

**Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**  
**Departamento de Engenharia de Construção Civil**

**BT/PCC/42**

---

**Estudo do Escoamento em  
Conduitos Horizontais de Sistemas  
de Coleta de Esgotos Sanitários de  
Edifícios Residenciais**

---

**Lúcia Helena de Oliveira**  
**Orestes Marraccini Gonçalves**

**São Paulo - 1991**

O presente trabalho é uma versão abreviada da dissertação de mestrado apresentada pela Eng<sup>a</sup> Lúcia Helena de Oliveira, sob orientação do Prof. Dr. Orestes Marraccini Gonçalves. "Estudo do escoamento em condutos horizontais de sistemas de coleta de esgotos sanitários de edifícios residenciais". A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na Biblioteca de Engenharia Civil da Escola Politécnica/USP.

Oliveira, Lúcia Helena de

Estudo do escoamento em condutos horizontais de sistemas de coleta de esgotos sanitários de edifícios residenciais / L.H. de Oliveira, O.M. Gonçalves. -- São Paulo : EPUSP, 1991.

19p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/42)

1. Instalações hidráulicas e sanitárias I. Gonçalves, Orestes Marraccini II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil III. Título IV. Série

CDU 628.6

# ESTUDO DO ESCOAMENTO EM CONDUTOS HORIZONTAIS DE SISTEMAS DE COLETA DE ESGOTOS SANITÁRIOS DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

Lúcia Helena de Oliveira

Escola Politécnica da USP

**RESUMO** -- Este trabalho, trata do escoamento não permanente, verificado nos ramais e coletores dos Sistemas de Coleta de Esgotos Sanitários de Edifícios Residenciais. As equações diferenciais da continuidade e da quantidade de movimento, que regem este escoamento, são resolvidas pelo método das características. Algumas configurações típicas de instalações sanitárias brasileiras são simuladas através de programa computacional, cujos resultados mostram que a redução dos diâmetros dos ramais e coletores é viável, tanto a nível de desempenho, quanto economicamente.

## 1 - INTRODUÇÃO

Os primeiros Sistemas de Coleta de Esgotos Sanitários surgiram em meados do século passado e eram projetados com a finalidade única de conduzir os esgotos para fora do edifício. Desta forma, apresentavam um único tubo de queda sem ventilação, e ainda, eram desprovidos de dispositivos para evitar o retorno de odores para os ambientes sanitários.

A evolução destes sistemas tem sido lenta e controvertida, talvez devido ao pequeno percentual no custo total do "sistema edifício". No entanto, os sistemas americanos evoluíram mais rapidamente do que os sistemas ingleses, em consequência do processo acelerado de urbanização, ocorrido nas grandes cidades dos Estados Unidos, trazendo consigo os problemas inerentes às instalações sanitárias, e conseqüentemente, a busca de alternativas para a solução destes problemas.

Com relação ao dimensionamento, sabe-se que no Brasil e em vários outros países, estes sistemas, têm sido dimensionados com base nos critérios e normalizações, estabelecidos a partir das pesquisas realizadas por Hunter [1] durante a primeira metade deste século, no National Bureau of Standards - NBS, nos Estados Unidos.

Pode-se afirmar que há três fatores principais intervenientes no dimensionamento destes sistemas, que são: a simultaneidade de utilização dos aparelhos sanitários, o regime de escoamento considerado e a ventilação do sistema. O estabelecimento das vazões de projeto está intimamente relacionado ao primeiro fator mencionado.

Hunter [1], em seu trabalho, apresenta um método com base na função de probabilidade binomial, para a determinação do número de aparelhos em utilização simultânea. Este método fornece bons resultados, porém é limitado no que diz respeito ao padrão de utilização e à dependência dos usuários dos diversos modelos de um mesmo tipo de aparelho.

De uma forma geral, o dimensionamento de ramais e coletores, utilizando-se o método proposto por Hunter, ou seja, distribuição binomial e escoamento em regime permanente, conduz a um superdimensionamento, o que em alguns casos, prejudica as velocidades de autolimpeza, e conseqüentemente, o desempenho do sistema.

Quanto ao regime de escoamento, no interior de um Sistema de Coleta de Esgotos Sanitários, ele caracteriza-se pelo movimento de ondas, provocado pelas descargas aleatórias dos diversos aparelhos do sistema, ou seja, é eminentemente não permanente e à superfície livre.

No que diz respeito à ventilação do sistema, Graça [2] concluiu que:

- a necessidade de ventilação é determinada pelas características do sistema de coleta e seus componentes, em particular os desconectores;
- a ventilação secundária não é um elemento necessariamente constituinte de todos os Sistemas Prediais de Coleta de Esgotos Sanitários, e sim, uma conseqüência natural da análise técnica e econômica.

Após esta noção geral dos fatores intervenientes no dimensionamento dos Sistemas Prediais de Coleta de Esgotos Sanitários, gostaríamos de ressaltar que neste trabalho estudaremos somente a parte que diz respeito ao escoamento, e em particular, nos condutores horizontais do sistema.

O regime de escoamento não permanente, que também inclui os transitórios de pressão, oscilações de massa ou onda, cujas técnicas de análise dependem do tempo, vem sendo pesquisado desde a metade do século XIX, [4]. Isto é confirmado pelos trabalhos de Laplace e Lagrange, sendo que o primeiro resultado deste estudo foi o desenvolvimento da fórmula da celeridade para pequenas ondas, proposta por Lagrange.

Contudo, o tratamento matemático avançado do regime de escoamento não permanente em condutos livres, teve início com o desenvolvimento das equações diferenciais parciais da continuidade e da quantidade de movimento, conhecidas como equações de Saint-Venant. Uma das técnicas utilizadas na solução destas equações é o método das características, que será apresentado neste trabalho. Esta técnica, foi colocada em

prática com o advento dos computadores digitais, pois até então, estes cálculos eram inadmissíveis [3] devido aos inúmeros passos de cálculo, e conseqüentemente, um grande consumo de tempo para a análise de um sistema.

