

Dispositivos de entrada e saída dos decantadores

ENG.º CARLOS ALFREDO RICHTER
GERENTE DE PESQUISA/SANEPAR

1. INTRODUÇÃO

Posta em prática há pouco mais de uma década, a decantação em fluxo laminar trouxe uma grande expectativa não somente em termos de resultados econômicos na construção dos decantadores, mas também na eficiência esperada na clarificação da água.

No Brasil, os primeiros dispositivos de decantação laminar utilizados foram módulos tubulares na estação de Barra Mansa (RJ) e bandejas de madeira na estação de Itajaí (SC) com a finalidade de aumentar suas capacidades. Na SANEPAR, o primeiro projeto data de 1972, para a estação de tratamento da cidade de Araucária, concluída e posta em operação em 1973. Desde então, não só no Brasil, mas em toda a América Latina, foram utilizados decantadores laminares em diversos projetos, de um modo geral com resultados satisfatórios. Alguns projetos, entretanto, apresentaram resultados bastante inferiores ao esperado, e, por este motivo, desencorajando a muitos a realização de novos projetos com esta técnica.

De um modo geral, os projetos que falharam o foram por deficiências nos sistemas de entrada e/ou saída e apresentam características de projeto semelhantes aos dos projetos convencionais, apesar de que um dos primeiros projetos elaborados com esta nova tecnologia

(*) apresenta um sistema adequado de entrada de água floculada aos decantadores, sob os módulos tubulares, exemplo que só recentemente e por poucas entidades vem sendo imitado e aperfeiçoado (**).

Este trabalho tem por finalidade apresentar e discutir aspectos pouco tratados na literatura técnica, visando proporcionar elementos à realização de projetos adequados dos sistemas de entrada e saída dos decantadores, evitando ou corrigindo tais deficiências, relacionadas com uma imperfeita distribuição de fluxo.

2. DISPOSITIVOS DE ENTRADA

A entrada de água nos decantadores é geralmente feita através de canais ou canalizações com passagens ou comportas laterais, distribuindo o fluxo no interior de uma dada unidade ou entre diversas unidades paralelas.

Em uma estação de tratamento, os canais com laterais são usados também em alguns tipos de dispositivos de re-

moção de lodo de decantadores, fundos falsos com distribuidores para água de lavagem nos filtros, difusores de produtos químicos, etc.

Como consequência do não dimensionamento ou do dimensionamento imperfeito desses dispositivos de equalização de fluxo, tem surgido uma série de problemas na operação das estações de tratamento, tais como curtos circuitos e/ou sobrecarga nos decantadores, lavagem imperfeita dos filtros, mistura não homogênea de produtos químicos à água, etc.

2.1. HIDRÁULICA DOS CANAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO

A vazão em um orifício lateral é dada pela equação geral

$$q_o = C_D A \sqrt{2g(\Delta E)} \quad (1)$$

na qual q_o = vazão que passa pelo lateral; C_D = coeficiente de descarga; A = área do lateral; e ΔE = dissipação de energia através do orifício. De um modo geral, o valor de C_D depende não somente das características geométricas do orifício, mas também da relação entre a carga de velocidade no canal de distribuição e a energia total $E = V^2/2g + h + z$. Conclui-se que a distribuição de fluxo é função da perda de carga e da variação de velocidade ao longo do canal, das

(*) Projeto da Estação de Tratamento de Água de Botucatu (SP) - 1972.

(**) São exemplos diversos projetos da SANEPAR bem sucedidos: Foz do Iguaçu, Ivaiporã, Cascável, Araçongas, etc e o projeto conhecido por SANEPAR-CEPIS, utilizado em dezenas de cidades.

características geométricas do canal e da perda de carga nos orifícios, conseqüentemente de sua forma, número e dimensões.

Em cada canal ou canalização de secção constante e com orifícios igualmente espaçados e de mesmas dimensões, a distribuição de vazão pode tomar diversas configurações, segundo a ação daquelas variáveis. Na figura 1, apresentam-se duas situações extremas em relação à extensão do canal, com suas configurações típicas de distribuição de fluxo. Em um canal curto, o efeito da perda de carga contínua é desprezível, elevando a linha piezométrica a partir do primeiro orifício e, em conseqüência, resultando uma distribuição de vazão crescente de montante para jusante. Em canais longos a perda de carga contínua torna-se um fator de influência mudando a configuração da distribuição que, inicialmente sendo crescente, passa a decrescer a partir de cerca de um terço de sua extensão, voltando a tomar uma forma crescente na extremidade de jusante.

