

Arraste de ar em tubulações com grande declividade: algumas considerações relacionadas ao dimensionamento dos coletores de esgoto

Milton Tomoyuki Tsutiya (1)
Winston Hisasi Kanashiro (2)

Resumo

Em tubulações parcialmente cheias, fortemente inclinadas, transportando esgoto ou água limpa, ocorre uma mistura do líquido com as bolhas de ar.

O trabalho aborda o mecanismo de arraste de ar e os resultados experimentais de alguns pesquisadores discute as condições para o início da mistura água-ar, faz uma análise do escoamento aerado e apresenta vários gráficos para o dimensionamento dos coletores de esgoto.

Propõe-se, ainda, para o dimensionamento das tubulações de esgoto, a velocidade máxima de 10 m/s e para a altura máxima da lâmina da mistura água-ar o valor de 75% do diâmetro do coletor.

1 Introdução

Dependendo da turbulência do escoamento poderá haver a entrada de bolhas de ar na superfície livre do líquido. A mistura água-ar ocasiona um aumento na altura da lâmina d'água, sendo importante verificar se a tubulação projetada ainda continua funcionando como conduto livre, pois, caso contrário, a tubulação poderá ser destruída por pressões geradas pelas permutações aleatórias entre escoamento livre ou forçado.

No caso do escoamento de esgoto, o conhecimento da mistura água-ar é de grande importância, principalmente quando a tubulação é projetada com grande declividade, pois nessa condição o grau de entrada de bolhas de ar no escoamento poderá ser bastante elevado. Devido a esse fato, a Norma NBR 9649 da ABNT — Projeto de Redes Coletoras de Esgoto Sanitário — publicada em novembro de 1986, incluiu no item 5.1.5.1 a seguinte recomendação: "Quando a velocidade final v_c é superior à velocidade crítica

ca v_c , a maior lâmina admissível deve ser 50% do diâmetro do coletor, assegurando-se a ventilação do trecho; a velocidade crítica é definida por:

$$v_c = 6 (g R_H)^{1/2}$$

onde

g = aceleração da gravidade"

Neste trabalho, tecem-se inicialmente algumas considerações sobre o mecanismo de entrada de ar, os parâmetros importantes que foram considerados nas pesquisas e também os resultados em laboratório, para em seguida apresentar seus objetivos principais:

- condições para o início da mistura água-ar;
- análise do escoamento aerado;
- aplicações para o dimensionamento das tubulações de esgoto, com exemplos de cálculos;
- considerações sobre as velocidades máximas em tubulações de esgoto.

2 Mecanismo de entrada de ar

2.1 Entrada de ar no seio líquido

Em canais abertos ou em tubulações parcialmente cheias, fortemente inclinados, transportando esgoto ou água limpa, ocorre uma mistura do líquido com as bolhas de ar.

A figura 1 mostra esquematicamente o início do processo.

No início do trecho de declividade acentuada, a água que ainda não contém bolhas de ar acelera-se devido à gravidade e com isso, há um aumento na velocidade do escoamento. A camada-limite, até então laminar, começa a se instabilizar tornando-se turbulenta.

O arraste de ar ocorre somente após o afloramento da camada-limite turbulenta, devido ao fato de que, antes do seu afloramento, o escoamento acima dessa camada se processa quase que a potencial de velocidades, tendo, por isso, gradientes de velocidades baixas e, conseqüentemente, também, o índice de turbulência.

A camada-limite turbulenta de espessura $\delta(x)$ se aproxima da superfície e aflora no ponto P_A (ver fig. 1) e com isso há um aumento no índice da turbulência gerando flutuações turbulentas capazes de vencer as forças de tensão superficial. A turbulência é responsável pelo lançamento de gotas d'água e essas ao caírem de volta à superfície arrasta as bolhas de ar para o seio líquido (ver fig. 2), e, portanto, no ponto P_i , se inicia a entrada de ar no escoamento.

Para se formar uma bolha de ar a partir de uma gota d'água podem ser distinguidas as seguintes fases:

- a) a gota d'água esférica (na realidade é quase esférica) colide com a superfície d'água na direção aproximadamente perpendicular;
- b) após a gota tocar a superfície, ela se torna parcialmente achatada e simultaneamente se cria uma abertura na superfície d'água;
- c) nesta fase ocorre a formação de um anel de água;
- d) sob a influência da tensão superficial o anel começa a fechar;
- e) quando esse anel é completamente fechado, a bolha de ar é formada.

Uma vez que a bolha de ar é incorporada ao líquido, ela é arrastada pelo escoamento e fica sob a ação das seguintes forças principais:

- empuxo de Arquimedes;
- tensões turbulentas;
- força devido à energia cinética residual.

A energia cinética remanescente da gota se encarrega de arrastar essa bolha para o interior da massa líquida até que atinja o equilíbrio devido ao empuxo de Arquimedes, responsável pelo movimento ascendente da bolha. O movimento caótico das bolhas no interior do escoamento é ocasionado pelas tensões turbulentas. Observe-se que a energia cinética mínima para a formação da bolha é a energia capaz de vencer a força devida à tensão superficial.

Entre os pontos P_i e P_E (fig. 1) há um aumento gradual de concentração de ar e também, em conseqüência, au-

(1) — 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; Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

(2) — Engenheiro do CTH-Centro Tecnológico de Hidráulica, Professor de Laboratório de Fenômenos de Transporte da Faculdade de Engenharia da Faap-Fundação Armando Álvares Penteado.

