

AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DE REATOR UASB SUBMETIDO À VARIAÇÃO CÍCLICA DE VAZÃO

HYDRODYNAMIC EVALUATION OF A UASB REACTOR SUBMITTED TO CYCLICAL FLOWRATE VARIATION

KARINA QUERNE DE CARVALHO

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Maringá - UEM. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Doutora em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Professora do Curso de Tecnologia em Gestão Ambiental e Engenharia Ambiental da UTFPR

MONIQUE TOLEDO SALGADO

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Doutoranda em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP

FERNANDO HERMES PASSIG

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Professor e Coordenador do Curso de Tecnologia em Gestão Ambiental e Engenharia Ambiental da UTFPR

EDUARDO CLETO PIRES

Engenheiro Mecânico pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - USP. Mestre em Engenharia Mecânica pela PUC-RJ. Doutor e Livre-Docente em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Professor Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP

Recebido: 10/04/07 Aceito: 06/05/08

RESUMO

Um reator UASB em escala piloto (160 l) foi usado com o objetivo de estudar seu comportamento hidrodinâmico quando submetido a variações cíclicas senoidais da vazão afluyente. Os ensaios foram realizados com traçador eosina Y para as condições operacionais: vazão média afluyente constante e igual a 16 l.h⁻¹ e tempo de detenção hidráulica de 10 h (ensaios 1 e 2), e para vazão afluyente submetida à variação senoidal de 40% (ensaios 3 e 4) e de 60% (ensaio 5). A variação da concentração do traçador no efluente foi ajustada pelos modelos teóricos de dispersão de fluxo e de reatores em série. O reator UASB apresentou comportamento similar ao de reator de mistura completa para vazão média afluyente constante e similar ao reator de fluxo pistonado com a aplicação das variações senoidais cíclicas, sendo que o modelo de pequena dispersão apresentou melhor ajuste matemático.

PALAVRAS-CHAVE: Difusão, bio-reator, hidrodinâmica, traçador, fenômeno de cauda

ABSTRACT

A bench scale UASB reactor (160 l) was used in stimulus-response assays in order to evaluate its behaviour when submitted to cyclical sinusoidal variations of the influent flow rate. Assays were carried out with eosin Y as the tracer in different operational conditions: constant mean influent flow rate of 16 l.h⁻¹ and hydraulic residence time of 10 h (assays 1 and 2), and influent flow rate submitted to sinusoidal variation of 40% (assays 3 and 4) and 60% (assay 5). The variation of tracer concentration in the effluent was adjusted by the theoretical models of dispersion (low and high) and N-continuous stirred tank reactors in series. Complete mixture behaviour was noted to the application of the constant influent flow rate and a plug flow one to the application of the cyclical sinusoidal variations of the influent flow rate. The low dispersion model demonstrated the best mathematical adjustment in the RTD.

KEYWORDS: Diffusion, bioreactor, hydrodynamics, tracer, tailing phenomena

INTRODUÇÃO

A aplicação de modelos matemáticos para previsão do comportamento dinâmico de reatores UASB está recebendo atenção particular com a divulgação do modelo ADM 1 proposto pela IWA. Uma das etapas

necessárias para uso desse modelo, ou de qualquer outro, é o conhecimento detalhado do comportamento hidrodinâmico.

A hidrodinâmica dos reatores anaeróbios tem papel importante porque pode influenciar a velocidade das reações biológicas, por meio de

alterações na taxa de transferência de massa e a distribuição das reações ao longo do reator. Como consequência da distribuição da biomassa e do encaqueamento das reações bioquímicas, diferentes regiões do reator apresentam composições diferentes, em função do tipo de escoamento imposto.

Além disso, curtos-circuitos hidráulicos, caminhos preferenciais e zonas mortas (sem presença de substrato na alimentação) podem prejudicar a eficiência dos reatores no tratamento de águas residuárias devido à diminuição do volume útil e do tempo de detenção hidráulica dos reatores.

Brito e Melo (1997) avaliaram o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB em escala de laboratório, com volume de aproximadamente 480 ml e mantido à temperatura de 30°C. O substrato era composto por mistura de ácidos acético e propiônico na proporção de 4,5:1,0. O reator foi operado com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 1,7 h e velocidade ascensional de 0,22 m.h⁻¹. A imobilização do reator com 21 kg.m⁻³ de sólidos voláteis foi feita com biomassa anaeróbia granular proveniente de reator UASB em escala real tratando água residuária de indústria de farinha de trigo. Os ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foram realizados com injeção de volume de 2 ml de cloreto de lítio e concentração de 5 g.l⁻¹ na linha de alimentação do reator UASB.

Os autores verificaram a presença de gradiente da concentração do substrato ao longo da altura do reator, o que pode indicar comportamento hidrodinâmico semelhante ao reator tipo tubular ideal. Isso ocorreu devido à baixa velocidade ascensional de operação aplicada ao reator e a insuficiente produção gasosa obtida para promover a turbulência necessária à mistura do fluido interno. O coeficiente de ajuste de 0,97 foi obtido para as curvas experimentais de distribuição do tempo de residência (DTR) quando foi aplicado o modelo de tanques em série (N-CSTR) com equivalência de 4 reatores de mistura completa. Os autores destacam o surgimento de cauda nas amostras do efluente do reator contendo cloreto de lítio, o que poderia indicar a presença de zonas estagnadas no reator.

Morgan-Sagastume et al (1997) estudaram a influência da posição do sistema de coleta de biogás no comportamento hidrodinâmico de um reator em escala piloto com volume de 840 l. O reator foi operado com TDH de 5,8 h e vazão média afluente de 3,45 m³.d⁻¹ e inoculado com 264 l de lodo anaeróbio granular. Os ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foram realizados com injeção de volume de 10 ml de bromocresol verde e con-

centração de 14,1 mg.l⁻¹ na linha de alimentação do reator. O bromocresol verde foi escolhido por não absorver ou adsorver na biomassa e por apresentar estabilidade nos parâmetros pH e potencial redox na operação do sistema com água de torneira.

