

## Tensão trativa: um critério econômico para o dimensionamento das tubulações de esgoto

Joaquim Gabriel Oliveira Machado Neto (1)  
Milton Tomoyuki Tsutiya (2)

### 1. INTRODUÇÃO

O projeto hidráulico-sanitário das tubulações de esgoto envolve considerações sobre três aspectos principais:

- hidráulico — as tubulações funcionando como condutos livres, deverão transportar as vazões máximas e mínimas previstas no projeto;
- reações bioquímicas — controle de sulfeto de hidrogênio;
- deposição de materiais sólidos encontrados nos esgotos — ação de autolimpeza.

Com a experiência acumulada durante muitos anos, no conhecimento hidráulico em canais de conduto livre, há relativamente pouca controvérsia sobre os princípios hidráulicos dos condutos de esgoto. Fórmulas de Manning, Ganguillet-Kutter e Prandtl-Colebrook são normalmente utilizadas. O coeficiente de Manning de 0,013 é usualmente selecionado para a maioria dos materiais utilizados em tubulações de esgoto.

Considerações sobre as reações bioquímicas no projeto das tubulações de esgoto são necessárias para prevenir a formação indesejável de gases provenientes dos esgotos, principalmente em regiões planas onde a velocidade nas tubulações é relativamente pequena. A principal preocupação é com o sulfeto de hidrogênio que pode causar corrosão das paredes das tubulações, além de ser um gás letal em grandes concentrações.

Os sólidos encontrados no esgoto consistem de partículas orgânicas e inorgânicas com diferentes tamanhos e pesos específicos. As partículas mais pesadas podem ser transportadas por carregamento de fundo. Partículas finas movem-se em suspensão e os materiais leves flutuam na superfície da água.

Tradicionalmente, é assumida que a ação de autolimpeza em esgotos sanitários, para enfrentar o aspecto de deposição de materiais sólidos, é obtida pela manutenção de uma velocidade mínima independentemente do diâmetro da tubulação. Devido ao fato de que o mecanismo básico da ação de autolimpeza é uma força hidrodinâmica exercida sobre as paredes do conduto pelo escoamento de esgotos, alguns autores recomendam o uso da tensão trativa em substituição à velocidade de autolimpeza. Ambos conceitos, da tensão trativa e da velocidade de autolimpeza, encontram-se bem estabelecidos no campo de transporte de sedimentos.

Neste trabalho, tecem-se inicialmente algumas considerações sobre a formação de sulfeto de hidrogênio e deposição de materiais sólidos nas tubulações de esgoto, para em seguida apresentarem-se seus objetivos principais:

- o critério da tensão trativa para o dimensionamento hidráulico sanitário das tubulações de esgoto, estabelecendo-se seus valores para se prevenir quanto à geração de sulfetos e deposição de materiais sólidos;
- o critério da tensão trativa comparado ao da velocidade de autolimpeza, justificando a recomendação da utilização da tensão trativa para o dimensionamento das tubulações de esgoto;
- a sequência de cálculo para o dimensionamento das tubulações de esgoto, utilizando a tensão trativa.

### 2. OS SULFETOS EM TUBULAÇÕES DE ESGOTO

#### 2.1 — Generalidades

Devido ao fato de que o esgoto fresco tem quantidade apreciável de oxigênio dissolvido, normalmente as redes coletoras de esgoto não apresentam problemas relativos a sulfetos de hidrogênio (H<sub>2</sub>S). Entretanto, à medida que o esgoto escoar pela rede através de grandes extensões, por vezes, com velocidade baixa, a concentração

de oxigênio diminui gradualmente, prevalecendo as condições anaeróbias no esgoto e propiciando o aparecimento de sulfeto de hidrogênio, cujos efeitos são notados principalmente nos coletores-tronco, interceptores e emissários.

O sulfeto de hidrogênio ou simplesmente sulfeto, pode ocasionar vários problemas, tais como:

- odor, trazendo incômodo aos operadores e à vizinhança;
- toxidez, em altas concentrações representando perigo de vida aos operadores;
- corrosão, quando os coletores e demais componentes do sistema de esgoto são executados com materiais não imunes ao ataque do ácido sulfúrico;
- maior incidência de decantação precária nas estações de tratamento de esgoto por lodo ativado.

Neste item, apresenta-se sucintamente alguns aspectos que devem ser considerados durante a elaboração do projeto hidráulico-sanitário dos coletores de esgoto, a fim de que, pelo dimensionamento adequado, consiga-se a eliminação ou a diminuição na geração de sulfetos. Observamos, entretanto, que cada sistema de esgoto deverá ser estudado junto com as características dos efluentes a serem recebidos, para a escolha da medida ou conjunto de medidas a serem tomadas para encontrar a solução do problema.

#### 2.2 — Geração de sulfetos e seus efeitos

Diversos fatores influenciam a geração de sulfetos nos esgotos domésticos e industriais, destacando-se (9):

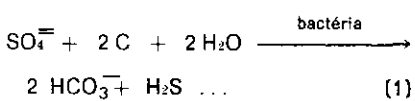
- teor de enxofre existente nos compostos orgânicos e sulfetos usualmente encontrados nos esgotos;
- temperatura do esgoto: a geração de H<sub>2</sub>S é praticamente inexistente abaixo de 15°C atingindo o seu pico nas proximidades de 38°C;

(1) Superintendente de Projetos para a Região II e de Redes, Diretoria de Construção - Sabesp; mestre em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

(2) Engenheiro da Superintendência de Projetos para a Região II e de Redes, Diretoria de Construção — Sabesp; mestre em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- pH do esgoto: a redução do enxofre para H<sub>2</sub>S ocorrerá rapidamente dentro da faixa de pH entre 5,5 e 8,5 (valores de pH comumente encontrados em esgotos domésticos);
- ausência de oxigênio livre no esgoto.

Os sulfetos são normalmente gerados nos esgotos através das bactérias Desulfovibrio Desulfuricans na presença de matéria orgânica e em ausência de oxigênio. Essas bactérias reduzem o sulfato a sulfeto. Considerando C o carbono da matéria orgânica, a reação para a geração de sulfeto pode ser representada por:



A película de limo formada nas partes submersas da parede da tubulação é a principal fonte da geração de sulfeto em tubulações de esgoto, pois é nessa película que ocorrem as condições estritamente anaeróbias favoráveis ao desenvolvimento do processo. Essa película que congrega micróbios filamentosos e material gelatinoso (zooglúia), onde se abrigam muitas bactérias menores, tem espessura de 1 mm, mas se a velocidade for alta, ela pode ter menos de 0,25 mm de espessura. Quando a velocidade é extremamente baixa, a película pode atingir até 3 mm ou mais, no entanto, se o esgoto transportar material abrasivo, essa película pode não se desenvolver nas paredes das tubulações.

Reid e Yang (18) observaram que o desenvolvimento da película de limo estava relacionado com a tensão trativa e que há um limite crítico a partir do qual não se formaria a película de limo produtora de sulfetos. O controle dessa película é de fundamental importância para a geração de sulfetos, pois a ausência da película implica ausência ou pequena geração de sulfetos.

A concentração crítica de oxigênio para impedir o acesso de sulfeto ao esgoto situa-se geralmente na faixa de 0,1 a 1 mg/l (27). Neste caso, o desprendimento de H<sub>2</sub>S é função dentre outros fatores da temperatura e da turbulência do escoamento.

Caso o teor de oxigênio seja inferior a 0,1 mg/l, o H<sub>2</sub>S gerado na película de limo se transfere para o esgoto, escapando para a parte superior da tubulação. Uma determinada quantidade de H<sub>2</sub>S é perdida através da ventilação natural da tubulação, entretanto, a maior parte é absorvida pela camada de umidade condensada existente na parte superior da tubulação onde é bacteriologicamente oxidado, resultando na formação de ácido sulfúrico.

Quando as tubulações são construídas com materiais que não são imunes ao ataque pelo ácido sulfúrico, como o concreto, fibrocimento ou aço, ocorrerá uma corrosão gradual.

### 2.3 — Previsão sobre a ocorrência do sulfeto em tubulações de esgoto

Diversos modelos têm sido propostos para a previsão de sulfeto e dentre todos o mais citado é a fórmula Z desenvolvida por Pomeroy (27) a partir de uma equação proposta por Davy. A fórmula é a seguinte:

$$Z = \frac{\text{DBO}_E}{(l/2 \cdot Q)^{1/3}} \cdot \frac{p}{b} \dots \quad (2)$$

onde:  
 Z = indicador da tendência para a ocorrência de sulfetos, mg. s<sup>1/3</sup>/l.pê;

DBO<sub>E</sub> = DBO · 1,07<sup>(T-20)</sup> = DBO efetiva, mg/l;

DBO = demanda bioquímica de oxigênio a 20°C e cinco dias, mg/l;

T = temperatura, °C;  
 l = declividade da tubulação, m/m;  
 Q = vazão de esgoto, pés<sup>3</sup>/s;  
 p = perímetro molhado, pé;  
 b = largura da superfície do líquido, pé.

As condições prováveis para a geração de sulfetos são apresentadas no Quadro 1 (1).

O valor de Z a ser utilizado no projeto das tubulações de esgoto, para se prevenir quanto à geração de sulfetos, tem sido apresentado por diversos autores, podendo-se destacar:

- Paintal (18) — sugere o valor de 7.500.
- Ludwig e Almeida (14) — para esses autores pode ser utilizado o valor de 10 mil para vazões até 1 m<sup>3</sup>/s e para vazões maiores o valor de 6.100.

- Takahashi (25) — recomenda o valor de 7.500.

Segundo Pomeroy (27) a fórmula Z tem sido bem sucedida na previsão de formação de sulfeto, mas alerta que para pequenas vazões ela pode indicar a sua formação onde na realidade não ocorre e que, por outro lado, para grandes vazões a fórmula pode não indicar a formação quando na verdade é observada a ocorrência.

Richardson (24) recomenda a sua utilização para uma faixa de vazões compreendidas entre 3 e 2 mil l/s.

Para Takahashi (25), caso a fórmula Z preveja condições de intensa formação de sulfetos, então o problema deve ser estudado com equações mais detalhadas para melhor conhecimento das possibilidades de sua ocorrência, para servirem de subsídios na decisão de adoção de medidas preventivas.

### 3. A DEPOSIÇÃO DE MATERIAIS SÓLIDOS EM TUBULAÇÕES DE ESGOTO

Os materiais sólidos encontrados em esgotos consistem de partículas orgânicas e inorgânicas. Devido ao efeito da gravidade, qualquer dessas partículas com densidade maior do que o da água tenderá a depositar-se nas tubulações de esgoto.

O estudo da deposição dessas partículas é bastante complexo, uma vez que a vazão de esgoto varia ao longo do tempo. Nessas condições o movimento do líquido é na realidade variado, embora se admita para o dimensionamento das tubulações de esgoto o movimento permanente e uniforme.

As partículas sólidas são normalmente depositadas nas tubulações de esgoto nas horas de menor contribuição, quando a velocidade é pequena. Dependendo da velocidade do esgoto (V) na tubulação e da velocidade de sedimentação (Vs) da partícula, poderá ocorrer a deposição, conforme indicado na figura 1.

Quadro 1 — Condições para a geração de sulfetos segundo a fórmula Z de Pomeroy-Davy

Valores de Z (mg. s <sup>1/3</sup> /l.pê)	Condições a serem observadas
Z < 5.000	sulfeto é raramente gerado
5.000 ≤ Z ≤ 10.000	condição marginal para a geração de sulfeto
Z > 10.000	comum a geração de sulfeto

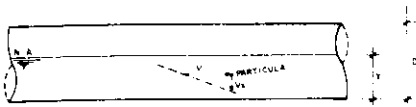


Figura 1 — Deposição de materiais sólidos em tubulações de esgoto

A deposição de partículas encontradas no esgoto (partículas discretas), pode ser analisada através da seguinte equação:

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g d}{C_x} \left( \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right)} \dots (3)$$

onde:

- $V_s$  = velocidade de sedimentação da partícula;
- $g$  = aceleração da gravidade;
- $d$  = diâmetro da partícula;
- $C_x$  = coeficiente de atrito entre a partícula e o líquido;
- $\rho_s$  = massa específica da partícula;
- $\rho_l$  = massa específica do líquido.

