

PROPOSTA DE UM MÉTODO DE CÁLCULO DO TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO NO TRATAMENTO DE ESGOTOS POR LODOS ATIVADOS EM BATELADAS

PROPOSAL OF A CALCULATION METHOD TO DETERMINE THE SETTLING TIME IN BATCH ACTIVATED SLUDGE SEWAGE TREATMENT

RAFAEL CARVALHO DE OLIVEIRA SANTOS

Engenheiro Civil e Sanitarista da CEDAE. Mestre em Engenharia Ambiental pela UERJ. Professor Assistente do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da Faculdade de Engenharia da UERJ

OLAVO BARBOSA FILHO

Engenheiro Químico. PhD pelo Imperial College (Londres). Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da UERJ

GANDHI GIORDANO

Engenheiro Químico. D.Sc. Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela PUC – Rio. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da UERJ

Recebido: 31/01/05 Aceito: 12/05/05

RESUMO

Neste artigo é feita uma análise do funcionamento de reatores biológicos para tratamento de esgotos pelo processo de lodos ativados, em batelada. A análise destaca o ciclo de operação desses reatores, que inclui as etapas de aeração e sedimentação, indicando o tempo de sedimentação para o qual se obtém a máxima eficiência operacional. É apresentado um método de cálculo para a determinação racional deste tempo ótimo. O trabalho contém uma revisão da literatura concernente ao assunto estudado, com ênfase nos conceitos de sedimentação zonal e fluxo de sólidos, acompanhada da dedução do método de cálculo proposto.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de esgoto, tratamento de águas residuárias, lodos ativados em batelada, sedimentação, tempo de sedimentação.

INTRODUÇÃO

A tecnologia de tratamento de esgoto pelo processo de lodos ativados com operação em bateladas se desenvolve no interior de um tanque apenas, aqui denominado **reator**.

A operação do reator é cíclica. Em cada ciclo ele funciona inicialmente como **tanque de aeração** e, em seguida, como **decantador final**. Este modo de funcionamento implica a divisão do reator em duas partes superpostas. A parcela superior do volume útil do tanque, a **zona de carga**, é alternadamente encheda e esvaziada, o que determina a intermitência do fluxo de esgoto. A parte inferior consiste

na **zona de lodo**, na qual é acumulado o lodo do reator, quando completada a **fase de sedimentação**, uma vez decorrido o **tempo de sedimentação**.

Para que o tratamento promovido tenha boa eficiência, é necessário e suficiente que o reator opere bem tanto como tanque de aeração quanto como decantador final.

O reator por batelada será eficaz como tanque de aeração se o seu suprimento de oxigênio for satisfatório e se a massa de microrganismos no seu interior for suficiente para metabolizar a matéria orgânica a ele afluente. Uma vez provido o oxigênio requerido, resta garantir a quantidade bastante de biomassa nele presente. Isto dependerá, exclusivamente, do

seu bom desempenho como decantador final, desde que a remoção do excesso de lodo seja efetuada corretamente, pois que, então, a fuga de biomassa no efluente tratado será desprezível. A adoção de um tempo de sedimentação e de uma **altura da zona de carga** adequados garantirá o bom desempenho do reator como decantador final.

SEDIMENTAÇÃO ZONAL EM BATELADAS – TESTE DE SEDIMENTAÇÃO EM COLUNA

São reconhecidos três tipos de sedimentação, determinados pela natureza

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the operation of activated sludge sequencing batch reactors (SBR) for sewage treatment. Emphasis is placed on the operational cycle of those reactors, which includes the phases of aeration and sedimentation, indicating the settling time corresponding to the maximum operational efficiency. An explanation is made of a calculation method to determine this optimum settling time. The work includes a review of the literature concerning the subject of the present study, considering the concepts of hindered (zone) settling and solids flux, together with the derivation of the proposed calculation method.

KEYWORDS: Sewage treatment, wastewater treatment, activated Sludge, sequencing batch reactors, sedimentation, settling time.

dos sólidos suspensos (Jordão & Pessôa, 1995) e pela concentração com que os sólidos se encontram na suspensão: a **sedimentação discreta**, a **sedimentação floculenta** e a **sedimentação zonal**. Embora alguns autores como Metcalf & Eddy (1991) refiram-se a um quarto tipo de sedimentação, no qual se enquadraria o fenômeno de adensamento do lodo, julgam os autores deste trabalho mais adequado considerar tal fenômeno parte integrante do processo de sedimentação zonal, adotando o que preconizam autores outros como os citados Jordão & Pessôa (1995).

A sedimentação zonal ocorre porque as partículas sólidas em suspensão possuem concentração muito elevada e propriedades físicas bem semelhantes. A pequena distância entre elas é insuficiente para impedir a ação de forças interparticulares e, dentro de certa medida, tais forças podem mantê-las em posições fixas entre si, como peças de uma estrutura (Da-Rin & Nascimento, 1977). Isto faz com que as partículas se arranjam formando camadas que sedimentam de tal modo que cada camada se comporta como uma massa única, sujeita a uma resistência do fluido ao seu movimento tanto maior quanto mais elevada for a sua concentração de sólidos. O fenômeno se assemelha à passagem de um fluido através de um leito filtrante granular, no qual a resistência ao deslocamento do fluido é função da proximidade entre os grãos constituintes do leito. **Tem-se por resultado ser a velocidade de sedimentação da camada tanto menor quanto maior for sua concentração de sólidos.** É desta natureza a sedimentação do lodo secundário no decantador final de uma estação de tratamento biológico de esgoto, bem como, na fase de sedimentação, em um reator em bateladas.

O ponto de partida para o estudo da sedimentação zonal são os ensaios de sedimentação em coluna (Figura 1).

Considere-se um cilindro contendo uma coluna com altura total H_T de uma suspensão homogênea cuja concentração de sólidos é X . Posta esta suspensão em repouso, tem princípio a sedimentação do lodo nela contido. No instante inicial da sedimentação (Figura 1a), o lodo está presente em toda a altura H_T da coluna, com concentração de sólidos X , uniforme. Ao longo do processo de sedimentação, todas as camadas de lodo se deslocam em direção ao fundo do cilindro, exceto aquela que já nele se encontrava no instante inicial. Fina a sedimen-

tação (Figura 1b), todo o lodo está em repouso, acumulado em uma camada de espessura H_U menor que H_T , apoiada no fundo do cilindro. A concentração de sólidos é X_U , uniforme.

Portanto, a partir do conhecimento das condições inicial e final do processo, pode-se observar que, enquanto o lodo sedimenta, acontece aumento da concentração de sólidos e redução conseguinte da velocidade de sedimentação, até que, ao final do processo, o lodo alcança a concentração de sólidos máxima X_U , para a qual a velocidade de sedimentação é nula.

