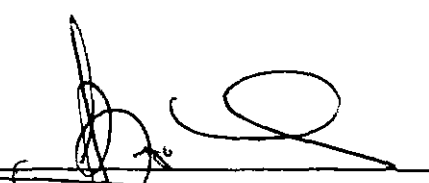


"MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE DECANTADOR PRIMÁRIO DE  
ESGOTOS UTILIZANDO-SE A TÉCNICA DE TRAÇADORES "

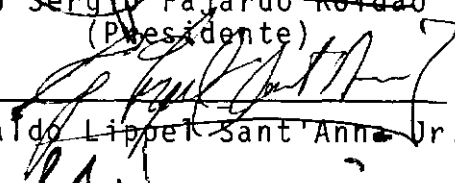
Sérgio Vasconcelos de Azeredo

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE  
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO  
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

Aprovada por:



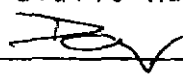
João Sérgio Fajardo Reidão  
(Presidente)



Geraldo Lippert Sant'Anna Jr.



Giulio Massarani



Paulo Canedo de Magalhães

RIO DE JANEIRO, R.J-BRASIL  
MARÇO - 1985

AZEREDO, SÉRGIO VASCONCELOS

Modelagem Hidrodinâmica de Decantador Primário de Esgotos utilizando-se a Técnica de Traçadores. (Rio de Janeiro), 1985.

IX, 127 p 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.), Engenharia Civil, 1985.

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Modelos Hidrodinâmicos de Escoamento
2. Materiais e Métodos
3. Modelagem de Casos Reais

I. COPPE/UFRJ      II. Título (série)

### AGRADECIMENTOS

- Em especial, ao Prof. João Sêrgio Fajardo Roldão, pela sua paciência e colaboração prestadas durante todo o período em que utilizei as facilidades de seu laboratório e na ajuda para superação das dificuldades encontradas na preparação desta tese, em virtude de ter sido elaborada em regime de tempo parcial.
- Ao Prof. Geraldo Lippel Sant'Anna Jr, pela colaboração fundamental na elaboração final da tese, principalmente quanto aos trabalhos de modelagem hidrodinâmica.
- À FEEMA - Fundação Estadual de Engenharia de Meio Ambiente, pela disponibilidade de tempo que me concedeu para que pudesse executar este trabalho, e em especial aos Engenheiros Carlos Henrique Abreu Mendes e Ricardo da Silveira, que me concederam esta chance.
- Ao Roberto de Sousa, estagiário do laboratório, pela grande ajuda concedida na parte de elaboração e emprego dos programas de computador.
- À eficiente e amiga equipe do laboratório, como o Srs. Emygdio, Ricardo, Sidnei e outros que tanto me ajudaram no trabalho de campo como nas análises de laboratório.

Resumo da Tese Apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a Obtenção do Grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

"MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE DECANTADOR PRIMÁRIO DE  
ESGOTOS UTILIZANDO-SE A TÉCNICA DE TRAÇADORES"

Sérgio Vasconcelos de Azeredo

Março/1985

Orientadores: João Sérgio Fajardo Roldão e  
Geraldo Lippel Sant'Anna Jr

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho visa estudar o comportamento hidrodinâmico de uma unidade de decantação primária de uma estação de tratamento de esgotos, modalidade lodosativados, através da determinação de parâmetros obtidos com o uso de traçadores.

A técnica empregada na obtenção dos dados experimentais consistiu na injeção de traçador radioativo (Bromo-82) e traçadores fluorescentes (Amidorodamina G-Extra, Rodamina B, Eosina e Uranina).

Comparação entre o desempenho dos diferentes traçadores é mostrada. É apresentada também modelagem com aplicação de modelos simplificados de escoamento apresentados na literatura.

A estação escolhida para a realização dos experimentos foi a da Ilha do Governador, no Rio de Janeiro, cuja vazão média diária está em torno de  $17.280 \text{ m}^3/\text{dia}$ .

Abstract of thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## HYDRODYNAMIC MODELS OF PRIMARY SETTLERS USING TRACERS' TECHNIQUES

Sérgio Vasconcelos de Azeredo

March, 1985

Chairmen: João Sérgio Fajardo Roldão and  
Geraldo Lippel Sant'Anna Jr.

This work comprises a study on the Hydrodynamic of a primary settler of sewage treatment plant, type sludge activated through the evaluation of parameters obtained by the use of tracers.

The technique employed in obtaining the data consisted in the injection of radioactive tracer (Bromine-82) as well as fluorescent tracers (Amidorodamine G-Extra, Rodamine B, Eosine and Uranine).

The experimental results were compared with the results predicted by simplified hydrodynamics models published.

The sewage treatment plant chosen was the plant located at Ilha do Governador (Rio de Janeiro) whose average flowrate is about  $17.280 \text{ m}^3/\text{day}$ .

## ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
I.1 - Generalidades .....	1
I.2 - O Tratamento por Lodos Ativados .....	3
I.3 - O Decantador Primário .....	6
I.4 - A Digestão Anaeróbia .....	7
I.5 - Objetivos do Trabalho .....	8
I.6 - Apresentação do Trabalho .....	9
 CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE MODELAGEM DE ESCOAMENTO EM EQUIPAMENTO .....	 11
II.1 - Definições Básicas .....	11
II.1.1 - A Técnica de Estímulo - Resposta .....	11
II.1.2 - O Conceito de Função de Transferência .....	14
II.1.3 - Distribuição dos Tempos de Residência .....	16
II.1.4 - Obtenção da Distribuição de Tempos de Resi- dência a partir dos Resultados Experimentais	18
II.1.5 - Parâmetros Associados à Distribuição de Tem- pos de Residência (D.T.R) .....	18
II.2 - Modelos de Escoamento- Aplicações a Tanques de Decantação .....	20
II.2.1 - Conceituação geral.....	20
II.2.2 - Modelos Aplicáveis a Tanques de Decantação	25
II.2.2.1 - Modelo A - Modelo de Três Tanques em Série	25
II.2.2.2 - Modelo B - Modelo de Dois Tanques em Série	29
II.3 - Trabalhos Anteriores com Modelagem de Unidades de Tratamento .....	32

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS - APLICAÇÃO DOS MODELOS E DA TÉCNICA DE TRAÇADORES A UMA SITUAÇÃO REAL - METO DOLOGIA APLICADA .....	36
III.1 - Seleção de Traçadores .....	36
III.2 - Fatores que Influenciam na Fluorescência ...	42
III.3 - Local dos Testes - Descrição da Estação de Tratamento de Esgotos da Ilha do Governador (ETIG) .....	46
III.4 - Partes Constituintes da Estação .....	47
III.4.1 - Entrada de Esgoto Bruto .....	47
III.4.2 - Elevatória de Esgotos Brutos .....	47
III.4.3 - Caixa de Areia .....	48
III.4.4 - Canal de Interligação da Caixa de Areia ao Decantador Primário com Medidor de Vazão Ti po Calha Parshall .....	48
III.4.5 - Decantador Primário .....	49
III.4.6 - Canal de Interligação do Decantador Primá rio à Câmara de Aeração .....	49
III.4.7 - Câmara de Aeração .....	49
III.4.8 - Decantador Secundário .....	51
III.4.9 - Estação Elevatória de Recirculação de Lodo .....	51
III.4.10 - Estação Elevatória de Lodo Bruto .....	52
III.4.11 - Digestores Anaeróbios .....	52
III.4.12 - Canal Efluente do Decantador Secundário ..	53
III.4.13 - Leito de Secagem .....	53
III.5 - Metodologia de Trabalho e de Obtenção de Dados Experimentais .....	53
III.5.1 - Análise das Concentrações de Traçador ....	53
III.5.2 - Procedimentos Experimentais no Campo .....	57
III.5.2.1 - Preparação e Injeção de Traçadores .....	58

III.5.2.2 - Coleta de Amostras .....	60
III.5.2.3 - Medição de Vazão e de Volume do Sistema de Decantação Primária .....	61
III.6 - Análises de Laboratório .....	64
III.6.1 - Preparação e Análise das Amostras .....	64
III.6.2 - Determinação da Concentração de Traçadores Fluorescentes .....	66
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	72
IV.1 - Introdução .....	72
IV.2 - Codificação das Experiências .....	73
IV.3 - Fatores que Influenciam a Perda de Traçador ..	76
IV.4 - Observações a Respeito de Vazões de Operação	78
IV.5 - Análise Preliminar - Seleção dos Experimentos	82
IV.6 - Parâmetros Específicos do Escoamento .....	83
IV.6.1 - Tempo de Detenção Médio Experimental e Fra - ção de Zonas Mortas .....	83
IV.6.2 - Análise da Perda de Traçadores .....	84
IV.7 - Análise da Modelagem Hidrodinâmica do Decanta- dor Primário .....	86
IV.7.1 - Preliminares .....	86
IV.7.2 - Modelagem Satisfatória .....	88
IV.7.3 - Modelagem Razoável .....	98
IV.7.4 - Modelagem Inadequada .....	102
IV.7.5 - Interpretação Física dos Resultados .....	102
IV.7.6 - Comentários a Respeito da Modelagem .....	105
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	108
APÊNDICE I - RESOLUÇÃO DA INTEGRAL DA EQUAÇÃO (41) .....	110



APÊNDICE II - PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESI- DÊNCIA .....	113
APÊNDICE III- MANUSEIO DOS TRAÇADORES .....	117
APÊNDICE IV - DIAGRAMA DE BLOCOS EXPLICATIVO DO QUE O PRO - GRAMA "CONTRAC" EXECUTA .....	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	125

## CAPÍTULO I

### I N T R O D U Ç Ã O

#### I.1 - GENERALIDADES

O tratamento adequado dos dejetos domésticos é um fator fundamental em questões de saúde pública. Deficiências apresentadas no trato deste problema podem acarretar momentos e situações calamitosas de epidemias ou endemias de doenças de veiculação hídrica, tais como hepatite, infecções gastro-intestinais e outras, que acarretam elevados custos no seu combate após a contaminação.

Estes custos podem se tornar muito mais onerosos socialmente do que a profilaxia preventiva oriunda de medidas de saneamento básico, tais como uma correta e eficaz coleta, tratamento e disposição final de efluentes oriundos de esgotos domésticos.

No Brasil, estamos ainda em fase muito primitiva quanto ao enfoque deste problema. Temos índices altíssimos de mortalidade infantil ou na população adulta, devido a doenças que poderiam ser plenamente evitadas, caso se desse a devida atenção governamental a este problema, evitando-se o contato da população com fontes transmissoras de doenças, tais como o esgoto doméstico.

Poucas são as cidades que possuem algum sistema, por mais simples que seja, de esgotamento sanitário, geralmente são as capitais e mesmo assim são as de maior porte, onde a população beneficiada raramente ultrapassa o percentual de 20% da população urbana total.

Vemos na periferia ou mesmo nas favelas das grandes cidades, valas a céu aberto, escavadas ao longo das ruas, que escoam bem ou mal os efluentes domésticos, que se misturam com o lixo doméstico, lama, vegetação rasteira e dejetos animais. Com qualquer enxurrada, esta mistura é carregada até o quintal das casas ou mesmo para dentro delas, onde a população, principalmente a infantil, vem a ser contaminada.

