

As «Incríveis» Fendas Retentoras

CEL. LEONINO JÚNIOR

Engenheiro Civil e Militar — Professor e
Chefe do Laboratório de Hidráulica e Mecânica
dos Fluidos do Instituto Militar de
Engenharia.

Introdução — O trabalho que se segue, foi apresentado, discutido e aprovado por unanimidade, com o título de “Um novo sistema para a retenção de materiais carreados no fundo de condutos. As fendas retentoras”, no I Congresso Latino-Americano de Hidráulica, realizado na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, entre os dias 10 e 15 de Agosto do corrente ano, patrocinado pela Associação Internacional de Pesquisas Hidráulicas com sede em Delft, na Holanda, e do qual participaram eminentes e dignas autoridades de renome, não só das Américas, mas também de países outros, altamente evoluídos nos domínios da Hidráulica e da Mecânica dos Fluidos. Foi êle previamente apreciado e escolhido, figurando dentre 32 outros, nacionais e estrangeiros, selecionados pela comissão que funcionou, com essa finalidade, na Universidade de Montevidéu, Uruguai, e que, diga-se a bem da verdade, cumpriu realmente a sua missão.

Ao divulgá-lo através desta revista, que mais uma vez nos concede a honra de publicar trabalho de nossa autoria, julgamo-nos no dever de acrescentar algumas explicações, no intuito de melhor informar aqueles que não acham perfeitamente ao par de certos detalhes referentes ao assunto abordado, principalmente quanto as razões que nos levaram à troca do título.

Realmente, fazer o que modesta porém seguramente fizemos, transformando assunto complexo, controvertido e ainda sujeito a dúvidas e discussões, considerado não perfeitamente resolvido, em alguns princípios fundamentais, algumas fórmulas básicas, em uma simples fenda no fundo de um conduto, é algo que assume proporções de incrível e se assemelha à audácia dos pretenciosos.

Mas, se temos a modesta pretensão de haver realizado algo de positivo, não contestado e aprovado em um Congresso Internacional, do qual participaram eminentes e dignas autoridades no assunto, oriundas de países altamente evoluídos na ciência da água, tais como França e Estados Unidos, que culpa nos cabe no caso?

Realmente, podemos afirmar com segurança, e absoluta certeza, pelas múltiplas e variadas discussões que temos travado sobre as fendas, com técnicos conhecedores, que elas são verdadeiramente incríveis.

Quem está em dia com o assunto tratado e conhece bem a complexa, a discutida teoria do transporte sólido em Hidráulica, bem poderá aquilatar da simplicidade com que pretendemos haver resolvido o assunto, no aspecto em pauta. Quem já tomou conhecimento dos complicados e duvidosos “dessableurs”, já realizados ou por realizar, que de quando em vez aparecem como novidade nas publicações técnicas especializadas, com a mesma finalidade, bem poderá compará-los com as nossas fendas para julgá-las “incríveis”.

Pois essa exatamente tem sido a primeira impressão dos mais capacitados técnicos que têm tomado conhecimento das nossas fendas retentoras. Alguns, pensam de imediato tratar-se de algo que não funciona, que não corresponde às finalidades visadas; outros julgam já terem visto algo parecido, que era empregado empiricamente em tempos idos. Essas opiniões porém mudam completamente.

Trava-se então a indispensável discussão sobre o assunto e no fim, depois de vários debates e de uma demonstração prática do funcionamento, acabam acreditando mesmo que as fendas são sensacionais. E muito mais, elas são autênticas e originais. Foi portanto pelas razões apresentadas, que reolvemos dar estas explicações ao publicar o trabalho, na certeza

de que os entendidos que nos lerem, terão também, à princípio, a natural e bem compreensível reação dos seus colegas, quanto à nossa pretensão.

Mas, encerrando, voltamos a afirmar com segurança e sem receios, como já temos feito tantas vezes: **as fendas retentoras existem e funcionam realmente**, conforme está exposto, queiram ou não os incrédulos!

E aí estão elas, pioneiras e vencedoras, cada vez mais confirmadas pelas aplicações reais já feitas, pelos ensaios de laboratório, cada vez mais apoiadas pela sólida base teórica da bibliografia citada.

Além disso, o que é mais importante, a simplicidade e a eficiência permanecem imutáveis. Nada de novas fórmulas para a sua aplicação, nada de novos dispositivos para melhorá-las. As aplicações sim, estas crescem e se ampliam cada vez mais, tornando nos casos indicados a retenção clássica por meio da decantação inteiramente obsoleta e firmando cada vez mais os princípios da retenção dinâmica por nós aplicados.

I — CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Sabem, todos aqueles que lidam na prática com problemas de transporte sólido em condutos de qualquer espécie, as dificuldades que o caso apresenta quando se trata de proteger instalações ou obras situadas a jusante, quanto à ação altamente nociva e prejudicial que provém da presença do material transportado, e que pode resultar de duas modalidades:

- a) da deposição do material, de modo inadequado, causando açoreamentos indesejáveis, com suas bem conhecidas consequências, tais como entupimentos, diminuição da seção de vazão, da capacidade de acumulação, etc.
- b) da ação mecânica das partículas, exercendo efeitos abrazivos e produzindo em consequência sérias erosões e destruição do material, principalmente no caso de máquinas hidráulicas e partes ou peças sujeitas ao atrito.

Sabem, igualmente, os que lidam no assunto, as dificuldades de ordem prática que o fenômeno provoca, quando se trata de reter as partículas por um meio qualquer, visando-se a proteção das obras ou instalações contra os efeitos citados, que normalmente acarretm sérias dificuldades e prejuízos de vulto para a vida ou a manutenção de tais realizações.

Temos, na prática diária, enfrentado sérios problemas sobre o assunto, nos casos mais variados, cada um deles apresentando aspectos e modalidades diferentes.

Como é de conhecimento dos especialistas, os dispositivos empregados até a presente data e por meio dos quais se visa reter ou desviar os materiais em aprêço, são geralmente onerosos e complicados e nem sempre apresentam a eficiência que seria de desejar, principalmente quando a situação impõe que se fuja aos moldes clássicos de retenção, pela redução das velocidades, com o aumento das seções e a consequente decantação.

As instalações de tal natureza, requerem normalmente espaço considerável, do qual nem sempre se pode dispor e quando tal situação se apresenta, isto é, quando se trata de reter os materiais **em movimento**, a solução traz dificuldades muito maiores e tem conduzido à concepção e à utilização de dispositivos por demais complexos, que normalmente não se traduzem em resultados satisfatórios.

Por outro lado, sabem aqueles que nos lêem, que a teoria do transporte sólido na Mecânica dos Fluidos, se bem que esteja bem desenvolvida sob certos aspectos, ainda se acha em estado evolutivo, estando em sua maior parte apoiada em resultados experimentais, cujas conclusões às vezes deixam sérias dúvidas e contradições, principalmente quando, à luz da doutrina moderna, se deseja realizar algo com o auxílio da experimentação sobre modelos e quando se quer obter qualquer resultado sob o aspecto quantitativo.

Surgem então fórmulas as mais variadas, conclusões as mais diversas, instalações as mais exóticas, que geralmente se adaptam a aspectos muito particulares do vasto campo explorado e que, às vezes, quando aplicadas em outras situações, levam a resultados inteiramente divergentes ou falham lamentavelmente.

Se formos pesquisar e recolher todo o acervo existente sobre o complexo assunto, através dos trabalhos que têm sido realizados pelos pesquisadores e estudiosos no mundo todo, teremos diante de nós uma vasta e variada documentação, através da qual somente poderemos chegar a certas conclusões de ordem geral muito limitadas, e dentre os trabalhos

realizados, somente alguns podem ser considerados verdadeiramente como clássicos ou definitivos, constituindo passos marcantes na evolução da vasta e complexa teoria.

Indiscutivelmente, certas conclusões e certos princípios existem, já estabelecidos e aceitos de modo inofismável, dos quais ninguém pode se afastar ao abordar o problema.

