

11º CONGRESSO
BRASILEIRO
DE ENGENHARIA
SANITÁRIA
E AMBIENTAL

FORTALEZA, 20 A 25 DE SETEMBRO DE 1981

ABES - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

TEMA: ABASTECIMENTO DE AGUA

**SEDIMENTAÇÃO EM DECANTADORES RETANGULARES,
FUNÇÃO DA ESTRUTURA DE SAÍDA**

MIGUEL FERNÁNDEZ Y FERNANDEZ
IESA- INTERNACIONAL DE ENGENHARIA S.A.
ELOI FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO - PUC-RIO
JOSÉ PEDROSO DA SILVEIRA FILHO
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO - PUC-RIO
JOSÉ PIZARRO DE SANDE E LEMOS
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO - PUC-RIO

CORRESPONDÊNCIAS através de :
MIGUEL FERNANDEZ Y FERNANDEZ
miguel@aquacon.eng.br

SEDIMENTAÇÃO EM DECANTADORES RETANGULARES, FUNÇÃO DA ESTRUTURA DE SAÍDA

SUMARIO

Ultimamente tem-se optado pela instalação de canaletas de transbordamento em decantadores de estações de tratamento d'água, com objetivo de aumentar a vazão dos mesmos sem alterar sua eficiência.

Neste trabalho é apresentado um modelo teórico do comportamento das partículas sólidas em suspensão quando a área de transbordamento do decantador é variada. São obtidas diversas curvas de trajetória da partícula em função desse comprimento e da relação $r = H v_s/q$. As equações foram discretizadas em diferenças finitas e admitidas as partículas como discretas.

Dos resultados obtidos, observou-se que qualquer comprimento adicional (canaletas) torna o decantador ineficiente, isto é, apenas o transbordamento na periferia oposta a entrada torna o decantador mais eficiente com relação a decantação de partículas em suspensão para uma mesma relação r .

ÍNDICE

NOMENCLATURA	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
I. -INTRODUÇÃO	01
2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	01-02
3. MÉTODO DE RESOLUÇÃO	02-05
3.1 Modelo Utilizado	02-03
3.2 Campo de Velocidade	03-04
3.3 Velocidade de Decantação da Partícula	04-05
4. RESULTADOS	05
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	05-06
REFERÊNCIAS	07

NOMENCLATURA

D	diâmetro da partícula
d^*	diâmetro adimensional
F	equação (12)
h	espaçamento entre malhas
H	altura do decantador
L	comprimento do decantador
P	equação (11)
q	vazão por unidade de largura
r	relação adimensional $\frac{H \cdot v_s}{q}$
u	velocidade horizontal do fluido
u_0	velocidade de entrada do fluido
v	velocidade vertical do fluido
v_s	velocidade de decaimento da partícula sólida
v_s^*	velocidade v_s adimensional
x	coordenada horizontal
y	coordenada vertical
w	comprimento da canaleta
β, η, ξ	variáveis
$\varphi = \phi$	função de corrente
ρ_p	densidade da partícula
ρ_f	densidade do fluido
μ	viscosidade do fluido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo aproximado do escoamento no decantador retangular para uma saída pontual

Figura 2 - Modelo aproximado do escoamento no decantador retangular para uma saída linear

Figura 3 - Componentes da velocidade na partícula de fluido

Figura 4 - Divisão de malhas no decantador

Figura 5 – Condições de contorno para determinação do campo de velocidades

Figura 6 – Fluxograma do programa principal

Figura 7 – Trajetórias de decantação para comprimento das canaletas $w = 0,0$

Figura 8 – Trajetórias de decantação para comprimento das canaletas $w = 0,1$ L

Figura 9 – Trajetórias de decantação para comprimento das canaletas $w = 0,2$ L

Figura 10 – Trajetórias de decantação para comprimento das canaletas $w = 0,3$ L

Figura 11 – Trajetórias de decantação para comprimento das canaletas $w = 0,4$ L

Figura 12 – Vazão máxima em função do comprimento da canaleta

1. INTRODUÇÃO

Os processos adotados nas estações de tratamento de água consideram basicamente três fases distintas: coagulação, decantação e filtração, sendo as duas últimas complementares.

Os decantadores surgem no processo como unidades econômicas na medida em que diminuem as necessidades de filtros (estes de construção e operação mais onerosa). Qual a redução de turbidez ideal num decantador e qual a turbidez aduzida ao filtro é tema controverso, variando com o leito filtrante, as características da água ao longo do tempo, etc.

O presente estudo admite como definida pelo projetista a relação ótima decantação x filtração, traduzida por uma determinada turbidez de saída dos decantadores, que corresponde à remoção de determinada partícula dentre o universo de partículas formadas no processo de floculação, e designada como "partícula crítica". Em outras palavras, pode-se estipular uma determinada partícula, com densidade conhecida, e estabelecer que todas as partículas de densidade igual ou superior devem ser removidas para que se tenha a remoção de turbidez desejada.

Com relação aos decantadores retangulares de fluxo horizontal (convencionais ou clássicos), os critérios de cálculo em uso baseiam-se em estudos de KAMP [1], e HAZEN [2] além de considerações empíricas nunca bem esclarecidas.

Uma das propostas deste trabalho é chegar a um modelo teórico de simulação para que todas as considerações possam ser testadas e posteriormente acrescidas de fatores empíricos de correção, o que é perfeitamente possível com as técnicas atuais. A discussão do tema no XI Congresso da ABES deve ser seguida de um aprimoramento do modelo pelos autores e todos os demais interessados.

No estágio atual da técnica, é usual prover os decantadores "convencionais" com calhas de coleta de água decantada avançando para montante a partir da parede oposta à de entrada, e embora se faça referência a uma taxa de extravasão por metro linear de borda de calha, o que se procura estabelecer é uma "área de saída".

Não é do conhecimento geral a influência exata que essas canaletas implicam ao escoamento no decantador, não existindo ainda um modelo que forneça o comprimento ótimo dessas canaletas em função do percentual de partículas depositadas.

No presente trabalho foi feito um modelo teórico do escoamento do fluido no decantador e obteve-se a trajetória de uma partícula sólida na situação mais desfavorável, para qualquer comprimento de canaleta ("área de saída"). Não estão incorporados no modelo as correntes parasitas térmicas, de vento, etc, que serão combatidas por detalhes de projeto, levadas em consideração nos coeficientes de segurança ou incorporadas a algum coeficiente empírico.

No item 2 faz-se uma rápida definição do problema e revisão da literatura disponível relativa ao assunto.

No item 3 é apresentado o método de resolução e as equações que regem o modelo proposto.

No item 4 são apresentados os resultados obtidos.