Diante do exposto acima, se faz mister que sejam incentivados pelo Poder Público a implantação acelerada de sistemas completos de coleta, tratamento e disposição final de esgotos domésticos, para que se consiga elevar o nível de saúde da população e para isso, devido aos altos custos envolvidos na consecução desses objetivos, é necessária a pesquisa de formas alternativas, menos dispendiosas, para a implantação desses sistemas.

Como formas alternativas de implantação, tem-se redes coletoras menos profundas, emprego de fossas sépticas simplificadas, uso de materiais não convencionais e não importados e que também se realize um trabalho de averiguação dos sistemas convencionais implantados para que se saiba se realmente atendem ao que se propõem.

É necessário também que se verifique se para as nossas condições, essas são meramente soluções copiadas pelas economias periféricas do que foi testado em economias centrais com hábitos populacionais, condições climáticas e recursos naturais, de equipamentos e financeiros totalmente diferentes e principalmente bem superiores aos nossos.

## I.2 - O TRATAMENTO POR LODOS ATIVADOS (FIGURA 1)

O desenvolvimento das técnicas de projeto baseadas na cinética de remoção de substratos orgânicos pelos microorganismos constituintes do lodo ativado, fornecedoras das bases para um enfoque racional do problema, deu-se nos últimos vinte e cinco anos.

As atenções se voltaram especialmente para o tanque de aeração, o reator no qual se processa a estabilização da matéria orgânica, objetivo específico do tratamento.

O sistema de aeração é constituído de três unidades, que são o tanque de aeração, a elevatória de retorno do lodo a tivado e o decantador secundário.

O processo dos lodos ativados se alicerça na capacidade de certos microorganismos utilizarem a matéria orgânica, contida no esgoto, como substrato (fonte de energia) para seus processos vitais. Tais organismos fazem parte do chamado lodo

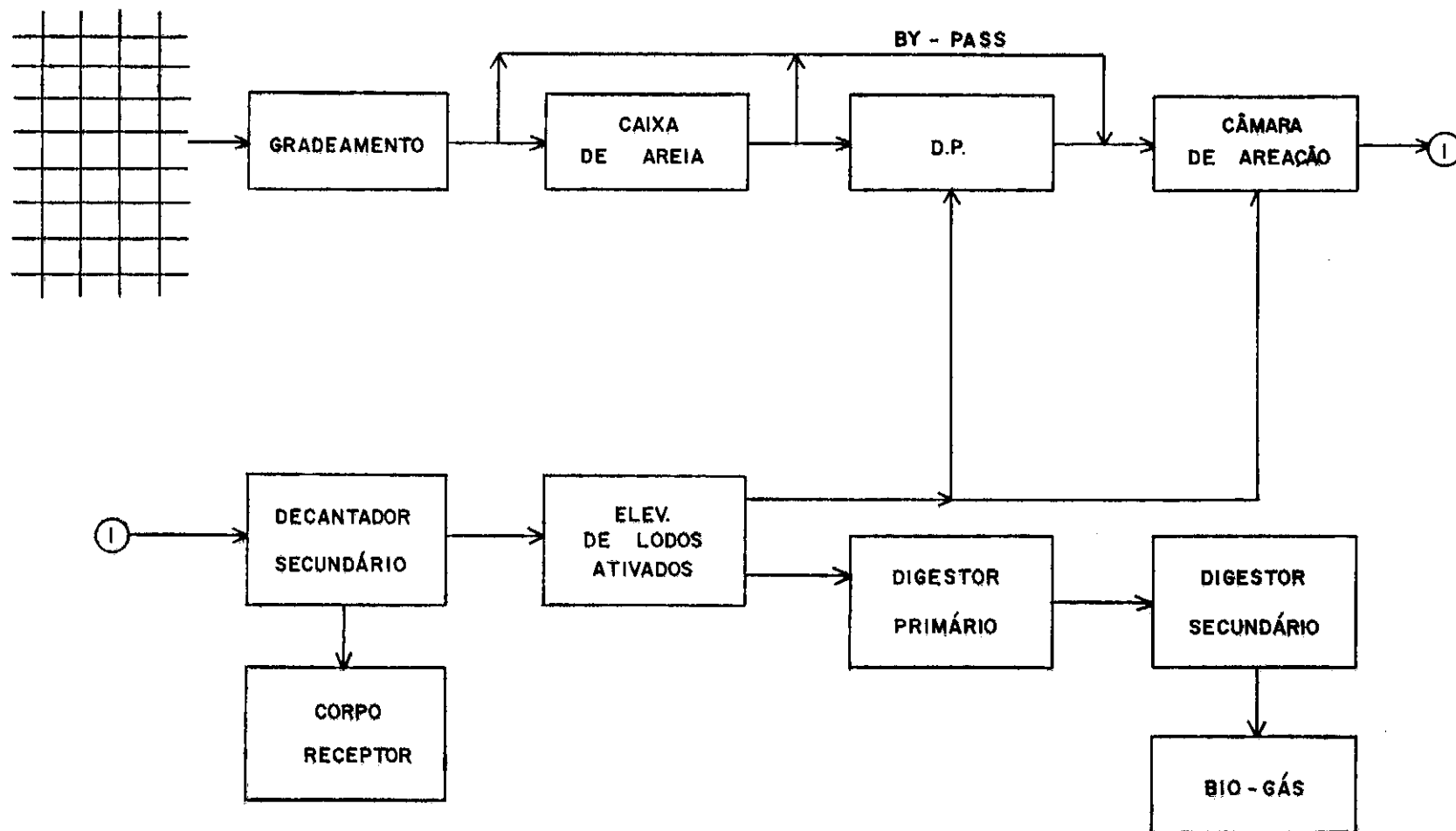


FIGURA 1 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO CONVENCIONAL DE TRATAMENTO DE ESGOTOS POR LODOS ATIVADOS.

ativado, ou seja, dos flocos mantidos em suspensão no tanque de aeração. Esses tanques são dimensionados para receber e estabilizar até o grau desejado, a matéria orgânica afluyente. Como o volume do tanque de aeração é fixo, a existência de uma certa massa fixa de lodo ativado implica na fixação de uma certa concentração de sólidos no referido tanque.

No processo de lodos ativados, há uma certa produção de sólidos em suspensão causada pela acumulação no sistema, dos sólidos em suspensão não biodegradáveis trazidos pelo esgoto bruto e pelo aumento da biomassa causado pela proliferação dos microorganismos que incorporam a seu material celular, parte da matéria orgânica biodegradada. Esta produção de sólidos é descartada periodicamente, de tal forma que o excesso produzido em certo período é removido nesse mesmo período.

Essencialmente, o processo dos lodos ativados consiste em submeter esgotos brutos ou pré-decantados à aeração artificial em unidades de tratamento denominadas tanques de aeração (T.A.). Essa aeração artificial pode ser obtida pela insuflação de ar comprimido no interior do T.A., ou pela agitação do líquido por meio de pás giratórias de eixo horizontal (rotores, tipo gaiola) ou vertical (cones de aeração).

Os esgotos brutos ou pré-decantados contêm microorganismos, em concentrações relativamente baixas, e matéria orgânica. Esses microorganismos, ao ingressarem no T.A., encontram condições propícias a seu desenvolvimento. Há alimento em abundância e concentrações adequadas de oxigênio dissolvido.

A presença dos nutrientes básicos normalmente encontrados nos esgotos domésticos e outros fatores ambientais, permitem aos organismos se reproduzirem rapidamente, agrupando-se em colônias que permanecem em suspensão, formando os flocos de lodo ativado.

Esses organismos, através de suas funções naturais de nutrição e reprodução, utilizam-se do substrato orgânico presente como fonte de energia, promovendo a sua oxidação, ou estabilização. O efluente do T.A. é submetido à decantação em uma unidade de tratamento denominada Decantador Secundário (D. S.), no interior do qual os flocos de lodo ativado são separados por sedimentação, dirigindo-se para o fundo da unidade, de onde são retornados parcialmente ao tanque de aeração.

### I.3 - O DECANTADOR PRIMÁRIO

O decantador primário é uma unidade de tratamento que recebe o esgoto após um tratamento preliminar de gradeamento e desarenação que coloca o efluente em condições de ser submetido à deposição dos sólidos orgânicos e inorgânicos para posterior remoção (transferência).

Sua finalidade é a de remover sólidos sedimentáveis, de forma a permitir que os esgotos estejam em condições de serem lançados nos corpos receptores ou de serem submetidos a tratamentos secundários, nos casos em que for necessário um maior grau de tratamento.

Em termos de qualidade, identifica-se uma remoção de sólidos em suspensão da ordem de 40 a 60%, e da D.B.O. de 25 a 35%.

As condições de decantação estão vinculadas basicamente à velocidade de sedimentação dos esgotos dentro do tanque, isto é, à taxa de escoamento superficial. Além deste parâmetro, pode-se relacionar a decantação ao tempo de detenção no decantador. Normalmente, a quase totalidade dos sólidos sedimentáveis é removida no período de 2 (duas) horas de detenção. A tendência atual é reduzir-se este tempo para 1 (uma) hora, na vazão máxima, mantendo-se as condições de taxa de escoamento superficial.

#### I.4 - A DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia do lodo, tornando-o estável, é realizada com a finalidade de destruir ou reduzir a níveis previamente estabelecidos, os microorganismos patogênicos, estabilizar total ou parcialmente as substâncias instáveis (matéria orgânica) presentes nos lodos frescos, reduzir o volume do lodo através dos fenômenos de liquefação, gaseificação e adensamento, dotar o lodo de características favoráveis à redução da umidade e de permitir a sua utilização, quando estabilizado convenientemente como fonte de húmus ou condicionador de solo para fins agrícolas.

Os digestores são construídos com características des



tinadas a digerir o lodo cru, a reter e encaminhar convenientemente o gás produzido, a permitir a remoção do material resultante da liquefação (sobrenadante), de modo a reconduzi-lo ao início do sistema de tratamento, a permitir a remoção do lodo digerido e o seu encaminhamento para as unidades de tratamento subsequentes, a recircular o gás e/ou o lodo, de modo a acelerar o processo de digestão e finalmente a permitir o aquecimento do lodo em digestão, de acordo com a temperatura previamente estabelecida em projeto.

O funcionamento dos digestores está vinculado à eficiência da digestão realizada por meio das bactérias anaeróbias e facultativas, as quais desdobram e estabilizam as substâncias orgânicas complexas.

## 1.5 - OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho visa estudar a unidade Decantador Primário de uma Estação de Tratamento de Esgotos, com o intuito de se detectar, através de procedimentos experimentais, envolvendo o uso de traçadores, parâmetros, tais como tempo de residência, vazão de operação, percentual de volume de esgoto inacessível ao traçador no decantador; enfim, pretende-se fazer uma Modelagem Hidrodinâmica do equipamento em apreço, para que se consiga ter uma idéia precisa de suas condições de funcionamento.

