

# Aplicação da Tensão Trativa Mínima ao transporte hidráulico de sólidos em tubulações (\*)

Ramón Reinaldo Contreras Correa (1)

## 1 Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar o Método da Tensão Trativa Mínima (TTM) para o projeto das canalizações de águas residuárias, método que oferece claras vantagens sobre o convencional, ao usar elementos de cálculo que permitem visualizar e desenvolver o sistema em projeto de um modo melhor que o que se tem conseguido com o método das velocidades mínimas para evitar o depósito de sólidos nas canalizações de águas servidas.

Do exposto, se deduz a conveniência de aplicar o método da TTM em consideração à sua maior funcionalidade ao utilizar diretamente as variáveis que configuram as características do escoamento.

Em sua apresentação se desenvolvem alguns critérios e conceitos físicos orientados no sentido de considerar as águas servidas dentro das formas menos complexas das misturas utilizadas no Transporte Hidráulico de Sólidos por Tubulações. Incluem-se as fórmulas e metodologia de cálculo em uma das aplicações práticas realizadas pelo autor.

## 2 Introdução

Até há alguns anos, as características hidráulicas da maior parte das canalizações de águas servidas eram definidas aplicando-se velocidades mínimas de autolavagem da ordem de 0,6 m/s e, excepcionalmente, de até 0,45 m/s (condicionando-se os valores citados a determinadas alturas do líquido, inclinação, frequência da vazão mínima e coeficiente de rugosidade do material selecionado).

Estes cálculos, no caso específico das canalizações de esgotos domésticos, devem ser complementados com novas variáveis quando uma só canalização não for suficiente para conduzir a vazão máxima sem sacrificar o limi-

te de segurança fixado de modo a garantir a velocidade de limpeza à vazão mínima. Neste caso é permitido considerar a aplicação de velocidades mínimas da ordem de 0,45 m/s, sempre que velocidades menores sejam muito pouco frequentes. Além disso, deve-se considerar que o efeito de limpeza proporcionado por vazões mais altas pode depender da capacidade de escoamento da canalização isenta de depósitos sólidos.

Este método de cálculo convencional tem sido ultimamente complementado e substituído em casos específicos pela aplicação do conceito da Tensão Trativa Mínima (\*), exposto detalhadamente nos capítulos seguintes integrando-se, além disso, alguns conceitos do Transporte Hidráulico de Sólidos (THS), desenvolvido recentemente com muito acerto pela Hidráulica Industrial para misturas bifásicas.

Este último método apresenta a vantagem de poder estudar os esgotos como um fluxo de sólidos em suspensão homogêneo ou heterogêneo, segundo seja o seu comportamento hidrodinâmico, nas formas mais simples que se costuma classificar os fluxos de misturas de acordo à forma em que são arastadas as partículas sólidas. Por sua vez, a aplicação da TTM permite empregar, diretamente, no dimensionamento das canalizações, elementos de fácil manejo e interpretação, tais sejam o número de Reynolds, raio hidráulico, peso específico, viscosidade cinemática, perda de carga, inclinação e outros.

Além disso, deve-se mencionar que, dentro da Engenharia moderna, tem-se registrado um notável avanço no transporte hidráulico e pneumático, desenvolvimento em que teve especial participação o setor industrial. Este desenvolvimento teórico e prático torna-se manifesto ao considerar que, já em 1982, celebrou-se a 8.ª Conferência Internacional do Transporte Hidráulico por Tubulações (Johannesburg — África do Sul).

## 3 Águas residuárias

### 3.1 Classificação e características

Denominam-se águas residuárias (águas servidas ou esgotos) os líquidos efluentes de uma comunidade, classificando-se segundo sua origem em domésticos ou sanitários, industriais e pluviais.

As águas residuárias domésticas, apesar de apresentarem notória variação de vazão, como consequência da sua origem nas atividades humanas, são relativamente estáveis em sua composição quando existe controle do consumo de água domiciliar, sendo essencialmente orgânica. Por sua vez, as águas servidas das indústrias podem também apresentar um conteúdo estável, mas sua vazão é função das jornadas de trabalho e sequências de processo, sendo sua composição resultado da tecnologia e do produto elaborado, podendo variar sua matéria de orgânica a mineral, sendo geralmente mais ricas em sólidos minerais. Com relação às águas pluviais, estas são marcadamente intermitentes e sazonais, correspondendo àquela parte das chuvas que escoam superficialmente lavando a superfície dos centros povoados, tendo, além disso, sua composição variável em função da duração das chuvas e tendo alguma semelhança aos esgotos domésticos somente no início do escoamento.

As águas servidas apresentam, em geral, características variáveis conforme a sua origem, ao tipo de canalização (unitário, separador ou misto), à hora de produção ou da tomada da amostra, à extensão da rede coletora, ao estado de conservação da mesma e, inclusive, ao maior ou menor consumo de água no lugar.

É difícil conseguir que as redes transportem um só tipo de águas residuárias posto que, mesmo nas comunidades urbanas residenciais, existe uma mínima contribuição industrial e algumas conexões clandestinas de águas pluviais.

Os esgotos industriais apresentam-se, por sua vez, algumas vezes acompanhados de esgotos sanitários gerados pelo pessoal que nelas trabalham.

(\*) Trabalho apresentado no "XIX Congresso Interamericano da Ingeniería Sanitaria y Ambiental", Santiago do Chile, 1984.

(1) Engenheiro da Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias (Emos) - Santiago, Chile.

É usual o recebimento de alguns resíduos industriais na rede pública, com a aplicação prévia de processos que tendem a evitar a ocorrência de obstruções, prejuízos por corrosão e outros (para o qual devem cumprir com determinadas exigências regulamentares, estabelecidas pelas autoridades).

Para efeito do presente trabalho, serão consideradas somente as águas residuárias domésticas, referindo-se a elas genericamente sem especificar seu tipo, exceto casos específicos em que sua diferente condição será destacada.

### 3.2 Composição e detritos sólidos

A composição das águas servidas é de 99,9% de água e 0,1% de sólidos dissolvidos e em suspensão (1.000 ppm), estando tais sólidos constituídos por cerca de 70% de matéria orgânica (proteínas, gorduras e carboidratos) e 30% de matéria inorgânica (areias, sais e metais) (7).

O conteúdo destes materiais faz com que os esgotos tenham um peso específico levemente superior ao da água (1,001 kg/m<sup>3</sup>), pequena diferença que permite aplicar ao seu escoamento as mesmas leis e princípios da água, tanto nos canais e canalizações em lâmina livre como nos condutos sob pressão (20).

Geralmente e em sentido literal, denominam-se "detritos sólidos" aquelas partículas de areia, pedregulho ou outras partes minúsculas de matéria mineral; esta definição se estende para o caso de águas residuárias a um grande número de materiais como sementes e outros parecidos que não são de origem animal.

Estes materiais apresentam duas características básicas: não estão sujeitos à putrefação e têm uma velocidade de decantação marcadamente superior à daqueles sólidos orgânicos putrescíveis.

Deste modo, os primeiros são geralmente a causa da obstrução de tubos ou canais, nas mudanças de direção da canalização.

Os detritos sólidos podem incluir areia, lodo e cascalho provenientes de ruas não pavimentadas ou com defeitos nos pontos de coleta de águas servidas, contendo, em alguns casos, uma grande variedade de escombros que são arrastados dos pavimentos das ruas. A grande maioria deles é de origem doméstica, tais como cascas de ovos, grãos, ossos e material similar, existindo uma clara tendência a

umentar sua importância, como consequência do crescente uso de trituradores domésticos.