É temerário, no entanto, é perigoso e pode conduzir a lamentáveis insucessos, adotar, sem certas precauções, determinadas conclusões ou fórmulas, que ainda carecem de um apóio sólido, e que representam, às vèzes, meros casos particulares de aplicação muito restrita, a situações muito especiais.

Será preferível, julgamos, em cada caso ainda não perfeitamente esclarecido, partir dos princípios gerais já definitivamente consagrados a que nos referimos e, com muita cautela, com muito discernimento, com o auxílio precioso da experimentação, verificar qual o verdadeiro e seguro caminho a seguir, aproveitando então, **se fôr o caso**, resultados de trabalhos outros, já realizados por outros pesquisadores, que possam, sem sombra de dúvidas, ser utilizados ou aplicáveis ao caso em aprêço.

Somos inteiramente contra a inversão de tal procedimento, à luz dos conhecimentos atuais, e aconselhamos aos que se virem a braços com problemas correlatos a que façam como nós, agindo da maneira indicada.

Foi assim agindo, na solução de um problema real, que chegamos a resultados completos e positivos, que procuraremos divulgar no presente trabalho, para apreciação e julgamento dos conhecedores do assunto, que assim poderão aquilatar do mérito do que fizemos, com a devida cautela e com o apóio seguro da experimentação.

Que nos perdoem aqueles que nos lêem, se seguindo a mesma conduta indicada, chegamos a resultados muito simples porém reais e definitivos, sem aplicação de fórmulas complexas e teorias muito elevadas, que embora valorizando talvez muito mais o trabalho sob o aspecto matemático e altamente científico, viessem a tirar o mérito que modestamente julgamos ter: **a sua simplicidade, e seu caráter real e geral, a sua objetividade.**

Permitam-nos então que, sem a pretensão de divulgar algo de nôvo, possamos, nos ítens que se seguem, citar as bases em que nos apoiamos, para chegar aos resultados que obtivemos, êstes sim, com as características que mencionamos.

II — O CONCEITO GERAL DE FÔRÇA TRATIVA

Conforme demos a entender no início, de modo bem geral, tratava-se, na realidade, de reter, por meio de um dispositivo simples, eficiente, prático e original, matérias sólidas transportadas em um conduto livre em escoamento, situados entre o fundo e uma certa altura, formando portanto uma camada de determinada espessura, com a finalidade de proteger uma instalação situada a jusante contra a presença de tais materiais, considerados nocivos no caso em aprêço.

Para justificar portanto o nosso procedimento e as nossas conclusões, julgamo-nos no dever de explicar a nossa concepção.

Primeiramente consideremos a separação, já consagrada, do material transportado em:

- a) material de fundo;
- b) material em suspensão.

Façamos algumas considerações sôbre os dois tipos de materiais acima.

a) Material de fundo

A luz dos conhecimentos atuais, constitui ponto pacífico que o material em aprêço, independentemente da consideração de qualquer fenômeno que possa intervir na sua movimentação, é constituído pelo material que se desloca nas proximidades do fundo do conduto, segundo dois modos de progressão:

- por rolamento;
- por saltos.

A diferença entre os dois tipos de movimento é por demais conhecida e poupamo-nos ao trabalho de explicá-la. Não temos dúvidas quanto à sua aceitação unânime e quanto

à classificação como material de fundo, que vem a constituir a chamada "charriage" dos franceses ou "bed load" da língua inglesa.

Desejamos frisar, no entanto, que não restam dúvidas de que o material em aprêço se desloca no conduto, ocupando **uma certa camada**, cuja espessura não está bem definida, pois que depende de uma série de fatores que interferem no fenômeno e que não desejamos analisar, para não alongar demasiadamente o presente trabalho.

Por outro lado, forçoso é reconhecer que, no problema geral do transporte sólido, o material em aprêço é indiscutivelmente constituído pela **parte mais pesada** de material transportado, nem sempre correspondendo ao **material de maiores dimensões**, ao ser considerado o complexo transportado.

O "bed load" portanto é a porção do transporte total, cujo movimento se dá no próprio fundo ou em suas imediações, sendo influenciado pela presença desse fundo.

b) **Material em suspensão**

Evidentemente, todo o material que não fizer parte do citado na letra anterior, constitui o material em suspensão, transportado no seio da massa líquida, segundo princípios diferentes dos que regem o transporte anterior.

Do mesmo modo, trata-se agora do material de menor pêso ou, seria melhor dizer, de menor densidade, e de muito mais difícil retenção.

Por outro lado, sua ação, embora ainda não bem esclarecida, deve ser muito menos prejudicial do que a do material de fundo, pelo menos no que diz respeito aos assoreamentos.

Constitui ela a chamada "suspension" dos franceses ou o "suspended load" da língua inglesa, cujo transporte ocorre relativamente longe do fundo e é governado pelo campo da turbulência plenamente desenvolvida.

Não iremos aqui discutir as causas do transporte sólido, nem também será o caso de apresentar as diferentes hipóteses e teorias que procuram justificar a sua realização. As limitações de espaço nos impõem o desenvolvimento mais amplo de outros assuntos.

O fato real e positivo é que o transporte existe e se processa segundo as duas modalidades citadas, sendo tal fato plenamente aceito pelos pesquisadores.

Por outro lado, é impossível definir, de um modo geral, ou fixar, os limites do escoamento dentro dos quais se processa um ou outro tipo de transporte. Poderemos apenas dizer que o chamado material de arraste se desloca nas proximidades do fundo, sendo o seu transporte por êle influenciado. Até que distância do fundo isso se dá ou se propaga e se influencia? Bem, isto é um aspecto do problema que tentaremos definir depois.

Prosseguindo em nossas considerações sôbre as generalidades do fenômeno, que já constituem pontos pacíficos, aceitos por todos, diremos que para abordar o problema do material de fundo, que é o que nos interessa particularmente no caso, existem dois caminhos perfeitamente definidos que podem ser seguidos:

- o conceito de uma **velocidade crítica**;
- a consideração de uma **fôrça trativa**.

A um ou outro têm se apegado os estudiosos, desenvolvendo em tôrno de cada um deles, extensa e variada documentação teórica e experimental.

Temos, na nossa prática, pelo trato e pelo estudo constante do assunto, tendido para o segundo e julgamos que, assim procedendo, estamos de acôrdo com a maioria dos pesquisadores.

No primeiro caso, como se sabe, considera-se uma velocidade máxima admissível, a partir da qual começará o material em estudo a ser movimentado.

Tal velocidade está sujeita à influência de inúmeros e imprevisíveis fatores e o resultado dos estudos realizados é normalmente encontrado nas publicações especializadas, sob a forma de tabelas de valores ou fórmulas empíricas, de acôrdo com as quais é possível obter o valor dessa velocidade crítica, que ultrapassada conduzirá ao aparecimento do transporte dos materiais devidamente classificados, em condições naturais mais ou menos definidas. Este foi o caminho seguido pelos pioneiros no assunto e ainda hoje é adotado por muitos estudiosos, pelo menos como ponto de partida para a elaboração de um projeto. Talvez isso aconteça, pelo fato de ser de mais fácil aplicação o princípio em aprêço.

Somos de parecer que o segundo caminho é mais seguro e mais adequado aos modernos conceitos da ciência. Preferimos adotá-lo, julgando estar com a maioria e também pelo fato de nos parecer êle mais racional. Infelizmente não podemos discutir aqui as razões que nos levaram a adotá-lo. Que nos julguem porém os entendidos no assunto.

Como sabemos, consiste êle na consideração de uma **fôrça trativa**, que surge em consequência dos diferentes fatores que influenciam no escoamento, e que tende a tracionar as partículas do material considerado, em obediência às leis da mecânica clássica.