Uma comparação entre os comportamentos de diversos traçadores fluorescentes e radioativos é também mostrada.

Foi determinada também a conservação do traçador, através do cálculo do Balanço de Massas.

Procurou-se adaptar modelos de fluxo hidráulico conhecidos ao fluxo real existente, sendo que os modelos testados foram diferentes combinações dos modelos ideais de fluxo tipo pistão, laminar e de mistura perfeita.

## I.6 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo II é feita uma abordagem da técnica de estímulo-resposta, da distribuição dos tempos de residência (D.T.R.), de parâmetros associados à D.T.R., um estudo de modelos de escoamento ideais existentes, inclusive com aplicação à tanques de decantação e finalmente um estudo das principais disfunções que ocorrem na prática em sedimentadores.

O Capítulo III descreve a Estação de Tratamento estudada, apresenta a metodologia de trabalho e os materiais aplicados, contendo dados básicos dos traçadores e os procedimentos de campo, de coleta e preparação das amostras para análises feitas em laboratório.

O Capítulo IV apresenta os resultados experimentais, uma seleção e análise de cada experiência, a comparação entre diferentes tipos de traçadores, a escolha dos modelos que melhor se ajustaram aos resultados experimentais e uma discussão

final dos resultados obtidos.

Finalmente, o Capítulo V apresenta as conclusões e recomendações após todo o trabalho desenvolvido e devidamente discutido.

## CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE MODELAGEM DE  
ESCOAMENTO EM EQUIPAMENTOSII.1 - DEFINIÇÕES BÁSICAS

DANCKWERTS [1], em trabalho efetuado em 1953, realizou as primeiras pesquisas no sentido de estudar e modelar o escoamento de fluidos em equipamentos. Posteriormente LEVENSPIEL [2] sintetizou os trabalhos de DANCKWERTS, introduzindo novos conceitos e ampliando a análise do escoamento e de modelos teóricos aplicáveis, particularmente, a reatores químicos.

## II.1.1 - A TÉCNICA DE ESTÍMULO-RESPOSTA

O conhecimento real do escoamento em equipamentos é muito difícil de ser atingido. O conhecimento parcial, macroscópico, pode ser obtido, utilizando-se a técnica de estímulo e resposta. Por essa técnica, um traçador é introduzido no equipamento, na forma de estímulo  $X(t)$  ou sinal, que pode ser de qualquer tipo (degrau unitário, pulso unitário, impulso senoidal, etc), sendo a resposta a saída do equipamento  $Y(t)$ , registrada e analisada (FIGURA 2.a).

Neste trabalho, apenas o estímulo tipo pulso instantâneo unitário (Delta de Dirac) foi empregado e, portanto, na análise se limitará a este tipo de estímulo, porque ele é de fácil aplicação e atende de forma satisfatória ao que se propõe este trabalho.



FIGURA 2.a - INTRODUÇÃO DE ESTÍMULO ( TRACADOR ) EM UM EQUIPAMENTO (  $x(t)$  ) E SUA RESPOSTA (  $y(t)$  )

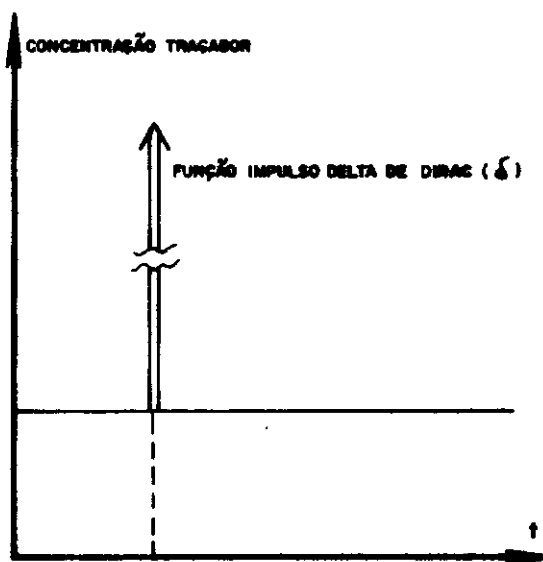


FIGURA 2.b - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE INJEÇÃO INSTANTÂNEA DE UM TRACADOR NA CORRENTE DE ENTRADA DE UM EQUIPAMENTO:

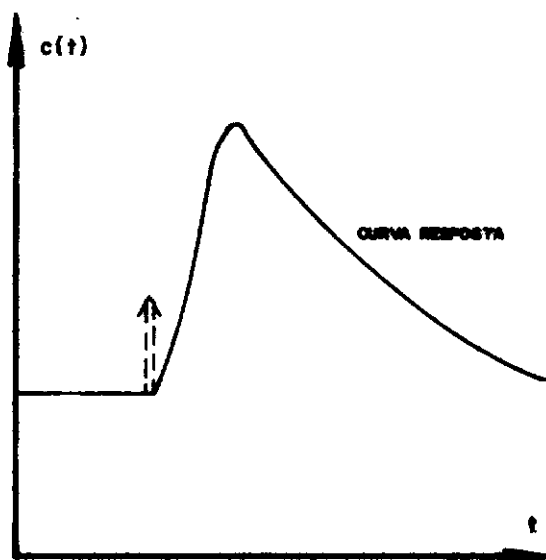


FIGURA 2.c. - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UMA CURVA-RESPOSTA A UMA INJEÇÃO DO TIPO PULSO INSTANTÂNEO.

O impulso Delta de Dirac (instantâneo e unitário), consiste na injeção instantânea distribuída na seção transversal, de uma quantidade conhecida de traçador, na corrente de entrada do equipamento, conforme ilustrado na FIGURA 2.b.

O estímulo Delta de Dirac, instantâneo e unitário, é matematicamente definido por:

$$\delta(t-t_0) = \infty \text{ para } t=t_0$$

$$\delta(t-t_0) = 0 \text{ para } t \neq t_0$$

$$\int_0^{\infty} \delta(t-t_0) dt = 1 \quad (1)$$

onde  $t$  = tempo qualquer  $t_0$  = tempo inicial

A transformada de Laplace deste estímulo, é:

$$\mathcal{L}[\delta(t-t_0)] = e^{-t_0 s} \quad (2)$$

No caso do estímulo se der no instante  $t_0=0$

$$\mathcal{L}[\delta(t)] = 1 \quad (3)$$

DANCKWERTS [1] introduziu a notação de denominar a resposta a uma injeção do tipo pulso instantâneo de curva  $\phi$  (FIGURA 2.c), que é uma curva normalizada em relação a um valor de referência  $C_0$ , onde:

$$C_0 = \frac{M}{V}$$

sendo:

$M$  = massa inicial do traçador injetado

$V$  = volume do equipamento onde foi feita a injeção

$$\bar{C}_o = \frac{Q \int_0^{\infty} C(t) dt}{V}$$

ou ainda pode ser escrito

$$C_o = \int_0^{\infty} \frac{C(t) dt}{\tau} \quad (4)$$

onde:  $\tau = \frac{V}{Q}$  = tempo de passagem do fluido, no equipamento

$Q$  = vazão do fluido onde o traçador foi injetado.

## II.1.2 - O CONCEITO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Para que se possa modelar e se ter uma idéia de quanto um equipamento real, se aproxima do Modelo Teórico, isto é, tentar aplicar um ou mais modelos a partir dos resultados obtidos, utiliza-se a noção de Função de Transferência. O objetivo primordial da aplicação deste conceito, é o de se ampliar o potencial matemático de análise, tornando mais criteriosa a seleção de modelos teóricos aplicáveis às condições reais de escoamento.

Neste tipo de enfoque, o equipamento é considerado uma "caixa preta", submetida a um estímulo  $X(t)$  à entrada e apresentando uma resposta  $Y(t)$ . na saída.

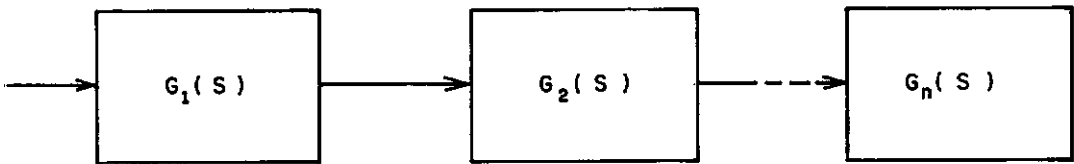
A função de transferência  $G(S)$  é a relação entre as transformadas de Laplace da resposta e do estímulo:

$$G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} \quad (5)$$

Quando  $X(t) = \delta(t)$  impulso instantâneo unitário

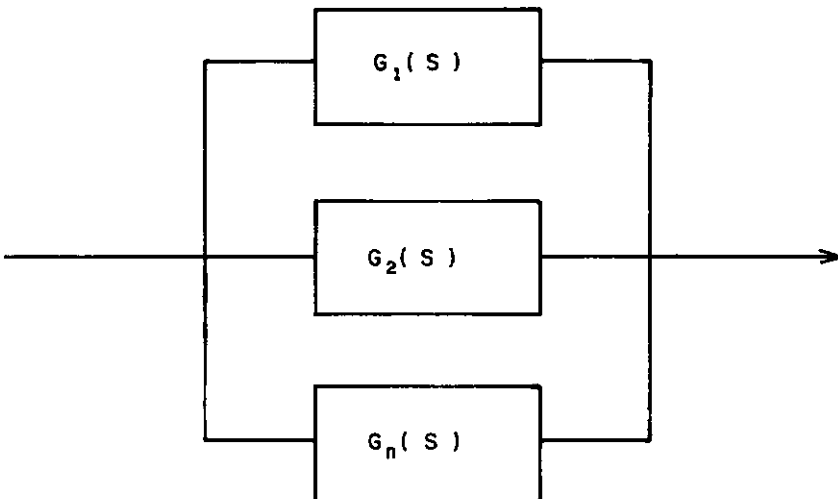
$$X(S) = 1 \rightarrow G(S) = Y(S)$$

Se o escoamento no equipamento for caracterizado por regiões em série de distintos comportamentos hidrodinâmicos, a função de transferência global será representada pelo esquema abaixo:



$$\text{Sendo } G(S) = G_1(S) \cdot G_2(S) \cdot \dots \cdot G_n(S) \quad (6)$$

Caso essas regiões estejam em paralelo, conforme o esquema abaixo, a função de transferência será :



$$\text{Sendo } G(S) = G_1(S) + G_2(S) + \dots + G_n(S) \quad (7)$$

Um equipamento pode, em muitos casos, ser considerado como um sistema complexo, constituído de diferentes regiões correspondentes a diferentes tipos de escoamento, cada um ca-



racterizado por uma função de transferência. A função de transferência global  $G(S)$ , será uma combinação das funções de transferência elementares; conforme sua forma de combinação.

### II.1.3 - DISTRIBUIÇÃO DOS TEMPOS DE RESIDÊNCIA

DANCKWERTS [1] definiu quantitativamente as funções de distribuição de idades.

A idade de um elemento fluido, é o tempo que passa entre a entrada do elemento no equipamento e um instante dado, sendo portanto, menor ou igual ao tempo de residência.