A equação (3), que é conhecida como equação Newtoniana da sedimentação, mostra que a sedimentação de partículas discretas é função de seu diâmetro, do atrito e da massa específica da partícula e do líquido.

A experiência tem demonstrado que velocidades na tubulação ( $V$ ) abaixo de 0,3 m/s e em torno de 0,15 m/s ocasionaram a deposição de partículas orgânicas. Quanto à deposição e transporte de partículas inorgânicas, devido à sua importância, será discutido detalhadamente ao longo do presente trabalho.

A região de deposição de materiais sólidos em tubulações de esgoto foi determinada através de estudos realizados por Lynse (15), Paintal (17) e Yao (30). Segundo esses estudos, a deposição de materiais sólidos seria na região  $Y/D \leq 0,15$ . Portanto, os estudos de autolimpeza em tubulações de esgoto devem ser realizados, considerando que a deposição de sólidos encontrados em esgotos se dará na região  $Y/D \leq 0,15$ .

#### 4. TENSÃO TRATIVA PARA DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES DE ESGOTO

Neste item serão apresentados os conceitos relativos à tensão trativa e seus valores para o arraste de materiais sólidos e para prevenção quanto à formação de sulfetos.

##### 4.1 O conceito

A tensão trativa teve sua origem nos estudos hidráulicos dos canais. Segundo a literatura hidráulica o conceito da tensão trativa foi introduzido originalmente por Du Boys, em 1879. Entretanto, os seus princípios básicos fo-

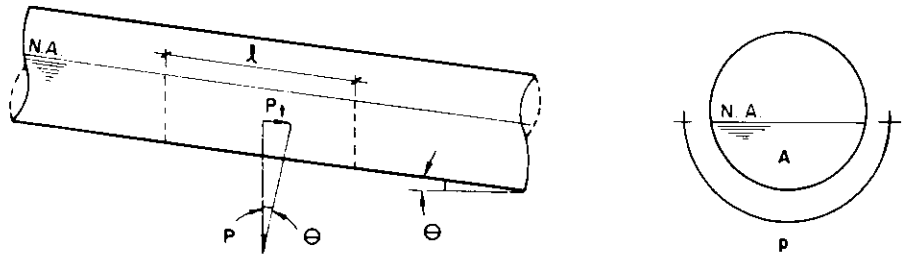


Figura 2 — Tensão trativa

ram desenvolvidos por Brahms por volta de 1754 (4).

A tensão trativa é definida como uma tensão tangencial exercida sobre a parede do conduto pelo líquido escoado (25).

A partir da figura 2 tem-se a tensão trativa média  $\sigma$  para escoamento uniforme:

$$\sigma = \frac{P_t}{pl} = \frac{P \sin \theta}{pl} = \frac{\gamma A l \sin \theta}{pl} = \gamma R_H \sin \theta$$

$$\sigma = \gamma R_H l \dots (4)$$

pois para  $\theta$  pequeno,  $\sin \theta \cong \text{tg } \theta$  e  $\text{tg } \theta = l$

onde:

- $\sigma$  = tensão trativa média, Pa;
- $P$  = peso de um trecho  $l$  do líquido que esco, N;

- $P_t$  = componente tangencial de  $P$ , N;
- $\theta$  = ângulo de inclinação do conduto, grau;
- $\gamma$  = peso específico do líquido,  $10^4$  N/m<sup>3</sup> para o esgoto;
- $R_H$  = raio hidráulico, m;
- $l$  = declividade da tubulação, m/m.

A tensão trativa, calculada pela equação (4), representa um valor médio da tensão ao longo do perímetro molhado do conduto.

Replogle e Chow (22) mediram experimentalmente a distribuição de tensão trativa nos condutos circulares nas condições de  $y/D = 1/3$ ,  $y/D = 1/2$  e  $y/D = 2/3$ . Duas séries de testes foram realizadas: uma utilizando tubulação de  $\varnothing 102$  mm de cobre e, outra com tubulação de  $\varnothing 133$  mm de aço. As declividades foram mantidas constantes, variando-se as lâminas com a variação da vazão. Seus resultados são apresentados na figura 3.

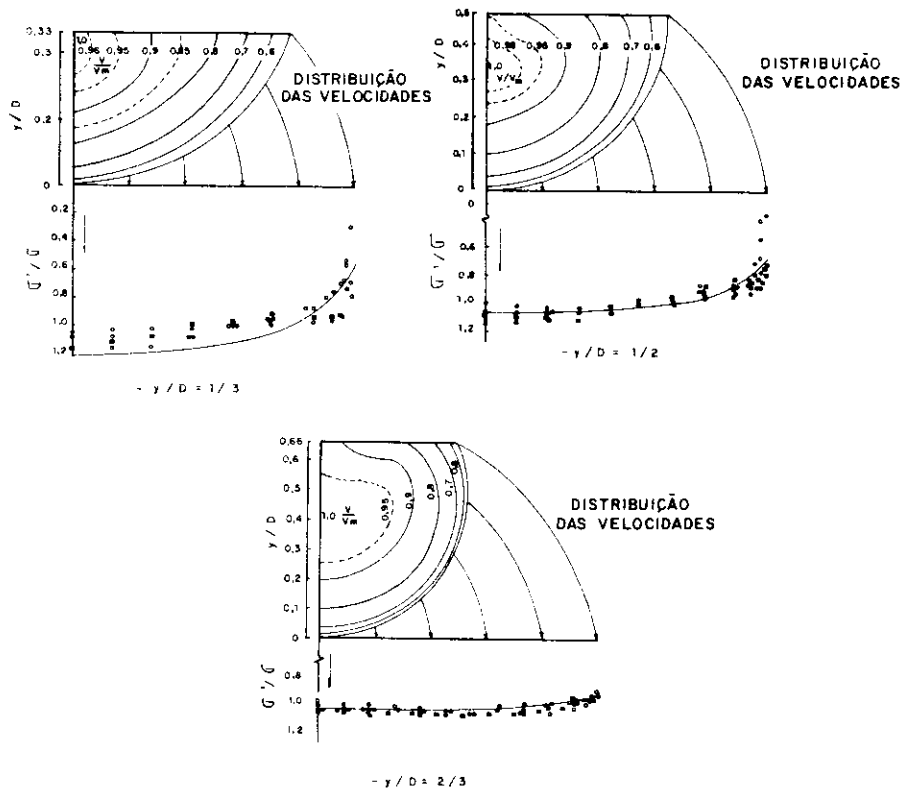


Figura 3 — Distribuição experimental da tensão trativa e da velocidade em condutos circulares (conduto apresentado em sua quarta parte)

Na figura 3 temos:

$\sigma'$  = tensão trativa em cada ponto junto à parede da tubulação;

$\sigma$  = tensão trativa média na tubulação;

$y$  = altura da lâmina de água;

$D$  = diâmetro da tubulação;

$V$  = velocidade em cada ponto;

$V_m$  = velocidade máxima na tubulação.

A figura indica que a máxima tensão trativa ocorre próximo à geratriz inferior da tubulação, enquanto a mínima ocorre próximo à superfície da água. Essa variação tende a ser menos pronunciada quanto maior for a relação  $y/D$ , portanto, para lâminas maiores que 50% do diâmetro da tubulação a tensão trativa tende a ser uniforme ao longo do perímetro molhado. Para lâminas menores, há uma sensível variação de tensões ao longo do perímetro molhado da tubulação. Entretanto, considerando que a deposição dos materiais sedimentáveis do esgoto localiza-se na região  $y/D \leq 0,15$  (30), podemos concluir que, nessas condições a tensão trativa é praticamente uniforme mesmo para lâminas pequenas.

#### 4.2 — Tensão trativa e o arraste de materiais sólidos — tensão trativa crítica

A tensão trativa crítica é definida como uma tensão mínima necessária para o início do movimento das partículas depositadas nas tubulações de esgoto. Seu valor é normalmente determinado através de pesquisas em campo ou em laboratório, pois depende de vários fatores, tais como:

- peso específico da partícula e do líquido;
- dimensões da partícula;
- viscosidade do líquido.

Das partículas inorgânicas destacam-se a areia, a argila e o silte. O transporte de areia tem sido estudado extensivamente em hidráulica fluvial, sendo que, fórmulas empíricas e gráficos experimentais são frequentemente disponíveis para estimar a sua tensão trativa crítica. O diagrama de Shields, (24) preparado com base em muitos dados experimentais, representa um modo teórico de calcular a tensão trativa crítica de partículas de vários tamanhos e pesos específicos, a diferentes temperaturas.

Partículas não coesivas, como a areia, em condutos com declividade positiva, estão sujeitas a duas forças:

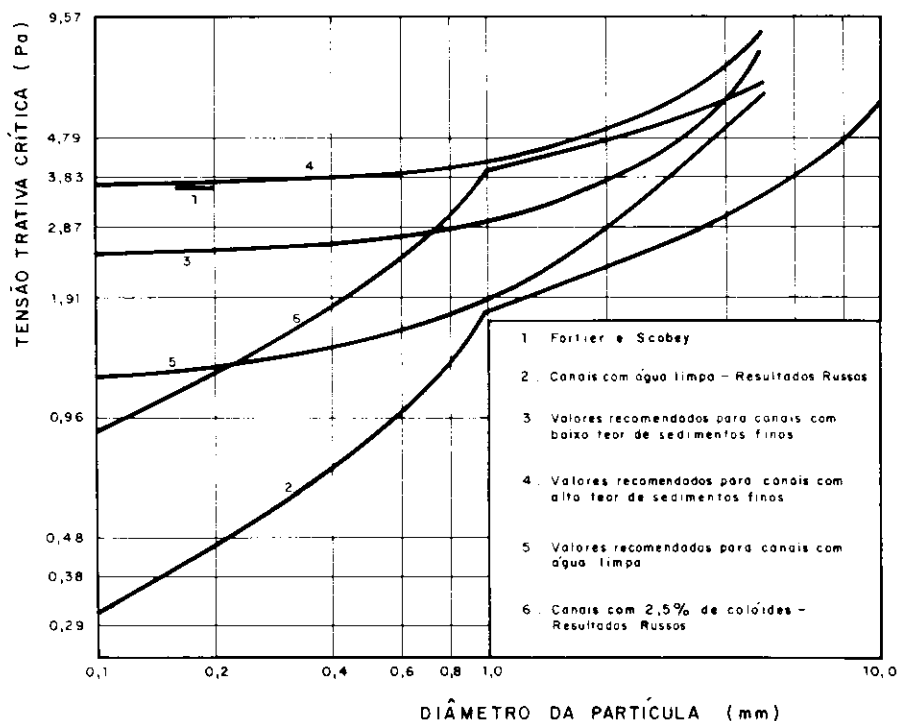


Figura 4 — Tensão trativa crítica para o início do movimento das partículas de areia

uma devida à tensão trativa do líquido e a outra ao seu componente peso, os quais tendem a movimentar a partícula. Pesquisas efetuadas pelo Bureau of Reclamation (17), mostram que a tensão trativa crítica é menor quando a partícula se encontra no trecho curvo da tubulação. Segundo Paintal, (17) para o transporte de sólidos nas tubulações de esgoto a tensão trativa crítica deve se referir à movimentação de partículas localizadas na geratriz inferior da tubulação.

A relação entre a tensão trativa crítica e o diâmetro das partículas de areia foi pesquisada por Lane (10), e seus resultados estão apresentados na figura 4.

Pela figura 4, observa-se que a tensão trativa crítica não varia linearmente com o diâmetro da partícula. Para água limpa a tensão trativa crítica é consideravelmente menor do que água com pequena ou alta concentração de sedimentos.

As caixas de areia nos sistemas de esgotos sanitários são normalmente projetadas para remover partículas de areia (peso específico de 2,65 g/cm<sup>3</sup>) com diâmetros iguais ou maiores que 0,2 mm. Segundo Pessoa e Jordão (18), na prática, são retidas partículas cujos diâmetros variam de 0,1 a 0,40 mm.

