ é a concentração média de um dado soluto na seção transversal sentido do escoamento; $\bar{u}$ é a velocidade média do escoamento; e D_L é o coeficiente de dispersão longitudinal.

Fischer (1966) mostrou que, para a equação (2) ser aplicável, é suficiente que os desvios da concentração em relação a $\bar{C}$ em pontos da seção transversal sejam muito menores que $\bar{C}$. Isto caracteriza o chamado "período difusivo", onde a mistura lateral estaria, em termos práticos, completa. O período inicial, onde o movimento das partículas do soluto depende da velocidade inicial e a advecção é o mecanismo dominante na distorção da forma da distribuição de soluto na seção transversal, é chamado de "período advectivo". Neste período a equação (2) não se aplica.

De acordo com French (1986), existem essencialmente três métodos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal (D_L) a partir de dados experimentais: o método de variação dos momentos, o método de propagação de Fischer e o método de ajuste com a solução fundamental da equação da dispersão unidimensional. A apresentação detalhada destes métodos é encontrada na literatura [Rigo, 1992; Teixeira, 1993; Barbosa júnior, 1997].

Método de Variação dos Momentos

O coeficiente de dispersão D_L , definido pela equação (2), mede a taxa de alteração da variância da nuvem de traçador com o tempo.

$$D_L = 0,5 \frac{d\sigma_x^2}{dt} \quad \text{equação (3)}$$

onde, σ_x^2 é a variância da distribuição de concentração de traçador em relação à distância ao longo da unidade.

Uma vez que a obtenção de distribuições espaciais de concentração com a posição ao longo do canal não é uma prática muito comum, Fischer (1966) utilizou a relação $\sigma_x^2 = \bar{u} \cdot \sigma_t^2$ com o objetivo de transformar a equação (3) em uma

forma mais apropriada, dada por:

$$D_L = \frac{1 - \sigma_{t2}^2 - \sigma_{t1}^2}{2u \cdot tg_2 - tg_1} \quad \text{equação (4)}$$

onde, σ_{t1}^2 , σ_{t2}^2 são as variâncias das curvas de passagem para as seções de monitoramento a montante e a jusante, respectivamente; e tg_1 , tg_2 são os tempos médios de passagem da nuvem de traçador pelas seções de monitoramento a montante e a jusante, respectivamente.

De acordo com Fischer (1966), a equação (4) é válida, desde que a equação (2) seja aplicável. O valor de tg é calculado de acordo com a equação abaixo:

$$tg = \frac{T \int_0^\infty \theta \cdot E(\theta) \cdot d\theta}{\int_0^\infty E(\theta) \cdot d\theta} \quad \text{equação (5)}$$

e σ_t^2 é a variância da curva de passagem, dada por:

$$\sigma_t^2 = \frac{T^2 \int_0^\infty \theta^2 \cdot E(\theta) \cdot d\theta}{\int_0^\infty E(\theta) \cdot d\theta} \quad \text{equação (6)}$$

Método da Propagação de Fischer

Este método, também conhecido como "routine procedure", utiliza uma curva de passagem medida em uma seção a montante para estimar a curva de passagem em uma seção a jusante, para um determinado valor de D_L . Através do método de tentativa e erros, com auxílio de uma rotina computacional, encontra-se o valor de D_L que minimiza a soma das diferenças entre a curva medida e a curva estimada na seção de jusante, o qual é estabelecido como sendo o coeficiente de dispersão para o trecho entre as seções de monitoramento em que o modelo foi aplicado. A curva de passagem do traçador na seção a jusante é obtida pela seguinte expressão:

$$C(x_2, t) = \int_0^\infty \bar{u} C(x_1, \tau) \frac{\exp \left\{ - \left[\bar{u} (tg_2 - tg_1 - t + \tau) \right]^2 \cdot [4 \cdot D_L \cdot (tg_2 - tg_1)]^{-1} \right\}}{\sqrt{4\pi \cdot D_L (tg_2 - tg_1)}} d\tau \quad \text{equação (7)}$$

onde, $C(x_1, \tau)$ é a concentração do traçador medida na seção a montante no tempo τ ; $C(x_2, t)$ é a concentração do traçador estimada na seção a jusante no tempo t ; τ é uma variável temporal de integração; e $\bar{u}$ é a velocidade média do escoamento no trecho considerado.

