

Controle da Corrosão por Sulfetos no Projeto de Interceptores de Esgoto*

RUSSELL GEORGE LUDWIG (**)
SÉRGIO AUGUSTO SÁ DE ALMEIDA (***)

INTRODUÇÃO

As primeiras experiências relacionadas com o problema da corrosão por sulfetos nos coletores de esgotos, foram conduzidas por Richard Pomeroy e Fred Bowlus (Ref. 1), durante o período de 1930 a 1945, quando iniciou-se a operação dos coletores troncos dos Distritos Sanitários de Los Angeles (LACSD), nos EUA.

Durante a década de 1950, exaustivos estudos foram efetuados na Austrália, por Davy, Parker e Thistlethwayte (Ref. 2, 3, 4). Simultaneamente, Suskin, Van Aardt e outros, na África do Sul, forneceram importantes informações quanto à tecnologia envolvida no projeto de coletores de concreto, resistentes à corrosão.

Pomeroy continuou seus estudos e pesquisas sobre corrosão por sulfetos durante os 30 anos que se seguiram à publicação do seu trabalho original, tendo publicado importantes trabalhos que fornecem subsídios sobre os processos básicos e meios

para o controle da corrosão (Ref. 5, 8, 11).

Os problemas de corrosão são geralmente associados com climas tropicais, onde a taxa de atividade biológica é mais intensa. Entretanto, sérios problemas de corrosão tem ocorrido na Inglaterra, Alemanha, Suécia e outros países onde as temperaturas baixas prevalecem. Em outras palavras, os problemas de sulfetos podem ser sérios em qualquer clima, se a DBO for alta e/ou as condições de fluxo no coletor forem inadequadas.

As considerações de projeto para controle dos sulfetos não formam uma ciência exata. Assim, todas as fórmulas apresentadas neste trabalho devem ser consideradas como tal, e o projeto deve incorporar a experiência e o bom senso.

GERAÇÃO DOS SULFETOS E SEUS EFEITOS

A presença de sulfetos no esgoto pode ser devida à descarga direta de alguns esgotos industriais nos coletores. Entretanto, sua presença é geralmente causada pela redução bacteriológica dos sulfatos, os quais são encontrados na água potável, e cuja concentração aumenta com o uso da mesma pelo homem. Esta atividade bacteriológica é concentrada numa camada de limo que tipicamente se desenvolve nas superfícies submersas dos coletores. A geração de sul-

fetos no esgoto propriamente dito, é geralmente muito pequena e pode ser desprezada.

As bactérias necessitam de oxigênio para consumir a matéria orgânica, e quando o oxigênio livre não é disponível, certas espécies obtêm oxigênio de íon sulfato ($SO_4=$), deixando o íon sulfeto ($S=$). A reação do sulfeto com a água resulta numa mistura do íon HS^- e gás sulfídrico, H_2S , função do pH

proporção de H_2S (%)	pH
5	99
6	91
6,5	76
7,0	50
7,5	24
8	9
9	1

Após a formação do H_2S , as seguintes atividades ocorrem, levando à corrosão do coletor:

(1) Quantidades significativas de gás sulfídrico (H_2S) escapam do esgoto para a zona de ventilação do coletor.

(2) Uma significativa quantidade de H_2S é transferida para as superfícies do coletor, acima do nível d'água.

(3) Este H_2S transferido para as paredes não submersas, é bacteriológicamente oxidado, resultando na formação de ácido sulfúrico.

Este processo é mostrado esquematicamente na Figura 1.

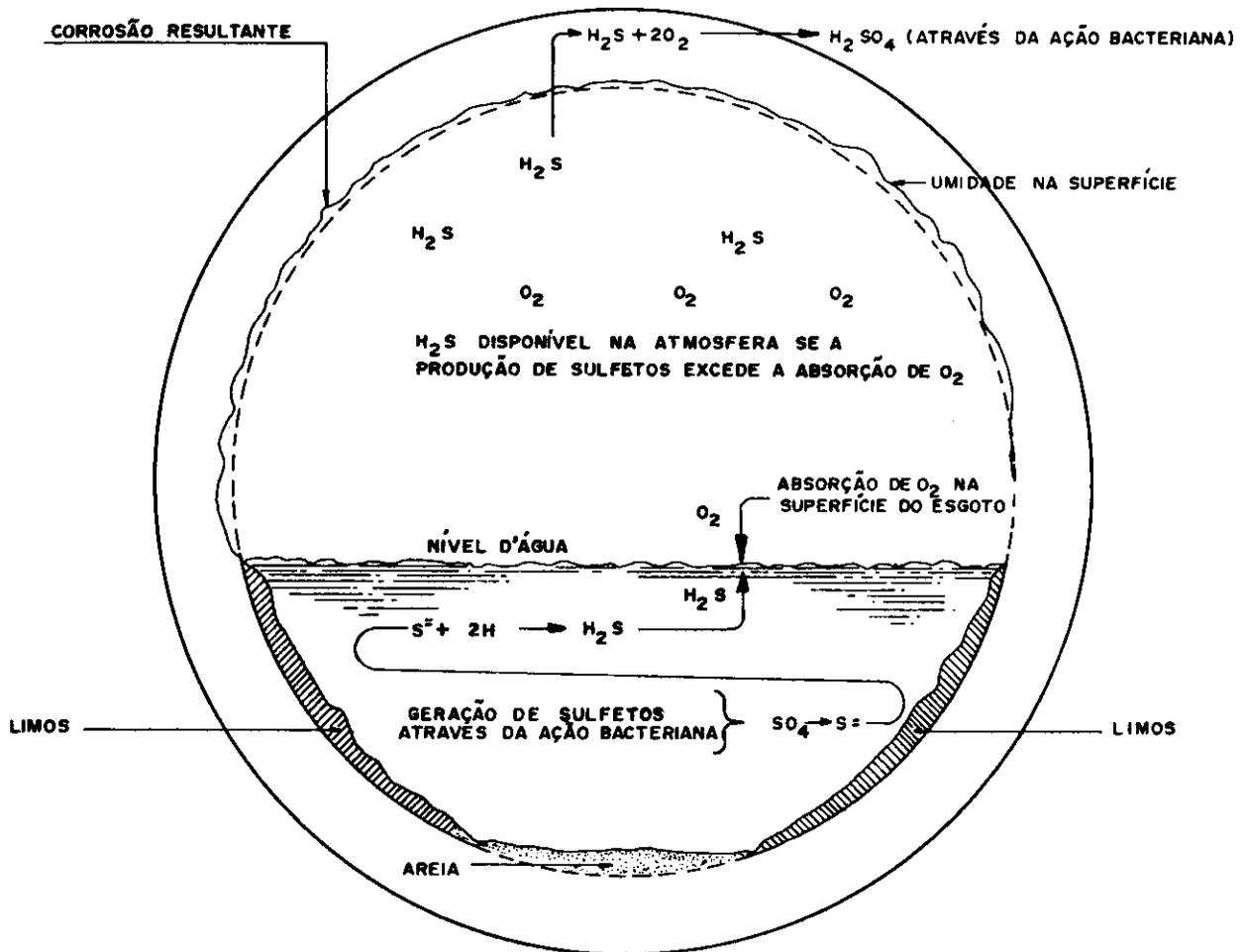
(*) Trabalho apresentado no 10.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES)

Manaus, Janeiro de 1979.

(**) Presidente da ENCIBRA S/A — Estudos e Projetos de Engenharia

(***) Vice Presidente da ENCIBRA S/A — Estudos e Projetos de Engenharia; Professor, PUC-RJ.

FIGURA 1



CORROSÃO DOS COLETORES DE ESGOTOS,
RESULTADO DA GERAÇÃO DE SULFETOS.

Quando os coletores são construídos com materiais que não são imunes ao ataque pelo ácido sulfúrico, como o concreto, cimento amianto, ou aço, ocorrerá uma corrosão gradual.

