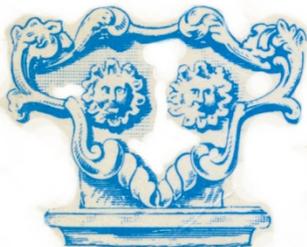




**COMPANHIA ESTADUAL
DE ÁGUAS E ESGOTOS**

**NOVA METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE
PROCESSOS DE LODOS ATIVADOS - AS CURVAS DE OPERAÇÃO
DO SISTEMA DE AERAÇÃO**

Eng.ºs Benito P. da Rin e Gerson P. L. Nascimento



9.º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA

*Promovido pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária - ABES
Seção do Estado de Minas Gerais*

Belo Horizonte, 3 a 8 de julho de 1977.

NOVA METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE
PROCESSOS DE LODOS ATIVADOS - AS CURVAS DE OPERAÇÃO
DO SISTEMA DE AERAÇÃO

Eng.ºs Benito P. Da-Rin e Gerson P. L. Nascimento



CEDAE

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
SECRETARIA DE OBRAS E SERVIÇOS PÚBLICOS
COMPANHIA ESTADUAL DE ÁGUAS E ESGOTOS

9.º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA
BELO HORIZONTE - MG - JULHO 1977

NOTAS DA EDIÇÃO DIGITALIZADA

Este trabalho foi originalmente apresentado em 1977 no 9º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária promovido pela ABES em Belo Horizonte, MG, editado com os meios então disponíveis para este fim: texto datilografado e imagens desenhadas em nanquim sobre papel vegetal.

Esta edição digital criada para atender o pedido de colegas que se interessavam pelo trabalho, que na época da publicação original teve pouca divulgação, foi gerada por um dos autores, o Eng. Benito P. Da-Rin em junho de 2021 (Gerson P. L. Nascimento faleceu em 2008) usando meios eletrônicos.

A simples digitalização de um dos poucos exemplares disponíveis e sua apresentação na forma de um conjunto de imagens das páginas originais não pareceu uma forma adequada de apresentação, como pode ser constatado pelo exame das tabelas numéricas que constam das páginas 52 a 54, mantidas assim para evitar possíveis alterações dos dados numéricos. Por isso, e visando exclusivamente melhorar a apresentação e tornar o texto mais legível, o autor submeteu as imagens das páginas de texto a um processo de reconhecimento ótico de caracteres (OCR), editou o texto assim obtido apenas para corrigir os erros gerados pela imprecisão do procedimento de conversão e criou este exemplar digitalizado no formato PDF. As ilustrações foram mantidas no formato original, substituindo-se apenas a fonte usada em algumas legendas para eliminar as imperfeições geradas no processo de digitalização.

Nada se modificou do texto original, exceto a pontuação (algumas vírgulas foram eliminadas). A paginação do original foi mantida e até mesmo os eventuais (felizmente poucos) erros de ortografia permaneceram inalterados, inclusive o uso do vocábulo “decantação” para se referir ao deslocamento das partículas da suspensão para o fundo do decantador secundário quando o correto seria “sedimentação” (confesso que resistir à tentação de fazer esta alteração me custou grande esforço).

Em resumo: o trabalho digitalizado é uma reprodução exata do original publicado em 1977 inclusive no que toda à paginação e disposição das figuras. No que toca ao conteúdo, nada foi alterado.

Rio de Janeiro, junho de 2021

Benito P. Da-Rin

Gerson P. L. Nascimento (in memoriam)

RESUMO

A técnica de tratamento de esgotos pelo processo de lodos ativados é relativamente nova e as bases racionais de projeto e operação somente têm se desenvolvido nas últimas duas décadas. Esse desenvolvimento tem enfatizado sobretudo os fenômenos que se processam no reator biológico, relegando a segundo plano o papel do decantador final.

Os autores demonstram que o Tanque de Aeração, o Decantador Secundário e a Elevatória de Lodos Ativados são peças interdependentes de uma única estrutura básica, a qual denominaram Sistema de Aeração.

Estabelecem, a seguir, uma metodologia para a determinação da lei de variação da velocidade de sedimentação zonal com a concentração das partículas na suspensão e, utilizando esta função, aliada aos parâmetros de operação do sistema, estabelecem as relações que determinam o grau de interdependência entre as dimensões das unidades de tratamento do Sistema de Aeração e as condições de operação do mesmo.

Por meio destas relações, chegam a uma representação gráfica da faixa de operação do sistema, uma família de curvas, que denominaram curvas de operação, e que sintetizam todas as possíveis condições de operação a que pode ser submetido um genérico Sistema de Aeração por meio da variação conjunta dos parâmetros operacionais.

Tais curvas de operação, por espelharem a interdependência entre concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração, taxa de aplicação superficial sobre o decantador secundário e relação de recirculação, se constituem em valiosíssima ferramenta não somente para o dimensionamento de um novo sistema, como também para a análise do comportamento de um sistema existente, como é mostrado pelos autores.

Finalmente, os autores utilizam a sistemática proposta na determinação das curvas de operação de três sistemas existentes e concluem pela sua viabilidade.

ÍNDICE

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. | O ADENSAMENTO DE LODOS | 2 |
| 3. | O SISTEMA DE AERAÇÃO | 7 |
| 4. | A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO | 10 |
| 5. | A VARIAÇÃO DO FLUXO DE SÓLIDOS | 16 |
| 6. | A SISTEMÁTICA SUGERIDA | 21 |
| 7. | APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA A TRÊS CASOS PRÁTICOS | 32 |
| 8. | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 41 |
| 9. | LISTA DE SÍMBOLOS..... | 43 |
| 10. | BIBLIOGRAFIA | 45 |

NOVA METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DO
PROCESSO DE LODOS ATIVADOS - AS CURVAS DE OPERAÇÃO
DO SISTEMA DE AERAÇÃO

Eng^{os} Benito P. Da-Rin e Gerson P. L. Nascimento

1. **INTRODUÇÃO**

O tratamento de esgotos pelo processo dos lodos ativados é uma técnica relativamente nova. A primeira instalação a empregar esse processo foi construída há cerca de sessenta anos. Durante muitas décadas o dimensionamento do processo foi feito em bases empíricas e o desenvolvimento das técnicas de projeto baseadas na cinética de remoção de um substrato orgânico pelos microrganismos constituintes do lodo ativado, que fornece as bases para um enfoque racional do problema, somente se deu nos últimos vinte anos.

Sendo os lodos ativados um processo eminentemente biológico era de se esperar que as atenções se voltassem especialmente para o tanque de aeração, o reator no qual se processa a estabilização da matéria orgânica, objetivo específico do tratamento.

O decantador secundário era encarado como acessório de pouca importância dada a suposta simplicidade do processo físico que nele se desenrolava.

Apenas na última década levantaram-se as primeiras evidências de que o decantador secundário não apenas é peça fundamental do processo, como também o seu dimensionamento deve ser feito de forma integrada ao do tanque de aeração e elevatória de retorno de lodo ativado, constituindo-se essas três unidades em uma única entidade que passaremos a chamar de sistema de aeração.

No decorrer deste trabalho procurar-se-á delinear as bases sobre as quais se assenta a teoria que implica na interdependência das peças que constituem o sistema de aeração e que serviram de fundamento para a sistemática de projeto introduzida pelos autores.

Esta sistemática consistirá na obtenção de uma família de curvas que denominar-se-ão curvas de operação e que representarão o conjunto de todas as possíveis condições de operação de um sistema de aeração, possibilitando não somente um dimensionamento ótimo de um novo sistema como também se constituindo em extraordinária ferramenta de análise de um sistema existente.

2. O ADENSAMENTO DE LODOS

A operação unitária que visa a separação das partículas em suspensão de um líquido através da ação da gravidade denomina-se decantação. Este fenômeno se manifesta sob três formas típicas, dependendo da concentração inicial das partículas e da natureza das mesmas (1).

Partículas contidas em baixa concentração e que não apresentem tendência a flocular sedimentam-se independentemente e o fenômeno toma o nome de decantação discreta.

Partículas que tendem a flocular, agregando-se umas às outras, modificando suas características ao longo da trajetória, decantam-se segundo a decantação floculenta.

Se tais partículas se encontrarem em uma suspensão de elevada concentração, a pequena distância entre elas não é suficiente para impedir a ação das forças inter-particulares e, dentro de certa medida, tais forças podem mantê-las em posições fixas entre si como peças de uma estrutura. Nesse caso as partículas se decantam como um todo, formando uma interface perfeitamente definida entre o líquido clarificado e a zona onde as partículas vão se acumulando (lençol de lodo). Este fenômeno toma o nome de decantação zonal.

No tratamento de esgotos a decantação discreta se apresenta tipicamente nos dispositivos de remoção de areia por gravidade. A decantação floculenta nos decantadores primários e a decantação zonal nos decantadores secundários, decantadores por floculação química e espessadores de lodos por gravidade.

Neste trabalho os autores estão particularmente interessados no comportamento dos decantadores secundários, utilizados no processo de tratamento de esgotos por lodo ativado e suas variantes. Tais unidades de tratamento recebem o efluente dos tanques de aeração, que consiste normalmente em um líquido de baixa carga poluidora (esgoto tratado) contendo em suspensão os flocos de lodo ativado em concentrações que variam geralmente na faixa de 1.500 a 10.000 mg/l (2).

O fenômeno que se processa nessas unidades é caracteristicamente a decantação zonal.

A função dos decantadores é promover a separação das partículas e do líquido. O líquido deve se apresentar tão isento quanto possível de sólidos em suspensão. As partículas, que serão removidas pelo fundo da unidade e encaminhadas de volta ao tanque de aeração, deverão se apresentar em tal concentração que possam ser totalmente removidas pela vazão recirculada. Isso significa que a unidade deve cumprir dupla função: clarificar o líquido efluente e adensar os sólidos no fundo.

O dimensionamento dessas unidades deve levar em conta ambas as funções. O fato de não se considerar a capacidade da unidade de adensar o lodo implicará na impossibilidade de retornar esse lodo ao tanque de aeração com a mesma rapidez com que ele ingressa no decantador. Isso fará com que ele aí vá se acumulando e acabe por se perder pelo vertedouro de saída, quando todo o processo entrara em colapso.

Para fornecer um efluente clarificado, a área (superfície horizontal) do decantador deverá ser tal que a taxa de aplicação superficial A_s (volume de líquido aplicado à unidade de área do decantador na unidade de tempo) não exceda a velocidade de decantação do material de decantação mais lenta que se deseja remover.

Para serem adensados até a concentração desejada, os sólidos devem ser introduzidos no decantador de forma tal que a massa aplicada à superfície na unidade de tempo seja, no máximo, igual à capacidade do decantador de transportar esses sólidos para o fundo.

Os sólidos introduzidos em um decantador são transportados para o fundo por meio de duas ações distintas. A primeira é a decantação propriamente dita, ou seja, o transporte para baixo sob a ação da gravidade. A segunda é a tendência da massa líquida dirigir-se para baixo, levando consigo os sólidos, causada pela retirada do lodo do fundo.

A “velocidade” com que os sólidos se dirigem para o fundo de um decantador pode ser quantificada pelo fluxo de sólidos, definido como a massa de sólidos que atravessa a unidade de área de uma seção horizontal na unidade de tempo. O fluxo de sólidos total S_t que se dirige ao fundo da unidade será então a soma do fluxo de sólidos causado pela decantação, S_d , com o fluxo de sólidos causado pela remoção do lodo pelo fundo, S_u (3).

Considere-se uma dada seção horizontal de um decantador situada entre o fundo da unidade e a borda do lençol de lodo. Considere-se ainda que, nesse decantador, a concentração de sólidos seja homogênea em todas as seções horizontais. Seja C_i a concentração na seção considerada.

Nesse caso, o fluxo de sólidos através da unidade de área da seção considerada causado pela decantação será:

$$S_d = C_i \cdot v_i \quad (1)$$

Onde:

v_i = velocidade de sedimentação dos sólidos na concentração C_i -

O fluxo de sólidos nessa seção causado pelo escoamento do lodo do fundo será:

$$S_u = C_i \cdot U \quad (1a)$$

Onde:

U = velocidade média de escoamento causada pela remoção do lodo do fundo.

Nesse caso, o fluxo de sólidos total será:

$$S_t = S_d + S_u = C_i \cdot v_i + C_i \cdot U \quad (2)$$

Essa equação é geral e válida para todas as seções horizontais do decantador. Ela exprime a capacidade da seção (ou da unidade de área da seção) de se deixar atravessar pelos sólidos que se dirigem ao fundo.

Essa capacidade, como mostra a Eq. (2), é função de C_i , v_i e U .

A velocidade de sedimentação v_i na sedimentação zonal de uma determinada suspensão depende exclusivamente da concentração de sólidos em torno da partícula: $v_i = f(C_i)$ (4).

A velocidade média de escoamento causada pela remoção do lodo é definida por:

$$U = \frac{Q_u}{A} \quad (3)$$

Onde:

Q_u = vazão removida pelo fundo

A = área do decantador

Em condições ideais, a massa total de sólidos m que ingressa no decantador na unidade de tempo transportada na concentração C_0 pela vazão Q_0 afluyente ao DS, é totalmente removida pelo fundo na concentração C_u pela vazão Q_u , logo:

$$m = Q_0 \cdot C_0 = Q_u \cdot C_u \quad (4)$$

Então:

$$U = \frac{m}{C_u \cdot A} \quad (3a)$$

Portanto, em um decantador de área A constante que recebe uma massa m constante de sólidos ao longo do tempo e que os remove totalmente na concentração de fundo C_u , a velocidade U é função exclusiva de C_u .

Em tais condições o fluxo de sólidos total que atravessa qualquer seção horizontal da unidade depende exclusivamente da concentração em que esses sólidos são retirados pelo fundo e da concentração de sólidos na seção considerada.

$$S_t = f(C_i ; C_u) \quad (5)$$

No lençol de lodo de um decantador existem camadas horizontais com concentrações variando continuamente desde a concentração dos sólidos afluentes, C_0 , até a concentração de fundo C_u . Cada uma dessas camadas, de concentração C_i , tem uma certa capacidade de se deixar atravessar pelos sólidos, expressa pela Eq. (2), que depende da concentração da própria camada e da concentração de fundo.

Essa propriedade varia de camada em camada com a concentração C_i . A variação se dá de tal forma que o fluxo de sólidos passa por um valor mínimo para uma determinada combinação de valores de C_i e C_u .

A afirmativa acima é da máxima importância para a avaliação do fenômeno em tela. Ela significa que em um dado decantador em operação contínua, existe uma camada com concentração de sólidos C_i em que a capacidade de deixar passar sólidos é mínima e que funciona como fator limitante do processo (camada limitante). Se a massa de sólidos que ingressa na unidade de área do decantador na unidade de tempo (taxa de aplicação de sólidos) for maior que o fluxo de sólidos da camada limitante, os sólidos não poderão atravessá-la com a mesma rapidez com que ingressam na unidade e vão se acumulando sobre ela. Se esta situação perdurar por tempo suficiente, os sólidos acabarão por se perder pelo vertedouro do decantador, ainda que o mesmo tenha área suficiente para permitir a clarificação.

Em essência, para que o decantador funcione convenientemente não basta que sua área seja aquela dimensionada apenas para atender a clarificação do efluente a partir da taxa de aplicação superficial A_s . É preciso ainda que essa área seja tal que permita o transporte de sólidos para o fundo com a mesma rapidez com que ingressam na unidade, permitindo assim o seu adensamento até a concentração C_u desejada.

A área que permite esse adensamento é limitada pelo fluxo de sólidos S_t mínimo. Então a massa total de sólidos que ingressa no decantador na unidade de tempo, distribuída por toda a superfície do mesmo, não deve exceder a esse valor limite.

Assim:

$$A = \frac{m}{S_t} = \frac{Q_o \cdot C_o}{S_t} \quad (6)$$

Para que o decantador funcione convenientemente a técnica convencional de projeto recomenda determinar ambas as áreas, ou seja, a que permite a clarificação do líquido e a que leva ao adensamento dos sólidos até a concentração C_u desejada. A maior delas deverá ser adotada.

3 0 SISTEMA DE AERAÇÃO

A inabilidade de um dado decantador de adensar o lodo até a concentração C_u desejada implicará em colapso de todo o processo. Isso poderá ser depreendido das considerações seguintes.

O processo dos lodos ativados se alicerça na capacidade de certos microrganismos utilizarem a matéria orgânica contida no esgoto como substrato (fonte de energia) para seus processos vitais. Tais organismos fazem parte do chamado lodo ativado, ou seja, dos flocos mantidos em suspensão no tanque de aeração. Esses tanques são dimensionados para conter uma certa massa de organismos, suficiente para receber e estabilizar até o grau desejado a matéria orgânica afluyente, massa esta que é função da carga orgânica afluyente. Como o volume de um dado tanque de aeração é fixo, a existência de uma certa massa fixa de lodo ativado implica na fixação de uma certa concentração de sólidos no referido tanque.

Isto significa que o efluente de um tanque de aeração tem como característica uma certa concentração de sólidos em suspensão constante, ou variando muito pouco dentro de certos limites.

No processo de lodos ativados há uma certa produção de sólidos em suspensão causada em parte pela acumulação no sistema dos sólidos em suspensão não biodegradáveis trazidos pelo esgoto bruto e, principalmente, pelo aumento da biomassa causado pela proliferação dos microrganismos que incorporam a seu material celular parte da matéria orgânica biodegradada. Esta produção de sólidos em suspensão é descartada periodicamente, de tal forma que o excesso produzido em um certo período é removido nesse mesmo período. Logo, do ponto de vista do balanço de matéria no sistema, essa produção e descarte não implicarão em variação da massa (e, portanto, da concentração).

A concentração de sólidos em suspensão inertes no esgoto afluyente ao TA, se comparada às concentrações existentes no interior do processo, apresenta valores desprezíveis. Pela mesma razão os sólidos em suspensão no efluente do decantador secundário serão desprezados.

Admitidas essas hipóteses simplificadoras, do ponto de vista do transporte de sólidos em suspensão o processo se apresentará com aspecto do diagrama da fig. (1).