Como se sabe, o tamanho e a densidade das partículas de detritos sólidos, assim como a temperatura do fluido, afetam a velocidade com que os sólidos sedimentam; neste sentido os parâmetros de projeto comumente usados para definir as câmaras de remoção de detritos sólidos estão baseados em uma densidade de 2,5 (g/cm<sup>3</sup>) e uma temperatura de 15°C, mesmo que seja comum a existência de uma grande diferença entre os valores da densidade média de detritos sólidos em diferentes cidades. Esta, em alguns casos, tem variado entre 1,4 e 2,7 g/cm<sup>3</sup>, enquanto que o diâmetro do material varia geralmente de mais fino que 10 micra (argila coloidal) até 2 cm (cascalho grosso) (8).

Com relação à densidade dos sólidos sujeitos à decomposição toma-se como referência a densidade de 1,2 g/cm<sup>3</sup> (6).

## 4 Movimento de sólidos e líquidos

### 4.1 Conceitos, propriedades e relações

O movimento de um corpo através de um líquido origina um certo grau de resistência do líquido ao deslocamento, que interfere com os efeitos do regime hidráulico existente e outros próprios do sistema. Tal regime depende, entre outros, dos conceitos, propriedades e relações expostos nos itens seguintes.

#### A. Viscosidade, atrito e perda de carga contínua

Uma propriedade dos fluidos é a de deformar-se sob a ação de forças exteriores, por pequenas que estas sejam, opondo resistência à deformação por existência da viscosidade que retarda a deformação. A partir desta, pode-se estimar a resistência ao deslizamento das massas fluidas como "componentes tangenciais" das tensões que se anulam ao repouso, denominadas por analogia com os sólidos de Atrito Interno (1).

Este atrito é a origem das ações de resistência ao movimento e absorve energia no escoamento dos líquidos, que avaliada como energia por unidade de peso (Bernoulli), denomina-se Perda de Carga Contínua ou atrito hidráulico.

Deve-se destacar que a perda de carga contínua aparece por causa da viscosidade e da turbulência.

#### B. Resistência dos fluidos ao esforço de corte

A viscosidade é uma medida da resistência do fluido ao esforço de cisalhamento, quando o fluido se move. Esta resistência se manifesta nos líquidos reais sempre que uma camada sobre outra produz esforços tangenciais importantes. Todos os fluidos apresentam viscosidade (a qual é originada preliminarmente pela interação de suas moléculas), ainda que a maior ou menor importância de seu efeito no fluxo dependa do tipo de líquido e da situação ou configuração física (regime de escoamento) em que se apresenta.

#### C. Regime laminar

O regime laminar é aquele no qual a perda de carga se deve exclusivamente a esforços viscosos, sendo possível resolver seus problemas teoricamente a partir da respectiva equação de Newton. Este regime se apresenta somente em canalizações de pequeno diâmetro, com velocidades muito baixas ou então com fluidos de alta viscosidade.

A lei de Newton da viscosidade expressa que a Tensão Tangencial ou Tensão de Corte "T" é igual ao produto da viscosidade dinâmica (ou absoluta "μ", pelo gradiente de velocidade "du/dy".

$$T = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (4.1.C - C.1)$$

$$T \text{ em kg/m}^2 \\ \mu \text{ em kg} \cdot \text{s/m}^2 \\ du/dy \text{ em 1/s}$$

A viscosidade dinâmica é uma propriedade característica do fluido e depende da temperatura e da pressão; sendo insensível nos líquidos a dependência da pressão é, por outro lado, importante o efeito da temperatura, situação que se manifesta por um forte aumento da viscosidade ao diminuir a temperatura, fenômeno que se explica pela coesão molecular que se acentua ao baixar a temperatura.

Conforme estejam sujeitos ou não os fluidos à lei de Newton, estes podem se classificar como **newtonianos** se existe uma relação linear entre a tensão tangencial e a velocidade de deformação (independente do tempo e da velocidade de deformação do líquido) ou não **newtonianos** se a viscosidade dinâmica é variável (ver fig. 4.1.C).

Usualmente, em vez do coeficiente de viscosidade dinâmica, emprega-se o coeficiente de viscosidade cinemática "v" que representa a relação entre a viscosidade dinâmica e a densidade "ρ".

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} \quad (4.1.C-2)$$

v em m<sup>2</sup>/s  
 ρ em kg · s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>  
 g em m/s<sup>2</sup>  
 γ em kg/m<sup>3</sup>

#### D. Regime turbulento

Regime turbulento é aquele em que apresenta, além do efeito de viscosidade, o importante efeito dos choques de partículas, que se intercambiam a filetes vizinhos; esta situação se caracteriza por fortes flutuações de pressão e de velocidade (multiplicidade de pequenos redemoinhos).

É o regime mais frequente nas aplicações práticas de engenharia e apresenta problemas muito mais difíceis de resolver que o movimento laminar; de fato, neste regime, as perdas de carga não podem ser calculadas tão facilmente por um raciocínio exclusivamente teórico, sendo seus estudos notoriamente empíricos e experimentais.

Para determinar a tensão tangencial que compreenda a totalidade das forças que se opõem ao movimento, aplica-se uma expressão completa da tensão tangencial que se compõe de dois comandos e em que o primeiro termo corresponde à lei de Newton e o segundo ao movimento turbulento.

$$T = (\mu + \eta) \frac{dv}{dy} \quad (4.1 - D)$$

Nesta fórmula, o coeficiente de viscosidade de redemoinho "η" tem as mesmas dimensões da viscosidade dinâmica e depende das características do regime do fluxo e da densidade.

Na zona de turbulência, a viscosidade de dinâmica é desprezível face à viscosidade de redemoinho e pode-se omiti-la. Ao contrário do que sucede na camada adjacente às paredes da canalização (onde não podem haver flutuações transversais), na qual o fluxo se desenvolve em regime laminar e somente exerce efeito a viscosidade dinâmica.

#### E. Número de Reynolds

Denomina-se número de Reynolds a relação adimensional:

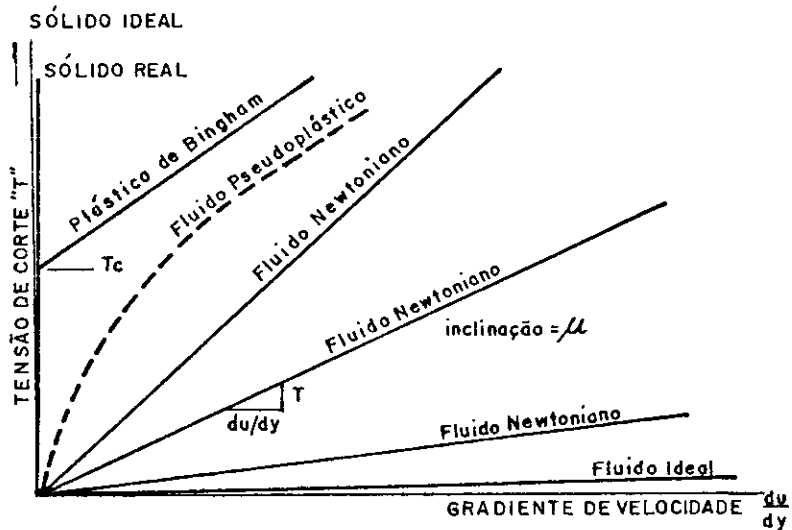


Figura 4.1.C — Fluidos newtonianos e não newtonianos

$$R = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{vD}{\nu} \quad (4.1-E)$$

v = velocidade (m/s)

D = dimensão linear característica do conduto, por exemplo, seu diâmetro (m) (ρ, μ e ν, já definidos).

O número de Reynolds permite conhecer o regime de escoamento, pois a experiência demonstra que normalmente se este parâmetro excede de 3 mil, o escoamento é turbulento. Se este valor é inferior a 2.100 ou a 2 mil, o escoamento se dá em regime laminar. Pode existir entre estes valores um regime distinto, sendo aproximados os valores assinalados.