Os canais de distribuição nas estações de tratamento de água são geralmente curtos e, assim, é válido admitir nula a perda de carga contínua e uma

recuperação integral da carga cinética ao longo do canal.

Considere-se um canal de secção constante com orifícios de iguais dimensões e que o nível de água no tanque ou nos tanques receptores, após o lateral, é o mesmo, embora possa não ser no canal de distribuição.

A figura 2 mostra a situação hidráulica nos laterais e no canal imediatamente antes e depois das comportas ou orifícios de descargas. Através da análise de dados experimentais obtidos por diversos pesquisadores, Hudson (2) encontrou a seguinte expressão

$$\alpha = \frac{h'_f}{V_L^2} = \theta + \phi \left(\frac{V}{V_L} \right)^2 \quad (2)$$

em que θ é o coeficiente de perda de carga na entrada do orifício, $\phi \left(\frac{V}{V_L} \right)^2$ é o coeficiente de perda de carga devida à mudança da direção do fluxo, V é a velocidade no canal imediatamente à jusante do lateral e V_L é a velocidade média no lateral. Para laterais longos, isto é, cujo comprimento é maior que três diâmetros.

$$\theta = 0,4 \text{ e } \phi = 0,9;$$

para laterais curtos, de comprimento menor que três diâmetros,

$$\theta = 0,7 \text{ e } \phi = 1,67$$

Na maior parte das instalações os laterais são curtos. Por exemplo, em um canal de secção constante, contendo 5 comportas, o desvio de descarga entre as comportas 1 e 5 deverá ser inferior a 10% (figura 2). Qual deverá ser a relação de áreas entre as comportas e o canal para satisfazer esta condição?

$$\text{Tome-se } \theta = 0,7 \text{ e } \phi = 1,67$$

Quando a velocidade no canal aproxima-se de zero, o coeficiente da perda de carga na entrada tende à constante $\theta = 0,7$. Este valor ocorre na última comporta à jusante de um canal, no caso a comporta 5. Adicionalmente a esta parcela, há a perda de carga devida à dissipação de energia na saída do lateral igual a $V_L^2/2g$, de modo que a perda de carga total na comporta 5 será:

$$h_o = (1,0 + 0,7) \frac{V_{L5}^2}{2g} = 1,7 \frac{V_{L5}^2}{2g}$$

$$\text{ou } V_{L5} = \frac{1}{\sqrt{1,7}} \cdot \sqrt{2gh_o} = 0,767 \sqrt{2gh_o}$$

A uma variação de descarga de 10% entre as comportas 1 e 5 (de iguais dimensões), corresponde

$$V_{L5} = 1,10 V_{L1}$$

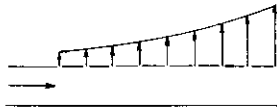
Assim

$$V_{L1} = \frac{V_{L5}}{1,10} = \frac{0,767}{1,10} \sqrt{2gh_o} = 0,697 \sqrt{2gh_o}$$

e portanto, a perda de carga na comporta 1 será

$$h_o = \left(\frac{1}{0,697} \right)^2 \frac{V_{L1}^2}{2g} = 2,057 \frac{V_{L1}^2}{2g} = \frac{V_{L1}^2}{2g} + 1,057 \frac{V_{L1}^2}{2g}$$