Com as facilidades decorrentes dos cálculos computacionais, Swaffield [4] tem desenvolvido um programa de computador, na Universidade de Heriot-Watt, na Escócia. Este programa simula todo o escoamento de esgotos sanitários, em regime não permanente, no interior de um Sistema de Coleta de Esgotos Sanitários.

O desenvolvimento acelerado da área computacional, permite-nos prever, para um futuro próximo, o desenvolvimento de novos softwares, envolvendo a teoria do escoamento não permanente. E ainda, com a vazão de projeto do sistema podendo ser determinada através de métodos probabilísticos avançados, considerando-se o tipo do edifício, as atividades nele exercidas, bem como, as características dos usuários, conforme trabalho desenvolvido por Gonçalves [5].

Assim sendo, a consideração do escoamento não permanente no dimensionamento dos Sistemas Prediais de Coleta de Esgotos Sanitários, tornar-se-á acessível à grande maioria dos projetistas, ficando para o passado, a confiança nos modelos empíricos, limitados a sistemas pré-estabelecidos para o desenvolvimento do método utilizado atualmente. Com isto, os custos destes sistemas serão bem menores, e certamente, com a garantia de um alto nível de desempenho.

## 2 - DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO EM REGIME NÃO PERMANENTE PELO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

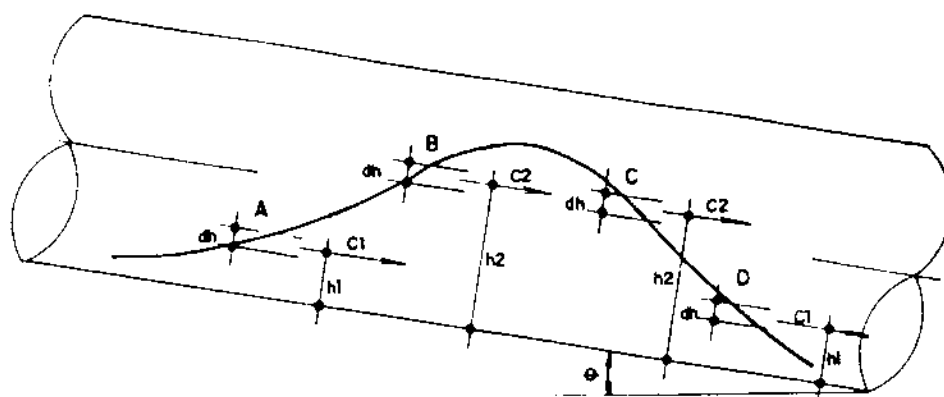
### 2.1 A Atenuação de Ondas e sua Implicação no Projeto de Sistemas de Coleta de Esgotos Sanitários

As condições de escoamento em um Sistema de Coleta de Esgotos Sanitários variam muito rapidamente, em relação ao tempo, pois dependem da aleatoriedade das descargas dos aparelhos. Por esta razão, este tipo de escoamento deve ser tratado como movimento de ondas. O escoamento não permanente em condutos livres, caracteriza-se pela modificação da forma das ondas, a medida que elas se propagam pelo sistema.

A formação de onda em ramais e coletores, pode ser considerada composta de dois mecanismos separados, porém superpostos. A medida que a onda se propaga, a sua altura cresce com a dissipação de energia, e é atenuada, devido a sua difusão, de tal modo, que a superposição destes dois efeitos, resulte numa profundidade de pico, a jusante da entrada do escoamento.

A figura 2.1 mostra como uma onda influencia o escoamento em um tubo parcialmente cheio. A velocidade da onda, responsável pela mudança das condições do escoamento, depende da sua profundidade, sendo que os pontos mais profundos, apresentam maior velocidade.

Esta variação da velocidade com a profundidade local, produz uma declividade íngreme na parte dianteira da onda, de profundidade crescente, e uma declividade suave, na sua extremidade traseira.



**Figura 2.1** Dependência da atenuação da onda com a profundidade local, determinada pela velocidade de propagação da onda. Como  $h_1 < h_2$  e  $c_1 < c_2$ , C sobrepõe D, enquanto B se distancia de A, alterando a forma da onda. SWAFFIELD [6].

Estes dois efeitos são observados à medida que a descarga de um aparelho é acionada, sendo verificada no sistema a redução da profundidade de pico, associada à onda, a medida que ela se propaga a jusante, com o conseqüente aumento do seu comprimento. Este fenômeno é denominado atenuação da onda, e evidentemente, influencia as profundidades e velocidades do escoamento através do sistema. Assim sendo, o efeito de encadeamento, atenuação de todas as ondas, depende da magnitude e da forma da curva de descarga do aparelho em utilização.

Observações feitas por Swaffield & Galowin [7], [8], constataam que um escoamento com curva de vazão de descarga "triangular" (de um vaso sanitário), atenua mais rapidamente em relação a uma curva "trapezoidal" (de uma banheira), pois o achatamento da extremidade traseira da onda, desgasta a extremidade dianteira, limitando a sua tendência de tornar-se íngreme.

Além dos parâmetros do escoamento, como a forma de utilização e as curvas de descarga dos aparelhos, a atenuação da onda depende dos parâmetros do tubo: diâmetro, declividade e rugosidade.