Na expressão mais simples do estudo, a que procuramos nos ater como dissemos, o escoamento no conduto é considerado permanente uniforme e essa fôrça nada mais é do que o resultado da componente da fôrça devida à gravidade, que atua sôbre o volume de água, paralelamente ao fundo do conduto, e cuja expressão é:

$$\omega A L S$$

onde:

ω é o pêsso específico do líquido;

A é a área molhada;

L é o comprimento do trecho considerado;

S é a declividade do conduto.

Surge, como consequência, o conceito de **fôrça trativa unitária**, verdadeiramente uma tensão, que será o valor médio da fôrça trativa por unidade de área molhada, e cuja expressão será:

$$\frac{\omega ALS}{PL} = \omega RS$$

e então:

$$\tau_0 = \omega RS$$

onde:

P é o perímetro molhado;

R é o raio hidráulico.

Em um canal largo, o raio hidráulico pode ser considerado igual a profundidade média h e então:

$$\tau_0 = \omega h S.$$

Deve-se notar, em consequência, que a fôrça trativa unitária, exceto quando se tratar de canais largos, não é uniformemente distribuída ao longo do perímetro molhado e é sempre paralela à face do conduto considerada.

Podemos então representá-la grãficamente do seguinte modo:

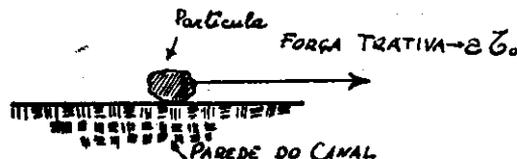


Fig. 1

onde consideramos o valor a como sendo a **área efetiva da partícula**.

Como se sabe, esforços têm sido dispendidos no sentido de determinar a maneira pela qual é feita a distribuição de fôrças trativas, ao longo da seção transversal de um conduto considerado. Dados a respeito desses estudos são encontrados na vasta documentação existente, sob a forma de grãficos ou tabelas.

Abordemos agora o caso geral de uma partícula situada em um ponto qualquer da seção de um conduto, no qual a água está em escoamento:

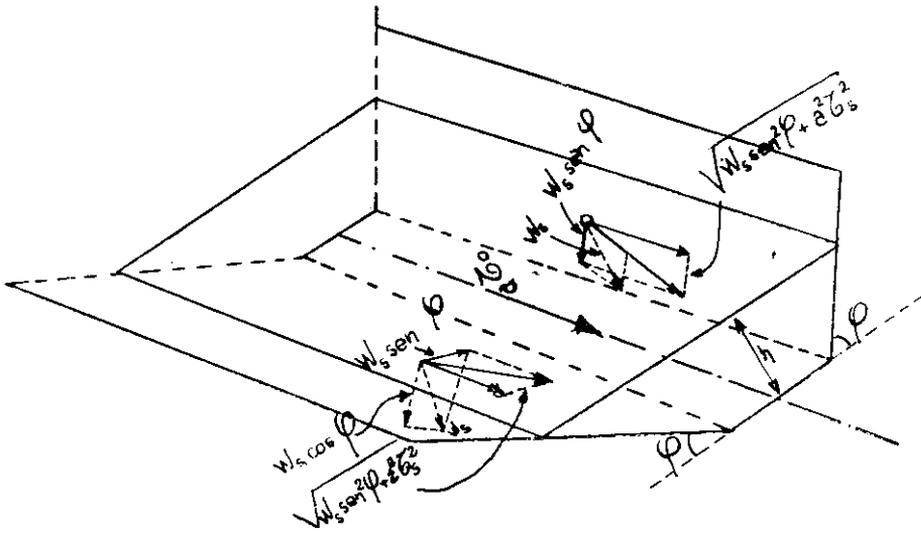


Fig. 2

Temos então a considerar duas forças que agem sobre essa partícula:

- a força trativa, cuja expressão já sabemos ser a τ_s ;
- uma componente da força da gravidade $W_s \text{ sen } \varphi$, que tende a fazer com que a partícula se desloque para baixo.

Nas expressões acima:

τ_s é a força trativa unitária, no ponto em que se acha a partícula;

W_s é o peso da partícula submersa;

φ é o ângulo de inclinação do lado do conduto com a horizontal.

As duas forças acima são perpendiculares entre si, e à sua resultantes tem para valor:

$$F = \sqrt{W_s^2 \text{ sen}^2 \varphi + a^2 \tau_s^2}$$

Quando a força acima é suficientemente grande, a partícula se desloca para baixo.

Considerando agora as leis da mecânica sobre o atrito, pode-se admitir que, no início do movimento, a resistência da partícula ao deslocamento é igual à força que tende a deslocá-la.

A resistência ao movimento é igual à força normal à superfície $W_s \text{ cos } \varphi$ multiplicada pelo coeficiente de atrito $\text{tg } \theta$, onde θ será o ângulo de talude natural do material da partícula, submerso.

Podemos então escrever:

$$W_s \text{ cos } \varphi \text{ tg } \theta = \sqrt{W_s^2 \text{ sen}^2 \varphi + a^2 \tau_s^2}$$

Resolvendo a expressão acima em relação à força trativa unitária, que tende a produzir o deslocamento da partícula no ponto considerado da seção, acha-se:

$$\tau_s = \frac{W_s}{a} \text{ cos } \varphi \text{ tg } \theta \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \varphi}{\text{tg}^2 \theta}}$$

Se considerarmos que a partícula está situada em uma superfície horizontal, tem-se, para $\varphi = 0$:

$$W_s \text{ tg } \theta = a \tau_s$$

e a força trativa terá então para expressão:

$$\tau_t = \frac{W_s}{a}$$

A relação entre τ_s e τ_L é denominada **relação de forças trativas** e a sua expressão será portanto:

$$K_v = \frac{\tau_s}{\tau_L} = \cos \phi \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi}{\operatorname{tg}^2 \theta}} = \sqrt{1 - \frac{\operatorname{sen}^2 \phi}{\operatorname{sen}^2 \theta}}$$

Vê-se então que a relação é função apenas do ângulo de inclinação da superfície e do ângulo de talude natural do material da partícula dentro d'água.

Evidentemente, este último ângulo é função das características do material da partícula e pode ser facilmente determinado experimentalmente.

Como consequência das deduções feitas, chega-se então à conclusão de que, de acordo com o conceito de força trativa, o deslocamento da partícula no conduto depende dos seguintes valores:

W_s = peso da partícula submersa;

a = área projetada da partícula, sobre um plano normal ao escoamento, que denominamos de área efetiva e que portanto está ligada às suas dimensões e à sua forma;

ϕ = ângulo de inclinação, com a horizontal, da superfície onde está situada a partícula;

θ = ângulo de talude natural do material da partícula submersa, função portanto das características desse material.

Ora, todos os elementos acima podem ser determinados ou fixados, e permitem que se estabeleça os seguintes valores:

— Força trativa crítica — Determinando as condições de início do movimento da partícula.

— Força trativa admissível — Deduzida do valor acima, como condição de projeto, correspondendo ao valor máximo da força trativa que não causará séria erosão do material que forma o leito do conduto, em uma superfície horizontal.

A experimentação desempenha evidentemente importante papel na determinação ou fixação dos valores acima.

Em torno do assunto que abordamos de modo tão simples portanto, largo trabalho experimental tem sido desenvolvido, sendo os resultados traduzidos sob a forma de tabelas ou gráficos, que são encontrados nas publicações especializadas. Tais elementos permitem pelo menos, ao engenheiro, ter uma base de partida racional e, tanto quanto possível segura, para a solução de um caso prático. Considere-se que, na nossa simples dedução não fizemos referência aos múltiplos e complexos fatores que influem no processamento do fenômeno abordado, preocupando-nos, apenas, com a sua realização e os seus resultados.

No nosso caso, julgamos suficientes apenas a considerações que fizemos.