O tempo de residência de uma porção ou elemento de fluido, é o tempo decorrido desde sua entrada até sua saída do equipamento.

A distribuição de tempos de residência ou a frequência de distribuição de idades de um fluido à saída de um equipamento é representada pela função  $E(t)$ , cujas propriedades básicas são:

a) A probabilidade das partículas terem idades compreendidas entre 0 e  $\infty$  é igual ao valor 1:

$$\int_0^t E(t) dt = 1 \quad (8)$$

b) A fração do fluido na saída, com idade menor do que  $t$  é:

$$\int_0^t E(t') dt' \quad (9)$$

onde  $t'$  = tempo referente à idade inferior a  $t$ .

c) A fração de material com idade superior a  $t$ ,  $\bar{e}$ :

$$\int_0^{\infty} E(t') dt' = 1 - \int_0^t E(t') dt' \quad (10)$$

Quando o impulso instantâneo unitário (função Delta de Dirac)  $\bar{e}$  aplicado à entrada do equipamento, todos os elementos de traçador entram no mesmo instante no equipamento (mesma origem de idades), portanto, a idade dos elementos à saída,  $\bar{e}$  idêntica à distribuição de tempos de residência:

A função  $E(t)$   $\bar{e}$  definida por:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} = \frac{C(t)}{Co. \tau} \quad (11)$$

A dimensão de  $E(t)$   $\bar{e}$   $(T^{-1})$ , sendo uma função de distribuição de tempos de residência.

A curva  $E(t)$  pode ser normalizada, passando a ser descrita na forma adimensional, sendo que para tanto, usa-se a variável  $\theta$ , onde:

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad (12)$$

A relação entre  $E(t)$  e  $E(\theta)$   $\bar{e}$  expressa da seguinte forma:

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = \int_0^{\infty} E(\theta) d\theta = 1$$

$$\tau E(t) = E(\theta) \quad (13)$$

#### II.1.4 - OBTENÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA A PARTIR DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A curva  $\phi(t)$  experimental, é a curva da variação da concentração de traçador com o tempo medida à saída do equipamento, quando um estímulo tipo pulso instantâneo unitário de traçador é aplicado à entrada do equipamento.

Em nossos equipamentos, a massa de traçador injetada era conhecida e o volume do equipamento estimado com razoável precisão, podendo dessa forma  $C_0$  ser calculado. Desse modo a função  $E(t)$  podia ser calculada para cada ponto experimental.

O conhecimento da vazão de operação ( $Q$ ), permite o cálculo do tempo de passagem ( $\tau = V/Q$ ), e conseqüentemente, da função  $E(\theta)$ ; através da equação (13).

#### II.1.5 - PARÂMETROS ASSOCIADOS À DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA (D.T.R.)

Inúmeros parâmetros, associados à D.T.R. nos permitem verificar desvios de comportamento dos dados experimentais, em relação aos modelos de comportamento ideais.

Os principais parâmetros, são:

a) Tempo médio de residência ou média temporal ( $\bar{t}$ ):

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt}, \text{ para funções contínuas (14)}$$

$$\text{ou } \bar{t} = \frac{\sum t C(t) \Delta t}{\sum C(t) \Delta t}, \text{ para funções discretas (15)}$$

O tempo médio de residência quando diferente do tempo de passagem  $\tau$ , permite constatar casos particulares de desvios da idealidade tais como zonas mortas, dispersões na entrada, saída do equipamento, e etc.

b) A variância  $\bar{e}$  dada por:

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \text{ para funções contínuas (16)}$$

$$\text{ou } \sigma^2 = \frac{\sum (t - \bar{t})^2 C(t) \Delta t}{\sum C(t) \Delta t} \text{ para funções discretas (17)}$$

c) A variancia normalizada  $\bar{e}$  dada por:

$$\sigma_{\theta}^2 = \sigma^2 / \tau^2 \quad (18)$$

d) A variancia pode ser também normalizada em relação à média (nos casos em que  $\tau$  não é conhecido)

$$\sigma_{\theta'}^2 = \sigma_t^2 / \bar{t}^2 \quad (19)$$

Outros parâmetros associados à Distribuição de Tempos de Residência, estão definidos e listados no Apêndice II. Estes parâmetros são utilizados não apenas para indicar desvios em relação aos modelos de escoamento ditos ideais, como também para estimar os parâmetros dos modelos teóricos que procuram re

presentar os escoamentos reais.

## II.2 - MODELOS DE ESCOAMENTO - APLICAÇÕES À TANQUES DE DECANTAÇÃO

### II.2.1 - CONCEITUAÇÃO GERAL

Para se determinar o comportamento hidrodinâmico de um equipamento, dever-se-ia avaliar o que acontece à cada partícula de fluido que passa através dele, o que exigiria um trabalho de dimensões inatingíveis.

A determinação do comportamento global do fluido no equipamento pode ser feita, indiretamente, através da técnica de estímulo-resposta. Nesse caso, o sistema representado pelo equipamento é estimulado com algum tipo de traçador, e a resposta ou reação do sistema ao estímulo é determinada experimentalmente. Analisando-se a resposta dada, obtêm-se a informação desejada sobre o sistema. Trata-se, evidentemente, de uma informação de natureza macroscópica.

A informação obtida através do uso de traçadores, é aplicada diretamente em conjunto com modelos de escoamento.

O escoamento do fluido em equipamentos, pode apresentar em geral, características compreendidas entre dois casos ideais: o escoamento de mistura perfeita e o escoamento tipo pistão.

No modelo de mistura perfeita, o traçador é instantane

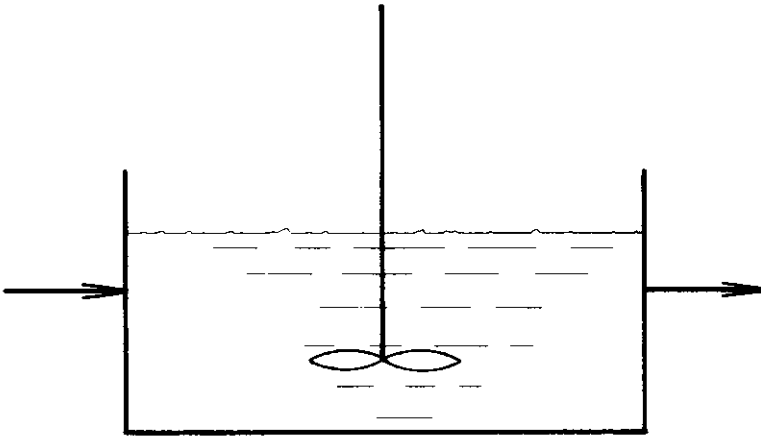


FIGURA 3.a. - MODELO DE ESCOAMENTO TIPO  
MISTURA PERFEITA - SIMBOLOGIA



FIGURA 3.b. - MODELO DE ESCOAMENTO  
TIPO PISTÃO - SIMBOLOGIA.

neamente distribuído uniformemente no volume do equipamento. A simbologia para esse modelo está representada na FIGURA 3.a.

A sua D.T.R.  $\bar{e}$ :

$$E(\theta) = \bar{e}^\theta \quad (20)$$

e a sua função de transferência  $\bar{e}$ :

$$G(S) = \frac{1}{1+\tau S} \quad (21)$$

No modelo pistão, o traçador  $\bar{e}$  uniformemente distribuído numa seção transversal  $\bar{a}$  entrada no equipamento, e ele se desloca como uma frente de velocidade uniforme e constante, característica de um escoamento pistonado. A sua representação  $\bar{e}$  vista na FIGURA 3.b.

A sua D.T.R.  $\bar{e}$ :

$$E(\theta) = \delta(\theta-1) \quad (22)$$

A sua função de transferência  $\bar{e}$ :

$$G(S) = e^{-\tau S} \quad (23)$$

O escoamento tipo pistão corresponde ao deslocamento do estímulo de um tempo correspondente ao tempo de passagem do fluido no equipamento.

Os modelos reais procuram representar as diversas situações de escoamento não compreendidas pelos dois casos ideais.

Os modelos reais podem utilizar vários parâmetros, enquanto os modelos ideais apresentados acima, só utilizam um parâmetro.

O número de parâmetros usados no modelo, indica o seu grau de flexibilidade, e geralmente quando o número de parâmetros aumenta, o modelo é capaz de atender a uma grande gama de condições. Ocorre, em contrapartida, uma menor possibilidade de interpretação física desses parâmetros.

A aplicação dos princípios de balanço de população para a modelagem do escoamento, caracterizando a mistura num equipamento foi formalmente organizada por DANCKWERTS. Ele definiu as funções básicas de distribuição de idade de elementos fluidos, em equipamentos de processo.

Os modelos não ideais, procuram incorporar anomalias e desvios da idealidade devidos a fenômenos de escoamento, que ocorrem no interior dos equipamentos.

Os principais fenômenos existentes são:

a) Escoamento preferencial ("Channeling") - ocorre quando elementos do fluido passam pelo equipamento em menor tempo. (Ocorre em leitos porosos, de geometria inadequada).

b) Curto circuito - ocorre, quando elementos do fluido "by" passam o equipamento, não percorrendo o interior do equipamento.

c) Zonas mortas - são regiões do equipamento, praticamente isoladas ou inacessíveis, onde o fluido nelas aprisiona



do não interage com as regiões ativas. Não há troca de matéria entre as regiões mortas e a fração ativa do equipamento.

d) Zonas estagnantes - são regiões do equipamento, onde o fluido aprisionado interage fracamente com a região ativa. Há troca de matéria entre as zonas estagnantes e a fração ativa, mas essa troca é lenta.

e) Recirculação - ocorre quando parcelas de fluido retornam à entrada ou a pontos no interior do equipamento.

Algumas destas anomalias do escoamento, são detectáveis a partir do exame de curva experimental  $E(\theta)$  e da análise de parâmetros calculados a partir dela.

Os gráficos de Concentração x Tempo, nos quais o decaimento da curva de concentração é muito lento (chamado de "cauda longa") exprimem um escoamento que possui um percentual de zonas estagnantes elevado.

No caso de equipamentos com curto-circuito, ocorrem oscilações na curva de concentração, nos primeiros instantes após a injeção. Alguns dos parâmetros determinados, que bem podem caracterizar o escoamento real, são, a relação  $\bar{t}/\tau$ , o índice de tempo de detenção modal e o índice de dispersão. (Estes parâmetros são apresentados no Apêndice II).

Diversos modelos foram propostos, para representar os escoamentos não ideais. Entre os mais conhecidos pode-se citar o modelo de Dispersão Axial (DANCKWERTS [1]), os modelos de tanques em série com zonas mortas e curto-circuito e modelos com

zonas estagnantes.