Como os sulfetos são formados pela redução de sulfetos, na ausência de oxigênio dissolvido, o balanço de oxigênio no esgoto é o fator determinante. Este balanço de oxigênio é representado pela quantidade de oxigênio inicialmente disponível, no esgoto, mais a taxa de oxigênio transferida pela aeração da superfície do esgoto, contra a demanda de oxigênio pela ação bacteriológica. Uma apreciável quantidade de oxigênio dissolvido é inicialmente presente no esgoto fresco, e persiste a concentrações decrescentes, ao longo de todo o sistema coletor. Por esta razão, a presença do gás sulfídrico e resultante corrosão não é evidenciada na rede coletora, exceto onde as tubulações são assentes com declividades que são inadequadas para a auto-limpeza, ou onde as tubulações recebem descargas diretas de esgotos contendo sulfetos. Como nos grandes sistemas, a rede coletora representa não menos que 70% do comprimento total de coletores, este fato é de grande importância. Nos sistemas por gravidade, onde os problemas de corrosão existem, os efeitos são geralmente notados nos coletores-tronco ou interceptores. A medida que o esgoto flui pela rede coletora, a concentração de oxigênio dissolvido gradualmente diminui, devido a uma demanda que é maior que o fornecimento. Em algum ponto do sistema, o oxigênio dissolvido é exaurido e os sulfetos aparecem. Quando os sulfetos dissolvidos alcançam concentrações médias excedendo 0,1 mg/l, a corrosão geralmente é evidenciada. Pomeroy (5) estimou que, sob condições tropicais, as concentrações médias anuais de sulfetos dissolvidos de 0,1 mg/l e 1,0 mg/l, produzem ataques no concreto comum segundo taxas de, respectivamente, 25 mm/século e 250 mm/século.

No projeto de sistemas coletores, o engenheiro deve dar atenção adequada à provisão de velocidade de auto-limpeza, bem como à potencialidade da ocorrência de problemas pelos sulfetos. Na verdade, como demonstrado mais à frente, exceto onde esgoto muito forte e/ou altas temperaturas ocorrem, a manutenção de velocidades de auto-limpeza (0,6 m/s, ou maior, durante os períodos de vazão máxima) levam a sistemas livres dos problemas de corrosão.

Por outro lado, quando o projeto leva a velocidades insuficientes para a auto-limpeza, mesmo onde o au-

mento da concentração de sulfetos não ocorre inicialmente, a resultante deposição de sólidos e o acentuado desenvolvimento de limos nas superfícies molhadas diminuem a velocidade, podendo ocorrer, em consequência, problemas de corrosão.

Embora a completa ausência de sulfetos seja desejável para minimizar odores e para fornecer melhores condições para a manutenção dos coletores, o Engenheiro frequentemente não pode atingir esta condição na prática.

Em áreas planas, o controle dos sulfetos através de declividades adequadas requer custo excessivo de escavação. Neste caso, o Engenheiro deve fazer comparações econômicas entre os custos adicionais de escavação, possível bombeamento adicional, e emprego de materiais mais econômicos, contra o emprego de tubulações construídas com materiais mais caros, mas inertes ao ataque pelos sulfetos, como a cerâmica vitrificada, fibra-de-vidro, ou plástico, ou ainda então o uso de revestimentos plásticos especiais em tubos de concreto de grande diâmetro. Outra alternativa é o emprego de projetos especiais, como apresentado mais à frente.

Na maioria dos casos, o problema pode ser economicamente resolvido pela seleção de declividades e diâmetros adequados, que levem à velocidade que controlam a geração de sulfetos.

TAXA DE GERAÇÃO DE SULFETOS

Pomeroy determinou que a taxa de geração de sulfetos, num coletor de esgotos é proporcional à DBO do esgoto e à temperatura (Ref. 11). Ele empregou uma expressão denominada "DBO efetiva", provendo correção para a temperatura, como mostrado a seguir:

$$EDBO = DBO \times 1,07^{T-20}, \quad T = ^\circ C$$

Então, para uma DBO₅ (20°C) de 250 mg/l, a DBOE seria:

T - °C	EDBO
16,5	197
20	250
28	430

A matéria orgânica e o íon SO₄ são, naturalmente, necessários no processo, mas para maior a parte dos esgotos, existe um suprimento adequado destes constituintes. Para alguns despejos industriais, ou para esgotos que possuem uma relação entre matéria orgânica e SO₄ não usual, a geração pode ser afetada. Parece provável que o SO₄ deixa

de ser limitante na faixa de 20 a 100 mg/l.

A taxa de produção de sulfetos pelos limos pode ser expressa como um fluxo de sulfetos, ØSE, onde:

$$\begin{aligned} \text{ØSE} &= \text{fluxo de sulfetos, g/m}^2\text{-h} \\ \text{ØSE} &= M \text{ (EDBO)}, \text{ sendo } M \text{ um coeficiente de fluxo, em m/h} \end{aligned}$$

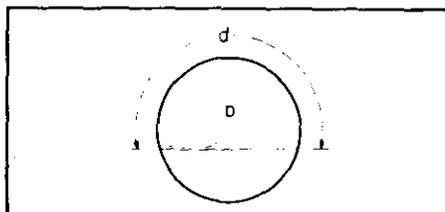
Pomeroy determinou que um valor médio para este coeficiente é 1,0 × 10⁻³ m/h.

A taxa de aumento de sulfetos é igual ao fluxo de sulfetos gerados no total, dividida pelo volume do esgoto, isto é:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{(M) \text{ (EDBO)} \text{ (área do limo)}}{\text{volume do esgoto}}$$

Área do limo por unidade de comprimento = P

Volume do esgoto por unidade de comprimento = a



$$\frac{\text{Área}}{\text{volume}} = \frac{P}{a} = \frac{1}{r}, \text{ onde } r = \text{raio hidráulico}$$

Assim:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{M \text{ (EDBO)}}{r}$$

Como anteriormente mencionado, no fluxo de esgotos os sulfetos resultantes são subsequentemente reduzidos ou eliminados pela oxidação com o oxigênio dissolvido, presente ou absorvido pelo sistema.

Em tubulações fechadas, não há a possibilidade de absorção e, quando a linha é longa, o oxigênio dissolvido inicial é rapidamente utilizado.

TUBULAÇÕES SOB PRESSÃO

Numa tubulação fluindo cheia, r = d/4, e usando-se o valor M = 1,0 × 10⁻³, a fórmula se reduz a:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{4 \text{ (EDBO)}}{(10^3)d} \quad \frac{ds}{dt} \text{ em mg/l-h}$$

Convertendo para minutos, a geração num período de t minutos é:

$$\Delta s = \frac{(\text{EDBO}) (t)}{(15 \times 10^3) (d)}, \text{ onde:}$$

- Δs = mg/l
- EDBO = mg/l
- d = metros
- t = minutos

Entretanto, Pomeroy mostra que para uma tubulação longa sob pressão, há também geração de sulfetos no esgoto propriamente dito. Ele fornece um fator de correção para este incremento, baseado em extensivos testes de campo executados no sul da Califórnia.

A fórmula resultante é:

$$\Delta s = \frac{(EDBO) (t)}{15 \times 10^3} \frac{(1 + 0,40d)}{d}$$

onde (1 + 0,40 d) é o fator de correção para a geração no próprio esgoto, sendo d em metros.

$$\Delta s = \frac{(EDBO) (t)}{15} \cdot \left(\frac{1 + 0,0004 d}{d} \right)$$

sendo d = mm
t = minutos

O valor de 0,12 mg/l provavelmente não conduzirá a problemas, particularmente se velocidades razoáveis existirem nos coletores à jusante de tubulação sob pressão.

Entretanto, um valor de 1,12 mg/l com certeza causará problemas sub-

$$\Delta s = (0,573 \times 10^{-6}) \left(\frac{L}{D} \right)^{0,8} (DBO)^{0,8} (1,139)^{T-20}$$

Virtualmente, todas as evidências indicam que o SO₄ não é um fator na geração de sulfetos, a menos que seja elemento limitante (20 a 100 mg/l). Também, não há justificativa convincente para o uso do expoente 0,8 na DBO, baseado nas informações apresentadas, particularmente se a DBO for inferior a 400 mg/l.