Os autores verificaram que o posicionamento do coletor de biogás (como barreira física) mais próximo ao manto de lodo diminuiu a fração de volume morto no interior do reator ao introduzir uma zona de equalização de fluxo de vazão, ou seja, evitou o aparecimento de caminho preferencial no interior do reator e aumentou a eficiência do sedimentador. O comportamento hidrodinâmico do reator apresentou tendência a escoamento tubular com o posicionamento do coletor de biogás próximo ao manto de lodo.

Esse trabalho pretende avaliar o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB em escala piloto (160 l) submetido a variações cíclicas diárias de cargas orgânicas e hidráulicas de vazão com período de 24 h. Com isso objetiva-se analisar a influência das variações cíclicas diárias de cargas orgânicas e hidráulicas em períodos curtos

de duração iguais ou menores que 24 h, comuns em esgoto de origem doméstica e frequentemente encontradas em pequenas instalações de tratamento. Como primeira etapa do estudo, um levantamento da resposta hidrodinâmica do reator nessas condições foi elaborado, variando-se senoidalmente a vazão média afluente em até 60%, em valores inferiores e superiores. Posteriormente, os resultados experimentais obtidos foram comparados com modelos matemáticos de uso corrente na avaliação hidrodinâmica de reatores.

METODOLOGIA

Reator

Os ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foram realizados em um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) em escala piloto confeccionado em PVC com 1,86 m de altura, 300 mm de diâmetro e volume total de 160 l (Figura 1). O reator UASB foi operado para estudar a influência das variações cíclicas senoidais de cargas orgânicas e hidráulicas da vazão média afluente durante 370 dias.

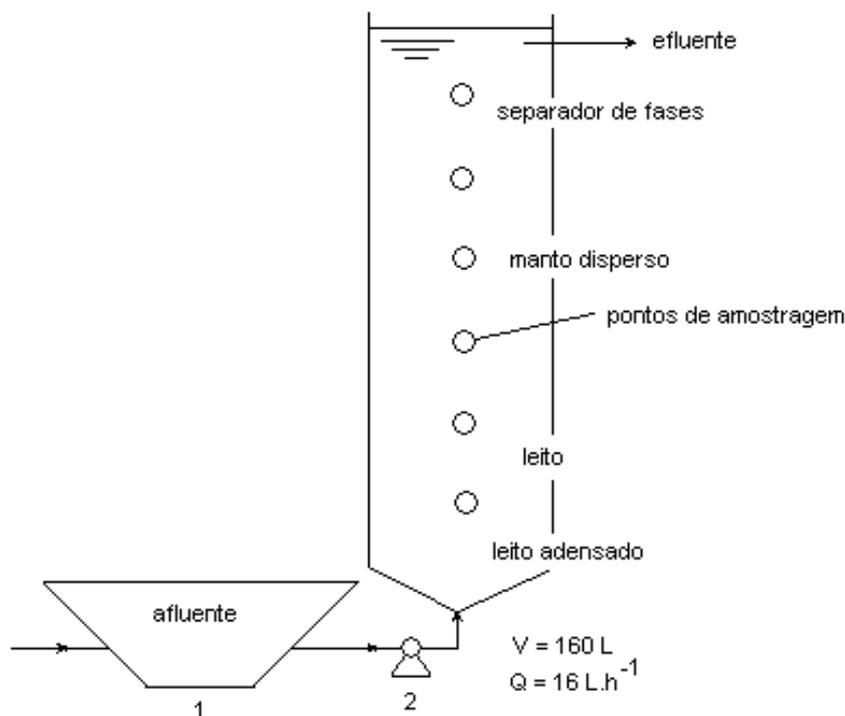


Figura 1 - Esquema do reator UASB em escala piloto. (1) Reservatório do afluente (590 L), (2) bomba dosadora

Inóculo

O reator foi inoculado com aproximadamente 55 L de lodo anaeróbio granular proveniente de reator anaeróbio que trata água residuária de abatedouro de aves. Esse lodo foi escolhido por apresentar diversidade microbiana verificada por exames microbiológicos com microscopia ótica comum, de fluorescência e de contraste de fase com microscópio Leica DM LB (ob 100x), sistema de câmera digital Leica DC 200 e programa computacional *Image Pro-Plus* na versão 4.5.0. Os exames microbiológicos do inóculo identificaram predomínio de bacilos delgados e curvos; bacilos ovalados, bacilos com extremidades arredondadas, filamentos e cocos. Dentre as arqueias metanogênicas, predominaram bacilos fluorescentes e filamentos semelhantes a *Metanosaeta* sp., bacilos curvos fluorescentes e cistos de sarcinas e arqueias metanogênicas semelhantes a *Metanosarcina* sp.

Determinações das concentrações de sólidos totais, sólidos totais voláteis e de sólidos totais fixos resultaram em aproximadamente 36 g.l⁻¹, 30 g.l⁻¹ e 6 g.l⁻¹, respectivamente.

Esgoto

O reator foi alimentado continuamente com esgoto doméstico com concentração de matéria orgânica variando na faixa de 573 mg.l⁻¹ a 687 mg.l⁻¹ em termos de DQO em todas as etapas dos ensaios de estímulo-resposta e mantido a temperatura ambiente. A caracterização do esgoto doméstico foi realizada por determinações das concentrações dos parâmetros de controle: DQO (bruta e filtrada), pH, ácidos voláteis e alcalinidades total e a bicarbonato, sólidos totais e sólidos suspensos (Tabela 1).

Operação do reator

A Tabela 2 apresenta as três principais etapas de operação do reator UASB.

