

# Influência da mistura rápida hidráulica nas operações de floculação e sedimentação

Luiz Di Bernardo (1)  
Jorge Adílio Penna (2)

## Resumo

A primeira etapa no processo de remoção de partículas coloidais de uma água de abastecimento consiste na operação de coagulação. Da sua eficiência dependerão as operações seguintes, como floculação, sedimentação e filtração. Tem sido observado que esta eficiência será tanto maior quanto melhores forem as condições de mistura do produto químico coagulante com a água bruta. As pesquisas têm mostrado que, de uma maneira geral, os tempos requeridos para essa mistura devem ser bem reduzidos e a forma de adição do coagulante a mais uniforme possível. Nas estações de tratamento de água, essa operação, conhecida como mistura rápida, tem sido realizada em unidades mecanizadas ou hidráulicas.

O presente trabalho procura investigar os diversos parâmetros relacionados com a operação de mistura rápida realizada em um ressalto hidráulico formado em canal de seção retangular e fundo horizontal. Os parâmetros estudados são o número de Froude a montante do ressalto, a forma e a posição de lançamento do coagulante e a vazão da água.

A primeira etapa consiste na avaliação das condições de mistura de um corante adicionado à água, através de uma análise fotográfica. Na segunda etapa do trabalho, procura-se estudar a eficiência do ressalto hidráulico com uma unidade de mistura para a coagulação de uma água preparada com caulinita, utilizando-se de sulfato de alumínio como coagulante.

Os resultados mostraram que o ressalto hidráulico pode ser uma unidade eficiente de mistura rápida para a coagulação de águas de abastecimento, como comprovaram os valores da turbidez remanescente obtidos após ensaio de floculação ("Jar-Test"). Conseguiu-se, em alguns casos, reduzir a turbidez a valores inferiores a 0,9% da turbidez inicial. Os resultados mostraram ainda a influência da

forma e posição de lançamento do coagulante, o número de Froude e da vazão.

Os autores desejam expressar seu profundo agradecimento à Fapesp-Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo auxílio concedido para a execução do trabalho experimental (Processo n.º 82/2127-8).

## 1 Introdução

Dentro das diversas operações unitárias realizadas em um sistema de tratamento de água, a coagulação exerce um papel de grande importância, pois da sua eficiência dependem as operações subsequentes como floculação, sedimentação e filtração. Em geral, a coagulação tem sido considerada como o resultado da reação do coagulante com a água a ser tratada, envolvendo, independentemente, duas ações distintas, porém complementares: (I) dispersão uniforme do coagulante em toda a massa de água; (II) reação do coagulante com a água bruta. É sabido que essa reação se processa, geralmente, em um tempo muito curto (1). Portanto, é preciso assegurar uma dispersão rápida e uniforme do coagulante na água a ser tratada, para que todas as partículas em suspensão sejam desestabilizadas. Esta é a finalidade da operação unitária conhecida como mistura rápida.

Nas estações de tratamento de água, a operação de mistura rápida tem sido realizada em unidade hidráulica ou mecanizada. Dentre as unidades hidráulicas, destacam-se:

— queda livre, resultante de um vertedor retangular ou triangular;

— ressalto hidráulico, notadamente aquele que se forma em uma calha Parshall;

— grade provida de orifícios, disposta em dutos ou canais;

— injetores instalados em condutos forçados.

As unidades mecanizadas são geralmente constituídas de tanques com retores providos de pás, hélices ou turbinas.

Durante muitos anos, as unidades de mistura rápida vêm sendo proje-

tadas e operadas com base na experiência profissional, na intuição e em alguns conhecimentos empíricos dos projetistas (21). Isto se explica por que, apesar de se conhecerem inúmeros estudos a respeito dos mecanismos da coagulação, pouco se sabe a respeito da operação de mistura, como o tipo de misturados mais adequado, tempo e intensidade de mistura e ainda a posição e a forma de adição dos produtos químicos, principalmente com relação às unidades hidráulicas. Entretanto, é comum o emprego dessas unidades, e apesar do pouco conhecimento de que se dispõe para o seu projeto e operação os resultados têm mostrado, às vezes, uma melhor eficiência das unidades hidráulicas sobre as mecanizadas, conforme mostrado há pouco tempo (21, 23).

Estas comprovações, aliadas aos elevados custos de implantação, operação e manutenção das unidades mecanizadas, justificam, principalmente em nosso meio, as pesquisas relativas a unidades hidráulicas de mistura rápida. Assim, os objetivos do presente trabalho foram de investigar uma instalação-piloto, os efeitos decorrentes da forma com que o coagulante era adicionado na água e a influência da mistura nas operações de floculação e sedimentação quando se varia o número de Froude de montante de um ressalto hidráulico, para diferentes vazões. Como decorrência, não são feitas, nesse trabalho, considerações sobre os mecanismos de desestabilização de partículas coloidais, pois esse assunto encontra-se bem discutido nas referências (1) (10), (11), (14) e (15).

## 2 Considerações sobre turbulência e ressalto hidráulico

### 2.1 Aspectos gerais da turbulência

A turbulência é um fenômeno associado a um fluido escoando em altos valores do número de Reynolds. Hinze (8) definiu o escoamento turbulento como "uma condição irregular de escoamento no qual várias gran-

(1) Professor livre-docente da Escola de Engenharia de São Carlos — USP.

(2) Docente da Universidade Federal de Ouro Preto.

dezas (velocidade e pressão) apresentam uma variação aleatória com o tempo e coordenadas espaciais, de modo que, estatisticamente, distintos valores médios podem ser observados". Dessa definição, pode-se notar que o fenômeno deve ser tratado sob um ponto de vista estatístico.

A medição da velocidade ou da pressão em um ponto fixo de um escoamento turbulento mostra que tais grandezas estão sujeitas a flutuações irregulares no tempo e no espaço em torno de um valor médio. Desse modo, é possível definir qualitativamente o movimento turbulento como sendo o resultado da superposição de dois movimentos: (I) um movimento médio; (II) um movimento pulsatório, como ilustra a figura 1 para o caso da velocidade [16].

O vetor velocidade  $V$  do escoamento, em um sistema triortogonal  $X, Y, Z$ , será definido como:

$$V = u_i + v_j + w_k \quad (1)$$

onde:

$u$  = velocidade instantânea na direção  $X$  do escoamento ( $LT^{-1}$ )

$v$  = velocidade instantânea na direção  $Y$  do escoamento ( $LT^{-1}$ )

$w$  = velocidade instantânea na direção  $Z$  do escoamento ( $LT^{-1}$ )

$i, j, k$ , = versores do sistema nas direções  $X, Y$  e  $Z$ , respectivamente

Na direção  $x$  do escoamento:

$$u = \bar{u} + u' \quad (2)$$

onde:

$\bar{u}$  = velocidade média em um certo intervalo de tempo ( $LT^{-1}$ )

$u'$  = flutuação da velocidade de um determinado instante em torno do valor médio  $\bar{u}$  ( $LT^{-1}$ )

A velocidade média  $\bar{u}$  é definida pela relação

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (3)$$

onde:

$T$  é um intervalo de tempo suficientemente grande de modo que  $\bar{u}$  tenha o mesmo valor para qualquer tempo superior, em escoamento permanente.

Da própria definição segue-se que:

$$\bar{u}' = \frac{1}{T} \int_0^T u'(t) dt = 0 \quad (4)$$

$$\bar{u'^2} = \frac{1}{T} \int_0^T (u - \bar{u})^2 dt \quad (5)$$

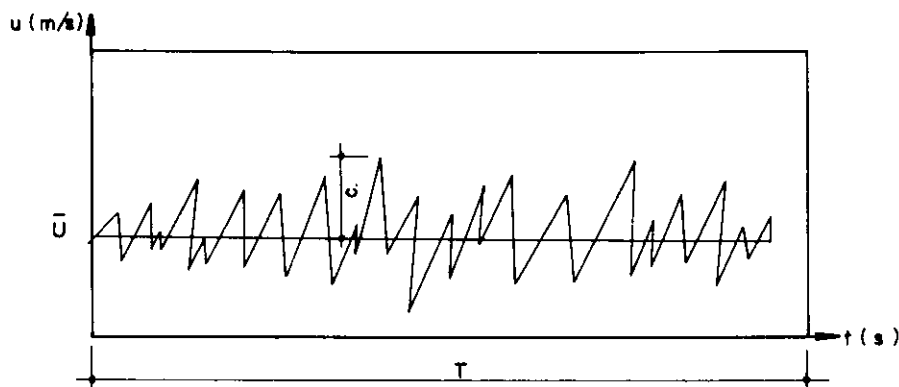


Figura 1 — Representação gráfica da variação da velocidade instantânea  $u$ , num intervalo de tempo  $T$

Um importante parâmetro de turbulência, conhecido como "intensidade de turbulência", é igual à raiz quadrada da média do quadrado das flutuações de velocidade, cuja expressão é:

$$u'^2 = \overline{u'^2}$$

Analogamente, pode-se escrever as mesmas relações dadas pelas equações (2 a 6) para  $v$  e  $w$ .

Como foi dito, a turbulência é um fenômeno totalmente aleatório. No entanto, para efeito de simplificação, ela pode ser estudada segundo algumas particularidades. Assim, tem-se a turbulência, que é aquela que não muda a sua estrutura com a translação de um conjunto de coordenadas axiais ao longo de escoamento; a turbulência isotrópica, que inclui a homogeneidade, é aquela que não muda suas características com a rotação ou a reflexão de um conjunto de coordenadas axiais, ou seja,

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} \quad (7)$$

ou ainda

$$u'v' = u'w' = v'w' = 0 \quad (8)$$

Embora não ocorra dentro dos escoamentos reais esse tipo de turbulência, a isotropia é uma idealização que pode facilitar muito o tratamento matemático e a compreensão do fenômeno da turbulência. Outros tipos particulares de turbulência incluem a turbulência na camada limite, que pode ser descrita como um escoamento turbulento influenciado por um contorno sólido (junto a uma superfície) e a turbulência livre, que é aquela que não sofre influência de um contorno sólido, como, por exemplo, o caso de jatos de descarga de um bocal.