Para se determinar os desvios entre a curva medida e a curva estimada, French (1986) utilizou a soma dos valores médios quadráticos da diferença entre os valores medidos e estimados da concentração na seção de monitoramento (EQM), dado por:

$$EQM = \sum_{i=1}^n \left(\frac{[C(x_2)_i - (C_E)_i]^2}{n} \right)^{0,5} \quad \text{equação (8)}$$

onde, $C(x_2)_i$ e $(C_E)_i$ são, respectivamente, os valores de concentração medidos e estimados para os n pontos da curva de passagem.

Ajuste com a Solução Analítica Fundamental da Equação de Dispersão

Neste método, uma curva de passagem para uma seção a jusante é gerada a partir da solução analítica fundamental da equação da dispersão unidimensional, equação 3.13, que considera injeção instantânea do soluto na entrada da

unidade.

$$C(x, t) = \frac{M}{2A\sqrt{\pi D_L t}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{u}t)^2}{4D_L t} \right] \quad \text{equação (9)}$$

onde, $C(x, t)$ é a concentração do traçador estimada na seção a jusante no tempo t ; M é a massa de traçador que foi injetada no escoamento; $\bar{u}$ é a velocidade média do escoamento; e x é o comprimento longitudinal entre as seções de lançamento e monitoramento do traçador.

O coeficiente de dispersão longitudinal (D_L) é determinado pelo ajuste entre a curva gerada e a curva medida na seção de jusante, de modo que os desvios entre os valores medidos e estimados sejam mínimos.

Relação entre D_L e o coeficiente adimensional de mistura (d).

O coeficiente adimensional de mistura (d), que tem sido o parâmetro mais utilizado para representar os efeitos da dinâmica do escoamento em unidades de contato, é definido como sendo o inverso do número de Peclet

($Pe = \bar{u}L/D_L$, onde, $\bar{u}$ é a velocidade média do escoamento, L = comprimento do trecho monitorado e D_L é o coeficiente de dispersão longitudinal). Desta forma, o coeficiente adimensional de mistura (d) se relaciona com D_L através da seguinte equação:

$$d = \frac{D_L}{\bar{u} \cdot L} \quad \text{equação (10)}$$

Portanto, uma vez determinado o valor de D_L , pode-se obter o coeficiente de adimensional de mistura d , que sido o parâmetro mais utilizado para representar os efeitos da dinâmica do escoamento em unidades de contato, através do emprego das equações 10.

Método de Levenspiel

Além dos métodos citados acima, os quais foram desenvolvidos para canais, existe um outro método de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal com o uso de traçador. Este método, aqui chamado de método de Levenspiel, ao contrário dos demais apresentados, foi desenvolvido para UTAE.

Através de equações propostas por Levenspiel (1972), o coeficiente de dispersão adimensional de mistura (d) pode ser obtido a partir do índice de dispersão σ^2 , extraído da curva de passagem. O índice de dispersão é dado por:

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_t^2}{tg^2} \quad \text{equação (11)}$$

onde, tg e σ_t^2 são definidos pelas equações (5) e (6), respectivamente.

Segundo Levenspiel (1972), existem três diferentes equações relacionando o índice de dispersão (σ^2) com o coeficiente de dispersão adimensional.

Para reatores abertos, onde não há mudanças do padrão de escoamento nas fronteiras de entrada e saída,

$$\sigma^2 = 2d - 8d^2 \quad \text{equação (12).}$$

Para reatores fechados, onde ocorrem perturbações nos padrões de escoamento devido à presença das fronteiras,

$$\sigma^2 = 2d - 2d^2 \left(1 - e^{-\frac{1}{d}} \right) \quad \text{equação (13).}$$

E para reatores aberto-fechado ou fechado-aberto, onde as mudanças nos padrões de escoamento ocorrem em apenas uma das fronteiras,

$$\sigma^2 = 2d + 3d^2$$

equação (14).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para se avaliar os métodos de obtenção do coeficiente adimensional de mistura (**d**), foi utilizado uma unidade de contato do tipo chicanada. O circuito hidráulico da unidade é mostrado na Figura 1. Neste circuito a água era bombeada do reservatório de alimentação através de um sistema de medição de vazão e entrava no tanque por uma caixa de amortização de energia cinética, para que se pudesse conseguir uma melhor distribuição do fluxo na entrada da unidade em toda a seção transversal ao sentido do escoamento.