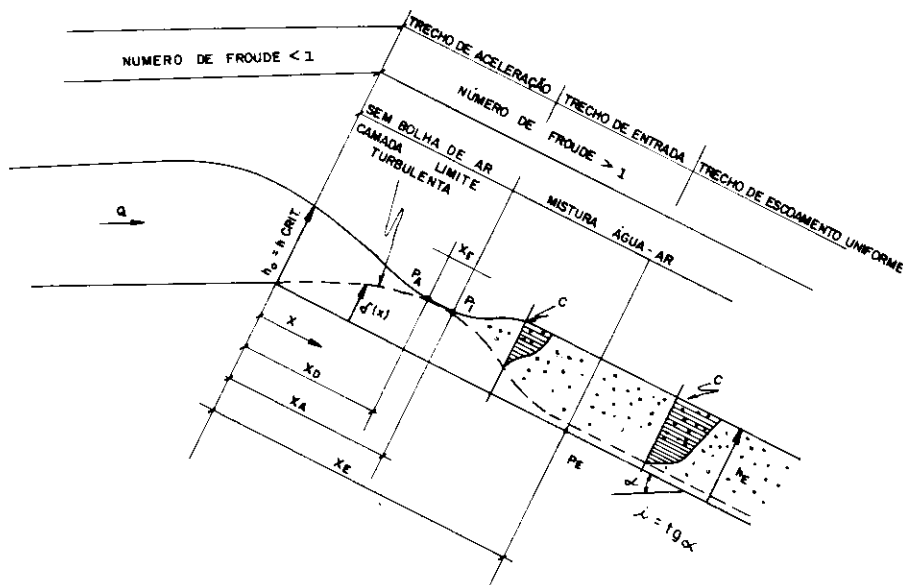


Figura 1 — Seção longitudinal de uma tubulação com grande declividade

mento na espessura da lâmina da mistura líquido-ar. Isto ocorre devido ao fato de à medida que se vai caminhando para jusante (de P_1 e P_E) observa-se um aumento na velocidade do escoamento e no índice de turbulência da superfície. Quando o escoamento atinge o ponto P_E há um equilíbrio dinâmico entre as forças atuantes (força gravitacional que tende a acelerar o escoamento) e as forças resistentes (atrito, perda por turbulência etc.) resultando em escoamento uniforme (v e h_E constantes) e, portanto, nessas condições, o índice de turbulência se mantém constante, e, conseqüentemente, há um equilíbrio dinâmico entre o ar incorporado e o ar que deixa o escoamento.

O modelo descrito foi proposto por Viparelli (1953) e recentemente Volkart (1980) fez um estudo bem detalhado desse mecanismo. Ele observou o escoamento através de fotos obtidas com estroboscópio e partindo de considerações energéticas chegou a resultados teóricos bastante satisfatórios com os dados experimentais. Pela análise das fotografias apresentadas por Volkart, observa-se que os diâmetros das gotas variam de 1,0 a 6,5 mm e as bolhas de ar apresentam diâmetros entre 1,0 e 10,0 mm. Observou-se, também, que normalmente o diâmetro das bolhas é sempre maior que o diâmetro das gotas geradoras.

É importante ressaltar que há uma grande diferença entre o ar que é arrastado em forma de bolhas pelo escoamento e o ar que é dissolvido na água. O primeiro é um processo físico de aprisionamento de bolhas de ar pela água através da tensão superficial, enquanto o outro é um fenômeno físico-químico que é a adsorção de moléculas de ar pelas moléculas de água.

Outro aspecto a se observar é a diferença que há entre condutos circulares parcialmente cheios e canais retangulares abertos, ambos transportando a mistura água-ar nas mesmas condições de alta velocidade, sendo que, essa diferença se acentua quando o diâmetro do conduto é pequeno e a lâmina líquida é superior a meia seção.

Pelas considerações já feitas anteriormente, o ar é arrastado pelo escoamento quando as gotas lançadas no ar retornam à superfície líquida. Ocorre, porém, que algumas gotas se chocam com a geratriz superior do tubo e estas ao retornarem ao escoamento não carregam ar, portanto, é de se esperar que nas mesmas condições de escoamento, a concentração média de ar (C) seja maior em canais abertos do que em condutos circulares parcialmente cheios.

2.2 Parâmetros importantes

O processo de arraste de ar é basicamente um jogo de forças entre as tensões turbulentas na superfície e as forças de tensão superficial. Então, pode-se dizer que a concentração de ar (C) é função da viscosidade (ν), da velocidade do escoamento (v), da altura da lâmina d'água (y), da largura da superfície livre (B), da tensão superficial (τ), do diâmetro do tubo (D), da rugosidade (ϵ) e da inclinação do tubo (i).

Volkart (1980), com base na Análise Dimensional concluiu que a concentração de ar (C) é função do número de Froude, do número de Boussinesq, do número de Reynolds e do número de Weber.

O número de Reynolds ($R = vD/\nu$) é uma relação entre as forças de inércia e as forças viscosas e indica se

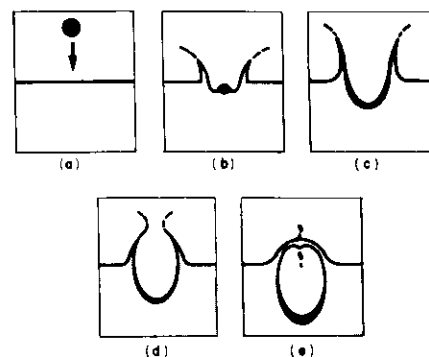


Figura 2 — Formação de uma bolha de ar pela queda de uma gota d'água

o escoamento é laminar ou turbulento. No escoamento laminar prevalecem as forças viscosas, no entanto, se as forças de inércia forem maiores que as forças viscosas instabiliza-se a camada-limite laminar gerando a turbulência.

O número de Froude ($F = v/\sqrt{gy}$) é uma relação entre forças de inércia e forças gravitacionais. O número de Boussinesq ($B = v/\sqrt{gR_H}$) é o número de Froude mais detalhado, ou seja, mais completo, pois leva em conta a influência da superfície molhada do conduto, a área da seção transversal e a superfície livre, e não apenas a altura da lâmina líquida como é o caso do número de Froude.

O número de Weber ($W = v^2 \rho \frac{L}{\tau}$)

é uma relação entre as forças de inércia e as forças de tensão superficial.

Observe-se que a Análise Dimensional nos fornece a relação funcional entre uma determinada grandeza e grupos de adimensionais, mas, ela não nos diz qual é o adimensional mais importante e nem qual é a forma da função. Ambos deverão ser determinados experimentalmente através de medições.

2.3 Resultado das pesquisas

Estudando vários condutos circulares parcialmente cheios no Laboratório de Zurique (ETH), na Suíça, com diâmetros de 110 mm e 240 mm e protótipos de até 900 mm, com inclinações máximas de 45°, Volkart (1982) concluiu que a melhor relação funcional entre a concentração C e os adimensionais (F, B, R, W) era entre C e B. Esses resultados se encontram representados na figura 3 e apresentam a seguinte correlação utilizando um método estatístico:

$$C = 1 - \frac{1}{0,02 (B_w - 6,0)^{1,5} + 1}$$

$$B_w \geq 6,0 \dots \dots \dots (2.1)$$

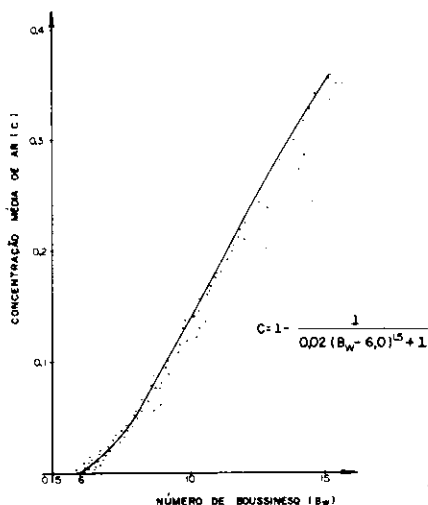


Figura 3 — Relação entre concentração média de ar (C) e o número de Boussinesq (B_w).

sendo B_w o número de Boussinesq para água pura.