## 2.2 Dissipação de energia no escoamento turbulento

O conceito de turbulência de um sistema particular está associado à

dissipação de energia nesse sistema. Estatisticamente, pode-se pensar no conceito de turbulência como um sistema constituído de vórtices e caracterizado por suas velocidades e pelas distâncias em que essas velocidades mudam significativamente. Estas distâncias são conhecidas como "escala do movimento" ou "escala de turbulência" ( $\lambda$ ). O movimento vorticoso mais rápido tem também a maior escala de movimento. É o movimento que ocorre no início de uma grande turbulência, constituído por grandes vórtices e escoamentos com altos números de Reynolds. Tais movimentos contêm a maior parte de energia cinética turbulenta extraída do escoamento médio.

Juntamente com os vórtices de grande escala, o escoamento turbulento possui também vórtices de pequena escala, com velocidades menores  $v$ , que, embora ocorrendo em grande quantidade, eles representam apenas uma pequena parcela de energia cinética do escoamento médio. Entretanto, os vórtices pequenos têm um papel importante no escoamento turbulento. Seja, por exemplo, o número de Reynolds ( $Re$ ) que corresponde a um vórtice de escala  $\lambda$ :

$$Re = \frac{v \lambda}{\nu} \quad (9)$$

onde:

$\nu$  = viscosidade cinética ( $L^2.T^{-1}$ )

$v$  = velocidade de escoamento ( $LT^{-1}$ )

$\lambda$  = escala de movimento ( $L$ )

Quanto menor o valor de  $\lambda$  e da correspondente velocidade  $v$ , menor será o número de Reynolds. Para vórtices de grande escala, o número de Reynolds é muito grande. Conseqüentemente, na região de grandes vórtices, as forças viscosas terão pequeno efeito sobre o escoamento, que se

moverá sem dissipação de energia. Entretanto, a superposição de grandes vórtices cria os pequenos vórtices, para os quais o número de Reynolds decresce rapidamente com o decréscimo de  $\lambda$ , até um valor  $\lambda_0$  (valor mínimo da escala de turbulência). A partir desse valor, as forças viscosas passam a ter efeito apreciável sobre o movimento de fluido, iniciando-se a dissipação de energias que é convertida em calor. Deste modo, existe uma contínua transferência de energia dos vórtices maiores para os vórtices progressivamente menores, até aqueles com escala de ordem de  $\lambda_0$  em que a energia é convertida em calor. Pode-se dizer que os movimentos de pequena escala como uma "ponte" por onde a energia cinética turbulenta dos movimentos de grande escala se converte em energia térmica (12).

Uma análise das flutuações da velocidade instantânea em um ponto de um escoamento turbulento mostra que estas flutuações podem ser associadas a faixas de frequências. A energia cinética turbulenta, que está intimamente relacionada com as flutuações de velocidade, é distribuída sobre faixas de frequência, segundo uma distribuição chamada "espectro de energia". Tem sido encontrado que a energia introduzida em um sistema de frequências mais baixas é dissipada pela viscosidade em frequências mais altas. Isto resulta numa transferência de energia das frequências mais baixas para frequências mais altas (21).

A forma do "espectro de energia" e as leis governantes da transferência de energia são uma maneira de se estudar e conhecer melhor o fenômeno da turbulência. Deve-se ressaltar que os escoamentos turbulentos são sempre dissipados e, portanto, para manter a turbulência, há necessidade de um contínuo suprimento de energia para compensar as perdas pela viscosidade.

## 2.3 Ressalto hidráulico em canais retangulares de fundo horizontal

### 2.3.1 Considerações iniciais

O ressalto hidráulico é um fenômeno localizado, que se forma na passagem brusca de um escoamento em regime supercrítico (torrencial) a um escoamento em regime subcrítico (fluvial). Devido ao alto grau de turbulência que acompanha o fenômeno e, por conseguinte, à grande dissipação de energias que ocorre, o ressalto hidráulico vem despertando o interesse de

pesquisadores há mais de um século. Diversas são as suas aplicações práticas, podendo-se destacar o seu uso como um dissipador natural de energia dos escoamentos de altas velocidades, como os que ocorrem em vertedores de barragens ou em quaisquer outras estruturas hidráulicas. Além desse uso mais comum, o ressalto hidráulico pode ser utilizado para aumentar a carga de um canal, aerar águas de abastecimento e misturar produtos químicos para o tratamento de água.

O primeiro pesquisador a observá-lo e estudá-lo experimentalmente foi o italiano Bidone, em 1818. Entretanto, foi Bélanger, em 1928, o primeiro a formular uma teoria matemática para o ressalto, teoria essa melhorada mais tarde por Bresse. A partir daí, inúmeros estudos experimentais foram realizados com o objetivo de se verificar a validade da teoria proposta por Bélanger e Bresse. Estes estudos preocupavam-se, principalmente, com a razão entre as profundidades conjugadas de ressalto, ou seja, a razão entre as alturas de montante e de jusante de ressalto, e com o desenvolvimento de relações empíricas para a determinação de seu comprimento.

A maioria dos trabalhos sobre ressalto hidráulico concentrou-se na investigação dos parâmetros ligados à sua eficiência como dissipados de energia. Os estudos do ressalto hidráulico como um misturador de produtos químicos, entretanto, são raros em nosso meio. Talvez porque, para se estudar a mistura no ressalto, há necessidade de se conhecer primeiramente os problemas relacionados com a turbulência que ocorre no mesmo, conhecimentos estes ainda recentes. São raros os trabalhos como os de Azevedo Netto (2), Francílio Paes Leme (17) e de Rivera e colaboradores (18), que tratam especificamente de ressalto hidráulico que se forma numa

calha Parshall como misturador de produtos químicos no tratamento de águas de abastecimento.

### 2.3.2 Equação básica do ressalto

Partindo da equação da quantidade de movimento, aplicada ao volume de controle mostrado na figura 2, para um canal de fundo horizontal e seção retangular, Bélanger e Bresse chegaram à seguinte equação que relaciona as profundidades conjugadas do ressalto com o número de Froude a montante do mesmo:

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8 Fr_1^2} - 1) \quad (10)$$

onde:

$Y_1$  = profundidade d'água no canal no início do ressalto (seção 1) (L)

$Y_2$  = profundidade d'água no canal no final do ressalto (seção 2) (L)

$Fr_1$  = n.º de Froude do escoamento no início do ressalto, definido por

$$Fr_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gY_1}} \quad (11)$$

onde:

$U_1$  = velocidade média do escoamento no início do ressalto ( $LT^{-1}$ )

$g$  = aceleração local da gravidade ( $LT^{-2}$ )

A equação (10) foi reduzida para as seguintes hipóteses além daquelas de canal de fundo horizontal e retangular:

a) escoamento permanente e fluido incompressível;

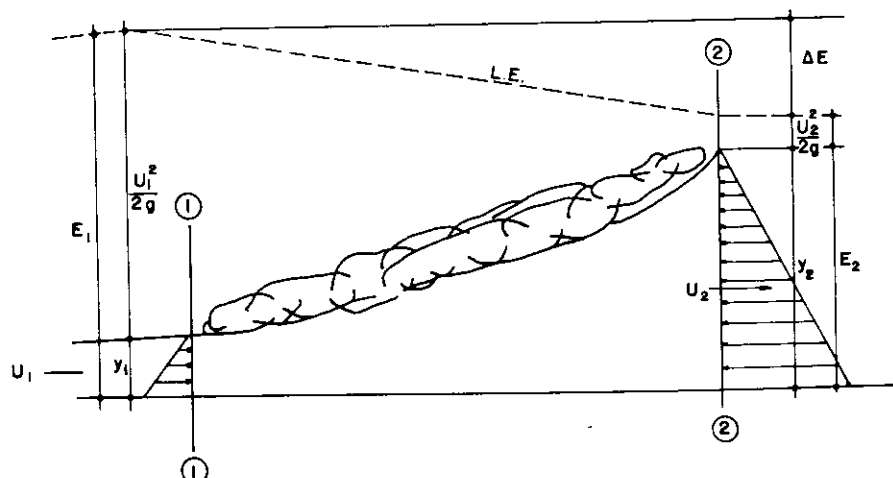


Figura 2 — Representação esquemática clássica do ressalto hidráulico

b) distribuição uniforme de velocidade imediatamente a montante e a jusante das seções 1 e 2;

c) ausência de forças de atrito e de forças viscosas;

d) distribuição hidrostática de pressão nas seções 1 e 2.

A figura 3 mostra a variação de  $Y_2/Y_1$  com  $Fr_1$  obtida por Bradley e Peterka (4).

### 2.3.3 Comprimento do ressalto hidráulico

O comprimento do ressalto hidráulico ( $L_j$ ) é a distância horizontal entre o início da seção turbulenta (seção 1 na figura 2) e a seção onde o escoamento torna-se uniforme (seção 2).

Um outro comprimento pode também ser distinguido na região de transição. É aquele compreendido entre as seções 1 e a seção onde termina a região de grande turbulência, conhecido como comprimento do "roller" ( $L_r$ ). Segundo o "U.S. Bureau of Reclamation", para ressaltos perfeitos ( $5 \leq Fr_1 \leq 15$ ) a relação  $L_j/Y_2$  tende a permanecer da ordem de 6,0, conforme mostra a figura 4.