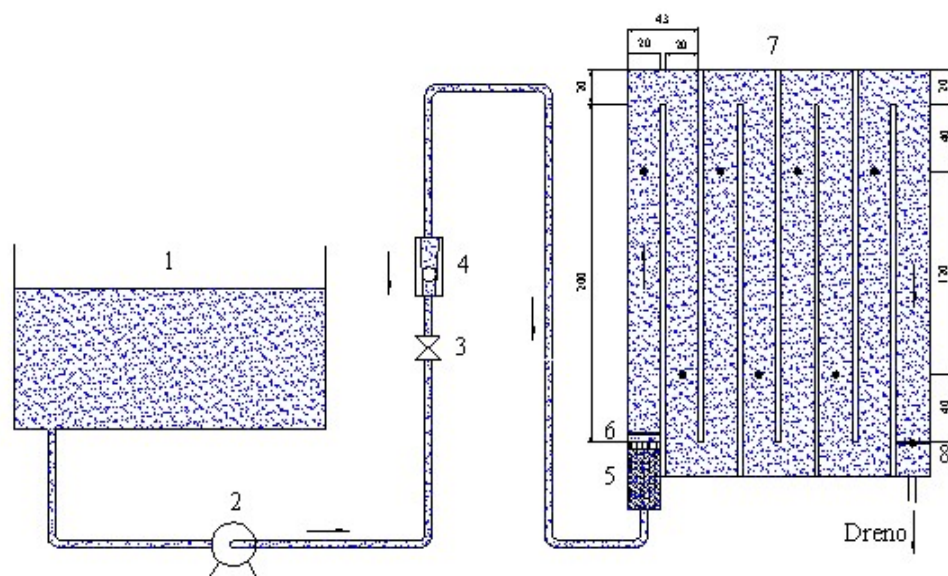


Figura 1: Circuito hidráulico da unidade de contato utilizada.

O tanque chicanado era constituído de 8 compartimentos de 0,2m de largura por 2,4m de comprimento, com exceção dos compartimentos 1 e 8 que possuíam 2,2m devido aos dispositivos de entrada e saída. As chicanadas foram construídas de aço revestido e possuíam 0,03m de espessura. A abertura entre compartimentos era de 0,2m, o que corresponde ao espaçamento entre chicanas. O lançamento do traçador era feito a 0,1m da seção de entrada e o monitoramento era feito a 0,6m antes do fim de cada compartimento. Somente no último compartimento é que a seção de monitoramento foi alterada, sendo este feito sobre o vertedor de saída. Os pontos onde foram monitoradas as concentrações do traçador com o tempo para a obtenção das curvas de passagem também são mostrados na Figura 1. A vazão utilizada foi de 1,0 l/s, definida em função dos objetivos do projeto maior de pesquisa [Teixeira, 1998; Moreira, 1999; Figueiredo, 2000]. A altura da lâmina d'água foi de 0,26m.

O traçador utilizado foi o Cloreto de Potássio (KCl). Por ser um traçador salino, a densidade da solução precisou ser corrigida, através da adição de álcool etílico e para permitir a visualização do traçador no momento do lançamento um corante (Amidorodamina) também foi adicionado a esta solução. Portanto, a solução de traçagem era composta de 40g de KCl, 180 ml de álcool etílico e 0,1g de Amidorodamina por litro de solução. A densidade da solução resultante foi de 997 kg/m³, que corresponde à densidade da água utilizada para se fazer os experimentos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra as curvas de passagem obtidas para os compartimentos 03 a 08. A partir destas curvas foram calculados os valores dos coeficientes adimensionais de mistura (**d**) para os trechos compreendidos entre os vários

compartimentos.