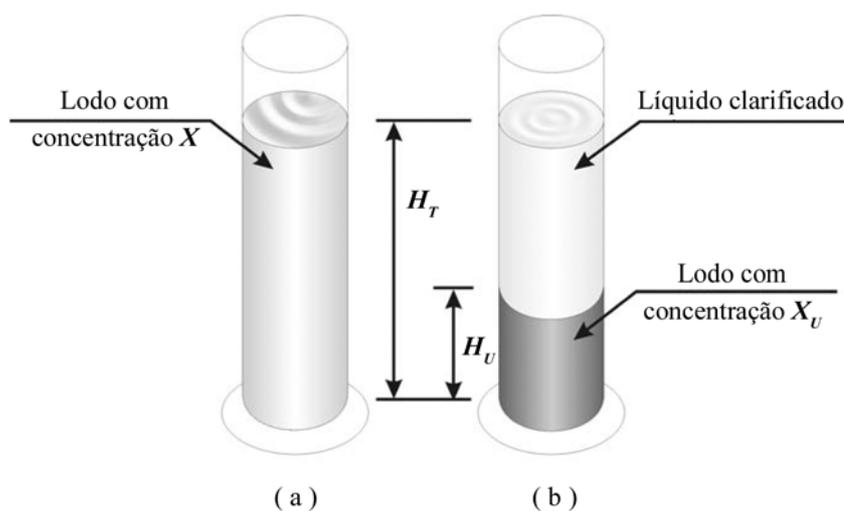
As fases intermediárias do fenômeno podem ser apreendidas através do raciocínio desenvolvido em seguida e ilustrado pela Figura 2, permitindo que se obtenha um modelo bastante adequado às aplicações práticas visadas pelos autores.

Decorrido um tempo infinitesimal dt do início da sedimentação, o lodo (à exceção da camada de espessura infinitesimal junto ao fundo do cilindro) sedimenta, durante dt , à velocidade de sedimentação V_S , característica da concentração inicial X . Logo, ocorre a transferência, para baixo, da massa infinitesimal dos sólidos antes presentes em uma camada de espessura infinitesimal, medida a partir da superfície do líquido. Esta camada agora contém líquido clarificado, isento de lodo, e sua espessura mede $V_S \cdot dt$.

Como o lodo apresentava a mesma concentração de sólidos X em toda a altura H_T , então em todos os infinitos planos horizontais ao longo de H_T , exceto no do fundo, o lodo iniciou a sua sedimentação à velocidade V_S . Assim, a transferência de sólidos da camada superior se propaga para baixo, plano a plano, observando uma taxa de transferência única e igual a $X \cdot V_S$, até o fundo do recipiente.

Uma vez que a camada de espessura infinitesimal de lodo apoiado no fundo é estática, sua concentração de sólidos sofre um aumento com a transferência recebida e não transmitida. Mas como sua espessura é infinitesimal, também o é seu volume e, por esta razão, sua concentração de sólidos atinge imediatamente o valor máximo X_U .

Esta camada inferior estava estática desde o início do processo por efeito da sustentação do fundo e por isto sua concentração de sólidos alcança X_U . No mesmo tempo, por causa do decréscimo, até a anulação, da sua capacidade de recepção de sólidos, ela passa a exercer, na camada de espessura infinitesimal imediatamente acima, ação da mesma natureza daquela que sofreu do fundo. Nesta segunda camada se desenvolve, então, fenômeno semelhante que resulta na elevação da sua concentração de sólidos de X para $X_U - dX$. Assim sucessivamente acontece numa infinidade de camadas superiores de espessuras infinitesimais.



H_T = altura total da coluna de suspensão no início do ensaio [cm]
 H_U = altura da camada de lodo (com concentração X_U [mg/L]) ao final do ensaio [cm]
 X = concentração de sólidos inicial [mg/L]
 X_U = concentração de sólidos final (a máxima) [mg/L]

Figura 1 – Ensaio de sedimentação zonal em coluna
(a) Instante inicial (b) Instante final

Em síntese, decorrido dt após o início da sedimentação, forma-se junto ao fundo uma infinidade de camadas, com espessuras infinitesimais (cujo somatório é também infinitesimal), nas quais as concentrações de sólidos apresentam, de baixo para cima, uma variação contínua e decrescente, desde X_U até X .

O estado da coluna de suspensão no instante dt pode ser retratado pela representação gráfica correspondente ao tempo zero da Figura 2, tendo-se em mente que na superfície há uma camada de espessura dH com líquido clarificado e no fundo há uma infinidade de camadas de espessuras somadas dH com concentrações de sólidos decrescentes, de baixo para cima, de X_U até X . Em todo o restante intermediário da coluna, a concentração de sólidos é X .

Enquanto a sedimentação evolui, a interface líquido clarificado-lodo, que é um plano horizontal onde a concentração de sólidos é X , descende à velocidade constante V_S . Ao mesmo tempo, a contínua transferência de sólidos para o fundo faz com que tenha sua concentração aumentada cada uma das infinitas camadas que apresentam, de baixo para cima, concentrações de sólidos que variam da máxima X_U à inicial X . Como a concentração não pode crescer além de X_U , dá-se o aumento da espessura da camada mais de baixo, à medida que, ordenadamente de baixo para cima, nas demais infinitas camadas é atingida X_U . Assim, a superfície superior da camada com concentração de sólidos máxima ascende e, porque a taxa de transferência de sólidos descendentes é invariável, ascende a uma velocidade constante V_{AU} característica de X_U . Uma vez que cada uma das outras infinitas camadas também tem sua concentração continuamente aumentada, cada concentração, a exemplo da máxima, ascende a velocidade constante própria.

Resumindo, com o desenrolar da sedimentação, os sólidos descem e as concentrações ascendem. Assim como os sólidos sedimentam com velocidades constantes e características das suas concentrações, as concentrações ascendem com velocidades também constantes e cada qual própria da concentração que sobe.

Decorrido um tempo t_1 do início da sedimentação, a interface líquido clarificado-lodo sedimentou à velocidade V_S , atingindo a distância $V_S \cdot t_1$ da superfície do líquido. Simultaneamente, do fundo se elevou a concentração X_U , à velocidade V_{AU} , alcançando uma altura $V_{AU} \cdot t_1$ medida do fundo. Também ao longo de t_1 ,

cada camada com concentração entre $X_U - dX$ e X ascendeu com sua velocidade característica. A camada com concentração X terá então se erguido à sua velocidade ascensional V_{AX} , passando a situar-se $V_{AX} \cdot t_1$ acima do fundo do cilindro.