A relação adimensional citada pode-se considerar como a relação entre a tensão de corte devida à turbulência e a tensão de corte devida à viscosidade, ou seja, a razão entre as forças de inércia e as de viscosidade. Quanto maior é o número de Reynolds, tanto maior é a influência das forças de inércia e, ao contrário, com o aumento das forças de viscosidade (baixo número de Reynolds), o escoamento tende à fórmula laminar. Ainda que esta forma de ver o número de Reynolds não é exata, serve para demonstrar que este, apresentando valores numéricos grandes, pode-se desprezar a influência da viscosidade, posto que resulta desprezível comparada aos efeitos da turbulência.

#### F. Número de Reynolds generalizado para fluidos não newtonianos independentes de tempo, tipo pseudoplástico

Como se especifica no item 5.3, as misturas bifásicas com "sólidos assimétricos" em suspensão, correspondem ao tipo de fluidos pseudoplásticos

cos não newtonianos, independentes do tempo, pelo que o estudo desta mistura pode ser abordado pelo método de Metzner e Reed do "Número de Reynolds Generalizado". Este método permite encontrar os coeficientes de atrito destes fluidos em escoamento laminar e turbulento (10).

O citado número de Reynolds generalizado se define, para escoamento laminar, através da relação seguinte:

$$N' = \frac{8 \cdot \rho \cdot v^2}{T_e} \quad (4.1. F-1)$$

v = velocidade média (m/s)

Este número permite definir analiticamente, para estes líquidos (em tubos de diâmetro constante), o coeficiente de atrito de Fanning, para o "escoamento laminar".

$$f = \frac{16}{N'} = \frac{2 T_e}{\rho v^2} \quad (4.1. F-2)$$

Para o "escoamento turbulento" em tubo liso, Dodge e Metzner desenvolveram uma fórmula para o coeficiente de atrito também em função de N' e análoga à dos fluidos newtonianos, cuja origem é predominantemente empírica.

A expressão deste número de Reynolds generalizado adota a forma seguinte (válida para os regimes laminar e turbulento):

$$N' = \frac{\rho D^{n'} \cdot \sqrt{v}}{K (8)^{n'-1}} \quad (4.1. F-3)$$

n' = índice que caracteriza o comportamento do escoamento

K coeficiente ou índice de consistência

Em particular, para um fluido newtoniano, basta tomar  $n = 1$  e  $K = \mu$ , para se obter

$$N' = \frac{v \cdot D}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (4.1.F-4)$$

A aplicação do número de Reynolds generalizado permite o coeficiente de atrito em forma análoga ao caso dos fluidos newtonianos.

A figura 4.1.F mostra em forma explícita o comportamento do coeficiente de atrito nestas condições, sendo as expressões analíticas de  $f$ ,  $K$  e  $n'$  as seguintes

$$\frac{1}{f} = \frac{4}{n'} \cdot \log(N' \cdot f) - \frac{0,4}{n'} \quad (4.1.F-5)$$

$$K = k \left( \frac{3n' + 1}{n'} \right) \quad (4.1.F-6)$$

$$n' = \frac{d(\log T_e)}{d(\log 8 v/D)} \quad (4.1.F-7)$$

$K$  e  $n'$  são respectivamente a constante de proporcionalidade e expoente para uma lei de potência (as leis de potência são métodos semi-empíricos para descrever distribuições de velocidade e de pressão nos regimes turbulentos).

Um grande número dos fluidos não newtonianos se rege pelo critério definido com esta fórmula do regime turbulento, entretanto as soluções com certos compostos orgânicos de alto peso molecular apresentam coeficiente de atrito notoriamente inferior ao determinado analiticamente. Nestas soluções orgânicas de alta densidade, uma vez alcançado o número de Reynolds generalizado crítico, obtém-se um coeficiente de atrito que continua baixando, quase tão baixo como a curva para escoamento laminar, em vez de apresentar o valor proporcionado pela fórmula, dando a impressão que a turbulência foi suprimida ou retardada.

Em alguns fluidos, como a mistura de sólidos com a água, onde a fase sólida não está muito dispersa, esta tendência continua até chegar a coeficientes de atrito inferiores ao da água pura nas canalizações. Nas paredes, a fase líquida se separa da fase sólida para formar uma camada de baixa viscosidade e o núcleo mais rígido da mistura tende a mover-se como uma

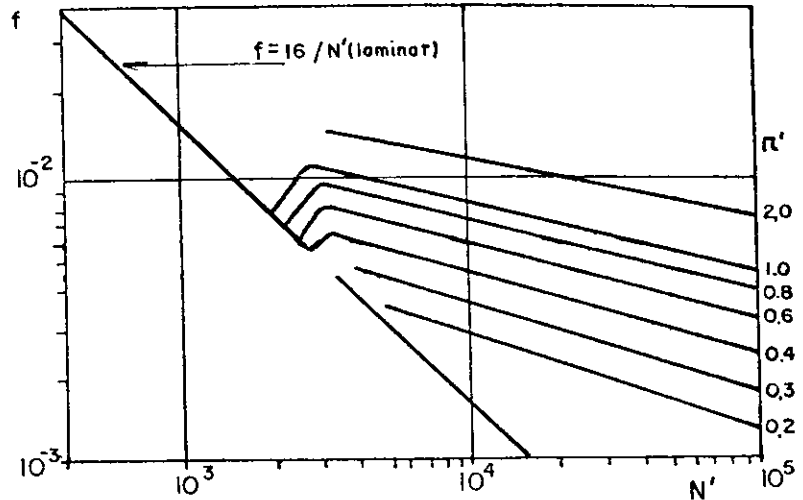


Figura 4.1.F — Número de Reynolds generalizado versus coeficiente de atrito de Fanning

rolha, dado que existe menor transferência de quantidade de movimento turbulento da camada limite para o núcleo, a camada laminar é mais espessa e o fator de atrito menor do que seria com o escoamento de água pura.

Isso permite que, em casos de bombeamento de misturas de carbono altamente concentrados: lama de carvão com concentração de 80% por volume de carvão triturado ou em pó na água; polpa de papel e a mistura de sólidos na água, anteriormente citados, possam ser com menor exigência de potência que para o bombeamento de água pura (10).

#### 4.2 Escoamento de líquidos face a corpos sólidos

Quando se realiza o escoamento de um líquido real, ao longo de uma superfície sólida, o "campo de velocidades" do fluido manifesta a presença da superfície, exercendo uma "ação retardadora" sobre as partículas do líquido, ação que se manifesta a uma espessura praticamente nula na superfície e que, à medida que avança no interior do fluxo, se transmite aos filotes próximos dando forma a uma camada de espessura crescente, denominada camada limite. As partículas do fluido em contato com o corpo apresentam uma "velocidade relativa zero" com relação à superfície de contato, tendendo sua velocidade a um valor limite finito (que existia previamente sem a presença do sólido), à medida que aumenta a distância no sentido normal a esta. Origina-se, portanto, um **gradiente de velocidades** muito forte, no qual as forças de viscosidade são muito importantes (9, 11).

O gradiente de velocidades gerado pela presença do corpo sólido no fluxo origina, por sua vez, próximo da superfície, **forças còrtantes** que reduzem a velocidade do fluido relativa a dita

superfície. Fora da camada limite, a velocidade apresenta uma variação pequena e o escoamento tende ao de um fluxo ideal ou fluxo potencial; no geral as forças de viscosidade são de segunda ordem.

Na camada limite se apresenta também um gradiente de pressão originado pelo fluxo potencial (tendência a manter a energia mecânica total) que aumenta ou diminui a quantidade de movimento da camada, se a pressão diminui ou aumenta, respectivamente, a jusante da corrente (4).

Anteriormente foi citada a característica da camada limite de apresentar uma espessura crescente à medida que o fluxo de partículas líquidas avança sobre a superfície sólida; aquela se gera pela ação contínua das forças còrtantes atuantes, que tendem a frear as partículas de fluxo adicionais. Junto à tendência anterior, se registra, além disso, que a velocidade das partículas tende assintoticamente à velocidade do fluxo principal (10, 12).