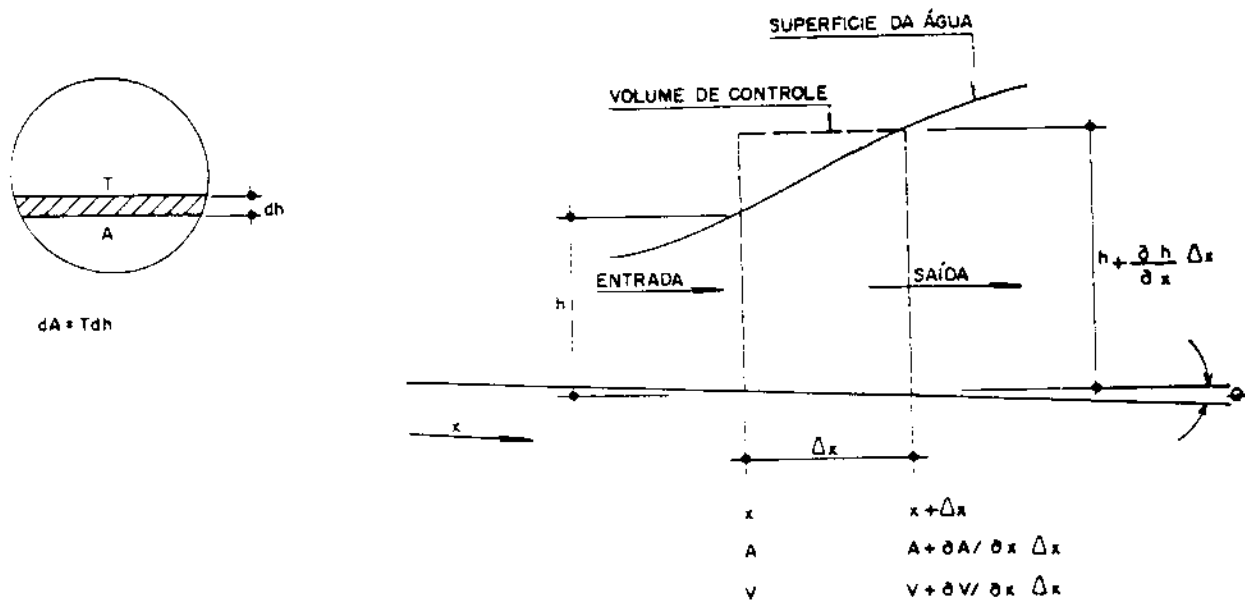
## 2.2 As Equações do Movimento

As equações que regem o escoamento não permanente em condutos livres são as equações diferenciais parciais da continuidade e da quantidade de movimento. Elas são definidas em termos de profundidade e velocidade do escoamento.

As hipóteses fundamentais [9] para o desenvolvimento das equações de Saint-Venant, são:

- A superfície da onda varia gradualmente, então, pode-se afirmar que a distribuição de pressão em uma seção é hidrostática, ou que a aceleração vertical é pequena;
- As perdas por atrito no escoamento não permanente são muito próximas das obtidas no escoamento permanente;
- A distribuição da velocidade através da seção transversal de um canal é uniforme;
- O movimento da onda pode ser considerado bidimensional, com os eventuais efeitos de diferença de níveis, nas seções transversais desprezíveis;
- A declividade do fundo do canal é tão pequena que  $\sin \theta = \text{tg } \theta$  e  $\cos \theta = 1$ , onde  $\theta$  é o ângulo entre o fundo do canal e a horizontal.

### 2.3 Equação da Continuidade



**Figura 2.2** Esquema de elemento de escoamento não permanente para dedução da Equação da Continuidade.

Conforme a figura 2.2, a vazão em massa que entra no volume de controle é expressa por:

$$\dot{m}_e = \frac{\gamma}{g} AV \quad (2.1)$$

onde:

- A = área da seção transversal,  $m^2$ ;
- V = velocidade média do escoamento,  $m/s$ ;
- $\gamma$  = peso específico da água,  $N/m^3$ ;
- g = aceleração gravitacional,  $m/s^2$ .

A vazão em massa que sai do volume de controle é expressa por:

$$\dot{m}_s = \frac{\gamma}{g} \left( A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right) \left( V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x \right) \quad (2.2)$$

Então, a vazão efetiva em massa do volume de controle é dada por:



$$\dot{M} = \frac{\gamma}{g} AV - \frac{\gamma}{g} \left( A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right) \left( V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x \right)$$

$$\dot{M} = \frac{\gamma}{g} AV - \frac{\gamma}{g} AV - \frac{\gamma}{g} A \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x - \frac{\gamma}{g} V \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x - \frac{\gamma}{g} \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x^2$$

Desprezando-se o termo de segunda ordem, temos:

$$\dot{M} = - \frac{\gamma}{g} A \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x - \frac{\gamma}{g} V \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \quad (2.3)$$

A taxa de crescimento do volume de controle é:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\gamma}{g} \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \quad (2.4)$$

Como a taxa de crescimento do volume de controle em relação ao tempo deve ser igual a vazão real em massa, na entrada do volume de controle, tem-se a partir das equações (2.3) e (2.4) que:

$$\frac{\gamma}{g} \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x = - \frac{\gamma}{g} V \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x - \frac{\gamma}{g} A \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x \quad (2.5)$$

Dividindo-se ambos os membros por  $(\gamma/g) \Delta x$ , temos:

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

Da figura 2.2, temos que  $\partial A = \partial h T$ . Substituindo-se na equação (2.6), obtém-se a Equação da Continuidade:

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + VT \frac{\partial h}{\partial x} + T \frac{\partial h}{\partial t} = 0, \quad (2.7)$$

onde:

T = largura da seção transversal do escoamento, m;  
A e V, definidos anteriormente.

## 2.4 Equação da Quantidade de Movimento

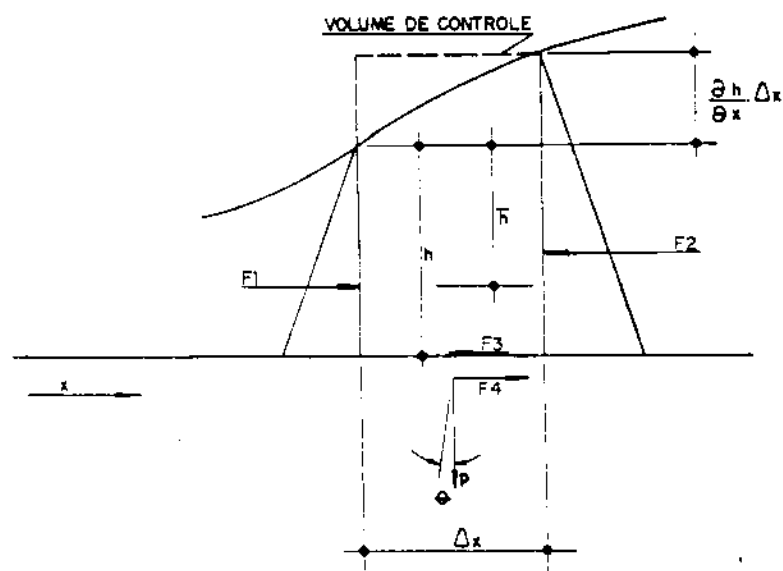


Figura 2.3 Esquema de elemento de escoamento não permanente para dedução da Equação da Quantidade de Movimento.