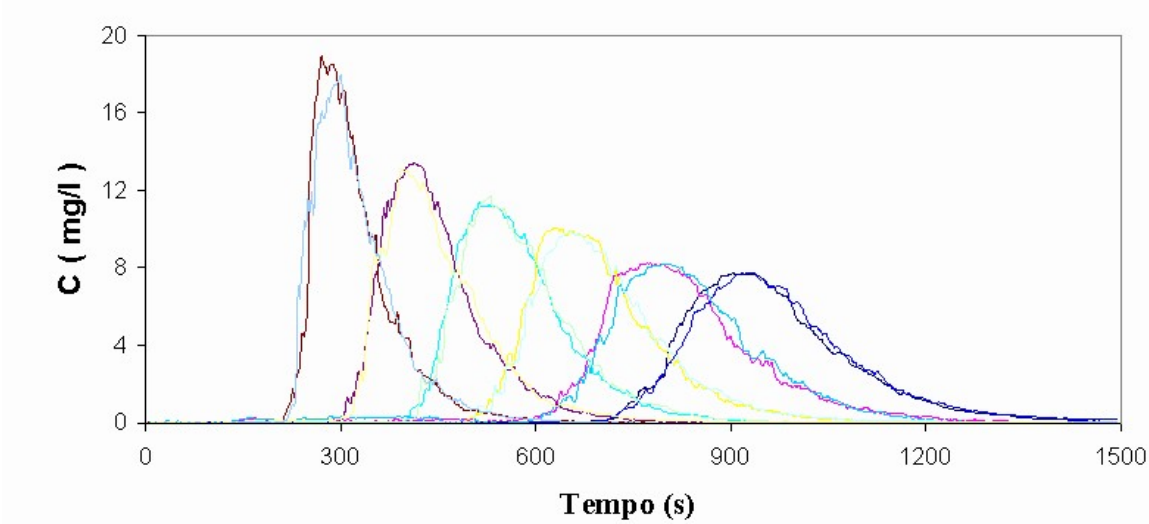


Figura 2: Curvas de passagem para os compartimentos 03 a 08.

Foram testados os modelos de ajuste com a solução analítica fundamental, o modelo de Levenspiel, o método de variação dos momentos e o método da propagação de Fischer. Para os dois primeiros métodos foi considerado um lançamento instantâneo do traçador na entrada da unidade e para os dois últimos métodos, a curva de passagem obtida para o terceiro compartimento foi utilizada como dado de entrada para a obtenção dos valores de **d** com base nos métodos de convolução.

O método de Levenspiel é mais direto e de mais fácil implementação. Porém, neste estudo ele sempre superestimou os valores de **d**, levando a piores ajustes entre as curvas medidas e estimadas (ver Tabela 1 e Figura 3).

Tabela 1: Cálculo dos Coeficientes de mistura utilizando-se uma curva de passagem.

Número do Compartimento	Ajuste com a Solução Analítica da Equação da dispersão (equação 9)		Método de Levenspiel (equações 12 - 14)	
	d . 10⁷	EQM (mg/l)	d . 10⁷	EQM (mg/l)
-				
03	20,1	18,1	29,4	19,0
04	18,4	15,7	35,9	19,1
05	12,5	14,0	14,1	14,2
06	10,9	13,1	14,6	13,9
07	8,9	10,9	16,6	14,8
08	8,2	8,8	11,6	10,4

De acordo com a Tabela 1, o método de determinação de **d** baseado no ajuste com a solução analítica fundamental da equação da dispersão levou a ajustes um pouco melhores que o método de Levenspiel, porém o erro quadrático médio entre as curvas medidas e ajustadas para o valor ótimo de **d** ainda foram relativamente altos, mostrando que estes métodos devem ser aplicados com cautela para a determinação de **d** em unidades de contato do tipo chicanadas. A

representação gráfica destes resultados é mostrada na Figura 3.