É necessário destacar que, ainda, quando a camada limite se apresenta no regime turbulento, sempre existirá uma subcamada limite do fluido próxima à parede, que se apresenta em movimento laminar (4, 12).

A espessura da camada limite, geralmente, se define como a distância desde a superfície do corpo, ao ponto em que a velocidade difere em 1% da preexistente à chegada do corpo sólido.

#### A. Regime de escoamento

Como já se mencionou, a maior parte dos escoamentos naturais e os de importância para a engenharia são turbulentos, sendo um importante critério para a sua determinação avaliar oportunamente o número de Reynolds.

Independentemente do tipo de escoamento que apresente o fluido, a ca-

mada limite pode apresentar um regime de escoamento laminar ou turbulento, segundo sejam as características do sistema. De fato, em muitos casos práticos começa sendo laminar e, ao aumentar a espessura da camada, o escoamento se faz instável passando, em seguida, ao regime turbulento (se a superfície do sólido é suficientemente grande) (10, 12).

Com relação ao campo de velocidades no regime turbulento, este resulta anisotrópico, como consequência do retardo do escoamento produzido pelo contorno sólido, apresentando uma variação da velocidade média entre a superfície e a corrente livre.

### B. Tipos de configuração do escoamento

Apresentam-se dois tipos de configuração do escoamento de líquidos com relação aos corpos sólidos, segundo seja o fluido externo (ou em torno a um corpo) ou fluido confinado (no interior de um conduto).

**Escoamento Externo** — No escoamento externo de um fluido ao redor de um sólido pode-se observar três zonas bem definidas que são:

Zona 1 — "Bastante afastada do sólido — na qual o escoamento é essencialmente ideal, sendo o atrito pouco importante.

Zona 2 — "Próxima ao sólido", na qual o líquido desenvolve a camada limite e onde a viscosidade e/ou a turbulência são importantes.

Zona 3 — "Detrás do sólido", onde se desenvolve uma estela de redemoinhos, geralmente uma região de alta turbulência e baixa pressão, originada pela separação da camada limite da superfície do corpo, por retardo da corrente na presença de um forte gradiente de pressão adverso.

**Escoamento Confinado** — O escoamento confinado em um tubo apresenta um fluxo central aproximadamente ideal, circundado por uma camada limite que se estende através de todo o conduto, aumentando sua espessura a jusante, não existindo uma linha divisória exata entre a zona de escoamento potencial, onde o atrito é desprezível, e a mencionada camada (10).

Define-se como fluxo turbulento totalmente "desenvolvido" aquele que apresenta a razão nula da variação das quantidades médias de velocidade e turbulência na direção do escoamento. Em outras palavras, o ponto a partir do qual os perfis de velocidade não variam com a distância na direção do escoamento.

### C. Forças atuantes sobre um sólido por um fluido em movimento

Sempre que um sólido é colocado em um líquido em movimento se faz presente a ação de uma **força hidrodinâmica** que possui duas componentes, uma devida às tensões tangenciais denominada **força do atrito**, que atua na direção do movimento do fluido e uma força de sustentação conhecida como **força de pressão**, que é normal à direção do escoamento.

Na avaliação destas forças apresentam-se dois coeficientes, "cd" e "cl", que dependem do número de Reynolds e que são geralmente determinados experimentalmente.

As relações que permitem avaliar tais forças são as seguintes:

$$D = cd \cdot (\rho \cdot v^2 / 2) A \quad (4.2 - C)$$

$$L = cl \cdot (\rho \cdot v^2 / 2) A$$

A = área projetada normalmente à direção da corrente (m<sup>2</sup>)  
 cd = coeficiente de resistência (adimensional)  
 cl = coeficiente de sustentação (adimensional)  
 ρ = densidade (kg.s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)  
 v = velocidade relativa do fluido em relação ao sólido (m/s)  
 D = força de atrito (kg)  
 L = força de pressão (kg)

De ambas, a força de pressão devido à separação da camada-limite é a mais importante e é a que frequentemente predomina para manter os sólidos em suspensão (10).

A participação dos componentes citados está ligada ao comportamento da camada-limite, sendo a velocidade do escoamento o fator predominante para que se realize a separação desta camada; influem também outros fatores tais como a rugosidade, a forma e o tamanho do corpo.

De fato, a baixas velocidades geralmente não se produz a separação da camada-limite, atuando neste caso exclusivamente o componente de atrito. Se a velocidade aumenta e produz-se a separação da camada, entram a atuar ambos os componentes e, se a velocidade aumenta mais, a força de velocidade passa a ser de segunda ordem com relação ao componente de pressão.

Além disso, a força hidrodinâmica incluiria outras que facilitam o transporte hidráulico. Estas forças são originadas pelas "flutuações turbulentas" do fluido (flutuações de pressão e velocidade). Neste caso se explica a suspensão dos sólidos pela ação de fortes gradientes de velocidade na zona de camada limite, o qual origina um efeito de repulsão do conduto para o sólido; além disso, a presença de redemoinhos nos fluxos turbulentos tende a dispersar verticalmente os sólidos.

## 5 Transporte hidráulico de sólidos

### 5.1 Antecedentes

O Transporte Hidráulico de Sólidos (THS) é um método de condução de materiais sólidos reduzidos a partículas, que se trasladam em suspensão em um meio líquido, que geralmente é a água, em forma de misturas não newtonianas independentes do tempo, do tipo plástico de Bingham, quando suas partículas são simétricas (caso da hidráulica industrial), ou do tipo pseudo-plástico, quando se apresentam sólidos assimétricos (águas residuárias).

Este método, desenvolvido com êxito pela Hidráulica Industrial, tem sido aplicado preferencialmente em sistemas de elevação mecânica, por ser geralmente mais versátil que os gravitacionais (18, 19). Entre as vantagens que apresenta o THS sobre os sistemas de transporte convencionais, destacam-se as seguintes:

— Permite manter um fluxo contínuo de material, com opção de automatização total do sistema, apresentando, além disso, relativa independência topográfica do terreno e dos fatores climáticos.

— É aplicável a um grande número de materiais usados em diferentes processos industriais e/ou efluentes dos mesmos, com perspectivas permanentes de melhoramento do sistema, a partir de possíveis inovações nas características da mistura quanto a concentração, densidade relativa, granulometria, velocidade e outras.

Nas diferentes aplicações existentes, se destaca um melhoramento gradual desta nova técnica quanto à capacidade de transporte, diminuição da perda de carga na canalização e consumo de potência nos sistemas elevatórios.

O THS conceitualmente corresponde à utilização de um fluxo bifásico sólido-líquido; no geral o meio líquido que conduz as partículas sólidas atua geralmente em regime turbulento para conduzir os sólidos dispersos, sendo esta turbulência um dos fatores que provoca a suspensão, ao gerar tensões de cisalhamento. Em outros casos, em que a concentração das partículas sólidas e a viscosidade da mistura são muito altas, o fluxo se realiza em regime laminar.

Esta disciplina apresenta até o momento alguns estudos teóricos e um grande número de experiências que tem servido de base a suas exitosas aplicações, que lhe têm outorgado um marcado caráter empírico. Diversos autores têm desenvolvido variadas formas de modelação matemática, de aplicação restrita, chegando a definir

complexas equações, cujas proposições têm sido, de um modo geral, de limitada utilidade prática (15, 17).

Dentro dos diferentes tipos de condutos, que são possíveis de utilizar no THS, se tem utilizado preferentemente as tubulações por gravidade e universalmente nos sistemas por impulsão, dando origem ao denominado Transporte Hidráulico de Sólidos por Tubulações (THST), disciplina que centralizou notoriamente o desenvolvimento desta técnica.

O THS tem sido aplicado geralmente em escoamentos de líquidos com partículas sólidas de distinta densidade, as quais interatuam com o fluido e com as paredes do conduto onde escoam confinado. Busca-se, com este método, obter as mais altas concentrações de sólidos dentro dos distintos regimes de fluxo, em soluções que geralmente resultam heterogêneas em seus valores limites de aplicação.