Conforme está mostrado na Figura 2, portanto, no instante t_1 ter-se-á, a partir do fundo:

- Uma camada de lodo com concentração de sólidos máxima X_U , de espessura H_{U1} , tal que:

$$H_{U1} = V_{AU} \cdot t_1 \quad (1)$$

- Uma camada com espessura H_{I1} e concentrações de sólidos X_i variando de $X_U - dX$ até X , de baixo para cima, sendo:

$$H_{I1} = V_{AX} \cdot t_1 - V_{AU} \cdot t_1 = (V_{AX} - V_{AU}) \cdot t_1 \quad (2)$$

- Uma camada de lodo com a concentração de sólidos inicial X , de espessura H_{X1} valendo:

$$\begin{aligned} H_{X1} &= H_T - V_S \cdot t_1 - V_{AX} \cdot t_1 = \\ &= H_T - (V_S + V_{AX}) \cdot t_1 \end{aligned} \quad (3)$$

- Uma camada com líquido clarificado, de espessura H_{C1} alcançando:

$$H_{C1} = V_S \cdot t_1 \quad (4)$$

Em um determinado instante t_2 , posterior a t_1 , a concentração de sólidos X , ascendente, encontra a interface líquido clarificado-lodo, também com concentração de sólidos X , que descende.

Neste momento a camada com concentração de sólidos X tem espessura infinitesimal e a situação, a partir do fundo do cilindro é:

- Uma camada de lodo com concentração de sólidos máxima X_U , de espessura H_{U2} medindo:

$$H_{U2} = V_{AU} \cdot t_2 \quad (5)$$

- Uma camada com espessura H_{I2} , com concentrações de sólidos X_i variando de $X_U - dX$ até X , de baixo para cima, onde:

$$H_{I2} = V_{AX} \cdot t_2 - V_{AU} \cdot t_2 = (V_{AX} - V_{AU}) \cdot t_2 \quad (6)$$

- Uma camada com líquido clarificado, de espessura H_{C2} :

$$H_{C2} = V_S \cdot t_2 \quad (7)$$

Do início do processo até t_2 , a interface líquido clarificado-lodo sedimenta à velocidade constante V_S , a máxima ao longo de todo o processo, posto que nela a concentração de sólidos é X , constante e mínima. A curva *Altura da Coluna de Lodo X Tempo*, neste intervalo, é um segmento de reta, portanto, como se vê na Figura 2.

A partir de t_2 , tendo continuidade a sedimentação, a cada intervalo infinitesimal de tempo dt transcorrido, a concentração de sólidos da interface líquido clarificado-lodo é substituída por uma concentração infinitesimalmente maior ascendente que alcança o topo da coluna de lodo. A cada aumento de concentração corresponde uma redução na velocidade de sedimentação da interface para o valor característico da nova concentração. Assim, a partir de t_2 , a velocidade de sedimentação da interface diminui ininterruptamente até um instante t_4 . Em t_4 a concentração de sólidos máxima X_U atinge a interface e a velocidade de sedimentação desta se torna nula, completando-se o processo da sedimentação.

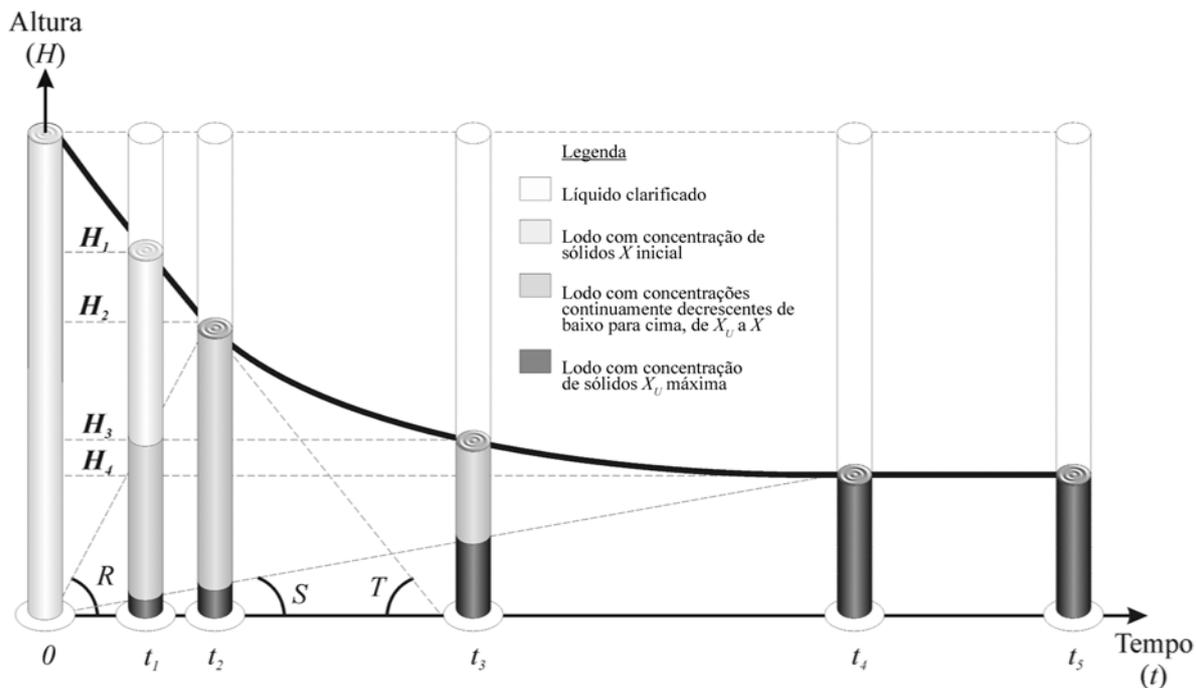
Assim sendo, como se pode observar na Figura 2, no intervalo limitado por t_2 e t_4 , a curva *Altura da Coluna de Lodo X Tempo* deixa de ser retilínea, adquirindo uma curvatura que cresce de zero até um valor máximo e depois diminui de volta para zero.

O trecho final da curva *Altura da Coluna de Lodo X Tempo* é uma semi-reta horizontal, pois a velocidade de sedimentação é nula e a altura da coluna de lodo permanece constante.

SEDIMENTAÇÃO ZONAL COM FLUXO CONTÍNUO – TEORIA DO FLUXO DE SÓLIDOS

Embora este estudo se refira diretamente à sedimentação zonal em bateladas, alguns dos elementos fundamentais do método de cálculo proposto foram derivados da teoria da sedimentação zonal em unidades de fluxo contínuo. Assim, é indispensável incluir aqui uma breve revisão desta teoria.