A etapa I teve início, após o período de partida em regime de batelada do reator por 24 h. Nessa etapa o reator foi operado com vazão média afluente constante e igual a 16,0 l.h⁻¹ e tempo de detenção hidráulica de 10 h durante 309 dias. O estado de equilíbrio dinâmico aparente foi alcançado no 90° dia de operação do reator e verificado por

Tabela 1 - Caracterização do esgoto doméstico

Parâmetros	Substrato				
	N	\bar{X}	DP	Min	Máx
pH	64	6,4	0,0	6,4	6,5
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	64	191	9	181	206
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	64	628	40	573	687
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	64	419	19	394	447
ST (mg.L ⁻¹)	64	627	62	442	747
STV (mg.L ⁻¹)	64	453	76	307	578
STF (mg.L ⁻¹)	64	174	34	135	205
SST (mg.L ⁻¹)	64	97	9	85	107
SSV (mg.L ⁻¹)	64	85	8	75	94
SSF (mg.L ⁻¹)	64	12	6	8	19

N: número de amostras; \bar{X} : média aritmética; DP: desvio padrão; Min: valor mínimo; Máx: valor máximo

Tabela 2 - Condições operacionais do reator UASB

Etapas	Período de operação (dia)	Q (l.h ⁻¹)	TDH (h)	Velocidade ascensional (m.h ⁻¹)
I	0 a 309	16,0	10	0,23
II	310 a 344	mín = 14,5	11	0,21
		máx = 17,5	9	0,25
III	345 a 372	mín = 13,7	12	0,20
		máx = 18,3	8	0,26

meio de determinação dos parâmetros de controle: DQO (bruta e filtrada), ácidos voláteis, pH, alcalinidades total e a bicarbonato, sólidos suspensos fixos e voláteis e sólidos totais fixos e voláteis.

Na etapa II, o reator UASB foi submetido a variações senoidais cíclicas em valores inferiores e superiores a 40% da vazão média afluente, alcançando picos de mínimo e de máximo iguais a 9,6 l.h⁻¹ e 22,4 l.h⁻¹, respectivamente, durante 34 dias.

A aplicação da variação senoidal, com período de 24h e amplitudes de 40% e 60% do valor da vazão média, foi realizada por programa computacional que alterava percentualmente a vazão média afluente da bomba dosadora em intervalos de 15 min. O comportamento do reator foi avaliado por determinação dos mesmos parâmetros de controle da etapa I, que indicou o alcance do estado de equilíbrio dinâmico aparente no 319° dia de operação.

A etapa III teve início no 345° dia de operação do reator com aplicação da variação senoidal cíclica em valores

inferiores e superiores a 60% da vazão média afluente, alcançando picos de mínimo e de máximo iguais a 6,4 l.h⁻¹ e 25,6 l.h⁻¹, respectivamente, durante 27 dias. O comportamento do reator nessa etapa foi avaliado por meio da determinação dos mesmos parâmetros das etapas anteriores.

Monitoramento

Análises dos parâmetros DQO (bruta e filtrada), DBO, pH, sólidos suspensos fixos e voláteis e sólidos totais fixos e voláteis foram realizadas em amostras do afluente (substrato) e do efluente para avaliar o comportamento do reator UASB durante todo o período de operação do reator (Tabela 3), de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1998). As análises de alcalinidade total e a bicarbonato foram realizadas em amostras do substrato e do efluente segundo metodologia descrita por Dillalo e Albertson (1961) e modificada por Ripley et al (1986). As concentrações de

ácidos voláteis foram determinadas em amostras do substrato e do efluente de acordo com metodologia proposta por Dillalo e Albertson (1961).

Os resultados experimentais obtidos nas três etapas de operação do reator UASB estão apresentados na Tabela 7.

Procedimentos dos ensaios hidrodinâmicos

Os procedimentos adotados para realização dos ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foram divididos em três etapas (Tabela 4). Na primeira etapa foram realizados dois ensaios de estímulo-resposta com o reator sendo operado com vazão média afluente constante igual a 16 l.h⁻¹ e tempo de detenção hidráulica de 10 h. Nas etapas II e III o reator foi submetido a variações cíclicas senoidais da vazão afluente em valores inferiores e superiores a 40% e 60%, respectivamente.

Todos os ensaios foram realizados com corante eosina Y como traçador após o reator UASB ter alcançado o estado de equilíbrio dinâmico aparente em cada etapa. Esse traçador foi escolhido em razão de suas características que permitem fácil detecção, elevada recuperação da massa injetada, estabilidade e segurança no manuseio. Outros autores também empregaram o traçador eosina Y em ensaios de estímulo resposta para determinação das curvas de distribuição do tempo de detenção hidráulica de reatores biológicos no tratamento de águas residuárias (Jiménez et al, 1988a; De Nardi et al, 1999).

O método colorimétrico de leitura de absorbância foi aplicado para determinação da concentração de eosina Y nas amostras do efluente do reator. As leituras dos comprimentos de ondas foram realizadas em espectrofotômetro Hach uv-vis, modelo DR/2000, com comprimento de onda de 516nm.

As condições operacionais do reator, a concentração e a massa molecular do traçador são apresentadas na Tabela 4. Medidas foram tomadas para garantir que a injeção do traçador fosse o mais similar possível de um pulso ideal. O volume de injeção do traçador foi de aproximadamente 20 ml em cada ensaio e o tempo de injeção foi de aproximadamente 50 s.

A concentração inicial do traçador usada no experimento foi baseada na solubilidade da eosina Y, observando sua faixa de detecção nas análises

colorimétricas. Com a realização do primeiro ensaio hidrodinâmico (800 mg de traçador), foi possível observar que a quantidade de massa de traçador injetada no reator poderia ser reduzida de 40% a 50% e as concentrações de eosina Y no efluente poderiam ser detectadas dentro da faixa de detecção adotada. Dessa maneira, optou-se por reduzir a quantidade de massa do traçador nos ensaios hidrodinâmicos subsequentes.

O tempo total de duração dos ensaios foi determinado de tal forma que as amostras fossem coletadas pelo menos durante três vezes o tempo de detenção hidráulica teórico, com intervalos não superiores a uma hora. As amostras coletadas foram centrifugadas por cerca de 4 minutos para evitar a interferência da presença de sólidos na leitura das absorbâncias pelo método colorimétrico.

Os termos apresentados na Tabela 5 foram aplicados nas análises dos dados experimentais de acordo com Levens-

piel (2000). As curvas experimentais da variação de concentração do traçador ao longo do tempo, C(t), foram normalizadas (área sobre a curva igual a 1) de acordo com Levenspiel (2000), resultando em curvas de distribuição do tempo de residência hidráulica (E_{θ}) em função do tempo adimensional (θ). Após a normalização, foi possível calcular a variância para cada ensaio (σ_{θ}^2).