Entre os estudos teóricos mais recentes, destaca-se o Modelo Bifásico de Wallis, cujos resultados têm sido corroborados pelas experiências de Durand e outros pesquisadores (16). Neste modelo determinam-se as equações da mistura a partir das equações individuais do líquido e do sólido, para se estabelecer posteriormente o equilíbrio dos efeitos das forças interfaciais, concluindo-se que a resistência ao fluxo da mistura é idêntica à recebida pelo fluido portante só, podendo em forma linear pela concentração da mistura e dependente das características do sólido.

Os estudos práticos anteriormente mencionados baseiam-se em sua maioria na análise dimensional e se tem preocupado preferentemente em definir os elementos de projeto, isto é, velocidade mínima, perda de carga e abrasão mecânica, em função de variáveis como o diâmetro e material das canalizações, densidades relativas dos sólidos (1,2 / 5,5), tamanho das partículas (0,02 / 25 mm), concentrações volumétricas (0,01 / 50%), regime de escoamento, velocidades médias, viscosidade etc.

Cabe destacar, além disso, que existe, atualmente em etapa experimental, o transporte hidráulico de partículas sólidas aglomeradas previamente em fórmula de cápsulas (16).

## 5.2 Características do projeto hidráulico

Os estudos empíricos realizados para o THS têm permitido determinar as características mais significativas para o cálculo hidráulico dos condutos.

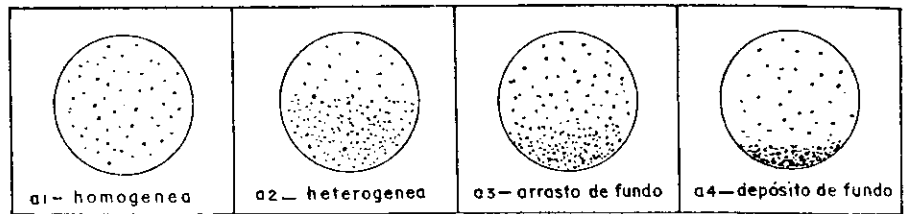


Figura 5.2.A — Formas de suspensão das partículas sólidas em escoamento de misturas por canalizações

### A. Regimes de fluxo

As diferentes formas de escoamento de misturas que é possível observar são usualmente classificadas em quatro grupos, de acordo com a forma em que são arrastadas as partículas sólidas no interior da canalização.

a.1 — “Suspensão Homogênea” — O comportamento hidráulico da mistura é semelhante à do líquido puro, deslocando-se as partículas sólidas à mesma velocidade do fluido e, portanto, sem concentração local de sólidos que origine gradientes de concentração e tamanho de partículas, em um plano normal ao fluxo (Fig. 5.2A — a1).

a.2 — “Suspensão Heterogênea” — Os sólidos da mistura tendem a cair no interior do fluxo, mantendo ainda a mesma velocidade longitudinal que o fluido, dando lugar à formação de um gradiente vertical de concentração e granulometria dos sólidos, sem que estes choquem notoriamente com a parede do conduto (Fig. 5.2A — a2).

a.3 — “Arraste de Fundo” — Observam-se distintas velocidades entre as partículas sólidas e entre estas e o fluido, trasladando-se as mais pesadas por deslizamento, rodando ou a saltos sobre o fundo, enquanto que as mais finas se mantêm em suspensão a igual velocidade que o fluido. Observam-se

gradientes de concentração e granulometria muito mais notáveis do que os do caso precedente (Fig. 5.2A — a3)

a.4 — “Depósito de Fundo” — Os sólidos mais grossos da mistura se depositam intermitentemente ou definitivamente no fundo do conduto (Fig. 5.2A — a4).

Estas quatro formas de fluxo podem-se apresentar em uma mesma mistura, de acordo com a velocidade do escoamento. Sendo maior a capacidade de suspensão do líquido à medida que aumenta a velocidade, tendendo nesta condição a mistura a um comportamento homogêneo sob o ponto de vista da distribuição dos sólidos. Esta característica física tem sido constatada em diversos estudos teóricos e experimentais realizados para determinar a curva do diagrama log-log da figura 5.2.A — a5.

Na figura recém-mencionada, pode-se observar que a velocidade limite entre os dois regimes não é clara, mantendo-se as características de definição de transição dos regimes de escoamento. Observa-se, além disso, que o início da curva é descendente, devido aos fenômenos de obstrução que se apresenta nas canalizações com velocidades inferiores à mínima. A zona de análise e aplicação na indústria corresponde à parte ascendente da curva.

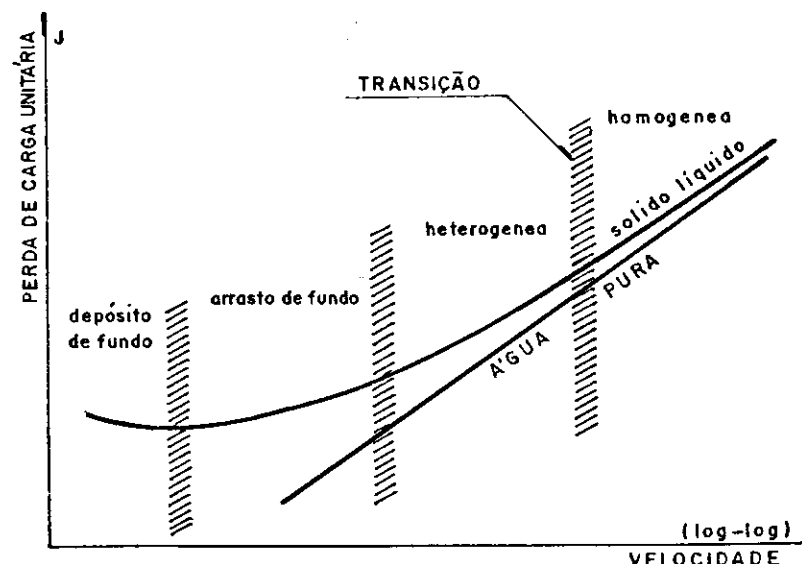


Figura 5.2.A-a5 — Formas de suspensão das partículas sólidas em escoamento por tubulações em função da velocidade

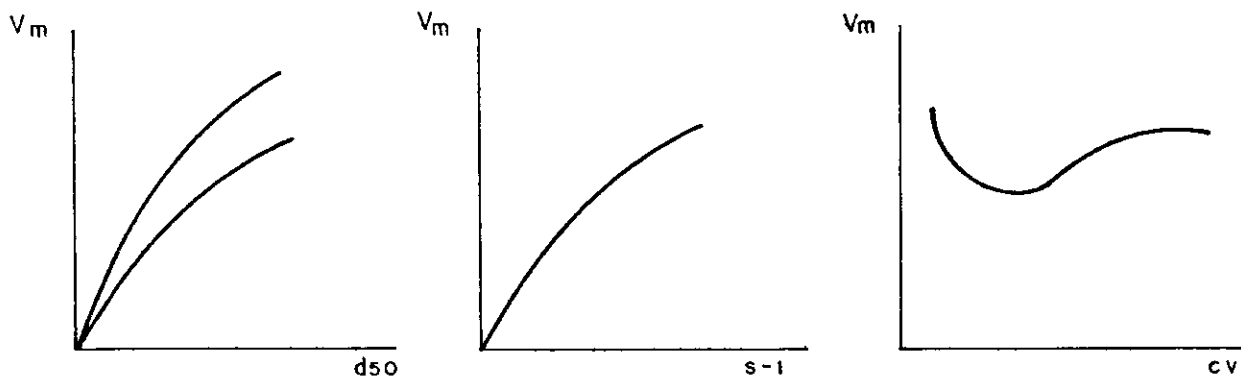


Figura 5.2.B (b1)

(b2)

(b3)

### B. Velocidade mínima

No THS, define-se como velocidade mínima ( $V_m$ ) aquela com a qual se inicia o depósito das partículas sólidas, por períodos importantes.