O Quadro 2 apresenta a tensão trativa crítica para partículas de areia com dimensões de 0,2 e 1 mm, obtidas através do diagrama de Shields, bem como por outros pesquisadores (30).

Para se obter a tensão trativa em pascal (Pa), será considerada a seguinte aproximação:

$$1 \text{ kgf/m}^2 \cong 10 \text{ N/m}^2 = 10 \text{ Pa}$$

Devido à presença de gorduras e matérias orgânicas, geralmente o esgoto sanitário tem a seguinte concentração (6):

- partículas em suspensão menores que 0,04%;
- a soma de partículas em suspensão e partículas coloidais são frequentemente menores que 0,1%.

As tubulações de esgoto devem ser projetadas de modo que não ocorra a deposição da matéria orgânica. Entretanto, considerando a sedimentação de partículas orgânicas nas tubulações e admitindo que essas partículas têm dimensões de 1 mm e peso específico 1,01, a tensão trativa crítica estimada pelo diagrama de Shields é de 0,0015 Pa (30). Se houver a agregação dessas partículas, conseqüentemente aumentando o tamanho, por exemplo, para 10 mm, a tensão trativa crítica será de aproximadamente 0,006 Pa (30). Observamos que, no projeto das estações de tratamento de esgoto, as partículas orgânicas normalmente consideradas são de 1 mm e peso específico igual ou maior que 1,001 g/cm<sup>3</sup> (6).

Tem sido observado que as partículas que possuem propriedades coesivas, principalmente as que são de di-

Quadro 2 — Tensão trativa crítica para partículas de areia de 0,2 e 1 mm

A u t o r	Tensão Trativa Crítica em kgf/m <sup>2</sup> (Pa)	
	0,2 mm	1 mm
Diagrama de Shields	0,024 (0,24)	0,064 (0,64)
Lane	0,15 (1,5)	0,20 (2,0)
Du Boys e Straub	0,08 (0,8)	0,16 (1,6)
Resultados Russos		
- Água limpa	0,05 (0,5)	0,20 (2,0)
- Com 2,5% de colóides	0,15 (1,5)	0,39 (3,9)
Fortier e Scobey (com colóides)	0,39 (3,9)	0,39 (3,9)

menções reduzidas podem necessitar de tensão trativa crítica elevada.

Dunn<sup>(3)</sup> estudando a tensão trativa crítica em um canal escoando líquido contendo quantidade grande de silte e argila obteve o valor de 24 Pa. Esse valor representa a tensão necessária para movimentar as partículas de sedimentos já depositadas no leito do canal. Em esgotos sanitários, observa-se que as concentrações de argila, silte e outros materiais coesivos são relativamente pequenas.

Portanto, pela análise dos materiais orgânicos e inorgânicos encontrados nos esgotos, concluímos que as partículas de areia são as que merecem maiores atenções para a autolimpeza dos coletores de esgoto.

Yao<sup>(30)</sup> recomenda que, para o es-

tudo de autolimpeza, sejam utilizadas partículas de areia com diâmetros variando de 0,2 a 1 mm.

O Quadro 3 apresenta a tensão trativa crítica para ser utilizada no dimensionamento das tubulações de esgoto, obtida por diversos pesquisadores.

Pelo que se observa no Quadro 3, a maioria das pesquisas realizadas a respeito da tensão trativa crítica para a autolimpeza em coletores de esgoto indica valores variando entre 1,0 a 2,0 Pa.

Esses valores são normalmente utilizados, considerando o escoamento a seção plena nas tubulações.

A Sabesp, em sua instrução interna (IP-015/1980), adotou o conceito de

tensão trativa para a elaboração de projetos de rede e coletores-tronco da Região Metropolitana de São Paulo. Essa instrução complementava a PNB-567/75 da ABNT no que se refere à seguinte condição:

- dispensa-se a obediência da condição  $y/D \geq 0,2$  para as condições de início de funcionamento da rede, sempre que a tensão trativa for maior ou igual a 0,15 kgf/m<sup>2</sup>.

Em 1983, a Sabesp, através de uma norma interna denominada "Diretrizes básicas a serem adotadas nos projetos das redes coletoras de esgotos", recomenda que, para o dimensionamento hidráulico dos coletores de esgoto seja utilizado o conceito de tensão trativa, em substituição à velocidade de autolimpeza preconizada pela PNB-567/75. Segundo essa norma, os coletores de esgoto devem ser dimensionados de modo a atender à seguinte condição:

- a declividade a ser adotada deverá proporcionar uma tensão trativa média  $\sigma = 1.000 R_H I \geq 0,10$  kgf/m<sup>2</sup> ... (5).

A declividade mínima poderá ser obtida pela aplicação da fórmula aproximada:

$$I = 0,0055 Q^{-0,47} \dots (6)$$

onde I é a declividade mínima, em m/m, e Q a vazão de dimensionamento, em l/s.

#### 4.3 — Tensão trativa e a prevenção quanto à geração de sulfetos

A DBO e a temperatura do esgoto são fatores fundamentais na geração de sulfetos. Para as nossas condições a Cetesb<sup>(3)</sup>, em pesquisa realizada em sete cidades do interior do Estado de São Paulo, mediu a DBO do esgoto e a temperatura obtendo valores de 250 mg/l e 25°C. A Sabesp<sup>(25)</sup>, pesquisando as características do esgoto afluente à Estação de Tratamento da Leopoldina, obteve os valores de DBO = 280 mg/l e temperatura de 25°C, correspondendo às condições médias mensais mais desfavoráveis do ano de 1979.

Considerando os valores de DBO de 250 mg/l e 300 mg/l e temperatura de 25°C, correspondendo aproximadamente aos valores pesquisados, teremos para a DBO<sub>E</sub> os valores de 350,64 e 420,77 mg/l, respectivamente. Convém salientar que, Pomeroy<sup>(27)</sup> recomenda que sejam tomadas as temperaturas médias dos três meses mais quentes e a DBO média das máximas de seis horas consecutivas, durante o dia, para se determinar os máximos prováveis valores de Z.

Quadro 3 — Tensão trativa crítica para ser utilizada no dimensionamento das tubulações de esgoto

Autor	Tensão Trativa Crítica		Fonte
	kgf/m <sup>2</sup>	Pa	
Gustafsson	0,10 - 0,15	1,0 - 1,5	8
Schultz	0,15 - 0,20	1,5 - 2,0	23
Lynse	0,20 - 0,39	2,0 - 3,9	15
Paintal	0,39	3,9	17
Yao	0,10 - 0,20	1,0 - 2,0	30

As velocidades apresentadas na figura 5 para as condições de  $Z = 5.000$ ,  $7.500$  e  $10.000$ , foram calculadas através da seguinte equação:

$$V = 0,3048 \left( \frac{DBO_E}{Z \cdot n} \right)^{0,75} \frac{R_H^{0,5}}{A^{0,25}} \left( \frac{p}{b} \right)^{0,75} \quad (7)$$

onde:

- $V$  = velocidade na tubulação, m/s;
- $DBO_E$  = DBO efetiva, mg/l;
- $Z$  = indicador da tendência para a ocorrência de sulfetos,  $mg \cdot s^{1/3} / l \cdot pé$ ;
- $n$  = coeficiente de rugosidade de Manning ( $n = 0,013$ );
- 0,3048 = coeficiente de conversão da unidade;
- $R_H$  = raio hidráulico, m;
- $A$  = área molhada,  $m^2$ ;
- $p$  = perímetro molhado, m;
- $b$  = largura da superfície do líquido, m.

A equação (7) resultou da associação da fórmula Z de Pomeroy-Davy, com a equação de Manning e equação da Continuidade.

A figura 5 apresenta a comparação das velocidades em função do diâmetro e das lâminas ( $y/D = 0,20$ ), para as condições da equação (7) e tensões trativas de 0,6; 0,8; 1,0; 1,5 e 2,0 Pa.

Considerando que a DBO dos esgotos varia de 250 a 300 mg/l e que a temperatura é da ordem de 25°C pela figura 5 pode-se concluir que:

- $\sigma = 0,6$  Pa — implica geração de sulfetos
- $\sigma = 0,8$  Pa — atende às seguintes condições:
  - $Z = 10.000$  e  $DBO = 250$  mg/l;  $D \geq 500$  mm;
  - $Z = 10.000$  e  $DBO = 300$  mg/l;  $D \geq 1.100$  mm;
- $\sigma = 1,0$  Pa — atende às seguintes condições:
  - $Z = 10.000$  e  $DBO = 250$  mg/l;  $D \geq 300$  mm;
  - $Z = 10.000$  e  $DBO = 300$  mg/l;  $D \geq 550$  mm;
  - $Z = 7.500$  e  $DBO = 250$  mg/l;  $D \geq 900$  mm;
- $\sigma = 1,5$  Pa — atende às seguintes condições:

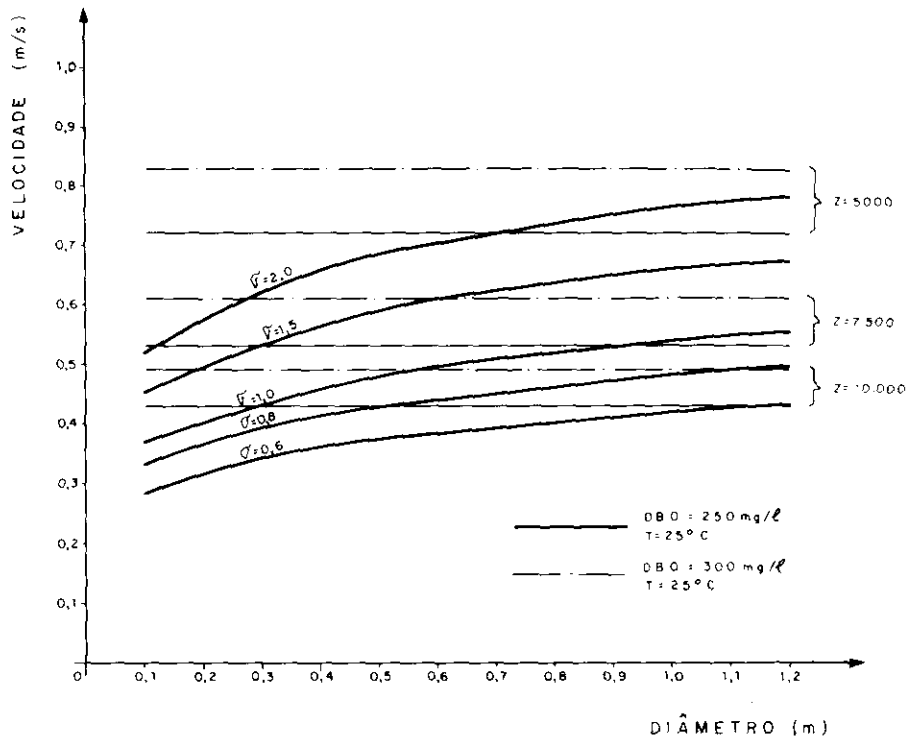


Figura 5 — Determinação da velocidade em função do diâmetro e relação  $y/D = 0,20$ , para as condições da fórmula Z e tensões trativas

$Z = 10.000$  e  $DBO = 250$  mg/l;  $D \geq 100$  mm;

$Z = 10.000$  e  $DBO = 300$  mg/l;  $D \geq 200$  mm;

$Z = 7.500$  e  $DBO = 250$  mg/l;  $D \geq 300$  mm;

$Z = 7.500$  e  $DBO = 300$  mg/l;  $D \geq 600$  mm;

- $\sigma = 2,0$  Pa — atende às seguintes condições:

$Z = 10.000$  e  $DBO = 250$  mg/l;  $D \geq 100$  mm;

$Z = 10.000$  e  $DBO = 300$  mg/l;  $D \geq 100$  mm;

$Z = 7.500$  e  $DBO = 250$  mg/l;  $D \geq 150$  mm;

$Z = 7.500$  e  $DBO = 300$  mg/l;  $D \geq 300$  mm;

$Z = 5.000$  e  $DBO = 250$  mg/l;  $D \geq 700$  mm;

Devido ao fato de que nas redes coletoras, onde os diâmetros são pequenos, normalmente não há geração de sulfeto, e além disso, as tubulações utilizadas são de manilha cerâmica que não são atacadas pelo ácido sulfúrico, é recomendável que o estudo sobre a geração de sulfeto seja efetuado para diâmetros maiores. Para essas condições, a utilização da tensão trativa mínima de 1,0 Pa parece

ser um critério razoável de projeto para se prevenir quanto à geração de sulfetos, embora na literatura técnica outros autores recomendem valores maiores para a tensão trativa, tais como:

- Paintal (18);  $\sigma = 3,9$  Pa;
- Robertson (18);  $\sigma = 3,4$  Pa;
- Reid e Yang (18);  $\sigma = 2,9$  Pa;
- Yao (31);  $\sigma = 1,5$  a  $2,0$  Pa;
- Takahashi (25);  $\sigma = 1,5$  Pa.