No item 5 os resultados são comentados e algumas conclusões são feitas.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Camp [1], Ingersoll et al [3] e Graber [4] analisaram exaustivamente os decantadores retangulares para o caso em que a saída é o simples transbordamento pela-parede oposta à de entrada. A trajetória da partícula em decantação foi por eles determinada, quando o fluido é tratado como ideal, e também obtiveram as funções de corrente desse escoamento. Graber compara seus resultados de um modelo de escoamento potencial com modelos que tratam o escoamento como radial, tendo a saída como origem.

Todos os resultados alcançados, portanto, restringem-se aos decantadores convencionais com transbordamento fixo na parede oposta à de entrada.

Este trabalho propõe-se a ampliar os resultados de Graber, apresentando resultados para o projeto de

decantadores que utilizem canaletas de transbordamento.

Técnicos da área de hidráulica observando a performance dos decantadores convencionais em uso em diversas estações de tratamento d'água fizeram algumas considerações sobre o processo de decantação das partículas sólidas, cujo raciocínio é o seguinte.

No início da decantação da partícula sua trajetória é aproximadamente linear, sendo a taxa de decaimento função da relação entre u e v_s , onde u é a velocidade horizontal do escoamento da água e v_s a velocidade de queda da partícula. Supondo que o tanque tivesse um comprimento tão grande quando se desejasse a decantação da partícula seria um fato definitivo. Isto só não ocorre pelo fato do decantador ter comprimento finito, obrigando que a água transborde pela parte superior da extremidade final do tanque. No trecho final do decantador, por esse motivo, as linhas de corrente se deformarão em relação ao escoamento 'quase' uniforme que existia na parte inicial, veja figura 1. Com isso acentuam-se cada vez mais os gradientes de velocidade na direção vertical que eventualmente (dependendo das características da partícula e da sua posição atual) poderão carregar a partícula, não permitindo que esta decante.

Conclui-se, então, que esse gradiente é fundamental no processo de decantação. E de imediato pensou-se no seguinte: conseguindo-se diminuir a intensidade desse gradiente a vazão do decantador poderia ser aumentada sem que a partícula fosse carregada.

Este é o princípio no qual se basearam aqueles que tomaram a iniciativa de instalar as canaletas de transbordamento em diversos decantadores. As linhas de corrente em tais tanques teriam o aspecto mostrado na figura 2.

Restava ainda a resposta à seguinte pergunta. Qual o comprimento que deve ter essa canaleta?

Da mesma forma que conclui-se o efeito favorável das canaletas ao diminuir a intensidade do gradiente vertical da velocidade, pode-se concluir que ela antecipará a ação desse mesmo gradiente, apesar da intensidade ser menor. Logicamente esses dois efeitos atuam em sentido contrário sobre o decaimento da partícula, o que 'provavelmente' definirá um comprimento ótimo da canaleta a ser projetada.

Este é exatamente o objetivo deste trabalho, verificar se existe esse comprimento ótimo, e caso positivo, localizá-lo para os projetistas.

3. MÉTODO DE RESOLUÇÃO

3.1 Modelo Utilizado

No modelo utilizado por Graber [4] para o decantador com transbordamento simples (pontual), o movimento da partícula no ponto (x,y) , na figura 3, decantando com velocidade v_s relativa ao fluido é determinada por:

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (1.a)$$

$$\frac{dy}{dt} = v - v_s \quad (1.b)$$

onde u e v são, respectivamente, a componente da velocidade do fluido em x e em y . Eliminando dt a trajetória da partícula é dada por:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v - v_s}{u} \quad (2)$$

A resolução dessa equação diferencial depende da determinação anterior do campo de velocidade do escoamento do fluido, u e v , e da definição da velocidade de queda da partícula v_s .

3.2 Campo de Velocidade

Para determinar o campo de velocidade do fluido utilizou-se a teoria do escoamento potencial.

Considerando-se o comprimento das canaletas não definido, uma solução analítica para as funções de corrente seria um pouco tedioso apesar de possível, preferindo-se utilizar uma solução aproximada para obter-se as formas da função de corrente.

No escoamento bi-dimensional, a função de corrente ϕ é definida como

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (3.a)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3.b)$$

Utilizando-se as leis básicas de mecânica dos fluidos, e aplicando a definição de função de corrente dadas em (3.a) e (3.b), chega-se a equação de Laplace

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

sujeita a condições de contorno.

A forma discreta da equação(4), usando diferenças finitas de segunda ordem e uma malha quadrada é

$$\phi_{i+1,j} + \phi_{i-1,j} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i,j-1} - 4 \cdot \phi_{i,j} = 0 \quad (5)$$

Richardson [6] propõe um método para determinar a função de corrente num ponto (i, j) da malha por iterações sucessivas. A diferença dos valores da função $\phi_{i,j}$ entre cada iteração vai diminuindo e assim a função $\phi_{i,j}$ converge para o seu valor.

A equação de Richardson [6] é a seguinte:

$$\phi_{i,j}^{(k+1)} = \frac{1}{4} [\phi_{i+1,j}^{(k)} + \phi_{i-1,j}^{(k)} + \phi_{i,j+1}^{(k)} + \phi_{i,j-1}^{(k)}] + erro \quad (6)$$

onde k+1 significa a iteração seguinte à iteração k.

As condições de contorno utilizadas são:

$$\begin{array}{ll} y = 0 & \phi(x,0) = 0 \\ x = 0 & \phi(0,y) = u_o y \\ y = L & \phi(L,y) = 0 \\ y = H [0 \leq x < (L-w)] & \phi(x,H) = u_o H \\ y = H [(L-w) \leq x < L] & \frac{\partial \phi}{\partial y}(x,H) = 0 \end{array} \quad (7)$$

A condição de contorno na canaleta impõe que a velocidade de saída seja normal à superfície.

O erro admitido para o truncamento do processo iterativo foi de $\varepsilon = 10^{-4}$.

3.3 Velocidade de Decantação da Partícula

Camp [1] e Graber [4] mostram que pela teoria da decantação ideal tem-se $\frac{u}{v_s} = \frac{L}{H} = c^{te}$.