De acordo com a figura 2.3 as seguintes forças estão agindo no volume de controle:

$$F_1 = \gamma A \bar{h} \quad (2.8)$$

$$F_2 = \gamma A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x + \gamma A \bar{h} \quad (2.9)$$

$$F_3 = \gamma A S \Delta x \quad (2.10)$$

$$F_4 = \gamma A S_0 \Delta x \quad (2.11)$$

onde:

- $F_1$  = empuxo a montante, N;
- $F_2$  = empuxo a jusante, N;
- $F_3$  = força devido ao atrito, N;
- $F_4$  = componente do peso na direção  $x$ , N;

$S_0$  = declividade da linha do fundo do canal;  
 $S$  = declividade da linha de energia;  
 $A$  = área da seção transversal,  $m^2$ ;  
 $\gamma$  = peso específico do fluido,  $N/m^3$ ;  
 $\bar{h}$  = altura do centro de gravidade da área da seção transversal, m.

O valor de  $S$  pode ser calculado, através de qualquer fórmula para escoamento permanente, como por exemplo, as fórmulas de Manning ou Chezy. Sendo que foi assumido um pequeno valor para  $\theta$ ,  $\text{sen}\theta = \theta = S_0$ .

A força resultante, que atua no volume de controle da figura 2.3, é então, assim determinada:

$$F = \Sigma F$$

$$F = F_1 - F_2 - F_3 + F_4$$

Substituindo-se as expressões de  $F_1$  a  $F_4$ , a partir das equações (2.8) a (2.11), vem:

$$F = -\gamma A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \gamma A S \Delta x + \gamma A S_0 \Delta x \quad (2.12)$$

O momento na entrada do volume de controle é:

$$M_e = \frac{\gamma}{g} A V^2 \quad (2.13)$$

O momento na saída do volume de controle é:

$$M_s = \frac{\gamma}{g} \left[ AV^2 + \frac{\partial}{\partial x} (AV^2) \Delta x \right] \quad (2.14)$$

Portanto, o momento da vazão efetiva em massa, no volume de controle é:

$$M_e = \frac{\gamma}{g} AV^2 - \frac{\gamma}{g} \left[ AV^2 + \frac{\partial}{\partial x} (AV^2) \Delta x \right]$$

$$M_e = - \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial x} (AV^2) \Delta x \quad (2.15)$$

A taxa de crescimento do momento em relação ao tempo é:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\gamma}{g} AV \Delta x \right) \quad (2.16)$$

De acordo com a lei da conservação do momento, a taxa de crescimento do momento, em relação ao tempo, é igual à taxa do momento da vazão real, em massa, mais as forças atuando sobre a água no volume de controle. Então,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\gamma}{g} AV \Delta x \right) = - \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial x} (AV^2) \Delta x - \gamma A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x + \gamma AS_o \Delta x - \gamma AS \Delta x \quad (2.17)$$

Dividindo-se todos os termos por  $(\gamma/g) \Delta x$  e simplificando, a equação (2.17) transforma-se em:

$$\frac{\partial}{\partial t} (AV) + \frac{\partial}{\partial x} (AV^2) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_o - S) \quad (2.18)$$

Desenvolvendo-se os dois primeiros termos, do primeiro membro da equação e dividindo-se por A, temos:

$$g \frac{\partial h}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{A} \left( \frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x} + A \frac{\partial V}{\partial x} \right) = g(S_o - S) \quad (2.19)$$

O quarto termo do primeiro membro da equação (4.29), é a equação da continuidade e tem valor zero. Então, a equação (4.29) torna-se a seguinte:

$$g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = g(S_o - S), \quad (2.20)$$

que é a Equação da Quantidade de Movimento.

## 2.5 O Método das Características

Embora existam vários métodos para resolver as equações de escoamento não permanente, a técnica abordada neste trabalho é baseada no método das características, que é uma maneira de converter o problema da solução de duas equações diferenciais parciais hiperbólicas, na solução de quatro equações diferenciais totais, [10]. Estas equações, definidas em termos de profundidade do escoamento, velocidade e celeridade, são desenvolvidas e resolvidas pelo esquema de diferença finita. Este método tem sido, também, amplamente empregado no estudo de transitórios de pressão, para escoamento em conduto forçado.

### 2.5.1 Equações Características

As equações da continuidade (2.7) e da quantidade de movimento (2.20) formam um par de equações diferenciais parciais hiperbólicas quase lineares, que aqui rerepresentamos:

$$L_1 = A \frac{\partial V}{\partial x} + VT \frac{\partial h}{\partial x} + T \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (\text{Equação da Continuidade})$$

$$L_2 = g \frac{\partial h}{\partial x} + g(S - S_0) + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (\text{Eq. Quant. de Movimento})$$

Combinando-se as equações acima tem-se:

$$L = \lambda L_1 + L_2 = 0$$

Substituindo-se  $L_1$  e  $L_2$  na expressão de  $L$ , temos:

$$L = \lambda T \left[ \frac{\partial h}{\partial t} + \left( V + \frac{g}{\lambda T} \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + (\lambda A + V) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + g(S - S_0) = 0 \quad (2.21)$$

O método das características [11], consiste em escolher um par de valores de  $\lambda$  que transformem as equações (2.7) e (2.20) em um par de equações diferenciais totais, possíveis de solução numérica. Vamos então, determinar os valores de  $\lambda$ , raízes da equação (2.21).