### 2.3.4 Eficiência do ressalto hidráulico

Tendo em vista a figura 2 e as hipóteses estabelecidas anteriormente, pode-se escrever:

$$E_1 = Y_1 + \frac{U_1^2}{2g} \quad (12)$$

$$E_2 = Y_2 + \frac{U_2^2}{2g} \quad (13)$$

onde:

$E_1$  e  $E_2$  são, respectivamente, as energias específicas nas seções 1 e 2.

A perda de energia ou carga no ressalto ( $\Delta E$ ) é dada por:

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (14)$$

ou

$$\Delta E = (Y_1 - Y_2) + \left( \frac{U_1^2}{2g} - \frac{U_2^2}{2g} \right) \quad (15)$$

A equação de continuidade para canais retangulares fornece:

$$q = U_1 \cdot Y_1 = U_2 \cdot Y_2 \quad (16)$$

onde:

$q$  = vazão por unidade de largura do canal ( $L^2T^{-1}$ )

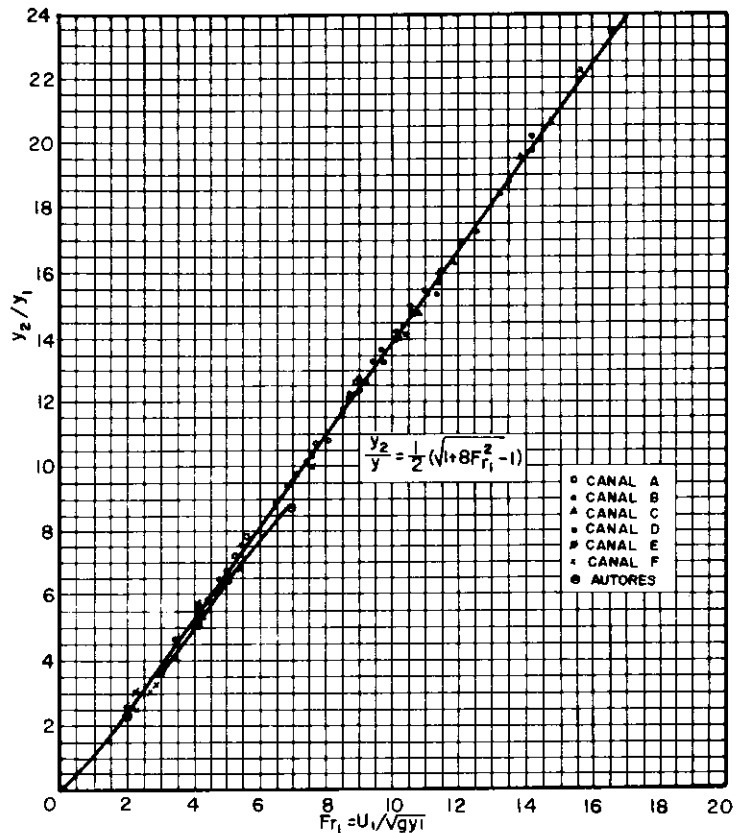


Figura 3 — Variação de  $Y_2/Y_1$  com  $Fr_1$  (04)

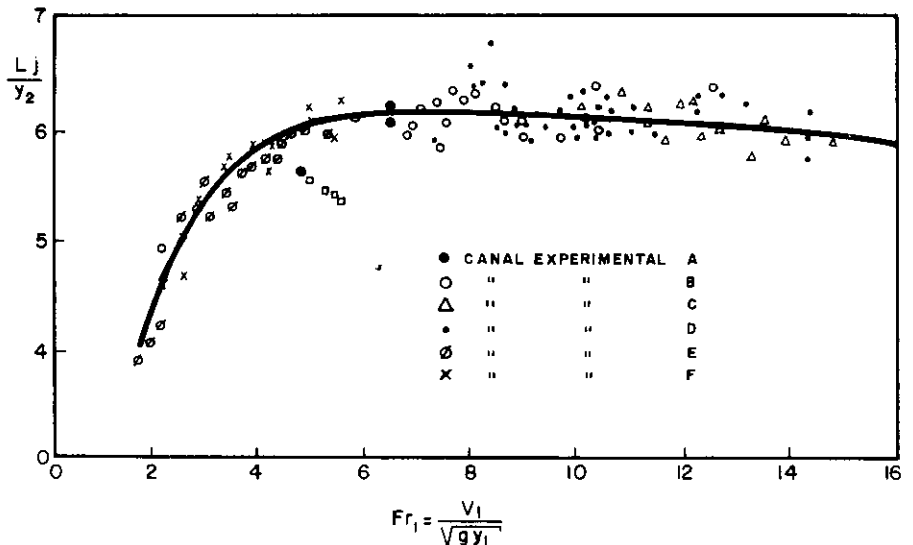


Figura 4 — Variação do comprimento do ressalto ( $L_j$ ) com o número de Froude ( $Fr_1$ ) (04)

Combinando as equações (15) e (16), obtém-se:

$$\Delta E = (Y_1 - Y_2) + \frac{q^2}{2g} \left( \frac{Y_2^2 - Y_1^2}{Y_1^2 Y_2^2} \right) \quad (17)$$

A equação da quantidade de movimento para as seções 1 e 2 pode ser escrita como:

$$Y_1 \cdot Y_2 (Y_2 + Y_1) = \frac{2q^2}{g} \quad (18)$$

admitindo-se as mesmas hipóteses consideradas anteriormente para a equação (10), ou seja, a equação básica do ressalto.

Partindo-se da equação (18), pode-se escrever a equação da quantidade de movimento para as seções 1 e 2 como:

$$\frac{Y_2^2 = Y_1^2}{2} = \frac{q^2}{g} \frac{Y_2^2 - Y_1^2}{Y_1 \cdot Y_2} \quad (19)$$

Combinando-se as equações (17) e (19) e eliminando-se  $q^2/g$  obtém-se:

$$\Delta E = \frac{(Y_2 - Y_1)^3}{4 Y_1 \cdot Y_2} \quad (20)$$

A perda de energia pode também ser obtida em função das profundidades conjugadas ( $Y_1$  e  $Y_2$ ) e o número de Froude ( $Fr_1$ ) conforme proposto por Stevens (22).

$$\Delta E = \frac{Y_1 (\sqrt{1 + 8 Fr_1^2} - 3)^3}{16 (\sqrt{1 + 8 Fr_1^2} - 1)} \quad (21)$$

Na literatura clássica, a eficiência do ressalto ( $\eta$ ) é definida pela relação entre a energia dissipada no ressalto ( $\Delta E$ ) e a energia na seção inicial do ressalto ( $E_1$ ), ou seja:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \quad (22)$$

#### 2.4 A mistura no ressalto hidráulico

O estudo da turbulência no ressalto hidráulico pode ser realizado quantitativamente a partir do desenvolvimento de técnicas de medição das flutuações de velocidade, como o anemômetro de fio quente, conforme estudo efetuado por Rouse e colaboradores (19), cujas conclusões principais são:

a) Com relação à distribuição de velocidade, destacam-se três lugares geométricos:

— um de velocidade zero passando pelo meio de "roller";

— um de gradiente de velocidade máximo próximo à superfície do "roller";

— um de velocidade máxima aproximadamente no meio entre o "roller" e o fundo;

b) Com relação à intensidade de turbulência pode-se destacar que:

— a intensidade de turbulência cresce com o número de Froude de montante ( $Fr_1$ );

— a intensidade de turbulência é mínima onde o gradiente de velocidade é mínimo e vice-versa;

c) Com relação à transformação da energia no ressalto pode-se destacar que:

— metade da energia de turbulência é "produzida" dentro da primeira metade do comprimento do "roller";

— por causa do efeito convectivo do escoamento médio e o efeito difusivo da própria turbulência, esta energia não é totalmente dissipada no ponto em que é "produzida", mas em uma seção mais a jusante. Em resumo, escoamento médio em turbulência e sua posterior dissipação em calor.

Estas observações podem ser úteis, por exemplo, quanto à localização do

ponto de lançamento do produto químico a ser misturado, pois duas ou mais quantidades (massa de duas ou mais substâncias) formam sistema unido quando as concentrações de cada uma delas são as mesmas em todos os pontos do sistema (mistura completa).

A difusão molecular ou simplesmente difusão é o fenômeno mais importante no processo de mistura. Este fenômeno ocorre devido ao movimento browniano das moléculas. A difusão molecular ocorrerá enquanto houver um gradiente de concentração, podendo, em função da maior ou menor velocidade de difusão, completar a mistura num tempo menor ou maior, respectivamente. A turbulência criada no processo de mistura tem por finalidade acelerar esse processo, permitindo à difusão atuar mais efetivamente, de modo a que a mistura seja completada em um tempo mais curto. A difusão molecular deve funcionar em conjunção com a turbulência para realizar a completa mistura (21).

As equações básicas usadas na mistura são semelhantes àquelas usadas para descrever a turbulência. Um campo escalar isotrópico é muito semelhante a um campo turbulento isotrópico, com exceção que nestes estão envolvidas quantidades vetoriais, enquanto que, no outro, apenas quantidades escalares. O processo de mistura pode ser imaginado como sendo análogo à dissipação de energia turbulenta. Em um ponto de um campo escalar isotrópico, as concentrações instantâneas ( $c$ ) podem ser tomadas como a soma de seu valor médio ( $\bar{c}$ ) mais as flutuações em torno dessa média ( $c'$ ), assim:

$$c = \bar{c} + c' \quad (23)$$

que é similar à expressão para a velocidade instantânea, com exceção da notação vetorial.

De maneira semelhante à da velocidade, a raiz quadrada da média do quadrado das flutuações de concentração pode ser definida como:

$$c'_1 = \sqrt{c'^2} \quad (24)$$

O seguinte parâmetro pode ser definido como a intensidade de congregação ( $I_s$ ).

$$I_s = \frac{c'^2}{\bar{c}^2} \quad (25)$$

onde:

$c'^2$  representa o quadrado da flutuação da concentração média inicial.