Concha & Almendra [7] propõe um modelo combinando a teoria da camada limite e dados experimentais para a distribuição de pressão sobre a superfície da partícula, obtendo uma expressão para o coeficiente de arraste. Usando esses resultados como base, eles desenvolveram uma expressão para a velocidade de decantação de partículas esféricas conhecido o seu diâmetro para qualquer número de Reynolds. A equação (8) representa a velocidade de decantação adimensionalizada

$$v_s^* = \frac{20,52}{d^*} \left[\left(1 + 0,0921 \cdot d^{*3/2} \right)^{1/2} - 1 \right]^2 \quad (8)$$

onde:

$$d^* = \frac{d}{P} \quad (9)$$

$$v_s^* = \frac{v_s}{F} \quad (10)$$

$$P = \left[\frac{3}{4} \frac{\mu}{\Delta\rho \cdot \rho_f \cdot g} \right]^{1/5} \quad (11)$$

$$F = \frac{\mu}{\rho_f} \cdot \frac{1}{P} \quad (12)$$

Com os resultados de (6) e (8) substituídos em (2) e adimensionalizando esta equação, obtemos uma equação diferencial ordinária de 1ª ordem que tem a seguinte forma funcional:

$$\frac{d(y/H)}{d(x/H)} = F \left(\frac{u}{v_s}, \frac{x}{H}, \frac{y}{H} \right) \quad (13)$$

A solução numérica dessa equação (13) foi obtida utilizando-se o método de Runge-Kutta de 4ª ordem [8] [9].

De uma forma geral a equação (13) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\eta' = F(\beta, \xi, \eta) \quad (14)$$

com condições de contorno. Expandindo essa derivada em série de Taylor, e utilizando o método de Runge-Kutta, tem-se:

$$\eta_{n+1} = \eta_n + \frac{1}{6} [\kappa_1 + 2\kappa_2 + 2\kappa_3 + \kappa_4] \quad (15)$$

onde η_{n+1} é o valor da função no ponto vizinho a 'n' e

$$\begin{aligned}
\kappa_1 &= \Delta F(\beta, \xi_n, \eta_n) \\
\kappa_2 &= \Delta F\left(\beta, \xi_n + \frac{1}{2}\Delta, \eta_n + \frac{1}{2}\kappa_1\right) \\
\kappa_3 &= \Delta F\left(\beta, \xi_n + \frac{1}{2}\Delta, \eta_n + \frac{1}{2}\kappa_2\right) \\
\kappa_4 &= \Delta F(\beta, \xi_n + \Delta, \eta_n + \kappa_3)
\end{aligned}
\tag{16}$$

onde $\Delta = \frac{h}{H}$, e h é a distância entre as malhas.

Como o campo de velocidade é obtido da função de corrente que tem valores discretos, foi necessário desenvolver uma função de interpolação que avaliasse as propriedades no intervalo das malhas.

A interpolação realizada é linear e bidimensional, obtendo-se o valor da velocidade em qualquer ponto do decantador.

Foi feito um programa em FORTRAN IV para proceder todos os passos, cujo fluxograma é apresentado na figura 6.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos para a trajetória da partícula sólida em decantação estão plotadas em gráficos nas paginas seguintes.

Os resultados representam trajetórias para algumas situações típicas de vazão, diâmetro e densidade características dados por Steel [10].

Foi utilizada uma relação $L/H = 26,0$ conforme aconselha Graber.

A figura 7, compara os resultados obtidos por Graber [3] e pelo presente trabalho fazendo o caso particular de canaletas de comprimento nulo.

A figura 8, mostra a trajetória da partícula quando o comprimento da canaleta é igual a 0,1 L, a figura 9 para 0,2 L, a figura 10 para 0,3 L e a figura 11 para 0,4 L.

Para todos esses casos os parâmetros que também podem alterar a trajetória da partícula são: sua densidade e diâmetro e a velocidade de entrada da água (vazão). Essas variáveis foram englobadas em um termo adimensional $r = H v_s / q$, onde $q = (\text{vazão}) = u_o H$. São traçadas curvas representativas da trajetória para sete diferentes valores de r , para cada comprimento de canaleta.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Foram consideradas as variações de quatro parâmetros na trajetória das partículas: diâmetro e densidade da partícula sólida, vazão de água e comprimento das canaletas.

Os efeitos das variações das três primeiras variáveis foram englobadas no termo $r = H v_s / q$ e são mostradas nas figuras 7,8,9,10 e 11. Observa-se desses gráficos que quanto maior for o parâmetro r a decantação ocorre de forma mais rápida. Esse resultado já era conhecido do trabalho de Graber [3] e

pode ser facilmente controlado pelo ajuste da vazão e/ou pelos processos de floculação.

O comprimento das canaletas, conforme mostram os resultados das figuras 7,8,9,10 e 11 atuaram de forma inversa do previsto, isto é, quanto maior for a área de transbordamento mais difícil de ocorrer a decantação da partícula. Isso pode ser facilmente observado pela curva representada por $r = 0,041$ nas figuras 7,8 e 9. Na figura 7, o efluente é pontual, e para $r = 0,041$ a partícula decantou em 93% do comprimento do decantador; quando aumenta-se a área de transbordamento do efluente para 0,1 L, figura 8, a mesma partícula sujeita à mesma vazão, $r = 0,041$, decanta em 95%, aproximadamente, finalmente quando o comprimento das canaletas sobe para 0,2 L, figura 9, e mantendo-se $r = 0,041$, verifica-se que a partícula não decanta.

Utilizando o programa, variou-se a vazão de entrada, até que fossem encontradas as condições limites na qual a partícula decanta. Isso foi feito para diferentes comprimentos de canaletas. Os resultados obtidos estão plotados no gráfico da figura 12.

O gráfico da figura 12, define duas regiões, uma acima da curva onde a decantação não ocorre, e a outra, abaixo dela, onde as partículas encontram o fundo do tanque. Pode ser construído um gráfico desses para cada diâmetro e densidade diferente, o que seria desnecessário já que o resultado é óbvio.

Observando-se o gráfico, ele apresenta um comportamento nitidamente monótono e decrescente, não possuindo pontos de máximo ou de mínimo. Esse fato implica que o uso das canaletas não diminui tanto quanto se esperava os efeitos do gradiente de velocidade e antecipou a atuação desse mesmo gradiente sobre a trajetória da partícula. Portanto, o resultado da figura 12 mostra que quanto menor for a área de transbordamento (para um mesmo valor de r), melhor a eficiência na decantação das partículas sólidas.

Sugere-se aos colegas operadores de ETAs com calhas de saída, realizar experimentos com dois decantadores em paralelo, um com as calhas, outro sem, durante algum tempo, publicando os resultados. Os autores apreciariam poder participar de um programa desses.

Paralelamente devem ser aprofundados os estudos apresentados principalmente no que tange à possibilidade de adotar partículas de dimensões e densidade variável (aglomeráveis) no modelo e que é o próximo estágio a que se propõe.