a) Canal Curto



b) Canal longo



Fig. 1 – Distribuições Típicas de Fluxo

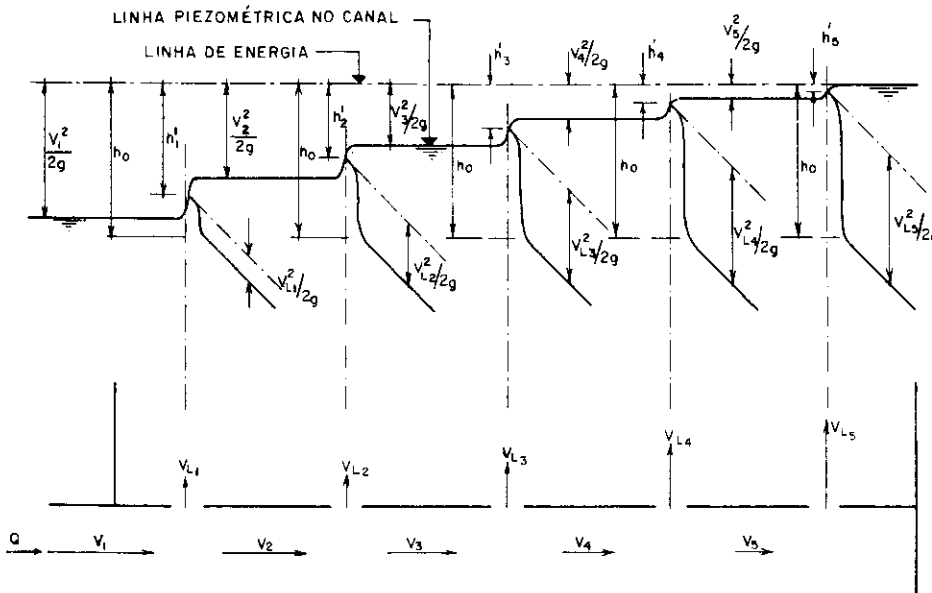


Fig. 2 – Linha Piezométrica em um canal curto com saídas laterais

A primeira parcela corresponde a perda na saída do lateral, enquanto que a segunda parcela representa a perda de carga devida ao desvio do fluxo e entrada na comporta. Assim o coeficiente β definido pela equação (2) vale 1,057, podendo-se escrever

$$1,057 = 0,7 + 1,67 \left(\frac{V_1}{V_{L1}} \right)^2$$

ou
$$\frac{V_1}{V_{L1}} = 0,462$$

Sendo n o número de comportas e A_L a área de cada comporta, deveria ser

$$V_{L1} = \frac{Q}{nA_L}$$

e sendo A a área do canal

$$V_1 = \frac{Q}{A}$$

resulta
$$\frac{V_1}{V_{L1}} = \frac{nA_L}{A} = 0,462$$

significando que a relação entre a área total dos laterais e a área do canal deverá ser igual ou inferior a 0,46 para que o desvio máximo da descarga entre as comportas extremas seja inferior a 10%.

Generalizando, a perda de carga total na comporta é

$$h = \beta \frac{V_L^2}{2g} \quad (3)$$

$$\beta = 1,0 + \theta + \vartheta \left(\frac{V}{V_L} \right)^2 \quad (4)$$

no qual $1,0$ = coeficiente da perda devida à dissipação de energia na saída lateral; θ = coeficiente correspondente à perda na entrada e ϑ refere-se à energia necessária à mudança de direção do fluxo.

A perda de carga no canal sendo desprezível e havendo a recuperação da carga cinética, como o nível de água à saída deve ser o mesmo, as perdas de carga nos diversos laterais deverão ser iguais (fig. 2) isto é,

$$\beta_1 \frac{V_{L1}^2}{2g} = \beta_2 \frac{V_{L2}^2}{2g} = \dots = \beta_i \frac{V_{Li}^2}{2g} \quad (5)$$

Da equação (4) deduz-se que

$$\beta_1 > \beta_2 > \dots > \beta_i$$

em consequência, será

$$V_{L1} < V_{L2} < \dots < V_{Li}$$

demonstrando-se que a distribuição de fluxo apresenta uma configuração crescente de montante para jusante. A equação (4), por outro lado, mostra que uma distribuição uniforme só é possível quando V/V_L é constante ao longo do canal. Isto pode ser obtido reduzindo-se a sua secção imediatamente após cada lateral.