Quando o decantador é de operação contínua, o líquido no seu interior encontra-se em movimento. Por isto, a clarificação do efluente só será promovida se a taxa de escoamento superficial T_L a ele aplicada (igual à razão entre a vazão tratada Q e a área A da superfície da unidade) não exceder a velocidade de sedimentação V_S da interface líquido clarifi-



$T_g(T)$ = velocidade de sedimentação do lodo com concentração de sólidos X inicial
 $T_g(R)$ = velocidade ascensional da concentração X inicial
 $T_g(S)$ = velocidade ascensional da concentração X_U máxima

Figura 2 – Sedimentação zonal em batelada – curva altura da interface clarificado / lodo x tempo e representação dos principais estágios da coluna de suspensão ao longo do tempo

cado-lodo. Ou seja, T_L não pode ultrapassar a velocidade de sedimentação do lodo com a concentração inicial de sólidos X (a concentração no afluente ao decantador).

A operação de um decantador final num sistema de lodos ativados de fluxo contínuo inclui sempre a remoção, pelo fundo da unidade, do lodo sedimentado, que é retornado ao tanque de aeração. Então, é também essencial para a eficácia da decantação que todo o lodo introduzido no decantador seja transferido ao seu fundo (considera-se desprezível a porção de sólidos em suspensão dispersos que saem com o efluente, já que, se não o for, a decantação será ineficaz), pois de outra forma haverá acúmulo de lodo no seu interior e subsequente extravasamento de lodo pelo vertedor da unidade, juntamente com o efluente tratado. É necessário, portanto, que a taxa de transferência de sólidos em cada camada horizontal de lodo no interior do decantador seja pelo menos igual à taxa com que os sólidos a ele afluem (a taxa de aplicação de sólidos, T_y) e, como consequência, que todo o lodo introduzido seja transportado ao fundo e dali removido.

A transferência dos sólidos introduzidos em um decantador de operação con-

tínua para o fundo decorre de duas ações distintas. A primeira é a sedimentação propriamente dita, o movimento dos sólidos por ação da gravidade. A segunda é o arraste dos sólidos pelo líquido que se desloca para baixo em movimento determinado pela retirada do lodo do fundo, na operação de recirculação.

A taxa de transferência dos sólidos para baixo é denominada **fluxo de sólidos**, o qual é definido como a **massa de sólidos que atravessa a unidade de área de uma seção horizontal na unidade de tempo**. De acordo com o que acaba de ser exposto, o **fluxo de sólidos total** G_T é a soma do **fluxo de sólidos por gravidade** G_G com o **fluxo de sólidos por recirculação** G_R . Um decantador de operação contínua só será eficaz, então, se **também** a taxa de aplicação de sólidos T_y (igual à **razão entre a vazão mássica de sólidos introduzidos e a área da superfície da unidade**) a que for submetido não ultrapassar o seu respectivo fluxo de sólidos máximo (Da-Rin & Nascimento, 1977; Ramalho, 1983).

Considere-se uma seção horizontal qualquer de um decantador final de operação contínua que se situe entre o fundo da unidade e a interface líquido clarificado-lodo. Admita-se que em cada uma de todas as seções horizontais deste decanta-

dor a concentração de sólidos seja homogênea. Sejam X_i [mg/L] a **concentração de sólidos na seção considerada**, V_i [m/h] a **velocidade de sedimentação do lodo com esta concentração** X_i e U [m/h] a **velocidade descendente do líquido devida à recirculação do lodo**.

Os fluxos de sólidos por gravidade G_{Gi} [kg/m² . h], por recirculação G_{Ri} [kg/m² . h] e total G_{Ti} [kg/m² . h] através da seção analisada são, respectivamente:

$$G_{Gi} = X_i \cdot V_i \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

$$G_{Ri} = X_i \cdot U \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

$$G_{Ti} = (X_i \cdot V_i + X_i \cdot U) \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

Esta equação (10) é geral e aplicável a cada uma das infinitas seções horizontais do decantador. Ela fornece o fluxo de sólidos total através de cada seção do decantador quando ele é operado tratando uma vazão Q de uma suspensão de um lodo específico, sob taxa de escoamento superficial T_y não superior à velocidade de sedimentação V_s do lodo com a concentração de sólidos afluente X , sujeito a uma **vazão de recirculação** Q_R tal que a razão entre Q_R e a área da superfície da unidade A seja igual a U .

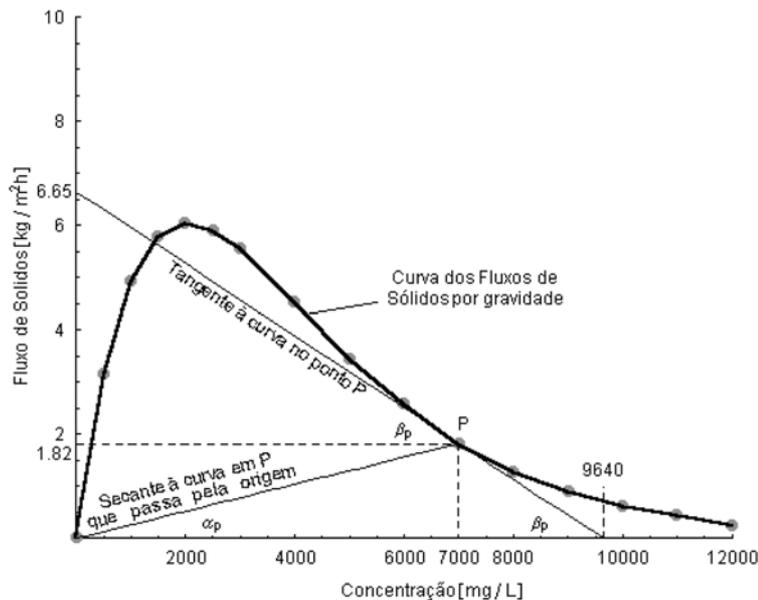
Assim, ao longo da altura da manta de lodo de um decantador final existem infinitas camadas horizontais, nas quais as concentrações de sólidos vão variando, de cima para baixo, de X até X_U . Cada camada, com concentração X_i , tem uma capacidade de se deixar atravessar pelos sólidos expressa pela Equação (10). Como mostra aquela equação, este fluxo de sólidos máximo depende de X_i e da velocidade descendente do líquido U . Em última análise, depende de X_i e da vazão de recirculação Q_R (ou da razão de recirculação R).

Os procedimentos adotados para determinar as condições limites operacionais válidas para a decantação contínua de um determinado lodo, que constituem as bases da teoria do fluxo de sólidos, foram estabelecidos por Yoshioka et al (1955) e consolidados por Dick (1970).

A partir do conhecimento dos valores de uma série de pares ordenados (X_i ; V_i) característicos de um determinado lodo, que podem ser obtidos através de ensaios de sedimentação em coluna, calculam-se, mediante a aplicação da equação (8), os respectivos fluxos de sólidos por gravidade G_{G_i} . Constrói-se, então, a curva Fluxo de Sólidos por Gravidade de X Concentração de Sólidos do referido lodo, exemplificada na Figura 3.