SISTEMA DE AERAÇÃO

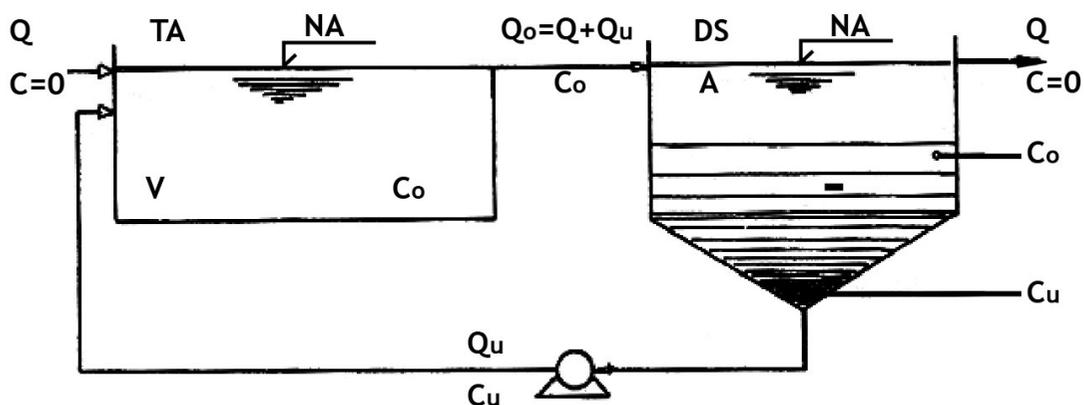


FIG. 1

Onde:

Q = vazão afluente

Q_u = vazão de recirculação

C_0 = concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração

C_u = concentração de sólidos em suspensão na vazão de recirculação.

Seja r a razão de recirculação, definida por:

$$r = \frac{Q_u}{Q} \quad (7)$$

Neste caso, um simples balanço de matéria em torno do tanque de aeração levará à relação:

$$C_0 = C_u \frac{r}{1 + r} \quad (8)$$

Isto significa que em um dado sistema C_0 depende na razão direta de C_u . Se o decantador secundário não possuir área suficiente para permitir o adensamento do lodo até a concentração C_u , necessária para manter C_0 em seu valor de projeto, a massa total de lodo ativado existente não será suficiente para estabilizar a matéria orgânica até o grau desejado e o processo perderá em eficiência.

Da Eq. (8) poderia se supor que o problema seria solucionado com o aumento da relação de recirculação r . Tal raciocínio, entretanto, é enganoso.

A massa de sólidos aplicada ao decantador secundário na unidade de tempo é:

$$m = (Q + Q_u) C_o \quad (4a)$$

O aumento de $(Q + Q_u)$ causado por um aumento de r não implica em redução de C_o por diluição, pois a massa de sólidos contida no sistema é constante e o sistema é de volume constante (logo $C_o = \text{constante}$). O que irá ocorrer é que a mesma massa de sólidos M passará a fluir mais rapidamente, o que aumentará m .

A taxa de aplicação de sólidos sobre a área A do DS será

$$s = \frac{(Q + r.Q) C_o}{A} \quad (9)$$

Um aumento de r visando manter o transporte do lodo em uma concentração de fundo menor que a desejada implicará então no aumento de S_t , pelo aumento de $r.Q$. Conforme será visto adiante, o aumento de S_t implicará na diminuição da concentração de fundo, o que fará a massa total transportada pela nova vazão $r.Q$ permanecer aproximadamente na mesma posição.

Um sistema no qual a concentração de fundo no DS (C_u) seja insuficiente para manter o valor desejado da massa de sólidos em suspensão no tanque de aeração, somente poderá operar convenientemente se o valor de C_o for diminuído (para diminuir S_t) ou através do aumento de C_u .

Diminuir C_o significa aumentar o volume V do TA. Aumentar C_u significa expandir a área A do DS. Ambas as hipóteses, evidentemente, escapam do alcance do operador. Portanto, se o sistema não for dimensionado convenientemente, levando em conta a capacidade do DS de transportar sólidos para o fundo, jamais poderá operar eficientemente.

A esse respeito convém citar Culp e Culp (5):

“Em muitos casos, o processo aparentemente simples de

separação de sólidos por gravidade pode ser o elo fraco na cadeia do processo de tratamento, do qual dependem operações relativamente complexas em outros pontos a jusante"

e ainda:

"O custo de um decantador representa uma parcela muito pequena do custo total do tratamento. Tentativas para economizar no projeto do decantador importam em um potencial de economia muito pequeno, mas em um grande potencial para destruir a confiabilidade de toda a estação".

Do exposto fica claro que o volume do TA, a área do DS e a capacidade de recalque da elevatória de retorno de LA são grandezas intimamente relacionadas e devem ser projetadas como um único conjunto integrado, que denominaremos sistema de aeração.

O objetivo deste trabalho é introduzir uma sistemática para projeto de novas instalações e análise do comportamento de instalações existentes, que leve em conta todas as grandezas envolvidas e seu grau de interdependência, através de certas relações que permitam a otimização do dimensionamento e operação dos sistemas de aeração.

4 **A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO**

A massa total de sólidos aplicada sobre um decantador secundário não deve ser maior que a capacidade de se deixar atravessar pelos sólidos da camada horizontal de concentração C_i para a qual o valor de S_t é mínimo. Este valor mínimo se dá em uma camada horizontal de concentração C_i para a qual:

$$S_t = C_i \cdot v_i + C_i \cdot U = \min \quad (2a)$$

O valor de S_t dependerá não apenas das propriedades da suspensão (responsável pelo valor da parcela $C_i v_i$) como também das próprias condições de operação (responsável pelo valor da parcela $C_i U$).

Isso quer dizer que, em uma certa medida, o operador pode influir no processo através da variação de r , pois o valor de U depende de r

(Eqs. (3) e (7)). Isso não significa que um decantador poderá ter aumentado seu fluxo de sólidos significativamente através da variação de r , pois como vimos isso é impossível. Mas permitirá otimizar a operação buscando o ponto em que, para um dado valor de S_t , o valor da parcela $C_i V_i$ seja máximo, o que implicará na redução da parcela $C_i U$ reduzindo Q_u ao seu valor mínimo compatível com a boa operação.

O valor de $C_i.v_i$ é característico da suspensão. Conforme vimos, v_i varia com C_i , mas infelizmente a lei de variação é característica de cada suspensão. Lodos ativados de origens diferentes, produzidos por substratos diversos e diferentes idades de lodo ou relações alimento-microrganismos, se decantarão de forma diferente.

As bases teóricas da sedimentação zonal foram formuladas por Kinch (4) e possibilitam a determinação da variação de v_i com C_i através da observação da velocidade de descida da interface sólidos-líquido clarificado de uma suspensão em repouso. Talmadge e Fitch (6) partindo da teoria desenvolvida por Kinch, estabeleceram um procedimento prático através do qual pode-se determinar graficamente a velocidade de sedimentação v_i dos sólidos contidos em uma camada de concentração C_i em suspensões ideais, ou seja, aquelas em que v_i é função exclusiva de C_i .

Dick e Ewing (7), aplicando o método de Talmadge e Fitch para suspensões de lodos ativados, estabelecem que tais suspensões não se comportam como ideais e a velocidade v_i depende de fatores outros além da concentração C_i , tais como a altura da coluna do lodo e grau de agitação da suspensão. Sugeriram que os dados utilizados para projeto de espessadores por gravidade de lodos ativados fossem obtidos através de observações realizadas em condições semelhantes às da unidade real. Não obstante tais desvios das condições ideais, diversos autores têm sugerido relações visando estabelecer a lei de variação $v_i = f(C_i)$.

Aarne Vesilind, (8) sugere uma lei de variação do tipo:

$$v_i = v_0 \cdot e^{-KC_i}$$

Ray Krone (9) preconiza uma variação sob a forma:

$$v_i = v_0 (1 - kC_i)^5$$

Onde:

v_i = velocidade de sedimentação da camada de concentração C_i .

v_0 = velocidade de sedimentação da partícula individual.

K e k = constantes que dependem do tipo do lodo.

Os autores deste trabalho realizaram 52 testes de sedimentação com lodos ativados produzidos por 3 diferentes estações de tratamento de esgoto usando variantes diferentes do processo de lodos ativados, segundo técnica descrita no Anexo. As observações foram realizadas imediatamente após a retirada do material dos tanques de aeração, para evitar modificações nas características da suspensão. O deslocamento da interface foi observado por período nunca inferior a 2,5 horas e a concentração inicial foi determinada em amostra colhida no mesmo ponto e no mesmo momento e preservada em geladeira até a execução da análise de laboratório. As concentrações iniciais observadas variaram de 1.800 mg/l a 10.136 mg/l. A variação da posição da interface foi registrada em planilha e transposta para gráficos H x t. A título de ilustração, três desses gráficos foram incluídos (fig. 13 a 15).

As velocidades iniciais foram determinadas por meio de ajustamento estatístico de uma reta aos pontos que apresentassem maior aderência. Não se consideraram ajustamentos com um coeficiente de correlação inferior a 0,9. O ponto de compressão foi determinado a partir da interseção analítica da reta assim obtida com uma segunda reta ajustada aos pontos de maior aderência no segmento linear que se manifesta após a compressão. Não foram considerados, igualmente, coeficientes de correlação inferiores a 0,9. Do ponto de interseção obtido das equações das retas ajustadas traçou-se a bissetriz, determinada analiticamente para evitar a deformação angular causada pela escala. O ponto de compressão foi obtido pela interseção da bissetriz com a reta ajustada aos dois pontos da curva situados mais próximos desta bissetriz. Considerou-se a velocidade de compressão v_c como o coeficiente angular desta última reta e a concentração de compressão C_c foi obtida a partir da altura determinada analiticamente pela interseção com o eixo das alturas. O método é ilustrado pelas figuras 13 a 15.

Foram assim obtidas 52 velocidades de sedimentação v_s e 32 velocidades de compressão v_c , associadas a suas concentrações iniciais C_0 e de compressão C_c . (o número de v_c é inferior ao de v_s , pois no período de observação nem sempre se completava o estágio de compressão).

Essas velocidades v_s e v_c foram plotadas contra as respectivas C_0 e C_c (figuras 6 a 8).

As análises indicam que os lodos ativados observados se comportaram de forma a obedecer a lei de variação preconizada por Duncan e Kawata (10), que tem a forma:

$$v_i = b.C_i^{-a}$$

Onde a e b são coeficientes que dependem da natureza do lodo.

Com efeito, o tratamento estatístico dos dados levou aos seguintes resultados:

Estação de Tratamento da Ilha do Governador (ETIG) (ver fig. 6)

$$v = f(C_0): v = 2,016 \times 10^{11} . C_0^{-3,2993}$$

coeficiente de correlação $r = 0,9797$

O ajustamento foi efetuado apenas para os pares $v_s ; C_0$, ou seja, velocidades iniciais e concentrações iniciais. Isso porque se considerou que esses valores são mais precisos, pois o primeiro é obtido diretamente do gráfico (por meio do ajustamento de uma reta aos pontos do trecho de decantação livre que apresentem um coeficiente de correlação superior a 0,9), e o segundo pela medida em laboratório da concentração C_0 .

Os pontos ($v_c ; C_c$) obtidos através de processo gráfico, oferecendo portanto menor precisão, não foram incluídos para o estabelecimento da função. Entretanto constam dos gráficos (figs. 6, 7 e 8), e pode-se notar que ainda se ajustam a uma curva do mesmo tipo. Com efeito, se incluídos os pares ($v_c ; C_c$), o total de pontos se ajustará a uma curva de mesma forma. Para a ETIG esse ajustamento apresentou um coeficiente de correlação $r = 0,97$, bastante satisfatório.

Estação de Tratamento de Esgotos de Acari (ETCA) (ver fig. 7).

$$v = f(C_0): v = 3,8733 \times 10^{15} . C_0^{-4,6529}$$

$$r = 0,8645$$

Se incluídos os pares v_c ; C_c , o coeficiente r cai para 0,7795.

Estação de Tratamento de Vila Kennedy (ETVK) (ver fig. 8)

$$v = f(C_0): v = 2,637 \times 10^8 \cdot C_0^{-2,4811}$$

$$r = 0,8145$$

Se incluídos os pares (v_0 ; C_0), r cai para 0,7518.

A descrição das instalações, assim como de suas condições de operação, encontra-se no item 7.

Os dados acima indicam que não somente é possível estabelecer-se a lei de variação $v = f(C)$ de um certo lodo ativado, como também é válido incluir-se dados obtidos das próprias curvas de decantação nessa variação, ou seja, incluir entre os pares de valores (v_s ; C_0) outros pares (v ; C) obtidos através de tangentes às curvas de decantação.

Em outras palavras, não somente a teoria instituída por Kinch é válida para o tipo de suspensão em que se constitui o lodo ativado, como também o método gráfico preconizado por Talmadge e Fitch fornece pares de valores adicionais que podem ser utilizados para o estabelecimento da correlação $v_i = f(C_i)$.

Infelizmente não é possível, com os conhecimentos disponíveis até a presente data, determinar-se a correlação $v_i = f(C_i)$ de outra forma que não a observação direta do lodo a ser manuseado. Quando se tratar de ampliação de instalação existente o problema é de fácil solução, pois o lodo está à disposição do projetista. Quando, por outro lado, se tratar de projeto de nova instalação, os testes devem ser feitos com lodo gerado em reatores de laboratório ou instalações piloto, utilizando o mesmo esgoto e operando nas mesmas condições de carga que a futura instalação. Este procedimento certamente poderá redundar em enorme economia para o projeto, especialmente se for utilizada a sistemática proposta. Utilizar dados de outras fontes julgando que as condições são “semelhantes” e, portanto,

a decantabilidade dos lodos será igualmente semelhante poderá redundar em enormes prejuízos para a operação da futura ETE.

Isso porque sendo o lodo ativado um produto da atividade biológica, suas condições de decantabilidade são passíveis de enormes variações sob o efeito de fatores os mais diversos.

Magara et. al. (11) afirmam que a decantabilidade dos flocos de lodo ativado depende de:

- Grau de produção natural de certos polieletrólitos durante o processo de estabilização da matéria orgânica. Esses compostos segregados pelas células agem como coagulantes durante a decantação.

- Potencial eletroquímico das células.

- Propriedades físicas dos flocos, tais como tamanho e densidade.

Steiner et. al. (12) determinaram uma correlação entre carga elétrica superficial das células e decantabilidade. Como a carga elétrica superficial é a principal responsável pela biofloculação, concluíram que a decantabilidade depende do grau de floculação das células. Gondim (13) afirma que o fenômeno de floculação está relacionado com a superpopulação do meio e a falta de alimentos daí decorrente.

A relação entre a disponibilidade de alimentos e a biomassa existente (relação F/M) é dada por Ford e Eckenfelder (14) como a principal responsável pelas características de decantabilidade do lodo ativado. Realizaram experiências com diversos tipos de substratos e diversas relações F/M e concluíram que problemas de decantabilidade se apresentavam com valores desta relação (expressa em termos de kg DBO/kg SSV) acima de 0,8 quando o substrato utilizado era esgoto doméstico.

Magara et. al. (11) levaram a termo pesquisas visando correlacionar a relação F/M a certas características físicas do floco que influem na decantabilidade, tais como diâmetro aparente do floco, densidade efetiva e velocidade de sedimentação de flocos isolados, mostrando que na faixa de relação F/M expressa em kg DQO/kg SSV de 0,2 a 1 (o que, segundo Marais (15), corresponde à faixa de 0,11 a 0,56, se

medida em termos de kg DBO/kg SSV), embora tanto o diâmetro quanto a densidade das partículas isoladas tenham variado razoavelmente, o fizeram em razão inversa, de forma que a resultante variação de v foi pequena. Nenhum dos pesquisadores conseguiu, entretanto, determinar uma forma de estabelecer a variação $v_i = f(C_i)$ a partir do conhecimento de quaisquer parâmetros que não sejam os extraídos diretamente da decantação do lodo.

Como a decantabilidade do lodo é parâmetro fundamental para o dimensionamento e análise do sistema de aeração, sua determinação através dos testes de decantabilidade em proveta é imprescindível para um procedimento eficaz.

5 A VARIAÇÃO DO FLUXO DE SÓLIDOS

A equação que define o fluxo de sólidos (Eq. (2)) é geral e válida para todas as camadas do lençol de lodo. Seu valor passa por um mínimo, que ocorre em uma certa camada do lençol de lodo entre o fundo e a borda superior do mesmo.

A concentração C_i dessa camada de S_t mínimo poderá variar de acordo com as condições de operação, e ocupar qualquer valor entre C_0 e C_u .

Isso pode ser facilmente entendido se nos lembrarmos que o fluxo total de sólidos S_t é a soma de duas parcelas, S_i e S_u (Eq. (2)) e levamos ainda em conta que em um sistema em equilíbrio a massa de lodo que ingressa no decantador, trazida pela vazão efluente do TA, é igual a que é retirada pelo fundo pela vazão Q_u .

$$(Q + Q_u) C_0 = Q_u \cdot C_u \quad (4d)$$

Como a massa total de sólidos é constante, o aumento de Q_u , em um sistema em equilíbrio, implicará em uma diminuição de C_u , pois a mesma massa será transportada em um maior volume de líquido. Por outro lado, o aumento de Q_u forçará o aumento de $(Q + Q_u)$. C_0 é constante e não varia com a variação de $(Q + Q_u)$. Logo a taxa de aplicação de sólidos sobre o DS aumentará. O sistema se equilibrará em uma nova posição: à diminuição

da concentração C_u correspondera um aumento do fluxo de sólidos S_t , e vice-versa.

Esse aumento do fluxo de sólidos deve-se à variação do valor de U na Eq. (2). Vê-se, portanto, que a variação de Q_u pode aumentar o valor do fluxo de sólidos através das diversas camadas de lodo, embora isso não contribua para aliviar a situação de um DS sobrecarregado, pois o aumento do fluxo de sólidos causado pelo aumento de Q_u implicará no aumento da taxa pela qual esses mesmos sólidos serão aplicados ao DS.

Ora, já se mencionou que a Eq. (2) é geral e válida para qualquer camada. Por outro lado, a capacidade de transportar sólidos para o fundo pode ser variada em função da variação da parcela $C_i U$, variando-se Q_u . Sabe-se ainda que a capacidade de um certo decantador de transportar sólidos para o fundo é função do fluxo de sólidos da camada limitante.

As três afirmativas acima sendo válidas, como o são, levam à ilação de que, variando-se as condições da operação a camada limitante muda de posição, o que forçará a alteração do valor de $C_i v_i$. A cada condição de operação, ou seja, a cada conjunto de valores de r , Q , C_0 e seus respectivos C_u e Q_u , corresponde um valor de S_t que é limitado pela concentração C_i de uma determinada camada. A mudança de qualquer um dos parâmetros de operação implicará ou na ruptura do equilíbrio, com perda de sólidos pelo vertedouro de saída do DS, ou na acomodação de todo o sistema em uma nova condição de equilíbrio, com a consequente mudança dos demais parâmetros, inclusive C_i . O sistema passará a ser controlado por um novo S_t (de uma nova camada de concentração $C'_i \neq C_i$), que será o menor dentre todos os existentes na nova configuração.

Essa afirmativa leva a algumas conclusões extremamente interessantes.

A primeira delas é que não existe a famosa "concentração crítica" para a qual a capacidade de transporte de sólidos é mínima, característica da suspensão. A concentração limitante do processo é resultante da combinação de certas condições de operação, e varia de acordo com elas em uma mesma suspensão.