Sendo q_i a vazão que passa por uma lateral, a vazão total que entra no canal é

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

Da equação 5

$$\frac{q_i}{q_1} = \frac{V_{Li}}{V_{L1}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\beta_i}}}{\sqrt{\frac{1}{\beta_1}}} \quad (6)$$

portanto

$$Q = q_1 + q_1 \frac{\sqrt{\frac{1}{\beta_2}}}{\sqrt{\frac{1}{\beta_1}}} + q_1 \frac{\sqrt{\frac{1}{\beta_3}}}{\sqrt{\frac{1}{\beta_1}}} + \dots +$$

$$+ q_1 \frac{\sqrt{\frac{1}{\beta_n}}}{\sqrt{\frac{1}{\beta_1}}}$$

$$q_1 = Q \frac{\sqrt{\frac{1}{\beta_1}}}{\sum \sqrt{\frac{1}{\beta_i}}}$$

ou, para o lateral i

$$q_i = Q \frac{\sqrt{\frac{1}{\beta_i}}}{\sum \sqrt{\frac{1}{\beta_i}}} \quad (07)$$

2.2. DIMENSIONAMENTO DOS CANAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO

A equação (7) pode ser utilizada através de cálculos iterativos para o dimensionamento de canais com dis-

tribuição de fluxo. O número de iterações é indefinido porque a cada iteração β_i com excesso para a comporta da extremidade de jusante, é sempre crescente, não se chegando a uma solução mais que uma certa aproximação.

Este problema pode ser resolvido como no exemplo anterior e admitindo, por exemplo, uma variação linear da vazão entre as diversas comportas (figura 3). Esta é uma aproximação que pode ser feita em diversos casos práticos, facilitando os cálculos.

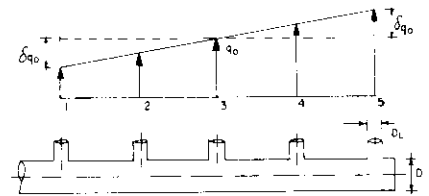


Fig. 3

Sendo

$$q_0 = \frac{Q}{n} \quad (8)$$

onde n é o número de laterais, a vazão na primeira comporta seria

$$q_1 = q_0 - \delta q_0 \quad (9)$$

onde δ é o desvio da descarga entre q_1 e q_0 . Para a última comporta

$$q_n = q_0 + \delta q_0 \quad (10)$$

As velocidades na primeira e última comportas são respectivamente

$$V_{L1} = V_{L0} (1 - \delta)$$

$$V_{Ln} = V_{L0} (1 + \delta)$$

A perda de carga na comporta de jusante é

$$h = (1 + \theta) \frac{V_{Ln}^2}{2g} = (1 + \theta) (1 + \delta)^2 \frac{V_{L0}^2}{2g}$$

Na primeira comporta a perda de carga é

$$h = \left[1 + \theta + \vartheta \left(\frac{V}{V_{L1}} \right)^2 \right] \frac{V_{L1}^2}{2g} =$$

$$= \left\{ 1 + \theta + \vartheta \left[\frac{V}{(1 - \delta) V_{L0}} \right]^2 \right\} \cdot$$

$$\frac{(1 - \delta)^2 V_{L0}^2}{2g}$$

Igualando as expressões anteriores e, como $\frac{V}{V_{Lo}} = \frac{nA_L}{A}$

sendo A_L a área do lateral, n o número de laterais e A a área do canal, vem

$$(1 + \theta)(1 + \delta)^2 = (1 + \theta)(1 - \delta)^2 +$$

$$+ \phi \left(\frac{nA_L}{A} \right)^2$$

$$\frac{nA_L}{A} = 2 \sqrt{\frac{1 + \theta}{\phi}} \delta \quad (11)$$

ou

$$\delta = \frac{\phi}{1 + \theta} \cdot \left(\frac{nA_L}{2A} \right)^2 \quad (12)$$

Para canais com laterais curtos segundo Hudson (2), $\theta = 0,7$ e

$\phi = 1,67$. Assim $\frac{1 + \theta}{\phi} \approx 1$ e as equações acima podem ser simplificadas a

$$\frac{nA_L}{A} = 2 \sqrt{\delta} \quad (13)$$

e

$$\delta = \left(\frac{nA_L}{2A} \right)^2 \quad (14)$$

Exemplo: Uma canalização de 0,40m de diâmetro divide a vazão de 0,500m³/s em cinco laterais curtos de 0,20m de diâmetro (figura 3). O desvio de descarga em relação à vazão média $q = 0,5/5 = 0,100$ m³/s é

$$\delta = \left[\frac{5 \times \sqrt{(0,2)^2/4}}{2 \sqrt{(0,4)^2/4}} \right]^2 = 0,31$$