Yoshioka et al (1955) mostram que desta curva se podem extrair valiosas informações, algumas delas indicadas na Figura 3.

Uma observação atenta da Figura 3 mostra que quando o ponto de operação de um decantador final pertence à curva do fluxo de sólidos por gravidade, a unidade está sob carregamento de sólidos crítico. Como ocorre com o ponto P , tomado como exemplo, a concentração de sólidos X na suspensão afluyente e a vazão de recirculação Q_{RP} são tais que a velocidade descendente do líquido determinada pela recirculação vale U_p e a concentração do lodo no seu fundo, requerida para que todo o lodo afluyente seja removido por Q_{RP} alcança X_{UP} . Operando em tais circunstâncias, se estabelece uma camada horizontal entre o fundo e a interface líquido clarificado-lodo na qual a concentração de sólidos é X_p e o fluxo de sólidos total é G_{TP} , menor que todos os fluxos de sólidos de todas as demais camadas. Esta camada é, então, a **camada limitante**. Funcionando como se fora uma seção contraída do decantador, ela permite a passagem de um fluxo de sólidos total menor que o de qualquer outra seção, como será mostrado mais adiante.



$T_g(\alpha_p)$ = velocidade de sedimentação do lodo com concentração $X_p = 7000$ mg/L
 $T_g(\beta_p)$ = velocidade U_p descendente do líquido devida à recirculação do lodo, quando na camada limitante a concentração de sólidos é $X_p = 7000$ mg/L
 $X_p = 7000$ mg/L $X_U = 9640$ mg/L
 $G_{GP} = 1,82$ kg/m².h $G_{TP} = 6,65$ kg/m².h
 $G_{RP} = 6,65 - 1,82 = 4,83$ kg/m².h $U_p = 4,83 / 7.000 \cdot 10^{-3} = 0,69$ m/h

Figura 3 – Curva dos fluxos de sólidos por gravidade (G_g) em função das concentrações de sólidos (X) do lodo

A existência desta camada limitante é facilmente visualizada na Figura 4 (ponto T).

A Figura 4 consiste no resultado da construção da curva dos fluxos de sólidos totais G_{T_i} para a velocidade descendente do líquido U_p , mediante a soma da curva dos fluxos de sólidos por gravidade G_{G_i} da Figura 3 com a reta dos fluxos de sólidos por recirculação G_{R_i} relativa a U_p . Portanto, por sua própria natureza, esta curva resultante é o lugar geométrico dos pontos correspondentes aos fluxos de sólidos totais máximos quando a recirculação do lodo gera uma velocidade descendente do líquido igual a U_p .

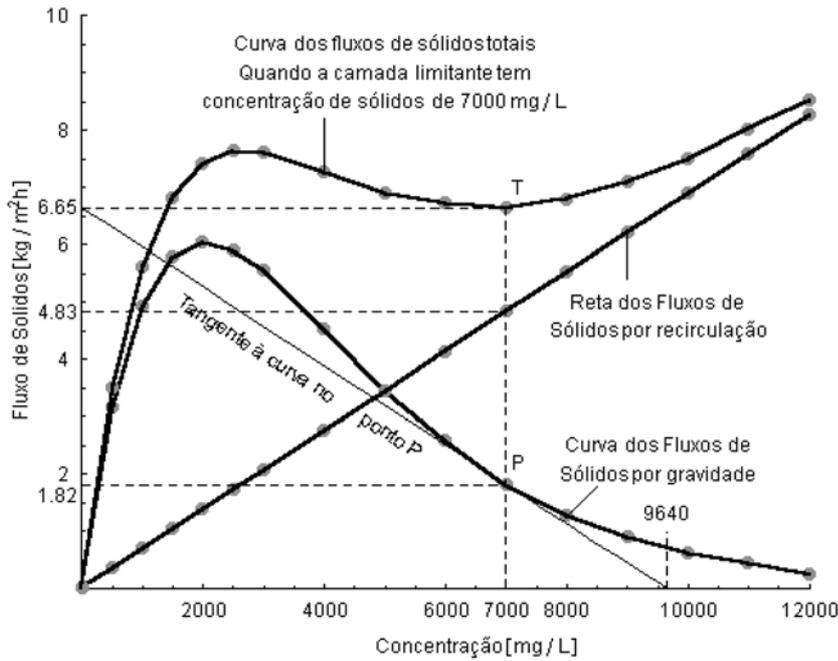
Como se constata da observação direta da Figura 4, quando aplicada uma vazão de recirculação Q_{RP} que origina uma velocidade descendente do líquido U_p , os fluxos de sólidos totais máximos do lodo estudado, nas diversas camadas horizontais do decantador observado, assumem valores tais que, na camada com concentração de sólidos X_p (ponto T da curva dos fluxos de sólidos totais, análogo do ponto P da curva dos fluxos de sólidos por gravidade) se estabelece o menor dos fluxos de sólidos totais máximos. Ela é, pois, a camada limitante deste lodo quando o decantador opera com U_p .

Observe-se que, operando o decantador com carregamento crítico, a sedimentação se dará, em seu interior, em estado estacionário (steady state): ao longo do tempo as condições permanecem imutadas. Através da camada limitante, os sólidos são transferidos num fluxo que iguala o fluxo limite. Se o fluxo aplicado softes-se aumento, parte do lodo não conseguiria atravessar a camada limitante e se acumularia acima dela, fazendo com que sua espessura crescesse, como ocorre com a camada do fundo do cilindro na sedimentação em batelada. A concentração da camada limitante ascenderia, conforme acontece nos ensaios de sedimentação em coluna. Ou seja, a **concentração da camada limitante encontra-se no limiar de ascender**. Isto significa que a **velocidade ascensional V_A [m/h] da concentração da camada limitante, na sedimentação em batelada, é igual em módulo à velocidade descendente U [m/h] do líquido devida à recirculação, na sedimentação contínua:**

$$V_A = U \quad (11)$$

TEMPO ÓTIMO DE SEDIMENTAÇÃO

Na fase de sedimentação a aeração é interrompida, reduzindo-se a atividade



$$\begin{aligned}
 X_p &= 7000 \text{ mg/L} & X_U &= 9640 \text{ mg/L} \\
 G_{GP} &= 1,82 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} & G_{TP} &= 6,65 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \\
 G_{RP} &= 6,65 - 1,82 = 4,83 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} & U_p &= 4,83 / 7000 \cdot 10^{-3} = 0,69 \text{ m/h}
 \end{aligned}$$

Figura 4 – Curvas e reta dos fluxos de sólidos totais (G_T), por gravidade (G_G) e por recirculação (G_R)

metabólica da biomassa que resulta na biodegradação do substrato. Daí decorre a prática comum à maioria dos autores – corroborada por Artan et al (2001) – de considerar nula a conversão biológica do substrato durante esta fase do ciclo. O tempo de sedimentação, essencial para que se possa separar o efluente tratado do lodo, implica redução da eficiência do processo na remoção biológica de carga orgânica. Assim, esta remoção será máxima quando for mínima a razão entre o tempo de sedimentação e o volume de efluente final clarificado (ou a altura da zona de carga) ao término da fase de sedimentação.