Caso (a):

$$\Delta s = (0,573) (10^{-6}) \left(\frac{900}{1} \right)^{0,8} (250)^{0,4} (1,139)^0 = 0,12 \text{ mg/l}$$

Caso (b):

$$\Delta s = (0,573) (10^{-6}) \left(\frac{900}{1} \right)^{0,8} (400)^{0,4} (1,139)^7 = 0,68 \text{ mg/l}$$

A acumulação prevista para o caso (a) é a mesma; mas para o caso (b) é cerca de 60% apenas.

GERAÇÃO DE SULFETOS EM TUBULAÇÕES PARCIALMENTE CHEIAS

A previsão da geração de sulfetos em tubulações parcialmente cheias é bem mais complexa.

Como previamente indicado, os sulfetos produzidos pela camada de limo são, em seguida, oxidados parcialmente ou inteiramente, pelo oxigênio inicialmente presente no esgoto, ou ainda subseqüentemente absorvido na superfície.

Exemplos:

	(a)	(b)
Comprimento da tubulação sob pressão	600 m	900 m
Velocidade	2 m/s	0,8 m/s
Diâmetro	1000 mm	1000 mm
DBO ₅ , 20°C	250 mg/l	400 mg/l
T	20°C	20°C

Caso (a):

$$\Delta s = \frac{(250) (1,07)^{20-20} \left(\frac{600}{120} \right)^{1,4}}{15} \left(\frac{1,4}{1000} \right) = 0,12 \text{ mg/l}$$

Caso (b):

$$\Delta s = \frac{(400) (1,07)^{27-20} \left(\frac{900}{48} \right)^{1,4}}{15} \left(\frac{1000}{1,4} \right) = 1,12 \text{ mg/l}$$

seqüentes. Mais à frente são discutidas as soluções para este caso.

Thistlethwayte, da Austrália, apresenta uma fórmula alternativa para a acumulação de sulfetos numa tubulação sob pressão, dada em seguida:

Na opinião dos autores, a principal deficiência desta fórmula é o fato que ela fornece o mesmo valor, independente da duração do percurso, isto é, independentemente da velocidade o que não é compatível com a experiência.

Note-se que, para o exemplo citado, usando a fórmula de Thistlethwayte, e uma concentração de SO₄ de 40 mg/l, obteríamos:

$$\Delta s = (0,573) (10^{-6}) \left(\frac{900}{1} \right)^{0,8} (250)^{0,4} (1,139)^0 = 0,12 \text{ mg/l}$$

Pomeroy afirma no Manual preparado para o U.S.E.P.A.

"Baseados na compreensão mais adequada dos processos de geração de sulfetos e oxidação, obtida através das pesquisas na Austrália e Estados Unidos nos anos recentes, é teoricamente possível enunciar-se uma equação que prevê a taxa da mudança de concentração de sulfetos num coletor. Não poderá ser feito com base nas condições de uma seção dada. Seria necessário descrever as condições do esgoto por 2 a 3 horas antes de chegar à dita seção, de modo que as concentrações de

sulfetos e oxigênio pudessem ser estimadas. Parece ser impraticável num caso genérico, embora teoricamente possível, obter todas as informações necessárias para o estudo."

Thistlethwayte apresentou numa fórmula complexa para o cálculo de acumulação em coletores, a qual inclui considerações sobre a remoção do limo das paredes da tubulação com o fluxo a altas velocidades. Os procedimentos apresentados podem ser úteis na análise de uma situação particular, onde os dados para os cálculos possam ser precisamente medidos e as constantes principais experimentalmente determinadas.

Na opinião dos autores, no projeto de sistemas de coletores, os métodos e fórmulas originalmente desenvolvidos por Pomeroy e Bowlus, posteriormente modificados por Davy, são os mais úteis.

Pomeroy e Bowlus:

Em 1946, Pomeroy e Bowlus estabeleceram os princípios fundamentais com relação à acumulação de sulfetos nos coletores. Como observado anteriormente, eles determinaram que a taxa de produção de sulfetos (e subseqüente demanda de oxigênio) num coletor é proporcional à temperatura e DBO do esgoto. A temperatura e a concentração de DBO são combinadas num único parâmetro denominado DBO Efetiva (EDBO).

A taxa de absorção de oxigênio na superfície de esgoto é determinada principalmente pela velocidade e declividade do coletor.

Baseado em exaustivos estudos de campo, uma aproximação da condição que permita um balanço entre o suprimento e demanda de oxigênio (para coletores à meia-seção) foi dada no relatório de 1946:

EDBO Marginal = 55 V²,
sendo V = velocidade em pé/s

No sistema métrico esta fórmula seria:

EDBO Marginal = 592 V², com a velocidade em m/s.

W. J. Davy

Em 1950, W. J. Davy (Ref. 2) apresentou uma fórmula mais completa, baseada em estudos de campo conduzidos em Melbourne, Austrália, onde o valor marginal da EDBO é relacionada com o número de Reynolds, com a área da seção molhada e com a largura da superfície. Pomeroy posteriormente modificou a fórmula de Davy para facilitar a sua aplicação, resultando uma expressão conhecida como a fórmula de "Z", apresentada abaixo:

$$Z = \frac{(EDBO) (p/b)}{(S^{1/2}) (Q^{1/3})}$$

ou: EDBO = (Z) (S^{1/2}) (Q^{1/3}) (b/p)

onde:

b/p = relação entre a largura da superfície e o perímetro molhado (adimensional)

S = declividade do coletor

Q = vazão de esgotos

Observações efetuadas em diversos coletores nós EUA levaram a conclusão que a condição marginal para a geração de sulfetos ocorre com um valor "Z" igual a 10.000, quando J é expresso em pé cúbico por segundo (cfs) e quando a EDBO é representada pela condição média encontrada durante o trimestre mais quente do ano. Com valores de "Z" de 5.000, ou inferiores, a geração de sulfetos nunca foi observada. Com valores de "Z" acima de 10.000, a geração de sulfetos e os problemas de corrosão resultantes provavelmente ocorrerão.

Mesmo com altos valores de "Z" pode não ocorrer geração de sulfetos. Estes casos podem ser explicados pela presença de substâncias tóxicas no esgoto ou valores extremos de pH, que inibem o desenvolvimento bacteriológico. A ausência de sulfetos nestes casos é mais provavelmente uma condição temporária: do ponto de vista de projeto, é suficiente saber-se que um valor alto de "Z" indica uma grande possibilidade de geração de sulfetos.

Adicionalmente, sabe-se que para grandes vazões, a geração de sulfetos pode ocorrer a valores de "Z" abaixo de 10.000. Este fato é discutido posteriormente.

No sistema métrico, com a vazão de esgoto (Q) expressa em m³/s, o valor marginal de "Z" é 32.800, e a fórmula é:

$$EDBO \text{ Marginal} = 32.800 S^{1/2} Q^{1/3} b/p$$

Modificação da fórmula de Pomeroy-Davy

Para fornecer uma ferramenta mais útil no projeto de coletores, R. Ludwig modificou a fórmula de Pomeroy-Davy, representando a EDBO em função da velocidade de projeto.

Como os projetistas de tubulações bem sabem, o diâmetro da tubulação não tem efeito significativo na velocidade, para valores de Q e S dados.

Usando a Equação de Manning, a velocidade pode ser escrita como:

$$V = K S^{3/8} Q^{1/4}$$

O valor de K foi determinado como sendo igual a 16,4, baseado no trabalho de Pomeroy e T.R. Camp. (Ref. 6,7), isto é, usando um valor de "n" igual a 0,013.

$$V = 16,4 S^{3/8} Q^{1/4}$$

V em m/s
Q em m³/s

(O Eng.º E. S. Macedo, da CEDAE, apresentou uma fórmula similar no seu trabalho apresentado no 1.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, com K igual a 15,8 para n igual a 0,013.)