III — A CONCEPÇÃO GERAL DO DISPOSITIVO

Feitas as considerações que julgamos necessárias para esclarecer o conceito de força trativa e procurando tirar partido de todas as ocorrências verificadas no processo de retenção do material de fundo de que pudéssemos lançar mão, para utilizar em nosso favor na concepção do dispositivo, chegamos à conclusão de que poderíamos empregar as seguintes noções, cuja adoção procuramos justificar nas páginas que se seguem:

- 1.º — A força trativa.
- 2.º — O conceito clássico de decantação.
- 3.º — A ação dinâmica de um escoamento sobre um corpo qualquer.

Passaremos portanto, em seguida a descrever a maneira pela qual associamos os conceitos acima, para empregá-los em nosso auxílio.

1.º — A força trativa

Já mostramos, nas páginas anteriores, como surgiu o conceito e indicamos como poderíamos dele lançar mão para determinar ou fixar condições de movimentação do material. Cumpre destacar o papel que desempenhará a experimentação, para a obtenção dos dados necessários à solução de qualquer caso real. De qualquer modo, com o precioso auxílio do laboratório, será perfeitamente possível obter os elementos necessários para o estabelecimento das condições desejadas, em qualquer situação.

Creemos não existirem dúvidas a respeito, face ao que foi exposto.

Poderemos, então, passar ao segundo conceito.

2.º — A sedimentação

Consideremos agora a noção fundamental que comanda o estabelecimento de um dispositivo qualquer, para retenção de materiais pelo princípio da sedimentação.

Observemos a figura abaixo, na qual representamos o processo a que está submetida uma partícula que se desloca em um conduto, sob a ação de um líquido que se escôa e que tende a se depositar de acôrdo com os princípios da sedimentação.

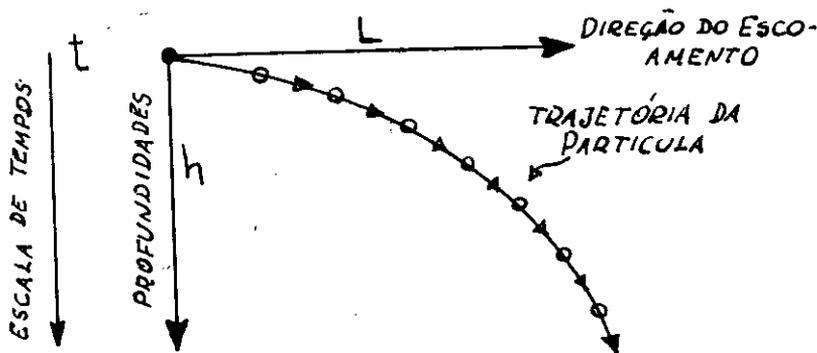


Fig. 3

Em consequência do surgimento das condições de processamento da decantação clássica, a partícula descreve uma trajetória, que pode ser referida a eixos coordenados segundo as direções indicadas, associando-se o movimento a uma escala de tempos.

Note-se que não nos preocupamos com as razões pelas quais a decantação se processa.

Admitimos apenas que ela se realiza segundo a condições indicadas, descrevendo a partícula uma trajetória, até atingir o fundo, o que é um fato incontestável, desde que existam as condições necessárias ao processamento do fenômeno, quaisquer que sejam elas.

Assim sendo, nada no impede de escrever as expressões que se seguem, e cujos valores podemos determinar experimentalmente:

$$t = \frac{h}{V_q}$$

Sendo V_q a velocidade de queda da partícula. Na situação mais desfavorável teremos uma velocidade V , de deslocamento da partícula no fundo do canal, cujo valor poderemos medir ou calcular, e que nos permitirá escrever:

$$L = V \times t = V \cdot \frac{h}{V_q}$$

Teremos portanto, à nossa disposição, os elementos acima.
Passemos a seguir ao 3.º conceito.

3.º — A ação dinâmica de um escoamento sobre um corpo

Poupamo-nos ao trabalho de demonstrar que o resultado da ação dinâmica de um líquido em escoamento sobre um corpo nele submerso, resulta de uma força ("drag") que tem para expressão:

$$F = C_{il} W_s a \frac{V^2}{2g}$$

na qual destacamos o conhecido coeficiente de forma C_{il} , que é uma característica do corpo considerado.

Abordados os 3 conceitos básicos nos quais nos apoiamos, passaremos agora a mostrar como os associamos, para a criação do dispositivo, por meio do qual desejamos obter os seguintes resultados:

- Reter o material de fundo, contido em uma camada de certa espessura.
- Encaminhar esse material retido para um depósito, do qual poderá ser facilmente retirado.

Para isso consideremos que, no fundo do conduto, abrimos uma fenda de seção retangular, formando um ângulo α com o eixo do canal, dotada de uma certa declividade de fundo β , que denominaremos de **fenda retentora**, e que vai ter a um pôço, situado ao lado do conduto, e que denominamos de **pôço de decantação**, conforme indicamos nas figuras abaixo:

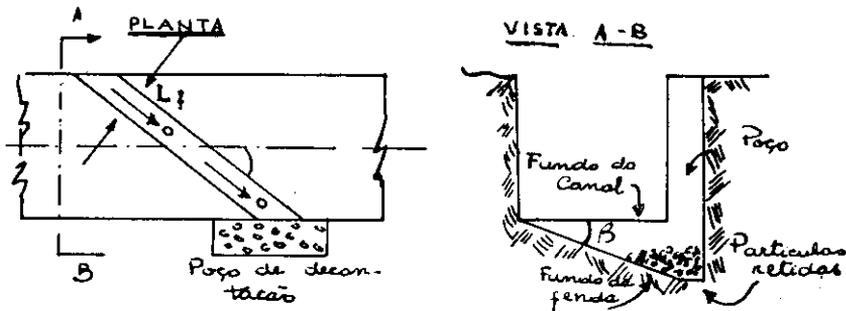


Fig. 4

Consideremos agora uma seção da fenda, cuja profundidade mínima denominamos de h_{min} , paralela ao eixo do canal, e analisemos o que se passará com uma partícula que atingir o seu bordo de montante, conforme representamos na figura.

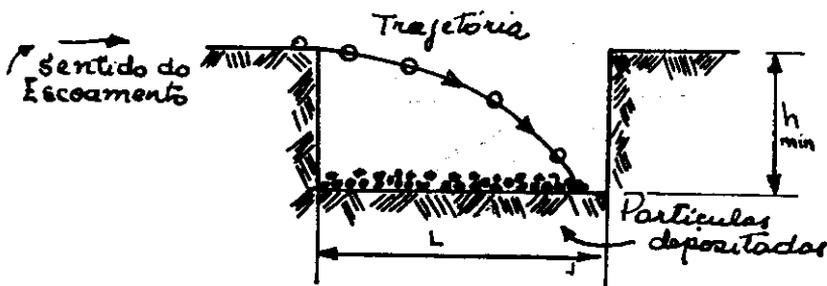


Fig. 5

De acôrdo com o que já deduzimos, podemos escrever:

$$L = V_r \cdot t = V_r \cdot \frac{h_{\min}}{V_q}$$

onde:

- L — é a largura da fenda, medida paralelamente ao eixo do canal;
- h_{\min} — é a profundidade mínima da fenda (situação mais desfavorável);
- V_q — é a velocidade de queda da partícula (sedimentação) que pode ser determinada experimentalmente ou pode estar tabelada;
- V_r — é a velocidade que tem a partícula ao atingir o bordo da fenda e que podemos considerar como sendo a velocidade do escoamento, **próxima do fundo** do canal.

Sendo L_f a largura da fenda, medida normalmente ao seu eixo, conforme indicamos na fig. 2, podemos escrever:

$$L_f = L \cos \alpha = V_r \cdot \frac{h_{\min}}{V_q} \cdot \cos \alpha$$

Com os artifícios de inclinarmos o eixo da fenda em relação ao eixo do canal (ângulo α) e de dar-lhe uma declividade β , passaremos a obter fôrças, decorrentes das próprias condições de escoamento, que indicaremos por vetores, cuja dedução iremos fazer e que, agindo sôbre a partícula, farão com que ela se desloque no interior da fenda, em direção ao pôço de decantação. Pelos princípios da decantação, vimos como a partícula, atingindo o bordo da fenda, animada de uma velocidade V_r , tende a se depositar no seu interior.