A primeira vista é de estranhar esse resultado pois, conforme descrito anteriormente, o mecanismo de entrada de ar no escoamento era essencialmente o jogo de forças entre o nível de turbulência e as forças de tensão superficial, e era esperado, a princípio, que a melhor correlação fosse entre C e R ou entre C e W. Entretanto, se analisarmos a correlação C e R observamos que não é conhecida a viscosidade cinemática da mistura água-ar. Quanto ao número de Weber, não é conhecido o comprimento L.

Finalmente, ao analisarmos o número de Boussinesq para água pura, $B_w = B = v_w / \sqrt{g R_{Hw}}$, sendo $v_w = v$ = velocidade de escoamento da água pura, $R_{Hw} = R_H$ = raio hidráulico para água pura, observamos que nele estão contidos o número de Froude, a turbulência (representado por v , pois o índice de turbulência é proporcional à velocidade) e também a influência da superfície livre.

Por outro lado, se tentarmos correlacionar C com o número de Boussinesq da mistura é de se esperar que a correlação não fique tão boa, pois o grau de incerteza é bem maior, pelo fato de não ser conhecido o valor da velocidade da mistura e nem do raio hidráulico a serem adotados.

Observe-se que a qualidade da correlação ditada pela Análise Dimensional é diretamente proporcional ao grau de confiabilidade dos valores que atribuímos aos parâmetros envolvidos.

Comparando os dados obtidos para condutos circulares parcialmente cheios e canais retangulares abertos, Volkart concluiu através de medições que as concentrações de ar eram maiores para os canais, confirmando as suposições teóricas. Esse mesmo pesquisador levantou também os per-

fis de velocidade e verificou que há uma grande semelhança aos perfis de um escoamento laminar, devido ao fato de que as bolhas de ar amortecem os componentes transversais das flutuações turbulentas reduzindo-as às baixas frequências.

A superfície livre da mistura, em tubulações parcialmente cheias, não é plana, e sua curvatura é mais acentuada nas regiões próximas às paredes do conduto (curvatura côncava).

3 Início do escoamento aerado

Conforme já visto no item (2.3) o adimensional que melhor retrata o fenômeno da entrada de ar é o número de Boussinesq. Pelas pesquisas efetuadas, Volkart concluiu que em tubulações parcialmente cheias, a mistura água-ar inicia quando o número de Boussinesq é igual a 6,0. Portanto:

$$B = 6,0 = \frac{v_c}{\sqrt{g R_H}} \rightarrow v_c = 6,0 \sqrt{g R_H} \dots \dots \dots (3.1)$$

onde: v_c = velocidade crítica, m/s
 g = aceleração da gravidade = 9,81 m/s²
 R_H = raio hidráulico, m

A equação (3.1) é válida para escoamento a jusante do ponto P_E (ver fig. 1) e, nessas condições, a entrada de ar se inicia quando a velocidade de escoamento é igual à velocidade crítica. Portanto, a suposição anterior que a entrada de ar somente iniciava quando a velocidade de escoamento atingia a faixa de 4 a 6 m/s não era correta.

4 Escoamento aerado

Pelas constatações experimentais de Volkart, o escoamento aerado se processa quando $B > 6,0$, ou seja, a velocidade de escoamento é maior que a velocidade crítica.

Através de medições em locais situados a jusante do ponto P_E , Volkart encontrou as seguintes relações:

- concentração média de ar:

$$C = 1 - \frac{1}{0,02 (B - 6,0)^{1,5} + 1} \dots \dots \dots (3.2)$$

- velocidade média da mistura:

$$v_m = (1 - C^{2,09}) v \dots \dots \dots (3.3)$$

- relação entre a seção molhada da mistura e da água pura:

$$\Delta = \frac{A_1 - A}{A} = 2 \ln \left[\frac{1}{(1 - C)} \right] \dots \dots \dots (3.4)$$

A equação (3.4) é válida para $C < 0,4$ e foi obtida a partir de dados experimentais apresentados na figura 4 e seu ajuste foi feito através de um método estatístico.

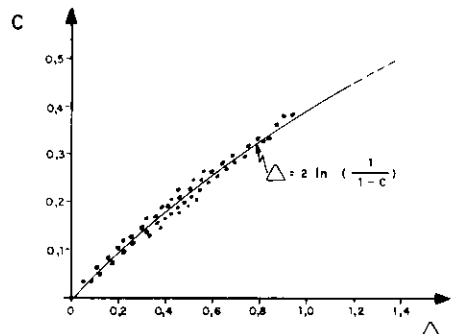


Figura 4 — Relação (Δ) em função da concentração média de ar (C)

Existindo a mistura água-ar, haverá um aumento na área da seção transversal do escoamento devido à superposição de dois fatores:

- pela diminuição da velocidade: $v_m < v$;
- pela diminuição da massa específica da mistura, e, consequentemente, aumento na vazão total:

$$Q_m = \frac{Q}{1 - C}$$

A figura 5 mostra uma seção típica do escoamento com mistura água-ar.