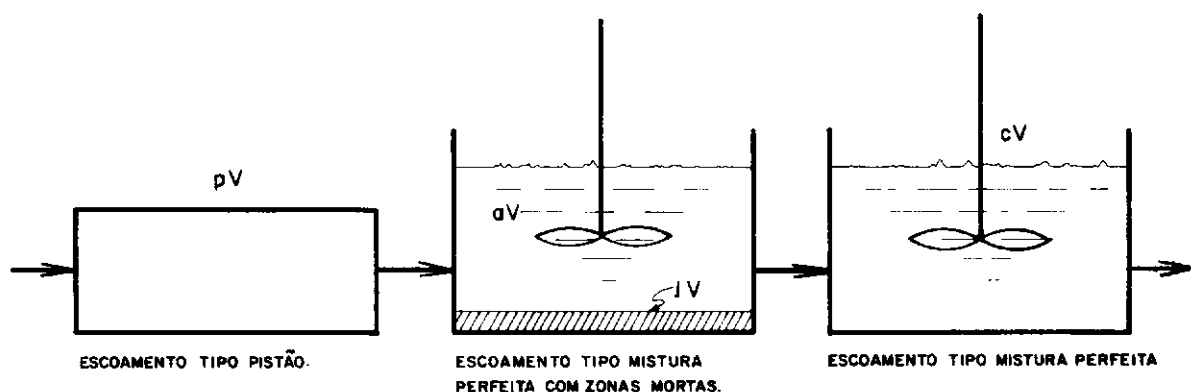
Apresentaremos a seguir, alguns modelos selecionados a partir do exame de nossos resultados experimentais, que permitem representar satisfatoriamente o escoamento em tanques de decantação. Lembramos que o tanque de decantação primária, é constituído dos seguintes componentes: tanque de mistura do esgoto, tanque de tubulação de alimentação e distribuição ao sedimentador propriamente dito e anel periférico de coleta de sobrenadante.

## II.2.2 - MODELOS APLICÁVEIS A TANQUES DE DECANTAÇÃO

Os modelos simplificados empregados na amostragem dos dados experimentais foram:

### II.2.2.1 - MODELO A - MODELO DE TRÊS TANQUES EM SÉRIE (FIGURA 4)

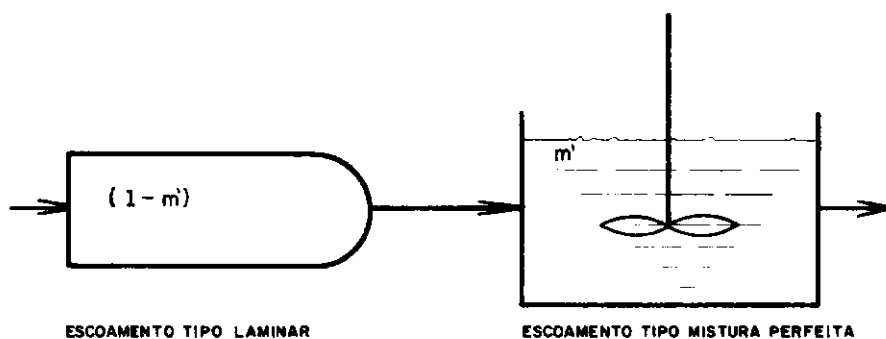
A primeira região é assumida como escoamento tipo pistão (tubulação afluente ao Decantador Primário, vinda da caixa de mistura). A segunda região é assumida como escoamento perfeitamente agitado (CSTR), representa a caixa de mistura na entrada do Decantador Primário além de regiões do próprio Decantador, eventualmente próximas às zonas de entrada e de saída. Além disso, no fundo desse tanque, há uma camada de lodo, que foi considerada como característica de zonas mortas, não havendo interação entre esta camada, e o volume misturado. Finalmente, a terceira região é assumida como um escoamento tipo mistura perfeita, sem camada de lodo e zonas mortas, representando o canal circundante de coleta do efluente do Decantador Primário.



ONDE :  $V =$  VOLUME TOTAL  $(p + a + l + c) = 1$

$p, a, l$  e  $c$  - PERCENTUAIS DE VOLUME DE CADA REGIÃO, SENDO QUE  $a + l$  REPRESENTA O PERCENTUAL DO VOLUME TOTAL, DO SEDIMENTADOR PROPRIAMENTE DITO.

FIGURA 4 - MODELO DE ESCOAMENTO DE TRÊS REGIÕES EM SÉRIE, SENDO UMA EM ESCOAMENTO TIPO PISTÃO, UMA EM ESCOAMENTO TIPO MISTURA PERFEITA COM CAMADA DE LODO E UMA OUTRA COM ESCOAMENTO TIPO MISTURA PERFEITA SIMPLES.



ONDE :  $m'$  = PERCENTUAL DE VOLUME DA FASE PERFEITAMENTE AGITADA.

FIGURA 5 - MODELO DE DOIS TANQUES EM SÉRIE, SENDO O PRIMEIRO UM ESCOAMENTO TIPO LAMINAR E O SEGUNDO, ESCOAMENTO TIPO MISTURA PERFEITA.

A FIGURA 4 mostra o modelo teórico, seus parâmetros e a eventual representação física desses elementos, no decantador. No caso desse modelo escolhido, a função de transferência  $G_0(S)$  representa o escoamento tipo pistão e a função de transferência  $G_1(S)$  representa o escoamento tipo mistura perfeita com zonas mortas e  $G_2(S)$  o escoamento de mistura perfeita.

Podemos chegar à equação do modelo, assumindo as funções de transferência a seguir, para cada região em série:

Por analogia com a equação (23), a função de transferência  $G_0(S)$  é dada por:

$$G_0(S) = e^{-\tau_P \cdot S} \quad (24)$$

que representa o volume  $pV$  do fluido em escoamento tipo pistão.

A função de transferência  $G_1(S)$  resulta do balanço material aplicado à segunda região completamente agitada, e pode ser escrita da seguinte forma:

$$QC_0 - QC_1 = aV \cdot \frac{dC_1}{dt} \quad (25)$$

equação esta, que representa a fração de volume  $aV$  do fluido em escoamento tipo mistura perfeita

A equação (25) pode ser reescrita da forma:

$$C_0(S) - C_1(S) = a \tau S C_1(S) \Rightarrow 1 = \frac{C_1(S)}{C_0(S)} + a \tau S \frac{C_1(S)}{C_0(S)} \Rightarrow$$

$$1 = G_1(S) + a \tau S G_1(S) \Rightarrow 1 = G_1(S)(1 + a \tau S)$$

Finalmente:

$$G_1(S) = \frac{1}{1+a\tau S} = \frac{1/a}{1/a+\tau \bar{S}} = \frac{1}{a} \left( \frac{1}{1/a+\tau \bar{S}} \right) \quad (26)$$

Por analogia com a equação (21), ou através de balanço material, pode-se chegar a:

$$G_2(S) = \frac{1}{1+c\tau S} \quad (27)$$

que representa a fração de volume cv do fluido em escoamento tipo mistura perfeita.

A função de transferência do modelo (G(S)), é expressa por:

$$G(S) = G_0(S) \cdot G_1(S) \cdot G_2(S) \quad (28)$$

$$G_1(S) \cdot G_2(S) = \frac{1}{(1+c\tau S)(1+a\tau S)} = \frac{1}{ac} \left( \frac{1}{\tau S+1/a} \right) \left( \frac{1}{\tau S+1/c} \right) \quad (29)$$

fazendo-se  $\tau S = \bar{S}$

$$\text{tem-se: } G_1(S) \cdot G_2(S) = \frac{1}{ac} \left( \frac{1}{\bar{S}+1/a} \right) \left( \frac{1}{\bar{S}+1/c} \right) \quad (30)$$

fazendo-se:  $r_1 = \frac{-1}{a}$  e  $r_2 = \frac{-1}{c} \Rightarrow$

$$\Rightarrow G_1(S) \cdot G_2(S) = \frac{1}{ac} \times \left( \frac{1}{\bar{S}-r_1} \right) \left( \frac{1}{\bar{S}-r_2} \right) \quad (31)$$

$$\text{donde: } G(S) = e^{-p \cdot \bar{S}} \frac{1}{ac} \left( \frac{1}{\bar{S}-r_1} \right) \left( \frac{1}{\bar{S}-r_2} \right) \quad (32)$$

A inversão da equação acima é relativamente trivial e

direta, podendo ser obtida através do uso de Tabela de Inversão de Transformadas, de uso generalizado em matemática, conduzindo à distribuição de tempos de residência do modelo.

$$\text{daí: } E(\theta) = \frac{1}{ac} \cdot \frac{1}{(r_1 - r_2)} \left[ e^{r_1(\theta - p)} - e^{r_2(\theta - p)} \right] \quad (33)$$

$$\text{Fazendo-se: } r_1 - r_2 = \left( \frac{-1}{a} + \frac{1}{c} \right) = \frac{-c + a}{ac} = \frac{(a - c)}{ac} \quad (34)$$

$$\text{obtem-se: } E(\theta) = \frac{1}{(a - c)} \left[ e^{\left[ \frac{-(\theta - p)}{a} \right]} - e^{\left[ \frac{-(\theta - p)}{c} \right]} \right] \quad (35)$$

#### II.2.2.2 - MODELO B - MODELO DE DOIS TANQUES EM SÉRIE (FIGURA 5)

O primeiro tanque é assumido como escoamento laminar (representando a parte do escoamento no interior do Decantador Primário), a segunda região é assumida como escoamento perfeitamente agitado, representando a caixa de mistura, regiões misturadas à entrada e à saída do próprio Decantador Primário e o canal circundante de coleta do efluente do Decantador Primário.

A equação para o escoamento laminar, foi apresentada por DANCKWERTS [1], que aplicada ao modelo representado na FIGURA 5, assume a forma

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1(\theta) = \frac{1}{(1 - m')} \cdot \frac{(1 - m')^3}{2 \theta^3} \quad \text{p/a } \theta > \theta_0 \end{array} \right. \quad (36)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1(\theta) = 0 \end{array} \right. \quad \theta \leq \theta_0 \quad (37)$$

$$\theta_0 = \frac{(1 - m')}{2} \quad (38)$$

O escoamento de mistura perfeita em série com um laminar  $\tilde{e}$  caracterizado por:

$$E_2(\theta) = \frac{1}{m} e^{-(\theta - \theta_0)/m} = \frac{1}{m} e^{\theta_0/m} \quad (39)$$

$E(\theta)$  pode ser obtida pela resolução do produto de convolução abaixo:

$$E(\theta) = \int_{\theta_0}^{\theta} E_1(T) \cdot E_2(\theta - T) dT \quad (40)$$

$$E(\theta) = 0 \quad \text{p/a} \quad \theta \leq \theta_0 \quad (41)$$

A resolução desta integral está mostrada em detalhe no Apêndice I.

A expressão de  $E(\theta)$  para esse modelo pode ser escrita na forma:

$$E(\theta) = A \cdot e^{-\theta/m'} \left[ B(\theta) - B(\theta_0) \right] \quad (42)$$

$$\text{onde: } B(\theta) = \left\{ \begin{aligned} & \frac{-1}{2} \frac{e^{\theta/m'}}{\theta^2} + \frac{1}{2m'} \left[ \frac{-e^{\theta/m'}}{\theta} + \frac{1}{m'} \left( \ln \theta + \frac{\theta}{m'} + \frac{\theta^2}{4m'^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{3}{18m'^3} + \frac{4}{96m'^4} + \frac{5}{600m'^5} + \frac{6}{432m'^6} + \frac{7}{35280m'^7} + \frac{8}{322560m'^8} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

$$\text{Sendo } \theta_0 = \frac{(1 - m')}{2} \quad (44)$$

$$\text{e } A = \frac{(1 - m')^2}{2m'} \cdot e^{(1 - m')/2m'} \quad (45)$$



### II.3 - TRABALHOS ANTERIORES COM MODELAGEM DE UNIDADES DE TRATAMENTO

MURPHY e BOIKO (4) estudaram a mistura longitudinal em tanques de aeração com fluxo em espiral em um aerador de laboratório e posteriormente em aerador em escala real, com o auxílio de Rodamina B (traçador fluorescente), introduzido instantaneamente na entrada do tanque de aeração.