A vazão no primeiro lateral resulta

$$q_1 = (1 - 0,31) \times 0,100 = 0,069 \text{ m}^3/\text{s}$$

e no último

$$q_5 = (1 + 0,31) \times 0,100 = 0,131 \text{ m}^3/\text{s}$$

Interpolando os valores das comportas intermediárias

Lateral	q (m ³ /s)
1	0,069
2	0,085
3	0,100
4	0,115
5	0,131
Total	0,500

2.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O NÚMERO DE FROUDE. ORIENTAÇÕES PARA O PROJETO

O número de Froude expressa a relação entre as forças de inércia e a ação da gravidade em um elemento de corrente. Em um canal ou canalização com saídas laterais, a inércia do fluido faz com que este tenda a manter o seu fluxo no canal, dificultando o seu desvio nas saídas de montante e facilitando-o nas de jusante.

Para que haja passagem de água por uma comporta é intuitivo que o número de Froude imediatamente antes da comporta não devia ser superior ao número de Froude na passagem. Se as profundidades correspondentes são iguais

$$\frac{V}{\sqrt{gh}} = \frac{V_L}{\sqrt{gh}}$$

Conseqüentemente, como $\frac{V}{V_L} = \frac{nA_L}{A}$,

deve-se ter

$$\frac{nA_L}{A} \leq 1$$

ou em outras palavras, a área do canal à montante de um grupo de saídas laterais não deve ser inferior à soma das áreas das passagens laterais.

Uma condição extrema que deve ser evitada, é aquela em que a vazão na primeira comporta resulta nula, ou seja $\delta = 1,0$. Nestas condições, pela equação (13)

$$\frac{nA_L}{A} = 2$$

seria um valor que ultrapassado poderia induzir um fluxo instável, com possível retorno de água pelas comportas ou orifícios de jusante.

Uma distribuição de fluxo praticamente uniforme pode ser obtida a relativamente baixos números de Froude no canal, por exemplo, a um número de Froude no canal igual à metade do número de Froude no lateral. A iguais profundidades corresponde

$$\frac{nA_L}{A} \leq 0,5$$

Para se lograr uma distribuição uniforme de fluxo uma solução é reduzir a secção do canal de montante para jusante de modo a manter um número de Froude praticamente constante. Isto implica em $V/V_L = \text{constante}$ ao longo de todo o canal. Assim pode-se idealizar um canal de distribuição contínua e uniforme como esquematizado na figura 4. Fixado V/V_L as dimensões deste canal e de seu vertedor devem guardar a seguinte relação

$$\frac{D_L L}{DH} = \frac{V}{V_L} \quad (15)$$

Para $V/V_L = 1$ $\frac{D_L}{D} = \frac{H}{L}$ ou

$$\frac{D_L}{H} = \text{tg } \alpha \quad (16)$$

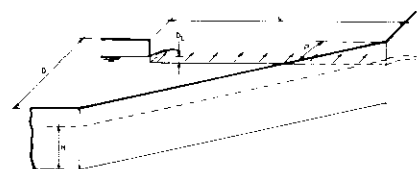


Fig. 4

3. DISPOSITIVOS DE SAÍDA DE ÁGUA DECANTADA

Os dispositivos de saída dos decantadores, juntamente com os dispositivos de entrada, podem determinar o sucesso ou o fracasso do projeto de um decantador e, por isso, devem também ser objeto de um cuidadoso estudo.

Com freqüência, se tem constatado que projetos inadequados de dispositivos de saída dos decantadores, por exemplo, vertedores de pequena extensão com elevadas cargas por unidade de comprimento, induzem correntes capazes de arrastar flocos, reduzindo a eficiência dos decantadores e sobrecarregando os filtros.

A experiência tem mostrado que, cargas sobre o vertedor de saída, da ordem de 5 l / sxm ou maiores, geram velocidades de aproximação de intensidade tal que arrastam para os vertedores os flocos que não tenham ainda sedimentado.