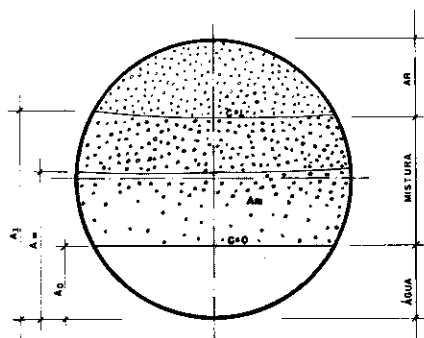


Figura 5 — Seção transversal de um conduto com mistura água-ar

Sendo:

- A_1 — área limitada pela curva de concentração $C = 1$;
- A_0 — área limitada pela curva de $C = 0$;
- A_m — área média da mistura

$$= \frac{Q + Q_a}{v_m} \quad (A_0 \leq A_m \leq A_1)$$

onde:
 Q = vazão da água pura
 Q_a = vazão de ar
 v_m = velocidade média da mistura

5 Aplicações para o dimensionamento das tubulações de esgoto

5.1 Início do arraste de ar

5.1.1 Inclinação mínima da tubulação para a qual se inicia o arraste de ar

A condição mínima para a qual se inicia o arraste de ar é a seguinte:

$$v_c = 6,0 \sqrt{g R_H} \dots \dots \dots (5.1)$$

Para o cálculo da velocidade é válida a fórmula de Chèzy, uma vez que o regime é permanente e na condição crítica ainda não há mistura água-ar:

$$v = C \sqrt{R_H} \operatorname{sen} \alpha \dots \dots \dots (5.2)$$

$$C = \frac{1}{n} R_H^{1/6} \dots \dots \dots (5.3)$$

onde:
 α = ângulo de inclinação da tubulação

R_H = raio hidráulico =

$$= \frac{R}{2} \left(1 - \frac{R-y}{R^2} \frac{\sqrt{2Ry-y^2}}{\varphi} \right)$$

..... (5.4)

$$\varphi = \operatorname{arc} \cos \left(\frac{R-y}{R} \right) \text{ (radianos)}$$

..... (5.5)

y = altura da lâmina d'água
 n = coeficiente de Manning = 0,013

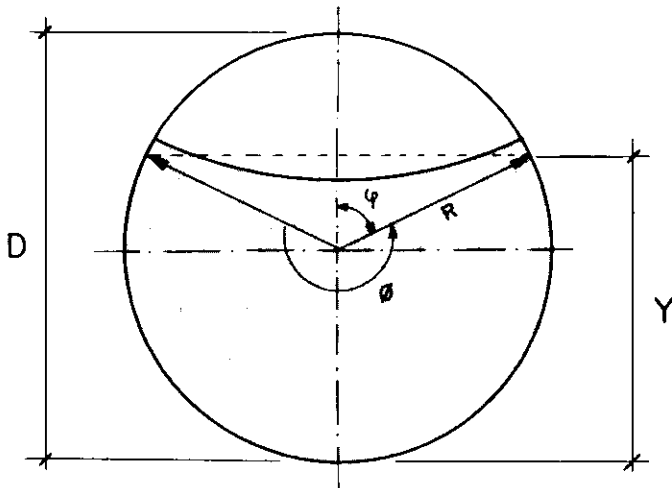


Figura 6 — Definição dos símbolos utilizados

Associando as equações (5,1), (5.2), (5.3) e (5.4), resulta a seguinte expressão:

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{36 n^2 g}{\left[\frac{R}{2} \left(1 - \frac{R-y}{R^2} \frac{\sqrt{2Ry-y^2}}{\varphi} \right) \right]^{1/3}} \dots \dots \dots (5.6)$$

A equação (5.6) permite determinar a declividade mínima para que ocorra o início do arraste de ar. A figura 7 mostra a declividade mínima em função do diâmetro da tubulação e da relação y/D.

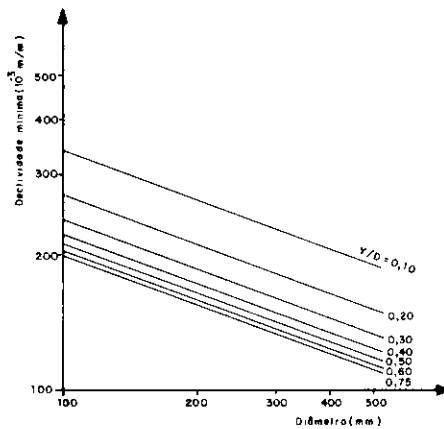


Figura 7 — Declividades mínimas das tubulações para o início do arraste de ar, para vários diâmetros e profundidades

Pelo que se observa na figura 7 pode-se concluir que:

- para uma determinada relação y/D, quanto maior o diâmetro da tubulação, menor será a declividade necessária para que ocorra o início do arraste de ar;

- para uma mesma tubulação, aumentando a relação y/D diminui a declividade necessária para o início do arraste de ar, sendo que, acima da meia seção, a declividade é pouco afetada pela relação y/D.

5.1.2 Velocidade para a qual ocorre o início do arraste de ar

Através da equação (5.1) foram determinadas as velocidades críticas para o início do arraste de ar, em função dos diâmetros das tubulações e das relações y/D. Os resultados desses cálculos estão representados na figura 8.

Pela figura 8 pode-se concluir que:

- para um determinado diâmetro, quanto maior a relação y/D maior deverá ser a velocidade para que ocorra o início do arraste de ar;

- para uma dada relação y/D, quanto maior o diâmetro, maior deverá ser a velocidade crítica;

- o início do arraste de ar ocorre para grandes velocidades e também, para velocidades pequenas (~1,5m/s).

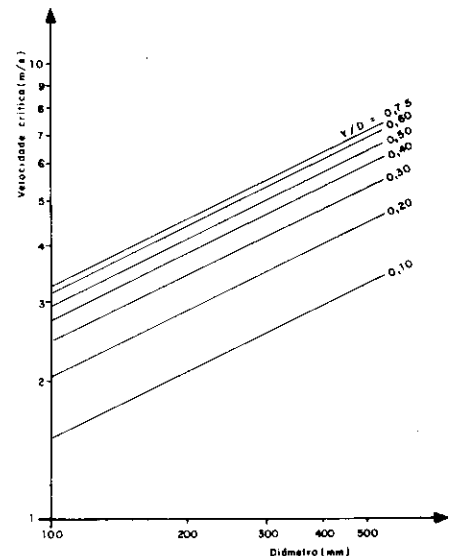


Figura 8 — Velocidades críticas em função dos diâmetros e das relações y/D

5.2 escoamento aerado

5.2.1 — Capacidade de transporte de uma tubulação considerando a mistura água-ar

A capacidade máxima da tubulação considerando a mistura água-ar foi fixada para y/D = 0,75 devido às seguintes razões:

- segurança na operação: considerou-se que com essa relação y/D não ocorreria o fenômeno chamado "slug flow", ou seja, as irregularidades oscilantes da superfície livre não atingiriam a geratriz superior do tubo, o que poderia ocasionar permutações aleatórias entre escoamento livre ou forçado. Esse fenômeno deve ser sempre evitado, uma vez que pode até destruir a tubulação.