A curva-resposta teórica e a curva experimental obtidas através da injeção de traçador foram comparadas entre si, sendo que a concordância verificada, indicou que o Modelo de Dispersão Axial empregado, descreveu a mistura longitudinal que ocorreu no tanque de aeração em escala real.

Esses autores concluíram que os estudos experimentais com aeradores em escala real reforçaram a idéia de que o Modelo de Dispersão Axial descreve adequadamente as condições de mistura longitudinal em aeradores com escoamento em espiral.

Em outro trabalho, MURPHY e TIMPANY (5) fizeram um estudo da mistura em tanques de aeração. Construíram um modelo de laboratório para estudar a aplicabilidade do Modelo de Dispersão

O traçador fluorescente empregado foi a Rodamina Lissamina B-200 ("color index" 45100). A curva resposta à função impulso injetada foi monitorada continuamente através de um fluo

rĩmetro conectado a um registrador grãfico. Alẽm dos testes em modelo de laboratõrio, foram efetuados testes em protõtipo em escala real, em um Tanque de lodo ativado, com aeraçãõ com fluxo em espiral. O Modelo Matemãtico que melhor proporcionou concordãncia entre as curvas experimentais e as curvas teõricas foi o Modelo de Dois Tanques Desiguais em Sẽrie, com Mistura Perfeita.

Posteriormente, MURPHY e WILSON (6) procuraram caracterizar o grau de mistura em Lagoas Aeradas. Partiram do pressuposto, de que a caracterĩstica hidrãulica de mistura de lagoa aerada nãõ ẽ necessariamente de mistura completa, como admitiam ECKENFELDER e FORD (10). Para aqueles autores, uma lagoa aerada ẽ no mĩnimo parcialmente misturada, e nãõ completamente misturada. O traçador empregado nas experiẽncias foi a Rodamina WT.

Foram testados diferentes Modelos de Tanques em Sẽrie e o exame dos valores dos somatõrios dos quadrados dos desvios indicou o Modelo de Dispersãõ e o Modelo de Tanques em Sẽrie, tipo Mistura Perfeita, de tamanhos diferentes como os que melhor se ajustaram aos dados experimentais.

CHEN, FAN e ERICKSON ( 7) desenvolveram um programa de computador para um projeto de estações de tratamento de esgostos. Elaboraram um programa de simulações para algumas unidades de tratamento servindo-se de dois tipos de algoritmos que podem ser usados para solucionar as equações do processo de tratamento.

Foram obtidos resultados de simulação para tratamentos primário e secundário, usando-se dados experimentais e fixando-se alguns parâmetros básicos.

SANT'ANNA (3) estudou a modelagem do escoamento e aspectos referentes à mistura e a transferência de oxigênio dentro de três tipos de equipamentos mais empregados no tratamento de águas residuais; ou seja: filtros biológicos, tanques de aeração e discos biológicos. Para o uso de tanques de aeração, ele analisou a influência dos seguintes parâmetros: vazão de ar, tempo de passagem do líquido, tipo e arranjo dos difusores. Estudou também o fenômeno de circulação do líquido no interior dos tanques de aeração.

FITZ (9) empregou os traçadores fluoresceína Sódica e Rodamina WT, na obtenção de informações a respeito da deposição de sólidos em sedimentadores. Obteve curvas que representavam a distribuição de idades de todos os elementos fluidos e sólidos que saíam de um equipamento em condições experimentais semelhantes (tanque retangular com um fundo falso), no qual se podiam variar a profundidade e a largura do tanque, assim como o tipo de escoamento e o tipo de afluente ao sedimentador. Estabeleceu também um modelo misto, composto de regiões com escoamento com retro-mistura, regiões com fluxo tipo pistão, regiões com zonas mortas, etc, as quais teriam função de distribuição de idades na saída do modelo, semelhantes à função de distribuição de idades experimentais. Finalmente utilizou esse modelo misto, para fazer a comparação entre a função de distribuição de idades previstas para o reator experi

mental e a função de distribuição de idades realmente obtida.

Com a utilização das técnicas experimentais que vêm descritas no Capítulo III e aplicando-se os Modelos A e B apresentados neste Capítulo, poderemos definir as condições de escoamento por que passa o sedimentador estudado na Estação de Tratamento de Esgotos escolhida.

### CAPÍTULO III

#### MATERIAIS E MÉTODOS

##### APLICAÇÃO DOS MODELOS E DA TÉCNICA DE TRAÇADORES

###### A UMA SITUAÇÃO REAL-METODOLOGIA APLICADA

Serão apresentados neste Capítulo os procedimentos empregados na realização dos ensaios experimentais com traçadores, no Decantador Primário da Estação de Tratamento de Esgotos da Ilha do Governador (ETIG), que está representada esquematicamente pelas FIGURAS (6) e (7).

#### III.1 - SELEÇÃO DE TRAÇADORES

Os traçadores são substâncias que são incorporadas aos fluidos para diferenciá-los ou marcá-los.

O traçador, para ser considerado adequado, deve ser conservativo, ter comportamento idêntico ao do traçado, ser facilmente detectado (isto é, ter alta sensibilidade e seletividade), ter baixo BKG ("background" - isto é, existência prévia no líquido a ser traçado), não deve introduzir perturbações nas características do meio, deve ser facilmente obtido, transportado, manuseado e de baixo custo.

Os traçadores salinos e os corantes, embora muito empregados em estudos de pequenos escoamentos, apresentam dificuldades

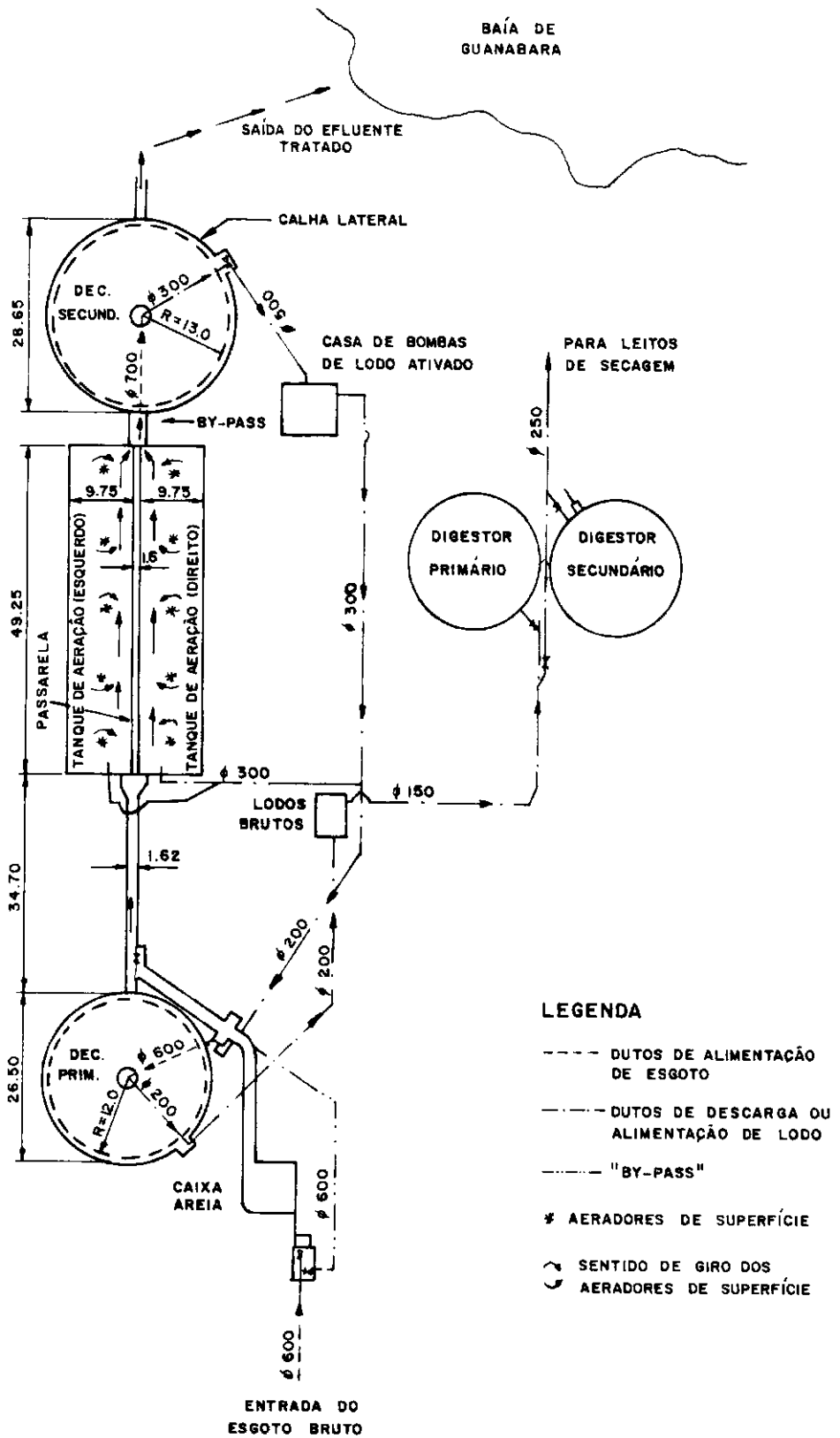


FIGURA 6 - PLANTA ESQUEMÁTICA ETIG

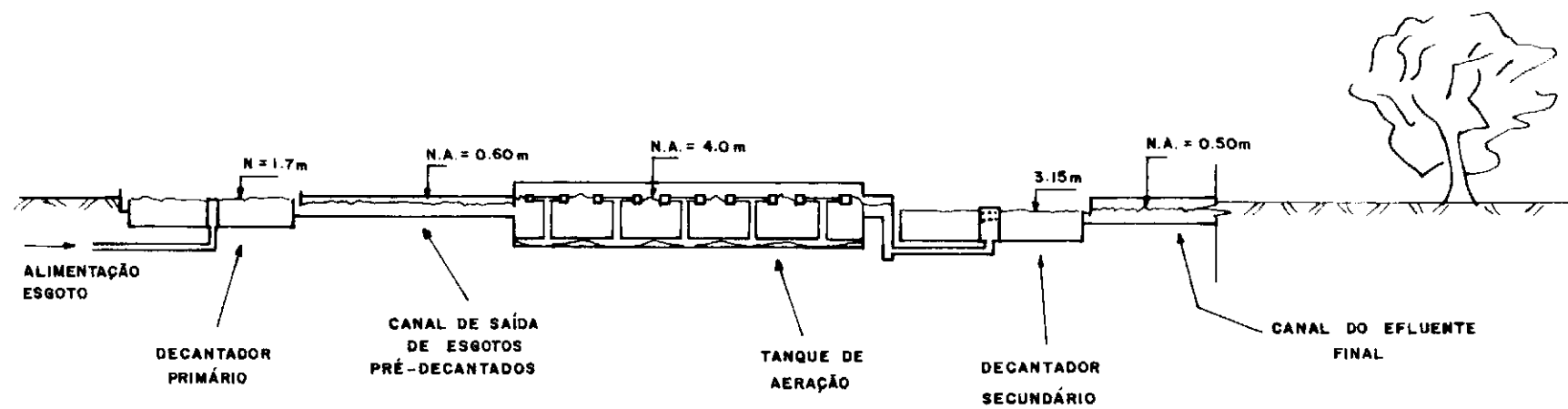


FIGURA 7 - CORTE ESQUEMÁTICO ETIG

dades quando aplicados em Estações de Tratamento de Esgotos, devido à alta concentração de "background", o que aliado à baixa sensibilidade de detecção, acarretaria no emprego de grandes massas de traçador, cujo manuseio seria difícil, provocaria distorções no escoamento, resultando também em custos elevados dos experimentos.