Tomando-se em conta a exposição anterior a respeito da sedimentação zonal em bateladas, é evidente que, adotando-se o tempo t_s de sedimentação igual a t_2 , ter-se-á a eficiência máxima no processo de tratamento, uma vez que se estará aproveitando na totalidade o tempo durante o qual a interface clarificado-lodo sedimenta à velocidade máxima.

É sabida a altura H_T útil total do reator (e assim, a altura total da coluna de suspensão), adotada em função do sistema de aeração escolhido. Também se sabe que, no instante t_2 (Figura 2), a concentração X inicial de sólidos (que vinha ascendendo do fundo desde o início do processo de sedimentação, à velocidade

constante V_A) alcança a interface (que, com concentração X de sólidos, vinha descendendo do topo da coluna, também desde o início do processo de sedimentação, à velocidade constante V_S). Portanto, ao longo do tempo t_2 [h], as distâncias percorridas pela interface (com concentração X inicial, que sedimentou à velocidade V_S [m/h]) e pela concentração X inicial (que ascendeu à velocidade V_A [m/h]) somam a altura H_T [m].

Pode-se, então, afirmar:

$$V_S \cdot t_2 + V_A \cdot t_2 = H_T \quad (12)$$

Adotando-se o tempo ótimo de sedimentação $t_s = t_2$, decorre:

$$t_s = \frac{H_T}{V_S + V_A} \quad (13)$$

Logo, a determinação do tempo ótimo de sedimentação t_s [h] através da equação (13) depende do conhecimento de V_S [m/h] e de V_A [m/h].

Diversos autores têm preconizado modelos matemáticos que expressem a lei de variação da velocidade V_i [m/h] de sedimentação de um lodo em função de sua concentração X_i [mg/L] de sólidos.

Assim, Vesilind (1968), definindo como sendo V_0 [m/h] a velocidade de sedimentação da partícula individual e K uma constante característica de cada lodo, propõe uma lei de variação com a forma:

$$V_i = V_0 \cdot e^{-K \cdot X_i} \quad (14)$$

Mais recentemente, vêm sendo propostos modelos nos quais o índice volumétrico do lodo, IVL [mL/g], é introduzido como elemento refletor da influência do tipo do lodo no processo da sedimentação zonal. Nesta linha de ação, Daigger (1995) apresenta:

$$V_i = 6,49 \cdot e^{-(0,1646 + 0,001586 \cdot IVL \cdot X_i / 1000)} \quad (15)$$

Von Sperling & Fróes (1998) estabeleceram, por faixa de sedimentabilidade, os valores médios representativos, para esgoto doméstico, dos parâmetros V_0 e K da Equação (14) proposta por Vesilind (1968). Desta forma, são sugeridas cinco equações para estimativa de V_i [m/h] em função da concentração X_i [mg/L] de sólidos do lodo, devendo-se selecionar aquela a ser empregada com base no tipo de sedimentabilidade do lodo, e sendo esta sedimentabilidade relacionada ao seu IVL . Cabe registrar que cada equação sugerida foi desenvolvida com base no valor de IVL representativo da faixa: 45 mL/g para a sedimentabilidade ótima e o valor médio (75 mL/g, 150 mL/g, 250 mL/g e 350 mL/g) para cada uma das demais faixas. Adiante são apresentadas as referidas cinco equações propostas por von Sperling & Fróes (1998), indicando-se, para cada uma delas, as respectivas classe de sedimentabilidade e faixa de valores de IVL .

- Sedimentabilidade ótima (IVL 0 a 50):

$$V_i = 10,0 \cdot e^{(-0,27 \cdot X_i / 1000)} \quad (16)$$

- Sedimentabilidade boa (IVL 50 a 100):

$$V_i = 9,0 \cdot e^{(-0,35 \cdot X_i / 1000)} \quad (17)$$

- Sedimentabilidade média (IVL 100 a 200):

$$V_i = 8,6 \cdot e^{(-0,50 \cdot X_i / 1000)} \quad (18)$$

- Sedimentabilidade ruim (IVL 200 a 300):

$$V_i = 6,2 \cdot e^{(-0,67 \cdot X_i / 1000)} \quad (19)$$

- Sedimentabilidade péssima (IVL 300 a 400):

$$V_i = 5,6 \cdot e^{(-0,73 \cdot X_i / 1000)} \quad (20)$$

Lançando mão das equações (16) a (20) propostas por von Sperling & Fróes (1998), estes autores consolidaram-nas todas em uma só, aplicando duas funções de regressão.

Primeiro tomaram-se por variáveis os valores de IVL representativos das faixas de sedimentabilidade e os respectivos valores do parâmetro V_0 , a eles tendo-se ajustado, com Coeficiente de Correlação - 0,978, a função exponencial:

$$V_0 = 10,79 \cdot e^{-(1,95 \cdot IVL / 1000)} \quad (21)$$

Depois se tomaram por variáveis os valores de IVL representativos das faixas de sedimentabilidade e os respectivos valores do parâmetro K , a eles tendo-se ajustado, com Coeficiente de Correlação 0,998, a função de potência:

$$K = 0,04 \cdot IVL^{0,50} \quad (22)$$

Por último substituíram-se, na equação (14), V_0 e K pelos segundos termos das equações (21) e (22), respectivamente, obtendo-se a supracitada equação que consolida as cinco propostas por von Sperling & Fróes (1998). Através dela pode-se estimar a velocidade V_s [m/h] de um lodo, desde que sejam conhecidos seu índice volumétrico do lodo IVL [mL/g] e sua concentração X [mg/L] de sólidos, como se segue:

$$V_s = 10,79 \cdot e^{-(1,95 \cdot IVL + 0,04 \cdot IVL^{0,5} \cdot X) \cdot 10^{-3}} \quad (23)$$

A título de ilustração comparativa, segue-se, na Tabela 1, uma série de valores de V_s calculados através da aplicação das fórmulas (15), (16) a (20) e (23), a partir de diversos valores de X e IVL .