- a Norma NBR 9649 fixa para a lâmina máxima da água sem mistura o valor de y/D = 0,75

A capacidade de transporte da tubulação e a velocidade média da mistura foram determinadas da seguinte forma:

— Pelas constatações experimentais de Volkart teremos:

$$C = 1 - \frac{1}{0,02 (B - 6,0)^{1,5} + 1};$$

$$B = \frac{v}{\sqrt{g R_H}} \geq 6,0 \dots (5.7)$$

$$\Delta = \frac{A_1 - A}{A} = 2 \ln \left(\frac{1}{1 - C} \right)$$

..... (5.8)

onde:

A = área da seção transversal para água pura

$$A_1 = \text{área da mistura para } y/D = 0,75 = \left(\frac{8\pi + 3\sqrt{3}}{48} \right) D^2$$

— Conhecendo-se A_1 e C, calcula-se A através da seguinte expressão:

$$A = \frac{A_1}{2 \ln \left(\frac{1}{1 - C} \right) + 1}$$

..... (5.9)

— Pela figura 6 teremos:

$$\frac{\varnothing \pi}{180} - \text{sen } \varnothing = \frac{8 A}{D^2} \quad (5.10)$$

— Conhecido A, através de tentativas determina-se \varnothing

— O raio hidráulico é calculado através da seguinte expressão:

$$R_H = \frac{D}{4} \left(1 - \frac{\text{sen } \varnothing}{\varnothing \pi} \right) \dots (5.11)$$

— Da equação (5.7) calcula-se v, sendo conhecidos C e R_H :

$$v = \left\{ \left[\frac{C}{0,02 (1 - C)} \right]^{2/3} + 6,0 \right\} \sqrt{g R_H}$$

..... (5.12)

— Utilizando a equação de Chèzy determina-se a declividade (i) da tubulação através da seguinte expressão:

$$\alpha = \text{arc sen} \left(\frac{v^2 n^2}{R_H^{4/3}} \right); \quad i = \text{tg } \alpha$$

..... (5.13)

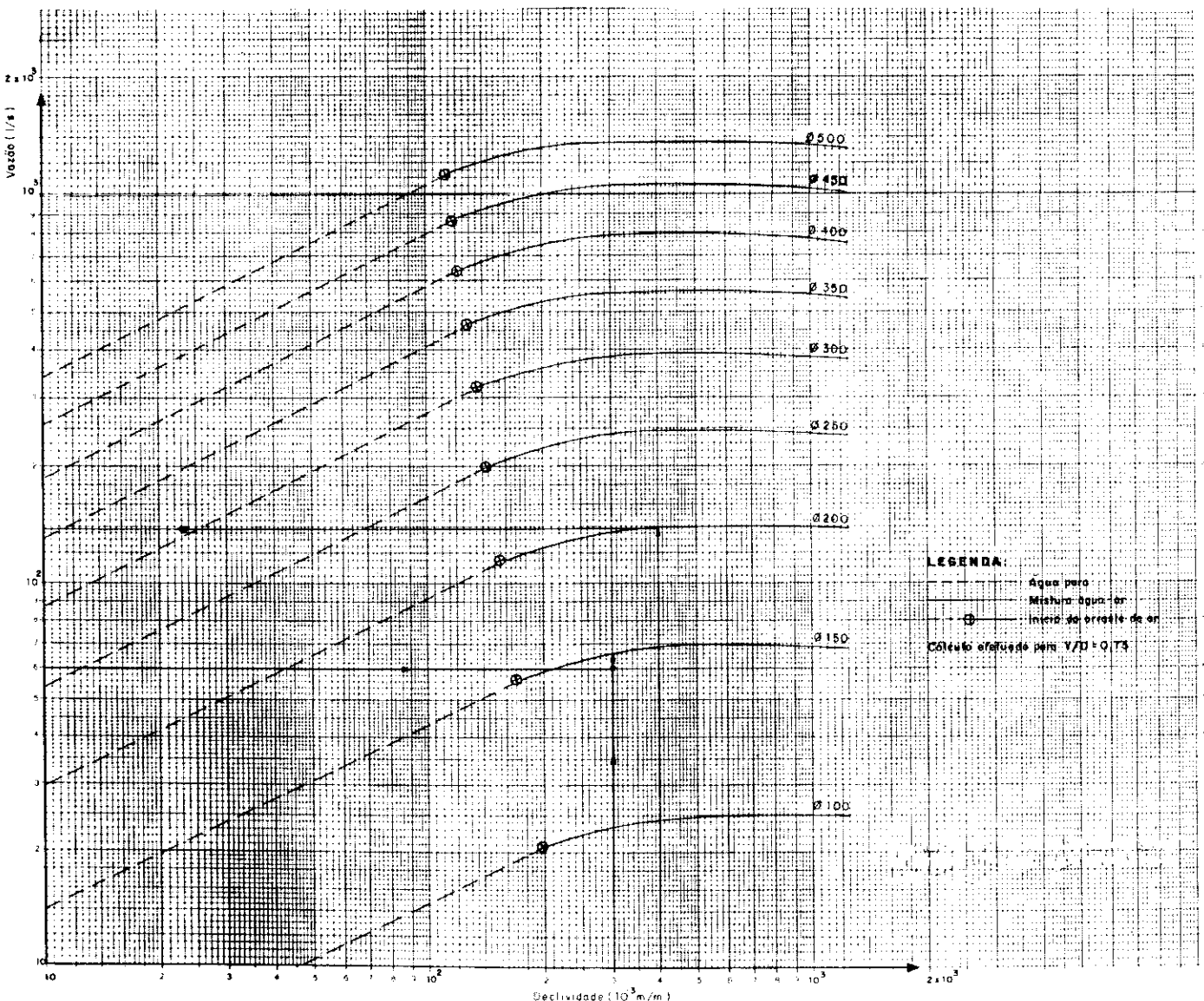


Figura 9 — Capacidade de transporte da tubulação em função da declividade, para escoamento aerado e não aerado