Os estudos realizados pelos autores mencionados consideraram condições de DBO e temperatura diferentes daquelas adotadas neste trabalho.

Para o controle de sulfeto, Yao (31) e Paintal (18) consideram importante que a lâmina nas tubulações de esgoto não exceda a 2/3 do diâmetro da tubulação. Para tubulações parcialmente cheias o ar sobre a superfície livre permite a ventilação e a aeração do esgoto, dificultando o desenvolvimento de condições anaeróbias. Também, os pontos de turbulência, como por exemplo os degraus, introduzem substancial quantidade de oxigênio dissolvido, no entanto, deve-se tomar o cuidado de que esses pontos promovam uma acentuada liberação de sulfeto, se este já estiver presente no esgoto.

## 5. VELOCIDADE DE AUTOLIMPEZA PARA DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES DE ESGOTO

### 5.1 — Considerações gerais

Como a vazão de esgoto é variável com o tempo, a lâmina e a velocidade na tubulação também variam. Se o esgoto escoar com velocidade baixa durante as horas de menor contribuição, materiais sólidos podem ser depositados na tubulação. Entretanto, a tubulação deve ser projetada de modo a alcançar uma velocidade mínima de escoamento, suficiente para assegurar a ação de autolimpeza nas horas de maior contribuição.

Tradicionalmente, considera-se que a ação de autolimpeza nas tubulações de esgoto é alcançada quando ocorrem simultaneamente determinadas lâminas e velocidades mínimas. Essas condições normalmente são críticas no início do funcionamento do sistema, quando as vazões de esgoto são menores.

### 5.2 — Velocidade mínima para autolimpeza

A velocidade de autolimpeza é a velocidade mínima capaz de transportar materiais sólidos encontrados nos esgotos, evitando-se, assim, a sua deposição nas tubulações.

A velocidade mínima necessária para o transporte de sedimentos é calculada pela seguinte expressão:

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

$$\frac{R_H^{1/6}}{n} \sqrt{B (s - 1) d} \dots (8)$$

onde:

- V = velocidade mínima, m/s;
- f = coeficiente de atrito da fórmula Universal;
- n = coeficiente de rugosidade de Manning;
- g = aceleração da gravidade, m/s<sup>2</sup>;
- s = relação entre o peso específico do sólido ( $\gamma_s$ ) com o peso específico do líquido ( $\gamma$ );
- d = diâmetro da partícula, m;
- B = constante adimensional, com valor de 0,04 para início do movimento de partículas granular e de 0,8 para a adequada autolimpeza dos materiais coesivos;
- $R_H$  = raio hidráulico, m.

Segundo WPCF (28), a equação 8 foi desenvolvida por Camp, utilizando-se

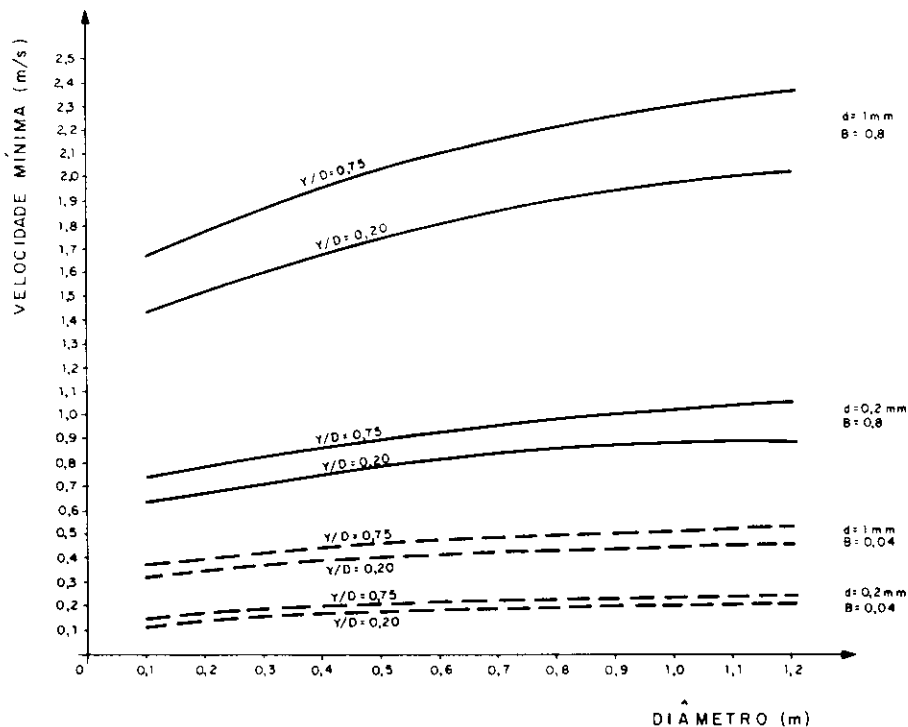


Figura 6 — Velocidades mínimas necessárias para o transporte de sedimentos

os dados experimentais de Shields sobre o movimento de materiais ungranulares depositados no leito do canal. Essa equação indica que a velocidade necessária para o transporte de material sólido depende fundamentalmente do coeficiente de atrito da tubulação, do diâmetro da partícula e de seu peso específico. Convém ressaltar que, essa equação recomendada pela WPCF (28), (29) para determinar a velocidade de autolimpeza nas tubulações de esgoto, foi deduzida utilizando o conceito da tensão e a equação geral dos condutos livres para escoamento uniforme, conforme referências (7), (12) e (20).

O gráfico da figura 6 resulta da equação (8) onde foram considerados: partículas com diâmetros de 0,2 mm e 1 mm, peso específico de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, constante adimensional B de 0,04 e 0,8, coeficiente de Manning de 0,013 e relação  $y/D = 0,20$  e  $y/D = 0,75$ .

Pela análise da figura 6, pode-se concluir que:

- a velocidade de autolimpeza varia com o diâmetro da tubulação; para diâmetros menores as velocidades são menores;
- a velocidade de autolimpeza varia com a altura da lâmina na tubulação; aumentando a lâmina também aumenta a velocidade;
- as velocidades mínimas necessárias para a movimentação de partículas granulares em função do diâmetro são:

— partículas de areia com diâmetro de 0,2 mm;

Velocidade mínima (m/s)	Diâmetro da tubulação (mm)
0,2	100 — 400
0,3	400 — 1.200

— partículas de areia com diâmetro de 1 mm;

Velocidade mínima (m/s)	Diâmetro da tubulação (mm)
0,40	100 — 200
0,50	200 — 800
0,60	800 — 1.200

● as velocidades mínimas necessárias para a adequada autolimpeza dos materiais coesivos em função do diâmetro são:

— para partículas com diâmetro de 0,2 mm;

Velocidade mínima (m/s)	Diâmetro da tubulação (mm)
0,80	100 — 200
0,90	200 — 400
1,00	400 — 800
1,10	800 — 1.200

-- para partículas com diâmetro de 1 mm.

Velocidade mínima (m/s)	Diâmetro da tubulação (mm)
1,70	100
1,80	200
1,90	300
2,00	400
2,10	500
2,20	500 - 700
2,30	700 - 1.000
2,40	1.000 - 1.200

O critério convencional adotado em vários países para a ação de autolimpeza é projetar as tubulações de esgoto com declividades suficientes para se ter velocidade mínima de 0,60 m/s, com escoamento a meia ou a seção plena. Nessas condições, para lâminas menores que meia seção, a velocidade será menor que 0,60 m/s e para lâminas maiores a velocidade será maior.

Camp <sup>(2)</sup> justifica uma velocidade menor de autolimpeza para lâminas menores, porque nessas condições haverá mais turbulência do líquido junto às paredes da tubulação, devido ao aumento da rugosidade, e esse acréscimo da turbulência permite igual limpeza mesmo com velocidades menores.

Para Metcalf-Eddy <sup>(16)</sup> a velocidade média de 0,30 m/s é geralmente suficiente para prevenir a deposição de partículas orgânicas do esgoto, entretanto, para que não haja a sedimentação de partículas inorgânicas, tais como a areia, a velocidade média de 0,75 m/s é considerada adequada para o projeto das tubulações de esgoto.

WPCF <sup>(20)</sup> recomenda que as tubulações de esgoto sejam projetadas com velocidades superiores a 0,91 m/s, embora velocidades de 0,46 m/s a seção plena tenha sido utilizada com sucesso nos Estados Unidos.

Segundo Paes Leme <sup>(11)</sup> partículas pesadas com diâmetro de 0,2 mm, depositam-se em velocidades menores que 0,15 m/s e são deslocadas e transportadas em velocidades iguais ou maiores que 0,40 m/s. Portanto, obedecido o limite mínimo de velocidade de 0,15 m/s, nas horas de me-

nor contribuição, a autolimpeza será garantida, se na hora de pico ocorrer a velocidade mínima de 0,60 m/s simultaneamente com a altura da lâmina de 20% do diâmetro.

### 5.3 — Lâmina mínima

Detritos leves que flutuam no esgoto podem aderir às paredes das canalizações nas situações em que a lâmina e a velocidade são pequenas. Esses detritos podem ser deslocados pela ação de flutuação que aumenta com a altura da lâmina ou através de velocidade adequada. A experiência tem demonstrado que, nos casos em que a lâmina é pequena mas a velocidade é alta, são raros os casos de sedimentação de material sólido nas tubulações.

A antiga norma do DOS fixava a lâmina mínima em 0,05 m e, para os casos em que não fosse possível obtê-la, preconizava a instalação de tanques fluxíveis. As normas da antiga Saec (ex-DAE) permitiram a adoção de declividades inferiores às recomendadas (ver item 5.4), desde que a altura da lâmina líquida fosse igual ou maior a 3/10 do diâmetro para a vazão média de projeto. As normas do DNOS estabeleciam que, nas regiões de fracas declividades, as alturas mínimas de lâmina de água seriam de 20% do diâmetro, com velocidade mínima de escoamento de 0,60 m/s para a vazão inicial.

A PNB-567/75 recomenda que, para velocidade inicial variando entre 0,50 a 0,60 m/s a relação  $y_i/D$  deverá ser superior a 20%, sendo  $y_i$  a lâmina correspondente à vazão inicial de dimensionamento. Para velocidades superiores a 0,60 m/s podem ser tolerados enchimentos menores que 20%.

As Instruções Técnicas Interministeriais da França <sup>(11)</sup> sugerem como limites mínimos para lâmina nas tubulações de esgoto, os valores D/4 ou D/5.

### 5.4 — Declividades mínimas

Os principais valores de declividades mínimas para projeto das tubulações de esgoto, recomendados por diversas fontes, são apresentados a seguir:

#### ● Norma da antiga Saec (ex-DAE)

Todas as canalizações devem ser projetadas e construídas com declividade suficiente para que a velocidade média, quando metade da seção estiver sendo utilizada, não seja inferior a 0,60 m/s. As declividades mínimas desejáveis para o projeto das tubulações de esgoto, utilizando a fórmula de Ganguillet-Kutter, são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 — Declividades mínimas — Norma da Saec (ex-DAE)

Diâmetros (mm)	Declividades mínimas (m/m)	Diâmetros (mm)	Declividades mínimas (m/m)
150	0,0070	500	0,0015
200	0,0050	600	0,0010
250	0,0035	700	0,0008
300	0,0025	800	0,0006
350	0,0023	900	0,00050
400	0,0020	1.000	0,00045
450	0,0018	1.200	0,00040



● PNB-567/75

As declividades mínimas admissíveis para satisfazer a velocidade inicial de dimensionamento,  $v_i = 0,50$  m/s nos condutos, serão, sempre que necessário, calculadas em função da vazão inicial  $Q_i$ , pela expressão:

$$l_{\text{mín}} = 0,01 \times Q_i^{-2/3} \dots\dots\dots (9)$$

para  $Q_i$  expresso em l/s e  $l$  em m/m.