Assim,
 $V^{4/3} = 41,7 S^{1/2} Q^{1/3}$
 $S^{1/2} Q^{1/3} = 0,024 V^{4/3}$

A fórmula de Pomeroy-Davy se transforma em:

$$EDBO \text{ Marginal} = (32.800) (0,024) V^{4/3} b/p = 787 V^{4/3} b/p$$

Esta fórmula pode ser comparada com a original de Pomeroy e Bowlus, substituindo-se o valor de b/p para fluxo à meia-seção, que é igual a 0,636.

$$EDBO \text{ Marginal} = 500 V^{4/3}$$

Na faixa de valores de EDBO mais freqüentemente encontrada de 250 a 400 mg/l, a divergência das duas fórmulas é menor que 8%.

Embora seja evidente que a fórmula original de Pomeroy e Bowlus geralmente forneça bons resultados, a sua aplicação é limitada. A nova fórmula é baseada em experiências de campo adicionais e considera vazões à qualquer profundidade no coletor.

FÓRMULA "Z" DE POMEROY-DAVY

A fórmula de Pomeroy-Davy é apresentada graficamente na figura (3), com uma série de curvas representando condições de fluxo em tubulações circulares, quando velocidades à meia-seção tem valores entre 0,5 e 1,0 m/s. Estas curvas se aplicam a coletores circulares de qualquer diâmetro.

Note-se que a condição de fluxo mais favorável para o controle de sulfetos é à meia-seção, quando a EDBO marginal atinge um valor máximo. Valores da EDBO marginal a profundidades proporcionais de d/D = 0,3 e 0,67 são iguais a cerca de 90% do máximo.

Como pode ser visto nestas curvas, os valores marginais da EDBO variam significativamente com a profundidade de fluxo no coletor.

Sabe-se ainda que a DBO varia consideravelmente; sendo os maiores valores de DBO associados com as vazões de pico.

Embora as variações da vazão e DBO com o tempo nos coletores principais dependam do tempo de concentração e natureza da área servida, a experiência dos autores permitiu a derivação de relações médias a partir de várias fases de vazão e DBO medidas. Estas relações podem ser sumarizadas da seguinte forma:

- (1) A vazão de pico é igual a cerca de 170% da vazão média.
- (2) A vazão mínima é cerca de 40% da vazão média.
- (3) O pico da DBO é também cerca de 170% da DBO média e ocorre um pouco depois do pico de vazão.
- (4) A DBO mínima é cerca de 40% média e ocorre um pouco depois da vazão mínima.

Com base na fórmula de Manning, pode-se calcular as relações entre vazões e profundidade. Assumindo um esgoto com um DBO₅ a 20° C médio de 250 mg/l, as relações podem ser tabuladas da seguinte forma:

	Vazão	Profundidade d/D	DBO ₅ 20°C
vazão mínima, Q _{min}	0,4 Q _{med}	0,3	100 mg/l
vazão média, Q _{med}	1,0 Q _{med}	0,5	250 mg/l
vazão máxima, Q _{max}	1,7 Q _{med}	0,7	425 mg/l

FIGURA 2
FÓRMULA POMEROY - DAVY
PARA DBO EFETIVA MARGINAL

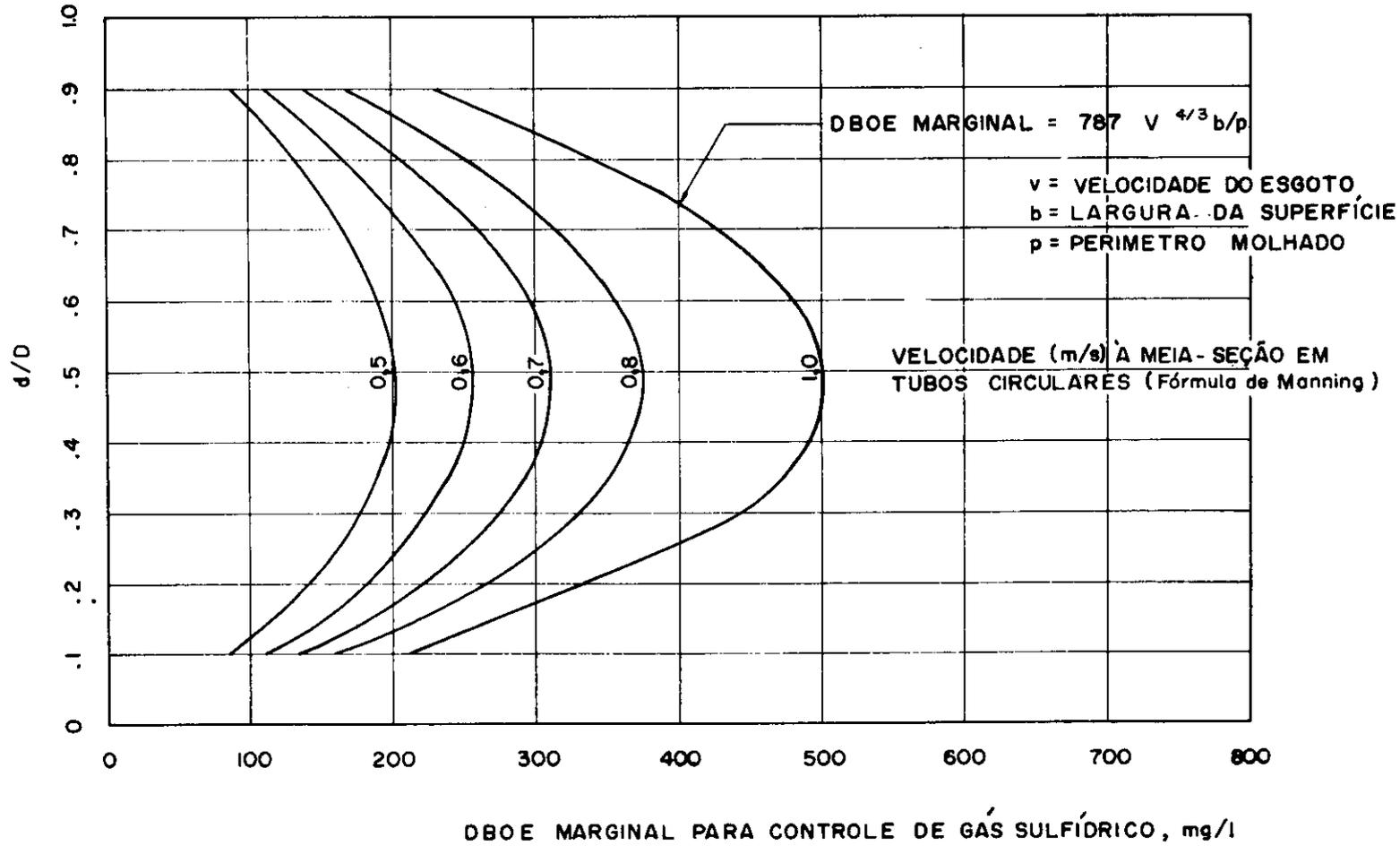
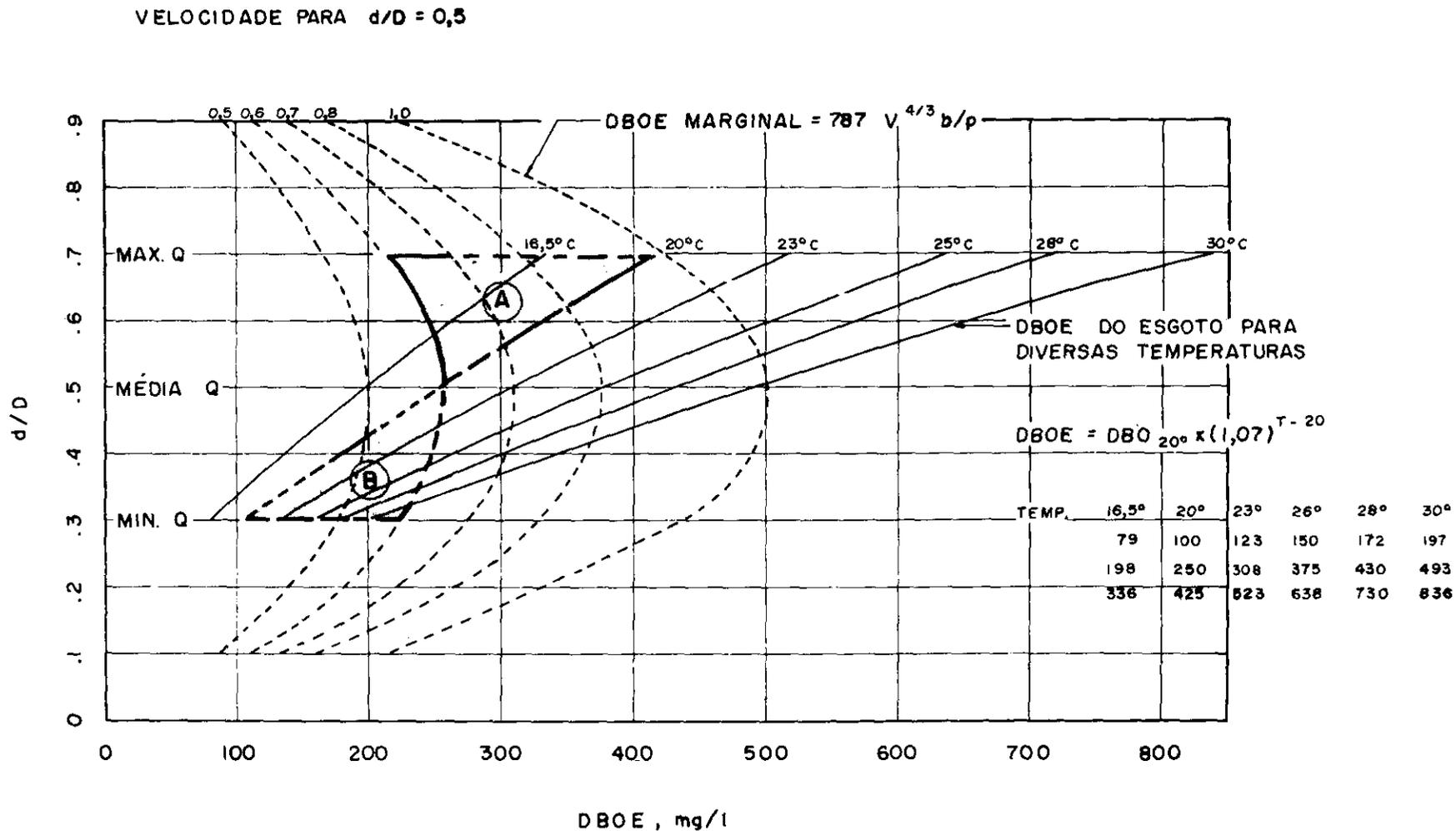