Alguns autores descrevem a determinação desta concentração crítica, supostamente existente, através de determinação

gráfica na curva de decantabilidade, obtida pela interseção da curva com a bissetriz das retas prolongamento dos segmentos retilíneos que se apresentam imediatamente antes e após a suspensão entrar em compressão e atribuem esta técnica a Talmadge e Fitch, citando o mesmo artigo incluído na bibliografia deste trabalho. O curioso é que nesse artigo não é mencionada nem a referida concentração crítica, nem a determinação gráfica do seu correspondente ponto crítico. O que se menciona é a existência de um ponto no qual a interface entra em compressão e que a máxima área unitária (correspondente ao mínimo fluxo de sólidos) deverá ser obtida através da tangente traçada por esse ponto.

Quanto à construção gráfica baseada no traçado da bissetriz, deve-se notar que a posição desta bissetriz e, portanto, a interseção da mesma com a curva de decantação, varia conforme as escalas dos eixos $H \times t$. Se a posição do “ponto crítico” fosse uma característica física da suspensão sua determinação não poderia ser influenciada pelas escalas como não é, por exemplo, a determinação gráfica de v_s .

Nas curvas de decantação utilizadas neste trabalho a determinação do par $(v_c ; C_c)$ foi feita utilizando-se a bissetriz dos trechos retilíneos da curva de decantação, exclusivamente com o fito de obter valores representativos da velocidade de sedimentação da interface em uma concentração intermediária entre a concentração inicial e final de cada teste, procurando assim homogeneizar e padronizar o procedimento. Mesmo assim, a bissetriz não foi determinada graficamente, mas analiticamente, através das equações das retas ajustadas aos trechos retilíneos da curva de decantação, com a finalidade de evitar a interferência da deformação causada pela escala.

A segunda conclusão do raciocínio anteriormente exposto sobre a variação de S_t com os parâmetros de operação do sistema é que essa variação, se determinada, poderá ser de extrema utilidade, pois enfeixará em um único procedimento todas as possibilidades de operação de um dado sistema.

Para determinar a lei da variação de S_t com os parâmetros de operação examinemos preliminarmente o método apresentado por Dick (3) e introduzido por Yoshioka et. al. para a análise do comportamento de um DS em operação contínua.

A taxa de aplicação de sólidos ao decantador secundário de um sistema em equilíbrio não deve exceder ao fluxo de sólidos da camada limitante do processo, S_t . Assim:

$$\frac{(Q + Q_u) C_o}{A} = S_t \quad (6a)$$

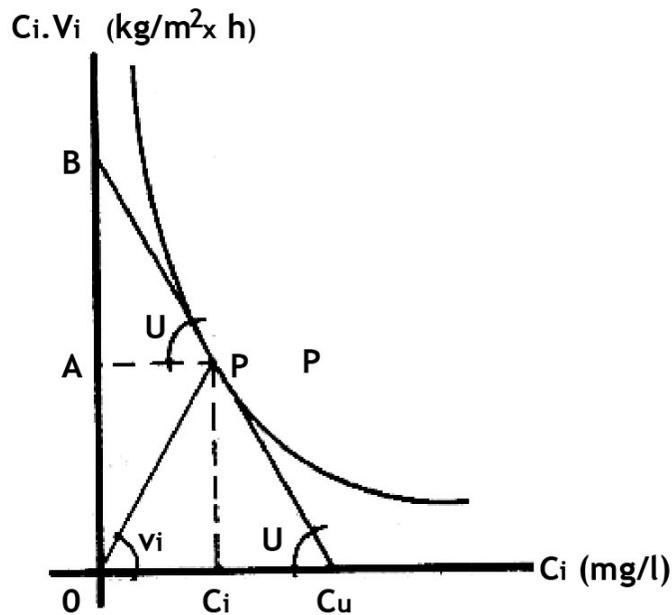
Combinando-se com Eq. (4d), vem:

$$\frac{Q_u \cdot C_u}{A} = S_t \quad (6b)$$

Considerando-se $Q_u/A = U$, vem:

$$U = \frac{S_t}{C_u} \quad (10)$$

Por outro lado, conhecida a lei da variação $v_i = f(C_i)$, pode-se determinar a variação de S_d com C_i , construindo-se o gráfico dos fluxos de sólidos S_d produzidos pela sedimentação de diversas camadas de lodo nas concentrações C_i e com velocidades v_i , (fig. 2), marcando-se os produtos $C_i \times v_i$ obtidos da função $v_i = f(C_i)$ contra as respectivas concentrações C_i , obtendo-se a denominada curva de fluxos:



CURVA DE FLUXOS

Fig. 2

Nesse gráfico, a distância AO representa o fluxo de sólidos S_d promovido pela sedimentação dos sólidos da camada de concentração C_i . A velocidade v_i é fornecida pela inclinação da reta OP, pela própria definição da lei de variação utilizada.

Seja a distância OB o fluxo total de sólidos que atravessa a camada com concentração C_i . Então a Eq. (2) nos mostra que a distância AB corresponde ao fluxo de sólidos S_u , que atravessa a camada com concentração C_i sob a ação da retirada pelo fundo da vazão Q_u . Como:

$$S_u = C_i \cdot U \quad (1a)$$

...a velocidade U corresponde a tangente do ângulo BPA.

Se realmente OB corresponde a S_t , a reta BP deverá obrigatoriamente ser tangente à curva pois, a cada par de valores de C_i e C_u em um sistema em equilíbrio, corresponde um único par de valores v_i e U. Caso a reta cortasse a curva teríamos o mesmo fluxo S_t gerado por duas camadas limitantes, o que é impossível.

Assim sendo, a tangente à curva no ponto P, correspondente à concentração C_i , corta o eixo dos fluxos de sólidos à distância OB da origem, correspondente ao fluxo total S_t , e os fluxos de sólidos S_d e S_u são os espelhados pelos segmentos AO e AB, respectivamente.

Isto posto, e tendo em vista a Eq. (10), a interseção da reta de segmento BP com o eixo das concentrações corresponde à concentração de fundo C_u para as condições de operação representadas pelo ponto P.

Essa propriedade é de imensa importância, pois permite associar-se o fluxo de sólidos S_t com a correspondente concentração C_u .

Cada tangente à curva de fluxos irá determinar, por meio de suas interseções com os eixos dos fluxos e das concentrações, um par de valores (S_t ; C_u) correspondente a uma determinada condição de operação. Evidentemente, a cada um desses pares corresponderão, para cada concentração C_0 , uma relação de recirculação r e uma taxa de aplicação superficial L , conforme se verá adiante, além de uma concentração C_i , determinada pelo ponto de tangência, que é a concentração de sólidos da camada limitante (o que demonstra a inexistência de uma “concentração crítica” característica da suspensão).

Essa propriedade será utilizada para a obtenção da sistemática de projeto proposta a seguir pelos autores.

A SISTEMÁTICA SUGERIDA

O dimensionamento de um sistema de aeração implica basicamente na determinação de três grandezas: o volume do tanque de aeração V , a área do decantador secundário A e a capacidade de recalque da elevatória de recirculação de lodos Q_u .

Essas três grandezas são interdependentes. A escolha de uma delas para um dado sistema implicará na fixação das outras duas.

Os dados básicos necessários ao projeto do sistema são:

Q - vazão afluente (m^3/seg)

F_0 - carga orgânica afluente (kg DBO ou DQO/dia)

E_f - eficiência desejada de remoção de carga orgânica (%).

Além desses dados o projetista deverá conhecer as características de decantabilidade do lodo, $v = f(C)$.

Q , F_0 e E_f fornecem, através das técnicas usuais de projeto, o valor da massa M de lodo ativado que deverá ser contida no TA. O volume V deste TA deverá conter essa massa M na concentração C_0 , tal que:

$$V = \frac{M}{C_0} \quad (11)$$

Determinado o valor de M pode-se arbitrar o valor de C_0 dentro das faixas usuais, o que implicará na determinação de V .

Quanto à área A do decantador secundário, alguns livros-texto sugerem que seja determinada pela simples adoção de um valor para a taxa de aplicação superficial A_s expressa em volume de líquido aplicado à unidade de área do DS na unidade de tempo. O valor de A_s seria arbitrado tendo em vista as características do lodo e A resultaria de:

$$A = \frac{Q}{A_s} \quad (12)$$

Esse procedimento pode levar a problemas operacionais, especialmente se a concentração C_0 do sistema for alta, visto não levar em conta o adensamento dos lodos. Para evitar esses problemas, alguns autores

sugerem que além da área determinada pela Eq, (12), responsável pela clarificação do efluente e na qual o valor de A_s seria o da velocidade inicial do deslocamento da interface na curva de decantação, seja ainda determinada a área necessária ao adensamento do lodo até a concentração C_u , arbitrada pelo projetista.

A área necessária ao adensamento, A_t , seria obtida pela relação:

$$A_t = \frac{(Q + r.Q) C_o}{A_a} \quad (6c)$$

...onde A_a seria a taxa de aplicação de sólidos, expressa em massa de sólidos aplicada à unidade de área do DS na unidade de tempo. Seu valor seria o obtido pela técnica sugerida por Talmadge e Fitch (6), suficiente para fornecer os sólidos adensados até a concentração arbitrada. A área assim obtida seria a mínima capaz de fornecer o lodo nessa concentração. A obtida através da Eq. (12) seria a mínima necessária à clarificação do efluente. Dever-se-ia adotar a maior delas.

(Notar que a área necessária à clarificação é obtida utilizando-se a vazão Q do líquido clarificado, a única que flui pelo vertedouro de saída, enquanto a área necessária ao espessamento utiliza a vazão $(Q + r.Q)$, responsável pelo transporte da massa de sólidos que será removida pelo fundo)

A vazão recirculada $Q_r = r.Q$ seria a determinada através de r , utilizando-se a relação:

$$r = \frac{C_o}{C_u - C_o} \quad (8a)$$

Como se vê a sistemática usual parte dos dados básicos, arbitra determinados parâmetros e, a partir daí, calcula as demais grandezas envolvidas, rigidamente fixadas por relações pré-estabelecidas.

A sistemática introduzida neste trabalho possibilitará um dimensionamento muito mais flexível através da utilização das curvas de operação do sistema que, espelhando a interdependência entre todas as grandezas envolvidas, permitirá a otimização do mesmo.

Ela utilizará os mesmos dados básicos de projeto e se apoiará nos conceitos desenvolvidos nos itens anteriores.

As curvas de operação serão determinadas utilizando-se a seguinte metodologia:

Através de testes de decantação em proveta, efetuados com o lodo gerado a partir das mesmas relações F/M e do esgoto a ser tratado no sistema, determina-se a lei de variação $v_i = f(C_i)$. Os testes conduzidos pelos autores levaram a uma função do tipo:

$$v_i = b.C_i^{-a}$$

Deve ser efetuado um número mínimo de três a cinco testes. Além dos pares $(v_s; C_{0,=})$, podem ser utilizados pares adicionais de valores $(v; C)$ obtidos das curvas de decantação por meio de tangentes traçadas a um ou mais pontos das mesmas curvas (ver Anexo).

A função assim obtida é característica do tipo de lodo e espelhará seu comportamento no que diz respeito à decantação.

De posse da lei de variação $v_i = f(C_i)$ o projetista poderá determinar diversos produtos $v_i \times C_i$ para um certo número de valores selecionados de C_i . Esses produtos correspondem aos fluxos de sólidos S_d (Eq (1)) e, se correlacionados com os correspondentes valores de C_i , gerarão a curva de fluxos do lodo em estudo.

Essa curva será construída, serão traçadas diversas tangentes à curva e determinadas suas interseções com os eixos coordenados (fig.3).

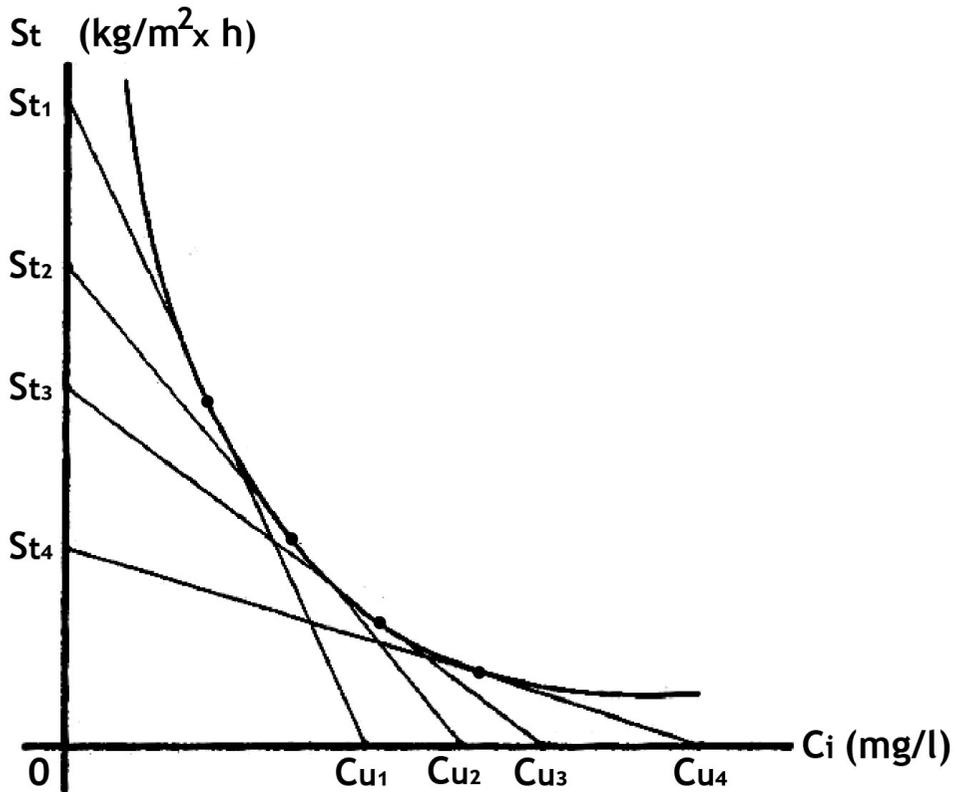


Fig. 3

Obtém-se assim diversos pares de valores (S_t ; C_u), cada um deles representativo de uma determinada condição de operação do sistema.

Presuma-se que se deseje conhecer o comportamento do sistema sob uma determinada concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração C_0 e recebendo uma vazão afluyente Q .

Conforme visto, cada par de valores (S_t ; C_u) representa uma dada condição de operação. Sendo assim, sua combinação com C_0 e Q deverá fornecer os valores de todos os demais parâmetros envolvidos. Senão vejamos:

Cada valor de C_u , se combinado com C_0 , fornece, através da Eq. (8a) o valor de r que, combinado com Q através da Eq (7), irá gerar a vazão de recirculação Q_u .

Cada valor de S_t , se combinado com r e C_0 , fornecerá o valor da taxa de aplicação superficial L a que está sendo submetido o DS para

esta específica condição de operação. Isso porque:

$$S_t = \frac{(Q + Q_u) C_o}{A} \quad (6a)$$

Substituindo-se o valor de Q_u fornecido pela Eq. (7):

$$S_t = \frac{Q}{A} (1 + r) C_o \quad (6d)$$

Tendo em vista que $L = Q/A$:

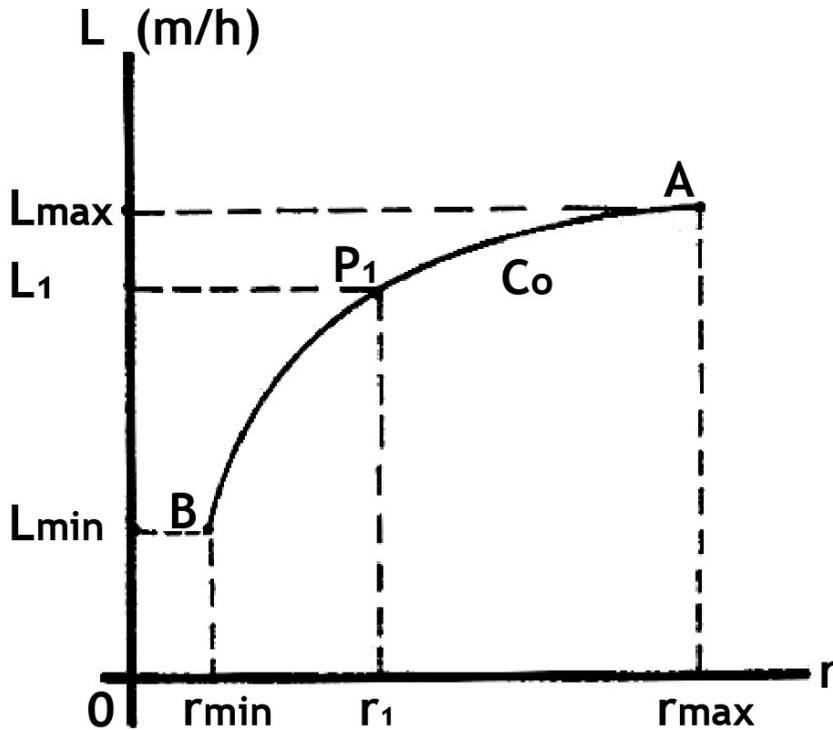
$$L = \frac{S_t}{(1 + r) C_o} \quad (13)$$

Note-se que o valor de L assim obtido não representa a taxa de aplicação superficial que irá fornecer o líquido clarificado. Ele tem um significado muito mais geral, do qual a condição de clarificação é apenas um caso particular, conforme será visto adiante. Este valor de L representa o volume de líquido recebido na unidade de tempo pela unidade de área do DS, na condição de operação espelhada pelo par $(S_t ; C_u)$.

Isso quer dizer que o DS, recebendo essa taxa de aplicação superficial L , irá fornecer não somente um líquido clarificado mas também os sólidos adensados até a concentração C_u , visto que ela foi determinada levando em conta a taxa de aplicação de sólidos espelhada pelo fluxo de sólidos S_t .

Pelo que foi exposto, cada par $(S_t ; C_u)$ obtido pelo traçado das tangentes na fig. 3, irá gerar um par correspondente de valores para L e r , quando referidos a uma concentração C_o .

Esses valores, se postos em um gráfico, irão gerar uma curva referente à concentração C_o , do tipo:



CURVA DE OPERAÇÃO

Fig. 4

Essa curva exprime a variação de L com r para a concentração C_0 considerada. Seja o ponto P_1 dessa curva. A ele corresponde uma relação de recirculação r_1 que deverá ser estabelecida para remover do fundo, na concentração C_{u1} , o lodo que aí se deposita quando o DS recebe a taxa de aplicação superficial L_1 , gerada pela vazão Q e necessária para manter no TA a concentração C_0 . A área do DS deverá ser então estabelecida através de:

$$A = \frac{Q}{L_1} \quad (14)$$

Para esse valor de L , quaisquer valores de r inferiores a r_1 implicarão na impossibilidade de se remover o lodo do fundo do DS com a mesma rapidez com que nele ingressa. O lodo irá se acumulando no DS e acabará por se perder pelo vertedouro de saída, o que fará C_0 se reduzir para valores inferiores ao da curva.