O primeiro termo entre colchetes é a derivada total  $dh/dt$ , se  $V + g/\lambda t = dx/dt$ , pois:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.22)$$

Analogamente, o segundo termo entre colchetes é a derivada total  $dV/dt$ , se  $\lambda A + V = dx/dt$ , pois:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.23)$$

As derivadas parciais da equação (2.21) podem ser substituídas pelas derivadas totais. A condição essencial é que:

$$\frac{dx}{dt} = V + \frac{g}{\lambda T} = V + \lambda A \quad (2.24)$$

ou

$$\lambda = \pm \sqrt{\frac{gA}{T}} \frac{1}{A} \quad (2.25)$$

Substituindo-se (2.25) em (2.24), temos:

$$\frac{dx}{dt} = V \pm \left( \sqrt{\frac{gA}{T}} \right) \quad (2.26)$$

O termo, entre parênteses, é a fórmula simplificada da celeridade ou velocidade de propagação da onda  $c$ , em uma seção genérica de um tubo. Então,

$$c = \sqrt{\frac{gA}{T}} \quad (2.27)$$

No escoamento em condutos livres,  $A$  e  $T$  são funções da profundidade. Reescrevendo a equação (2.26), vem:

$$\frac{dx}{dt} = V \pm c. \quad (2.28)$$

onde:

$V$  = velocidade média do escoamento, m/s;

$c$  = velocidade de propagação da onda, m/s;  
 $A$  = área da seção transversal do escoamento, m<sup>2</sup>;  
 $T$  = largura da superfície do escoamento, m;  
 $g$  = aceleração gravitacional, m/s<sup>2</sup>.

Substituindo-se as equações (2.22), (2.23) e (2.24) em (2.21), obtemos dois pares de equações, que são identificadas como equações características positivas  $C^+$  e equações características negativas  $C^-$ .

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dt} + \frac{g}{c} \frac{dh}{dt} + g(S - S_0) = 0 \end{aligned} \right\} C^+ \quad (2.29)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} = V + c \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dt} - \frac{g}{c} \frac{dh}{dt} + g(S - S_0) = 0 \end{aligned} \right\} C^- \quad (2.31)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} = V - c \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

Portanto, os dois valores reais de  $\lambda$  foram usados para converter as duas equações diferenciais parciais em duas equações diferenciais totais (2.29) e (2.31), condicionadas pelas equações (2.30) e (2.32).

### 2.5.2 Equações de Diferenças Finitas

Seja um tubo dividido em "n" partes, equidistantes  $\Delta x$ , conforme mostra a figura 2.4. Uma limitação [3], importante, deve ser feita na escolha das dimensões da malha. O intervalo  $\Delta t$  deve ser limitado, para garantir a condição de estabilidade de Courant, que restringe os parâmetros de tempo e espaço da malha. Ele é expresso por:

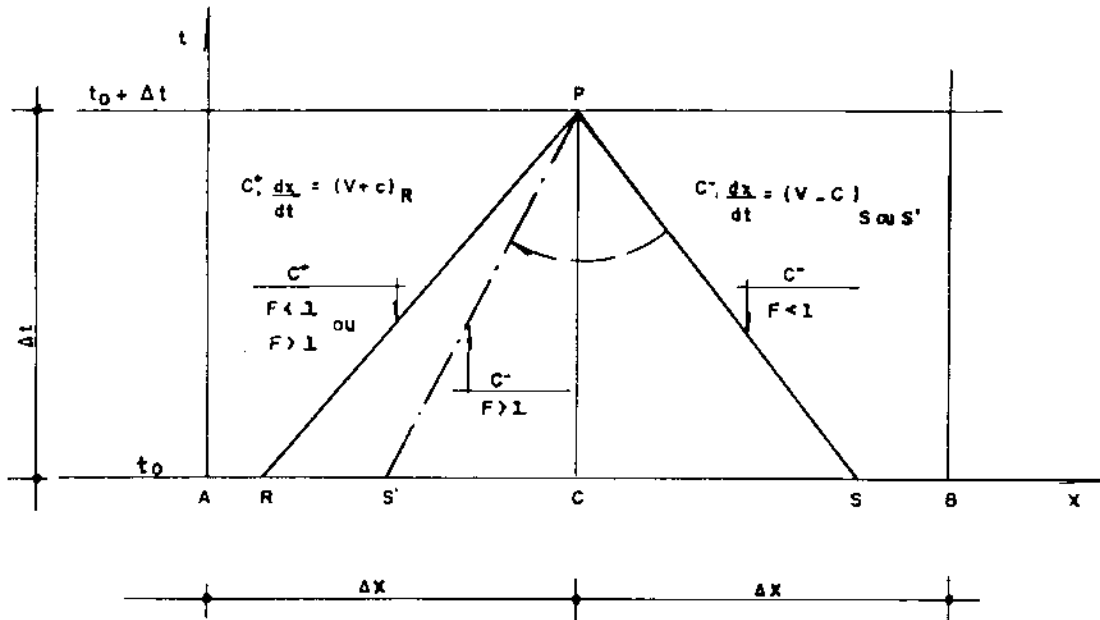
$$\Delta t < \frac{\Delta x}{(V + c)} \quad (2.33)$$

onde:

$\Delta x$  = comprimento entre nós escolhidos, m;  
 $V$  = velocidade média do escoamento, m/s;  
 $c$  = velocidade de propagação da onda, m/s.

A condição de Courant deve ser considerada, pois é necessário que o intervalo de tempo  $\Delta t$  seja suficientemente pequeno para que R e S,

pontos do plano x-t, estejam dentro do intervalo  $\pm \Delta x$  do ponto P, como ilustrado na figura 2.4. Caso contrário, a solução será instável.



$$F = V/(gA/T)^{1/2} \quad - \quad (\text{Número de Froude});$$

$F < 1$  - Escoamento subcrítico, S permanece a jusante da seção BC;

$F > 1$  - Escoamento supercrítico, S é transferido para a montante da seção AC como S'.

**Figura 2.4** Características  $C^+$  e  $C^-$  em uma malha do plano x-t, utilizadas em intervalos de tempo especificados pelo método das características. SWAFFIELD [6].