FIGURA 3

EFEITO DA VARIAÇÃO DA DBO EFETIVA
NO CONTRÔLE DE GÁS SULFÍDRICO



Os valores da EDBO para várias temperaturas foram superpostas sobre o conjunto de curvas da Figura (2) e são mostradas na Figura (3). Os valores para a EDBO máxima, média e mínima, foram plotados nos valores de d/D correspondentes de 0,7, 0,5 e 0,3, representando as condições de vazão máxima, média e mínima, de acordo com as determinações anteriores.

Considerando-se a relação entre a curva da EDBO marginal para um coletor projetado com uma velocidade à meia-seção de 0,6 m/s e a curva da EDBO para o esgoto a 20° C, podemos efetuar as seguintes observações. Na vazão média (d/D = 0,5), a EDBO marginal é igual ao valor da EDBO (250 mg/l). Para vazões entre a média e máxima (d/D de 0,5 a 0,7), a EDBO excede o valor marginal para o controle de sulfetos e alguma geração deve ser esperada. Entretanto, durante as vazões mínimas (d/D entre 0,5 e 0,3), a EDBO é inferior que o valor marginal e a re-oxigenação ocorrerá. Durante cada 24 h, o período durante o qual a DBO é significativamente abaixo da média é, pelo menos, igual ao período em que a DBO é acima da média. As áreas sombreadas na figura (3) indicam, de modo aproximado, a magnitude da geração de sulfetos, isto é, se a área "A" excede significativamente a área "B", geração de sulfetos, e conseqüente problemas de corrosão, ocorrerão.

O exame das curvas mostra que, para coletores transportando esgoto com DBO média, os problemas de sulfetos raramente existem em áreas de clima frio (temperaturas médias de 20° C ou menos), se velocidades de auto-limpeza (0,6 m/s) forem previstas. As curvas também indicam a necessidade de velocidades consideravelmente maiores em regiões de clima mais quente.

EFEITOS DAS CONDIÇÕES INICIAIS DE VELOCIDADE

As curvas das Figuras (2) e (3) mostram a relação entre a EDBO marginal e a EDBO real do esgoto, apenas para as condições de vazão de projeto. Entretanto, o problema de controle de sulfetos pode ser muito mais severo durante os anos iniciais de operação de um coletor, quando as vazões, e velocidades resultantes, são consideravelmente menores que as vazões de fins-de-plano. A análise do problema de controle de sulfetos para um caso típico onde a vazão inicial média é igual à terça parte da vazão média final foi elaborada por Ludwig (Ref. 12), baseada nas seguintes premissas:

(1) O dimensionamento prevê uma velocidade igual ou superior a 0,6

m/s, pelo menos durante as condições de vazão máxima.

(2) O dimensionamento prevê velocidades para a prevenção da geração de sulfetos, para as condições iniciais de projeto.

As conclusões, apresentadas na Ref. 12 são fornecidas abaixo.

(1) Para um EDBO médio de 250 mg/l, os critérios para projeto do coletor com relação ao controle de sulfetos e auto-limpeza são aproximadamente os mesmos. Para situações onde a vazão inicial é cerca de um terço da vazão final, diâmetro e declividade do coletor que forneçam uma velocidade de 0,7 m/s (à meia-seção) são necessários para satisfazer ambas as condições ao longo de toda a gama de vazões.

(2) Para valores de EDBO abaixo de 250 mg/l, as condições para auto-limpeza controlam o dimensionamento. Novamente, quando a vazão inicial é cerca de um terço da final, uma velocidade, à meia-seção, de 0,7 m/s, deve ser imposta.

(3) Para valores de EDBO acima de 250 mg/l, o critério de controle de sulfetos limitam o dimensionamento. As velocidades adequadas para controle de sulfetos serão mais do que adequadas para satisfazer condição de auto-limpeza.

METODOLOGIA SUGERIDA PARA O PROJETO DE COLETORES

Os resultados da análise são mostrados graficamente na Figura 4. À direita estão as duas curvas mostrando as velocidades à meia-seção necessárias para o projeto adequado dos coletores, incluindo considerações quanto ao controle dos sulfetos, bem como auto-limpeza.

O trecho inclinado da curva à esquerda é a fórmula básica de Pomeroy-Davy ($EDBO = V^{4/3}$) e representa as condições na vazão de projeto. O trecho inclinado da curva à direita ($EDBO = 400 V^{4/3}$) fornece velocidades para controle de sulfetos quando as vazões são um terço da vazão de projeto. Os trechos verticais de ambas as curvas representam aquelas onde a auto-limpeza governa o projeto.

A Figura (4) também inclui curvas para converter a DBO a qualquer temperatura em DBO.

No projeto de novos sistemas de coletores, o engenheiro deve tentar obter velocidades à meia-seção iguais aquelas dadas pela curva à direita, pois assim ocorrerá o controle adequado dos sulfetos nas condições de fim-do-plano.

O engenheiro deve evitar diâmetros e declividades que forneçam velocidades à meia-seção inferiores aquelas fornecidas pela curva à esquerda. Sob esta última condição,

alguma geração de sulfetos é esperada durante os primeiros anos de operação, desaparecendo à medida que a vazão tende a atingir os valores de projeto.