O 1.º vetor, que designaremos por F_1 , decorre da ação da fôrça trativa, atuando da maneira pela qual deduziremos, por meio das figuras que se seguem:

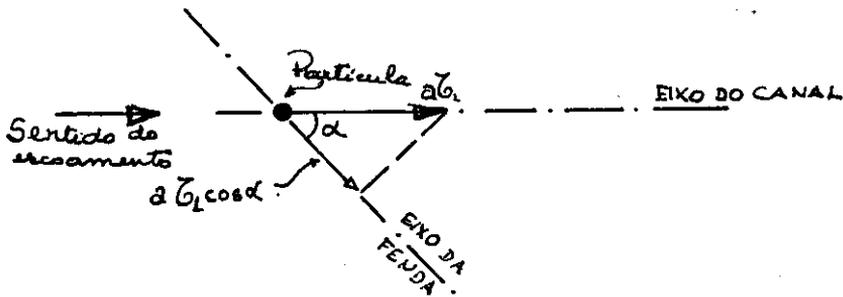


Fig. 6

Pela figura acima, vemos que poderemos obter uma componente horizontal da fôrça trativa, **agindo no sentido do eixo da fenda**, cujo valor será:

$$F_L = a \tau_L \cos \alpha$$

Este vetor no entanto poderá agir **segundo a declividade da fenda**, do modo indicado na figura abaixo, fazendo-se a sua decomposição conforme representamos:

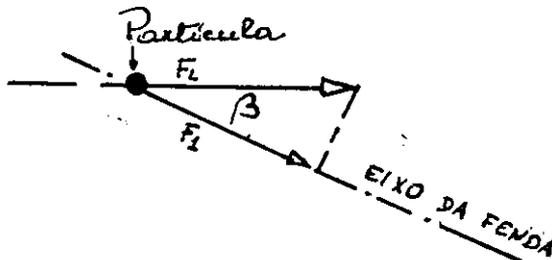


Fig. 7

Seu valor será:

$$F_1 = F_{11} \cos \beta = a \tau_1 \cos \alpha \cos \beta = a \frac{W_s}{a} t_x \theta \cos \alpha \cos \beta = W_s t_x \theta \cos \alpha \cos \beta.$$

Consideremos agora como agirá o peso da partícula submersa, quando esta se depositar no fundo da fenda por efeito da decantação, conforme mostramos. Será este o segundo vetor com que contaremos, para o deslocamento da partícula em direção ao pôço e que designaremos por F_2 , conforme mostramos na figura que se segue:

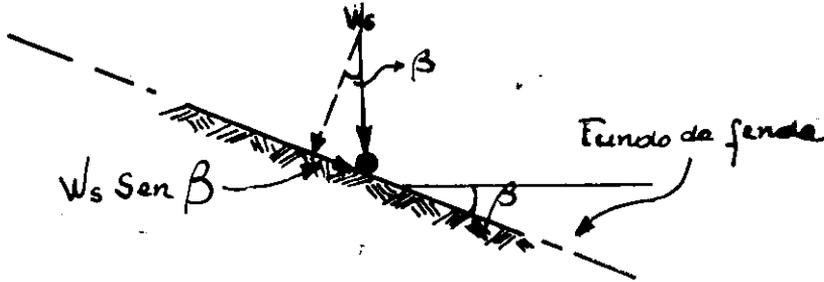


Fig. 8

Seu valor será:

$$F_2 = W_s \text{ sen } \beta$$

Até agora então, com base no que demonstramos, já obtivemos dois vetores F_1 e F_2 , cujos valores já deduzimos e que agirão no mesmo sentido, na direção do eixo da fenda, fazendo com que a partícula se desloque no interior da fenda, em direção ao pôço, tudo dependendo apenas dos valores fixados e das grandezas postas em jôgo.

Falta-nos então lançar mão do 3.º conceito citado, ou seja da ação dinâmica de um escoamento, para obtenção de um 3.º vetor, que designaremos por F_3 .

Para isso, agindo com o auxílio da experimentação, empregamos o seguinte artifício:

— produzimos, no interior da fenda, um escoamento secundário, que nada tem a ver com o que está se efetuando no canal. Mostraremos a seguir, a maneira pela qual podemos obter esse escoamento na prática. Tal efeito será realizado pela colocação, no pôço de decantação, de um conduto auxiliar que denominamos de **conduto de purga**, cuja necessidade e cuja ação iremos demonstrar e que, retirando líquido do pôço da maneira pela qual mostraremos, provocará o escoamento desejado no interior da fenda. Para maior clareza, observemos a situação esboçada na figura abaixo.

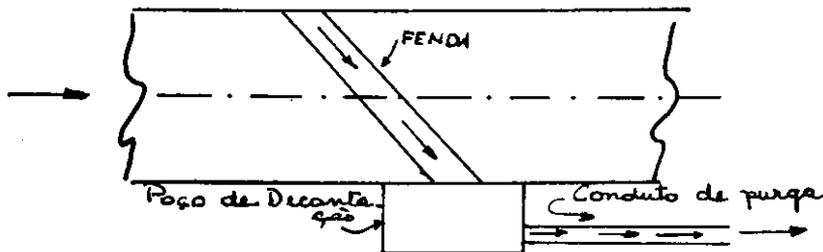


Fig. 9

O funcionamento do conduto em aprêço poderá ser obtido de várias maneiras, dentre as quais destacamos:

- por simples diferença de níveis;
- por sifonamento;
- por bombeamento.

O conduto além de proporcionar o efeito desejado, tem grande importância prática, principalmente quando o sistema de retenção de partículas funcionar em condutos de esgotos, como será um dos casos mais comuns na prática: ele garante uma renovação de líquido no interior do pôço, permitindo que este seja mantido em condições adequadas de sanidade, impedindo a estagnação, assegurada que fica a constante renovação.

Nos casos reais temos agido normalmente por sifonamento, ligando o conduto de purga à jusante, em nível mais baixo, a um conduto emissário.

Queremos, no entanto, destacar aqui que o vetor F_3 não é indispensável ao funcionamento da fenda, pois que ele poderá se dar apenas com a ação sempre presente de F_1 e F_2 . No entanto, conforme a prática tem demonstrado, ele concorre para aumentar sensivelmente a eficiência do dispositivo e apresenta, através da instalação do conduto de purga, as vantagens que citamos.

Quanto a expressão algébrica do vetor, já referida anteriormente, será ela:

$$F_3 = C_1 W_s a \frac{V_f^2}{2g}$$

Agindo largamente a favor da segurança, podemos fazer:

$$C_1 = 1$$

Por outro lado, como critério para dimensionamento e cálculo do conduto de purga, resolvemos fixar a seguinte condição, plenamente comprovada pela experimentação:

— o escoamento na fenda, produzido pela ação do conduto de purga, deverá ser tal que seja capaz de provocar, em uma seção média da fenda, uma velocidade média igual a V_f ; ora, se V_f já era capaz de produzir a movimentação das partículas no fundo do conduto normal, com muito mais forte razão essa velocidade movimentará as partículas no interior da fenda, onde as condições de movimentação são muito mais favoráveis, principalmente devido ao valor da declividade que é muito maior do que a do conduto principal.

A expressão para F_3 passará a ser portanto:

$$F_3 = W_s a \frac{V_f^2}{2g}$$

Concluindo o presente item, no qual procuramos justificar a concepção teórica do funcionamento da fenda, vimos que as partículas se movimentarão no seu interior, em direção ao pôo, sob a ação de uma força total F , cuja expressão geral será:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = W_s t_g \theta \cos \alpha \cos \beta + W_s \sin \beta + W_s a \frac{V_f^2}{2g}$$

Note-se, na expressão acima, que uma associação judiciosa de condições de projeto, de características do material a reter, de condições do escoamento e de determinações experimentais, poderá conduzir, de modo seguro, ao projeto adequado do dispositivo. No final deste trabalho faremos algumas considerações sobre valres a adotar para os elementos acima, fruto das aplicações que temos realizado em casos reais, com pleno sucesso.