Uma aproximação de diferença finita de primeira ordem às equações (2.29) a (2.32) fornece as seguintes expressões, que são as equações de diferenças finitas.

$$V_P - V_R + \frac{g}{c_R} (h_P - h_R) + g(S_R - S_0) \Delta t = 0 \quad (2.34)$$

$$x_P - x_R = (V_R + c_R) \Delta t \quad (2.35)$$

$$V_P - V_S - \frac{g}{c_S} (h_P - h_S) + g(S_S - S_0) \Delta t = 0 \quad (2.36)$$

$$x_P - x_S = (V_S - c_S) \Delta t \quad (2.37)$$



Estas expressões possibilitam a resolução das equações (2.29) e (2.32), determinando a velocidade e profundidade do escoamento em qualquer posição da malha e em qualquer tempo.

#### 2.5.2.1 Condições Iniciais

As condições iniciais, ao longo de todo comprimento do tubo, no tempo  $t = 0$ , devem ser conhecidas, a fim de que a solução seja procedida. Isto implica a presença de um pequeno escoamento inicial. É portanto, necessário calcular a velocidade e a profundidade no regime permanente para todo o comprimento do tubo.

#### 2.5.2.2 Condições de Contorno

Para que o cálculo prossiga com incrementos de  $\Delta t$ , assegurando que as características  $C^+$  e  $C^-$ , da figura 2.4, caiam dentro de seções do tubo, é necessário que as equações definindo a relação  $Vxh$ , na entrada e saída do tubo sejam conhecidas, bem como, qualquer condição de contorno intermediária, definindo por exemplo, conexões do tubo ou movimento de sólidos.

A solução das equações 2.34 e 2.36, com as condições de contorno, adequadamente, escolhidas para representar as várias condições de entrada ou saída, permite a propagação de múltiplas ondas através de um sistema a ser simulado.

### 3 - APLICACAO DE PROGRAMA PARA ANALISE DO ESCOAMENTO NAO PERMANENTE - ESTUDO DE CASOS

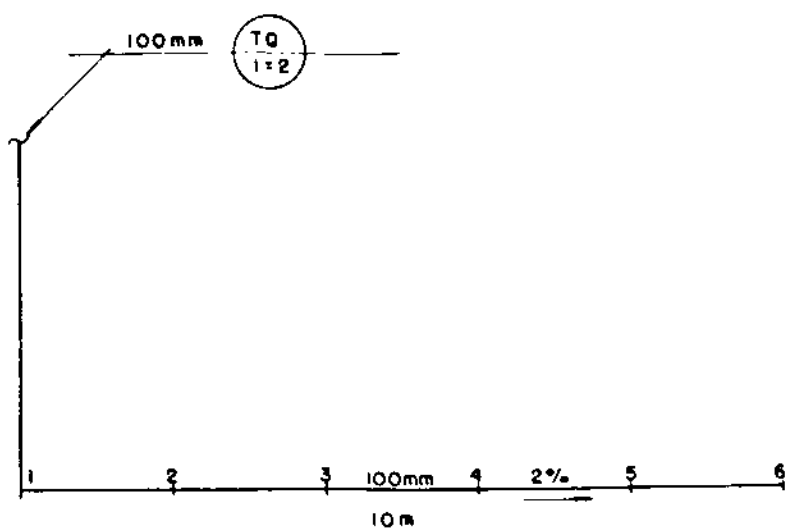
Para agilizar o processo de dimensionamento de tais componentes, Swaffield desenvolveu um programa de computador [4], que simula todo o escoamento de esgotos sanitários, no interior de um edifício. Este programa foi elaborado com base no modelo matemático, apresentado no item 2. Seu objetivo, é possibilitar, iterativamente, a análise do escoamento não permanente, verificado nos ramais e coletores dos Sistemas Prediais de Coleta de Esgotos Sanitários.

Nas configurações simuladas, procuramos investigar pontos críticos dos ramais de descarga e de esgoto e dos subcoletores e coletores, uma vez que o programa utilizado [4], permite a escolha de 6 seções a serem analisadas e fornece como resultados, as vazões e as profundidades do escoamento, para estas seções, durante o tempo de simulação escolhido.

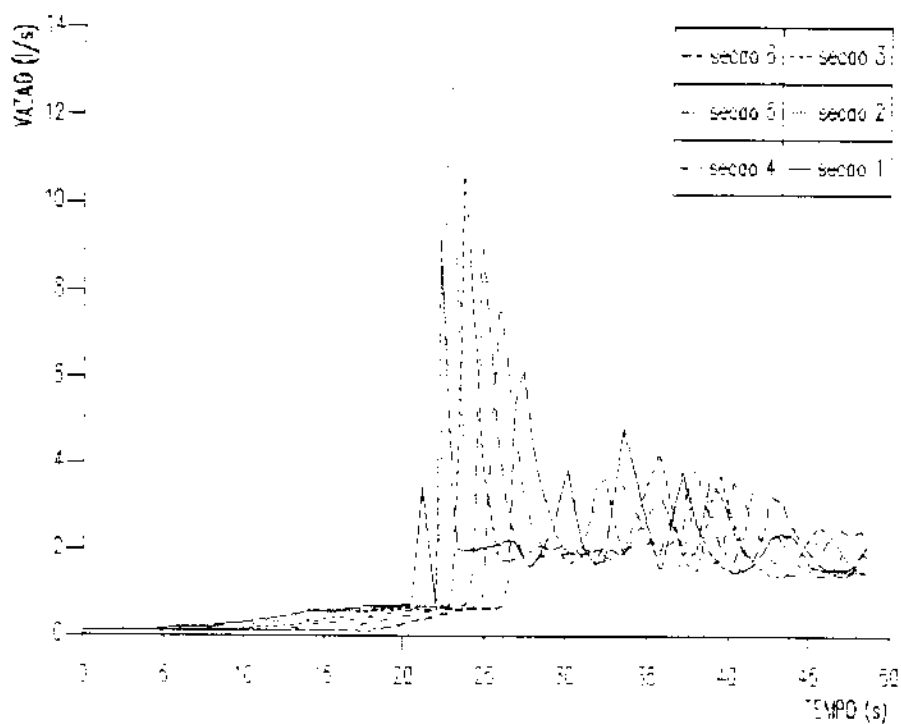
Apresentaremos os resultados e respectiva análise, para um subcoletor de um edifício de 12 andares com 24 banheiros, e portanto, 24 VS. 24 Ch. 24 Lv e 24 Bd. sendo que foi determinado.

probabilisticamente, segundo Graça [2], o número de aparelhos em uso simultâneo, ou seja: 2 VS, 11 Ch, 2 Lv, e 2 Bd.