Do mesmo modo, para se ter a auto-limpeza nos primeiros anos de operação, uma velocidade à meia-seção de, pelo menos, 0,7 m/s deve ser especificada, quando as vazões iniciais são cerca de um terço das vazões finais.

EXEMPLOS (USANDO A FIGURA 4)

DBO_5 a 20° C = 250 mg/l

(1) Temperatura = 20° C, EDBO = 250 mg/l

Curva "A" — para vazão final, a velocidade a meia-seção deve ser 0,6 m/s para controle de sulfetos e auto-limpeza.

Curva "B" — para Q inicial = 1/3 Q final, a velocidade deve ser 0,7 m/s.

(2) Temperatura = 16,5° C, EDBO = 197 mg/l

Curva "A" — a auto-limpeza controla. A velocidade à meia-seção será 0,6 m/s.

Curva "B" — a auto-limpeza controla. A velocidade à meia-seção será 0,7 m/s.

(3) Temperatura = 28° C, EDBO = 430 mg/l

Curva "A" — a prevenção de sulfetos controla. A velocidade à meia-seção deve ser 0,9 m/s.

Curva "B" — a prevenção de sulfetos controla. A velocidade à meia-seção deve ser 1,05 m/s.

GERAÇÃO DE SULFETOS EM GRANDES VAZÕES

Pomeroy indicou que a fórmula "Z" deve ser empregada com reservas e que a geração de sulfetos pode ocorrer segundo uma taxa baixa nos grandes interceptores, enquanto as fórmulas indicam que tal não seria esperado.

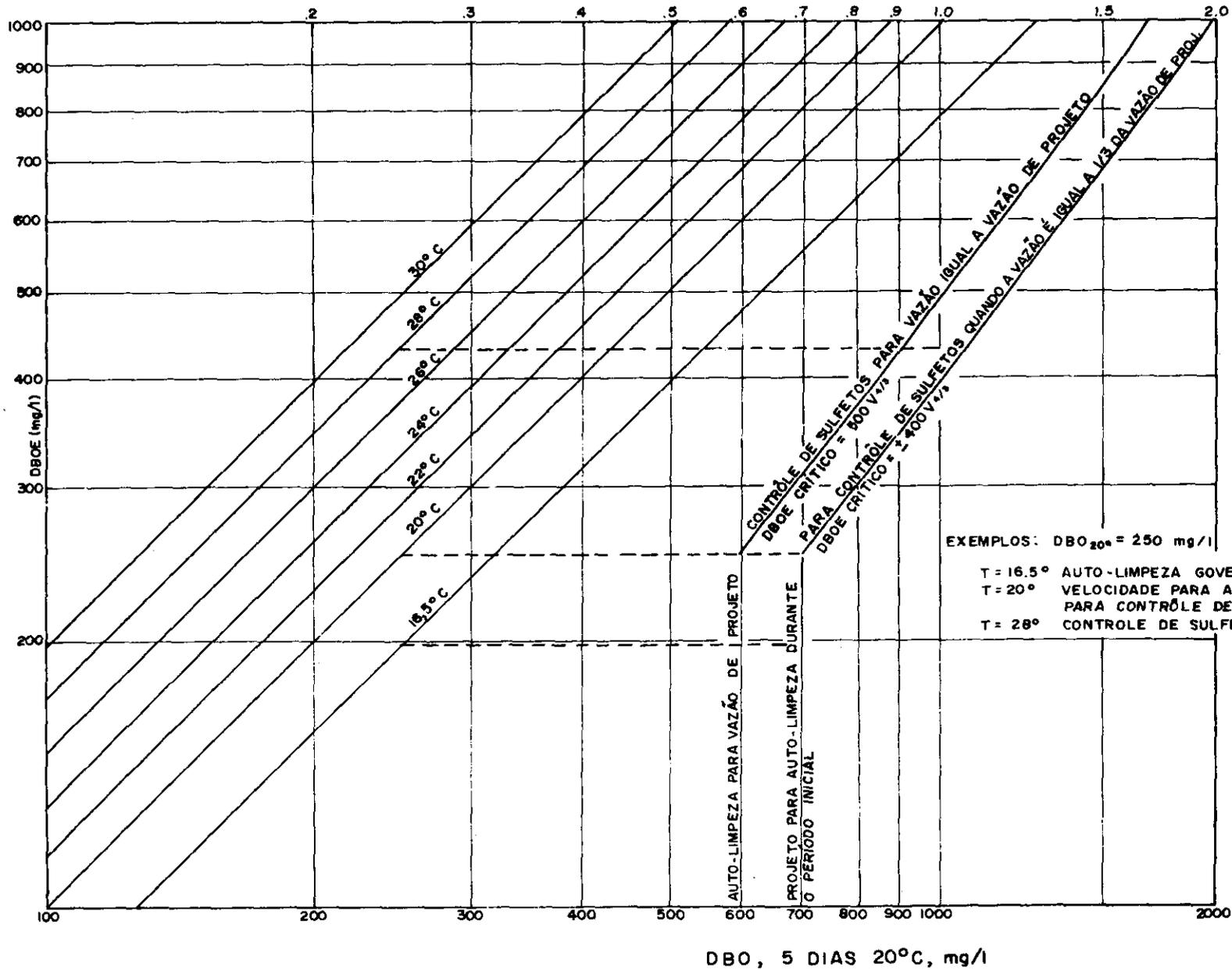
A explicação para este fato é que o oxigênio é utilizado não apenas pela camada de limo, mas no esgoto propriamente dito também. Para vazões menores, a absorção de O_2 positivo. A medida que a vazão aumenta, maiores diâmetros e tirantes são necessários. A razão entre área superficial e volume torna-se consideravelmente reduzida, e a demanda de oxigênio no esgoto transforma-se num fator importante.

Uma análise precisa exige o conhecimento de todo o sistema tributário, incluindo os efeitos de vazões contribuintes que possam ser conduzidas para o interceptor.

Para fins de projeto, considera-se que para vazões até 1 m³/s, a relação "Z" usando um valor de 32.800 resultará num dimensionamento se-

VELOCIDADE EM m/s À MEIA-SEÇÃO NECESSÁRIA PARA EVITAR O AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE S E PARA AUTO-LIMPEZA NAS TUBULAÇÕES DE ESGOTOS

FIGURA 4



guro. Tal valor seria equivalente a um diâmetro de coletor entre 1.000 e 1.200 mm.

Para vazões maiores, velocidades mais altas seriam indicadas. Embora seja apenas uma primeira estimativa, para um vazão de, digamos, 4 m³/s, um "Z" de cerca de 20.000 deve ser aplicado.

DETERMINAÇÕES REAIS DA GERAÇÃO DE SULFETOS

Como Pomeroy apontou, as determinações reais da geração de sulfetos não são viáveis, a menos que uma enormidade de dados seja disponível, o que geralmente não é o caso, na maior parte dos projetos.

Pode-se dizer que se o valor de "Z" de projeto for acima do valor requerido, a geração de sulfeto provavelmente ocorrerá, relacionando-se a sua intensidade com a magnitude da deficiência de "Z".

Na maior parte dos casos práticos, quando não há adição de sulfetos por fontes externas (tubulações de recalque, despejos industriais), a geração estará numa faixa de alguns décimos de mg/l, até valores de 1,5 mg/l.

Existem, naturalmente, exemplos onde concentrações de sulfetos de 5 mg/l, 10 mg/l, ou mesmo maiores tem sido descobertas, mas estes são casos especiais e envolvem circunstâncias não usuais.

MEDIDAS A SEREM TOMADAS PARA EVITAR A CORROSÃO PROJETO DE TUBOS PARA RESISTIREM AO ATAQUE DE SULFETOS

Os seguintes itens aplicam-se na construção de tubulações resistentes aos sulfatos.

(1) Emprego de material inerte ao ataque pelo ácido sulfúrico, como argila, fibra-de-vidro ou plástico. Como previamente mencionado, o emprego destes materiais requerem comparações econômicas.