REFERENCIAS

- [1] CAMP, T.R. - "Sedimentation and the Design of Settling Tanks", American Society of Civil Engineers, Transactions, Vol. III, p. 895 (1946).
- [2] HAZEN, A - "On Sedimentation", Trans. ASCE, vol.53, pag.45 (1904).
- [3] INGERSOLL, A. C. et al - "Fundamental Concepts of Rectangular Settling Tanks", American Society of Civil Engineers, Transactions, 121, 1196 (1956).
- [4] GRABER, S.O. - "Outlet weir Loadings for Settling Tanks", Journal WPCF, vol. 46, no.10, Oct. 1974, pp. 2355.
- [5] SHAMES, I.H, - "Mecânica dos Fluidos", Ed. Blücher, São Paulo, (1973).
- [6] ROACHE, P.V. - "Computational Fluid Dynamics", pp.113-117, Hermosa Publishers.
- [7] CONCHA, F. and ALMENDRA, E.R. - "Settling Velocities of Particulate Systems, 1. Settling Velocities of Individual Spherical Particles", Int. Jour. Mineral Processing, 5 (1979) pp.349-367.
- [8] HILDEBRAND, F.B. - "Introduction to Numerical Analysis", McGraw-Hill, H. 4, 1978.
- [9] CHOW, C - "An Introduction to Computational Fluid Mechanics", Wiley, USA, 1979.
- [10] STELL, E. W. - "Water Supply and Sewerage", McGraw-Hill, 1966.



FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA PRINCIPAL

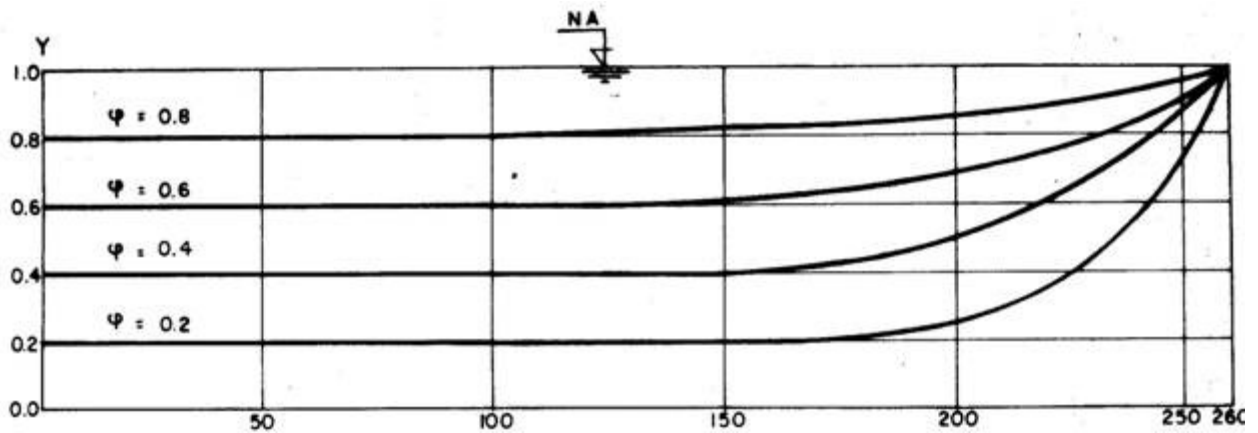


FIGURA 1 – MODELO APROXIMADO DO ESCOAMENTO NO DECANTADOR RETANGULAR PARA UMA SAÍDA PONTUAL

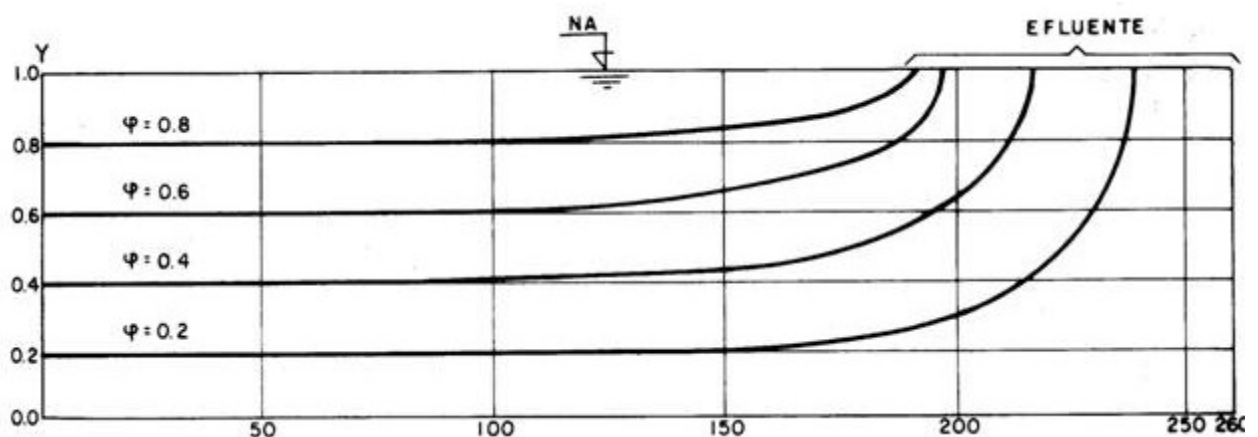


FIGURA 2 – MODELO APROXIMADO DO ESCOAMENTO NO DECANTADOR RETANGULAR PARA UM SAÍDA LINEAR

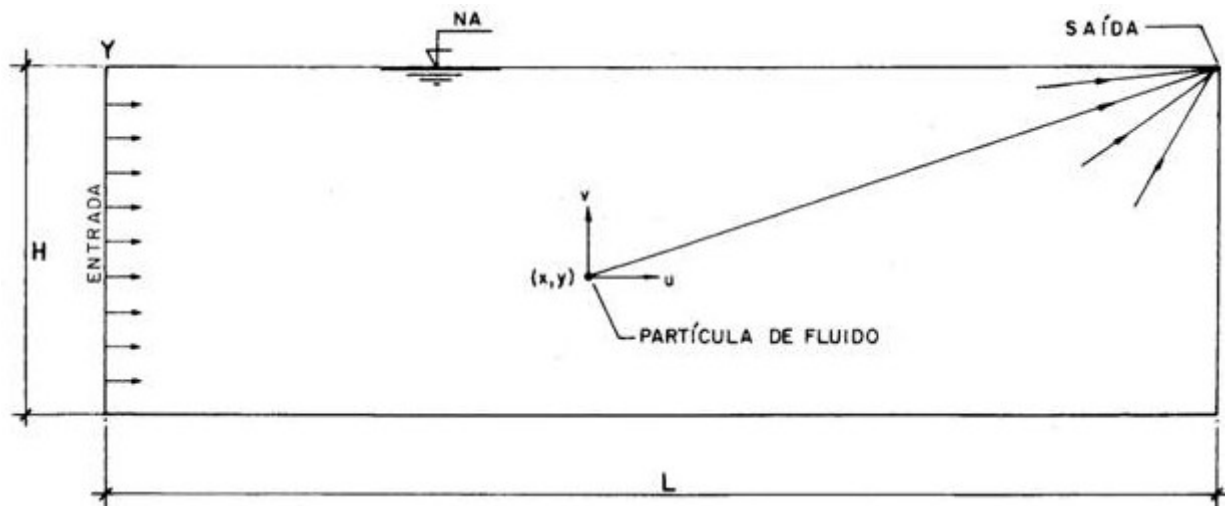


FIGURA 3 – COMPONENTES DA VELOCIDADE NA PARTÍCULA DE FLUÍDO

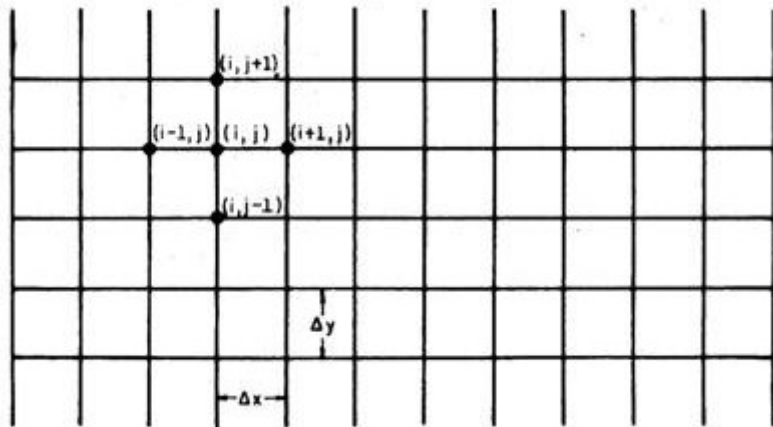


FIGURA 4 – DIVISÃO DE MALHAS NO DECANTADOR

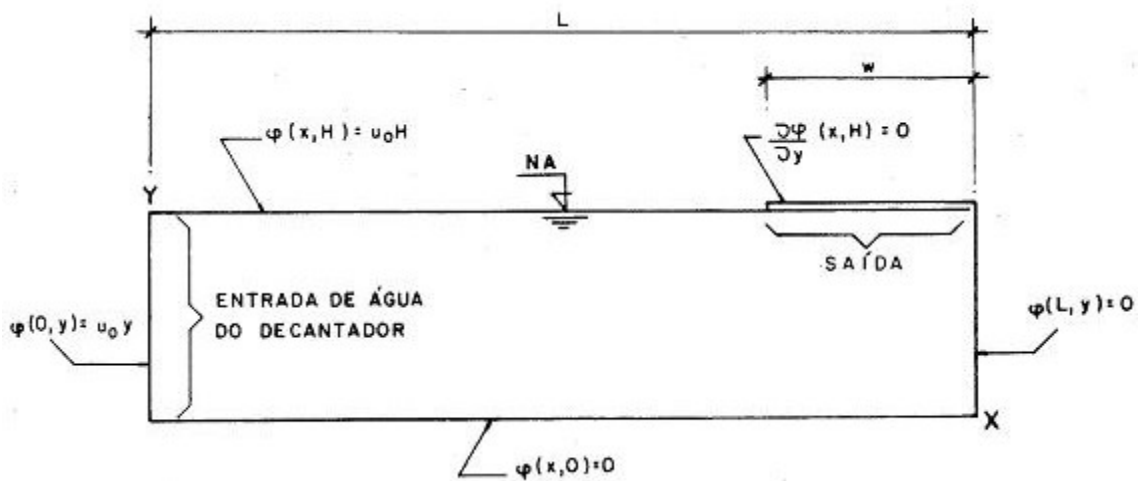


FIGURA 5 – CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA DETERMINAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES

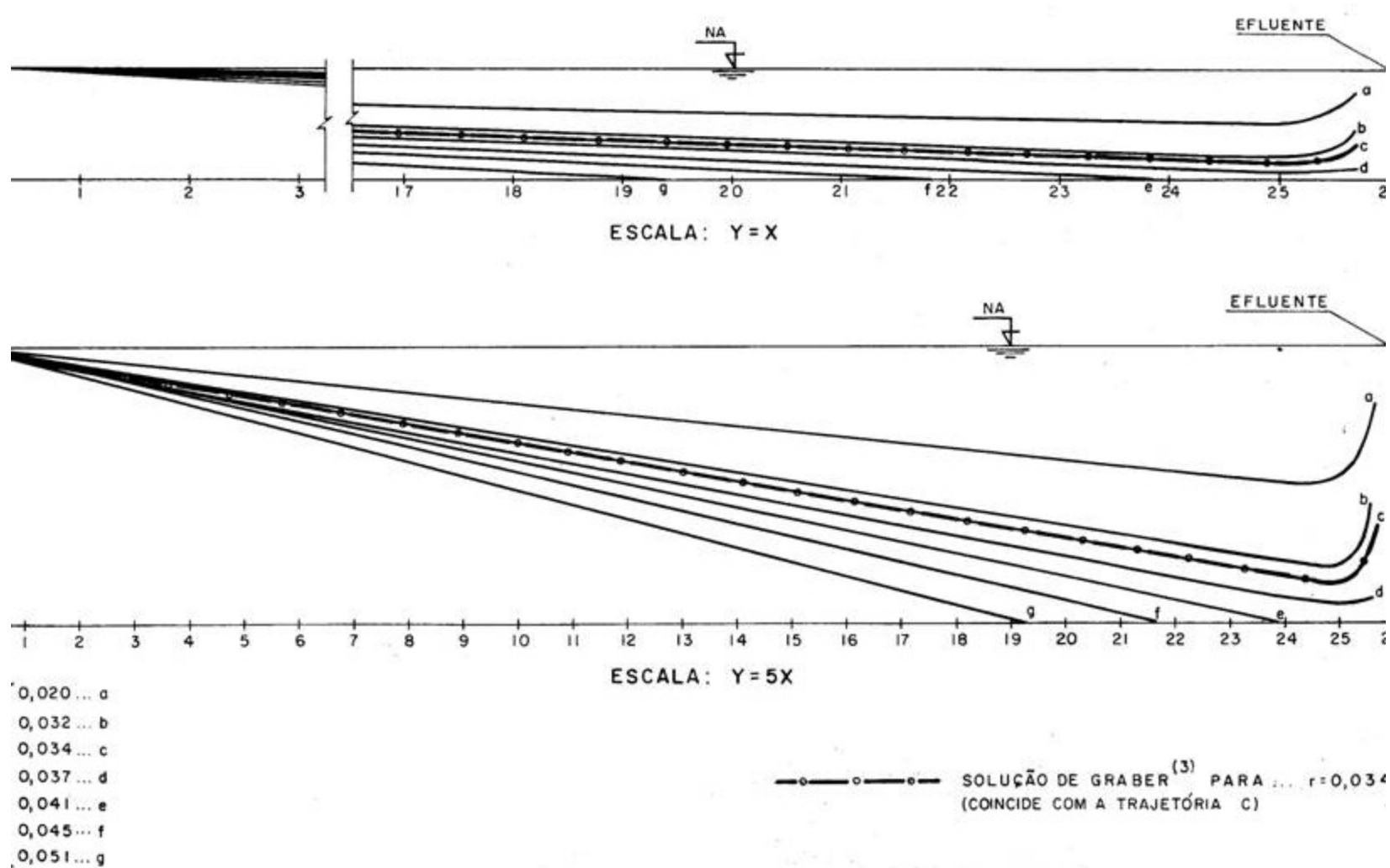
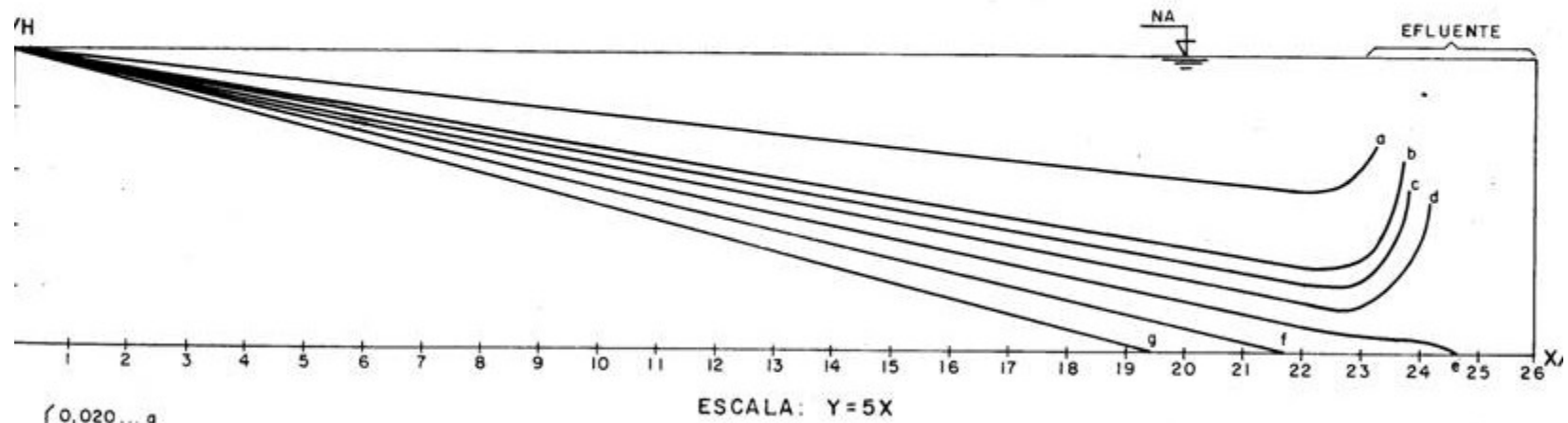
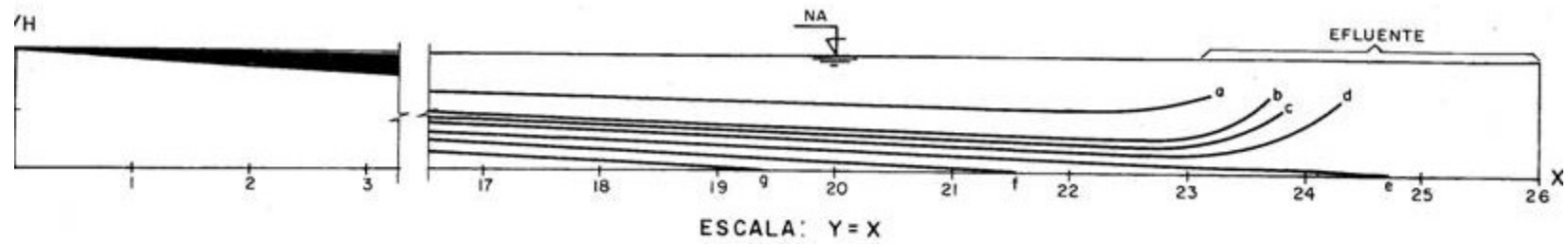


FIGURA 7 – TRAJETÓRIAS DE DECANTAÇÃO, PARA COMPRIMENTO DAS CANALETS $w = 0,0$



- 0,020 ... a
- 0,032 ... b
- 0,034 ... c
- 0,037 ... d
- 0,041 ... e
- 0,045 ... f
- 0,051 ... g