Cada ponto dessa curva corresponde a um par de valores ($L ; r$), que por sua vez corresponde a um par de valores ($S_t ; C_u$). Isso significa que cada ponto dessa curva corresponde a uma concentração C_i , limitante do processo, tal que seu S_t correspondente seja:

$$S_t = C_i \cdot v_i + C_i \cdot U \quad (2)$$

Essa propriedade nos servirá para determinar os limites dessa curva, ou seja, a faixa operacional do sistema na concentração C_0 .

Conforme vimos, a concentração limitante C_i varia de acordo com as condições de operação (ou seja, de acordo com a posição do ponto de operação na curva da fig. 3) numa faixa compreendida entre as concentrações C_0 e C_u , existentes respectivamente na borda e no fundo do lençol de lodo. Portanto, os limites operacionais do sistema estão compreendidos entre os pontos para os quais as camadas limitantes sejam aquelas de concentrações C_0 e C_u .

Isso significa que o ponto A da curva da fig. 3, correspondente a $L_{\text{máx}}$ e $r_{\text{máx}}$, espelha a condição de operação para a qual o fluxo de sólidos mínimo se dá na camada com concentração C_0 , ou seja, quando o valor de C_i , na Eq. (2) for igual a C_0 . Então v_i será igual à velocidade de sedimentação da interface na concentração inicial, ou seja, $v_i = v_s$. Logo:

$$S_t = C_0 \cdot v_s + C_0 \cdot U \quad (2b)$$

A taxa de aplicação superficial correspondente será então:

$$L_{\text{máx}} = \frac{S_t}{(1 + r) C_0} \quad (13a)$$

Ou, de acordo com (2b):

$$L_{\text{máx}} = \frac{v_s + U}{1 + r} \quad (13b)$$

Entretanto, combinando-se (3) e (7),

$$U = \frac{r \cdot Q}{A} = r \cdot L \quad (3b)$$

Substituindo-se esse valor em (13 b), vem:

$$L_{\text{máx}} = v_s \quad (15)$$

A eq. (15) exprime, como era de se esperar, que o valor máximo de taxa de aplicação superficial compatível com o equilíbrio do sistema é aquele que leva em conta apenas a clarificação do efluente, o que demonstra a afirmativa feita anteriormente que a taxa de aplicação superficial, conforme definida pela eq. (12), é apenas um caso particular da estabelecida pela Eq. (13). Em outras palavras, a função definida pela Eq. (13) passa por um máximo e o valor de L , nesse ponto, coincide com a taxa de aplicação superficial que fornece o efluente clarificado sem levar em conta o adensamento do lodo.

Com efeito, caso sejam estabelecidos pares de valores adicionais para $(S_t ; C_u)$ além do ponto correspondente a $L_{m\acute{a}x}$, notar-se-á que a curva inflete para baixo. Isso porque se estará bombeando um lodo cada vez mais diluído devido ao aumento de Q_u . Essa diluição implicará no aumento da vazão $(Q + Q_u)$, com o conseqüente aumento da taxa de aplicação de sólidos pois, como vimos, C_0 não depende das vazões no sistema. Esse aumento da taxa de aplicação de sólidos para a mesma vazão Q implicará na diminuição da taxa de aplicação superficial compatível com o equilíbrio do sistema, o que explica a curvatura para baixo da correlação $L \times r$ a partir do ponto A.

O valor de $r_{m\acute{a}x}$ correspondente a $L_{m\acute{a}x}$, abscissa do ponto A na curva da fig. 4, pode ser determinado a partir da relação fornecida pela Eq. (3 b).

$$r_{m\acute{a}x} = \frac{U}{L_{m\acute{a}x}} \quad (3c)$$

O valor de $L_{m\acute{a}x} = v_s$ é conhecido. O valor de U pode ser obtido através da tangente à curva da fig. 3 $(C_i.v_i ; C_i)$ traçada pelo ponto correspondente a C_0 , pois se sabe que para as condições $(L_{m\acute{a}x} ; r_{m\acute{a}x})$ a camada limitante do fluxo de sólidos está na concentração C_0 .

Um exame da fig. 2 nos mostra que quando $C_i = C_0$ (e portanto $C_i.v_i = C_0.v_s$), temos:

$$U = \frac{C_0 \cdot v_s}{C_u - C_0} \quad (16)$$

A tangente traçada à curva da fig. 2 pelo ponto de abscissa C_0 determinará, na sua interseção com o eixo das concentrações, o valor

correspondente de C_u , que fornecerá o valor de U com o qual, através da Eq. (3c), determinar-se-á $r_{m\acute{a}x}$.

Nota-se que o valor de C_u acima determinado corresponde ao menor valor da concentração de fundo compatível com o equilíbrio do sistema para as condições (Q ; C_o).

O ponto B da curva da fig.4 representa as condições extremas de operação na faixa oposta do espectro, ou seja, (L_{min} ; r_{min}). Sua posição será função exclusivamente das características do lodo, pois depende do grau máximo a que o lodo suporta o adensamento, ou seja, da máxima concentração de fundo ($C_{u,m\acute{a}x}$) que poderá ser obtida com o lodo em estudo. O valor de $C_{u,m\acute{a}x}$ será obtido através das curvas de decantação em proveta que geraram a correlação $v_i = f(C_i)$. Para tanto aconselha-se que estes testes tenham uma duração suficientemente longa para que a interface permaneça em repouso, isto é, que cesse a decantação. Quando isto ocorrer, todo o lodo contido na proveta estará sedimentado no fundo e sua concentração C_u será a máxima possível. Seja H_u a altura da interface em repouso, H_0 e C_0 as altura e concentração iniciais, respectivamente. Nesse caso:

$$C_{u,m\acute{a}x} = \frac{C_o \cdot H_0}{H_u} \quad (17)$$

Este valor de $C_{u,m\acute{a}x}$, juntamente com o valor de C_o na curva considerada, fornecerá r_{min} :

$$r_{min} = \frac{C_o}{C_{u,m\acute{a}x} - C_o} \quad (8b)$$

A ordenada da curva no ponto B, L_{min} , será obtida ainda através da tangente à curva da fig. 3, traçada a partir do eixo das concentrações do ponto correspondente a $C_{u,m\acute{a}x}$. A interseção desta tangente com o eixo das ordenadas se dará no ponto correspondente ao fluxo de sólidos mínimo S_{tmin} . (ver fig. 3).

O valor de L_{min} de acordo com a Eq. (13), será:

$$L_{min} = \frac{S_{tmin}}{(1 + r_{min}) C_o} \quad (13c)$$

O conjunto de pontos da curva da fig. 4 representa, então, o conjunto de todas as condições de operação compatíveis com o equilíbrio

de um sistema onde a concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração seja C_0 . Considerando-se que C_0 identifica o volume do tanque de aeração (eq. (11)), L a área do DS (Eq. (14)) e r a capacidade de recalque da elevatória de retorno de lodo (Eq. (7)), a curva da fig. 4 representa a interdependência entre essas três grandezas.

O procedimento adotado para a obtenção da curva da fig. 4 pode ser repetido para diversas concentrações de sólidos em suspensão no TA, dentro das faixas usuais. Isto irá gerar um gráfico como o da fig. 5.

Esse gráfico representa todas as condições possíveis de operação do sistema e se constitui em um extraordinário instrumento não só para o projeto como também para a análise do comportamento de um sistema em operação. Ele exprime todas as condições possíveis de volume do tanque de aeração (representada pelas diversas concentrações C_0), área de decantador secundário (em função de L) e capacidades da elevatória de recirculação (expressas por r).

As curvas nele representadas, por espelharem as possíveis condições de operação, denominaram-se curvas de operação do sistema.

Em termos de projeto ele permite a otimização do mesmo levando em conta determinadas restrições de caráter local.

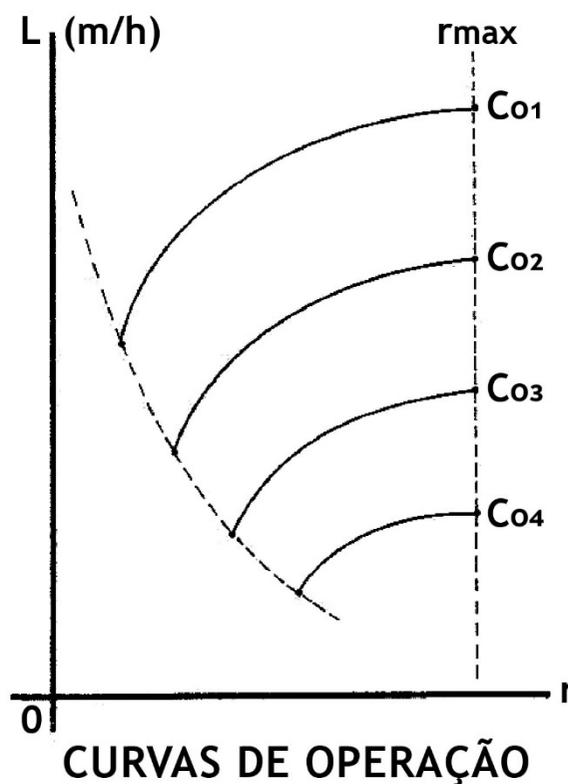


Fig. 5

Quanto à análise de um sistema existente, o gráfico fornece um inestimável auxílio aos responsáveis pela operação. É comum a ocorrência de problemas de operação caracterizados pela perda de lodo juntamente com o efluente do DS. Tais problemas são, em geral, atribuídos a deficiências da operação, ou à ocorrência do fenômeno de intumescimento do lodo ("bulking"). Muitas vezes, cremos mesmo que na maioria delas, tais problemas são causados exclusivamente pela inabilidade do DS de adensar o lodo até a concentração C_u desejada.

Por meio do gráfico da fig. 5 o operador poderá conhecer as reais possibilidades de operação do seu sistema.

Dispondo da vazão afluyente Q , ele pode calcular o valor da taxa de aplicação superficial L a que está submetido seu DS. Conhecendo a capacidade máxima de recalque de sua elevatória de retorno de lodo, poderá conhecer o valor máximo de r .

Com estes dois valores ele obterá um ponto no gráfico $L \times r$. Esse ponto cairá sobre uma curva, ou entre duas curvas correspondentes a duas concentrações C_0 . O valor da concentração C_0 obtido por interpolação é o máximo que seu DS poderá suportar. Qualquer tentativa de elevar a concentração C_0 para um valor acima deste redundará em perda de lodo pelo vertedouro de saída do DS, causada pela incapacidade desta unidade de transmitir sólidos para o fundo na mesma rapidez com que os recebe.

Se essa concentração C_0 , máxima de seu sistema, aliada ao volume disponível do TA existente, resultar numa massa total M de lodo suficiente para estabilizar a matéria orgânica afluyente, o sistema ainda poderá funcionar convenientemente. Caso contrário o excesso de matéria orgânica redundará em elevação da relação F/M até valores extremos e, aí sim, o operador terá problemas quanto à decantabilidade do seu lodo. Se uma situação assim se configurar, nenhum recurso de operação poderá fazer com que a ETE funcione eficientemente. O problema foge das mãos do operador, pois passa a exigir ou um aumento de área de decantação final ou o aumento do volume de aeração. Ao operador nada mais restará que desviar parte da vazão afluyente a seu sistema de aeração, limitando-se a receber aquela que traga uma carga orgânica compatível com a massa máxima de lodo que pode manter, e aguardar até que se faça a necessária ampliação de sua ETE.

7 APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA A TRÊS CASOS PRÁTICOS

A sistemática desenvolvida foi aplicada a três casos práticos, resultando na geração de três conjuntos de curvas de operação. Abaixo se descreve o método de aplicação utilizado.

Foram selecionadas três estações de tratamento de esgotos situadas no município do Rio de Janeiro que utilizam variantes diferentes do processo de lodos ativados.

Estação de Tratamento da Ilha do Governador: lodos ativados convencionais. Durante o período de observações, operou com as seguintes características:

Relação F/M média: 0,205

Eficiência média (em termos de remoção de DBO): 97,5%

A instalação é dotada de caixa de areia, decantador primário com diâmetro $D = 26,5$ m, dois tanques de aeração com volume $V = 1.800$ m³ cada, um decantador secundário com diâmetro $D = 28,7$ m, elevatória de recirculação com capacidade de recircular no máximo $Q_u = 75$ l/seg e unidades de digestão anaeróbia e secagem natural de lodo. Recebe um esgoto tipicamente doméstico que, no período, apresentou uma carga orgânica média de 181 mg DBO/l.

A carga orgânica média do esgoto decantado, afluente ao tanque de aeração, foi de 122 mg DBO/l e a concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração apresentou um valor médio de 3.070 mg/l, dos quais 1.980 mg/l voláteis. A concentração média de SS no lodo ativado foi de 6.770 mg/l.

A aeração é promovida por 10 aeradores superficiais tipo Simplex de 12 HP cada.

A instalação foi projetada usando parâmetros conservativos e ainda não recebe toda a vazão do projeto, o que justifica o valor extremamente baixo da relação F/M (calculada em termos de kg. DBO aplicada a kg. SSV por dia).

Estação de Tratamento da Vila Kennedy (ETVK): se constitui em dois valos de oxidação idênticos, colaterais, cada um com um volume de 130 m^3 . Os esgotos são encaminhados diretamente aos valos após simples gradeamento e a instalação não é dotada de decantador final. Originalmente dimensionada para operar pelo processo de aeração prolongada com operação intermitente (Da-Rin e Nascimento (16)), recebendo uma vazão média de $2,5 \text{ l/seg}$, passou a receber uma vazão média de $8,3 \text{ l/seg}$, o que forçou a modificar-se o método de operação. Atualmente, em caráter ainda de pesquisa, esta sendo operada de forma extremamente anti-convencional. Cada valo funciona, intermitentemente, como câmara de aeração e câmara de decantação. As unidades são operadas em série e o fluxo é invertido periodicamente. Isto permitiu um apreciável aumento da capacidade da instalação sem outras obras que a simples abertura de um vertedouro entre os dois valos.

Este tipo de operação torna difícil classificar o processo entre as variantes existentes de lodos ativados. Não seria aeração prolongada, em face do elevado valor da relação F/M ($0,282$) se comparado a faixa usual de operação desta variante. Não utiliza nem decantador primário nem secundário. É, de qualquer forma, uma instalação de lodos ativados que gera um lodo, conforme se verá adiante, de excelente qualidade.

A aeração é promovida por 4 aeradores superficiais tipo gaiola, de 5 HP. Não há recirculação de lodo, pois o lodo não deixa a câmara de aeração. O esgoto afluente é tipicamente doméstico. No período considerado sua DBO média foi de 215 mg/l . A concentração média de sólidos em suspensão no tanque de aeração foi de 6.500 mg/l , dos quais 3.800 mg/l voláteis.

Nessas instalações foram colhidas 52 amostras de lodo e submetidas ao teste de decantabilidade, conforme descrito no Anexo, sendo 10 da ETIG, 30 da ETVK e 12 da ETCA.

Como se desejava observar as concentrações na maior faixa de variação possível, além das amostras colhidas nas câmaras de aeração propriamente ditas foram colhidas amostras do lodo recirculado para os tanques de aeração da ETIG e do lodo da câmara de reaeração da ETCA.

A variação da altura da interface com o tempo gerou as respectivas curvas de decantação. Sempre que o tempo de observação era suficientemente longo para que o lodo entrasse completamente no estágio de compressão, determinava-se graficamente o ponto de compressão.

Os gráficos foram submetidos ao tratamento estatístico descrito no item 4 e deles foram obtidas as velocidades iniciais de sedimentação da interface v_s e, sempre que possível, as velocidades de compressão v_c , ambas convertidas para m/h.

Estes resultados estão sumarizados na tabela 1, na qual consta ainda a data do teste e as concentrações correspondentes.

Além das determinações de v_s e v_c , os gráficos $H \times t$ forneceram as concentrações máximas que se poderia esperar de cada tipo de lodo. Para tanto, e visando a simplificação do procedimento, arbitrou-se que os lodos estariam adensados até próximo de sua concentração máxima três horas após iniciada a decantação. Determinou-se então, em cada curva, a H_u correspondente à altura do lodo na proveta no tempo $t = 180$ minutos e cada observação gerou uma concentração máxima $C_{u\text{máx}}$, obtida pela Eq. (16). Os valores médios de cada instalação foram:

$$\text{ETIG: } C_{u\text{máx}} = 11 \text{ g/l}$$

$$\text{ETCA: } C_{u\text{máx}} = 12 \text{ g/l}$$

$$\text{ETVK: } C_{u\text{máx}} = 16 \text{ g/l}$$

Cada par de valores (v_s ; C_0) gerou um ponto nos gráficos das figuras 6, 7 e 8, respectivamente. Nesses gráficos foram ainda incluídos os pares (v_c ; C_c) apenas para comparação.

A distribuição dos pontos nos gráficos sugeriu que poder-se-ia estabelecer uma correlação do tipo sugerido por Duncan e Kawata (10), da forma: $v = b c^{-a}$.

Essa correlação se mostrou adequada, conforme relatado no Item 4.

Neste ponto, deve-se fazer algumas ressalvas. A primeira, relativa ao número de testes realizados, pois como se tratava de uma pesquisa, procurou-se efetuar o maior número possível de testes compatível com a acuidade necessária. Acreditamos que para fins de projeto ou análise do comportamento de um sistema existente um número menor de testes possa levar a resultados satisfatórios. Em qualquer caso, entretanto, recomendamos que se efetuem um mínimo de três a cinco testes.

A segunda ressalva prende-se ao fato de não se ter incluído os pares (v_c ; C_c) para o estabelecimento da correlação $v = f(C)$. Procedeu-se assim em busca da maior acuidade possível pois, conforme visto no Item 4, os pontos (v_s ; C_0) aderiram à curva com um grau de correlação sempre superior ao do obtido quando se incluía os pares (v_c ; C_c). Entretanto o menor coeficiente de correlação obtido ao se considerar todos os pares foi de 0,7518 (ETVK), que, se considerarmos o grau de imprecisão não só da obtenção gráfica dos pares (v_c ; C_c) como também das determinações de sólidos em suspensão em altas concentrações, pode-se considerar perfeitamente satisfatório.

Portanto, embora todos os valores de $v = f(C)$ utilizados neste trabalho tenham sido obtidos através da correlação $v_s = f(C_0)$, os autores consideram perfeitamente válida a inclusão de um maior número de pares (v ; C) obtidos por meio do traçado de uma ou mais tangentes à curva de decantação, como pode se perceber do exame das figs. 6, 7 e 8, onde os pares (v_c ; C_c) foram incluídos para fins de comparação.