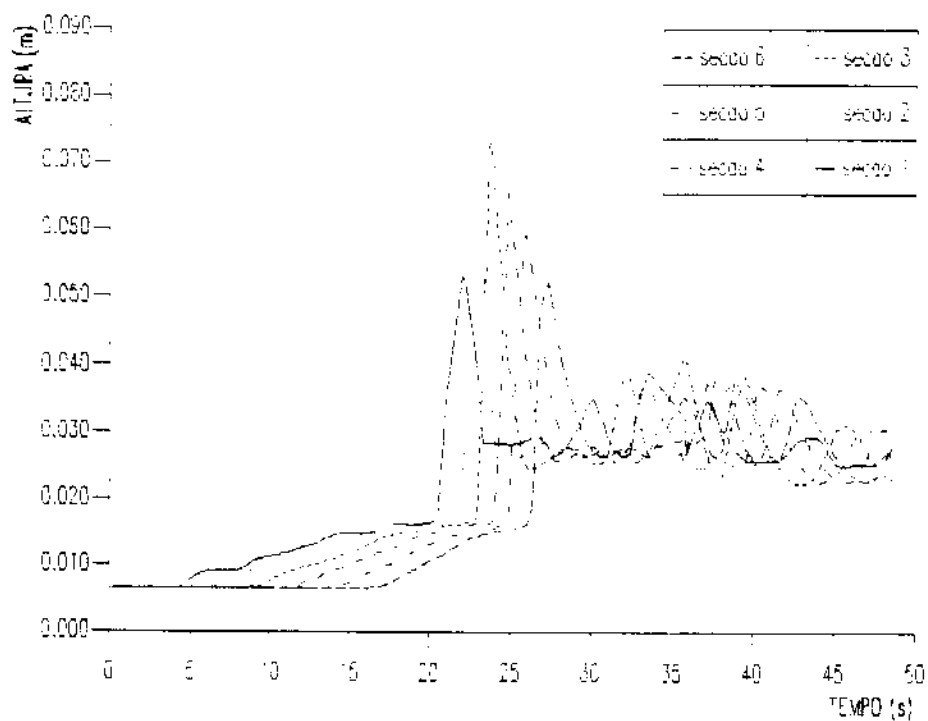
O subcoletor é de 10m com as 6 seções posicionadas em relação ao tubo de queda a: 0m, 2m, 4m, 6m, 8m e 10m, conforme ilustra a figura 3.1. Os ramais foram simulados com diâmetro de 100mm e 75mm, conforme apresentam os resultados, ilustrados nas figuras 3.2 a 3.5.



**Figura 3.1** Esquema do subcoletor de um edifício de 12 andares que recebe os efluentes de 24 banheiros.



**Figura 3.2** Vazão de descarga x Tempo, para as seções do subcoletor com ramais de 100mm e 50mm e declividade de 2%.



**Figura 3.3** Profundidade do escoamento x Tempo, para as seções do subcoletor com ramais de 100mm e 50mm e declividade de 2%.

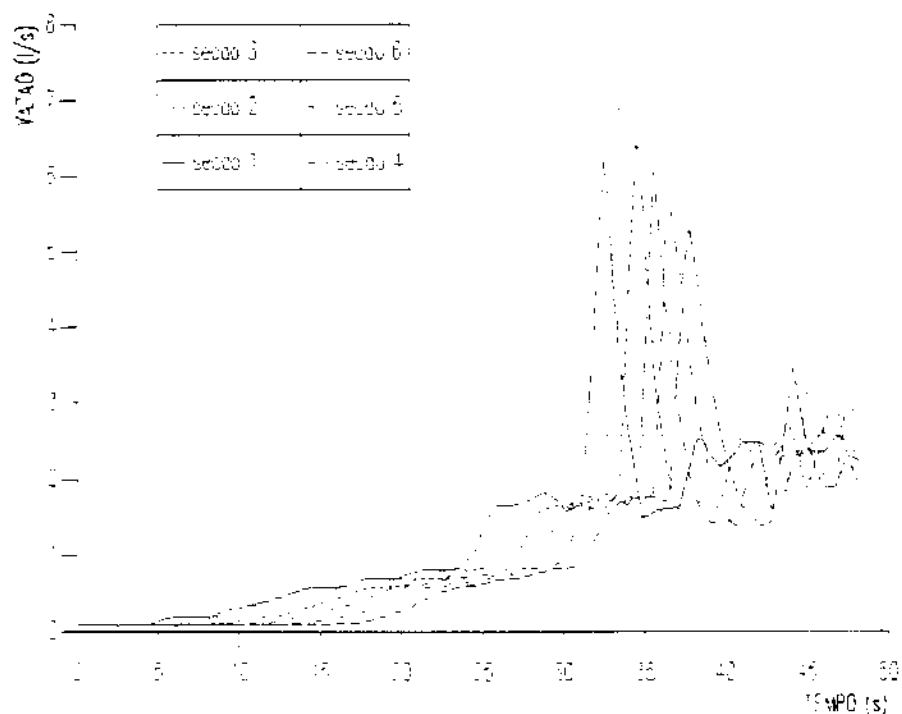


Figura 3.4 Vazão de descarga x Tempo, para as seções do subcoletor com ramais de 75mm e 50mm e declividade de 2%.