O parâmetro  $I_s$ , ou a sua raiz quadrada pode ser usado para indicar a

"eficiência de mistura". Deve-se lembrar que esta "eficiência" está associada com a magnitude das flutuações da concentração em relação à concentração média, ou seja, a mistura será completa quando  $I_s = 0$ , ou, ainda, quando não houver nenhum desvio em relação à concentração média.

O conhecimento dos parâmetros associados com a turbulência e a mistura são de muita importância no projeto de uma unidade de mistura de uma estação de tratamento de água. Além dos parâmetros estudados, deve-se lembrar que outros como as escalas de turbulência e de segregação e o número de Reynolds devem também ser conhecidos, pois estão intimamente ligados aos problemas de mistura, conforme sugerem Hinze (8) e Stenquist e Kaufman (21).

### 3 Investigação experimental

#### 3.1 Instalações utilizadas e etapas do trabalho

Foi utilizada uma canaleta existente no Laboratório de Hidráulica da EESC-USP, de vidro transparente, com as seguintes dimensões: comprimento de 3 m, largura de 0.1 m e altura de 0.3 m (Figura 5). Para a realização do trabalho experimental programado, os seguintes acessórios e aparelhos fizeram parte da instalação:

— comporta de fundo de montante, para controle da lâmina líquida do ressalto;

— comporta de jusante, para variar a posição do ressalto;

— válvula borboleta na canalização de alimentação da canaleta, para ajuste de vazão;

— bomba centrífuga com vazão máxima de 10 l/s;

— reservatório de 650 l, acoplado à canaleta, para recirculação de água na canaleta;

— reservatório de 5 l para armazenamento de corante;

— meias-canais de plástico com 1, 4, 8 e 12 orifícios para distribuição da solução de corante ou coagulante;

— aparelho de "Jar-test" modificado, montado próximo à canaleta;

— tubo de Prandtl para medida de velocidade de escoamento na canaleta e piezômetros para medidas da pressão estática e dinâmica do dispositivo;

— turbidímetro nefelométrico (Hach-Chemical C. USA, modelo 2.100 A);

— potenciômetro para medida de pH (Metrohm Herisan — pH meter E 520).

O trabalho experimental foi dividido em duas etapas:

1.) Estudo hidráulico dos efeitos da adição de corante num ressalto hidráulico formado em um canal retangular de fundo horizontal e influência

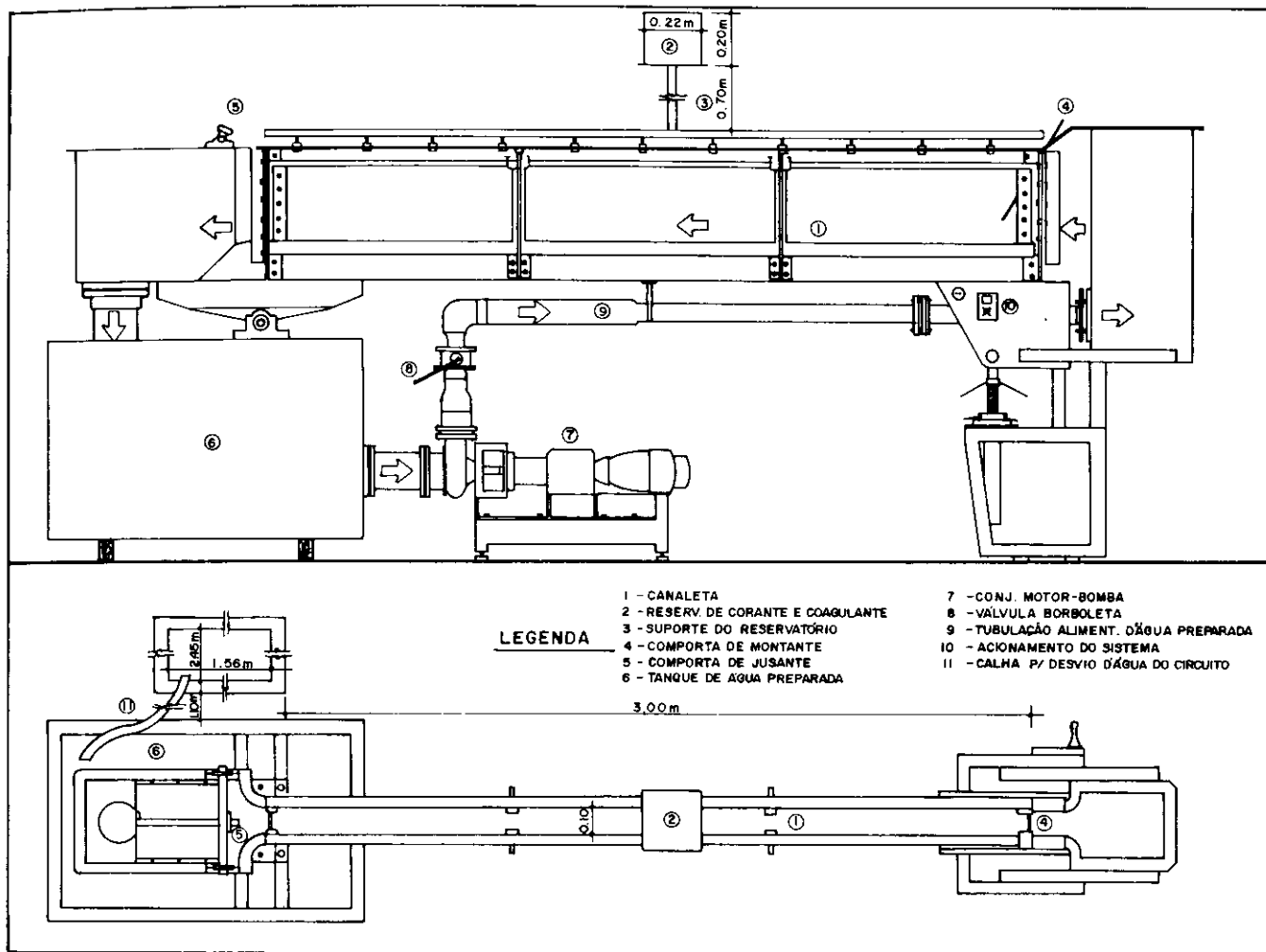


Figura 5 — Representação esquemática da canaleta com acessórios

do número de Froude e da vazão na mistura do corante na água, através de uma análise fotográfica.

2.) Estudo da eficiência da floculação de uma água preparada com caulinita, com a utilização de sulfato de alumínio como coagulante. Dos resultados da etapa anterior foram selecionadas as condições em que deveriam ser realizados os ensaios desta etapa, ou seja, o número de pontos de adição do coagulante, a posição de lançamento, a variação do número de Froude e da vazão.

### 3.2 Adição do corante e coagulante

#### 3.2.1 Números de pontos de adição do corante e coagulante

Para adição do corante foram empregadas quatro meias-canas de plástico rígido, com um orifício central na geratriz inferior e com quatro, oito e 12 orifícios espaçados igualmente ao longo da largura da canaleta. A alimentação das meias-canas era feita por dois bocais fixados às suas extremidades e ligados cada um a uma mangueira plástica de 4 mm de diâmetro que era, por sua vez, alimentada por

gravidade, através de um orifício no fundo do reservatório de corante, preso a um suporte acima da canaleta.

O corante utilizado, preparado sempre com a mesma dosagem, foi o azul de metileno, que era adicionado em vazões proporcionais às da canaleta e próximas àquelas que se utilizaria para o coagulante.

O coagulante foi adicionado em um ponto central e em quatro pontos espaçados igualmente ao longo da largura da canaleta, empregando-se uma mangueira plástica de 8 mm para a adição em um ponto e de 4 mm para a adição em quatro pontos. As mangueiras eram alimentadas por gravidade pelo reservatório de coagulante preso a um suporte acima da canaleta. O coagulante empregado foi uma solução de sulfato de alumínio, nas concentrações de 0,1%, 0,2% e 0,3%.

#### 3.2.2 Posições das meias-canas de adição do corante e das mangueiras de adição do coagulante

Na realização dos ensaios com o corante, a posição das meias-canas variou desde 0,5 m a montante do início do ressalto até o seu final, passando

por 0,25 m e 0,05 m a montante, o início, e diversas posições sobre o ressalto.

Na realização dos ensaios com o coagulante, as posições de adição foram a 0,5 m e 0,1 m a montante do início do ressalto e, sobre o ressalto, em um ponto situado a uma distância igual a 1/5 (um quinto) do seu comprimento, contada a partir de seu início.

### 3.3 Metodologia, resultados e conclusões da primeira etapa

#### 3.3.1 Variação do número de Froude no experimento

Em todo experimento, a variação do número de Froude foi feita variando-se a profundidade da lâmina d'água de montante ( $Y_1$ ) e a vazão de alimentação da canaleta, variando-se a abertura da comporta de montante e a posição da válvula borboleta que dava passagem à água na tubulação que alimentava a canaleta.

Utilizando-se das equações (11) e (16), obtém-se a seguinte equação:

$$Y_1 = 0,467295 \times \left( \frac{q}{Fr_1} \right)^{2/3} \quad (26)$$

Para cada vazão utilizada, o número de Froude desejado era facilmente conseguido quando se variava a abertura da comporta de montante até se obter a profundidade  $Y_1$ , calculada pela equação 2. A equação 10 era utilizada para se determinar o valor de  $Y_2$ .

### 3.3.2 Avaliação das condições de mistura

Foram realizados 130 ensaios com o corante, variando-se as posições de lançamento e os pontos de aplicação, o número de Froude de montante e a vazão da canaleta. De cada um destes ensaios foram tirados slides que, projetados em local apropriado, permitiram uma avaliação qualitativa das características hidráulicas da mistura, em função dos parâmetros acima citados.