As experiências a respeito mostram o seguinte comportamento:

b.1 — A velocidade mínima aumenta com o tamanho médio das partículas e, em menor proporção, também com a amplitude do espectro granulométrico (Fig. 5.2B — b1).

$$V_m \propto (d_{50})^{0,4 \rightarrow 0,80}$$

$$V_m \propto \left( \frac{d_{80}}{d_{50}} \right)^{0,0 \rightarrow 0,2}$$

b.2 — A velocidade mínima aumenta com a densidade relativa das partículas sólidas (Fig. 5.2B — b2).

$$V_m \propto (S-1)^{0,3 \rightarrow 0,5}$$

b.3 — A velocidade mínima pode aumentar, diminuir ou ser constante, com a variação da concentração de sólidos na mistura. Característica que, em geral, é constante somente dentro de determinadas faixas de concentração, próprias de cada elemento (Fig. 5.2B — b3).

$$V_m \propto (cv)^{0,1 \rightarrow 0,3}$$

(para  $cv = 10$  a  $30\%$ )

Para a estimativa da velocidade mínima, em uma determinada mistura, têm sido desenvolvidas várias fórmulas que, em geral, são muito imprecisas ou condicionadas, baseadas em antecedentes experimentais de limitada aplicação ou então de forma extremamente complexa. Requerem geralmente o uso de tabelas que fornecem os valores em função do diâmetro da canalização, densidade relativa dos sólidos, concentração em volume e outros.

A aplicação das fórmulas anteriores deve, portanto, interpretar-se como um primeiro antecedente, valioso para o respectivo estudo prático que deve ser realizado em uma estação-piloto.

### C. Perda de carga

A perda de carga que se apresenta no fluxo de uma mistura sólido-líquido tem um comportamento muito diferente do líquido puro, diferença que é função principalmente da velocidade do fluxo, do tipo de partículas e concentração da mistura. Seus aspectos mais notáveis são indicados a seguir e podem ser observados na figura 5.2C que corresponde a uma curva típica de perda de carga:

— O aumento de concentração de uma mistura origina maior perda de carga.

— Uma maior velocidade do fluxo homogeneiza a suspensão fazendo similares as perdas de carga das misturas com as originadas pelo líquido puro.

— O processo de deposição dos sólidos em suspensão, originado pela di-

minuição da velocidade do fluxo abaixo da velocidade mínima, origina um aumento na perda de carga.

### D. Abrasão mecânica

A abrasão mecânica originada pelo escoamento de uma mistura sólido-líquido mostra o seguinte comportamento:

— O efeito de abrasão mecânica cresce exponencialmente com a velocidade do fluxo da mistura.

— As mudanças de direção do fluxo produzem fortes abrasões locais que, em materiais brandos, adquirem sua maior magnitude para ângulos de impacto ao redor de  $30^\circ$ .

— A magnitude da abrasão é função das características de tamanho, densidade, dureza e irregularidade de forma das partículas sólidas.

### 5.3 Comportamento viscoso das misturas sólido-líquido

Em experiências realizadas recentemente com efluentes do processo extrativo do cobre, para avaliar a influência da concentração de sólidos na vis-

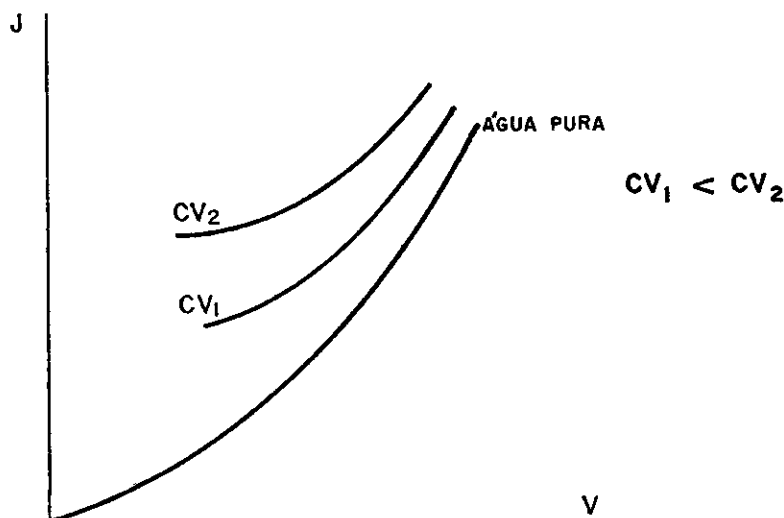


Figura 5.2.C — Perda de carga no fluxo de uma mistura sólido-líquido

cosidade de uma mistura com partículas finalmente divididas, foram efetuadas medições da viscosidade (com concentrações de volume variáveis de 0 a 48%), observando-se um comportamento não newtoniano do tipo Bingham em que a viscosidade aumenta com a concentração dos sólidos, de granulometria de 50 a 143 micra (17).

O comportamento do tipo "Plástico de Bingham" ( $t - t_c = \mu \cdot du/dy$ ) que representa muitos fluidos reais, corresponde ao daqueles fluidos "não newtonianos independentes do tempo", que exibem uma tensão de escoamento sem deformação, seguida de relação linear entre estes (ver Fig. 4.1.C). Este comportamento é muito similar ao que apresentam plásticos, emulsões (pinturas), pastas em geral, lama de águas servidas de perfuração de poços e suspensões de sólidos finamente divididos, os quais se caracterizam principalmente pela presença de uma "tensão tangencial crítica" (TC), abaixo da qual o fluido se comporta como se fosse um sólido (10,21).

Por sua vez, as misturas bifásicas com sólidos em suspensão assimétricos, como as partes de derivados de celulose e as soluções de polímeros elevados, correspondem, também, a fluidos não newtonianos independentes do tempo, mas do tipo **pseudoplástico** caracterizados por apresentar uma inclinação progressivamente decrescente, na curva de tensão de corte versus taxa de deformação (10).

## 6 Tensão Trativa no THST

### 6.1 Definições e fórmulas de cálculo

#### A. Tensão Trativa

Define-se como **tensão trativa** ou **tensão tangencial de arrasto**, a força por unidade de superfície que atua paralela à mesma e que é capaz de conduzir em uma canalização as partículas sólidas em suspensão que apresenta o fluxo de uma mistura bifásica sólido-líquido, com sólidos de um certo tamanho e densidade, vencendo, para isso, as forças que se opõem ao movimento e que tendem a fazer sedimentar tais partículas.

A tendência dos sólidos a sedimentar quando se encontram formando parte de um meio sólido-líquido, que apresenta duas ou mais classes de materiais (e que conservam no sistema suas características próprias), é compensada pela ação de outros efeitos que se fazem presente sobre o corpo, destacando-se, entre estes últimos, o empuxo do fluido sobre o sólido, o arrasto hidrodinâmico e as flutuações de turbulência, fatores que fundamentalmente proporcionam ao fluxo sua capacidade de arrasto.

#### B. Fórmulas da Tensão Trativa

Indiferentemente que o escoamento se verifique em regime laminar ou turbulento de uma corrente em movimento uniforme e contorno fechado (nos condutos circulares), a **tensão tangencial "T<sub>0</sub>"**, é igual ao produto do peso específico do líquido pelo raio hidráulico do escoamento e pela perda de carga unitária do mesmo (1, 3), ou seja:

$$T_0 = \gamma \cdot R \cdot J \quad (6.1 B-01)$$

$T_0$  = tensão tangencial na parede da canalização (kg/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  = peso específico do líquido (kg/m<sup>3</sup>)

$R$  = raio hidráulico (m)

$J$  = perda de carga unitária (adimensional)

Esta função que, recebe também o nome de Tensão de Corte, fisicamente corresponde a uma força por unidade de superfície que atua tangencialmente à superfície de separação dos tubos de corrente do fluxo. Por outro lado, é esta tensão que proporciona a absorção de energia que se produz no movimento de um líquido sobre a parede do conduto.