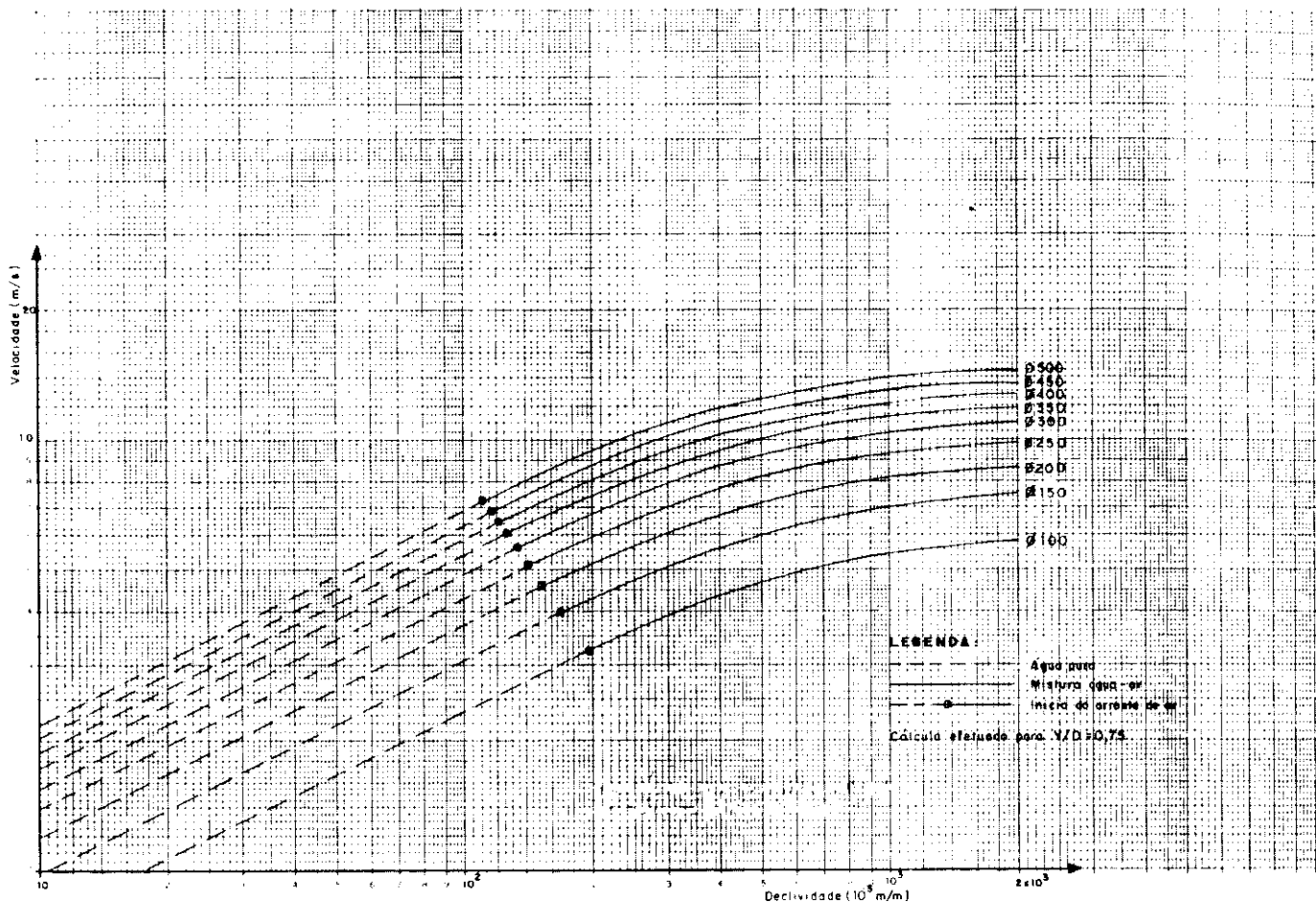


Figura 10 — Velocidade em função da declividade, para escoamento aerado e não aerado.

— A capacidade de transporte da tubulação foi determinada utilizando a equação da continuidade ($Q = vA$) e a velocidade média da mistura através da equação (3.3).

A figura 9 mostra a capacidade de transporte da tubulação em função da declividade, para o escoamento aerado e não aerado. Por essa figura pode-se concluir que:

- ocorrendo arraste de ar a capacidade de transporte da tubulação não sofre aumentos significativos com o aumento da declividade;

- a capacidade máxima da tubulação ocorre para declividade de aproximadamente 0,5 m/m, havendo um leve declínio para declividades maiores.

A figura 10 mostra uma relação entre velocidade, declividade e diâmetro da tubulação, considerando $y/D = 0,75$. Pela figura pode-se concluir que:

- havendo a mistura água-ar a velocidade na tubulação sofre uma sensível diminuição;

- para diâmetros acima de 250 mm a velocidade média da mistura pode superar os 10 m/s.

5.2.2 — Aumento na área da seção transversal devido à mistura água-ar.

A figura 11 apresenta a variação,

$$\Delta = \frac{A_1 - A}{A}, \text{ em porcentagem}$$

em função do ângulo de inclinação da tubulação, em graus, para diâmetros variando de 100 a 500 mm. Os gráficos foram traçados considerando: A_1 — área da mistura para $y/D = 0,75$; A — área da seção transversal para água pura.

Pelo que se observa na figura 11 pode-se concluir que:

- para ângulos menores que 10° , o acréscimo de área devido à mistura água-ar não é significativo para diâmetros variando de 100 a 300 mm; para diâmetros entre 300 e 500 mm o aumento é inferior a 10%;

- para ângulos entre 10 a 15° , o acréscimo é menor que 10% para diâmetros de 100 a 200 mm;

- com o aumento no ângulo de inclinação da tubulação haverá um aumento significativo na área da seção transversal.

É importante observar que, quando há uma diminuição de declividade e o escoamento passa a não ser aerado, as bolhas de ar aprisionadas no seio líquido são liberadas para a atmosfera;

portanto, teremos a passagem da mistura água-ar para água pura. No caso de transições bruscas é imprescindível a utilização de tubos de ventilação. Observamos que, para o dimensionamento do trecho não aerado, não deve ser considerado o aumento de área devido à mistura; porém, é importante que seja feito um estudo minucioso para o ponto de transição.

5.2.3 — Exemplos de cálculo

● Exemplo 1

— Dados: Vazão: $Q = 60$ l/s
Declividade da tubulação:
 $i = 0,3$ m/m

— Pedese: Calcular o diâmetro
— Solução: Com a vazão (Q) e a declividade da tubulação (i), pela figura 9, resulta o diâmetro de 150 mm.

● Exemplo 2

— Dados: Diâmetro: $D = 200$ mm
Declividade: $i = 0,4$ m/m

— Pedese: Vazão a ser transportada pela tubulação

— Solução: Pela figura 9, com a declividade e o diâmetro resulta a vazão de 142 l/s para a condição de $y/D = 0,75$.