Finalmente deve-se também lembrar que a única finalidade do estabelecimento da correlação $v = f(C)$ é a obtenção de um número suficientemente grande de produtos $C_i \times v_i$ para a construção da curva de fluxos. Não é imprescindível, embora seja preferível, o tratamento estatístico aqui utilizado que gerou as funções $v = b C^{-a}$. Desde que os pontos se distribuam no gráfico de forma a evidenciar uma determinada lei de variação, os produtos $C_i \times v_i$ poderão mesmo ser obtidos a partir de uma curva ajustada a sentimento aos pontos de um gráfico em escala natural. Isso é válido especialmente se se deseja empregar o método para a análise do comportamento de uma ETE em operação, onde normalmente se procura um resultado mais rápido, embora menos preciso e não existe a sofisticação de meios à disposição dos projetistas.

Estabelecida a lei de variação $v = f(C)$ para cada tipo de lodo, calculou-se por meio da função matemática os produtos $C_i \times v_i$, para C_i variando de 0 a 14.000 mg/l. Em seguida os resultados foram lançados no gráfico da fig. 9 e geraram as três curvas de fluxo correspondentes.

Aqui deve-se notar que as características específicas de cada lodo, espelhadas pelas curvas de fluxo, variam enormemente. Os mesmos se comportam como suspensões bastante diferentes, embora tenham sido gerados a partir de substratos semelhantes e sob relações F/M bastantes próximas. Isso vem ao encontro da afirmativa feita anteriormente

que cada lodo se comporta de maneira particular e não é válido, sendo inclusive inteiramente desaconselhável, utilizar dados obtidos de outras fontes para analisar o comportamento de um determinado lodo ativado. A extrapolação de dados obtidos através de reatores de laboratório ou instalações piloto utilizando o mesmo esgoto como substrato e operando sob as mesmas condições nos parece válida, conforme evidencia o fato de os pontos obtidos em ocasiões diferentes e de fontes diversas (como câmara de contato e câmara de reaeração da ETCA, valos 1 e 2 da ETVK, TA 1, TA 2 e retorno de LA da ETIG) da mesma instalação apresentarem uma boa correlação.

No gráfico da fig. 9 traçou-se tangentes a cada curva de fluxos a partir de valores selecionados de C_u no eixo das concentrações e determinou-se as interseções S_t destas tangentes com o eixo dos fluxos (As tangentes não foram incluídas na fig, 9 para não sobrecarregar o gráfico desnecessariamente). Os pares dos valores (S_t ; C_u) assim obtidos estão sumarizados na tabela 11.

A seguir, para cada ETE, foram selecionadas concentrações C_0 na faixa de 1.500 a 8.000 mg/l e, para cada uma das concentrações selecionadas, foram calculados os valores de L e r através das Eq. (13) e (8c).

Para cada C_0 selecionada, foram ainda calculados os valores de $L_{m\acute{a}x}$ e $r_{m\acute{a}x}$ e $L_{m\acute{i}n}$ e $r_{m\acute{i}n}$ através do seguinte procedimento:

$$L_{m\acute{a}x} = v_s \quad (15)$$

Onde v_s é a velocidade de sedimentação da camada cuja concentração é o C_0 considerado, obtida através da lei de variaçao $v_s = b C^{-a}$

$$r_{m\acute{a}x} = \frac{U}{L_{m\acute{a}x}} \quad (3c)$$

Onde:

$$U = \frac{C_0 \cdot v_s}{C_u - C_0} \quad (16)$$

Para a obtenção de U , foi traçada uma tangente à curva de fluxo no ponto de abscissa correspondente ao C_0 considerado e determinada sua interseção com o eixo das concentrações (correspondente ao C_u da Eq. (16)).

$$r_{\min} = \frac{C_0}{C_{U\max} - C_0} \quad (8b)$$

Onde C_0 é o valor considerado e $C_{U\max}$ é o valor médio obtido das curvas de decantação.

$$L_{\min} = \frac{S_{t\min}}{(1 + r_{\min}) C_0} \quad (13c)$$

Onde r_{\min} é o obtido pela Eq. (8 b), C_0 é o valor selecionado e $S_{t\min}$ é obtido (para todos os C_0 da mesma instalação) pela interseção com o eixo dos fluxos da tangente à curva de fluxo traçada a partir do ponto do eixo das concentrações correspondentes ao $C_{U\max}$.

Esse procedimento forneceu, para cada C_0 arbitrado e cada ETE, diversas combinações de valores de L e r , inclusive os valores limites (máximo e mínimo), que lançados aos gráficos das fig. 10 a 12, forneceram as curvas de operação das ETIG, ETCA e ETVK, respectivamente.

Sobre essas curvas cabem as seguintes observações:

- Foi utilizada a escala log-normal exclusivamente para comodidade de manuseio das curvas.

- O eixo dos r foi estendido apenas até o valor de 2,5 por entendermos que recirculações mais elevadas seriam antieconômicas, salvo se exigidas por alguma peculiaridade do processo, como por exemplo remoção biológica de nutrientes (17). Neste caso, nada impede que esse eixo seja estendido até ao valor de r_{\max} fornecido pela Eq. (3c). Esse valor é constante para todas as concentrações C_0 em uma mesma instalação, a partir do qual as curvas passam a infletir para baixo. A recirculação máxima aparece na fig. 8 (ETVK). Para as outras duas instalações, apresentou um valor extremamente alto ($r=3,5$ e $r = 7$ para a ETIG e ETCA, respectivamente), não cabendo nos limites escolhidos para os gráficos.

- Os trechos em tracejado de algumas curvas das ETIG e ETCA correspondem a dados extrapolados por não ser possível, dentro dos limites das curvas de fluxo utilizadas, obter valores precisos nesses trechos.

Análise dos resultados:

Não é possível empregar as curvas de operação da ETVK para a análise do seu sistema de aeração visto que o tipo de operação empregada não o permite, pela ausência de recirculação de lodos. Pode-se apenas afirmar, pela observação dessas curvas, que o lodo gerado é de muito boa qualidade do ponto de vista da decantabilidade.

A análise do comportamento da ETCA é bastante prejudicada por não dispormos nem da vazão de recirculação nem da concentração de sólidos em suspensão no lodo retornado. Se assumirmos que esse valor (C_u) é igual à concentração encontrada na camara de aeração de lodos, chega-se através da Eq. (8a) e dos valores de $C_0 = 2.580$ mg/l e $C_u = 2.940$ mg/l, a um valor de r elevadíssimo, da ordem de 8,1, o que é muito pouco provável. Entretanto, tendo em vista as características da instalação e o processo de retorno de lodo empregado, admite-se que o valor de r aí utilizado é extremamente alto. O valor de L obtido a partir da Eq. (14) e dos valores de $Q = 34,1$ l/seg, e $A = 150$ m² atinge a $L = 0,81$ m/h.

O exame da fig. 11 indica que a horizontal correspondente a $L = 0,81$ deverá encontrar a curva de $C_0 = 2.500$ mg/l em um ponto situado fora do gráfico, mas correspondente a um valor elevado de r , como esperado. Por outro lado, as curvas de operação da ETCA indicam que o lodo aí gerado é de muito má qualidade, característico do processo de bioadsorção.

A análise da operação da ETIG pode, entretanto, ser realizada plenamente.

Essa instalação tem apresentado, eventualmente, problemas de evasão de lodo pelo vertedouro do DS, particularmente ao se tentar elevar o valor de C_0 por meio da redução do descarte do excesso de lodo ativado, o que indica que a mesma está operando com C_0 próximo de seu limite máximo. Na ocasião das observações o sistema se apresentava em equilíbrio. A instalação, entretanto, operava no limite máximo de recirculação de lodo, no seu caso particular limitado pelo tipo do dispositivo de remoção de lodo do DS.

A taxa de aplicação superficial sobre o DS para $Q=90$ l/seg. e $A = 647$ m² atingiu ao valor de $L = 0,5$ m/h.

Esse valor, plotado contra $r = 0,83$ no gráfico da fig. 10, materializou o ponto P, que representa o ponto de operação do sistema. Esse ponto situado entre as curvas de operação de 2.500 mg/l e 3.000 mg/l, fornece por interpolação um valor de $C_0 = 2.850$ mg/l, apenas 7% inferior ao valor real de 3.070 mg/l.

Nas condições de decantabilidade do lodo gerado durante o período de observação esse é o valor máximo que a instalação suporta, visto que não é possível aumentar-se o valor de r , limitado pelas características do equipamento. O aumento da vazão afluyente irá acarretar um aumento de L . Isso forçará a redução do valor de C_0 , pois o ponto de operação irá se deslocar para cima (devido ao aumento de L) e para a esquerda (devido a diminuição de $r = Q_u/Q$).

Presumindo-se que a carga orgânica afluyente, representada pela DBO do esgoto afluyente, não se modifique ao longo do tempo até quando a instalação receber a totalidade da vazão de projeto ($Q = 200$ l/seg.) e que a eficiência de remoção de DBO do DP se mantenha a mesma, a carga orgânica afluyente ao TA atingirá ao valor de $F_0 = 3.108$ kg DBO/dia. Admitindo-se que nessa época a instalação opere com uma relação $F/M = 0,4$, máxima aconselhada para essa variante do processo (2), será necessária a presença de uma massa de SSV no TA de 5.270 kg. Se a relação entre as concentrações de SST e SSV no lodo ativado da ETIG mantiver as mesmas proporções atuais, a massa de SST atingirá ao valor de 8.170 kg. Para o volume total de 3.800 m³ do TA, isso corresponderá a um $C_0 = 2.270$ mg/l.

A vazão de 200 l/seg aplicada ao atual DS da ETIG, corresponderá a uma taxa de aplicação superficial $L = 1,1$ m/h. Como a vazão máxima recirculada não pode ser aumentada, teremos um vaíor de $r = 0,375$. A combinação desses valores gerou o ponto P_1 da fig. 10, fora da curva de operação correspondente ao $C_0 = 2.270$ mg/l, mínimo necessário ao tratamento.

A análise indicou, portanto, que, mantidas as atuais características de decantabilidade do lodo gerado na ETIG, esta instalação não poderá operar convenientemente quando receber a totalidade da sua vazão de projeto. Necessitará ou de uma ampliação no volume do TA, para a redução de C_0 a um valor próximo ao de 2.000 mg/l, conforme indica a posição do ponto P_1 , ou da construção de uma unidade adicional de decantação final, de forma a suportar a carga de sólidos representada pela $C_0 = 2.270$ mg/l, mínima necessária a eficiência da instalação. Caso seja construído um novo DS exatamente igual ao atual, o valor de L baixará para 0,55 e o de r se elevará para um máximo de 0,75, o que corresponde ao ponto P_2 da fig. 10, inteiramente satisfatório.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os autores concluem que:

1 - as características de decantabilidade do lodo ativado variam de instalação para instalação em função do tipo de esgoto tratado e das condições de operação de cada instalação. Até a presente data não foram desenvolvidas técnicas que permitam a previsão da lei de variação a partir do conhecimento prévio das variáveis envolvidas no processo;

2 - testes de decantação em proveta permitem a avaliação de tais características e a determinação da lei de variação da velocidade de sedimentação de uma certa camada de lodo com a concentração de lodo desta camada. Os testes levados a efeito pelos autores conduziram a uma função do tipo $v = b C^{-a}$. Este testes concluíram ainda pela aplicabilidade da teoria de sedimentação desenvolvida por Kinch ao tipo de suspensão em que se constitui o lodo ativado, assim como na validade do método de aplicação preconizado por Talmadge e Fitch;

3 - a eficiência do processo de lodos ativados depende não apenas dos fenômenos que transcorrem no tanque de aeração mas também, em grande parte, do fenômeno de separação de sólidos que se processa no decantador secundário. Essa dependência se dá em tal medida, que ambas as unidades, juntamente com a elevatória dos lodos ativados, devem ser encaradas como partes de um único conjunto integrado, de elevado grau de interdependência, que os autores denominaram Sistema de Aeração;

4 - a nova sistemática desenvolvida, baseada nas características de decantabilidade do lodo ativado, permite o dimensionamento e a análise do comportamento de sistemas de aeração levando em conta todas as variáveis envolvidas. Essa sistemática resulta na geração de uma família de curvas, que os autores denominaram curvas de operação do sistema, as quais espelham todas as combinações possíveis das diversas condições de operação de um dado sistema. A aplicação da sistemática na análise do comportamento de um sistema comprovou sua validade, resultando em um valor máximo admissível de SSTA 7% inferior ao real. O método oferece, portanto, uma certa margem de segurança, sendo ligeiramente conservativo.

Os autores recomendam:

1 - a utilização da sistemática por eles desenvolvida no projeto de novas instalações de tratamento pelo processo de lodos ativados. Tal procedimento permitirá não somente a obtenção de um projeto equilibrado, levando em conta o fenômeno de transporte de sólidos, como também a otimização do projeto em função de restrições locais, uma vez que permite variar, dentro da faixa possível, as dimensões das unidades de tratamento de forma a obter sempre um sistema equilibrado;

2 - que as características de decantabilidade do lodo utilizadas para o projeto de novas instalações sejam obtidas através de testes, realizados com o lodo gerado por reatores de laboratório ou unidades piloto, utilizando o mesmo esgoto como substrato e operando nas mesmas condições que o futuro sistema. Os gastos em tempo e recursos dispendidos nessa pesquisa serão grandemente compensados pela economia do projeto. Ao contrário, a utilização de dados obtidos de outras fontes ou estimados pelos projetistas pode redundar em malogro total para a operação do sistema;

3 - que a sistemática por eles desenvolvida seja empregada para o controle da operação de sistemas existentes. Por meio das curvas de operação poderá ser otimizada a operação do sistema, reduzindo a vazão recirculada ao mínimo compatível com a eficiência do mesmo, com a consequente economia de energia.

9 LISTA DE SÍMBOLOS

- a - Constante.
- A - Superfície horizontal do DS (m^2).
- A_a - Taxa de aplicação de sólidos responsável pelo adensamento do lodo ($kg/m^2 \times h$).
- A_s - Taxa de aplicação superficial responsável pela clarificação do efluente (m/h).
- A_t - Superfície horizontal do DS que permite o adensamento do lodo (m^2).
- b - Constante.
- C - Concentração de SS (genérica) (mg/l).
- C_c - Concentração de SS na qual o lodo entra em compressão (mg/l).
- C_i - Concentração de SS em uma camada horizontal i do lençol de lodo. (mg/l).
- C_0 - Concentração de SS no TA; Concentração inicial no teste de decantação (mg/l).
- C_u - Concentração de SS no fundo do DS (mg/l).
- $C_{u\text{máx}}$ - Concentração de SS máxima que um dado lodo pode alcançar (mg/l).
- DBO - Demanda Bioquímica de Oxigénio (mg/l).
- DQO - Demanda Química de Oxigénio (mg/l).
- DS - Decantador secundário.
- F_o - Massa de substrato afluente ao TA em um dado período (kg/dia).
- F/M - Relação alimento-microrganismos.
- H - Altura do lençol de lodo (genérica) (cm).
- H_c - Altura que o lodo ocuparia na proveta se se apresentasse homogeneamente na concentração C_c (cm).
- H_0 - Altura inicial da suspensão no teste de decantação (cm).
- H_u - Altura que o lodo ocuparia na proveta se se apresentasse homogeneamente na concentração C_u (cm).
- k - Constante.
- K - Constante.
- L - Taxa de aplicação superficial que leva em conta o transporte de sólidos (m/h).
- $L_{\text{máx}}$ - L máximo de um dado sistema (m/h).
- L_{min} - L mínimo de um dado sistema (m/h).
- LA - Lodos ativados,
- M - Massa de SS contida no TA (kg).

- m - Massa de SS transportada por uma dada vazão em um certo intervalo (kg/h).
- Q - Vazão de esgoto afluyente ao sistema (m^3/h).
- Q_0 - Vazão afluyente ao DS (m^3/h); $Q_0 = Q + Q_u$.
- Q_u - Vazão recirculada do fundo do DS ao TA (m^3/h).
- R - Relação de recirculação.
- r_{max} - r máximo de um dado sistema.
- r_{min} - r mínimo de um dado sistema.
- S - Fluxo de sólidos (genérico) ($kg/m^2 \times dia$).
- S_d - Fluxo de solidos devido à decantação da camada de lodo ($kg/m^2 \cdot dia$).
- S_t - Fluxo de sólidos total ($kg/m^2 \times dia$).
- S_{tmin} - S_t mínimo de um dado sistema ($kg/m^2 \times dia$).
- S_u - Fluxo de sólidos devido à remoção do lodo pelo fundo do DS ($kg/m^2 \times dia$).
- SS - Sólidos em suspensão.
- SSTA - Sólidos em suspensão no tanque de aeração.
- SSV - Sólidos em suspensão voláteis.
- t - Intervalo de tempo (min.).
- t_u - Tempo que o lodo leva para se adensar até a concentração C_u (min.)
- U - Velocidade de descida de uma dada camada do lençol de lodo do DS causada pela remoção do lodo pelo fundo (m/h).
- V - Volume do TA (m^3).
- v - Velocidade de decantação de uma camada de lodo (genérica) (m/h).
- v_c - Velocidade de decantação da camada de concentração C_c (m/h).
- v_i - Velocidade de decantação da camada de concentração C_i (m/h).
- v_0 - Velocidade de decantação da partícula individual (flocos de LA) (m/h)
- v_s - Velocidade inicial de decantação (velocidade de decantação da camada de concentração C_0) (m/h).

10. **BIBLIOGRAFIA**

- 1 Rich, L., Unit Operations of Sanitary Engineering, Wiley, New York.,1961.
- 2 Metcalf S Eddy Inc., Wastewater Engineering, McGraw-Hill, New York,1972,
- 3 - Dick, R.I., "Role of Activated Sludge Final Settling Tanks", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 96, n° SA 2, Abr. 1970, pp. 423-436.
- 4 - Kinch, G.J., "A Theory of Sedimentation", Transactions, Faraday Society, Vol. 48, 1952, pp. 166-176.
- 5 - Culp, R.L & Culp, G.L., Advanced Wastewater Treatment, Van Nostrand Reinhold, New York, 1971.
- 6 - Talmadge, W.P. & Fitch, E.B., "Determining Thickener Unit Areas", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 47, 1955, pp. 38-41.
- 7 - Dick, R.I. & Ewing, B.B., "Evaluation of Activated Sludge Thickening Theories", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 93, n° SA 4, Ag. 1967, pp. 9-29.
- 8 - Vesilind, P.A., Discussão de "Evaluation of Activated Sludge Thickening Theories", de Dick, R.I. & Ewing, B.B., Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 94, n° SA 1, Fev. 1968, pp. 185-190.
- 9 - Krone, R.B., Discussão de "Evaluation of Activated Sludge Thickening Theories", de Dick, R.I. & Ewing, B.B., Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 94, n° SA 3, Jun. 1968, pp. 554-558.
- 10 - Duncan, J.W.K S Kawata, K., Discussão de "Evaluation of Activated Sludge Thickening Theories", de Dick, R.I. & Ewing, B.B., Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 94, n° SA 2, Abr. 1968, pp. 431-433.
- 11 - Magara, Y., Nambu, S. & Utosawa, K., "Biochemical and Physical Properties of an Activated Sludge on Settling Characteristics", Water Research, Vol. 10, n° 1, Jan. 1976, pp. 71~77.