Em um decantador de fluxo horizontal, as linhas de fluxo são convergentes nas proximidades do vertedor, de modo que as superfícies de igual velocidade tem a forma aproximadamente cilíndrica (fig. 5). Em uma situação limite, a superfície que passasse pelo fundo teria uma área igual a

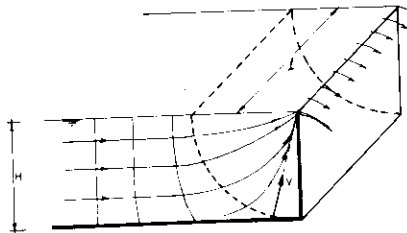


Fig. 5

em $H \ell/2$, sendo H a profundidade do tanque e ℓ o comprimento do vertedor e, nesta superfície, a velocidade de aproximação seria

$$v = \frac{2Q}{\pi H \ell} \quad (17)$$

Para não haver arrasto de flocos, a velocidade de aproximação deve ser inferior à velocidade crítica de sedimentação, numericamente igual à taxa de escoamento superficial V_s . Assim sendo, a vazão por unidade de comprimento de vertedor $q = Q/\ell$ deve ser

$$q \leq \frac{\pi H V_s}{2} \quad (18)$$

Sendos dados H em metros e V_s em $m^3/m^2 \times \text{dia}$, resulta

$$q \leq 0,018 H V_s$$

A profundidade geralmente está compreendida entre 2,5 e 4,5m e a taxa de escoamento superficial entre 25 a 40 $m^3/m^2/\text{dia}$. Entre estes números, a carga sobre os vertedores deverá estar compreendida entre 1,1 e 3,3 ℓ/sxm . Um valor médio de 2,0 ℓ/sxm é aplicado à maioria das instalações, com uma carga ao redor de 30 $m^3/m^2 \times \text{dia}$ e uma profundidade de aproximadamente 3,8 m.

A equação (18) mostra que, quanto menor a profundidade e a taxa de escoamento superficial do tanque, menor deve ser a vazão por unidade de comprimento de vertedor a ser adotada no projeto. Resultam valores tão baixos que requerem uma nivelção perfeita dos vertedores, de modo a assegurar uma perfeita distribuição de fluxo por toda a sua extensão. A equalização de fluxo é facilitada usando nos bordos das calhas vertedores ajustáveis em lâminas metálicas ou de plástico, como na figura 6, tomada da referência (3).

Na prática raramente seria possível a instalação de apenas um vertedor de saída localizado na extremidade do tanque transversalmente ao fluxo.