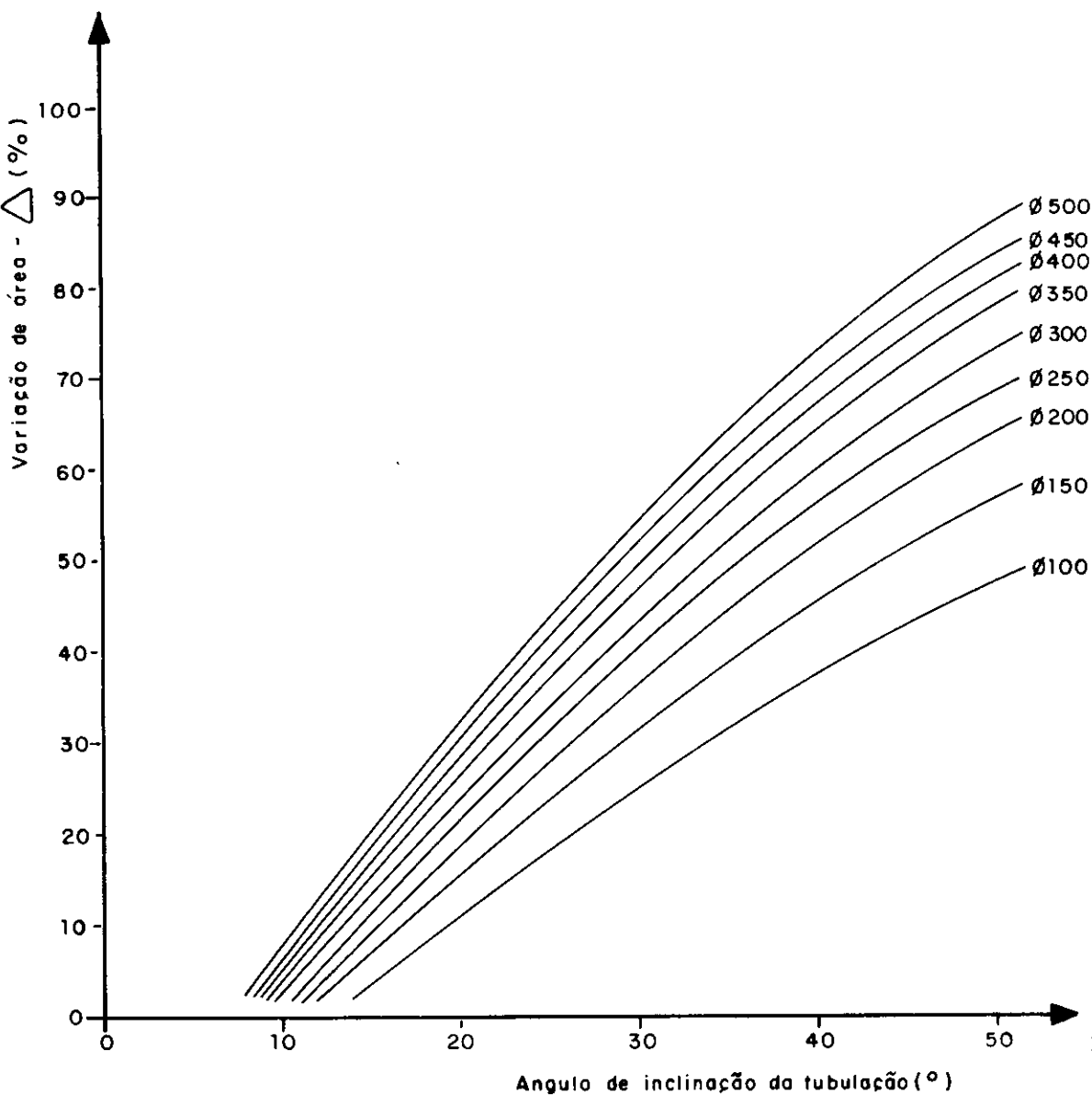


Figura 11 — Variação de área na seção transversal em função do ângulo de inclinação da tubulação

● Exemplo 3

— Dados: Diâmetro: $D = 200$ mm
 Ângulo de inclinação da tubulação:
 $\alpha = 50^\circ$

Capacidade do tubo: meia seção, sem arraste de ar

— Pede-se: Calcular y/D da mistura

— Solução: Cálculo da velocidade para água pura (meia seção)

$$v = \frac{1}{n} R_H^{2/3} \sqrt{\text{sen } \alpha} = \frac{1}{0,013}$$

$$\left(\frac{0,20}{4}\right)^{2/3} \sqrt{\text{sen } 50^\circ} = 9,14 \text{ m/s}$$

● Vazão a meia seção

$$Q = vA = 9,14 \times 15,71 \times 10^{-3} = 0,1436 \text{ m}^3/\text{s} = 143,6 \text{ l/s}$$

● Concentração de ar:

$$C = 1 - \frac{1}{0,02 (B - 6,0)^{1,5} + 1}$$

$$B = \frac{v}{\sqrt{g R_H}} = \frac{9,14}{\sqrt{9,81 \times \frac{0,2}{4}}} = 13,05$$

Substituindo, teremos: $C = 0,27$

● Cálculo do acréscimo da lâmina líquida devido ao arrastamento de ar

$$\Delta = \frac{A_1 - A}{A} = 2 \ln \left(\frac{1}{1 - C} \right)$$

$$A_1 = 25,69 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

● Através da expressão:

$$\frac{\varnothing \pi}{180} - \text{sen } \varnothing - \frac{8 A}{D^2} = 0$$

calcula-se o \varnothing por tentativas. Então:

$$\varnothing 243,25^\circ$$

● Portanto, teremos: $y/D = 0,77$

— Conclusão: limitar a altura da lâmina d'água em 50% do diâmetro do coletor (meia seção), considerando a água pura, não é necessariamente uma condição segura de operação, pois, neste caso, a relação y/D da mistura é maior que 0,75.

6 Considerações sobre as velocidades máximas em tubulações de esgoto

A Norma NBR 9649 da ABNT recomenda para velocidade máxima em tubulações de esgoto o valor de 5 m/s. Para Metcalf-Eddy a velocidade máxima deverá situar-se entre 2,5 e 3 m/s e para WPCF o limite máximo deverá ser de 3 m/s.