FIGURA 8 – TRAJETÓRIAS DE DECANTAÇÃO, PARA COMPRIMENTO DAS CANALETAS $w = 0,1L$

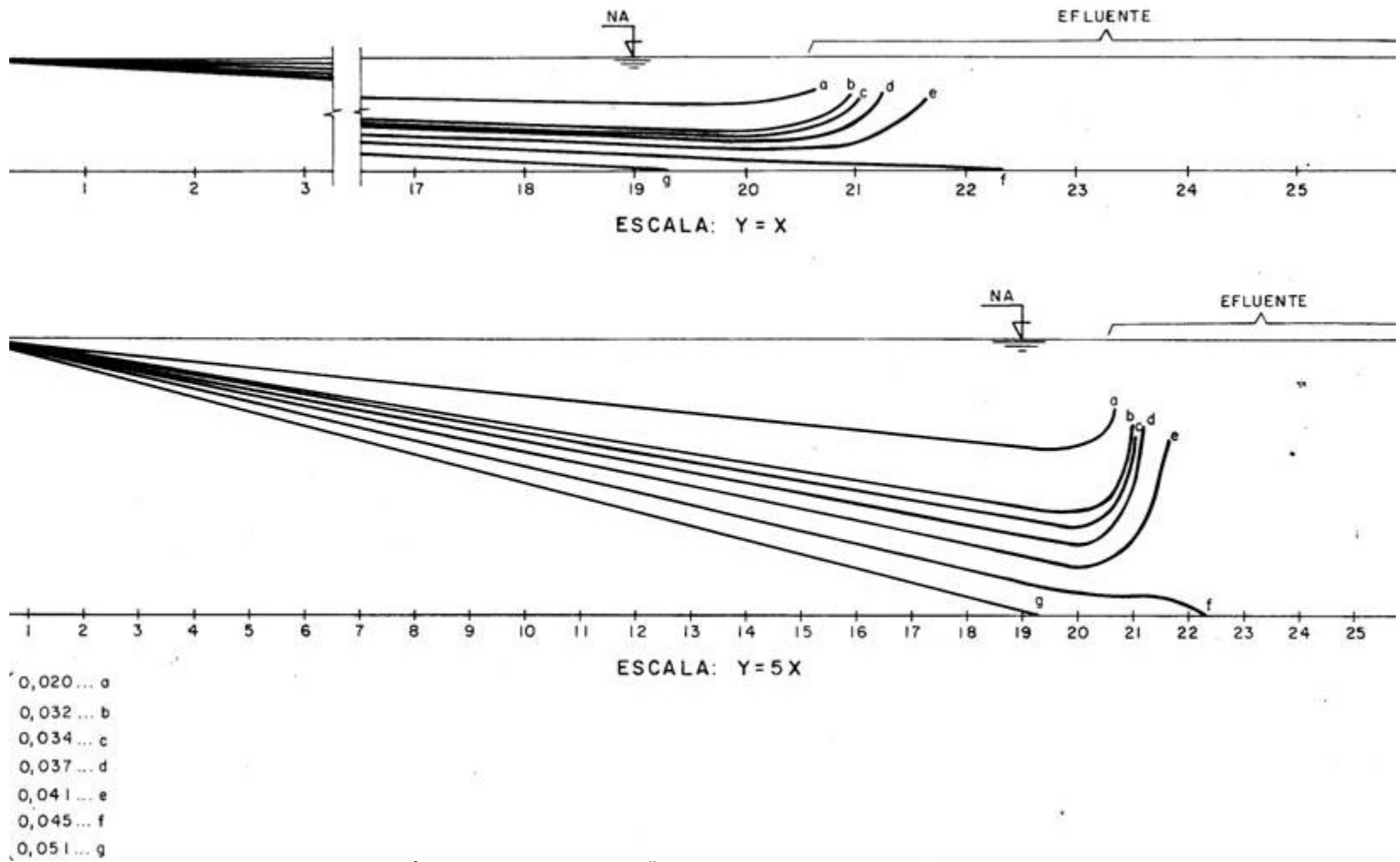


FIGURA 9 – TRAJETÓRIAS DE DECANTAÇÃO, PARA COMPRIMENTO DAS CANALETAS $w = 0,2L$

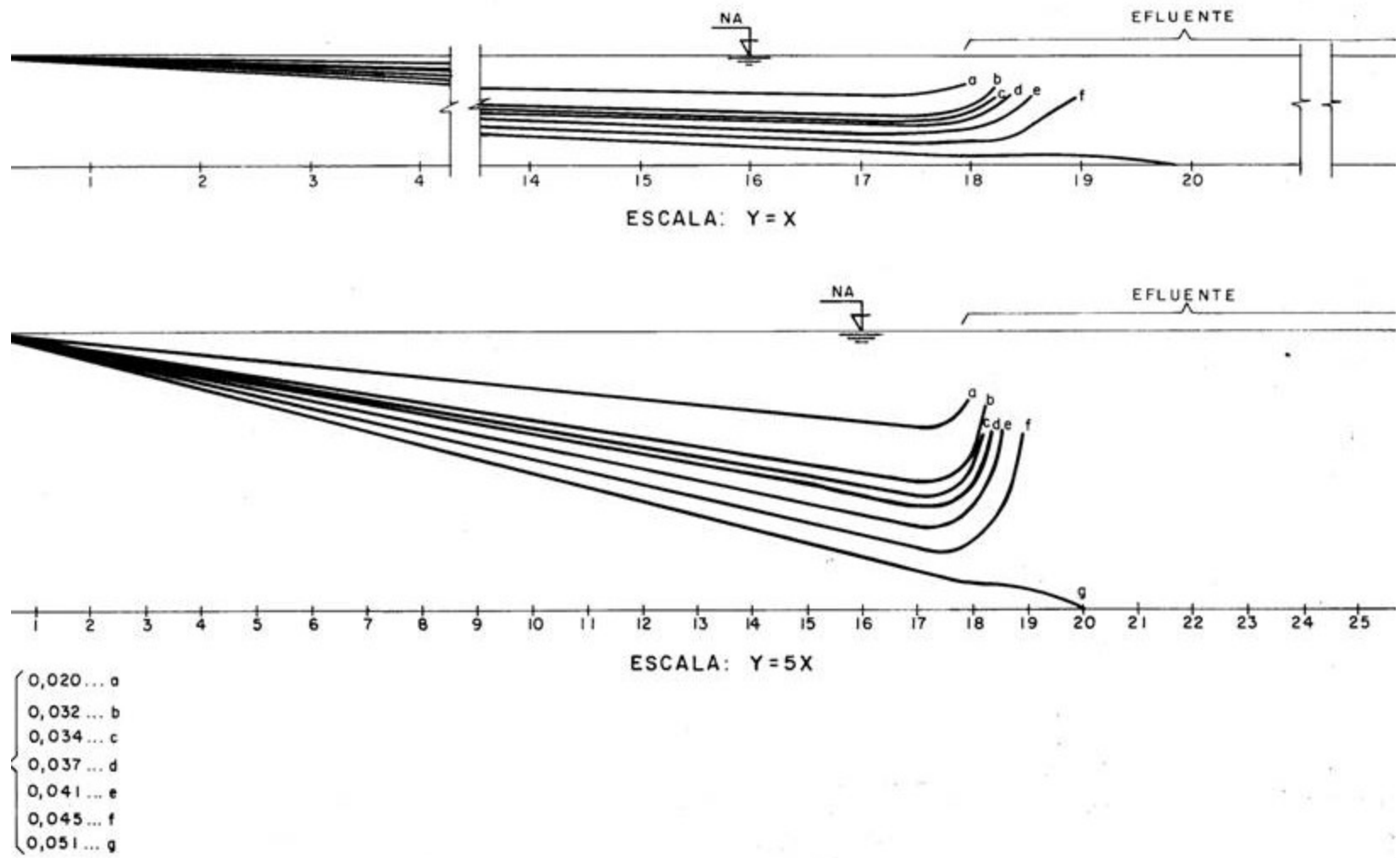


FIGURA 10 – TRAJETÓRIAS DE DECANTAÇÃO, PARA COMPRIMENTO DAS CANALETAS $w = 0,3L$