● Metcalf-Eddy (1\*)

As tubulações de esgoto devem ser projetadas com declividades suficientes para se ter velocidade mínima de 0,60 m/s a meia seção ou a seção plena. As declividades mínimas recomendadas são apresentadas no Quadro 5.

As declividades do Quadro 5 foram calculadas utilizando a equação de Manning com velocidade mínima de 0,60 m/s. Para Metcalf-Eddy a declividade mínima que permite uma adequada execução dos coletores é de 0,0008 m/m.

● WPCF (2\*)

A velocidade mínima recomendada pela WPCF é de 0,60 m/s para meia seção ou seção plena. Considerando essa velocidade e admitindo  $n = 0,013$ , WPCF apresenta as declividades mínimas conforme Quadro 6.

Quadro 6 — Declividades mínimas — WPCF

Diâmetros (mm)	Declividades mínimas (m/m)
150	0,0050
200	0,0040
250	0,0028
300	0,0022
375	0,0015

6. COMPARAÇÃO ENTRE O CRITÉRIO DA TENSÃO TRATIVA E O DA VELOCIDADE DE AUTOLIMPEZA

6.1 Considerações sobre as normas utilizadas

Em nosso país, a maioria dos projetos das tubulações de esgoto sanitário foi elaborada tendo como base:

- Norma da antiga Saec (ex-DAE) de 1960;
- PNB-567/ABNT de 1975.

Essas normas foram elaboradas para assegurar a ação de autolimpeza nas

Quadro 5 — Declividades mínimas — Metcalf-Eddy

Diâmetros (mm)	Declividades mínimas (m/m)	
	$n = 0,013$	$n = 0,015$
200	0,0033	0,0044
250	0,0025	0,0033
300	0,0014	0,0019
450	0,0011	0,0015
525	0,0009	0,0012
600	0,0008	0,0010
675	0,0007	0,0009
750	0,0006	0,0008
900	0,0004	0,0006

tubulações e aplicadas nas mais diversas situações, desde locais com topografia favorável até locais com topografia desfavorável, como, por exemplo, nas regiões litorâneas. A experiência tem demonstrado que as tubulações de esgoto executadas, obedecendo as diretrizes fixadas por essas normas, têm funcionado satisfatoriamente, podendo-se concluir que essas normas atendem às condições de esgotamento sanitário em nosso país, no que se refere à condição de autolimpeza.

A norma da Saec, a PNB-567/75, WPCF e Metcalf-Eddy utilizam o critério da velocidade de autolimpeza para o dimensionamento das tubulações de esgoto e admitem que a ação de autolimpeza é obtida pela

manutenção de uma velocidade mínima independentemente do diâmetro da tubulação.

O gráfico da figura 7 mostra a variação da velocidade em função do diâmetro da tubulação e das lâminas, e é obtido através das seguintes considerações:

● PNB-567/75

Para a condição  $y/D = 0,20$  foi admitido  $V = 0,50$  m/s conforme recomendação dessa norma. Para essa condição hidráulica foi calculada a velocidade para  $y/D = 0,75$  através da fórmula de Manning com  $n = 0,013$ .

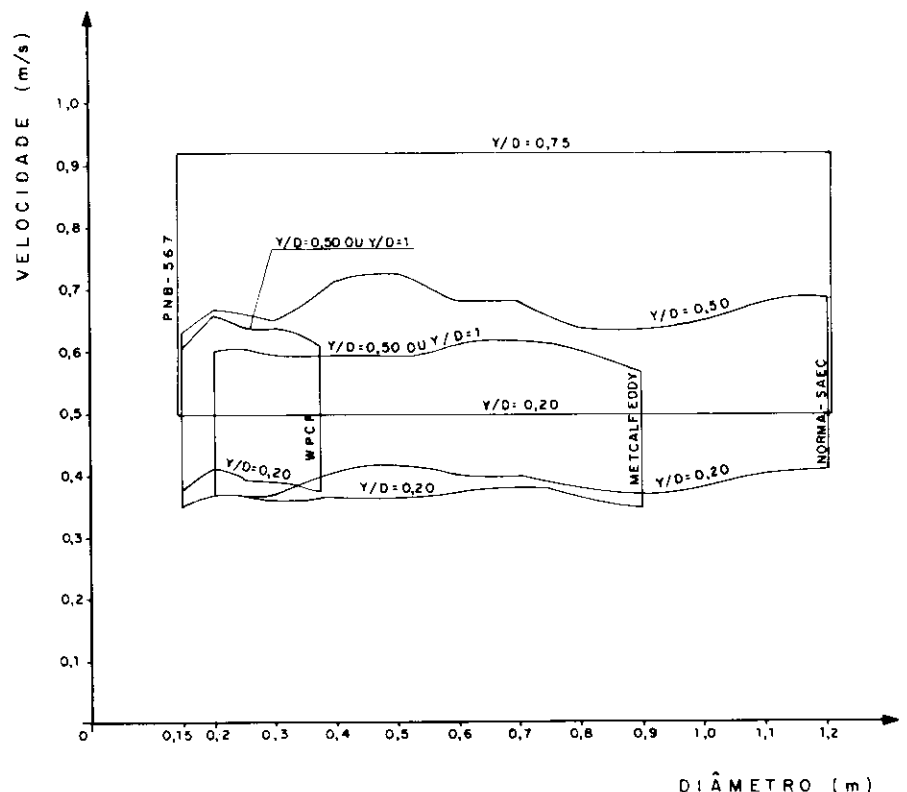


Figura 7 — Velocidade em função do diâmetro do coletor e das lâminas, para as condições fixadas pelas normas e outros autores

● Norma da Saec (ex-DAE)

Com as declividades mínimas recomendadas no Quadro 4, calculam-se as velocidades para as condições de  $y/D = 0,20$  e  $y/D = 0,50$  através da fórmula de Ganguillet-Kutter com  $n = 0,013$ .

● WPCF e Metcalf-Eddy

Considerando as declividades mínimas conforme Quadros 5 e 6 e utilizando a fórmula de Manning com  $n = 0,013$ , foram calculadas as velocidades para as condições de  $y/D = 0,20$  e  $y/D = 0,50$ . Observamos que tanto WPCF como Metcalf-Eddy admitem que os coletores de esgoto podem funcionar à seção plena.

Pela análise da figura 7, pode-se concluir que:

● As velocidades para a condição de  $y/D = 0,20$  serão:

— Norma da Saec: 0,35 — 0,42 m/s; — PNB-567/75: 0,50 m/s; — Metcalf-Eddy: 0,35 — 0,38 m/s; — WPCF: 0,37 — 0,41 m/s.

● As velocidades para a condição de  $y/D = 0,50$  serão:

— Norma da Saec: 0,63 — 0,73 m/s; Metcalf-Eddy: 0,57 — 0,62 m/s; WPCF: 0,60 — 0,66 m/s.

● Para a condição  $y/D = 0,75$  a velocidade será de 0,92 m/s (PNB-567/75).

● As diretrizes da WPCF e Metcalf-Eddy estão inseridas na norma da Saec.

● As diretrizes fixadas pela PNB-567/75 estão a favor da segurança em relação a WPCF, Metcalf-Eddy e à norma da Saec.

6.2 Tensão trativa x velocidade de autolimpeza

As pesquisas realizadas a respeito da tensão trativa crítica para o projeto das tubulações de esgoto, conforme apresentado no Quadro 3, indicam valores variando entre 1,0 a 2,0 Pa. Esses valores foram recomendados para o projeto das tubulações de esgoto, considerando conduto à seção plena. Entretanto, em nosso meio, as tubulações de esgoto são dimensionadas para funcionarem parcialmente cheias, portanto, dependendo da relação  $y/D$  a tensão trativa para as nossas condições, poderão ser menores, conforme mostra a equação que resulta do seguinte:

● Conduto à seção plena:  
 $\sigma_c = \gamma R_H l \dots (10)$

● Conduto parcialmente cheio:  
 $\sigma = \gamma R_H l \dots (11)$

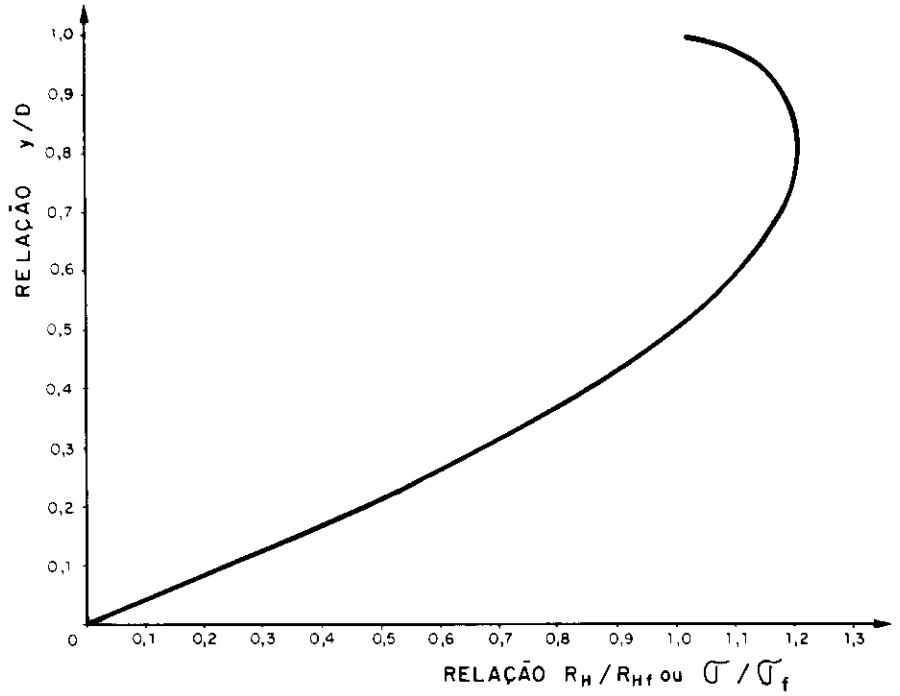


Figura 8 — Relação entre tensão trativa para condutos parcialmente cheios

Dividindo a equação (11) pela equação (10) temos:

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = \frac{R_H}{R_{Hf}} \dots (12)$$

$$\sigma = \frac{R_H}{R_{Hf}} \sigma_c \dots (13)$$

A equação (12) indica que a relação entre a tensão trativa para conduto parcialmente cheio e conduto à seção plena é a mesma relação entre os seus raios hidráulicos. A figura 8 apresenta para os valores de  $y/D$  os correspondentes valores de  $R_H / R_{Hf}$  que são os mesmos de  $\sigma / \sigma_c$ .

O Quadro 7, resulta da equação (13) onde foram calculadas as diver-

sas tensões trativas, considerando conduto parcialmente cheio com  $y/D$  variando de 0,20 a 0,75 e tensão trativa a seção plena de 0,6; 0,8; 1,0; 1,5 e 2,0 Pa.

Pelo que se observa no Quadro 7, as tensões trativas para  $y/D < 0,50$  são menores do que os valores fixados para a seção plena e para  $y/D > 0,50$  os valores são maiores.