O fator limitante da velocidade máxima é a prevenção da erosão por abrasão das paredes internas da tubulação e, portanto, o valor-limite de velocidade é função do material da tubulação e das características do material sólido transportado pelo esgoto e, em especial, as partículas de areia.

As concentrações de sólidos sedimentáveis em esgotos sanitários apresentadas por Imhoff em cidades européias são de 20 mg/l e para a cidade de New York, Estados Unidos, 30 mg/l, portanto, 0,02 a 0,03 g/l. Os dados apresentados significam que as concentrações de partículas sólidas abrasivas são muito pequenas. Como a erosão é ocasionada pela abrasão, ou seja, com o contato de partículas sólidas com a parede da tubulação, isto acontece quando esse material é transportado por carreamento de fundo.

Lysne et al. pesquisaram a erosão em coletores de esgoto utilizando tubos de PVC e concreto, com concentração média de areia variando de 0,8 a 1,6% e velocidades de 2,5 m/s, 4,5 m/s e 5,5 m/s, e chegaram à conclusão que a erosão diminui com o aumento da velocidade, independentemente do material da tubulação. Isto se deve ao fato de que o aumento da turbulência devido ao aumento da velocidade tende a reduzir o contato entre a superfície do tubo e o material erosivo.

Investigações realizadas em campo por Garcias et al. em tubulações de concreto transportando águas pluviais e em algumas delas, com lançamento contínuo de águas residuárias indevidas, obtiveram os seguintes resultados:

- no coletor Cianorte, transportando águas pluviais e despejo de laticínio, funcionando há mais de 14 anos, com velocidade de escoamento entre 7 e 8 m/s apresentou uma erosão praticamente insignificante;

- o mesmo ocorreu para o coletor Paranavaí, cuja velocidade situa-se em torno de 12,0 m/s;

- também, os coletores de Nova Esperança, que funcionam sob pressão há mais de 20 anos, não apresentaram efeitos significativos de erosão por abrasão;

- em nenhum coletor foi constatada a ruptura dos tubos e a falência das obras.

Tendo em vista as pesquisas citadas e também devido ao fato de que em

coletores de esgoto, o transporte de material abrasivo é insignificante em relação à galeria de águas pluviais, sugerimos para o limite máximo de velocidade o valor de 10 m/s para o dimensionamento das tubulações de esgoto. Valores superiores aos 10 m/s necessitam de uma pesquisa mais detalhada no que se refere à abrasão, ao mecanismo de entrada de ar e também na possibilidade de ocorrência da cavitação devido às irregularidades na superfície do conduto, e em especial, nas juntas das tubulações.

É importante ressaltar que, quando a tubulação é projetada para grandes velocidades, é necessário que sejam utilizados tubos resistentes, com número reduzido de juntas e que as tubulações sejam devidamente assentadas e ancoradas. Outro aspecto de fundamental importância é o estudo adequado das transições, principalmente nas transições bruscas, tal como a passagem do escoamento aerado para não aerado.

Para o projeto dos coletores de esgoto com grande declividade, o aumento do limite da velocidade máxima resulta em redução do investimento, com a diminuição do diâmetro dos coletores, do número de poços de visita, dos degraus, dos tubos de queda e dos dissipadores de energia.

7 Conclusões e recomendações

- A mistura água-ar inicia-se quando o número de Boussinesq é igual a 6,0.

- Existindo a mistura água-ar, haverá um aumento na seção transversal do escoamento devido à superposição de dois fatores:

- diminuição da velocidade;

- diminuição da massa específica da mistura, e, conseqüentemente, aumento na vazão total.

Para ângulos de inclinação da tubulação menor que 10°, o acréscimo de área não é significativo, entretanto, para ângulos maiores, esse acréscimo se torna importante e deverá ser calculado mesmo que a lâmina máxima d'água sem mistura seja inferior a 50% do diâmetro do coletor. A simples limitação da relação y/D em 0,50 considerando água pura, não garante a relação y/D da mistura em 0,75.

- Nas condições de escoamento aerado, a lâmina d'água máxima da mistura poderá ser de 75% do diâmetro do coletor.

- Ocorrendo a mistura água-ar, a capacidade de transporte da tubulação não sofre aumentos significativos com o aumento da declividade.

- Deverá ser assegurada a ventilação do trecho aerado através de dutos de ventilação para evitar os transitórios hidráulicos.

- A velocidade máxima para o dimensionamento das tubulações de esgoto deverá ser inferior a 10 m/s.

8 Bibliografia

1. ABNT - Norma NBR 9649 - Projeto de Redes Coletoras de Esgoto Sanitário. Nov/1986.
2. CHOW, V. T. - Open-Channel Hydraulics. International Student Edition. McGraw-Hill. Tokio, 1981.
3. FRENCH, R. H. - Open-Channel Hydraulics. International Student Edition. McGraw-Hill. Singapore, 1986.
4. GARCIAS, C. M. et al. - Velocidades Máximas e Mínimas em Tubulações de Concreto. 12.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Balneário Camboriú, Santa Catarina, Novembro, 1983.
5. GRAF, W. H. - Hydraulics of Sediment Transport. McGraw-Hill. New York, 1971.
6. IMHOFF, K.; Imhoff, K. R. - Manual de Tratamento de Águas Residuárias. Trad. Max Lothar Hess. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1986.
7. LYSNE, D. K. et al. - Erosion of Sewer. XVI th Congress of the International Association for Hydraulic Research. Proceedings. Volume 5. São Paulo, 1975.
8. METCALF & Eddy Inc-Wastewater Engineering. Collection and Pumping of Wastewater. McGraw-Hill. New York 1981.
9. PESSOA, C. A.; Jordão, E. P. - Tratamento de Esgotos Domésticos ABES/BNH. Vol. 1, 2.ª edição. Rio de Janeiro, 1982.
10. VIPARELLI, M. - The Flow in a Flume with 1:1 Slope - IAHR Congress, 1953, pp. 415-423.
11. VOLKART, P. U. - The Mechanism of Air Bubble Entrainment in Self-Aerated Flow. International Journal of Multiphase Flow, 6:411-423, February, 1980.
12. ——— - Self Aerated Flow in Steep, Partially Filled Pipes. Journal of the Hydraulics Division, ASCE 108 (HY9): 1029-1045, September, 1982.
13. Water Pollution Control Federation — Design and Construction of Sanitary and Storm Sewer. Washington, D.C. WPCF. Manual of Practice n.º 9, 1970.
14. Wood, I. R. - Uniform Region of Self — Aerated Flow. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 109 (3): 447-461, March, 1983.