Sendo possível, mediante a aplicação da equação (23), determinar V_s , o cálculo do tempo ótimo de sedimentação passa a depender unicamente do conhecimento de V_A :

Como \bar{U} [m/h] relaciona-se com R [adimensional], Q [m³/h] e A [m²] conforme:

$$U = \frac{R \cdot Q}{A} \quad (24)$$

Pode-se, a partir das equações (11) e (24), escrever:

$$V_A = \frac{R \cdot Q}{A} \quad (25)$$

Tabela 1 – Velocidades de sedimentação estimadas segundo Daigger (1995), von Sperling & Fróes (1988) e estes autores

X [mg/L]	IVL [mL/g]	V_s [m/h]		
		Daigger	Von Sperling & Fróes	Estes autores
1 500	45	4,56	6,67	6,61
	75	4,24	5,32	5,54
	150	3,55	4,06	3,86
	250	2,80	2,27	2,57
	350	2,20	1,87	1,77
2 500	45	3,60	5,09	5,05
	75	3,19	3,75	3,92
	150	2,37	2,46	2,37
	250	1,60	1,16	1,36
	350	1,07	0,90	0,84
3 500	45	2,84	3,89	3,86
	75	2,41	2,64	2,77
	150	1,59	1,49	1,45
	250	0,91	0,59	0,72
	350	0,52	0,44	0,40

Tabela 2 – Valores de p e q por faixa de sedimentabilidade definida com base no seu índice volumétrico do lodo, segundo von Sperling & Fróes

Sedimentabilidade	IVL [mL/g]	p [adimensional]	q [adimensional]
Ótima	0 a 50	14,79	0,64
Boa	50 a 100	11,77	0,70
Média	100 a 200	8,41	0,72
Ruim	200 a 300	6,26	0,69
Péssima	300 a 400	5,37	0,69

Porém, nas condições críticas de carregamento do decantador, tem-se:

$$\frac{Q}{A} = V_s \quad (26)$$

Logo:

$$V_A = R \cdot V_s \quad (27)$$

A equação (27), que se acaba de deduzir, demonstra que, durante a sedimentação em batelada, a velocidade V_A [m/h] ascensional da concentração X de um lodo é igual ao produto da velocidade V_s [m/h] de sedimentação deste lodo, com esta mesma concentração X , pela razão de recirculação R [adimensional] para a qual, na sedimentação contínua, a camada limitante pos-

sui concentração X de sólidos. Aparentemente, esta relação constitui-se em contribuição original deste autor (Santos, 2002).

Von Sperling & Fróes (1998) propuseram, por faixa de sedimentabilidade, como apresentado na Tabela 2 abaixo, os valores médios representativos, para esgoto doméstico, dos parâmetros p [adimensional] e q [adimensional] do modelo matemático que sugerem expressar o fluxo de sólidos G_T [kg/m² · h] total da camada limitante em função da vazão Q_R [m³/h] de recirculação e da área A [m²] superficial do decantador. Esta equação é:

$$G_T = p \cdot \left(\frac{Q_R}{A} \right)^q \quad (28)$$

Tomando por variáveis os valores de *IVL* representativos das faixas de sedimentabilidade já anteriormente discriminados e os respectivos valores de *p* determinados por von Sperling & Fróes (1998), estes autores aplicaram ao conjunto de pares ordenados (*IVL X p*) uma função de regressão. Foi ajustada a função de potência correspondente à Equação (29), que fornece o coeficiente *p* [adimensional] em função do *IVL* mL/g, com Coeficiente de Correlação de - 0,999:

$$p = 100,93 \cdot (IVL)^{-0,5} \quad (29)$$

Repetiu-se, em seguida, a aplicação do processo de regressão aos pares ordenados (*IVL X q*), em duas etapas: primeiro aos valores referentes às sedimentabilidades ótima, boa e média, e depois às média, ruim e péssima. Ao primeiro grupo de pares ordenados ajustou-se, com Coeficiente de Correlação 0,933, a função logarítmica correspondente à equação (30), que fornece o coeficiente *q* [adimensional] em função do *IVL* [mL/g], **somente para valores deste último parâmetro menores que 150 mL/g:**

$$q = 0,405 + 0,064 \cdot \log_e (IVL) \quad (30)$$

Por fim, ao segundo grupo de pares ordenados ajustou-se, com Coeficiente de Correlação - 0,918, a função logarítmica correspondente à equação (31), que fornece o coeficiente *q* [adimensional] em função do *IVL* [mL/g], **somente para valores deste último parâmetro maiores que 150 mL/g:**

$$q = 0,904 - 0,037 \cdot \log_e (IVL) \quad (31)$$

A título de ilustração comparativa, seguem-se, na Tabela 3, valores de *p* e *q* propostos por von Sperling & Fróes (1998) e calculados através da aplicação das fórmulas (29), (30) e (31), a partir dos valores de *IVL* representativos das faixas de sedimentabilidade ótima, boa, média, ruim e péssima.

Da Equação (28) vem:

$$G_T = p \cdot \left(\frac{R \cdot Q}{A} \right)^q \quad (32)$$

$$G_T = p \cdot (R \cdot V_S)^q \quad (33)$$

Substituindo-se *U* por *V_A* na Equação (10):

$$G_T = (X \cdot V_S + X \cdot V_A) \cdot 10^{-3} \quad (34)$$

Tabela 3 – Parâmetros *p* e *q* segundo von Sperling & Fróes e estes autores

IVL [mL/g]	<i>p</i> [adimensional]		<i>q</i> [adimensional]		
	von Sperling & Fróes	Estes autores Equação (29)	von Sperling & Fróes	Estes autores Equação (30)	Estes autores Equação (31)
45	14,79	15,04	0,64	0,65	-
75	11,77	11,65	0,70	0,68	-
150	8,41	8,24	0,72	0,73	0,72
250	6,26	6,38	0,69	-	0,70
350	5,37	5,39	0,69	-	0,69

Combinando-se com a Equação (27):

$$G_T = X \cdot V_S \cdot (1 + R) \cdot 10^{-3} \quad (35)$$

Substituindo-se este valor de *G_T* na Equação (33) e modificando-se o arranjo dos termos:

$$R = \frac{p \cdot (R \cdot V_S)^q}{X \cdot V_S \cdot 10^{-3}} - 1 \quad (36)$$

Calculados os valores do coeficiente *p* – através da aplicação da Equação (29) – e do coeficiente *q* – utilizando a equação (30) ou (31), conforme seja o valor do *IVL* do lodo estudado menor ou maior que 150 mL/g – pode-se determinar, por tentativas sucessivas, o valor de *R* que satisfaz a equação (36) e, em seguida, estimar o valor da velocidade *V_A* ascensional da concentração *X* na sedimentação em batelada, usando-se a equação (27). De posse do valor de *V_A*, pode-se obter o **tempo ótimo de sedimentação t_s** usando a equação (13).

Propõe-se, então, o cálculo do tempo ótimo teórico de sedimentação de sistemas de tratamento por lodos ativados em bateladas através do emprego do protocolo apresentado a seguir.