### 3.3.3 Preparação dos ensaios

Inicialmente procurou-se verificar a potencialidade da instalação-piloto, com respeito à vazão máxima com que a bomba centrífuga poderia alimentar a canaleta e os números de Froude de montante que poderiam ser obtidos com as diversas vazões. Para o primeiro caso, variou-se a posição da válvula borboleta desde a abertura mínima até a máxima, medindo-se as vazões correspondentes. Como a válvula era granulada, podia-se assim obter, aproximadamente, a vazão desejada pela posição da válvula. Essa investigação revelou que a instalação poderia ser alimentada com uma vazão de até 10 l/s. Para o segundo caso, variou-se a abertura da comporta de montante para as diversas vazões, medindo-se a profundidade  $Y_1$  e a velocidade média na seção onde se iniciava o ressalto.

A investigação revelou que poderiam ser obtidos os seguintes números de Froude com as correspondentes vazões:

**Quadro 1 — Números de Froude e vazão máxima obtidos na instalação**

NÚMEROS DE FROUDE	VAZÃO MÁXIMA (l/s)
2,0, 3,0 e 4,0	10
5,0	7
6,0	4
7,0	2,2

Em seguida, determinaram-se as diversas posições do reservatório de corante, sobre o suporte que o mantinha acima da canaleta, que conduziam às vazões de alimentação desejadas, proporcionais às da canaleta. As vazões de corante foram calculadas de modo a se aproximarem daquelas do coagulante. Para tanto, os cálculos foram feitos, assumindo-se uma dosagem de coagulante igual a 15 mg/l e concentração de 0,5%.

### 3.3.4 Características dos ensaios, resultados obtidos e discussão

O Quadro 2 apresenta, de forma resumida, as características de cada ensaio da série L, sem ter sido fixada a vazão.

Da análise fotográfica da série I pode-se observar que: (I) aumentando-se o número de Froude, melhoravam as condições de mistura; (II) quanto mais a montante do início do ressalto foram as posições de adição do corante, melhores foram as condições de mistura, principalmente para os ensaios com os números de Froude menores (2 e 3).

O primeiro resultado já era esperado, pois se sabia dos experimentos de Rouse, Sião e Magaratnam que a intensidade de turbulência aumenta com o aumento do número de Froude. Entretanto, deve-se acrescentar que esta observação seria mais confiável se todos os ensaios fossem realizados com uma mesma vazão. Isto porque para um mesmo número de Froude, o aumento da vazão ocasiona uma maior quantidade de energia dissipada no ressalto, podendo assim alterar a forma de dissipação dessa energia, como, por exemplo, a escala de turbulência.

O segundo resultado foi inesperado, pois se imaginava que a adição do corante sobre o ressalto numa mistura melhor era devido à maior turbulência nessa região. A ocorrência de uma mistura melhor para a adição mais a montante do ressalto pode talvez ser explicada pelo fato de o corante chegar mais uniformemente disperso no início do ressalto, devido já a um certo grau de turbulência do escoamento de montante (regime torrencial) e à própria difusão e advecção do corante desde o ponto de lançamento até o início do ressalto. Esta observação ficou bem mais evidente na análise fotográfica para os números de Froude menores (2,0 e 3,0) em consequência das menores intensidades de turbulência. Para números de Froude mais elevados, a mistura se tornava tão intensa que dificultava esta análise fotográfica, ou seja, as diferentes condições de mistura para as diversas posições de lançamento não se tornaram tão evidentes quanto aquelas em que o escoamento se processava com números de Froude menores.

A análise fotográfica não revelou qualquer diferença nas condições de mistura para diferentes números de orifícios devido, provavelmente, à pequena largura do canal e também em

**Quadro 2 — Características dos Ensaios da Série I**

NÚMERO DE FROUDE	POSIÇÃO DE ADIÇÃO DO CORANTE		NO INÍCIO DO RESSALTO	Nº DE ORIFÍCIOS DE ADIÇÃO DO CORANTE	L <sub>j</sub> (cm)	U <sub>1</sub> (m/s)	Y <sub>2</sub> (cm)	Y <sub>1</sub> (cm)	VAZÃO (l/s)
	DISTÂNCIA À MONTANTE DO INÍCIO DO RESSALTO (m)	DISTÂNCIA À JUSANTE DO INÍCIO DO RESSALTO (m)							
2	0,25; 0,05	0,025; 0,05	Sim	1	22	1,10	7,20	3,1	3,42
	0,05	0,10		12					
3	0,25; 0,05	0,05; 0,10; 0,125;	Sim	1	50	1,68	10,9	3,1	5,21
	0,05	0,15; 0,20; 0,25		8					
5	0,25; 0,05	0,05; 0,10; 0,15;	Sim	1	70	2,15	11,8	1,9	4,09
	0,05	0,20; 0,25; 0,30; 0,35		8					
7	0,25; 0,05	0,05; 0,10; 0,15;	Sim	1	45	2,19	8,8	1,0	7,00
	0,05	0,20		4					

consequência da posição em que foram tiradas as fotografias. Os slides mostraram uma vista de frente do escoamento. Se as fotos mostrassem uma vista de cima do escoamento, talvez se poderiam notar diferenças nas condições de mistura para variação no número de pontos de adição do corante numa mesma posição de lançamento.

Prosseguindo o trabalho, foi programada a série II, trabalhando-se com o número de Froude a 5, para vazões de 2 e de 7 l/s, e com números de Froude iguais a 2, 3 e 4 para as vazões de 2, 5 e 9 l/s.

A finalidade destes ensaios era de se verificar o efeito, na mistura, da variação da vazão (e, consequentemente, da energia dissipada no ressalto) para um mesmo número de Froude. Com esta nova série de ensaios, poder-se-ia, também, analisar, com maior segurança o efeito da variação do número de Froude na mistura, já que esta variação se daria com as mesmas vazões, ou seja, para 2 l/s, para 5 l/s e para 9 l/s.

Para os números de Froude iguais a 2, 3 e 4, trabalhou-se apenas com a meia-cana de 1 (um) orifício, já que não se conseguia observar qualquer diferença, na mistura, quando se variava o número de orifícios, ou o número de pontos de adição do corante.

Foram abandonadas as posições de lançamento sobre o ressalto, em virtude de os resultados da série I de experimentos terem mostrado uma condição de mistura melhor a montante do início do ressalto.

O Quadro 3 apresenta as principais características dos ensaios da série II.

Da análise fotográfica da série II de ensaios, pôde-se observar, apenas para o número de Froude igual a 2, que as condições de mistura pioraram

quando se aumentou a vazão. Para os outros números de Froude ensaiados esta observação não ficou tão evidenciada.

Para os números de Froude maiores, a grande intensidade de turbulência dificultou a análise, como anteriormente. As variações nas condições de mistura, que provavelmente podem estar ocorrendo nesse caso, devem ser consequência de uma alteração nas escalas de turbulência, quando se variam as vazões do escoamento para um mesmo número de Froude. Outra observação que pode ser tirada desses ensaios é a respeito da altura da lâmina d'água a montante do ressalto ( $Y_1$ ). À medida que se aumenta a vazão, mantendo-se o número de Froude e a largura do canal, cresce também o valor de  $Y_1$ . Esse aumento da altura da lâmina d'água a montante do ressalto parece dificultar a mistura, principalmente para o caso em que o corante é adicionado, deixando-o cair livremente sobre a superfície da água. O que se observa nas fotos é que numa mesma seção transversal no início da região de grande turbulência do ressalto (**roller**) a parte compreendida entre o fundo do canal e a altura correspondente à profundidade  $Y_1$  sofre pouca agitação, ou seja, nesta região a turbulência é bem menos intensa que naquela compreendida entre a altura correspondente à profundidade  $Y_1$  e a altura correspondente à profundidade  $Y$  (superfície livre do ressalto numa seção no início do **roller**). Assim, com o aumento da profundidade de montante, é razoável imaginar que maiores volumes de água passarão pelo ressalto sem participar da turbulência que ocorre no mesmo, ou seja, sem se misturar. Desta maneira, acredita-se que ressaltos formados em escoamentos com os mesmos núme-

ros de Froude ( $Fr_1$ ) e vazão tão mais eficientes misturadores, quanto maiores forem as larguras dos canais em que se dão esses escoamentos, ou, ainda, quanto menores forem as suas vazões unitárias ( $q$ ). Este é um estudo que se acredita ser bastante importante, podendo-se chegar, por exemplo, a otimizar a largura do canal para uma faixa de vazões e números de Froude em função das condições de mistura desejadas.

A série II de ensaios serviu também para confirmar as observações anteriores, principalmente em relação ao número de Froude, já que agora eles puderam ser comparados com vazões idênticas.

### 3.3.5 Conclusão dos ensaios com corante

Resumindo, pode-se concluir dos ensaios com corante que:

a) Quanto maiores foram os números de Froude, melhores foram as condições de mistura do corante na água;

b) Quanto mais a montante do ressalto foram as adições de corante, melhores foram as condições de mistura;

c) Quanto menores foram as vazões, para um mesmo número de Froude, melhores foram as condições de mistura, sendo mais evidentes para o número de Froude igual a 2;

d) A variação do número de pontos de adição do corante não apresentou qualquer alteração perceptível quando da análise fotográfica das condições de mistura. Este parâmetro foi também estudado nos experimentos com o coagulante, por acreditar-se que a dispersão mais uniforme do mesmo poderia melhorar essas condições.