O ajuste das curvas experimentais de distribuição do tempo de detenção hidráulica em função do tempo adimensional foi realizado com base nos modelos teóricos uniparamétricos de dispersão - de pequena (PD) e de grande intensidade (GD) e de tanques em série (N-CSTR) (Tabela 6).

Os modelos de dispersão representam o reator avaliado por um reator de fluxo pistonado no qual ocorre dispersão axial do escoamento. Nesse modelo, o escoamento do fluido ocorre de forma ordenada através do reator, ou seja, não há mistura ou difusão ao longo do caminho de escoamento. O

Tabela 3 - Parâmetros analisados, seus respectivos métodos e bibliografia utilizada

Parâmetros	Método de análise	Método n°	Referência
Temperatura	-	-	-
pH	Potenciométrico	4500_H+	APHA, 1998
Alcalinidade	Titulométrico	-	Dillalo e Albertson (1961) modificado por Ripley et al (1986)
DQO	Espectrofotométrico	5220_D	APHA (1998)
DBO	Titulométrico	5210_D	APHA (1998)
Sólidos suspensos	Gravimétrico	2540_G	APHA (1998)
Sólidos totais	Gravimétrico	2540_E	APHA (1998)
Ácidos voláteis	Titulométrico	-	Dillalo e Albertson (1961)

Tabela 4 - Características dos ensaios de estímulo-resposta realizados no reator UASB

Etapas	Ensaio	Tempo de Detenção Hidráulica (TDH)	Vazão afluente	Massa aplicada de traçador	Concentração de traçador
		(H)	(l.h ⁻¹)	(mg)	(mg.20ml ⁻¹)
1	1	10	16	800	40,0
	2	10	16	442	22,1
2	3	var.1	*40%.Q	706	35,3
	4	var.	*40%.Q	436	21,8
3	5	var.	**60%.Q	458	22,9

modelo de tanques em série simula o comportamento do reator avaliado por N (número) reatores de mistura completa (ideais) em série. A mistura completa indica que o conteúdo está agitado e uniforme em todo o reator, ou seja, a corrente de saída (efluente) tem a mesma composição que o fluido no interior do reator. Essas características podem ser verificadas pelos parâmetros D (ou $\frac{D}{uL}$) para os modelos de pequena e grande dispersão ou pelo número (N) de reatores de mistura completa em série para o modelo N-CSTR. A estimativa desses parâmetros foi realizada pela variância dos dados de resposta apresentados na Tabela 6.

A Tabela 5 apresenta um resumo das definições das variáveis empregadas nos modelos uniparamétricos para obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica (E_θ) em função do tempo adimensional (θ).

Os modelos teóricos uniparamétricos de dispersão de pequena (PD) e de grande intensidade (GD) e de tanques em série (N-CSTR) são apresentados na Tabela 6.

Para as etapas II e III, com aplicação das variações da vazão média afluyente, foi necessário corrigir a vazão afluyente para cada intervalo de tempo (t). Como a vazão média afluyente era controlada por programa computacional que simulava a variação senoidal, foi possível obter os valores das variações em cada intervalo de tempo de 15 min.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 7 apresenta um resumo dos resultados experimentais obtidos nas etapas I, II e III de operação do reator UASB, ou seja, submetido à vazão média afluyente constante e a variações senoidais cíclicas de 40% e de 60%, respectivamente.

Pela Tabela 7 é possível observar que o reator apresentou comportamento estável quanto ao pH em todas as etapas, com valores variáveis de 6,2 a 6,6 no afluyente e de 6,6 a 7,1 no efluente.

Os valores obtidos para as concentrações de alcalinidade total e a bi-

carbonato no efluente foram superiores àqueles obtidos para o afluyente em todas as etapas de operação do reator, o que indicou a capacidade de tamponamento do reator mesmo quando submetido a variações cíclicas da vazão afluyente. As concentrações de ácidos voláteis no efluente resultaram em valores inferiores a 90 mgHAc.l⁻¹ nas três etapas de operação. Foi possível observar o acúmulo de ácidos no efluente com a aplicação das variações senoidais cíclicas de vazão, principalmente nos períodos de aumento da vazão média para máxima. O aumento das concentrações de ácidos voláteis pode ter ocorrido devido à maior velocidade ascensional de fluxo, que acarretou em menor tempo de contato entre o substrato e a biomassa para a realização da metanogênese. Lew et al. (2004) e Leitão et al (2005) também observaram maiores concentrações de ácidos voláteis na operação de reatores UASB com tempos de detenção hidráulica reduzidos.

A eficiência do sistema na remoção de matéria orgânica diminuiu aproximadamente 13% e 21% com a

Tabela 5 - Definição das variáveis usadas para obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica (E_θ) em função do tempo adimensional (θ)

Variáveis	Definição
F_i	$\frac{C_i}{S}$
S	$\sum C_i \Delta t_i$
t_{gr}	$\frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$
θ	$\frac{t}{t_R}$
t_{Rc}	$t_R F_c$
σ^2	$\frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - t_{Rc}^2$
$\sigma_{t_{Rc}}^2$	$\frac{\sigma^2}{t_{Rc}^2}$

Tabela 6 - Definição das variáveis usadas para obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica (E_θ) em função do tempo adimensional (θ)

Modelo	Parâmetro	Equação
Dispersão de pequena intensidade	$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left(\frac{D}{uL} \right)$	$E_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/uL)}} \exp \left[-\frac{(1-\theta)^2}{4(D/uL)} \right]$
Dispersão de grande intensidade (tanque aberto)	$\sigma_{\theta,ta}^2 = 2 \left(\frac{D}{uL} \right) + 8 \left(\frac{D}{uL} \right)^2$	$E_{\theta,ta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/uL)}} \exp \left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/uL)} \right]$
Tanques de mistura completa em série	$N = \frac{1}{\sigma_{\theta}^2} = \frac{\bar{\theta}^2}{\sigma^2}$	$E_{\theta} = \frac{N(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta}$