(2) Emprego de revestimento plástico (como, por exemplo, o "Ameron T-Lock"). Este revestimento consiste de uma manta de PVC, com espessura de aproximadamente, 1,5 mm. Este material é moldado juntamente com a tubulação e é usado desde 1950, em Los Angeles, Cal, com excelentes resultados. O principal problema é o seu alto custo.

(3) Outros tipos de revestimentos. Nenhum deles obteve sucesso onde as condições de trabalho foram severas, devido, principalmente, à difusão do ácido através do material de rejuntamento, ou através de defeitos. Estes revestimentos eram feitos de argila ou vidro.

(4) Tubulações projetadas para resistência dos sulfetos. Seu emprego foi inicialmente sugerido na África do Sul, e o seu princípio básico consiste em projetar-se uma espessura adicional de concreto, a ser sacrificada pelo ataque de sulfetos. Os agregados calcários podem ser usados vantajosamente devido à sua maior alcalinidade.

Pomeroy fornece equações que permitem o cálculo do fluxo de H₂S para as paredes do tubo e estimam a taxa de penetração do ácido resultante do fluxo H₂S.

FLUXO DE H₂S

$$\varnothing_{sw} = 0,7 (SU)^{3/8} j (DS) \left(\frac{b}{p'}\right) \text{ onde:}$$

\varnothing_{sw} = fluxo de H₂S para as paredes do tubo, g/m²-h

S = declividade da tubulação

U = velocidade, m/s

j = proporção de sulfeto na forma de H₂S para o pH do esgoto

DS = sulfetos dissolvidos no esgoto

b = largura da superfície

p' = perímetro exposto

CORROSÃO DO TUBO DE CONCRETO

$$C = 11,5 k \varnothing_{sw} \left(\frac{1}{A}\right) \text{ onde:}$$

C = taxa média de penetração do ácido resultante do H₂S, assumindo reação a 100%, mm/ano

K = coeficiente para correção, função da porcentagem real de reação

\varnothing_{sw} = fluxo de H₂S, calculado pela equação acima

A = alcalinidade do cimento, expressa em porcentagem de equivalente de Ca CO₃

Kienow (Hidro-Conduit Corp., Califórnia), Ref. 10, demonstrou que tubulações de concreto centrifugado apresentam uma alcalinidade maior na parede interna que tubulações moldadas com os mesmos materiais, pois algumas partículas de cimento

migram para a face interna da tubulação, à medida que o tubo é centrifugado. Este autor apresenta os seguintes valores para a alcalinidade:

Tipo de tubulação	Alcalinidade Equiv. CaCO ₃ %
agregado granítico	
— moldado	0,20
— centrifugado	0,40
agregado calcário	
— moldado	0,90
— centrifugado	1,00

EXEMPLO

Suponha uma tubulação com as seguintes características:

diâmetro = 600 mm

declividade = 0,001

vazão = 0,1 m³/s para meia-seção

velocidade = $16,4 Q^{1/4} S^{3/8} = (16,4) (0,1)^{0,25} \times (0,001)^{0,375} = 0,69 \text{ m/s}$

Estimativa de Sulfetos dissolvidos = 1,5 mg/l

Para pH = 7,0, 50% dos sulfetos estão na forma de H₂S, isto é, j = 0,5

$$\varnothing_{sw} = 0,7 (SU)^{3/8} j (DS) (b/p')$$

$\frac{b}{p'} = 0,636$ para um tubo à meia-seção

$$\varnothing_{sw} = 0,7 [(0,001) (0,69)]^{3/8} (0,5) (1,5) (0,636)$$

$$\varnothing_{sw} = 0,022 \text{ g/m}^2\text{-h}$$

Assuma uma vida útil para a tubulação de 100 anos, com um coeficiente de segurança de 50%.

Lc = vida útil, anos

Seja Z o recobrimento sobre a armação de aço, mm

$$Lc = \frac{Z}{c} = \frac{Z}{11,5 k \varnothing_{sw} (1/A)}$$

K pode ser considerado, com margem de segurança, igual a 0,6.

$$\text{Assim: } (100) (1,5) = \frac{AZ}{6,9 \varnothing_{sw}}$$

$$AZ = (150) (6,9) (0,022)$$

$$AZ = 22,8$$

Então, uma tubulação de concreto armado pode ser especificada com um valor AZ de 22,8 (à semelhança de um valor de carga para resistência mecânica).

As alternativas seriam:

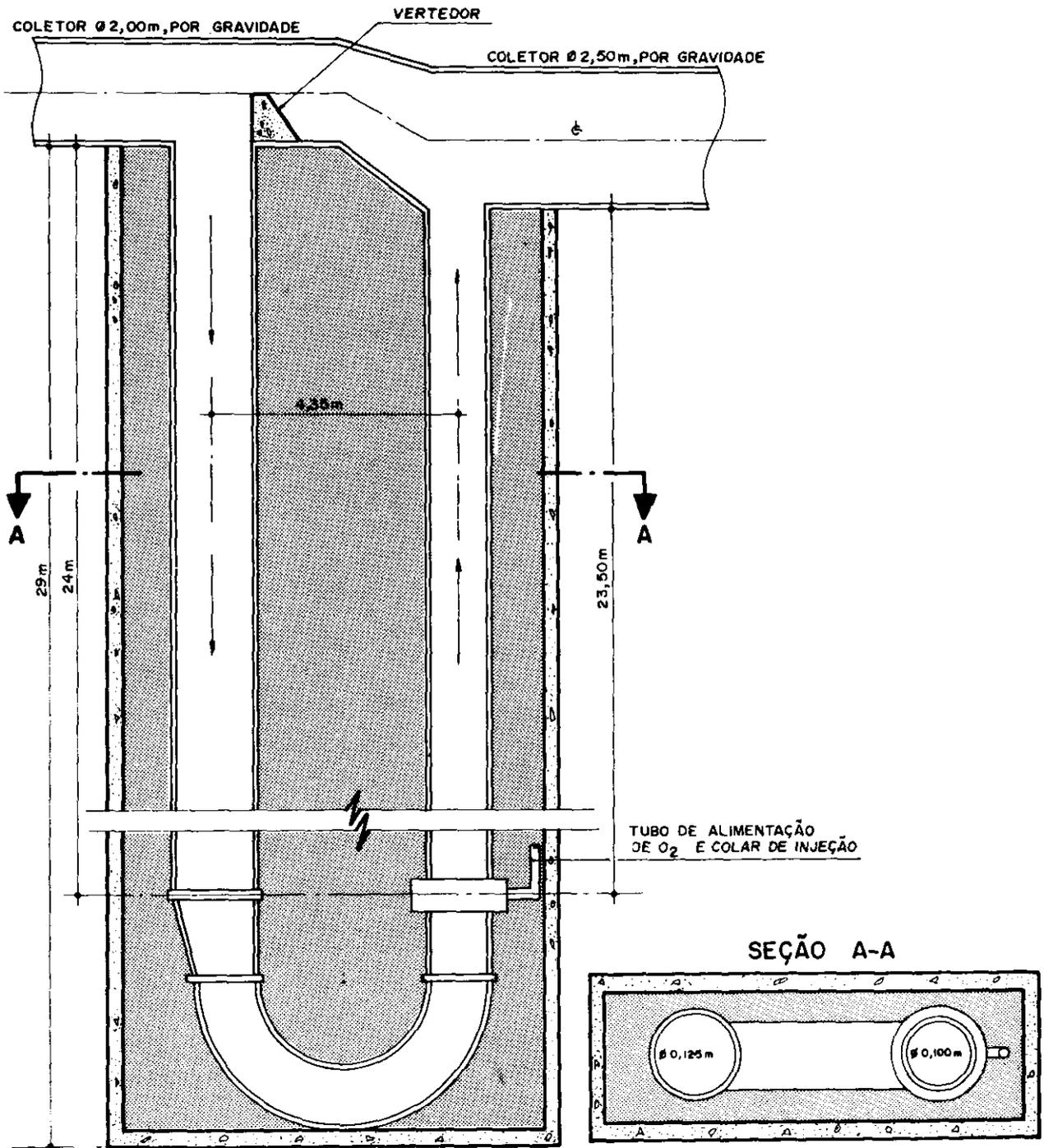
Tipos de Tubulação	A	Z = espessura do recobrimento sobre a armação, mm
Agregado granítico — moldado	0,2	114
— centrifugado	0,4	57
Agregado calcário — moldado	0,9	25
— centrifugado	1,0	23

Estudos econômicos e disponibilidade no mercado determinam qual

alternativa é a mais recomendada.