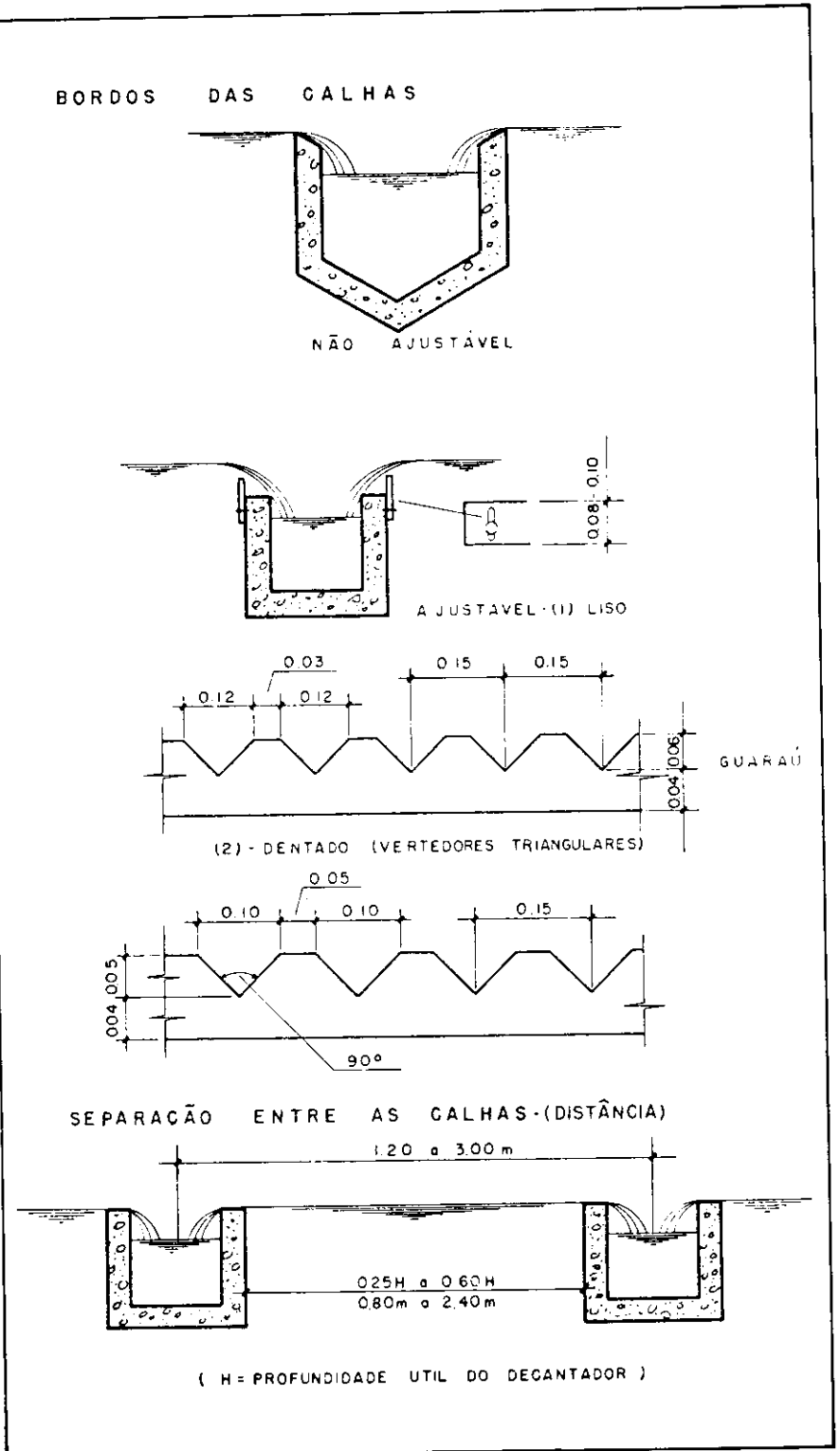


Fig. 6

Sendo B a largura do tanque de decantação e L o seu comprimento total, da equação (17) tira-se

$$\text{para } \frac{L}{H} = 4 \quad \ell = 2,5 B$$

$$\text{para } \frac{L}{H} = 25 \quad \ell = 16,0 B$$

$$\ell = \frac{2BL}{\pi H} \quad (20)$$

Para a maioria das instalações a relação L/H está compreendida entre 4:1 e 25:1 (3), resultando então

Diversos vertedores, qualquer que seja sua forma ou disposição, são, portanto, inevitáveis. Apesar de que, teoricamente podem ser dispostos de qualquer forma, paralelos ou perpendiculares à direção do fluxo, devem ficar o mais próximo possível da extremidade de saída do tanque e permitir a

passagem de raspadores mecânicos de lodo ou do tipo de sifão flutuante, se for o caso de sua instalação.

Hudson (4) sugere que o espaçamento entre vertedores não deve ser superior à duas vezes a profundidade do tanque.

Em decantadores de fluxo vertical as considerações são algo diferentes. Em se tratando de clarificadores de manto de lodos, a distância entre as calhas coletoras de água decantada não deve ser superior à duas vezes a altura da zona de água clarificada.

Nos decantadores laminares, de placas paralelas ou em módulos tubulares, é evidente que a distância máxima entre os vertedores de coleta (figura 7) é função da profundidade h de instalação dos módulos ou placas e inversamente proporcional à taxa de escoamento superficial. Admitindo razoável uma vazão por unidade de vertedor igual a 2,5 ℓ/sxm , resulta

$$\frac{d}{h} = \frac{432}{V} \quad (21)$$

onde V é a velocidade ascensional da água, ou seja, a taxa de escoamento superficial em $m^3/m^2 \times dia$. Na figura 7 acha-se representada a variação da relação d/h com V .

REFERÊNCIAS

1. CHAO, J. & TRUSSEL, R.R. - "Hydraulic Design of Flow Distribution Channels" Journal Env. Eng. Div. ASCE, vol. 106, nº EE2, April, 1980.
2. HUDSON, Jr, H.E. UHLER, RB & BAILEY, R. Dividing - Flow Manifolds with Square - Edged Laterals, Journal Env. Eng. Div. ASCE, vol. 105, nº EE4, August, 1979.
3. AZEVEDO NETTO, J.M. Experiência Brasileira no Projeto de Sedimentadores - Simpósio sobre nuevos Métodos de Tratamento de Água - CEPIS - OPS. Assunção, Paraguai, agosto 1972.
4. HUDSON Jr., H.E. Water Clarification Processes. Pratical Design and Evaluation. Van Nostrand Reinhold, 1981.