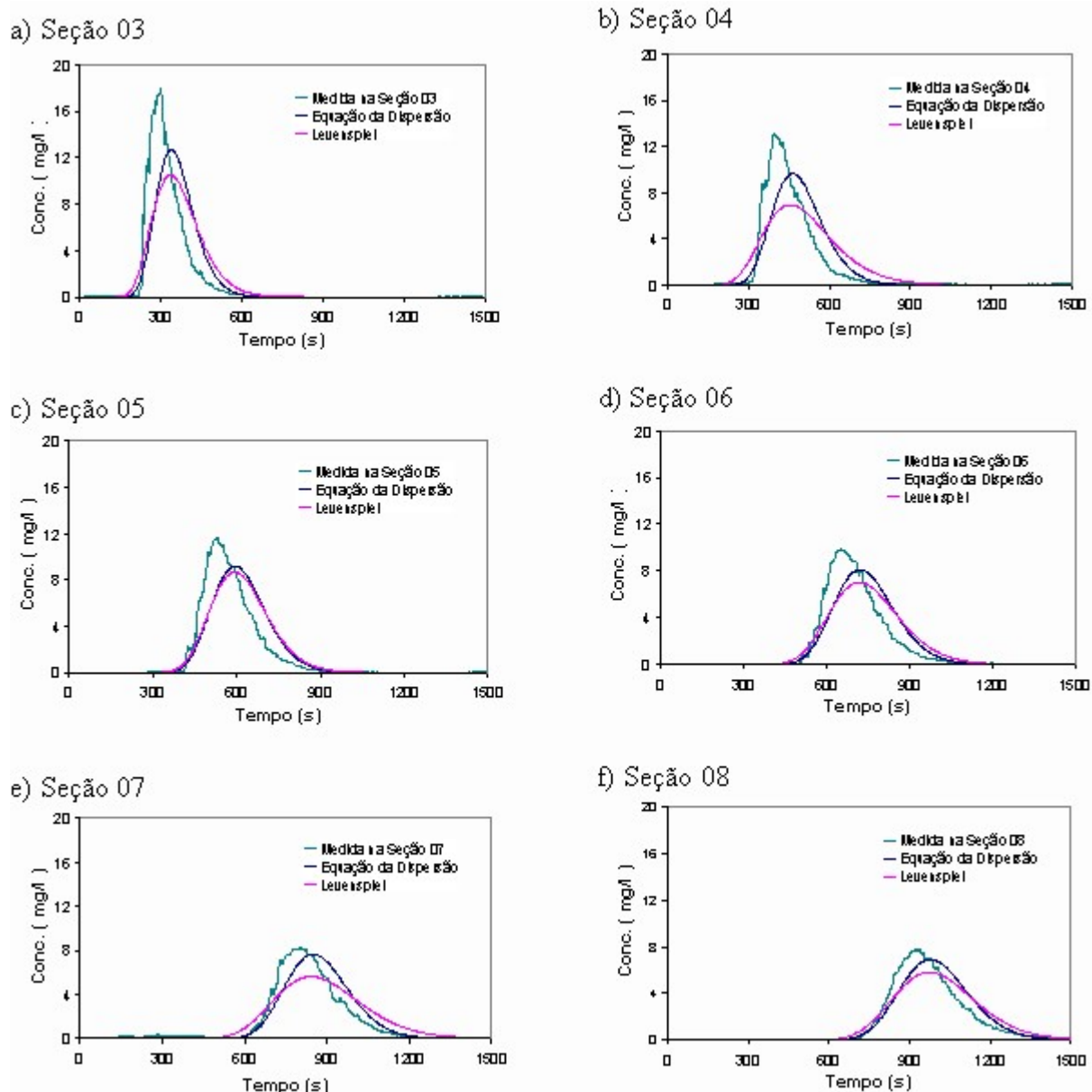


Figura 3: Curvas de passagem medidas e estimadas para as seções 03 a 08.