FIGURA 5

TUBO U



SEM ESCALA

CONTROLE DE SULFETOS EM SISTEMAS EXISTENTES TUBULAÇÕES SOB PRESSÃO

Primeiramente, deve-se esclarecer que não ocorre corrosão por sulfetos numa tubulação sob pressão, pois não há a oxidação do H_2S em ácido sulfúrico. Entretanto, quando o esgoto carregado de sulfetos é descarregado da tubulação sob pressão para um coletor por gravidade, severa corrosão pode ocorrer no segundo.

SOLUÇÕES

As soluções para este problema são:

a) **injeção de ar:** Em 1942, Lemke sugeriu no Condado de Orange, Cal., a injeção de ar nas tubulações de recalque de esgoto.

Esta medida provou ser bastante eficiente na eliminação da produção de sulfetos, e centenas de instalações como esta existem nos EUA.

A quantidade de ar necessária por unidade de comprimento é proporcional à área de paredes, e, portanto, ao diâmetro. É também função da pressão na tubulação, pois as pressões maiores provêm mais rápida absorção de oxigênio.

Pomeroy, no manual da EPA, fornece uma fórmula detalhada para o cálculo da quantidade de ar. Uma regra simplificada consiste em usar 11 l/min por cada centímetro de diâmetro do tubo.

O compressor de ar deve ter o dobro da capacidade de projeto e deve ser de baixa velocidade e para serviço pesado.

Também deve-se evitar pontos altos nas tubulações, pois nestes pontos os sulfetos podem ser oxidados em H_2SO_4 , com os consequentes problemas de corrosão.

É também viável, numa tubulação muito longa, prover a injeção de ar numa localização intermediária.

b) **Injeção de Oxigênio:** No 7.º Congresso de IAWPR, em Paris, set. 1974, Boon & Lister, da Inglaterra, apresentaram um trabalho descrevendo a injeção de oxigênio puro em tubulações sob pressão, com excelentes resultados (Ref. 9).

Quando a produção de sulfeto é alta, a injeção de O_2 pode ser vantajosa, pois maiores quantidades de oxigênio podem ser injetadas.

É também viável injetar oxigênio no trecho final da tubulação.

Maiores detalhes são fornecidos no artigo em referência.

TUBULAÇÕES POR GRAVIDADE

A inovação mais recente consiste no uso de um tubo "U" para tubu-

lações por gravidade, no qual o oxigênio pode ser injetado.

A Figura (5) mostra um esquema deste método.

O efeito é similar à aplicação numa tubulação sob pressão. O oxigênio puro é utilizado devido a necessidade de uma absorção rápida do oxigênio na limitada zona de afloação.

Este método é atualmente aplicado na cidade de Sacramento, Cal., onde esperava-se que as concentrações de sulfetos fossem muito altas. Neste caso foi determinado que esta solução era mais econômica que a alternativa envolvendo o uso de tubulações revestidas com PVC.

A vantagem adicional do emprego de O_2 é a eliminação paralela de odores.

Outro método de aplicação de oxigênio puro envolve o desvio de uma pequena parcela da vazão de esgoto, a qual é pressurizada e recebe injeção de O_2 retornando-a à parcela principal da vazão de esgotos por meios de bocais (jatos).

CONTROLE DE SULFETOS NOS SISTEMAS EXISTENTES

CONTROLE QUÍMICO

Substâncias químicas tem sido empregadas para o controle de sulfetos nos sistemas existentes, a saber:

- (1) Cloro
 - fornece remoção rápida e completa
 - não possui valor preventivo
 - dispendioso
- (2) Nitratos
 - fornecem O_2
 - dispendioso
- (3) Metais pesados
 - zinco, ferro, precipitam o S— em ZnS , etc.
 - dispendioso
 - a eficiência não é garantida
- (4) Cal/soda cáustica
 - tratamento de choque, para matar os organismos do limo
 - pode perdurar por até uma semana
- (5) Água oxigenada
 - é uma técnica recente
 - pode ser muito eficiente

EXEMPLO: Corpus Christi, Texas,

Coletor:	1,07 m de diâmetro, concreto
Comprimento:	7.249 m
Vazão:	0,1 m/s média; 0,17 m ³ /s máxima
Sulfetos:	5 a 8 mg/l, concentração inicial (muito alta devido ao grande período de detenção).

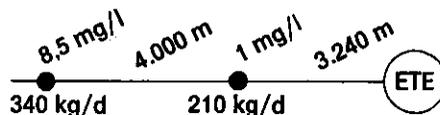
A injeção de H_2O_2 se dá em 2 pontos, separados de 4.000 m.

O sistema emprega H_2O_2 líquido, 50% de concentração.

Quantidade = 550 kg/d

Custo (EUA) = US\$ 300 por dia (Cr\$ 6.000,00/dia em novembro/78)

O esquema abaixo reproduz o sistema



OUTROS MÉTODOS

Redução de DBO

Em muitos casos os sulfetos não são um problema devido à grande parcela de infiltração da água subterrânea, reduzindo a DBO e a temperatura. Um exemplo típico é Las Vegas, Nev., EUA.

Nos primeiros anos de operação de um sistema de coletores pode ser uma solução vantajosa se a água for disponível.

REFERÊNCIAS

- 1 — Pomeroy, Richard D. e Bowlus, Fred D., Progress Report on Sulfide Control Research", Sewage Works Journal, vol. XVIII, n.º 4 (Julho 1946).
- 2 — Davy, W. J. "Influence of Velocity on Sulphide Generation in Sewers", Sewage and Industrial Wastes (Setembro 1950).
- 3 — Parker, C. D., "Hydrogen Sulphide Corrosion of Sewers, Technical Paper A-8, Parte 2, "Generation of Sulphides in Sewers", Parte 6, "Bacteriology of Corrosion Processes", Melbourne and Metropolitan Board of Works, Melbourne, Australia (1945-1965).
- 4 — Thistlethwayte, D. K. B., "The Control of Sulphides in Sewerage Systems", Ann Arbor Science Publishers, Inc., (1972).
- 5 — Pomeroy, Richard D., "Sanitary Sewer Design for Hydrogen Sulfide Control" Public Works, (Outubro 1970).
- 6 — Pomeroy, Richard D., "Flow velocities in Small Sewers", Journal Water Pollution Control Federation (Setembro 1967).
- 7 — Camp, T. R. "Design of Sewers to Sewers to Facilitate Flow", Sewage Works Journal, 18, 1, 3 (Janeiro 1946).
- 8 — Pomeroy, Richard D., "Generation and Control of Sulfide in Filled Pipes", Sewage and Industrial Wastes (Setembro de 1959).
- 9 — Boon A. G., Lister A. R., "Formation of Sulphide in Rising Main Sewers and Its Prevention by Injection of Oxygen", 7.º Congresso da IAWPR, Paris (1974).
- 10 — Kienow, Ken, "Protecting Reinforced Concrete Pipe, Sanitary Sewers", Water and Sewage Works (Outubro de 1975).
- 11 — Pomeroy, Richard D., "Process Design Manual For Sulfide Control in Sanitary Sewage Systems". U. S. EPA, (Outubro 1974).
- 12 — Ludwig, Russell G. "Projetos de Esgotos Sanitários, Controle de Sulfetos", Revista Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, V. 12, n.º 4 (Outubro/dezembro 1973).
- 13 — Pomeroy, Richard D., "The Problem of Hydrogen Sulphide in Sewers", Clay Pipe Development Ass'n, Ltd., Londres, Inglaterra, 1976.