Tabela 7 - Resumo dos resultados de operação obtidos nas etapas I, II e III

Parâmetros	Qméd = 16,0 L.h ⁻¹ ; TDH = 10 h						Q = 40%*Qméd; TDH = var.						Q = 60%*Qméd; TDH = var.												
	Afluente			Efluente			Afluente			Efluente			Afluente			Efluente									
	M	DP	MÁX	M	DP	MÍN	MÁX	M	DP	MÍN	MÁX	M	DP	MÍN	MÁX	M	DP	MÍN	MÁX						
pH	6,3	0,1	6,2	6,4	6,9	0,1	6,8	7,1	6,5	0,1	6,4	6,6	7,0	0,1	6,9	7,1	6,4	0,1	6,3	6,5	6,9	0,1	6,6	7,0	
Temp. do líquido (°C)	-	-	-	-	23,9	1,0	22,0	25,0	-	-	-	-	21,1	1,2	20,0	23,0	-	-	-	-	-	24,0	1,0	22,5	25,0
Alc total (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	196	8	184	206	261	19	244	295	176	19	162	213	199	12	181	213	181	11	158	195	240	14	218	263	
Alc bic. (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	84	20	52	117	231	18	211	261	92	17	77	131	164	20	140	192	52	3	46	57	197	12	184	216	
Ác.vol (mgHAC.L ⁻¹)	145	28	103	196	41	10	26	54	118	11	105	133	49	24	21	86	168	13	142	188	60	7	47	70	
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	693	127	588	909	267	62	207	360	750	142	600	916	384	101	211	494	562	77	487	729	347	36	303	411	
% remoção DQO bruta	-	-	-	-	61	-	-	-	-	-	-	-	48	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-	
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	502	69	426	595	134	30	99	189	480	76	404	643	186	57	106	255	404	69	314	527	170	21	141	199	
SST (mg.L ⁻¹)	105	24	78	145	72	20	50	120	127	44	81	198	121	39	71	177	84	19	64	117	92	13	78	116	
SSV (mg.L ⁻¹)	99	22	77	139	63	24	21	109	114	40	68	178	111	34	65	162	75	16	60	106	84	12	70	104	
SSF (mg.L ⁻¹)	6	5	0	14	9	9	3	29	13	5	6	20	9	7	1	19	9	5	4	20	8	3	4	12	

M: média aritmética; DP: desvio padrão; Mín: valor mínimo; Máx: valor máximo

aplicação das variações senoidais cíclicas da vazão média afluyente de 40% e de 60%, respectivamente. A eficiência do sistema foi prejudicada pelo arraste de sólidos no efluente, provavelmente pela formação dos bolsões devido ao acúmulo de biogás no manto de lodo. Com a aplicação das variações senoidais cíclicas da vazão afluyente de 40% e de 60%, foi possível observar maior arraste de sólidos nos períodos de aumento da velocidade ascensional de fluxo. Esse fenômeno também foi verificado por Mahmoud et al (2003). Aiyuk et al (2003) ressaltam que o aumento do arraste de sólidos no efluente pode ocorrer devido à ruptura (quebra) do grânulo do lodo anaeróbio usado no tratamento de esgoto doméstico de baixa concentração.

Resultados dos ensaios hidrodinâmicos

As curvas de variação das concentrações de eosina Y ao longo do tempo nas amostras do efluente do reator são apresentadas na Figura 2.

O lento decaimento observado nas concentrações de eosina Y ao longo do tempo pode indicar o fenômeno de "cauda", tanto para os ensaios realizados com vazão média afluyente constante de 16 l.h^{-1} e tempo de detenção hidráulica de aproximadamente 10 h (Figura 2, a e b), quanto para os experimentos realizados com variação senoidal cíclica da vazão média afluyente de 40% e de 60% (Figura 2, c, d, e). O efeito da cauda provavelmente ocorreu devido aos fenômenos de difusão em zonas mortas do reator, adsorção do traçador na biomassa do reator ou curto circuito hidráulico (Levenspiel, 2000). Outros estudos também observaram o efeito de cauda longa (Stevens et al, 1986; Jiménez et al, 1988a; Jiménez et al, 1988b; de Nardi et al, 1999; Lima, 2001).

Jiménez et al (1988a) observaram o fenômeno de cauda devido à difusão da eosina Y e de outros traçadores que distorcem o formato das curvas de resposta e levam ao erro do ajuste dos modelos matemáticos e da interpretação do comportamento hidrodinâmico de reatores.

De Nardi et al (1999) observaram o efeito da cauda na determinação do comportamento hidrodinâmico do reator anaeróbio horizontal com leito fixo (RAHLF) com lodo imobilizado em meio suporte de cerâmica. Os ensaios

de estímulo-resposta tipo pulso foram realizados com os traçadores dextrano azul, bromocresol verde e eosina Y em meio abiótico e o efeito cauda observado pode ter ocorrido devido ao fenômeno de difusão do traçador no meio suporte utilizado.

Lima (2001) avaliou a hidrodinâmica de reator anaeróbio horizontal com leito fixo (RAHLF) sendo operado com água e esgoto em diversos estágios de operação e vazão volumétrica e com diferentes traçadores, entre eles a eosina Y. O autor constatou visualmente a adsorção desse traçador na espuma com a abertura do reator após os ensaios. O traçador permaneceu retido na espuma após uma série de lavagens e expulsão do volume estagnado em uma matriz. Apesar do fenômeno observado, o autor constatou que o traçador foi adequado para o monitoramento dos desvios do escoamento e do comprometimento do volume útil ao longo dos estágios de operação. Observe-se que no reator estudado no presente trabalho não foi utilizado meio suporte.

Mesmo após a centrifugação das amostras do efluente para os ensaios de estímulo-resposta 3, 4 e 5, foi possível verificar algumas variações nas leituras de absorvância devido à presença de sólidos nessas amostras (Figura 2, c, d e e). Os pontos isolados das curvas de variação da concentração de eosina Y ao longo do tempo foram desconsiderados na análise matemática por apresentarem concentração anormal de traçador.