Na Tabela 2 verifica-se ainda que ao se tomar a seção 03 como seção de referência, o método dos momentos nem sempre levou a ajustes muito bons. Porém, a partir da seção 06 os valores de $\bar{d}$ obtidos pelo método dos momentos foram praticamente os mesmos conseguidos pelo método de Fischer (variação dos valores de EQM menores que 7%), o que pode ser decorrente do aumento das distâncias entre as duas seções de monitoramento. A representação gráfica destes resultados é mostrada na Figura 4.

Tabela 2: Cálculo dos Coeficientes de mistura utilizando-se duas curvas de passagem.

Trecho entre os Compartimentos Nº	Método dos Momentos (equação 5.5)		Método de Propagação de Fischer (equação 5.6)	
-	$d \cdot 10^7$	EQM (mg/l)	$d \cdot 10^7$	EQM (mg/l)
03-04	39,2	10,9	15,6	7,6
03-05	5,4	5,6	11,9	4,6
03-06	8,1	6,4	10,7	6,3
03-07	10,1	5,8	11,4	5,4
03-08	6,2	5,5	8,1	5,3

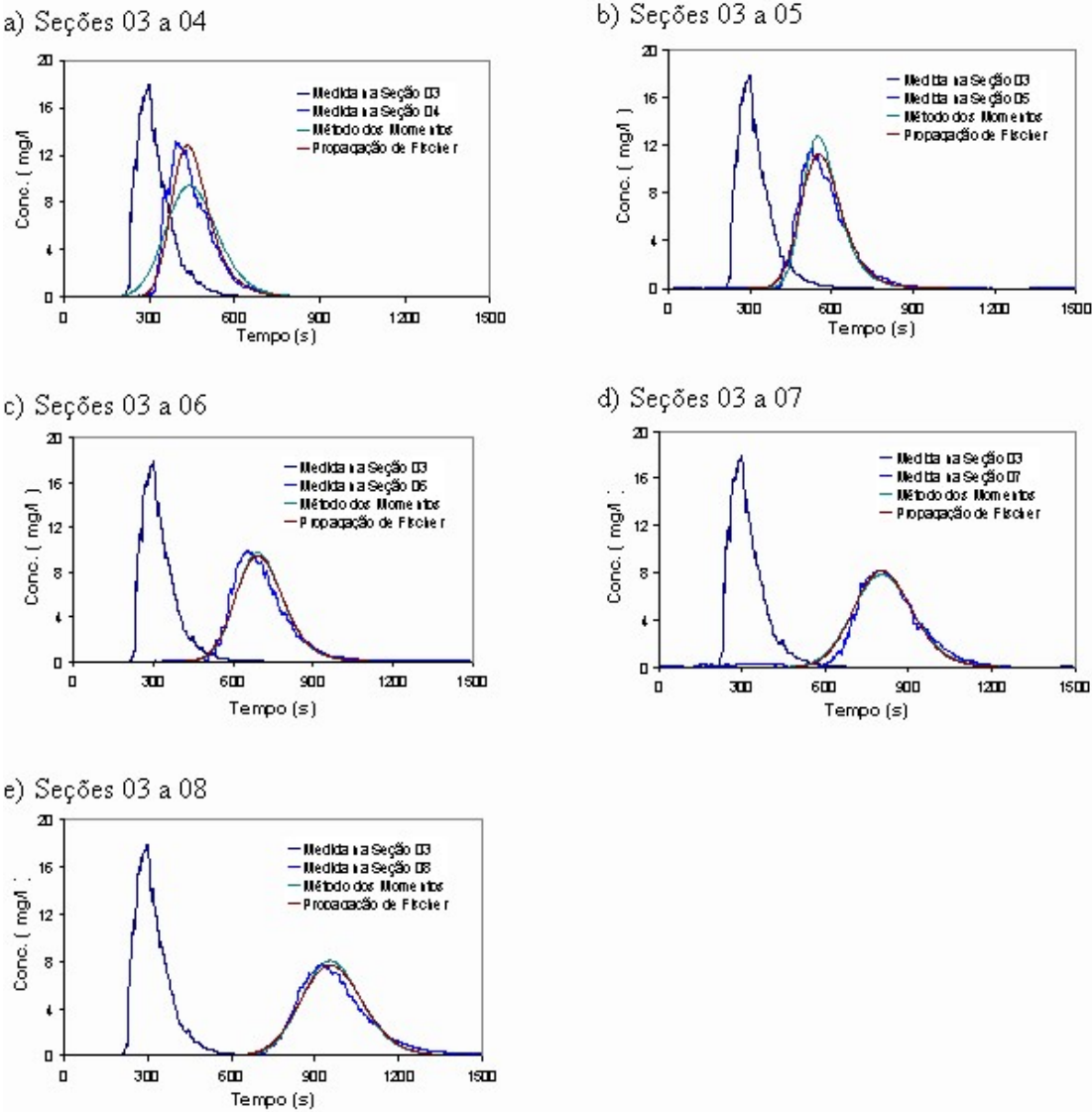


Figura 4: Curvas de passagem medidas e estimadas utilizados para o cálculo de d entre o compartimento 03 e os demais compartimentos a jusante.

Dos métodos que foram avaliados, o método da propagação de Fischer conseguiu uma melhor aproximação entre as curvas medidas e estimadas para a seção de jusante, sendo desta forma o método mais aconselhável quando se deseja determinar o valor de d para um determinado trecho compreendido entre duas seções de uma UTAE, cujas curvas de passagem são conhecidas.

CONCLUSÕES

O presente trabalho confirma a possibilidade de aplicação de métodos de determinação do coeficiente de dispersão, desenvolvidos para a área de hidráulica fluvial, para a avaliação do coeficiente de mistura em UTAE do tipo chicanada. Tal confirmação será muito útil para o desenvolvimento de trabalhos futuros, relacionando o coeficiente de mistura com parâmetros geométricos e da dinâmica do escoamento e, com isso, poder projetar UTAE para atender níveis pré-estabelecidos de eficiência de processos de tratamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, M.M.P. – "Estudo do efeito de defletor de escoamento e da relação comprimento/largura efetiva do escoamento na eficiência hidráulica de bacia de sedimentação", Dissertação de mestrado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, PMEA, UFES, 1997.