Quadro 3 — Características dos Ensaios da Série II

NÚMERO DE FROUDE	POSIÇÃO DE ADIÇÃO DO CORANTE		NO INÍCIO DO RESSALTO	Nº DE ORIFÍCIOS DE ADIÇÃO DO CORANTE	Lj (cm)	U <sub>1</sub> (m/s)	Y <sub>2</sub> (cm)	Y <sub>1</sub> (cm)	VAZÃO (l/s)
	DISTÂNCIA À MONTANTE DO INÍCIO DO RESSALTO (m)	DISTÂNCIA À JUSANTE DO INÍCIO DO RESSALTO (m)							
5	0,50; 0,25	0,125	Sim	1; 8	1,00	2,58	17,0	2,7	7
	0,05	0,20							
	0,50; 0,25	0,05	Sim	1	0,45	1,69	7,0	1,2	2
	0,05								
2	0,50	Não	Não	1	0,15	0,92	4,9	2,2	2
	0,25			1	0,35	1,25	9,1	4,0	5
	0,10			1	0,50	1,52	13,0	5,9	9
3	0,50	Não	Não	1	0,25	1,22	5,4	1,6	2
	0,25			1	0,55	1,64	10,7	3,0	5
	0,10			1	0,81	2,00	15,5	4,5	9
4	0,50	Não	Não	1	0,35	1,46	6,3	1,4	2
	0,25			1	0,65	2,42	12,8	2,5	5
	0,10			1	1,00	2,42	18,0	3,7	9



### 3.4 Metodologia, resultados e conclusões da segunda etapa

#### 3.4.1 Determinação da dosagem ótima de sulfato de alumínio

Tratou-se, inicialmente, da determinação da dosagem ótima do coagulante, o sulfato de alumínio, fixada a turbidez inicial da água bruta igual a 30 UT e a alcalinidade a 30 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ . Para tanto, foram realizados ensaios de floculação no aparelho de "Jar-test" modificado.

Para a preparação destes ensaios determinaram-se, inicialmente, as dosagens de caulinita e bicarbonato de sódio para a obtenção da turbidez e alcalinidade desejadas.

Caulinita — Turbidez

100 mg/l — 30 UT

Bicarbonato de Sódio — Alcalinidade  
51 mg/l — 30 mg/l ( $\text{CaCO}_3$ )

As características da água a ser preparada com estes valores acima foram:

Turbidez — 0,5 a 1,5 UT

Alcalinidade — 10 a 13 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ .

pH — 7,7 a 7,9

A água utilizada era de uma torneira do Laboratório de Hidráulica, proveniente da rede de abastecimento d'água da cidade de São Carlos — SP. A variação dos valores acima ocorreu nos cinco dias em que foram realizados estes ensaios preliminares.

A partir destes dados eram preparados 12 l de amostra, que, distribuídos nos seis frascos do aparelho de "Jar-test", eram utilizados em cada ensaio de floculação.

Todos os ensaios foram realizados com as seguintes características:

##### a) Mistura rápida

— tempo de agitação: 1 s

— gradiente de velocidade:  $800 \text{ s}^{-1}$

##### b) Floculação

— número hipotético de câmaras em série: 3

— primeira câmara:  $G_1 = 75 \text{ s}^{-1}$ ;  
 $t_1 = 10 \text{ min}$

— segunda câmara:  $G_2 = 45 \text{ s}^{-1}$ ;  
 $t_2 = 10 \text{ min}$

##### c) Sedimentação

— tempo: 30 min

A Figura 6 mostra os resultados obtidos, indicando uma dosagem ótima de sulfato de alumínio de 18 mg/l.

#### 3.4.2 Determinação do tempo ótimo de mistura rápida

Os ensaios para a determinação do tempo ótimo de mistura rápida foram

realizados para a mesma água preparada, conforme características anteriormente mencionadas, e mesmas condições físicas dos ensaios, exceção feita ao tempo de mistura rápida, que variou desde 1 até 30 segundos, tendo sido efetuados seis ensaios (1, 2, 5, 10, 20, 30 s).

Considerando-se a turbidez do sobrenadante, os melhores resultados foram obtidos com os tempos de 1, 2 e 5 segundos, o que era previsto, já que o mecanismo principal de desestabilização das partículas de caulinita é o de adsorção.

#### 3.4.3 A programação dos ensaios na canaleta

O reservatório de 650 l da canaleta foi empregado para a preparação da água de estudo. Para cada condição específica, os ensaios foram realizados segundo o seguinte procedimento:

a) Enchia-se o reservatório da canaleta com os 500 l de água limpa.

b) Determinavam-se a vazão e o número de Froude desejados.

c) Com o auxílio da comporta de jusante, posicionava-se o início do ressalto de modo a que seu término ocorresse nesta comporta.

d) Com a instalação em funcionamento adicionavam-se ao reservatório da canaleta  $W = 50 \text{ g}$  de caulinita e a quantidade de bicarbonato de sódio necessária para se obter a alcalinidade de 30 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ , agitando-se a massa d'água.

e) Com a solução de sulfato de alumínio já preparada em recipientes de 3, enchia-se o reservatório de coagulante.

f) Abriram-se os registros deste reservatório e, passados uns 4 a 5 segundos, iniciava-se a coleta de 2 da amostra de água "coagulada", no frasco apropriado para a realização do ensaio de floculação. A coleta era feita na saída da comporta de jusante (término do ressalto).

g) Levava-se o frasco para o aparelho de "Jar-test" onde se iniciava o ensaio de floculação.

h) Em seguida, interrompia-se o funcionamento da instalação e o restante da água bruta que ficava no reservatório era esgotado pelos dois registros instalados em seu fundo, um deles acoplado a uma bomba centrífuga, e conduzido por mangueiras até uma sarjeta localizada fora do Laboratório de Hidráulica.

i) Enquanto se desenvolvia o ensaio de floculação, o reservatório era novamente enchido com 500 l de água para a realização do ensaio seguinte.

OBS.: Como a água circulava na instalação em circuito fechado, era necessário, no momento de adição do coagulante, desviar-se a água "coagulada" para fora da instalação. Isto foi feito com o auxílio de calha plástica, que era colocada na saída da turbulência que retorna a água no reservatório, no momento em que se abriam os registros de coagulante. Esta calha desviava a água "coagulada" para o

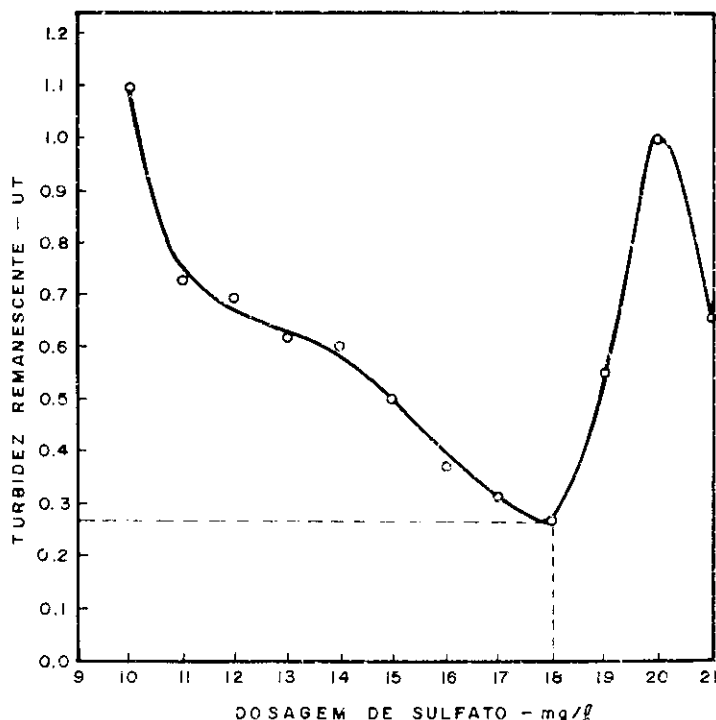


Figura 6 —

reservatório subterrâneo de 6.000 l do laboratório.

— O tempo decorrido entre a abertura dos registros de aplicação da solução de coagulante e o fim da coleta era de 6 a 8 segundos. Deste modo, o volume de água que saía da instalação, desviado pela calha neste período, não chegava a alterar consideravelmente a vazão da canaleta.

— O ensaio era realizado com o auxílio de outra pessoa que abria e fechava os registros de coagulante e desligava o funcionamento da instalação.

— No final de cada ensaio, o reservatório de coagulante era totalmente esgotado, para ser enchido no início do ensaio seguinte. Mantinha-se, assim, a solução sempre homogênea na hora do ensaio, evitando-se o depósito de sulfato no fundo.

— A cada dia era preparada nova solução de sulfato de alumínio, não se usando nunca a solução do dia anterior.

— Os gradientes de velocidade usados nos ensaios, bem como os respectivos tempos, foram os mesmos dos ensaios preliminares, ou seja,  $75 \text{ s}^{-1}$ ,  $45 \text{ s}^{-1}$  e  $25 \text{ s}^{-1}$  durante 10 minutos cada. As rotações que conduziam a estes gradientes foram alteradas de acordo com a temperatura da água, como recomenda a literatura.

As amostras eram coletadas a 0,1 m abaixo da lâmina d'água do frasco, com o auxílio do sifão de coleta, após os seguintes tempos de sedimentação: 1 min, 4 min, 7 min, 10 min, 15 min e 30 min. Destas amostras, determinava-se a turbidez.

De acordo com o procedimento anterior, foram efetuados cerca de 80 ensaios, divididos em três séries. Na primeira, foram utilizados os números de Froude iguais a 2, 3, 4 e 5, para as vazões de 3, 6 e 9 l/s, adicionando-se o coagulante através de 1 e 4 pontos a 0,5 e 0,1 m a montante do ressalto, a uma distância igual a 0,2 do seu comprimento (Lj), contada a partir do seu início. Na segunda série, os ensaios com a vazão de 6 l/s foram repetidos para a água preparada com diferentes temperaturas. Na terceira série, foram selecionados cinco ensaios da primeira série, de forma aleatória, os quais foram repetidos para verificação dos resultados anteriores.