O gráfico da figura 9 foi determinado através da seguinte equação:

$$V = \frac{1}{n} R_H^{1/6} \left( \frac{\sigma}{\gamma} \right)^{1/2} \dots (14)$$

onde:

V = velocidade, m/s;

n = coeficiente de rugosidade de Manning ( $n = 0,013$ );

Quadro 7 — Tensões trativas para conduto parcialmente cheio, admitindo um determinado valor para a seção plena

y/D	$\frac{R_H}{R_{Hf}}$	Valores de $\sigma$ (Pa)				
		$\sigma_f = 0,6$	$\sigma_f = 0,8$	$\sigma_f = 1,0$	$\sigma_f = 1,5$	$\sigma_f = 2,0$
0,20	0,47	0,28	0,38	0,47	0,71	0,94
0,30	0,68	0,41	0,54	0,68	1,02	1,36
0,40	0,86	0,52	0,69	0,86	1,29	1,72
0,50	1,00	0,60	0,80	1,00	1,50	2,00
0,60	1,11	0,67	0,89	1,11	1,67	2,22
0,70	1,19	0,71	0,95	1,19	1,79	2,38
0,75	1,21	0,73	0,97	1,21	1,82	2,42

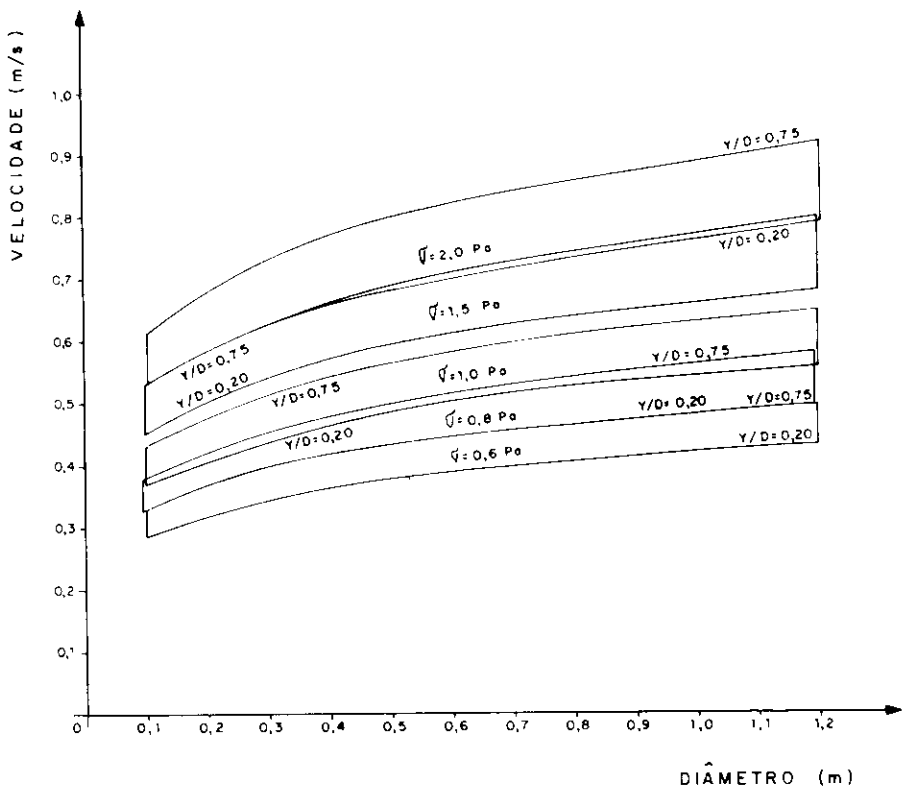


Figura 9 — Determinação da velocidade em função da tensão trativa, do diâmetro do coletor e das lâminas

$R_H$  = raio hidráulico, m;  
 $\sigma$  = tensão trativa, Pa;  
 $\gamma$  = peso específico do líquido,  $10^4$  N/m<sup>3</sup> para o esgoto.

As tensões trativas utilizadas foram de 0,6; 0,8; 1,0; 1,5 e 2,0 Pa. Observamos que a equação (14) resulta da combinação entre a equação de Manning ( $V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} I^{1/2}$ ) e a equação ( $\sigma = \gamma R_H I$ ) referente à tensão trativa.

A figura 9 indica que, utilizando a tensão trativa, a velocidade nos coletores é função do diâmetro do coletor, quanto maior o diâmetro maior será a velocidade.

A figura 10 resulta da associação parcial das figuras 6 e 9 e mostra que as tensões trativas de 0,6; 0,8 e 1,0 Pa movimentam, com folga, partículas de areia de diâmetro de 0,2 mm. Entretanto, considerando partículas de areia de 1 mm, a sua movi-

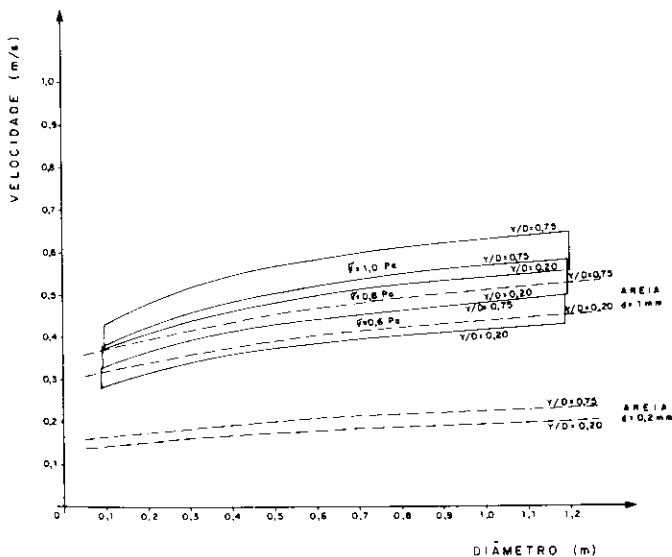


Figura 10 — Tensão trativa mínima necessária para a movimentação das partículas de areia

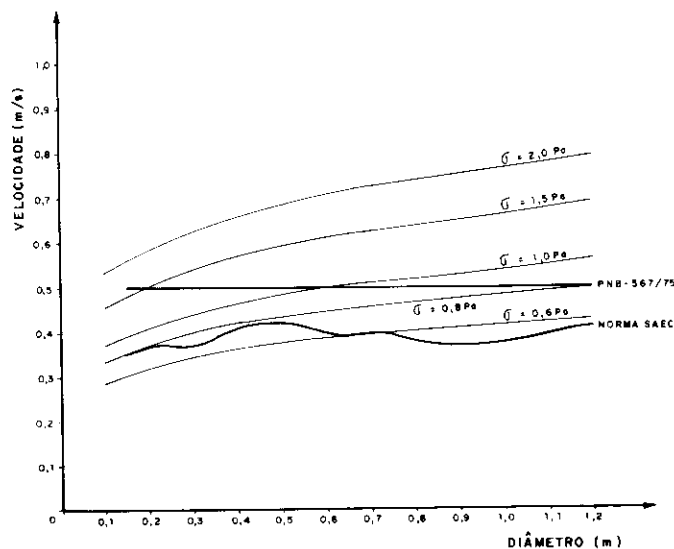


Figura 11 — Comparação entre o critério da tensão trativa com a da velocidade de autolimpeza, para as condições de  $y/D = 0,20$  e  $n = 0,013$

mentação só é possível para tensão trativa igual ou maior que 0,8 Pa.

A figura 11 resulta da associação da figura 7 com a figura 9, para a condição de  $y/D = 0,20$ . Pela análise da figura 11 pode-se concluir que:

- A PNB-567/75 atende ao critério da tensão trativa para valores de 1,5 e 2,0 Pa, e parcialmente para o valor de 1,0 Pa.

- A norma da Saec atende ao critério da tensão trativa para os valores de 0,8; 1,0; 1,5 e 2,0 Pa e parcialmente para o valor de 0,6 Pa.

Utilizando o ábaco desenvolvido por Pimentel (21) para as condições hidráulicas recomendadas pela PNB-567/75 e considerando para as condições críticas de escoamento a tensão trativa de 1,0 Pa, teremos as faixas de utilização conforme indicado na figura 12. Foi escolhida a tensão trativa de 1,0 Pa devido ao fato de que essa tensão atende às condições de autolimpeza e de controle de sulfetos. Pelo que se observa na figura 12, o critério da tensão trativa se torna mais econômico para pequenos diâmetros, no entanto, para grandes diâmetros haverá a necessidade de declividades maiores do que as recomendadas pela PNB-567/75 para se prevenir quanto a geração de sulfetos.

Como as declividades mínimas para grandes diâmetros são bastante reduzidas, deve ser também considerado o aspecto construtivo, pois não é recomendável declividade menor que 0,0005 m/m para o assentamento adequado das tubulações de esgoto. Portanto, para grandes diâmetros a declividade mínima escolhida deve atender às condições de autolimpeza, controle de sulfetos e aspectos construtivos.

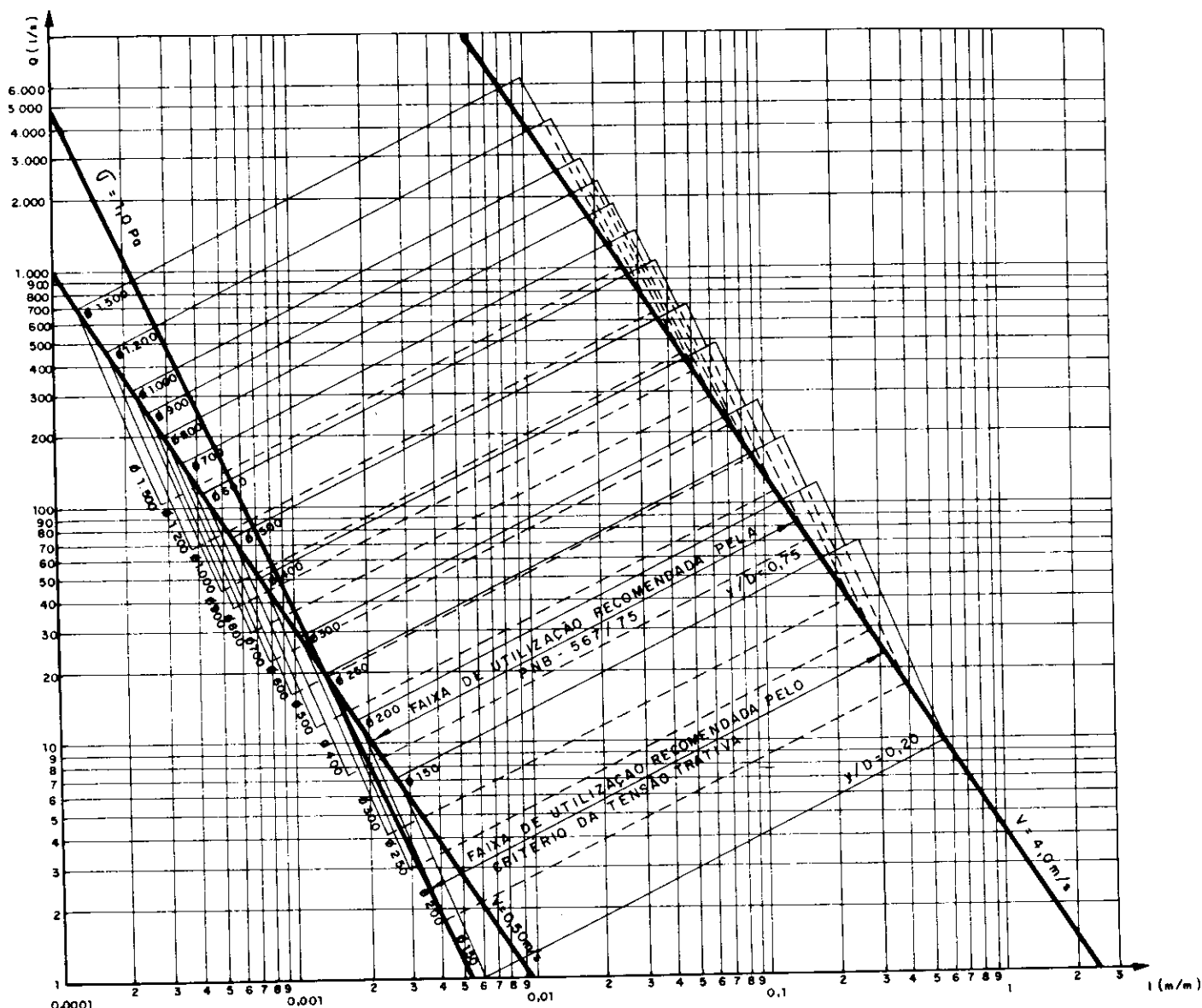


Figura 12 — Faixa de utilização recomendada pela PNB-567/75 e pelo critério da tensão trativa