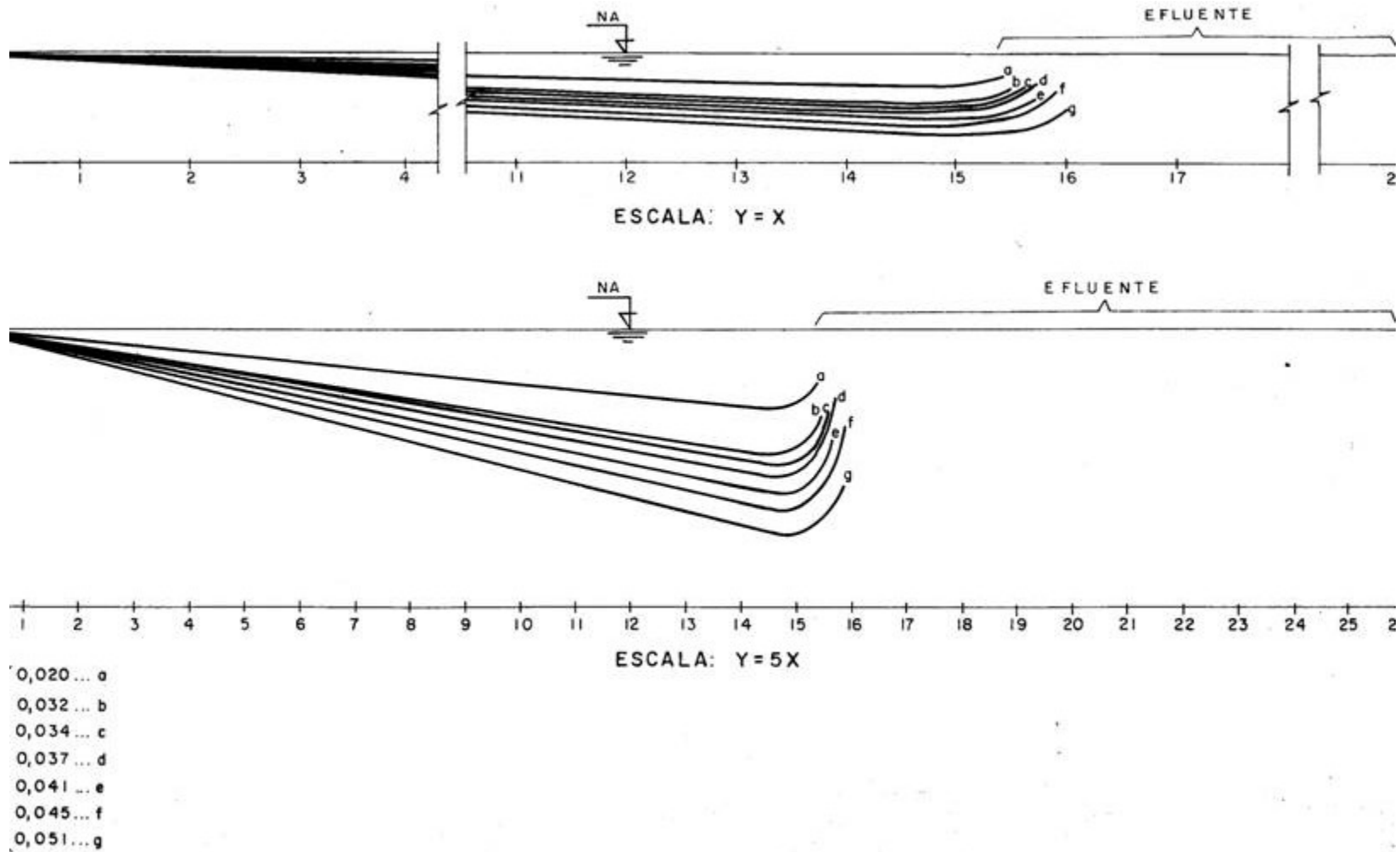


FIGURA 11 – TRAJETÓRIAS DE DECANTAÇÃO, PARA COMPRIMENTO DAS CANALETAS $w = 0,4L$

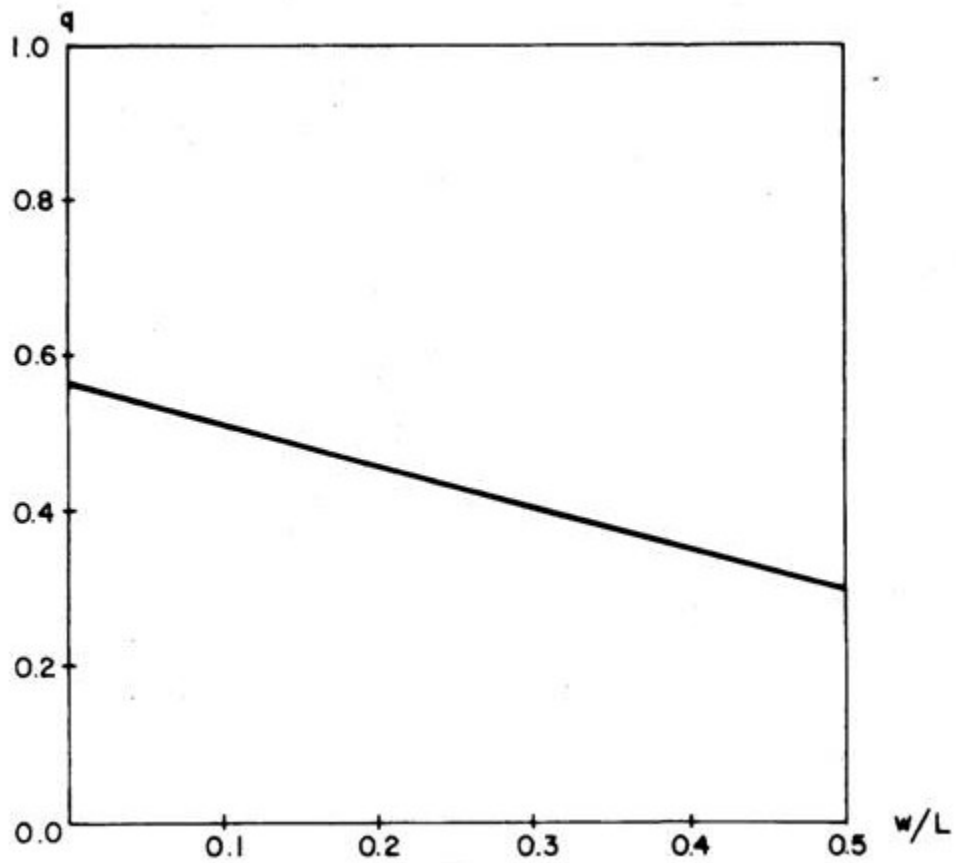


FIGURA 12 – VAZÃO MÁXIMA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DA CANALETA