PROTOCOLO PROPOSTO PARA CÁLCULO DO TEMPO TEÓRICO DE SEDIMENTAÇÃO EM REATORES DE LODO ATIVADO EM BATELADAS

a) Devem ser conhecidos a concentração *X* [mg/L] de sólidos em suspensão totais no tanque de aeração e o índice volumétrico do lodo *IVL* [mL/g];

b) Calcula-se a velocidade *V_S* [m/h]

de sedimentação do lodo à concentração *X*, empregando-se a equação (23);

c) Determinam-se os parâmetros *p* [adimensional] e *q* [adimensional], aplicando-se as Equações (29) e (30) ou (31), respectivamente;

d) Mediante o uso iterativo da Equação (35), acha-se a razão de recirculação *R* [adimensional] para a qual, no decantador de operação contínua, a camada limitante tem concentração de sólidos *X*;

e) Calcula-se a velocidade *V_A* [m/h] ascensional da concentração *X* na sedimentação em batelada, utilizando-se a Equação (27);

f) Determina-se o tempo *t_s* [h] ótimo teórico de sedimentação, aplicando-se a Equação (13).

EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Seja um reator em bateladas com profundidade útil de 4,00 m, que opera na fase de aeração com concentração de sólidos em suspensão *X* = 3 700 mg/L. Sendo o índice volumétrico do lodo *IVL* = 140 mL/g, estimar-se-ia o tempo ótimo teórico de sedimentação pelo método aqui proposto conforme se segue:

a) Velocidade *V_S* de Sedimentação do Lodo à Concentração *X*

$$V_S = 10,79 \cdot e^{-(1,95 \cdot 140 + 0,04 \cdot 140^{0,5} \cdot 3700) \cdot 10^{-3}}$$

$$V_S = 1,425 \text{ m/h}$$

b) Parâmetros *p* e *q*

$$p = 100,93 \cdot 140^{-0,5} = 8,53$$

$$q = 0,405 + 0,064 \cdot \log_e 140 = 0,72$$

c) Razão de Recirculação para a qual a Camada Limitante na Operação Contínua Tem Concentração de Sólidos *X* = 3 700 mg/L

$$R = \frac{8,53 \cdot (R \cdot 1,425)^{0,72}}{3\,700 \cdot 1,425 \cdot 10^{-3}} - 1 =$$

$$= 2,09 \cdot R^{0,72} - 1$$

$$R = 0,834$$

d) Velocidade Ascensional da Concentração de Sólidos $X = 3\,700$ mg/L

$$V_A = 0,834 \cdot 1,425 = 1,188 \text{ m/h}$$

e) Tempo Ótimo Teórico de Sedimentação

$$t_s = \frac{4,00}{1,425 + 1,188} = 1,53 \text{ h} = 1 \text{ h}, 32 \text{ min.}$$

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos matemáticos desenvolvidos por outros autores e que possibilitam estimar, com base no índice de volume do lodo e em sua concentração de sólidos, as suas velocidades de sedimentação e os seus fluxos de sólidos totais esteiam o método desenvolvido e são os fatores determinantes do nível de exatidão deste método. A precisão dos resultados da aplicação do método proposto está na razão direta da precisão de tais modelos matemáticos. O esforço no sentido de buscar o aprimoramento dos modelos matemáticos em questão é de todo desejável, pois são eles ferramentas essenciais para tornar mais direto e simples o uso prático da teoria da sedimentação zonal e do fluxo de sólidos.

De todo modo, a determinação do tempo ótimo teórico de sedimentação proporcionada pelo método aqui exposto abre caminho para um estudo mais amplo do tratamento de esgoto doméstico em bateladas. A tal empreitada se dedicaram estes autores, sendo sua pretensão apresentar, proximamente, trabalho complementar ao presente propondo um método racional de dimensionamento de reatores biológicos operados em bateladas.

REFERÊNCIAS

- ARTAN, N. et al. *The mechanism and design of sequencing batch reactor systems for nutrient removal - the state of the art*. Water Science and Technology, v. 43, n. 3, pp 53-60, 2001.
- DAIGGER, G. T. *Development of refined clarifier operating diagrams using an updated settling characteristics database*. Water Environment Research, v. 67, n. 1, pp 95-100, 1995.

DA-RIN, B. P.; NASCIMENTO, G. P. L. *Nova metodologia para dimensionamento e análise de processos de lodos ativados - as curvas de operação do sistema de aeração*. In: 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Anais, Belo Horizonte, 1977.

DICK, R. I. *Role of activated sludge final settling tanks*. Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, v. 96, n. SA 2, pp 423-436, 1970.

ECKENFELDER Jr., W. W. *Industrial water pollution control*. 3. ed. McGraw-Hill International, 1989.

JORDÃO, E. P. & PESSÔA, C. A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 3 ed. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental-ABES, 720pp. 1995.

KINCH, G. J. *A theory of sedimentation*. Transactions, Faraday Society, v. 48, pp 166-176, 1952.

METCALF & EDDY, Inc. *Wastewater engineering: treatment disposal reuse*. 3 ed. USA, McGraw-Hill Book Company, 1336 pp. 1991.

RAMALHO, R. S. *Introduction to wastewater treatment processes*. 2 ed. USA, Academic Press, 580 pp. 1983.

SANTOS, R. C. O. *Proposta de um método racional para dimensionamento de sistemas de tratamento de esgotos por lodos ativados em bateladas*. Dissertação de Mestrado, UERJ, 2002.

TALMADGE, W. P. & FITCH, E. B. *Determining thickener unit areas*. Industrial and Engineering Chemistry, v. 47, pp 38-41, 1955.

VESILIND, P. A. *Discussão de Evaluation of activated sludge thickening theories*, de Dick, R. I. & Ewing, B. B. Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE, v. 94, n. AS 1, pp 185-190, 1968.

von SPERLING, M. *Dimensionamento de lodos ativados por batelada utilizando os princípios da teoria do fluxo de sólidos*. Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, v. 6, n. 3, n. 4, pp 147-156, 2001.

von SPERLING, M., FRÓES, C. M. V. *Dimensionamento e controle de decantadores secundários com base em uma abordagem integrada e simplificada da teoria do fluxo de sólidos*. Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), v. 3, n. 1/2, pp 42-54, 1998.

YOSHIOKA, N.; HOTTA, Y.; TANAKA, S. *Batch settling of homogeneous slurries*. Kagaku Kogaku, v. 19, n. 12, pp 616-626, 1955.

Endereço para correspondência:

Rafael Carvalho de Oliveira Santos
Departamento de Engenharia
Sanitária e do Meio Ambiente
Faculdade de Engenharia
Universidade Estadual do Rio de
Janeiro - UERJ
Rua São Francisco Xavier, 524, S/5 029-F
20550-013 Rio de Janeiro - RJ-
Brasil
Tel.: (21) 9967-4263
E-mail: santosrco@ig.com.br