Como exemplo de custos de traçadores, fornecemos na Tabela III.1 o preço do kilograma de cada traçador empregado, transformados em ORTN's (no caso de fluorescentes) e de cinco pastilhas de Bromo 82 (excluído o custo de transporte).

TRAÇADOR		CUSTO
Amidorodamina G-Extra	- 6,4 ORTN	/Kg
Fluoresceína-Sódica (Uranina)	- 6,5 ORTN	/Kg
Rodamina B	- 7,6 ORTN	/Kg
Eosina	- 7,4 ORTN	/Kg
Bromo 82	- 3,9 ORTN	(5 pastilhas de 235 mCi para três experiências)

TABELA III.1 - CUSTOS DOS DIFERENTES TRAÇADORES EMPREGADOS

Nas experiências em que se aplicou traçadores fluorescentes, a massa utilizada foi de 20 gramas, o que corresponde a um custo máximo de 0,152 ORTN's por experiência, quando se em



pregou a RODAMINA B (traçador fluorescente mais caro).

Comparando-se esse valor com o custo de pastilhas de Bromo 82 empregadas por experiência (1,309 ORTN's), vemos que os traçadores radioativos são em princípio os mais caros, embora sejam considerados os mais precisos, devido a sua pouca tendência à perda. São porém, de difícil manuseio, necessitando de cuidados especiais de proteção radiológica.

Em geral, a perda de traçadores em Estações de Tratamento de Esgotos ocorre por adsorção à matéria orgânica existente no esgoto. Empregando-se traçador radioativo com fórmula química de baixa tendência de adsorção, o efeito acima citado é minorado, podendo até ser desprezível.

O único traçador radioativo utilizado neste estudo, foi o Bromo-82, porque além de possuir nível de toxidez moderado (classe 3) é de fácil irradiação, tem meia-vida adequada ao tempo de duração das experiências e a sua emissão de partículas gama se situa em níveis de energia médios.

As suas principais características são as que se seguem [12]:

Fórmula química - K Br (brometo de potássio)

Tempo de Meia-Vida ( $T_{1/2}$ ) - 36,0 horas

Emite uma partícula  $B^-$ , com 0,444 Mev máx e gamas principais que se seguem:

$\gamma_1$	- 0,5541 Mev	- 66%	de probabilidade de ocorrência
$\gamma_2$	- 0,6187 Mev	- 41%	" "
$\gamma_3$	- 0,6984 Mev	- 27%	" "
$\gamma_4$	- 0,7769 Mev	- 83%	" "
$\gamma_5$	- 0,8276 Mev	- 25%	" "
$\gamma_6$	- 1,0441 Mev	- 29%	" "
$\gamma_7$	- 1,3170 Mev	- 26%	" "
$\gamma_8$	- 1.4750 Mev	- 17%	" "

Os traçadores fluorescentes foram empregados na maioria das experiências realizadas neste trabalho, e os escolhidos es tão indicados na TABELA III.2.

TRAÇADOR (NOME MAIS COMUM)	"COLOR INDEX"	$\lambda$ exc.max	$\lambda$ flu.max.
Amido Rodamina G-Extra	45220	530	550
Fluoresceína Sódica(Urâni- na)	45350	490	520
Eosina	45400	517	530
Rodamina B	45170	555	575

TABELA III.2 - "COLOR INDEX", COMPRIMENTOS DE EXCITAÇÃO E DE FLUORESCÊNCIA DOS TRAÇADORES EMPREGADOS

### III.2 - FATORES QUE INFLUENCIAM NA FLUORESCÊNCIA

Como fatores que influenciam negativamente na fluorescência de amostras traçadas, podemos listar:

a) A temperatura da amostra (que é um fator reversível, isto é, voltando-se à temperatura inicial, retorna-se à fluorescência original) pode aumentar ou diminuir a fluorescência, de acordo com a sua variação. A fluorescência obtida é inversamente proporcional à variação da temperatura da amostra.

Nos traçadores empregados os percentuais de variação da fluorescência em relação a temperatura são indicados na TABELA III.3.

TRAÇADOR	VARIAÇÃO NA FLUORESCÊNCIA/VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (% °C)
Fluoresceína-Sódica (Uranina)	0,36
Rodamina B	2,80
Amidorodamina G-Extra	2,80
Eosina	-

TABELA III.3 - VARIAÇÃO DA FLUORESCÊNCIA COM A TEMPERATURA

No caso das experiências realizadas, as condições de temperatura durante a análise das amostras foram praticamente constantes e as possíveis correções a serem efetuadas são irrisó

rias, situando-se ao nível de precisão obtido no trabalho.

b) O foto-decaimento (que é irreversível), é outro fator que afeta negativamente a fluorescência. O traçador mais sensível a fenômenos de foto-decaimento é a Eosina, vindo a seguir, pela ordem, a Uranina, a Amidorodamina G-Extra e a Rodamina B, que é a menos sensível, conforme pode ser visto na TABELA III.4.

TRAÇADOR	$t^* \text{   h  }$
Fluorescência Sódica (Uranina)	11
Rodamina B	780
Amidorodamina G-Extra	770
Eosina	6

TABELA III.4 - EFEITOS DO FOTO-DECAIMENTO NOS DIFERENTES TRAÇADORES EMPREGADOS

$$\text{Sendo: } F = F_0 e^{\frac{-0,693 t}{t^*}} \quad (46)$$

onde  $F$  e  $F_0$  - fluorescências final e inicial, respectivamente

$t^*$  - tempo para ocorrer 50% de foto-decaimento

A equação (46) fornece a dependência ao foto-decaimento causado pela luz artificial incidente em água destilada.

Durante a passagem do traçador no equipamento, o fenômeno de foto-decaimento não pode ser controlado, embora o tempo de permanência do traçador tenha sido relativamente pequeno e a não transparência da água de esgoto tenha contribuído como um filtro à luz incidente.

As precauções após a coleta das amostras foram a sua imediata colocação em sacos opacos, o acondicionamento em gavetas no laboratório e a leitura das amostras feita na semi-obscuridade.

c) A adsorção do traçador à material sólido é outro fator praticamente irreversível. O traçador que mais sofre processo de adsorção é a Rodamina B. Os outros traçadores são potencialmente menos sensíveis, embora não haja estudos específicos efetuados em Estações de Tratamento de Esgotos.

d) A fluorescência é afetada pela variação no pH que é um fator reversível [11]. O traçador mais sensível à variação no pH é a fluoresceína sódica. Uma forma de se modificar o pH da amostra para evitar a variação na fluorescência é a utilização de solução tampão, para ajuste do pH antes da leitura. Os outros traçadores empregados praticamente não são sensíveis à variação do pH, dentro da faixa normalmente observada em Estações de Tratamento de Esgotos.

e) O "quenching" é outro fator irreversível [11]. Este fenômeno consiste na inibição química da fluorescência. Por exemplo, o cloro livre reage com o traçador, inibindo a sua fluores

cência. Como a presença de cloro livre no esgoto é de baixíssima concentração, este fenômeno não afetou as medições dos traçadores empregados.

Durante o emprego de traçadores fluorescentes, é recomendável que não se utilizem traçadores que não se adaptem a determinadas condições de trabalho ou que se evitem variações em fatores que podem ser perfeitamente controláveis (por exemplo, o caso do "quenching").

Os traçadores fluorescentes escolhidos para emprego neste trabalho, foram Amidorodamina G-Extra, Rodamina B, Fluoresceína Sódica e Eosina.

Rodamina B tem sido historicamente empregada em diversos trabalhos experimentais em laboratório, em lagoas aeradas e em baías ou estuários, embora não seja um traçador aconselhável para ser usado devido a sua alta tendência de adsorção a material sólido em suspensão a às paredes.

A Fluoresceína é também um traçador bastante conhecido e foi empregada também em trabalhos de laboratórios, sendo considerado um traçador problemático devido a sua alta foto-sensibilidade.

A Eosina também tem sérios problemas de foto-decaimento e é comumente empregada em águas subterrâneas.

Todos os três traçadores acima citados são facilmente

encontrados no Brasil.

A Amidorodamina G-Extra tem sido recentemente utilizada em trabalhos de laboratório e em estação de tratamento de esgoto.

Os principais cuidados no manuseio de traçadores estão descritos no Apêndice III.

#### LOCAL DOS TESTES-

#### III.3 - DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DA ILHA DO GOVERNADOR (ETIG)

A ETIG (ver FIGURAS 6 e 7) é uma estação de tratamento de esgotos sanitários do tipo lodos ativados convencional, que consiste basicamente, no tratamento a nível secundário dos esgotos domésticos, com o emprego de dispositivos denominados aeradores de superfície que introduzem oxigênio da atmosfera no seio da massa líquida, provocando, através da atuação de bactérias aeróbias, a redução de material orgânico existente no esgoto tratado.

O projeto de ETIG foi elaborado em 1969, para ser construída em três etapas, das quais a primeira se encontra em operação, atendendo a 130 Km de rede coletora, correspondendo a uma população estimada em 100.000 pessoas.

A área total da Estação abrange 55000 m<sup>2</sup> e a capacidade

de máxima de tratamento em projeto é de 200,0  $\ell/s$ , na 1ª etapa.

As bacias são esgotadas, pelas elevatórias da Bica, Zumbi, Paranapuã, do Tauã e do Batalhão Riachuelo. O recalque das elevatórias é feito em série, sendo que todo o sistema está interligado entre si.

O grau de tratamento esperado é de redução em 95% da D.B.O. (demanda bioquímica de oxigênio) e s.s. (sólidos em suspensão).

#### III.4 - PARTES CONSTITUINTES DA ESTAÇÃO

##### III.4.1 - ENTRADA DE ESGOTO BRUTO:

Possui uma grade de barras metálicas, que separa os sólidos mais grosseiros do esgoto bruto, isto é, com diâmetros superiores a 1".