Os valores obtidos para recuperação da massa do traçador injetada no reator resultaram em: 85% e 86% para os ensaios 1 e 2, respectivamente; 88% e 90% para os ensaios 3 e 4, respectivamente e 90% para o ensaio 5.

Brown et al (1984) verificaram 85% de recuperação do traçador bromofenol azul nas amostras do efluente de reatores de lodo ativado em escala real nos ensaios hidrodinâmicos. Jiménez et al (1988a) obtiveram recuperação de traçador nas amostras do efluente variando de 41 a 51% em ensaios com eosina Y na presença de biomassa; Brito e Melo (1997) alcançaram recuperação de 95% do cloreto de lítio usado em estudo hidrodinâmico de reator UASB com biomassa anaeróbia granular; Lima (2001) obteve porcentagem de recuperação de 90% da massa injetada ao avaliar a hidrodinâmica do reator RAHLF tratando esgoto sanitário; Passig (2005) obteve recuperação de

traçador variando de 42% a 89% na operação de reator UASB em escala real ($18,8 \text{ m}^3$) tratando esgoto sanitário à temperatura média de 24°C .

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos com o ajuste das curvas de distribuição do tempo de residência pelos modelos matemáticos teóricos, de acordo com Levenspiel (2000).

Observa-se em todos os ensaios que o tempo de detenção hidráulica real obtido por meio da curva DTR variou entre 14 e 16 horas. Os valores experimentais obtidos foram superiores ao TDH teórico por apresentarem diferenças significativas de 40% e de 60% nos ensaios 1 e 2, respectivamente e de 50% nos ensaios 3, 4 e 5 em relação ao tempo de detenção hidráulica teórico de aproximadamente 10 h. Esses resultados demonstraram atraso na resposta do traçador, o que pode indicar existência de zonas mortas no interior do reator ou adsorção do traçador na biomassa. O traçador teria se difundido nestas zonas mortas, sendo liberado aos poucos, o que provoca atraso em sua resposta na saída do reator e gera o fenômeno de cauda longa, como foi observado nas curvas experimentais.

Stevens et al (1986) notaram que os tempos de detenção hidráulica médios estimados a partir das curvas DTR foram aproximadamente 100% superiores do que os tempos teóricos em um reator anaeróbio de leito fluidizado devido à difusão do traçador Rodamina WT no biofilme.

Observando os dados da Tabela 8, nota-se que na etapa 1 (sem variação de vazão), o modelo teórico de N-CSTR em série fornece resultados iguais a 5 e 4 reatores e o modelo de pequena dispersão valores iguais a 0,112 e 0,121. Passig (2005) constatou que o reator UASB equivale a 5 reatores de mistura perfeita em série e obteve valor de 0,11 para o modelo de pequena dispersão. Portanto, pode-se concluir que esses valores encontrados estão muito próximos aos relatados na literatura técnico-científica.

Ainda na Tabela 8, nas etapas 2 e 3 observa-se aumento do número de N-CSTR em série e diminuição do valor referente ao modelo de pequena dispersão, provavelmente devido ao aumento da amplitude da variação da vazão afluyente. O aumento da amplitude de variação de vazão média afluyente ocasionou aumento do N-CSTR para 11 reatores de mistura perfeita em

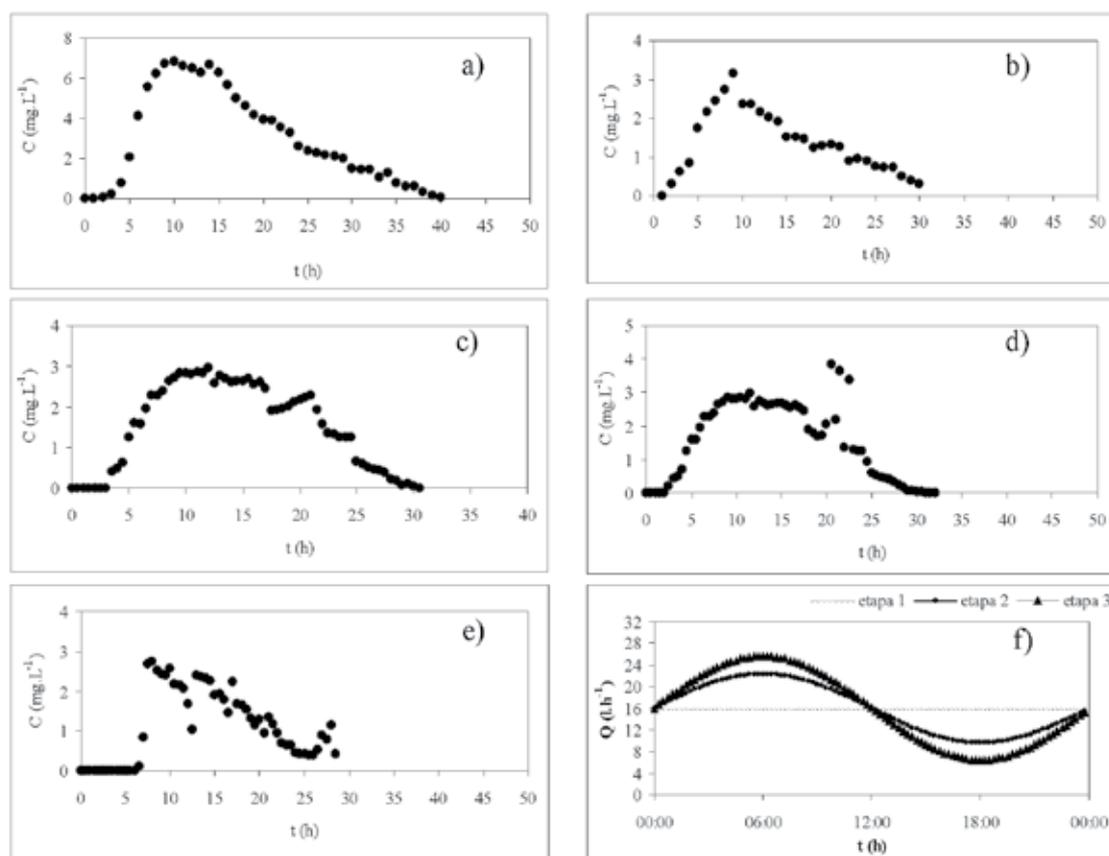


Figura 2 - Curvas de variação da concentração de eosina Y ao longo do tempo nas amostras de efluente do reator para os ensaios de estímulo-resposta: $Q=16 \text{ l.h}^{-1}$ e $TDH=10\text{h}$: a - ensaio 1, b - ensaio 2; $Q=40\%Q$ e $TDH= \text{var.}$: c - ensaio 3, d - ensaio 4; $Q=60\%Q$ e $TDH = \text{var.}$: e - ensaio 5; f - variação da vazão afluyente