IV — A CAMADA A RETER — O DEFLETOR

Não fica no que revelamos, a obtenção da eficiência da fenda retentora.

Ao tratar de casos reais, tivemos problemas adicionais, que passaremos a mencionar e a mostrar a maneira pela qual foram resolvidos, aumentando, ainda mais, a eficiência da fenda.

Três perguntas de ordem prática surgiram na aplicação em casos reais:

- a) Como fixar a espessura da camada a reter?
- b) Como assegurar a manutenção dessa espessura, relacionada com as características do escoamento?

- c) Como encaminhar, da melhor maneira possível, as partículas para o interior da fenda, facilitando a obtenção dos efeitos citados?

Procuraremos respondê-las nas linhas que se seguem, abordando-as separadamente.

a) A espessura da camada a reter

Sabem, aqueles que nos lêem e que são especialistas no assunto que, conforme dissemos no início, é impossível, à luz da teoria, determinar, com exatidão, a que altura ou profundidade se dará a separação entre o material de fundo e o material em suspensão.

Procuramos então, no intuito de bem determinar as possibilidades de retenção do dispositivo, fixar, por meio da experimentação, um critério razoável e coerente que nos permitisse estabelecer a espessura da camada, a adotar nos casos práticos.

As observações e as medidas realizadas, fruto de um laborioso e demorado trabalho de pesquisa, levaram-nos à conclusão de que, para aplicação da fenda, a espessura da camada pode ser fixada em $h/5$, sendo h o tirante de água na situação considerada.

O valor em aprêço, como dado de ordem prática, é perfeitamente coerente com o resultado das determinações feitas por outros pesquisadores.

Vencemos, assim a primeira dificuldade, face à coerência dos resultados obtidos.

b) A obtenção da espessura da camada

Procurando dotar a fenda de maior eficiência ainda, lembramo-nos de que o valor acima não poderia ser rígido e estava, naturalmente, sujeito a variações como decorrência de modificações nas condições de escoamento no conduto, variando portanto o tirante considerado.

Tratamos então de idealizar e ensaiar um dispositivo, que nos permitisse fazer uma verdadeira separação entre o material que deveria passar em suspensão, pela limitação das camadas segundo o critério estabelecido. Utilizamos, para isso, o canal de ensaios do laboratório, com paredes de vidro, no qual estudamos e comparamos dispositivos os mais variados, que nos permitissem a obtenção do efeito desejado. Cada dispositivo idealizado era então submetido a ensaios e verificações, nas condições mais diversas.

Depois de uma pesquisa meticulosa, chegamos à concepção de uma placa defletora ou defletor basculante, com a disposição esquematizada na figura.

Foram excelentes os resultados obtidos, com a grande vantagem de aumentar consideravelmente a eficiência da fenda.

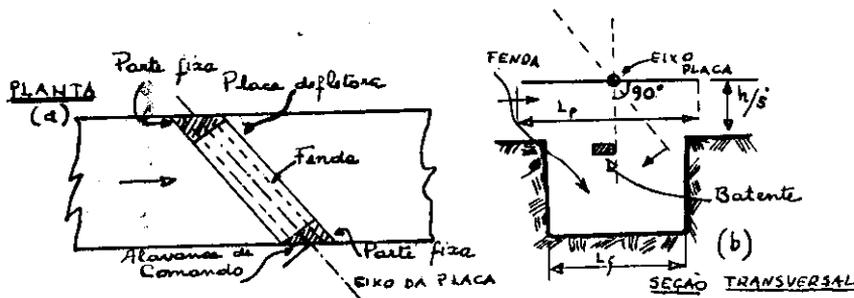


Fig. 10

Conforme indicam as figuras, trata-se de uma placa metálica basculante, tendo duas partes laterais fixas, com largura superior à da fenda e que pode girar de 90° em torno de um eixo horizontal, comandada por uma alavanca.

Na sua posição vertical, parte da placa penetra no interior da fenda, sendo o limite de giro fixado por meio de um batente.

A placa na horizontal, fica distante do fundo do canal de $h/5$, para o h máximo previsto.

Considerando-se que a placa, ao girar, deve passar com seu bordo a 5 cm do bordo da fenda, como medida de ordem prática, uma simples dedução geométrica nos fornece para valor da largura da placa em metros:

$$L_p = 2 \left(\sqrt{\frac{h^2}{25} + \frac{4}{9} L_f^2} - 0.05 \right)$$

Conforme a situação, o defletor será inclinado mais ou menos entre as posições extremas horizontal e vertical, permitindo portanto, a separação das camadas com o critério indicado, função dos valores de h .

A experimentação revelou que quanto maior fôr a vazão, tanto mais próxima da horizontal deverá estar a placa, como seria lógico concluir.

c) O encaminhamento do material

O que foi explicado na letra anterior é suficiente para dar resposta à presente questão. A placa defletora aumenta consideravelmente a eficiência da fenda e permite, pela sua manobra, que a fenda se adapte melhor a cada situação de escoamento.

Foi ela o Ovo de Colombo de que necessitávamos para a complementação do nosso dispositivo. Uma análise mais profunda do problema, certamente nos levaria à conclusão do surgimento de forças adicionais, agindo em nosso favor, por ação da placa defletora.

V — A RETIRADA DO MATERIAL RETIDO

Uma vez assegurada a captação do material e o seu encaminhamento para o pôço, preocupamo-nos com a maneira pela qual seria daí retirado, pois que poderia vir a ficar situado, conforme o caso, até a alguns metros de profundidade.

Impunha-se portanto elevar o material e colocá-lo depois em um veículo para ser transportado.

Ensaíamos, assim, vários processos que poderiam ser aplicados no caso, tais como:

- 1 — Bombeamento comum.
- 2 — Bombeamento tipo "air lift".
- 3 — Emprêgo de um dispositivo tipo parafuso de Arquimedes.
- 4 — Utilização de uma bomba injetora.
- 5 — Emprêgo de um transportador rolante, com esteira ou caçambas.

Entre todos, foi verificado que os dois últimos eram os melhores, razão pela qual analisaremos apenas êstes, poupando-nos ao trabalho de citar os inconvenientes apresentados pelos demais.

Cada dispositivo foi analisado, tanto quanto possível, teórica e experimentalmente.

a) Bomba injetora

A bomba injetora é a mais adequada à limpeza de caixas situadas em locais de pouco espaço, tais como logradouros públicos.

Trata-se de um conjunto móvel, instalado sôbre um caminhão, que poderá fazer a limpeza de várias caixas em pouco tempo.

A figura 11 indica esquemáticamente como seria o dispositivo utilizado.

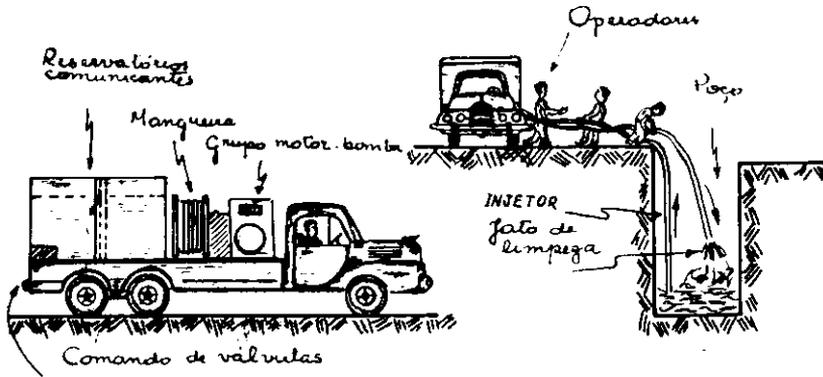


Fig. 11

Conforme se verifica, sôbre o chassi do veículo encontram-se instalados um motor de acionamento da bomba, a bomba própria dita e dois tanques que se comunicam entre si por meio de um sistema de filtragem. Formando o sistema injetor e de retirada de detritos, existe uma tubulação com válvulas, da qual faz parte uma mangueira de 4 polegadas de diâmetro, tipo mangote, que serve como tubulação de sucção quando colocada no pôco. Existe também uma mangueira auxiliar, de menor diâmetro, por meio da qual pode-se fazer incidir um jato de água no fundo do pôco, com a finalidade de revolver o material ali depositado, facilitando a retirada por aspiração. Um sistema de válvulas permite a inversão do escoamento na mangueira grande, a fim de expelir qualquer detrito de maiores dimensões que por acaso venha a ficar retido no seu interior.