### 3.4.4 Resultados e discussão

Devido à grande quantidade de ensaios efetuados, são apresentados, em forma de gráficos, os resultados de alguns ensaios julgados importantes e representativos, muito embora na dis-

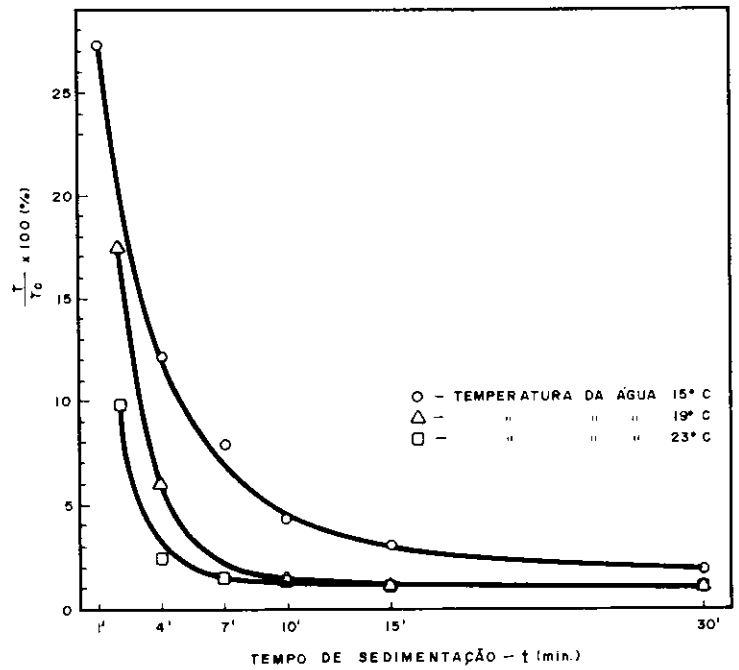


Figura 7 —

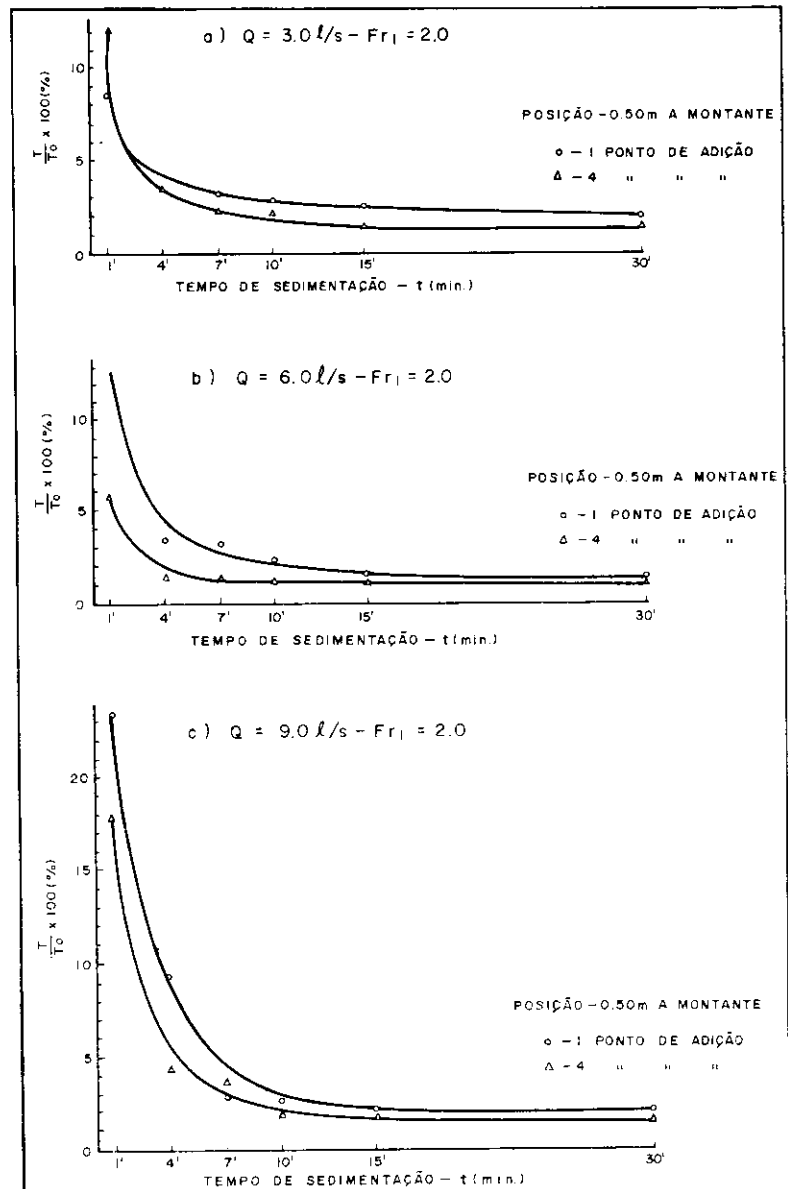


Figura 8 — Curvas de sedimentação em jarras para diferentes condições de mistura

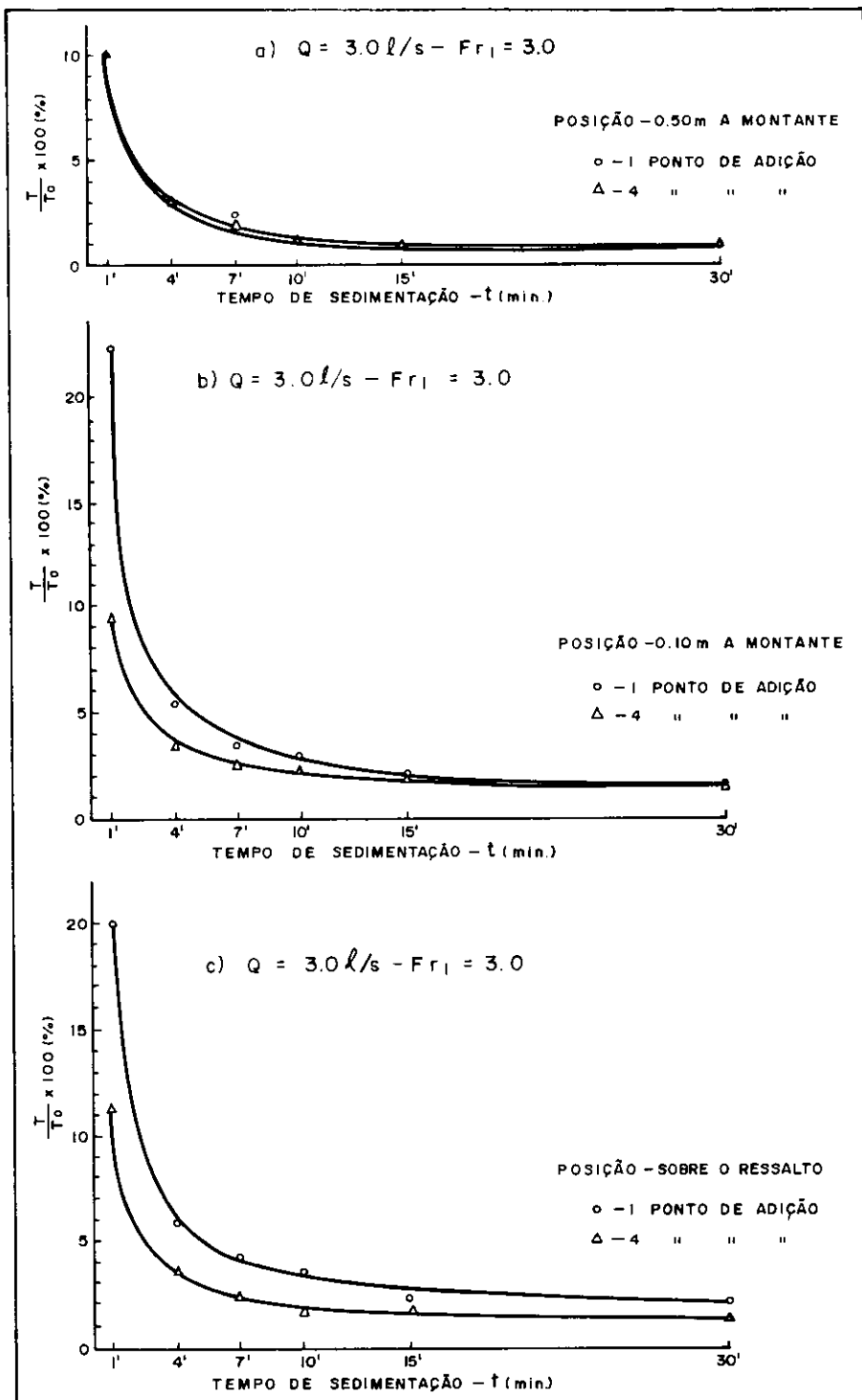


Figura 9 — Curvas de sedimentação em jarras para diferentes pontos de adição do coagulante

cussão e conclusões dessa segunda etapa fossem analisados todos os ensaios.

A figura 7 representa o efeito da temperatura na remoção da turbidez, a figura 8 representa a variação da turbidez em função do tempo de sedimentação com o número de Froude igual a 2 e 3 vazões diferentes e a figura 9 mostra o efeito da adição do coagulante em diferentes posições para uma vazão de 3 l/s e número de Froude igual a 3.

Os resultados mostraram que com a distribuição mais uniforme do coagu-

lante, ou seja, a adição em quatro pontos, obtiveram-se os menores valores para a turbidez residual, após o ensaio de floculação. Isto confirma a hipótese de que a distribuição mais uniforme de coagulante conduz a melhores condições de mistura. Esta conclusão ficou bem mais evidenciada nos ensaios realizados com os números de Froude e as menores vazões, onde a intensidade de mistura era menor. Com uma alta intensidade de turbulência, que ocorre com os números de Froude maiores, os resultados de turbidez residual tornaram-se bem próximos.