série e diminuição do valor de pequena dispersão para valor igual a 0,045. Com isso o comportamento hidrodinâmico do reator se aproxima do reator de fluxo pistonado. Cabe salientar que os valores do modelo de grande dispersão não sofreram alteração em função do aumento da amplitude de variação da vazão afluyente ao reator.

A Tabela 9 apresenta os resultados de coeficientes de correlação obtidos para os modelos matemáticos teóricos.

Na Tabela 9, pode-se observar que o modelo matemático de pequena dispersão apresentou os melhores ajustes dos dados experimentais para os ensaios com vazão média afluyente constante e com variação senoidal cíclica da vazão média afluyente.

Os valores de tempo de detenção hidráulica (TDH) e do parâmetro N não apresentaram diferenças significativas, o que indicou grau de mistura

semelhante para os ensaios realizados. Os resultados experimentais obtidos para TDH apresentaram diferenças significativas de 40% e de 60% nos ensaios 1 e 2, respectivamente e de 50% nos ensaios 3, 4 e 5 em relação ao tempo de detenção hidráulica teórico de 10 h.

As curvas experimentais de distribuição do tempo de residência (DTR) obtidas com o ajuste de modelos matemáticos são apresentadas na Figura 3.

Observa-se que os modelos de pequena dispersão (PD) e de grande dispersão (GD) apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais, apesar de inicialmente os ensaios não respeitarem suas premissas ($D/uL < 0,01$ e dispersão idêntica dentro e fora do volume de controle). Entretanto, isto não significa que o ajuste tenha sido satisfatório, porque, mesmo neste modelo, foi grande a dispersão em relação aos valores experimentais. Como o

modelo N-CSTR previu a ocorrência de uma concentração máxima de traçador, a qual não ocorreu, seu ajuste tornou-se comprometido (Figura 3 a, b, c, d e).

Nos perfis experimentais, foi detectada atenuação do pico devido ao retardo da passagem do traçador da porção posterior ao pico (efeito de cauda).

CONCLUSÕES

Na avaliação hidrodinâmica constatou-se que o reator UASB apresentou comportamento próximo ao de reator de mistura completa com aproximadamente 4 ou 5 reatores de mistura completa (N-CSTR) em série, para o ensaio sem variação de vazão afluyente. Com o aumento da amplitude da variação da vazão afluyente do reator constatou-se que o comportamento do reator se aproxima de um reator de fluxo pistonado.

Tabela 8 - Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para reator UASB

Etapas	Ensaio	TDH	N-CSTR	Pequena dispersão	Grande dispersão
		(H)		(PD)	(GD)
1	1	16	5	0,112	0,075
	2	14	4	0,121	0,079
2	3	15	8	0,064	0,075
	4	15	7	0,072	0,075
3	5	15	11	0,045	0,075

Tabela 9 - Coeficientes de correlação obtidos com o ajuste dos resultados experimentais pelos modelos teóricos

Etapas	Ensaio	Coeficiente de correlação (r)		
		Pequena dispersão	Grande dispersão	N-CSTR em série
1	1	0,809	0,809	0,663
	2	0,890	0,867	0,720
2	3	0,890	0,772	0,742
	4	0,795	0,779	0,714
3	5	0,771	0,704	0,705