- 12 - Steiner, A.E., McLaren, D.A. & Forster, C.F., "The Nature of Activated Sludge Flocs", Water Research, Vol. 10, nº 1, Jan. 1976, pp. 25-30.
- 13 - Gondim, J.C.C., "Valos de Oxidação Aplicados a Esgotos Domésticos", Trabalho apresentado à Faculdade de Saúde Pública da USP para obtenção de título de Mestre em Saúde Pública, São Paulo, 1976.
- 14 - Ford, D.L., & Eckenfelder, W.W., "Effect of Process Variables on Formation and Settling Characteristics of Sludge Flocs", Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 39 nº 11, Nov. 1967, pp. 1.850-1.859.
- 15 - Marais, G.R., & Ekama, G.A., The Activated Sludge Process - Part I; Steady State Behavior, Relatório de pesquisa W.W. 12, University of Cape Town, 1975.
- 16 - Da-Rin, B.P., & Nascimento, G.P.L., "Método de Dimensionamento de Valos de Oxidação para Tratamento de Esgotos Domésticos", Apresentado no 8º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, 1975.
- 17 - Barnard, J.L., "Biological Nutrient Removal Without the Addition of Chemicals", Water Research, Vol. 9, nº 5/6, Mai/Jun. 1975, pp. 485-490.
- 18 - Reed, S.C., & Murphy, R.S., "Low Temperature Activated Sludge Settling", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 95, nº SA 4, Ag. 1969, pp- 747-767.
- 19 - US Environmental Protection Agency, Publ. nº 625/1-75-003a, Process Design Manual for Suspended Solids Removal, 1975.
- 20 - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, New York, 1965.
- 21 - Dick, R.I., Discussão de "Low Temperature Activated Sludge Settling", de Reed, S.C., & Murphy, R.S., Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 96, nº SA 2, Abr. 1970, pp. 638-641.
- 22 - Fischerstrom, C.M.H., Isgard, E. & Larsen, I., "Settling of Activated Sludge in Horizontal Tanks", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 93, nº SA 3, pp. 73-83.

- 23 - Kos, P. & Pardus, I., Discussão de "Low Temperature Activated Sludge Settling", de Reed, S.C. & Murphy, R.S., Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 96, no SA 2, Abr. 1970, pp. 642-646.
- 24 - Eckenfelder, W.W., & Ford, D.L., Water Pollution Control, Pemberton Press, New York, 1970.
- 25 - Eckenfelder, W.W., Industrial Water Pollution Control, McGraw Hill, New York, 1966.
- 26 - Eckenfelder, W.W., Water Quality Engineering, Barnes & Noble, New York, 1970.
- 27 - Sparr, A.E. & Grippi, V., "Gravity Thickeners of Activated Sludge", Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 41, nº 22, Part 1, Nov. 1969, pp- 1.886-1.904.

ANEXO

A TÉCNICA UTILIZADA NOS TESTES DE DECANTAÇÃO

A maior parte dos sólidos que constituem o lodo ativado são formados biologicamente no tanque de aeração. Suas características dependem da biocinética do sistema. Cada sistema produz lodo de características particulares que, mesmo em um dado sistema, podem variar ao longo do tempo se variarem as condições de operação (18).

O método em geral utilizado para a determinação dessas características é o teste de decantação em cilindro graduado, no qual se registra o deslocamento da interface formada entre as partículas em suspensão e o líquido clarificado (1) (2) (3) (4) (6) (8) (10) (19) (20). O teste, entretanto, sofre influências diversas tais como tipo, diâmetro e altura do recipiente utilizado, concentração inicial, grau de agitação da suspensão, temperatura, método pelo qual se obtém a homogeneização inicial, etc.

Neste anexo se apresentará a metodologia utilizada para os testes efetuados após uma breve discussão sobre os diversos fatores que poderiam influenciar os resultados.

O teste consiste, basicamente, em introduzir a suspensão em um cilindro vertical graduado e observar o deslocamento para baixo da interface após a homogeneização inicial. As alturas H da interface são correlacionadas com o tempo t e geram, em um gráfico $H \times t$, a curva de decantação. A concentração inicial é medida pela técnica usual (20).

Concentrações iniciais: Em baixas concentrações a identificação da interface somente se torna possível após o decurso de um certo período. Reed et. al. (18), utilizando lodo biológico de aeração prolongada, somente consideraram a sedimentação zonal para concentrações acima de 2.000 mg/l, valor este que coincide com o mencionado por Dick (21). Neste trabalho, conseguiu-se observar a interface a partir da concentração inicial de 1.800 mg/l.

Quando a concentração inicial é muito elevada, o movimento da interface não é uniforme nos primeiros minutos de descida, mas uniformemente acelerado. Fischerstrom et. al. (22), consideram o

fenômeno como característico da suspensão, visto que não foi observado com suspensões de partículas de PVC de mesma concentração, e o denominaram de "tempo de aglomeração". O mesmo fenômeno foi observado por Reed et. al. (18). Dick e Ewing (7) afirmaram que ele é característico do lodo ativado e o atribuem ao suporte que as camadas superiores recebem das que estão situadas abaixo. Denominaram-no de "fator de retardo" e concluíram que varia exponencialmente com a concentração inicial. Kos e Pardus (23) atribuem o fenômeno à fase de formação de equilíbrio entre o tamanho dos flocos e as forças hidrodinâmicas e sugerem que a velocidade inicial de decantação v_s seja obtida apenas pela inclinação do segmento retilíneo inicial da curva de decantação, quando a velocidade de descida da interface seja uniforme por um período de no mínimo três a cinco minutos.

Este procedimento foi obedecido neste trabalho, o que explica o fato de, em alguns casos, a reta ajustada ao trecho retilíneo inicial cortar o eixo das alturas acima da altura inicial H_0 .

Temperatura: a literatura técnica em geral recomenda que as determinações da velocidade v_s sejam feitas nas temperaturas mais baixas a serem encontradas na operação real, por considerarem que a velocidade inicial da decantação zonal varia inversamente com a viscosidade cinemática, que é função direta da temperatura. Temperaturas baixas forneceriam valores mais baixos para v_s e, portanto, mais seguros.

Fischerstrom et. al. (22) realizaram testes a temperaturas de 15°C, e posteriormente os repetiram a temperaturas inferiores, confirmando o afirmado acima.

Isto, entretanto, apenas é válido quando se considera a clarificação do efluente, perdendo em substância quando se deseja considerar o adensamento do lodo.

Reed et. al. (18) conduziram estudos especificamente voltados para a avaliação da influência da temperatura na decantação do lodo ativado, concluindo:

- a influência da temperatura diminui com o aumento da concentração, sendo desprezível a elevadas concentrações;
- o adensamento do lodo não depende da temperatura.

Dick (21), comentando o trabalho de Reed, justifica o fato afirmando que a viscosidade apenas é responsável pela redução de v_s na fase inicial da sedimentação, quando há o predomínio da influência do atrito viscoso. Na fase de adensamento, quando predominam as ações das forças inter-particulares, a influência da temperatura é desprezível.

Como o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do adensamento do lodo no processo de decantação dos lodos ativados, não foram tomados cuidados especiais para homogeneizar as temperaturas. As observações foram realizadas em uma faixa de temperaturas de 27°C a 35°C, com um valor médio de 28,9°C.

Homogeneização inicial: Dick e Ewing (7) mencionam que os métodos usuais da homogeneização inicial da suspensão, como agitação ou aeração por bolhas de ar, interferem no teste, sugerindo que o mesmo seja feito por meio de bombeamento contínuo da suspensão previamente homogeneizada, pelo fundo do cilindro de testes. Outros autores, entre os quais Eckenfelder (25), consideram adequada a homogeneização obtida por agitação suave. As observações conduzidas pelos autores utilizaram suspensões homogeneizadas por agitação no vasilhame de coleta e, após serem vertidas no cilindro de teste, suavemente agitadas com bastão de vidro.

Agitação: Alguns autores recomendam que as observações sejam efetuadas enquanto a suspensão é lentamente revolvida por varetas verticais. Entretanto a finalidade e os efeitos dessa agitação não são objeto de concordância. Dick e Ewing (7) a aconselham com a finalidade de romper a estrutura formada pelo lodo que vai se depositando no fundo do cilindro de teste. Eckenfelder (24) (25) (26) atribui a ela a função de simular a ação física dos raspadores de fundo das unidades em escala real e recomenda uma velocidade de agitação de 4 a 5 RPH, enquanto Dick (3) discorda dessa afirmativa e atribui à agitação a finalidade de minimizar o “efeito de parede”, sugerindo uma velocidade de agitação da ordem de 60 RPH. Vesilind (8) afirma que a agitação pode influir na determinação de v_s , porém a falta de padronização quanto à velocidade de agitação e forma do mecanismo torna difícil a comparação de resultados. Nos testes que realizou não utilizou agitação. Sparr e Grippi (27) relatam casos em que o dispositivo de agitação foi removido de espessadores de lodo em operação sem que fossem observadas mudanças no grau de espessamento obtido. Reed et. al. (18) afirmam que as v_s obtidas por meio de teste sem agitação eram cerca de 20% inferiores às obtidas com o mesmo lodo em decantadores em escala real. Rich (1) e Metcalf & Eddy (2) descrevem o teste e não mencionam a

necessidade de agitação. Finalmente, Talmadge e Fitch (6), os introdutores do método de observação utilizado, não mencionam igualmente essa necessidade.

Em resumo, embora a literatura técnica seja extremamente controversa no que diz respeito à necessidade, causas e efeitos da agitação, há uma concordância geral quanto ao fato de que ela fornece valores de v_s inferiores aos obtidos em repouso.

Considerando-se que a agitação introduz uma notável complicação na execução dos testes, procurando obter resultados com maior reprodutibilidade e, principalmente, desejando obter resultados do lado da segurança (como aliás comprova a aplicação da sistemática na análise do comportamento da ETIG), os autores decidiram realizar o teste sem agitação.

Diâmetro e altura do cilindro de teste: Dick e Ewing (7), após examinarem testes efetuados em cilindros de diversas alturas, concluem pela influência da altura do cilindro no resultado do teste e recomendam que tais testes sejam realizados em cilindros de mesma altura que a profundidade do decantador em escala real. Vesilind (8) realiza testes em cilindros de diversos diâmetros e conclui que a influência do diâmetro do cilindro varia com a concentração inicial e com o diâmetro do cilindro podendo, no máximo, fornecer valores variando de 80 a 130% daqueles obtidos num cilindro de 36" de diâmetro, tendo entretanto um efeito desprezível na faixa de concentrações de 5.000 a 6.000 mg/l.

Apesar disso, a imensa maioria dos autores, inclusive os principais livros-textos do assunto, recomenda que o teste seja realizado nas provetas graduadas de 1 l, procedimento que, dada a sua simplicidade e visando padronização e reprodutibilidade dos resultados, foi adotado neste trabalho.

TABELA 1

| E T I G | | | | | |
|---------|-------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| Data | Local | C_o mg/l | v_s m/h | C_c mg/l | v_c m/h |
| 08/03 | TA 1 | 3.336 | 0,1788 | 4.390 | 0,0774 |
| 28/03 | TA 1 | 2.784 | 0,6514 | 3.894 | 0,1739 |
| 30/03 | TA 1 | 4.040 | 0,3311 | 5.082 | 0,1449 |
| 07/03 | TA 2 | 2.648 | 2,0676 | 5.092 | 0,2348 |
| 08/03 | TA 2 | 2.864 | 0,7728 | 3.580 | 0,231 |
| 23/03 | TA 2 | 2.488 | 0,8446 | 3.554 | 0,1641 |
| 28/03 | TA 2 | 2.300 | 1,2862 | 3.407 | 0,2898 |
| 09/03 | LA | 7.560 | 0,0366 | 7.636 | 0,0199 |
| 15/03 | LA | 10.136 | 0,0126 | - | - |
| 25/03 | LA | 6.032 | 0,0445 | 6.124 | 0,0194 |

TA = Tanque de Aeração.

LA = Retorno de Lodo Ativado.

TABELA 1

| E T C A | | | | | |
|---------|-------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| Data | Local | C_o mg/l | v_s m/h | C_c mg/l | v_c m/h |
| 01/03 | CR | 3.288 | 0,3527 | 4.413 | 0,1443 |
| 07/03 | CR | 2.380 | 1,1322 | 3.748 | 0,2443 |
| 09/03 | CR | 3.316 | 0,1210 | - | - |
| 17/03 | CR | 3.124 | 0,1278 | - | - |
| 23/03 | CR | 3.308 | 0,1332 | - | - |
| 31/03 | CR | 2.208 | 2,4642 | 4.698 | 0,2219 |
| 01/03 | CC | 3.216 | 0,3552 | 4.097 | 0,1554 |
| 03/03 | CC | 2.104 | 0,7408 | 2.882 | 0,2220 |
| 09/03 | CC | 2.788 | 0,1452 | - | - |
| 17/03 | CC | 2.940 | 0,2784 | 3.722 | 0,1080 |
| 23/03 | CC | 2.664 | 0,4086 | 3.422 | 0,1546 |
| 31/03 | CC | 1.800 | 2,6640 | 4.090 | 0,2220 |

CC = Câmara de Contato.

CR = Câmara de Reaeração.

TABELA 1

| E T V K | | | | | |
|---------|----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| Data | Local | C_o mg/l | v_s m/h | C_c mg/l | v_c m/h |
| 10/02 | V ₂ | 3.056 | 1,5072 | 4.775 | 0,2705 |
| 14/02 | V ₁ | 8.392 | 0,1014 | - | - |
| 15/02 | V ₁ | 6.092 | 0,1920 | 7.711 | 0,0966 |
| 16/02 | V ₁ | 5.656 | 0,1218 | 6.814 | 0,0676 |
| 17/02 | V ₁ | 5.076 | 0,3150 | 7.200 | 0,1063 |
| 24/02 | V ₁ | 9.164 | 0,030 | - | - |
| 29/02 | V ₁ | 7.296 | 0,0456 | - | - |
| 01/03 | V ₁ | 7.312 | 0,0534 | - | - |
| 02/03 | V ₁ | 6.760 | 0,0468 | - | - |
| 07/03 | V ₁ | 8.480 | 0,0474 | 9.070 | 0,0386 |
| 08/03 | V ₁ | 7.808 | 0,0486 | - | - |
| 10/03 | V ₁ | 4.192 | 0,1152 | 5.374 | 0,0541 |
| 21/03 | V ₁ | 3.596 | 0,6942 | 5.327 | 0,1738 |
| 24/03 | V ₁ | 3.472 | 0,3478 | 4.037 | 0,1448 |
| 14/02 | V ₂ | 6.012 | 0,4248 | 8.909 | 0,0901 |
| 15/02 | V ₂ | 8.104 | 0,1008 | 9.594 | 0,0676 |
| 17/02 | V ₂ | 7.728 | 0,0996 | - | - |
| 24/02 | V ₂ | 6.612 | 0,0564 | - | - |
| 28/02 | V ₂ | 7.664 | 0,0426 | - | - |
| 01/03 | V ₂ | 8.460 | 0,0372 | - | - |
| 02/03 | V ₂ | 9.252 | 0,0240 | - | - |
| 03/03 | V ₂ | 8.536 | 0,0354 | - | - |
| 07/03 | V ₂ | 6.488 | 0,1410 | 7.633 | 0,0773 |
| 08/03 | V ₂ | 7.156 | 0,0852 | - | - |
| 09/03 | V ₂ | 7.660 | 0,0768 | 8.569 | 0,0504 |
| 10/03 | V ₂ | 7.400 | 0,0984 | 9.250 | 0,0483 |
| 21/03 | V ₂ | 3.648 | 0,1896 | 4.395 | 0,0966 |
| 22/03 | V ₂ | 3.572 | 0,3840 | 4.961 | 0,1029 |
| 24/03 | V ₂ | 5.544 | 0,0542 | - | - |
| 28/03 | V ₂ | 4.747 | 0,0799 | 5.023 | 0,0580 |

V = Valor de Oxidação.