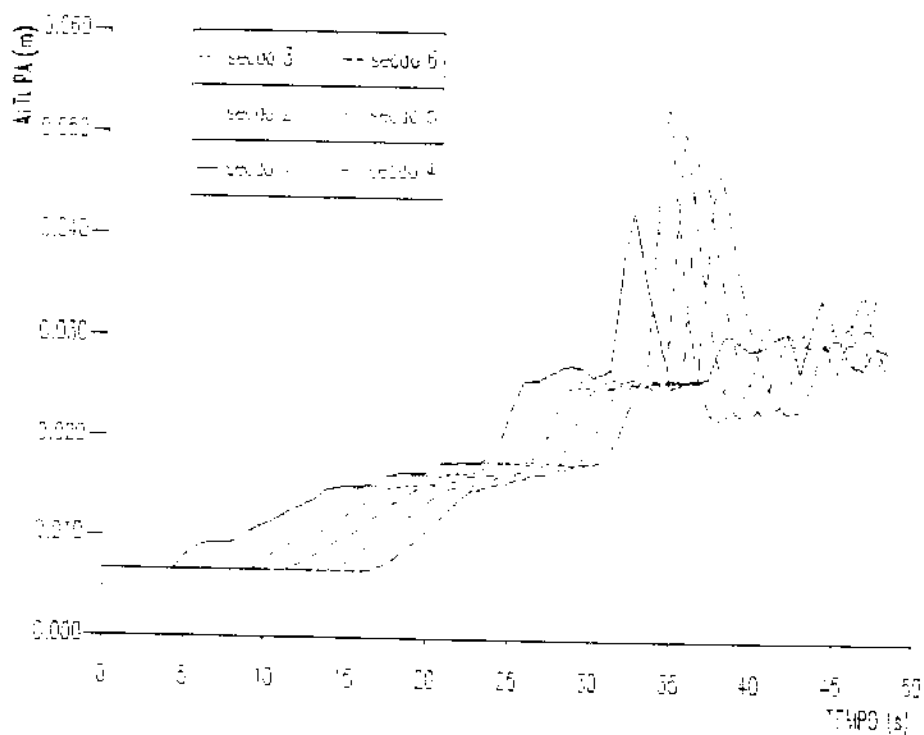


Figura 3.5 Profundidade do escoamento x Tempo, para as seções do subcoletor com ramais de 75mm e 50mm e declividade de 2%.

### 3.1 Análise dos Resultados

Consideramos os resultados obtidos, utilizando-se ramais de 75mm e 50mm, bastante satisfatórios, uma vez que o retardo do escoamento verificado não afeta o desempenho do sistema, tendo-se em vista o curto intervalo de tempo. Outro fato, é que a máxima altura da lâmina d'água obtida, neste caso, é bem mais favorável do que a verificada quando se utiliza ramais de 100mm e 50mm de diâmetro.

## 4 - CONCLUSÕES

- O método de dimensionamento para ramais e coletores, recomendado pela NBR-8160 [2], seria mais vantajoso, se além da utilização do estudo probabilístico na determinação do número de aparelhos em uso simultâneo, o que resulta numa vazão de projeto menor, considerasse o escoamento em regime não permanente;
- A consideração do escoamento em regime não permanente, no dimensionamento de ramais e coletores, só produz resultados compensadores, quando se utiliza, paralelamente, um método probabilístico adequado, para o estudo da simultaneidade;
- Os ramais e coletores quando superdimensionados apresentam baixo nível de desempenho, pois a altura da lâmina d'água é reduzida prejudicando o transporte de sólidos, e conseqüentemente, a autolimpeza destes componentes;
- Os resultados das simulações realizadas para os casos estudados mostram-se bastante favoráveis para a redução do diâmetro de ramais de descarga e de esgoto, passando-os de 100mm para 75mm;
- O aumento da declividade de ramais e coletores produz condições favoráveis de escoamento, através da atenuação de ondas, até um certo limite, para cada tipo de configuração adotada. Acima deste limite, poderá ocorrer um efeito oposto, denominado empolamento.

## 5 - REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) HUNTER, Roy B. **Methods of Estimating Loads Plumbing Systems.** National Bureau of Standards, Building Materials and Structures Report, BMS65, 1940.
- 2) GRACA, Moacyr E. Alves da Graça. **Formulação de Modelo para Avaliação das Condições Determinantes da Necessidade de Ventilação Secundária em Sistemas Prediais de Coleta de Esgotos Sanitários.** Tese apresentada à EPUSP para obtenção do título de Doutor em Engenharia. São Paulo, 1985.
- 3) WYLIE, E. Benjamin & STREETER, Victor L. **Fluid Transients.** United States of America. McGraw-Hill, 1978.
- 4) SWAFFIELD, J. A. & BRIDGE, Sarah. **Multistorey Buiding Drainage Network Analysis Program.** Heriot-Watt University, Scotland.
- 5) GONCALVES, Orestes Marracini. **Formulação de Modelo para o Estabelecimento de Vazões de Projeto em Sistemas Prediais de Distribuição de Agua Fria.** Tese apresentada à EPUSP para obtenção do título de Doutor em Engenharia. São Paulo, 1986.
- 6) SWAFFIELD, J. A. & GALOWIN, L. S. **Multistorey Building Drainage Network Design - An Application of Computer Based Unsteady Partially Filled Pipeflow Analysis.** *Building and Enviroment*, 24(1):99-110, 1989.
- 7) SWAFFIELD, J. A. & GALOWIN, Lawrence S. **Development of a Computer Based Analysis of Multistorey Building Drainage Network Flow.** In: *Proceedings of the CIB Commission W62, Symposium.* Copenhagen, May, 1986. 18p.
- 8) SWAFFIELD, J. A. & GALOWIN, Lawrence S. **Hydraulics of Horizontal Pitched Drains Based on Vertical Stack to Drain Entry Condition.** In: *Proceedings of the CIB Commission W62, Symposium.* Tokio, Apr. 1985. 29p.
- 9) CHAUDRY, M. Hanif. **Applied Hydraulic Transients.** Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1979. 503p.
- 10) RAJU, K. G. Ranga. **Flow Through Open Channels.** New Delhi. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. 1981.
- 11) DOUGLAS, J. F. et alii. **Fluid Mechanics.** 1 ed. London. Pitman Publishing Limited, 1979. 721p.