Em um dos tanques fica depositada a água que circula através do sistema, enquanto que no outro fica o material retido, retirado do pôco.

Existem fabricantes do material em aprêço que já o fornecem devidamente montado e apresentando as características necessárias.

Assistimos, em Nova York, a uma demonstração de limpeza de caixas com o auxílio de um equipamento do tipo em aprêço, na qual o sistema funcionou ôtimamente, tendo sido as caixas limpas em 10 minutos aproximadamente, cada um. As profundidades atingidas eficientemente pelo dispositivo vão até cêrca de 10 metros.

Com base no sistema geral idealizado há possibilidade de introdução de certas modificações, visando adaptá-lo a determinadas situações especiais.

b) O transportador rolante

Será mais adequado para locais onde se disponha de um certo espaço para a instalação. A figura indica esquemáticamente como é feita a instalação.

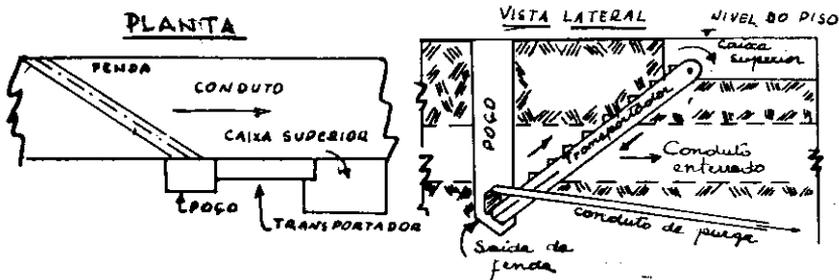


Fig. 12

Como vemos, o material encaminhado para o pôco através da fenda cai diretamente sôbre o transportador, que o eleva, lançando em uma caçamba de caminhão ou em uma caixa especial, que pode ser depois levantada, para depositar o conteúdo sôbre o veículo de coleta.

O sistema idealizado e experimentado é bem simples, composto de peças padronizadas para instalação em qualquer local, e que podem ser retiradas facilmente para fins de manutenção e limpeza.

No caso em apreço portanto, cada caixa de areia dispõe de seu próprio transportador. A produção e o rendimento são bem maiores do que no caso do injetor.

Deixamos de entrar em maiores detalhes a respeito, para não alongar demasiadamente o presente relato.

Podemos porém afirmar que o sistema também foi ensaiado e analisado cuidadosamente, sendo plenamente aprovado.

VI — DETALHES GERAIS E FINAIS

Evidentemente, em um trabalho da natureza do que estamos apresentando, cujo objetivo é dar uma idéia geral do estudo realizado, não podemos entrar em maiores detalhes, para que não fique muito longo.

No entanto, antes de terminar, desejamos encerrar certos aspectos do estudo feito, que julgamos útil acrescentar, como complementação.

Passemos portanto a abordá-los.

a) Características da fenda

Conforme vimos, a experimentação desempenha importante papel no projeto e, de acordo com o que foi exposto, verificamos que, para o dimensionamento adequado, torna-se necessária a obtenção dos seguintes dados:

- 1 — Características do material a reter quanto a propriedades físicas:
 - composição granulométrica;
 - constituição;
 - condições de sedimentação;
 - ângulo de talude natural, quando submerso;
 - disposição no conduto em escoamento, segundo diferentes camadas;
- 2 — Elementos referentes a fenda, para que ela funcione com a eficiência necessária tais como:
 - profundidade mínima;
 - largura (L_f);
 - ângulo com o eixo do conduto (α);
 - declividade (β), normalmente igual ao ângulo de talude do material a reter.

No entanto, as fórmulas apresentadas, associadas à experimentação e as medidas e observações locais, de fácil realização, conduzem seguramente à obtenção das características necessárias.

Podemos assegurar ser perfeitamente possível a obtenção de todos os dados necessários.

b) Características do conduto

Não há limitações quanto às condições do conduto no qual será feita a retenção.

Ele poderá ter qualquer forma de seção, com perímetro fechado ou aberto.

Poderá estar em qualquer situação, enterrado ou na superfície. Ao contrário do que ocorre na retenção clássica por decantação, não existem limitações quanto a velocidades de escoamento ou vazões.

Não há necessidade de espaço especial, pois que a fenda é realizada no próprio conduto e o poço de retenção ocupa área mínima. Todo o sistema poderá ficar abaixo do nível do piso do logradouro.

c) Características da instalação

Conforme vimos, o sistema realizado é bastante simples e a manutenção é muito fácil, ao contrário de outros dispositivos ou instalações que têm sido idealizados.

A fenda poderá ser disposta de várias maneiras, das quais indicamos alguns esquemas abaixo, permitindo retenção de maior ou menor quantidade de material e até a sua **separação de acordo com as propriedades granulométricas**, bastando apenas, para isso, variar as características da fenda ou seja: L , α e β .

Eis algumas disposições que poderão ser adotadas, conforme o caso:

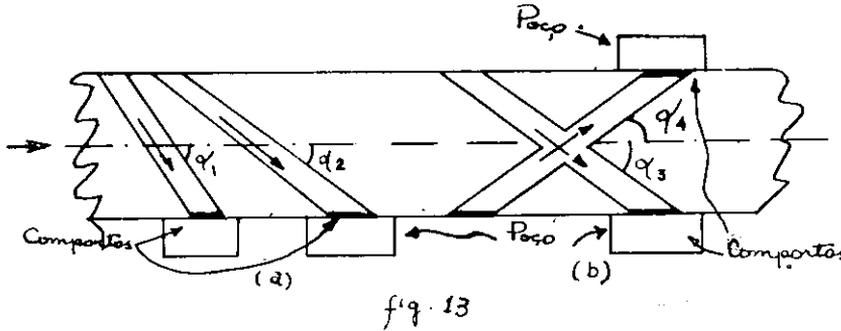


Fig. 13

No caso **a** poderemos dispor de várias fendas escalonadas, com características diferentes, retendo materiais diferentes ou com características idênticas, fazendo-se a retenção sucessiva, para maior eficiência.

No caso **b** temos a retenção em duas direções, também com características iguais ou diferentes, com maiores possibilidades de retenção.

Um detalhe a destacar é a colocação de comportas na entrada dos poços, conforme está indicado nas figuras. Isso permite pôr a fenda fora de funcionamento quando se deseja isolar o pôço, que poderá ser então esgotado para fins de manutenção. Um detalhe prático também importante é a colocação de grades a montante das fendas, para protegê-las contra o afluxo de detritos anormais de grandes dimensões. Evidentemente tais grades devem ser removíveis, para fins de manutenção.

Outras minúcias e detalhes construtivos e operacionais foram objeto de cogitações e de análise dos nossos estudos. Deixamos de mencioná-los para não alongar demais o presente relato.

Não restam sombras de dúvidas quanto à exequibilidade e ao funcionamento da fenda, repetimos mais uma vez. Todo o projeto foi apoiado em minuciosa experimentação. Cada detalhe, cada dispositivo concebido, foi cuidadosamente experimentado.

VII — CONCLUSÕES FINAIS

Esperamos haver, com o presente trabalho, obtido solução bastante simples, em moldes inteiramente originais, para o importante problema de retenção de matérias sólidas no fundo de um conduto livre qualquer.