Quando se aplica esta fórmula em canais abertos e condutos fechados não circulares, é costume usar o mesmo símbolo de  $T_0$  (em condições similares), só que nestes casos representa o valor médio da tensão de corte na parede.

Por outro lado (1), a tensão de corte "T" na superfície de separação dos filetes líquidos de menor raio que a tubulação e concêntrico com ela, fica expressa analiticamente por:

$$T = T_0 \left(1 - \frac{y}{r}\right) \quad (5.1 B-02)$$

$T$  = tensão tangencial na superfície de um filete de escoamento interno qualquer

$T_0$  = tensão tangencial na parede da canalização

$y$  = variável na direção do raio do cilindro interno

$r$  = raio da tubulação

A relação anterior mostra que a distribuição dos esforços tangenciais é representada por uma linha reta, que alcança o valor máximo na parede da canalização e o valor mínimo (zero) no eixo.

No caso de escoamento em canais verifica-se a mesma característica, em que se repete o valor  $T = 0$  na superfície livre, variando até o valor máximo  $T_0$  no fundo.

Considerando que a perda de carga  $J$  por unidade de comprimento é igual à "perda de altura topográfica"  $I$  por unidade de comprimento (inclinação do eixo hidráulico nos canais), tem-se

$$T_0 = \gamma R I \quad (6.1 B-03)$$

### 6.2 Tensão Trativa Mínima-TTM das águas residuárias

A tensão trativa mínima (TTM), ou "tensão crítica de arrasto" é aquela força por unidade de área que garante a autolimpeza das canalizações que transportam misturas sólido-líquido e que apresenta, portanto, a capacidade de iniciar o movimento das partículas sólidas de um certo tamanho e densidade, presentes numa mistura bifásica, e que permite que os sólidos que tenham sedimentado possam ser postos em movimento e arrastados pela corrente.

#### A. Antecedentes

Em 1936, o autor A. Shields considerava que a "força crítica de tração" necessária para produzir o deslocamento de materiais unigranulares ao longo do fundo de uma canalização é aproximadamente proporcional ao diâmetro das partículas e a seu peso submergido por unidade de volume. Esta teoria fundamentava-se nos resultados obtidos em experiências próprias e nas de outros pesquisadores. Do desenvolvimento teórico anterior deduziu Camp a velocidade necessária para transportar sedimentos (6):

$$V = \sqrt{\frac{8 B}{f} \cdot g \cdot (S-1) \cdot d =$$

$$\frac{1,486}{n} \cdot R^{1/4} \cdot \sqrt{B (S-1) d}$$

$v$  = velocidade média da corrente

$B$  — constante igual a um valor aproximado de 0,04 para o início do deslocamento de partículas granulares e ao redor de 0,8 para uma autolimpeza adequada da canalização (adimensional)

$f$  = coeficiente de atrito de Darcy — Weisbach (adimensional)

$g$  = aceleração da gravidade

$S$  = densidade da partícula (adimensional)

$d$  = diâmetro da partícula (mm)

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning e Kutter

$R$  = raio hidráulico



Tabela 1

ANO	EVOLUÇÃO EFETIVA DAS VAZÕES		
	VAZÃO (l/s)		
	Mínima	Media	Máxima
1975	49	80	138
1976	60	98	170
1977	74	120	209
1978	92	147	257
1979	113	180	316
1980	140	220	390
1981	150	240	420
1982	160	260	460
1983	170	290	500
1984	180	310	540
1985	200	330	580
1986	220	360	650
1987	250	410	715
1988	270	450	780
1989	290	480	855
1990	310	520	920
1991	340	560	990
1992	360	600	1.060
1993	380	640	1.130
1994	410	680	1.200
1995	430	710	1.260
1996	460	760	1.340
1997	490	800	1.400
1998	510	850	1.480
1999	540	890	1.550
2000	552	923	1.628

#### B. TTM nas águas residuárias

Os valores limites da TTM que garantem o cumprimento das funções de autolimpeza, para uma dada mistura sólido-líquido, devem ser determinados experimentalmente, dada a complexidade que o problema apresenta.

Apesar das experiências que tenham sido realizadas com esta orientação, aparentemente não tem ocorrido maior divulgação, à exceção do que está normalizado para águas servidas.

A respeito, em 1979, publicou-se no Brasil as "Instruções para a Elaboração de Projetos de Redes e Coletores-Tronco da Região Metropolitana de São Paulo" da Sabesp-Cia. de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Tal regulamentação especificava: "Dimensionar hidraulicamente a rede dispensando a obediência da condição  $h/D \geq 0,20$  para as condições iniciais do funcionamento da rede e sempre que a tensão trativa fosse maior ou igual a  $0,15 \text{ kg/m}^2$ ."

Posteriormente a aplicação do conceito da TTM estendeu-se a Estações Elevatórias de Águas Residuárias, correspondendo ao autor do presente trabalho o projeto da Estação Elevatória de Guaió (São Paulo, Brasil, dezembro, 1979), estando atualmente vigente esta nova metodologia de dimensionamento, nesse país.

#### 6.3 Aplicação prática

A aplicação prática do conceito da TTM, selecionada como exemplo, corresponde ao dimensionamento de uma estação elevatória de águas servidas realizado pelo autor para a Sabesp, através da Encibra — Estudos e Projetos de Engenharia (25), em 1980.

##### A. Estação elevatória de Guaió

Estação elevatória constituída por cinco grupos motobomba centrífugas, horizontais e iguais; dimensionada para a capacidade final de  $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$ . Considerava a alternativa de funcionamento de dois grupos em velocidade variável. Exigiu-se que o estudo técnico-econômico da linha de recalque fosse realizado com a aplicação da TTM, substituindo ao método convencional da velocidade mínima de  $0,6 \text{ m/s}$ .

Na materialização deste projeto levou-se em consideração que numa linha de recalque de águas residuárias, é necessário que as velocidades do líquido permitam o arrasto das matérias sólidas nele contidas, o que em termos de tensão trativa equivale a considerar:

$$T = \gamma R I \geq 0,15 \text{ ou}$$

$$T = \gamma \frac{D}{4} \cdot f \cdot \frac{\zeta}{D} \frac{v^2}{2\gamma} > 0,15$$

Nas tabelas n.os 2, 3, 4 e 5 estão calculados os valores da tensão trativa considerando as seguintes vazões limites do funcionamento das bombas selecionadas:

$$Q_{\min} = 200 \text{ l/s} \quad Q_{\max} = 475 \text{ l/s}$$

A tabela n.º 1 apresenta a evolução prevista das vazões no período de projeto 1975/2000.

A canalização ou sistema de canalizações a ser definido deveria transportar desde uma vazão mínima de  $150 \text{ l/s}$  no ano de 1981 até  $1.628 \text{ l/s}$ , vazão máxima no final do período.