A escolha do critério da tensão trativa em substituição à velocidade de autolimpeza para o dimensionamento das tubulações de esgoto, deve-se às seguintes considerações principais:

- o conceito da tensão trativa já é bem estabelecido no campo de transporte de sedimentos e para o projeto das tubulações de esgoto tem sido recomendado internacionalmente conforme referências citadas, e no Brasil a Sabesp já vem utilizando esse conceito;

- considerando uma determinada tensão trativa, a velocidade aumenta em função do aumento do diâmetro do coletor. Essa variação é a mesma observada pela equação (8) que, segundo a WPCF, serve para determinar a velocidade de autolimpeza nas tubulações de esgoto;

- a figura 13 indica que para uma determinada velocidade mínima a tensão trativa decresce com o aumento do diâmetro do coletor, e esse decréscimo é mais pronunciado quanto maior a velocidade mínima considerada. Isto significa que utilizando uma determinada velocidade independente do diâmetro do coletor a ação de autolimpeza seria menos efetiva para grandes diâmetros e, portanto, os pequenos coletores serão superdimensionados e os grandes coletores subdimensionados. Esse fato não ocorre quando se utiliza o conceito da tensão trativa para o projeto das tubulações de esgoto, pois conforme visto anteriormente, para uma dada tensão trativa a velocidade cresce com o aumento do diâmetro do coletor. A figura 13 resulta da seguinte equação:

$$\sigma = \gamma V^2 n^2 R_H^{-1/3} \dots (15)$$

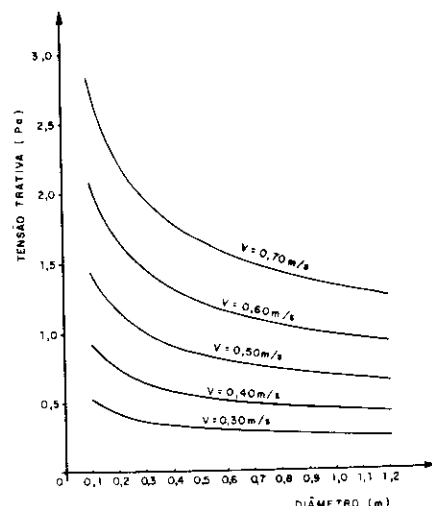


Figura 13 — Variação da tensão trativa em função do diâmetro e velocidades nos coletores, considerando  $y/D = 0,50$  e  $n = 0,013$

que se originou da combinação da equação de Manning com a equação da tensão trativa;

● o critério da tensão trativa tem sido recomendado para o controle de sulfetos em tubulações de esgoto, devido ao fato de que o desenvolvimento da película de limo está relacionado com a tensão trativa. Essa película formada nas partes submersas da tubulação constitui a principal fonte de geração de sulfetos em tubulações de esgoto.

## 7. DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES DE ESGOTO UTILIZANDO O CRITÉRIO DA TENSÃO TRATIVA

### 7.1 Equações básicas

Para o dimensionamento das tubulações de esgoto são utilizadas as seguintes equações:

- Continuidade:  $Q = VA$
- Manning:  $V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} |1/2$
- tensão trativa:  $\sigma = \gamma R_H l$

onde:

- Q = vazão, m<sup>3</sup>/s;
- V = velocidade média, m/s;
- A = área molhada, m<sup>2</sup>;
- n = coeficiente de rugosidade de Manning;
- R<sub>H</sub> = raio hidráulico, m;
- l = declividade da tubulação, m/m;
- σ = tensão trativa, Pa;
- γ = peso específico do líquido = 10<sup>4</sup> N/m<sup>3</sup>.

A seguir serão apresentadas as seguintes considerações:

#### a) Equação de Manning

A equação de Manning, devido à sua simplicidade e comprovação experimental, tem sido uma das equações mais utilizadas no dimensionamento das tubulações de esgoto, especialmente quando se utiliza o critério da tensão trativa.

A declividade (l) na equação de Manning é a declividade da linha de energia, e não a declividade da tubulação. Entretanto, em escoamento uniforme, essas declividades são equivalentes, portanto, para o projeto das tubulações de esgoto pode ser utilizada a declividade da tubulação.

O coeficiente de rugosidade de Manning (n) depende do diâmetro, da forma e do material da tubulação, da relação y/D e das características do esgoto. Embora o coeficiente n seja função dos fatores acima relacionados, tem sido normalmente utilizado em escoamento de esgoto o valor de 0,013. Para Metcalf-Eddy (10), esse

valor deve ser mantido, mesmo quando se utiliza materiais inicialmente menos rugosos e com comprimentos maiores do que as tubulações tradicionais, devido ao fato de que em sistema de esgoto o número de poços de visita (PV), tubos de inspeção (PI e TL), e demais singularidades permanecem o mesmo, independentemente do tipo de material da tubulação utilizada.

Além disso, segundo WPCF (28), havendo formação da película de limo, as paredes da tubulação tornam-se uma superfície uniforme e permanecem constantes ao longo do tempo, portanto, a rugosidade em tubulações de esgoto é a mesma e independe do material da tubulação.

#### b) Altura da lâmina de esgoto

##### ● Lâmina mínima

Pelo critério da tensão trativa, haverá autolimpeza nas tubulações de esgoto, desde que uma vez por dia atinja uma tensão trativa adequada (qualquer que seja a altura da lâmina). Entretanto, conforme visto no item 5.3, a experiência tem demonstrado que é recomendável que a lâmina mínima seja de 20% do diâmetro da tubulação.

##### ● Lâmina máxima

A lâmina máxima adotada será de 75% do diâmetro da tubulação, devido ao fato de que esse valor já é consagrado em nosso meio e, além disso, modificação para lâminas maiores, por exemplo para 80%, não traz nenhuma alteração significativa, pois o acréscimo de vazão é de aproximadamente 7%.

#### c) Velocidades máximas nas tubulações de esgoto

As velocidades nas tubulações de esgoto não devem ultrapassar determinados limites para evitar a ação erosiva das paredes do conduto. Os valores limites de velocidade são função do material da tubulação e das características do material sólido transportado pelo esgoto e, em especial, as partículas de areia.

As normas da Saec (ex-DAE), fixavam as seguintes velocidades máximas:

- manilha cerâmica vidrada 5,0 m/s;
- concreto 4,0 m/s;
- cimento-amianto 3,0 m/s;
- ferro fundido 6,0 m/s.

Metcalf-Eddy (16) recomenda para o projeto dos coletores de esgoto a velocidade máxima variando de 2,5 a 3,0 m/s.

Para WPCF (28) a velocidade máxima deverá ser de 3,0 m/s.

A PNB-567/75 recomenda para velocidade máxima o valor de 4,0 m/s. A Sabesp em sua norma interna "Diretrizes básicas a serem adotadas nos projetos das redes coletoras de esgoto", recomenda o valor de 6,0 m/s.

No presente estudo, será adotado para velocidade máxima o valor de 4,0 m/s, observando-se, entretanto, que a velocidade máxima é função do material da tubulação a ser utilizado.

### 7.2 — Sequência de cálculo

Conhecida as vazões em cada trecho, para dimensionar as tubulações de esgoto, devem ser determinados os valores do diâmetro e da declividade. Essa determinação e o cálculo da velocidade e da tensão trativa poderão ser feitos através da seguinte sequência:

a) Considerando a vazão inicial (Q<sub>i</sub>) e final (Q<sub>f</sub>) do trecho, pelo Abaco — "Dimensionamento e verificação das tubulações de esgoto" (anexo) teremos um determinado diâmetro e declividade. A declividade a ser adotada deverá ser aquela que implique menor escavação possível e o diâmetro escolhido deverá transportar as vazões Q<sub>i</sub> e Q<sub>f</sub>, de modo que a altura da lâmina na tubulação não seja superior a 75% do diâmetro.

A declividade mínima, que satisfaça a condição de tensão trativa de 1,0 Pa, também poderá ser obtida pela aplicação da fórmula aproximada:

$$l_{min} = 0,0055 Q^{-0,47}$$

onde l<sub>min</sub> é a declividade mínima, em m/m, e Q a vazão de dimensionamento, em l/s.

A declividade máxima, para satisfazer a condição de velocidade máxima de 4,0 m/s, também poderá ser obtida através da seguinte fórmula aproximada:

$$l_{max} = 2,54 Q^{-2/3}$$

onde l<sub>max</sub> é a declividade máxima, em m/m e Q é a vazão de dimensionamento, em l/s.

b) Conhecida a vazão, a declividade e o diâmetro do trecho, pela Tabela — "Dimensionamento e verificação das tubulações de esgoto", determina-se a relação y/D e a velocidade.

c) Com o valor de y/D, pelo Quadro 8 (13) apresentado a seguir, calcula-se o raio hidráulico.

d) Conhecendo o raio hidráulico e a declividade do trecho, determina-se a tensão trativa ( $\sigma = \gamma R l$ ) para as condições iniciais e finais.