Julgamos que o princípio de retenção por nós idealizado constitui idéia inteiramente nova, que resolvemos denominar de **retenção dinâmica de partículas**, pois que aproveitamos as **próprias forças que agem no escoamento** para realizar a retenção e o encaminhamento do material, agindo portanto a nosso favor.

Não temos a menor dúvida quanto à eficiência do sistema, pois que ela foi comprovada experimentalmente, em seus menores detalhes.

Nos nossos trabalhos de laboratório, para bem constatar o afluxo das partículas ao pôço, executamos um modelo reduzido do conjunto, no qual colocamos uma janela de vidro no fundo do pôço, que iluminamos com um potente refletor. Era impressionante a chegada de partículas.

O ângulo da fenda em relação ao eixo do canal, que se situa em tórno de 30° foi obtido fazendo a fenda girar de 0 a 90° e verificando a situação de maior eficiência.

Todos os dispositivos adotados foram igualmente ensaiados.

Os trabalhos ora descritos foram executados durante aproximadamente um ano e meio, no laboratório de Hidráulica do Instituto Militar de Engenharia, no Rio de Janeiro, do qual exercemos a chefia.

Tratando-se, conforme dissemos, de assunto inteiramente original, estamos requerendo a sua patente.

Estamos no entanto ao dispor dos que se interessarem pelo assunto, para aplicação em qualquer situação real, como é o caso do que está sendo feito no nôvo planejamento da rede de esgotos da cidade do Rio de Janeiro, onde as fendas retentoras serão utilizadas.

Anexamos ao presente trabalho algumas fotografias do trabalho experimental e uma pequena lista bibliográfica das principais obras em que nos apoiamos. Rendemos nossas homenagens aos autores dos citados trabalhos pelos degraus definitivos que conseguiram estabelecer, para a solução do complexo problema do transporte sólido na Hidráulica.

Esperamos haver, com o trabalho relatado, prestado uma modesta porém real contribuição para a solução do problema de retenção de matérias sólidas carreadas no fundo de condutos, com a consequente proteção de instalações situadas a jusante.

Muito honrados ficaremos se o nosso trabalho conseguir despertar a atenção daqueles que o lerem e servir como incentivo ou exemplo para aqueles que, como nós, tiverem as suas atividades voltadas para os belos, vastos e atraentes campos da experimentação nos domínios da Mecânica dos Fluidos.

Que nos perdoem os grandes matemáticos se, abordando problema tão complexo, chegamos a solução tão simples, com o emprêgo de fórmulas tão fáceis.

Conforme dissemos, embora respeitando e conhecendo a teoria, procuramos nos concentrar na objetividade do estudo, lançando mão apenas das expressões matemáticas que julgamos suficientes para bem esclarecer o que fizemos.

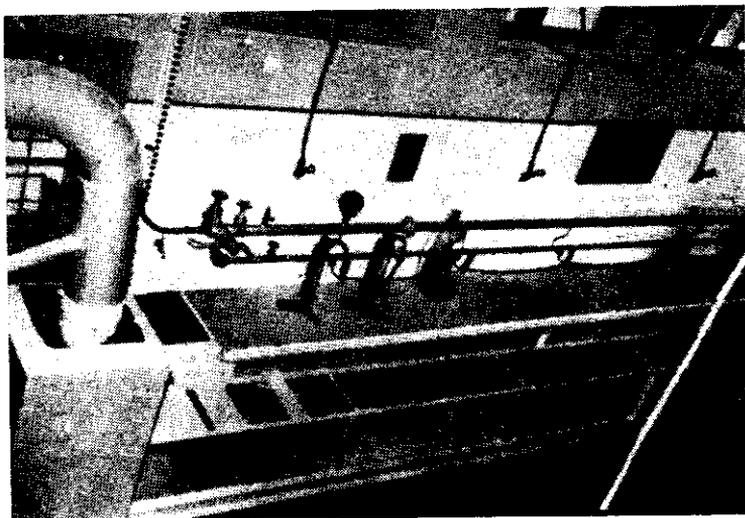
Aqueles que desejamos verificar a maneira pela qual sentimo-nos seguros ao aplicar fórmulas tão simples e quiserem se deixar empolgar pela beleza das deduções e dos aspectos teóricos do problema, magistralmente apresentados, poderão consultar os autores citados, aos quais demos todo o crédito de que são merecedores e sem cujo apóio não nos sentiríamos devidamente seguros para apresentar o resultado dos nossos estudos de modo tão simplificado.

Repetí-los julgamos, seria encher papel, seria mera perda de tempo e espaço, neste trabalho no qual estamos condicionados pela limitação de páginas imposta. Assim fazendo, além disso, iríamos roubar-lhes o mérito do trabalho executado, sem cujo apóio, repetimos, não nos atreveríamos a mencionar certas conclusões.

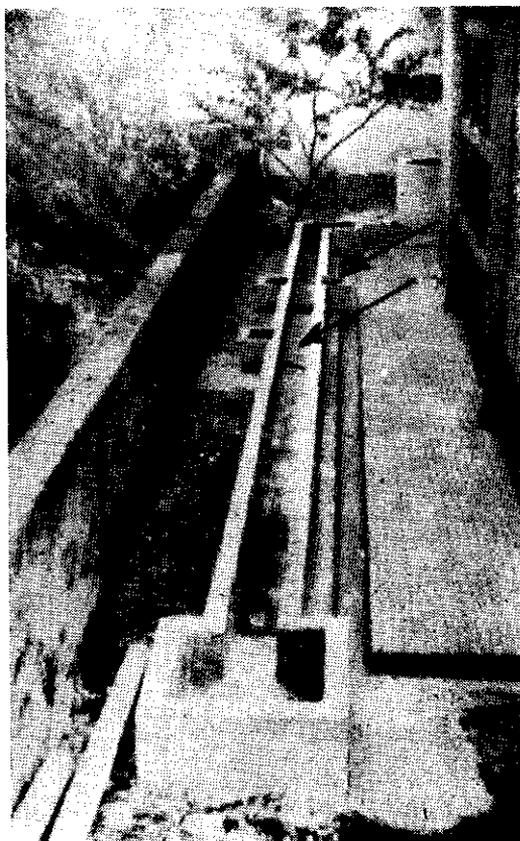
Estamos seguros de que a **retenção dinâmica de partículas** sob o aspecto aplicado é uma novidade e uma realidade, razões pelas quais temos a modesta pretensão de apresentar as **fendas retentoras**, como um passo nôvo e definitivo no problema da retenção eficiente e efetiva de materiais carreados, no fundo de condutos em escoamento.

BIBLIOGRAFIA

- 1 — LAMB — "Hydrodinamios" — Londres — 1932 — 6a. Edição.
- 2 — VEN-TE-CHOW — "Open Channel Hydraulios" — Mc — Graw Hill Book Company — New York — 1961.
- 3 — DR. HERMANN SCHLINCHTING — "Boundary Layer Theory" — Mc Graw Hil Book Company — New York — 1960.
- 4 — VICTOR L. STREETER — "Fluid Dynamics" — Mc-Graw Hill Book Company — New York — 1961.
- 5 — VITO A. VANONI, NORMAN H. DROOKS AND F. KENNEDY — "Lecture Notes on Sediment Trasportation and Channel Stability" — W M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources — California Institute of Technology — Pasadena — California-Report No KH — R — 1 — Janeiro, 1961
- 6 — J. O. HINZE — "Turbulencoe" — Mc Graw — Hill Book Company — New York 1959.
- 7 — Foram ainda consultados trabalhos avulsos dos seguintes autores: Hunter Rouse, E. W. Lane, H. A. Einstein, E. Meyer Peter, V. A. Vanoni.



Um dos canais do Laboratório onde foi realizada uma parte dos trabalhos



Outro canal (externo) onde também foram feitos os estudos. As setas indicam as fendas, notando-se, ao lado, os poços de retenção.