TABELA 2

| ETIG | | ETCA | | ETVK | |
|---------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|
| C_u mg/l | S_t kg/m ² x h | C_u mg/l | S_t Kg/m ² x h | C_u mg/l | S_t Kg/m ² x h |
| 4.000 | 7,920 | 2.750 | 11,170 | 4.000 | 6,600 |
| 4.250 | 6,945 | 3.000 | 8,300 | 4.250 | 5,900 |
| 4.500 | 6,000 | 3.250 | 6,460 | 4.500 | 5,500 |
| 4.750 | 5,340 | 3.500 | 5,070 | 4.750 | 4,950 |
| 5.000 | 4,730 | 3.750 | 3,795 | 5.000 | 4,670 |
| 5.250 | 4,275 | 4.000 | 3,055 | 5.250 | 4,330 |
| 5.500 | 3,815 | 4.250 | 2,425 | 5.500 | 4,060 |
| 6.000 | 3,109 | 4.500 | 1,960 | 5.750 | 3,780 |
| 6.500 | 2,585 | 4.750 | 1,615 | 6.000 | 3,550 |
| 7.000 | 2,167 | 5.000 | 1,355 | 6.250 | 3,345 |
| 8.000 | 1,605 | 5.250 | 1,115 | 6.500 | 3,160 |
| 9.000 | 1,220 | 5.500 | 0,945 | 6.750 | 2,990 |
| 10.000 | 0,958 | 5.750 | 0,794 | 7.000 | 2,835 |
| 11.000 | 0,771 | 6.000 | 0,700 | 7.500 | 2,545 |
| 12.000 | 0,618 | 6.500 | 0,500 | 8.000 | 2,350 |
| 13.000 | 0,535 | 7.000 | 0,390 | 8.500 | 2,123 |
| 14.000 | 0,450 | 8.000 | 0,230 | 9.000 | 1,965 |
| | | 9.000 | 0,145 | 10.000 | 1,665 |
| | | | | 11.000 | 1,452 |
| | | | | 12.000 | 1,278 |
| | | | | 13.000 | 1,130 |
| | | | | 14.000 | 1,010 |
| | | | | 16.000 | 0,8360 |
| | | | | 18.000 | 0,720 |

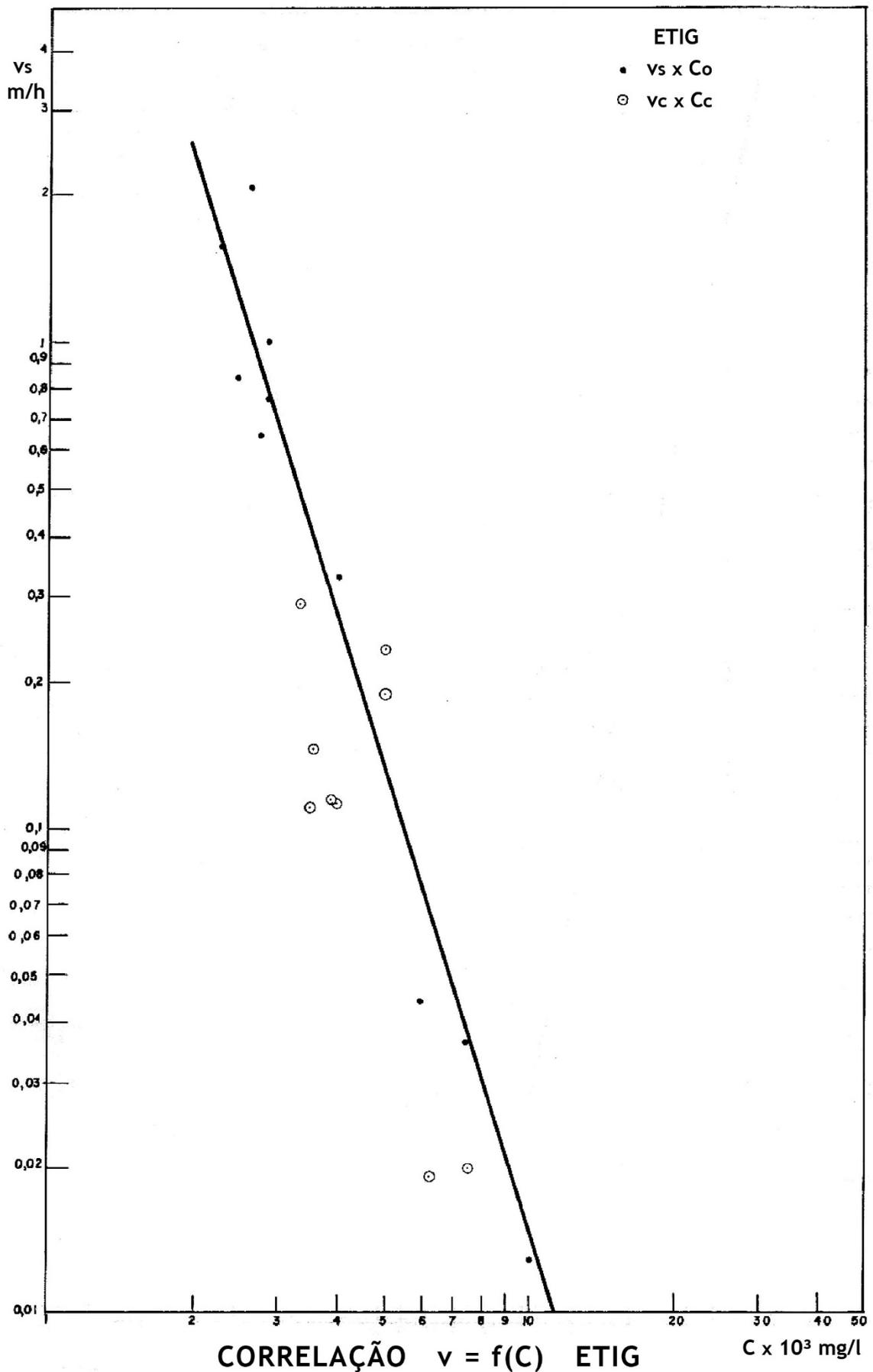


Fig. 6

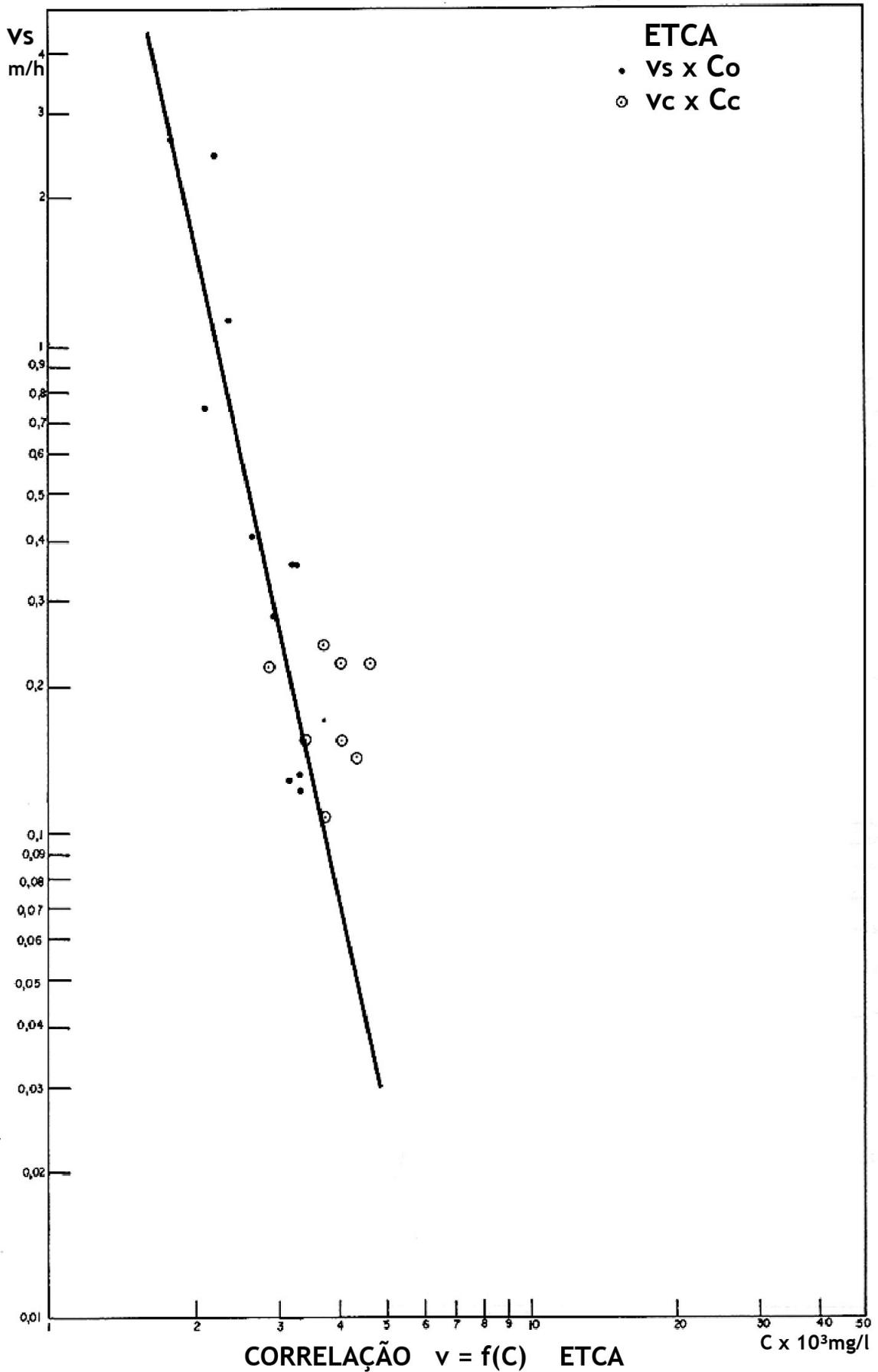


Fig. 7

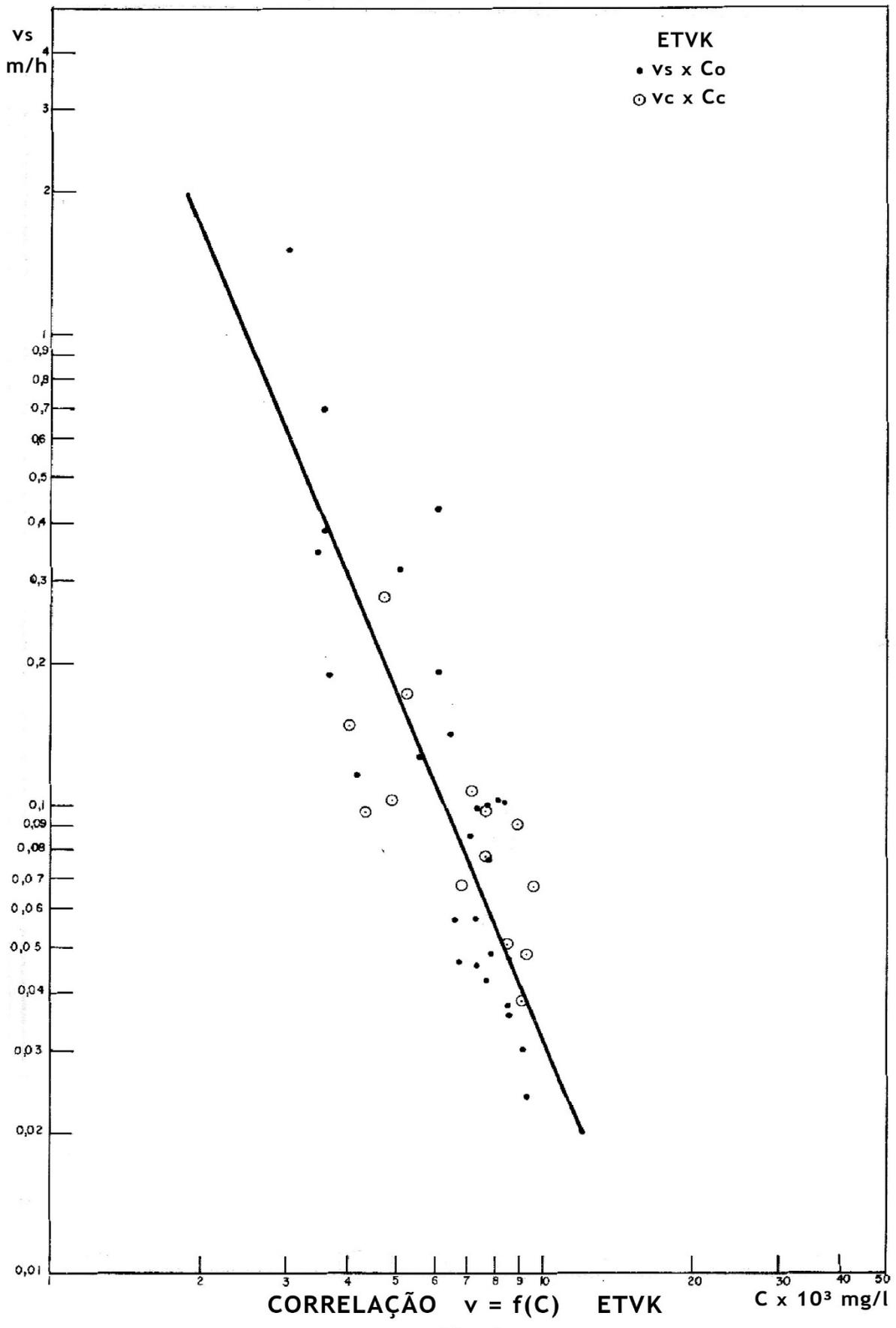
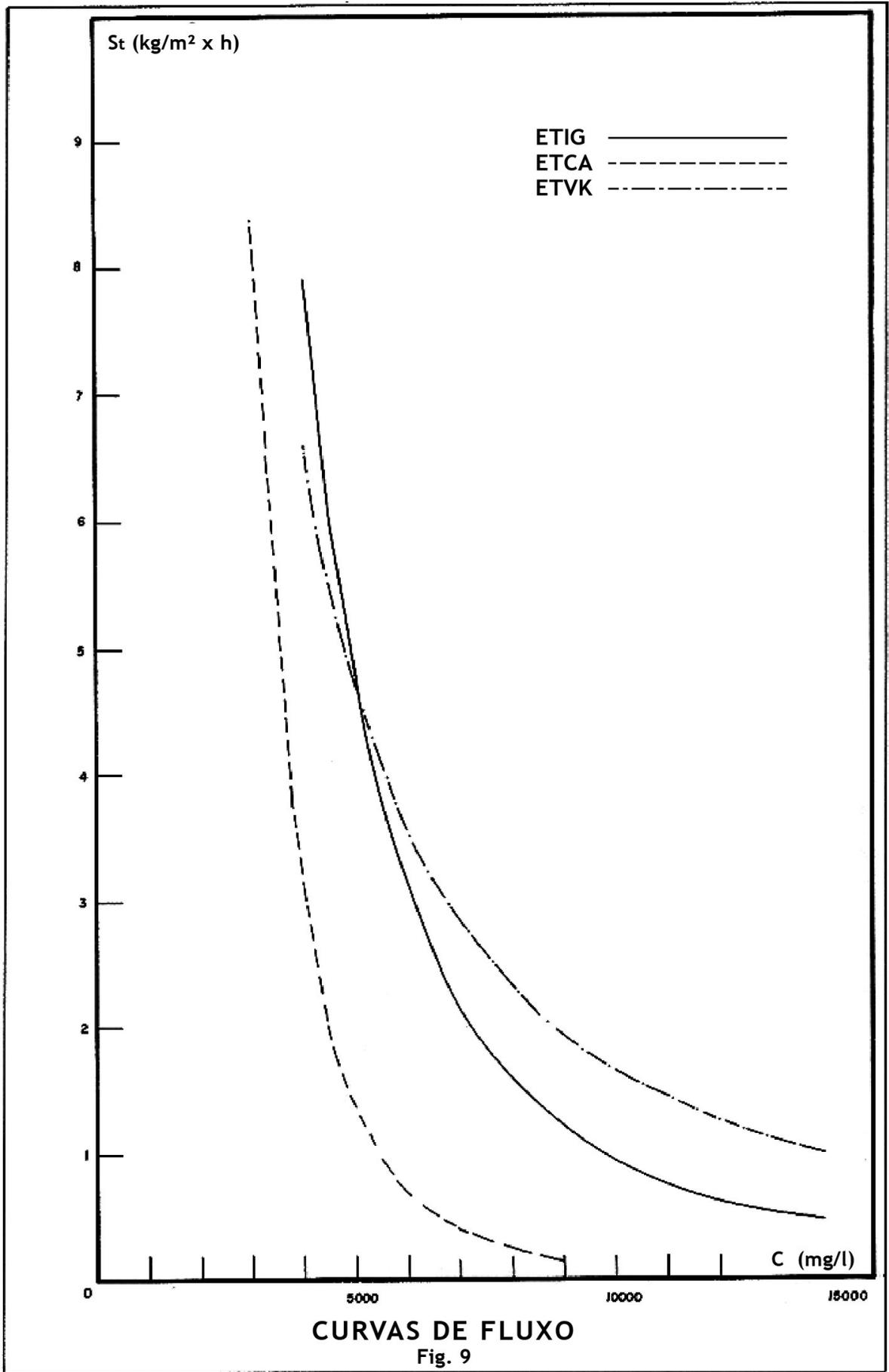
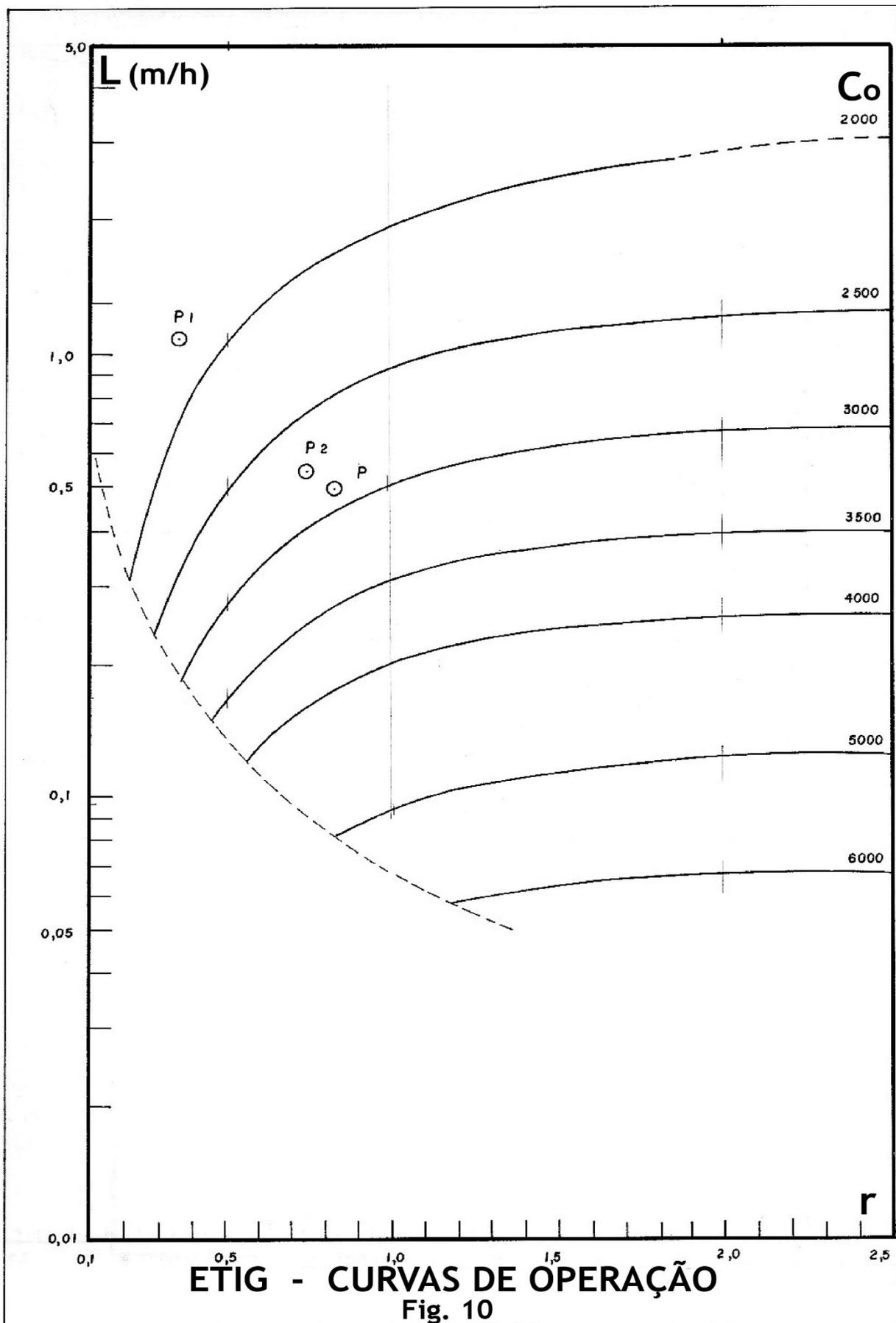
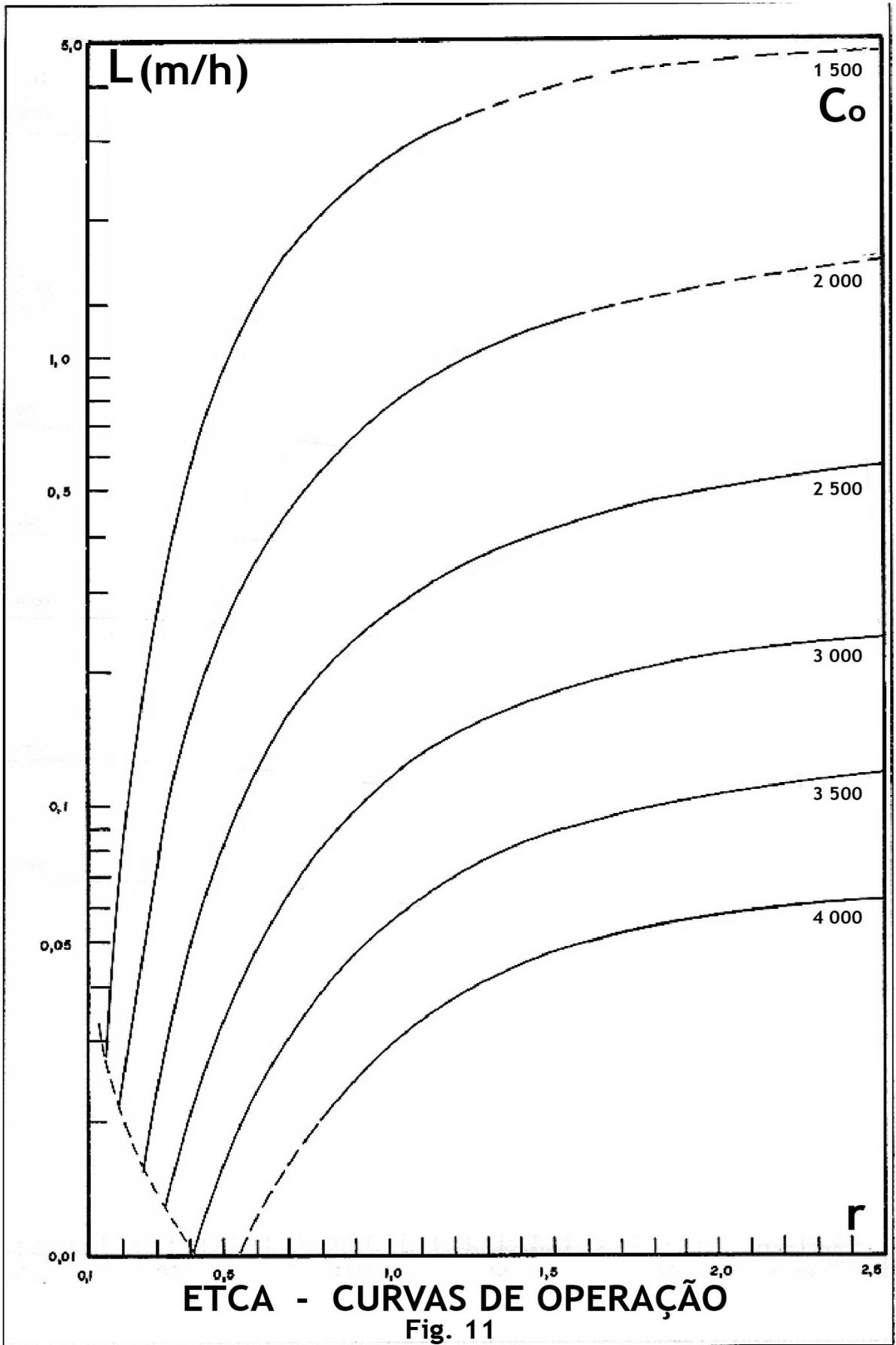
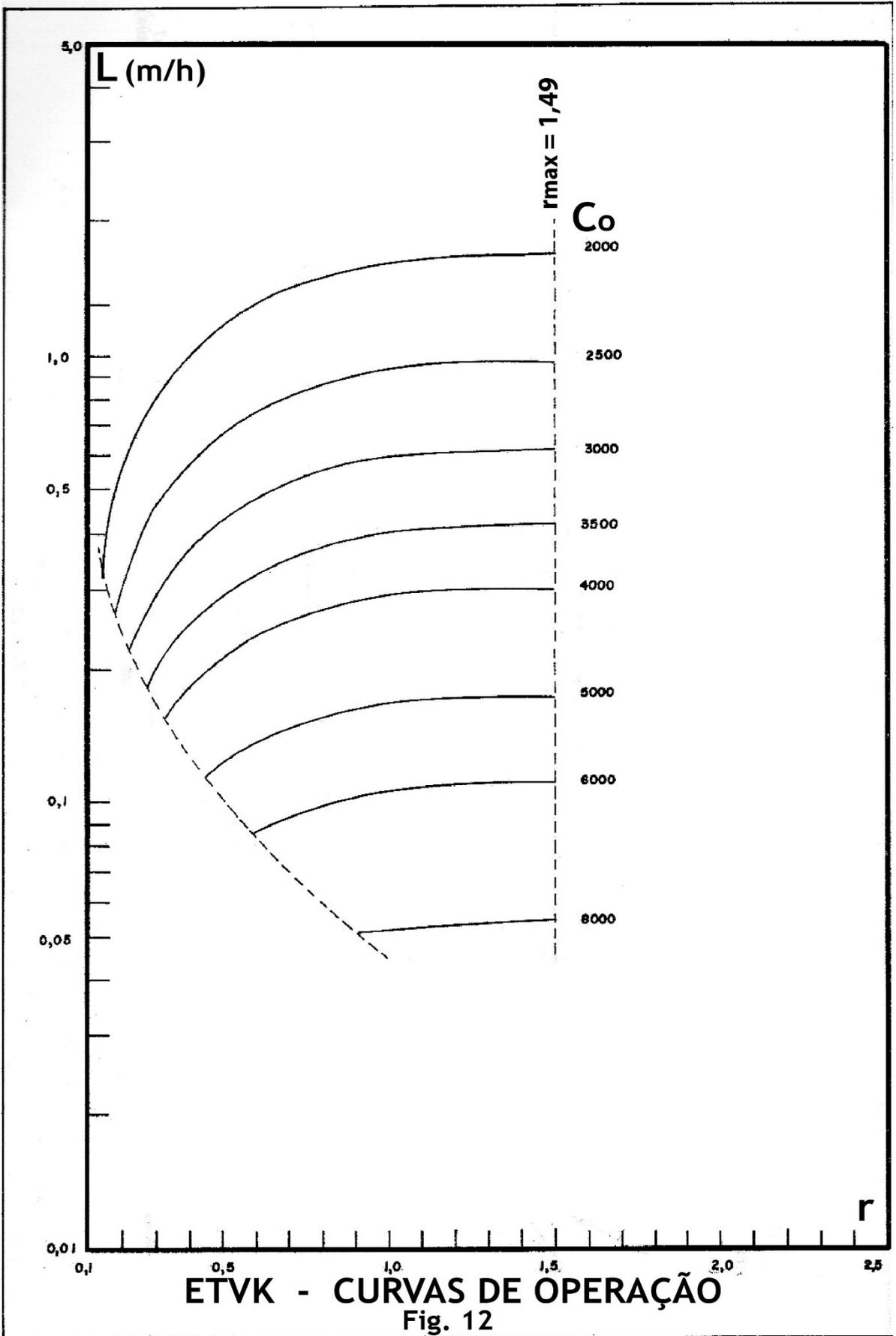