# TABELA PARA DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DAS TUBULAÇÕES DE ESGOTO

FÓRMULA DE MANNING COM  $n = 0,013$

D (m)	UNIDADES										Q (m³/s)										y/d										I (m/m)										V (m/s)									
	0,025	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,225	0,250	0,275	0,300	0,325	0,350	0,375	0,400	0,425	0,450	0,475	0,500	0,525	0,550	0,575	0,600	0,625	0,650	0,675	0,700	0,725	0,750	0,775	0,800	0,825	0,850	0,875	0,900	0,925	0,950	0,975	1,000										
0,100	V/√I	1,08	1,88	2,20	2,64	3,04	3,40	3,73	4,04	4,34	4,61	4,85	5,11	5,35	5,54	5,74	5,94	6,11	6,28	6,43	6,58	6,74	6,88	6,91	7,05	7,14	7,23	7,30	7,37	7,42	7,46	7,48	7,50	7,50	7,48	7,44	7,41	7,32	7,20	7,04	6,88									
0,150	Q/√I	1,41	2,21	2,88	3,46	3,94	4,45	4,89	5,30	5,68	6,04	6,37	6,69	6,98	7,26	7,53	7,77	8,00	8,22	8,43	8,62	8,79	8,95	9,10	9,24	9,34	9,47	9,57	9,65	9,71	9,77	9,80	9,82	9,82	9,80	9,76	9,69	9,58	9,43	9,21	8,92									
0,200	Q/√I	1,70	2,86	3,48	4,19	4,82	5,39	5,93	6,42	6,88	7,31	7,72	8,10	8,46	8,80	9,12	9,42	9,70	9,96	10,21	10,44	10,68	10,88	11,03	11,19	11,34	11,47	11,59	11,69	11,77	11,83	11,87	11,90	11,90	11,87	11,82	11,73	11,61	11,43	11,18	10,84									
0,250	Q/√I	2,03	3,51	4,37	5,29	6,34	7,07	7,76	8,41	9,02	9,58	10,11	10,61	11,09	11,53	11,95	12,34	12,71	13,06	13,38	13,66	13,91	14,15	14,45	14,67	14,86	15,03	15,19	15,31	15,42	15,50	15,56	15,59	15,59	15,56	15,48	15,36	15,21	14,98	14,68	14,28									
0,300	Q/√I	2,21	4,04	4,96	5,94	6,94	7,76	8,41	9,02	9,58	10,11	10,61	11,09	11,53	11,95	12,34	12,71	13,06	13,38	13,66	13,91	14,15	14,45	14,67	14,86	15,03	15,19	15,31	15,42	15,50	15,56	15,59	15,59	15,56	15,48	15,36	15,21	14,98	14,68	14,28										
0,375	V/√I	2,59	4,08	5,30	6,37	7,33	8,20	9,01	9,76	10,46	11,12	11,74	12,32	12,86	13,38	13,86	14,32	14,74	15,15	15,52	15,87	16,19	16,49	16,77	17,02	17,24	17,43	17,62	17,77	17,89	17,99	18,05	18,09	18,09	18,05	17,97	17,84	17,65	17,38	16,98	16,57									
0,400	Q/√I	2,70	4,26	5,53	6,65	7,65	8,56	9,41	10,19	10,92	11,61	12,25	12,84	13,43	13,97	14,47	14,95	15,39	15,81	16,20	16,57	16,91	17,22	17,51	17,77	18,00	18,21	18,40	18,55	18,68	18,78	18,86	18,90	18,90	18,84	18,76	18,63	18,43	18,14	17,71	16,87									
0,450	V/√I	2,82	4,80	5,98	7,18	8,27	9,26	10,17	11,02	11,81	12,56	13,25	13,91	14,53	15,11	15,65	16,17	16,65	17,10	17,53	17,92	18,29	18,63	18,94	19,22	19,47	19,70	19,90	20,07	20,21	20,31	20,39	20,43	20,43	20,38	20,29	20,15	19,93	19,62	19,18	17,82									
0,500	Q/√I	3,14	4,84	6,42	7,71	8,87	9,94	10,91	11,82	12,67	13,47	14,22	14,92	15,58	16,21	16,79	17,34	17,86	18,35	18,80	19,23	19,62	19,98	20,31	20,62	20,89	21,13	21,35	21,53	21,68	21,79	21,87	21,91	21,91	21,87	21,77	21,61	21,38	21,05	20,58	19,23									
0,600	V/√I	3,54	5,56	7,25	8,71	10,02	11,22	12,33	13,35	14,31	15,21	16,06	16,85	17,60	18,30	18,96	19,59	20,17	20,72	21,23	21,71	22,15	22,56	22,94	23,28	23,59	23,87	24,11	24,31	24,48	24,61	24,74	24,74	24,74	24,69	24,58	24,41	24,15	23,77	23,20	21,71									
0,700	Q/√I	3,82	6,18	8,03	9,65	11,11	12,43	13,66	14,80	15,88	16,88	17,79	18,67	19,50	20,28	21,02	21,71	22,35	22,94	23,53	24,08	24,55	25,01	25,48	25,90	26,14	26,45	26,71	26,94	27,13	27,27	27,37	27,42	27,42	27,37	27,25	27,05	26,76	26,34	25,78	24,00									
0,800	V/√I	4,28	6,76	8,78	10,55	12,16	13,59	14,93	16,18	17,34	18,43	19,48	20,41	21,32	22,17	22,97	23,73	24,44	25,10	25,72	26,30	26,84	27,33	27,79	28,20	28,58	28,91	29,20	29,45	29,65	29,81	29,92	29,97	29,98	29,91	29,78	29,57	29,28	28,80	28,11	26,30									
0,900	Q/√I	4,64	7,53	9,50	11,41	13,13	14,70	16,15	17,50	18,78	19,93	21,04	22,08	23,06	23,99	24,85	25,68	26,43	27,15	27,82	28,45	29,03	29,57	30,08	30,51	30,91	31,27	31,59	31,88	32,07	32,24	32,38	32,43	32,42	32,36	32,22	31,98	31,64	31,18	30,41	28,48									
1,00	V/√I	4,96	7,84	10,18	12,34	14,09	15,77	17,33	18,77	20,12	21,38	22,57	23,69	24,74	25,73	26,66	27,53	28,35	29,13	29,85	30,52	31,14	31,72	32,25	32,73	33,18	33,58	33,93	34,17	34,41	34,58	34,72	34,78	34,78	34,71	34,56	34,31	33,94	33,42	32,82	30,82									
1,10	Q/√I	5,30	8,35	10,86	13,05	14,81	16,48	20,00	21,44	22,79	24,05	25,24	26,38	27,41	28,41	29,34	30,21	31,04	31,80	32,52	33,18	33,80	34,36	34,87	35,34	35,73	36,11	36,41	36,67	36,86	36,99	37,08	37,08	36,96	36,83	36,58	36,17	35,61	34,78	32,82										
1,20	V/√I	5,62	8,83	11,51	13,82	15,91	17,81	19,56	21,20	22,72	24,15	25,48	26,73	27,93	29,08	30,18	31,08	32,02	32,89	33,70	34,45	35,17	35,82	36,41	36,94	37,43	37,88	38,27	38,60	38,86	39,04	39,20	39,28	39,20	39,03	38,75	38,33	37,74	36,83	34,46										
1,50	Q/√I	6,08	10,20	13,40	16,08	18,26	20,26	22,11	23,81	25,39	26,89	28,34	29,65	30,92	32,15	33,33	34,46	35,54	36,57	37,55	38,48	39,36	40,19	40,96	41,69	42,37	43,00	43,58	44,11	44,58	44,99	45,35	45,65	45,89	46,02	46,02	45,89	45,52	44,98	44,28	43,30	41,75								
1,75	V/√I	7,25	11,38	14,81	17,76	20,52	22,92	25,14	27,26	29,27	31,18	33,05	34,83	36,53	38,17	39,67	41,03	42,31	43,54	44,72	45,85	46,93	47,95	48,92	49,85	50,74	51,58	52,38	53,13	53,83	54,48	55,08	55,64	56,15	56,61	56,98	57,26	57,45	57,54	57,54	57,43	57,11	56,61							
2,00	Q/√I	7,93	12,44	16,18	19,42	22,43	25,05	27,49	29,79	31,99	33,98	35,84	37,63	39,28	40,84	42,27	43,56	44,82	46,06	47,27	48,45	49,59	50,68	51,72	52,71	53,66	54,56	55,41	56,21	56,96	57,66	58,31	58,91	59,46	59,96	60,41	60,81	61,16	61,46	61,71	61,88	61,95	61,91	61,75	61,48					

Quadro 8 — Determinação do raio hidráulico em função de  $y/D$

$\alpha = \frac{y}{D}$	$\beta = \frac{R_H}{D}$	$\alpha = \frac{y}{D}$	$\beta = \frac{R_H}{D}$
0,025	0,016	0,550	0,265
0,050	0,033	0,600	0,278
0,075	0,048	0,650	0,288
0,100	0,064	0,700	0,297
0,125	0,079	0,750	0,302
0,150	0,093	0,775	0,304
0,175	0,107	0,800	0,304
0,200	0,121	0,825	0,304
0,225	0,134	0,850	0,304
0,250	0,147	0,875	0,301
0,300	0,171	0,900	0,299
0,350	0,194	0,925	0,294
0,400	0,215	0,950	0,287
0,450	0,234	0,975	0,277
0,500	0,250	1,000	0,250

## 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

● O dimensionamento das tubulações de esgoto envolve considerações sobre três aspectos principais: hidráulico, controle de sulfetos e ação de autolimpeza.

● O critério da tensão trativa parece ser mais adequado para o dimensionamento das tubulações de esgoto do que o critério da velocidade de autolimpeza.

● A equação de Manning com  $n = 0,013$  tem sido utilizada para o dimensionamento das tubulações de esgoto quando se aplica o critério da tensão trativa.

● Para o dimensionamento das tubulações de esgoto propõe-se, para a tensão trativa crítica, o valor de 1,0 Pa que atende à condição de autolimpeza e de controle de sulfetos.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 — American Concrete Pipe Association — Concrete Pipe Handbook, United States of America, 1980.
- 2 — Azevedo J. G. et al — Hidráulica das Redes de Esgotos. Fórmulas Hidráulicas Recomendadas. Comportamento Hidráulico dos Esgotos nas Transições. Velocidades Limites de

Escoamento. Altura da Lâmina Líquida. Declividades Mínimas e Máximas. In: **Sistemas de Esgotos Sanitários**, Cetesb, 2.ª edição. São Paulo, 1977.

- 3 — Cetesb — Condições de Funcionamento de Sete Lagoas de Estabilização no Estado de São Paulo. **Revista DAE**, 124: 55-74, 1981.
- 4 — Chow, V. T. — **Open-Channel Hydraulics** — MacGraw-Hill. New York, 1981.
- 5 — Dunn, I. S. — Tractive Resistance of Cohesive Channels. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 89 (SM3): 1-24, March 1963.
- 6 — Fair, G. M.; Geyer, J. C.; Okun, D. A. — **Elements of Water Supply and Wastewater Disposal**. John Wiley and Sons. 2nd ed. New York, 1971.
- 7 — Graf, W. H. — **Hydraulics of Sediment Transport**. MacGraw-Hill. New York, 1971.
- 8 — Gustafsson, B. — **Lecture Notes for Sanitary Engineers**. Kungliga Tekniska Hogskolan. Stockholm, 1964.
- 9 — Hauser, F. L.; Manzochi, L. B. — Previsão de Durabilidade de Concretos Preparados com Agregados Graníticos e Calcários em Túneis Emissários de Esgotos. **Revista DAE**, 131: 41-49, dezembro 1982.
- 10 — Lane, E. W. — Design of Stable Channels. **Transactions, ASCE**, 120 (2776): 1234-1260, 1955.
- 11 — Leme, F. P. — **Planejamento e Projeto dos Sistemas Urbanos de Esgotos Sanitários**. Cetesb. São Paulo, 1977.
- 12 — ——— — **Teoria e Técnicas de Tratamento de Água**. Cetesb. São Paulo, 1979.

- 13 — Lencastre, A. — **Manual de Hidráulica Geral**. Editora Edgard Blücher/Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1972.
- 14 — Ludwig, R. G.; Almeida, S. A. S. — Controle da Corrosão por Sulfetos no Projeto de Interceptores de Esgoto. **Revista DAE**, 39 (121): 70-81, 1979.
- 15 — Lysne, D. K. — Hydraulic Design of Self-Cleaning Sewage Tunnels. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, 95 (SAL): 17-36, February, 1969.
- 16 — Metcalf & Eddy, Inc. — **Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater**. MacGraw-Hill. New York, 1982.
- 17 — Paintal, A. S. — Hydraulic Design of Self-Cleaning Circular Sanitary Sewers. **Water & Sewage Works. Reference Number 1972: R-52** — R-60, August, 1972.
- 18 — ——— — Design Sewers to be Self-Cleaning. **Water & Waste Engineering**, 14 (1): 32-45, January, 1977.
- 19 — Pessoa, C. A.; Jordão, E. P. — **Tratamento de Esgotos Domésticos**. ABES/BNH. Vol. 1. 2.ª edição. Rio de Janeiro, 1982.
- 20 — Pimenta, C. F. — **Curso de Hidráulica Geral**. Centro Tecnológico de Hidráulica. Vol. 1. 3.ª edição. São Paulo, 1977.
- 21 — Pimentel, J. S. — Declividade dos Condutos Livres Circulares. **Revista Dirigente Construtor**, XIII (11): 7, novembro, 1977.
- 22 — Replogle, J. A.; Chow, V. T. — Tractive Force Distribution in Open Channels. **Journal of the Hydraulic Division**, 92 (HY2): 169-191, February, 1969.
- 23 — Schultz, H. — **Über Die Berechnung Der Unteren Grenzgeses Chwindig Keiten in Kanalisationsnetzen. Wasser Wirtschaft und Wassertechnik**, Heft, 7. Jahrgang, 1960.
- 24 — Symposium on Septic Sewagw: Problems and Solutions. Institute of Water Pollution Control. England, 1979 — 122 p.
- 25 — Takahashi, A. — **Sulfetos em Interceptores de Esgotos: Ocorrência, Medidas Preventivas e Corretivas**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1983.
- 26 — Task Committee for Preparation of the Sedimentation Manual, Committee on Sedimentation of the Hydraulics Division — Sediment Transportation Mechanics: J. Transportation of Sediment in Pipes. **Journal of the Hydraulics Division**, 96 (HYZ): 1503-1536, July, 1970.
- 27 — U. S. Environmental Protection Agency (EPA) — **Process Design Manual for Sulfide Control in Sanitary Sewerage Systems**. Washington, D. C. 1974. 128 p.
- 28 — Water Pollution Control Federation — **Design and Construction of Sanitary and Storm Sewer**. Washington, D. C. WPCF. Manual of Practice n.º 9, 1970.
- 29 — ———. Gravity Sanitary Sewer Design and Construction. WPCF. Manual of Practice NO. FD-5, 1982.
- 30 — Yao, K. M. — Sewer Line Design Based on Critical Shear Stress. **Journal of the Environmental Engineering Division**, 100 (EE2): 507-520, April, 1974.
- 31 — ——— — Functional Design of Sanitary Sewers. **Journal of the Water Pollution Control Federation**, 48 (7): 1772 — 1778, July, 1976.