Tabela 2 — Determinação do coeficiente de perda de carga "f", para a vazão mínima das bombas (em regime de velocidade variável)

$$Q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}$$

$\varnothing$ (m)	$\varnothing^2$ (m <sup>2</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	v (m/s)	v <sup>2</sup> (m/s) <sup>2</sup>	$\frac{v^2}{2g}$	$\frac{1}{D}$	$\frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$	$\frac{K}{D}$	v x D	$\frac{v \times D}{\dots}$	f
0,500	0,250	0,1964	0,0183	1,0370	0,0529	2,000	0,1058	$4 \times 10^{-4}$	0,5092	$5,1 \times 10^5$	0,0172
0,600	0,360	0,2827	0,7075	0,5005	0,0255	1,666	0,0425	$3,3 \times 10^{-4}$	0,4245	$4,2 \times 10^5$	0,0170

Tabela 3 — Cálculo da Tração Trativa Mínima para operação das bombas com vazão mínima (em regime de velocidade variável)

$\varnothing$	$\mu$	$\frac{D}{4}$	$\mu^2$	$\frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$	f	$f \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$	$\sigma\varnothing$	$\sigma\varnothing \geq 0,15$
0,500	1.000	0,125	125	0,1058	0,0172	$1.820 \cdot 10^{-6}$	0,23	OK
0,600	1.000	0,150	150	0,0425	0,0170	$722,5 \cdot 10^6$	0,11	

Tabela 4 — Determinação do coeficiente de perda de carga "f", para a vazão máxima das bombas (em regime de velocidade constante)

$$Q = 0,472 \text{ m}^3/\text{s}$$

$\varnothing$ (m)	$\varnothing^2$ (m <sup>2</sup> )	A <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> )	v (m/s)	v <sup>2</sup> (m/s) <sup>2</sup>	$\frac{v^2}{2g}$	$\frac{1}{D}$	$\frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$	$\frac{K}{D}$	v x D	$\frac{v \times D}{\dots}$	f
1,000	1,000	0,7854	0,6010	0,3612	0,0184	1,0000	0,0184	$2 \times 10^{-4}$	0,601	$6 \times 10^5$	0,0155
0,900	0,810	0,6362	0,7419	0,5504	0,0281	1,1111	0,0312	$2,2 \times 10^{-4}$	0,668	$6,7 \times 10^5$	0,0156
0,800	0,640	0,5027	0,9389	0,8815	0,0450	1,2500	0,0563	$2,5 \times 10^{-4}$	0,751	$7,5 \times 10^5$	0,0157
0,700	0,490	0,3848	1,2266	1,5045	0,0768	0,4286	0,1097	$2,9 \times 10^{-4}$	0,859	$8,6 \times 10^5$	0,0158
0,600	0,360	0,2827	1,6696	2,7876	0,1422	1,6666	0,2370	$3,3 \times 10^{-4}$	1,002	$1 \times 10^6$	0,0154
0,500	0,250	0,1964	2,4033	5,7759	0,2947	2,0000	0,5894	$4 \times 10^{-4}$	1,202	$1,2 \times 10^6$	0,0160

Tabela 5 — Cálculo de Tensão Trativa Mínima para a vazão máxima das bombas (em regime de velocidade constante)

$\beta$	$\mu$	$\frac{D}{4}$	$\mu \cdot R$	$\frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$	$f$	$f \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$	$\sigma \beta$	$\sigma \beta \geq 0,15$
1,000	1.000	0,250	250	0,0184	0,0155	$285 \cdot 10^{-6}$	0,07	-
0,900	1.000	0,225	225	0,0312	0,0156	$487 \cdot 10^{-6}$	0,11	-
0,800	1.000	0,200	200	0,0563	0,0157	$884 \cdot 10^{-6}$	0,18	OK
0,700	1.000	0,175	175	0,1097	0,0158	$1.733 \cdot 10^{-6}$	0,30	OK
0,600	1.000	0,150	150	0,2370	0,0159	$3.768 \cdot 10^{-6}$	0,57	OK
0,500	1.000	0,125	125	0,5894	0,0160	$9.430 \cdot 10^{-6}$	1,18	OK

Nas tabelas apresentadas (n.º 3 e n.º 5), observam-se nas duas últimas colunas os valores da TTM que indicam a possibilidade de usar determinados diâmetros de canalizações no projeto, sob o ponto de vista do cumprimento da exigência do transporte de sólidos.

## 7 Recomendações

Com base nos antecedentes expostos é possível efetuar as seguintes recomendações:

— Aplicar o método de dimensionamento da TTM no projeto de canalizações de recalque e estações elevatórias de misturas bifásicas sólido-líquido.

— Realizar estudos complementares tendentes a utilizar o método de dimensionamento da TTM, nos condutos em lâmina livre, substituindo não somente a exigência de  $h/D > 0,20$ , mas também a da velocidade mínima.

— Na parte experimental, dar especial ênfase às características dos fluidos não newtonianos destas misturas, para prever aplicações futuras que otimizem a capacidade de transporte de sólidos, o consumo de energia ou minimizar o efeito da abrasão.

## 8 Referências bibliográficas

1 — Dominguez S., F. J.; 1959; **Hidráulica**; Santiago; Editorial Universitária.

2 — Trindade Neves E.; 1974; **Curso de Hidráulica**; Porto Alegre; Editora Globo.

3 — Lencastre, A.; 1972; **Manual de Hidráulica Geral**; São Paulo; Editora Edgard Blücher.

4 — Streeter, V. L.; 1963; **Mecânica dos Fluidos**; Madri; Mc-Graw-Hill.

5 — Azevedo Netto, J. M.; 1973; **Manual de Hidráulica**; São Paulo; Editora Edgard Blücher, Tomo I.

6 — WPCF/ASCE; 1970; **Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers**; Washington; WPCF/ASCE.

7 — Duncan Mara, D. y Silva, S. A.; 1979; **Tratamento Biológico de Águas Residuárias-Lagoas de Estabilização**; Rio de Janeiro; Produções Gráficas e Jornalísticas Limitada.

8 — ASCE/WPCF; 1969; **Projeto de Instalação de Tratamento de Esgoto**; Usaid.

9 — Schlag, A.; 1966; **Hidráulica**; México; Editorial Limusa-Wiley.

10 — Hughes, W. F. y Brighton, J. A.; 1974; **Dinâmica dos Fluidos**; Editora Mc-Graw-Hill do Brasil.

11 — Giles, R.; 1978; **Mecânica dos Fluidos e Hidráulica**; São Paulo; Editora Mc-Graw-Hill do Brasil.

12 — Mery M. H.; 1972; **Mecânica de Fluidos I**; Santiago; Departamento de Obras Civiles, F. C. F. y M., Universidad de Chile.

13 — Silvestre, P.; 1979; **Hidráulica Geral**; Rio de Janeiro; Livros Técnicos e Científicos Editora.

14 — Steel, E. W.; 1966; **Abastecimento D'Água, Sistema de Esgotos**, Rio de Janeiro; Ao Livro Técnico.

15 — Edward Velasco, A.; 1983; **Factibilidad Técnica y Económica del Transporte Hidráulico de Concentrados de Cobre y su Aplicación a los Planes de Ampliación de División Andina**; Memoria de Título U. Ch.

16 — Rayo J. C.; 1977; **Transporte Hidráulico de Sólidos por Tuberías**; Revista Minerale, Vol. XXXII feb-mar; Pág. 3.

17 — Wellmann, Patricio; 1977; **Influencia de la Concentración de Sólidos en la Viscosidad de una Pulpa de Relaves**; Revista Minerale, Vol. XXXII feb-mar; Pág. 23.

18 — Kleiman, Pablo; 1977; **Transporte Hidráulico de Relaves de Cobre**; Revista Minerale, Vol. XXXII feb-mar; Pág. 21.

19 — Gonzalez M. Pablo; 1977; **Transporte Hidráulico de Sólidos por Canales**; Revista Minerale, Vol. XXXII feb-mar; Pág. 29.

20 — Martins, J. A.; 1970; **Curso Sobre Sistema de Esgotos Sanitários**; São Paulo; Faculdade de Higiene e Saúde Pública; USP.

21 — Camargo Vieira, R. C.; 1971; **Atlas de Mecânica dos Fluidos — Fluidodinâmica**; São Paulo; Editora Pensamento.

22 — Plaes Leme, F.; 1977; **Planejamento e Projeto dos Sistemas Urbanos de Esgotos Sanitários**; São Paulo, Cetesb.

23 — Pimenta, C. F.; 1981; **Curso de Hidráulica Geral**; Rio de Janeiro; Editora Guanabara Dois; Tomo I.

24 — Cruz da Costa, E.; 1967; **Mecânica dos Fluidos**; Porto Alegre; Editora Globo.

25 — Contreras Correa, R. R.; 1980; **Estudo Hidráulico e Econômico para a Determinação do Diâmetro do Emissário de Recalque da Estação Elevatória do Guaió**; São Paulo.