2. BARBOSA JÚNIOR, A.R. – "Uso de traçadores na determinação de parâmetros de qualidade em escoamentos naturais da água", Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.
3. FIGUEIREDO, I.C. – "Estudo da influência da hidrodinâmica e da resistência de microrganismos no consumo de cloro para desinfecção de água", Dissertação de mestrado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, PMEA, UFES, 2000.
4. FISCHER, H.B. – "A note on the one dimensional dispersion model", Air and Water Pollution International Journal, Vol. 10, 1966, pp.443-452.
5. FRENCH, R.H. – Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill International Editions, 1986.
6. LEVENSPIEL, O. – Chemical reaction engineering, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1972.
7. MOREIRA, C.R.F. – "Estudo do comportamento hidrodinâmico de tanques chicanados, com vistas à otimização da desinfecção de água em tanques de contato de fluxo contínuo", Dissertação de mestrado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, PMEA, UFES, 1999.
8. RIGO, D. – "Dispersão longitudinal em rios: desempenho de métodos de previsão e de traçadores fluorescentes", Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1992.
9. TEIXEIRA, E.C. – "Estudo do comportamento hidrodinâmico de tanques chicanados com vistas à otimização da desinfecção de água com o cloro em tanques de contato de fluxo contínuo", Projeto de Pesquisa – Convênio CNPq nº 520259/94-7, 1998.
10. TEIXEIRA, E.C. – "Hydrodynamic Processes and Hydraulic Efficiency of Chlorine Contact Units", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Bradford, England, 1993.
11. TEIXEIRA, E.C. e SHIONO, K. – "Caracterização tridimensional da estrutura hidráulica do escoamento, do transporte e misturamento de solutos em um modelo de tanque de cloração de água", VI SILUBESA, Florianópolis, S.C., Vol. 1, Tomo 1, 1994, pp. 232-254.
12. WEHNER, J.F. e Wilhelm, R.H. "Boundary conditions of flow reactor". Chemical Engineering Science, Vol. 6, 1956, pp. 89-93.