Como ocorrido nos ensaios com o coagente, este resultado já era esperado, pois, de um modo geral, esta alta intensidade de turbulência faz com que o coagulante seja rapidamente misturado, mesmo com uma distribuição menos uniforme. Entretanto, acredita-se que este seja um parâmetro de grande importância na mistura, pois deve-se ressaltar que o canal utilizado na instalação-piloto possui apenas 0,1 m de largura. Para canais de largura mais acentuada, pode-se sempre esperar melhores resultados com uma distribuição mais uniforme do coagulante.

Quanto à posição de lançamento, o que se observou foi que para os menores números de Froude e com as menores vazões os melhores resultados ocorreram quando o coagulante foi lançado mais a montante do início do ressalto. A medida que se aumentou o número de Froude e a vazão, os melhores resultados foram para as posições de lançamento mais próximas do ressalto. Com os maiores números de Froude e vazão, como os ensaios realizados com  $Fr_1 = 5$ ;  $Q = 3 \text{ l/s}$  e  $Fr_1 = 4$ ;  $Q = 6 \text{ l/s}$  e ainda  $Fr_1 = 4$ ;  $Q = 9 \text{ l/s}$ , os melhores resultados ocorreram quando o lançamento foi feito no início do ressalto. Dessa maneira, não se pode afirmar qual a melhor posição para o lançamento do coagulante. Sabe-se, entretanto, que este parâmetro é de uma importância relevante, como mostraram os resultados, e que a melhor posição de lançamento será função do número de Froude e da vazão ou da quantidade de energia dissipada no ressalto. Uma explicação provável para essa variação poderia estar relacionada com o tempo de mistura. Observou-se nos ensaios de floculação que os melhores resultados foram obtidos com os menores tempos de mistura para essa água. Como no ressalto hidráulico, o aumento do número de Froude conduz a um comprimento (Lj) maior do ressalto, as distâncias entre o ponto de lançamento do coagulante e o ponto de coleta (final do ressalto) irão também aumentar. Como consequência, pode-se esperar também um aumento do tempo de mistura. Essa variação do tempo de mistura poderia, talvez, estar levando a essa alteração nos resultados, quando se varia o número de Froude e a vazão. Este é um parâmetro que merece ser mais bem estudado, fazendo-se, por exemplo, o lançamento do coagulante em um ponto cuja distância do final do ressalto seja sempre a mesma para os diversos números de Froude ensaiados. Pode-se, entretanto, afirmar que, para uma mesma condição de mistura, haverá sempre uma posição de lançamento que conduzirá a um melhor resultado para a turbidez residual.

Como já era esperado, o aumento do número de Froude conduziu a melhores resultados. Esta observação, entretanto, pode ser tirada somente através de uma análise global dos resultados, já que, numa análise individual, ou seja, comparando-se ensaios realizados sob mesmas condições, se nota, por exemplo, que para um determinado número de Froude o melhor resultado ocorreu para uma determinada posição de lançamento, enquanto que para outro ensaio sob mesmas condições e número de Froude diferentes o melhor resultado ocorreu noutra posição de lançamento.

O que de mais importante se observou, entretanto, é que mesmo para números de Froude pequenos (2 e 3), foram obtidos bons resultados da turbidez residual, o que mostra que não há necessidade de se trabalhar com valores altos do número de Froude para se conseguir uma coagulação eficiente. Para tanto, basta adicionar o coagulante no ponto ótimo e de forma mais uniforme possível.

Da mesma forma que a análise feita para o número de Froude, a variação da vazão pode ser estudada apenas de forma geral. O que se observou foi que os melhores resultados foram obtidos com a vazão de 6 l/s e os piores com a vazão de 9 l/s. Entretanto, pouco se pode concluir destes resultados, sendo este também um parâmetro que merece ser melhor estudado. Acredita-se, como já referido na discussão dos resultados dos ensaios com o corante, que para um mesmo número de Froude e vazões diferentes o parâmetro mais importante e que deve estar envolvido nessa variação seja a escala de turbulência do movimento, pois, apesar da maior quantidade de energia dissipada no ressalto com o aumento da vazão, esta energia parece ser dissipada sob a forma de grandes vórtices, ou seja, movimento turbulento com elevada escala de turbulência.

A segunda série de experimentos serviu para confirmar as análises anteriores e para mostrar a forte influência da variação da temperatura. Acredita-se que em pesquisas semelhantes este é um parâmetro que precisa ser controlado.

A terceira série de experimentos tinha a finalidade de verificar a confiabilidade dos resultados obtidos. Algumas discrepâncias em relação aos resultados observados nos ensaios realizados na primeira e segunda séries de experimentos podem ser creditadas ao aumento da temperatura ocorrida nesta terceira série de experimentos. Pode-se notar, inclusive, que os mesmos ensaios que foram repetidos durante esta série produziram resultados bem próximos.

### 3.4.5 Conclusões dos ensaios com coagulante

a) A coagulação, realizada em um ressalto hidráulico, é mais eficiente quando o coagulante é distribuído uniformemente na largura do canal;

b) dependendo da qualidade da água a ser coagulada e do número de Froude a montante do ressalto, é provável que haja uma posição "ideal" para o lançamento da solução do coagulante;

c) a altura da água a montante do ressalto influencia significativamente a eficiência da coagulação, principalmente para números de Froude pequenos, como 2 e 3;

d) para números de Froude elevados (acima de 5), a posição do lançamento do coagulante não influi significativamente na eficiência da coagulação.

## 4 Considerações finais

Não foi possível estudar, no presente trabalho, o efeito da largura do canal, quando se mantém a vazão e o número de Froude constantes. Acredita-se, porém, que o aumento da largura do canal deverá melhorar as condições de mistura, principalmente para números de Froude pequenos, devido à menor altura de água a montante do ressalto, que seria o melhor local de adição do coagulante.

Como em uma estação de tratamento de água é comum ocorrerem variações de vazão de água a ser tratada e, em geral, a adição do coagulante é feita em um ponto fixo, sugere-se a introdução de **stop-logs** a jusante do ressalto, para controlar a posição do início do ressalto.

## 5 Bibliografia

- 1 — AMIRTAJAH, A. & ILLS, K. M. — Rapid-mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation *Journal of American Works Association*, 210-216, April, 1982.
- 2 — AZEVEDO NETTO, J. M. — O Parshall como Misturador Rápido: s.n.t.
- 3 — BAKHMETEFF, B. A. & MATZKE, A. E. — The Hydraulic Jump in Terms of Dynamic Similarity — *Transactions American Society Civil Engineers*, 630-649, February, 1935.
- 4 — BRADLEY, J. N. & PETERKA, A. J. — The Hydraulic Design of Stilling Basins: Hydraulic Jumps on a Horizontal Apron (Basin I) *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 83 (HY5): 1-24, October, 1957.
- 5 — CAMP, T. R. Floc Volume Concentration *Journal of American Works Association*, 657-673, June, 1968.

- 6 — CAMP, & STEIN, P. C. Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion — *Journal of American Society of Civil Engineers*, 30: 219-237, May, 1943.
- 7 — CHOW, V. T. *Open Channel Hydraulics* New York, McGraw-Hill Book Company, 1959, 680 p.
- 8 — HINZE, J. O. *Turbulence* 2 ed. New York, McGraw-Hill Book Company, 1975, 790 p.
- 9 — HUDSON, H. E. & WOLFNER, J. P. Design of Mixing and Flocculating Basins *Journal of American Water Works Association*, 59: 1257-1267, July, 1967.
- 10 — KAWAMURA, S. Coagulation Considerations *Journal of American Water Works Association*, 65: 417-423, June, 1973.
- 11 — LETTERMAN, R. D. et alii Influence of Rapid — Mix Parameters on Flocculation *Journal of American Water Works Association*, 65: 716-722, November, 1973.
- 12 — LEVICH, F. *Physicochemical Hydrodynamics* s.n.t.
- 13 — MEHROTRA, S. C. Length of Hydraulic Jump *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 102 (HY7), 1027-1033, July, 1976.
- 14 — O'MELIA, C. R. *Coagulation and Flocculation - Physicochemical Processes for Water Quality Control*, W. J. Weber, 1982.
- 15 — O'MELIA, C. R. & STUM, W. Stoichiometry of Coagulation *Journal of American Water Works Association*, 514-539, May, 1968.
- 16 — ORTIZ, J. Macroturbulência de Escamento a Jusante de Estruturas de Dissipação por Ressalto — São Paulo, 1981. 207 p. Dissert. (mest. engenharia) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- 17 — PAES LEME, F. Avaliação da Eficiência Hidráulica do Misturador Parshall 9.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Belo Horizonte, julho, 1977.
- 18 — RIVERA, F. A. et alii Estudio de la Canaleta Parshall como Mescrador Rápido *Revista DIPA*, Bogotá, separada da revista ACODAL, 1981.
- 19 — ROUSE, SIAO and NAGARATNAM - Turbulence Characteristics of Hydraulic Jum *Journal of the Hydraulics Division - ASCE* (HY1), 1528-1 a 1528-28, February, 1958.
- 20 — SILVESTER, R. Hydraulic Jump in all Shapes of Horizontal Channels *Journal of the Hydraulics Division - ASCE*, (HY1), 23-25, January, 1964.
- 21 — STENQUIST, R. & KAUFMANN, W. Initial Mixing in Coagulation Processes EPA, 1974.
- 22 — STEVENS, J. C. Determining the Energy Lost in the Hydraulic Jump *Engineering News - Record*, 23(94): 928-930, June, 1925.
- 23 — VRALE, L. & JORDEN, R. M. Rapid Mix in Water Treatment *Journal of American Water Works Association*, 01(63): 52-58, January, 1971.