Fig. 8









30/03/1977
ETIG - TA 1
Co = 4040 mg/l

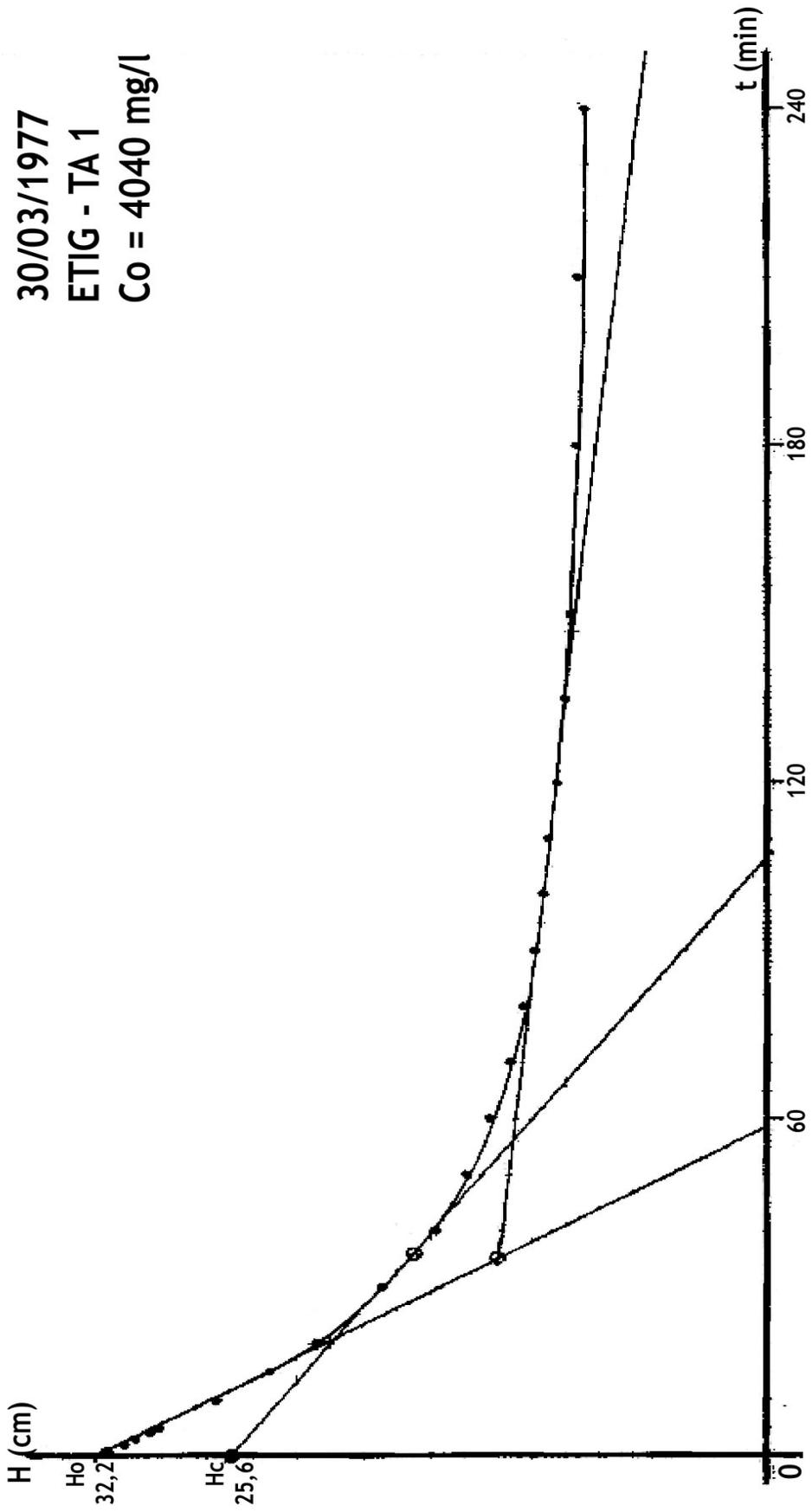


Fig. 13

01/03/1977
ETCA - CC
Co = 3216 mg/l

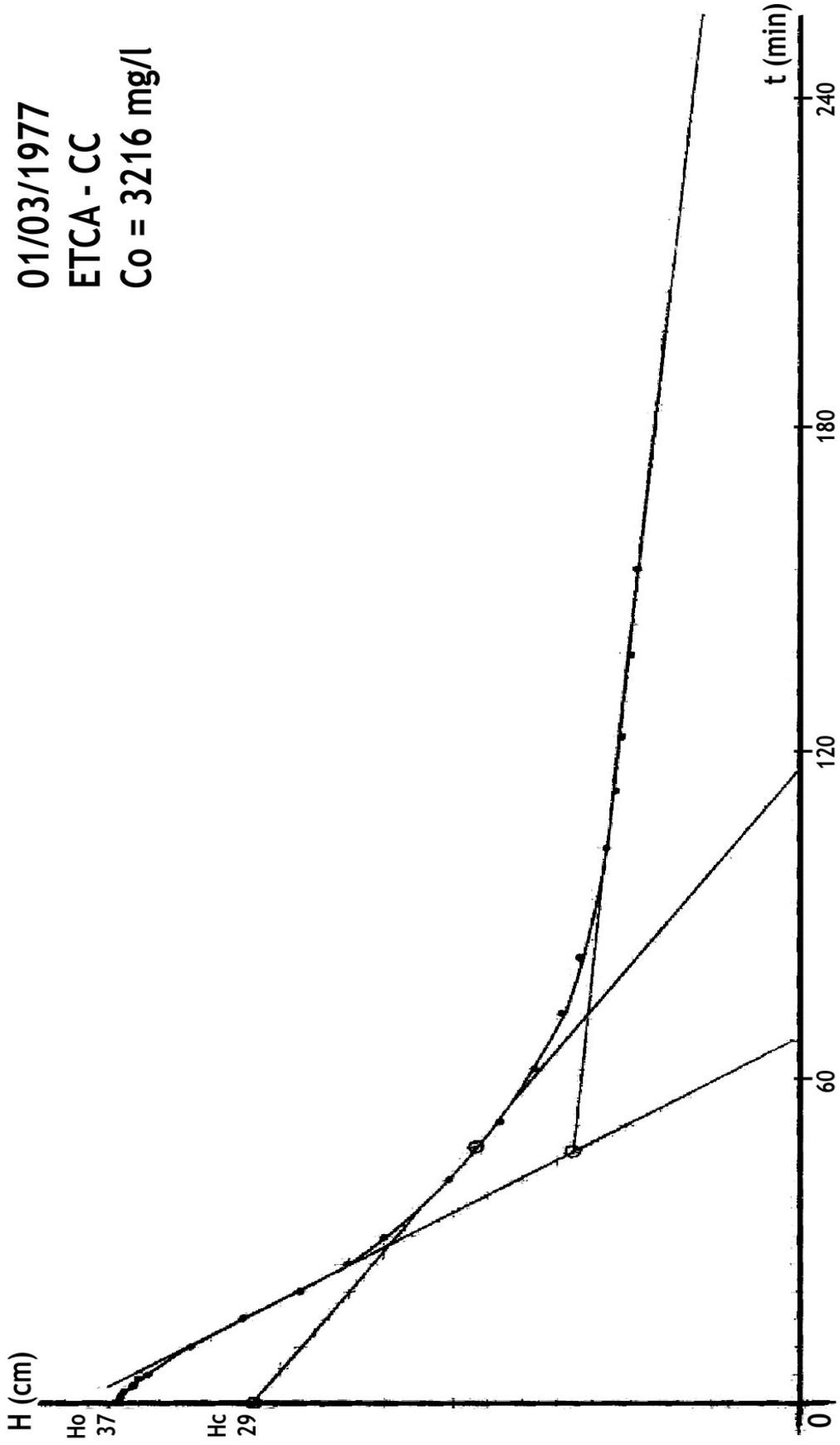


Fig. 14

21/03/1977
ETVK - V 1
Co = 3596 mg/l

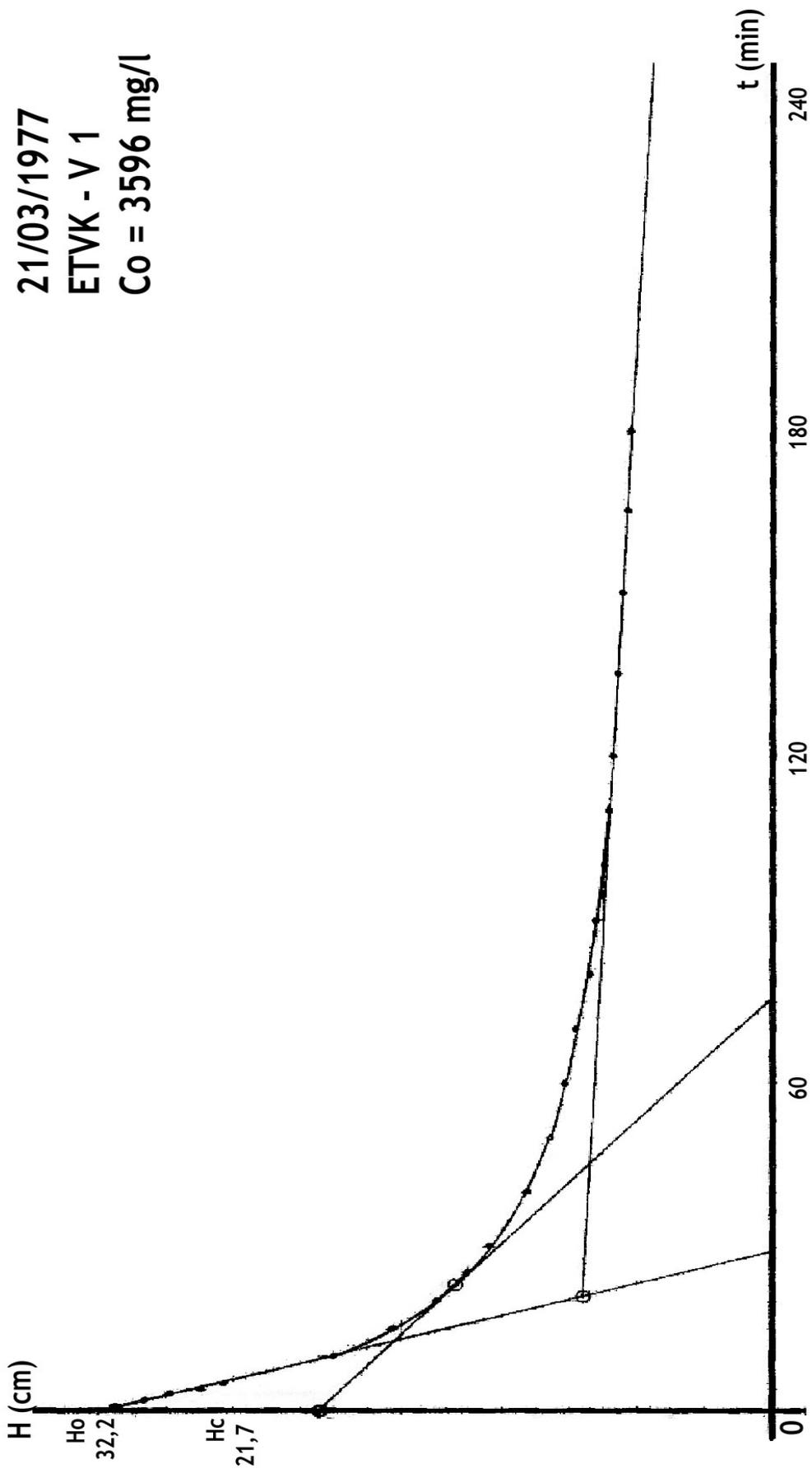


Fig. 15