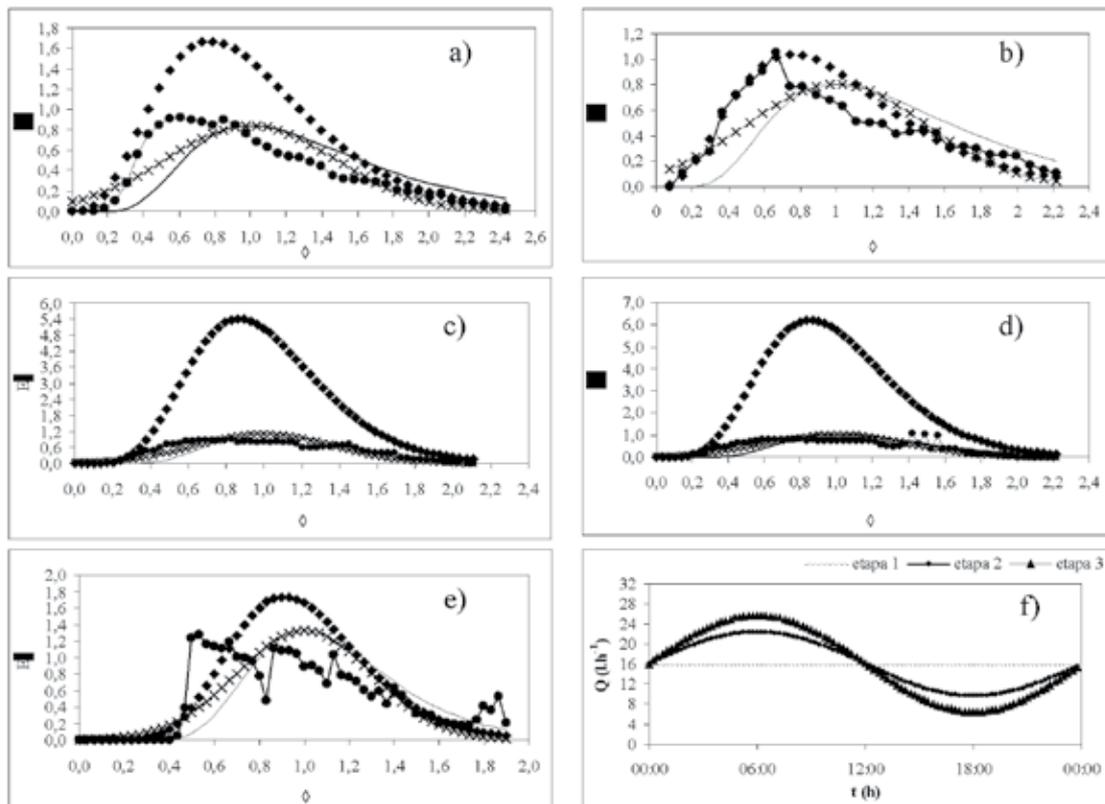


Figura 3 - Curvas de DTR obtidas experimentalmente com uso de eosina Y em diferentes condições operacionais do reator UASB: $Q=16 \text{ l.h}^{-1}$ e $TDH=10\text{h}$: a - ensaio 1, b - ensaio 2; $Q=40\%$. Q e $TDH= \text{var.}$: c - ensaio 3, d - ensaio 4; $Q=60\%$. Q e $TDH= \text{var.}$: e - ensaio 5; f - variação da vazão afluente. --- Dados experimentais; -x- pequena dispersão; \boxtimes N-CSTR em série; - grande dispersão

Apesar da aplicação das variações senoidais cíclicas de 40% e 60%, os parâmetros tempo de detenção hidráulica e grau de mistura do reator não apresentaram diferenças significativas quando comparados àqueles parâmetros obtidos para vazão média afluente constante.

Ao comparar o tempo de detenção hidráulica teórico com o determinado pelas curvas de DTR obtidas experimentalmente, verificou-se atraso de aproximadamente 50% da resposta do traçador que poderia indicar existência de zonas mortas hidrodinâmicas no interior do reator. O fenômeno de cauda observado nas curvas obtidas é resultante da difusão do traçador nessas zonas mortas e de sua lenta liberação.

AGRADECIMENTOS

Pelo apoio recebido, os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo FAPESP (Projeto temático nº. 01/05489-0, Bolsa de doutorado da Eng. Karina Querne de Carvalho - nº. 02/00683-6), e ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo em São Carlos - Escola de Engenharia de São Carlos.

REFERÊNCIAS

- AIYUK, S. et al. *Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates – a review*. Bioresource Technology, v.97, n. 17, p. 2225-241, Nov. 2006.
- BRITO, A.G.; MELO, L.F. *A simplified analysis of reaction and mass transfer in UASB and EGSB reactors*. Environmental Technology, v. 18, p. 35-43, Sept. 1997.
- BROWN, L; RHEAD, M.M.; HILL, D. *The use of bromophenol blue as a tracer in sewage works*. Water Research, v. 18, n. 9, p. 1083-087, Jan. 1984.
- DE NARDI, I.R.; ZAIAT, M; FORESTI, E. *Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors*. Bioprocess Engineering, v. 21, p. 469-76, Nov. 1999.
- JIMÉNEZ, B; NOYOLA, A; CAPDEVILLE, B. *Selected dyes for residence time distribution in bioreactors*. Biotechnology Techniques, v. 2, p. 77-82. 1988a.
- JIMÉNEZ, B. et al. *Dextran blue colorant as a reliable tracer in submerged filters*. Water Research, v. 22, p. 1253-257, Oct. 1988b.
- LEITÃO, R.C. et al. *The effect of operational conditions on the performance of UASB reactors for domestic wastewater treatment*. Water Science and Technology, v. 52, n. 1-2, p. 299-305. 2005.
- LEVENSPIEL, O. *Engenharia das Reações Químicas*. 3 ed. São Paulo. Ed. Edgard Blücher Ltda, 563 p, 2000.

LEW, B. et al. *UASB reactor for domestic wastewater treatment at low temperatures: a comparison between a classical UASB and Hybrid UASB-filter reactor*. Water Science and Technology, v. 49, n. 11-12, p. 295-301. 2004.

LIMA, C.A.A. *Tratamento de esgoto sanitário em reator horizontal de leito fixo (RAHLF) - Escala Piloto*. São Carlos, Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 165p, 2001.

MAHMOUD, N. et al. *Solids removal in upflow anaerobic reactors, a review*. Bioresource Technology, v. 90, n. 1, p. 1-9, Oct. 2003.

MORGAN-SAGASTUME, J.M.; JIMÉNEZ, B.; NOYOLA, A. *Tracer studies in a laboratory and pilot scale UASB reactor*. Environmental Technology, v. 18, p. 817-25. 1997.

PASSIG, F.H. *Reator anaeróbio híbrido para o tratamento de esgoto sanitário*. São Carlos, 148p. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2005.

STEVENS, D.K.; BERTHOUEX, P.M.; CHAPMAN, T.W. *The effect of tracer diffusion in biofilm on residence time distributions*. Water Research, v. 20, n. 3, p. 369-75, Mar. 1986.

Endereço para correspondência:

Karina Querne de Carvalho
Rua Mamborê, 987 - Centro
87302-140 Campo Mourão - PR
- Brasil
Telefax: (44) 3523-4156
E-mail: kaquerne@gmail.com

LISTA DE SÍMBOLOS

C_i = concentração de traçador, [M].[L]⁻³

D = coeficiente de dispersão, [L]².[T]⁻¹

$\frac{D}{uL}$ = número de dispersão do reator

E_i = curva de distribuição de idade de saída do traçador, [T]⁻¹;

E_i = Função de distribuição do tempo de residência hidráulica

N = número de reatores em série

S = área sob a curva concentração – tempo; [M]. [T]. [L]⁻³

t_R = tempo de médio de residência obtido da curva DTR, [T]

\bar{t} = tempo de residência médio adimensional

V^2 = variância, [T]²

V_i^2 = variância adimensional

t_a = tanque aberto