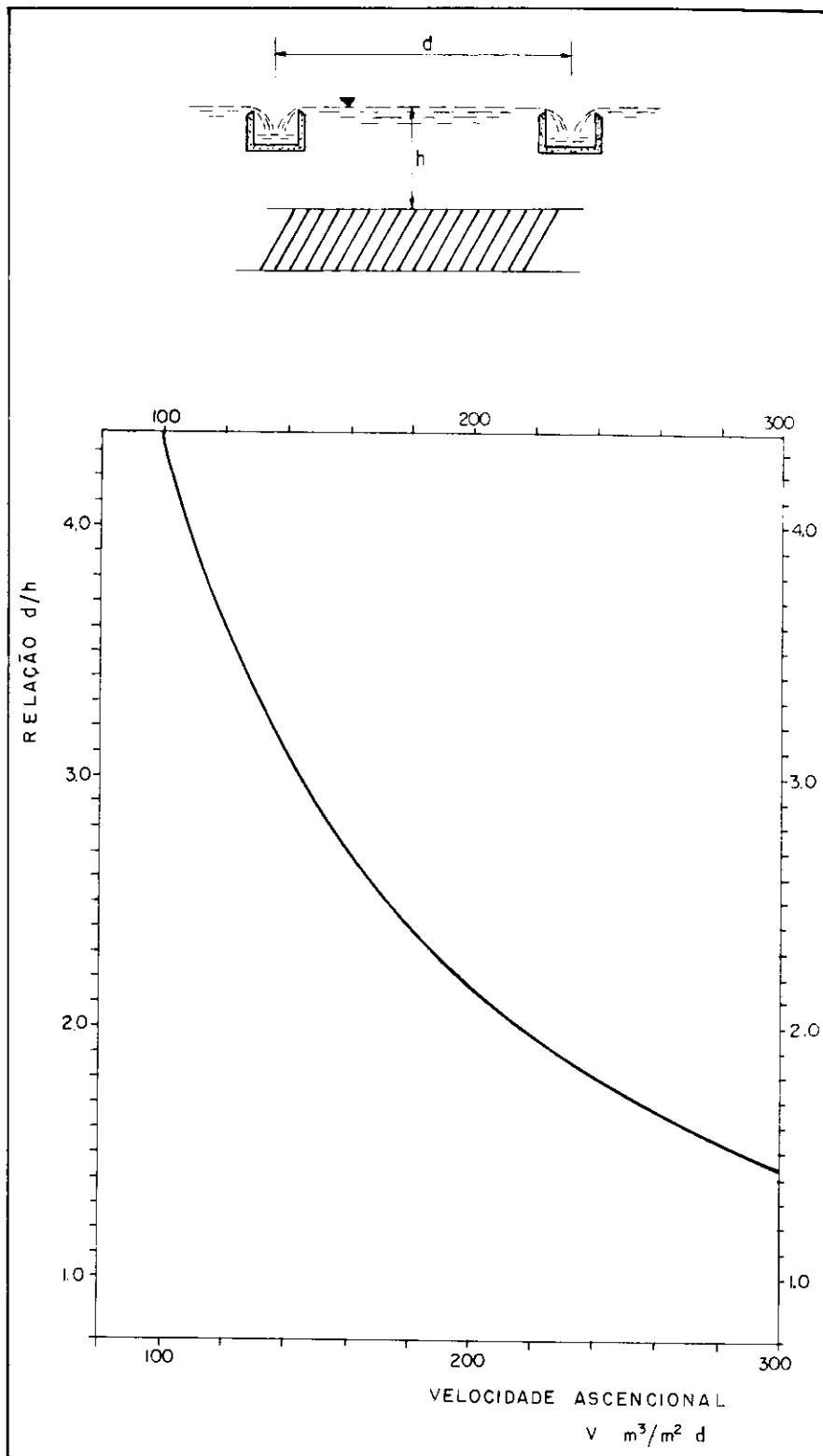


Fig. 7 - Relação entre a distância máxima entre as canaletas de água decantada e a profundidade da água em função da taxa de escoamento superficial