##### III.4.2 - ELEVATÓRIA DE ESGOTOS BRUTOS:

A elevatória de esgotos brutos recalca os esgotos afluentes à Estação, através de dois conjuntos motor-bomba com vazão nominal de 70,0  $\ell/s$  e três conjuntos motor-bomba com vazão nominal de 92,0  $\ell/s$ .

Os conjuntos funcionam de acordo com a vazão afluyente



à Estação, que varia de 60,0  $\ell/s$  à 380,0  $\ell/s$ , de acordo com a hora do dia.

#### III.4.3 - CAIXA DE AREIA:

Por concepção, deve provocar a decantação de partículas com diâmetros variando entre 0,1 e 0,2 mm. As suas dimensões são de 2,60 m de comprimento; 2,20 m de largura e 1,53 m de profundidade.

#### III.4.4 - CANAL DE INTERLIGAÇÃO DA CAIXA DE AREIA AO DECANTADOR PRIMÁRIO, COM MEDIDOR DE VAZÃO TIPO CALHA PARSHALL:

O canal possui 20,0 m de comprimento; 1,22 m de largura; 0,71 m de profundidade e 0,08 m/m de declividade de fundo.

Por erro de projeto, o canal apresenta elevado grau de turbulência, o que impede uma correta e eficiente medição de vazão neste canal, que é efetuada com a utilização de um medidor tipo calha parshall em concreto cuja capacidade teórica de medição situa-se entre 17,26 e 1426,3  $\ell/s$ ; com dimensões de 2,17 m de comprimento, 6' de largura máxima e 3' de largura mínima. No local existe uma régua graduada que introduzida em tubo comunicante com a Calha Parshall, permite leitura imediata de vazões.

### III.4.5 - DECANTADOR PRIMÁRIO (VER FIGURA |8|):

Permite a decantação de sólidos em suspensão, como etapa inicial do processo de tratamento, sendo que o tempo de residência projetado nesta unidade, é de duas horas.

O Decantador Primário possui 24 metros de diâmetro 2,40 metros de profundidade máxima e um volume aproximado de 1110 m<sup>3</sup>.

Esta unidade foi escolhida para estudo no âmbito desta tese, de maneira mais aprofundada.

### III.4.6 - CANAL DE INTERLIGAÇÃO DO DECANTADOR PRIMÁRIO À CÂMARA DE AERAÇÃO:

Este canal transporta o esgoto efluente do Decantador Primário para a Câmara de Aeração. Possui 25,40 m de comprimento; 1,62 m de largura e 0,98 m de profundidade.

### III.4.7 - CÂMARA DE AERAÇÃO:

Esta unidade é dividida em duas câmaras independentes, contando com aeradores de superfície, em número de dez, com potência instalada de 2.300 W.

Cada câmara possui 48,75 m de comprimento, 19,50 m

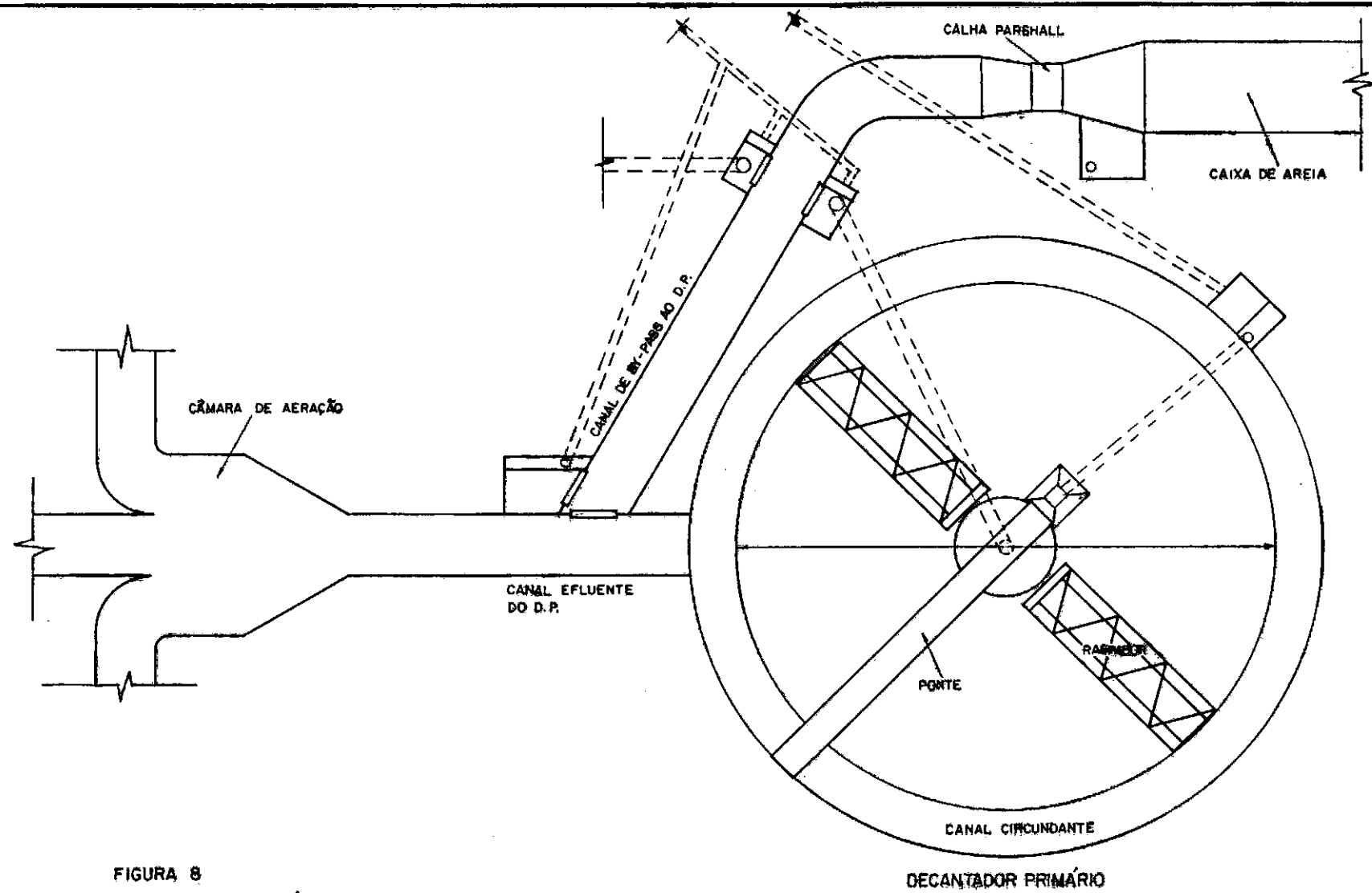


FIGURA 8  
DECANTADOR PRIMÁRIO — ESQUEMA

de largura e 5,03 m de profundidade. O tempo de residência de projeto desta unidade é de 6 horas.

#### III.4.8 - DECANTADOR SECUNDÁRIO

Esta unidade permite a decantação de sólidos em susensão, a nível secundário, como etapa final do processo de tratamento.

O decantador apresenta seção horizontal circular, com diâmetro de 20,0 m; 3,70 m de profundidade e volume aproximado de 1700 m<sup>3</sup>.

O tempo de residência de projeto desta unidade é de 2 horas.

#### III.4.9 - ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE RECIRCULAÇÃO DE LODO:

Esta elevatória tem a função de recircular o lodo ativado efluente do Decantador Secundário, para a entrada da Câmara de Aeração, mantendo uma alta concentração de lodos ativados nesta câmara.

A elevatória possui dois conjuntos motor-bomba, com vazão estimada em 35,0 l/s cada um, recirculando em média 70,0 l/s do lodo efluente do Decantador Secundário, através de tubulação com diâmetro de 300 mm em ferro fundido.

### III.4.10 - ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE LODO BRUTO:

Esta unidade tem a função de retirar o lodo biológico da Câmara de Aeração e o enviar aos Digestores Anaeróbios.

A elevatória é constituída de dois conjuntos motor-bomba, com vazão nominal de 20,0  $\ell/s$  cada um, sendo que a tubulação que interliga a elevatória aos digestores, possui diâmetro de 150 mm, em ferro fundido.

### III.4.11 - DIGESTORES ANAERÓBIOS:

São em número de dois, sendo um primário, e outro secundário. Neles se processa a digestão anaeróbica do lodo, que é posteriormente encaminhado ao leito de secagem, através de tubulação no diâmetro 300 mm em ferro fundido.

Estas unidades processam o tratamento do esgoto, através de bactérias anaeróbicas que produzem também como sub-produto o biogás.

O tempo de permanência de projeto no digestor primário é de 18 dias e no digestor secundário é de 12 dias.

Ambos os digestores possuem 18,09 m de altura e 20,00 m de diâmetro.

#### III.4.12 - CANAL EFLUENTE DO DECANTADOR SECUNDÁRIO:

O efluente líquido tratado, é retirado do Decantador Secundário, através deste canal.

O canal possui 30,0 m de comprimento; 1,20 m de largura e 2,20 m de profundidade.

Após o canal, existe uma tubulação com diâmetro de 800 mm, com 20 m de extensão, em ferro fundido, que lança o efluente tratado na Baía da Guanabara.

#### III.4.13 - LEITO DE SECAGEM:

É o local onde é processada a secagem, pela exposição ao sol e ao ar livre, do lodo efluente do Digestor Secundário. O Leito de Secagem possui 51,80 m de comprimento máximo; 16,0 m de largura e 0,50 m de profundidade.

### III.5 - METODOLOGIA DE TRABALHO E DE OBTENÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

#### III.5.1 - ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE TRAÇADOR

Foram empregados dois métodos de medição de traçadores:

O primeiro método utilizado foi o "in situ" isto é, no campo, no caso de traçadores radioativos, através de sonda de cintilação, acoplada a um "ratemeter". Este conjunto permite a leitura da taxa de contagens, em contagens por segundo (cps), da quantidade de material radioativo que passa no posto de coleta de amostras no instante dado, através da medição da radiação  $\gamma$  emitida pelo radioisótopo. As sondas de cintilação foram imersas na entrada do canal que interliga o Decantador Primário à Câmara de Aeração, tendo sido utilizadas as sondas SAPHIMO de matrícula L.T. n.ºs. 1,2,3 e 5.

Foram empregadas sempre duas sondas acopladas a dois "ratemeters", para comparação de resultados e por medida de segurança, caso um dos "ratemeters" apresentasse algum problema durante a passagem da nuvem de traçadores.

Os "ratemeters" empregados são do tipo SPP3 (SAPHYMO-SPAT) tendo sido fixado em 50 KEV o nível de discriminação e em 2 segundos a constante de tempo.

Na FIGURA |9| vê-se a geometria de medição empregada utilizando-se os aparelhos acima referidos.

É de se observar que não foi usado registrador gráfico, o qual é frequentemente empregado, devido às variações de concentração com o tempo serem relativamente lentas.

O segundo método empregado quando da utilização de traçadores fluorescentes, foi o de coleta de amostras de esgoto

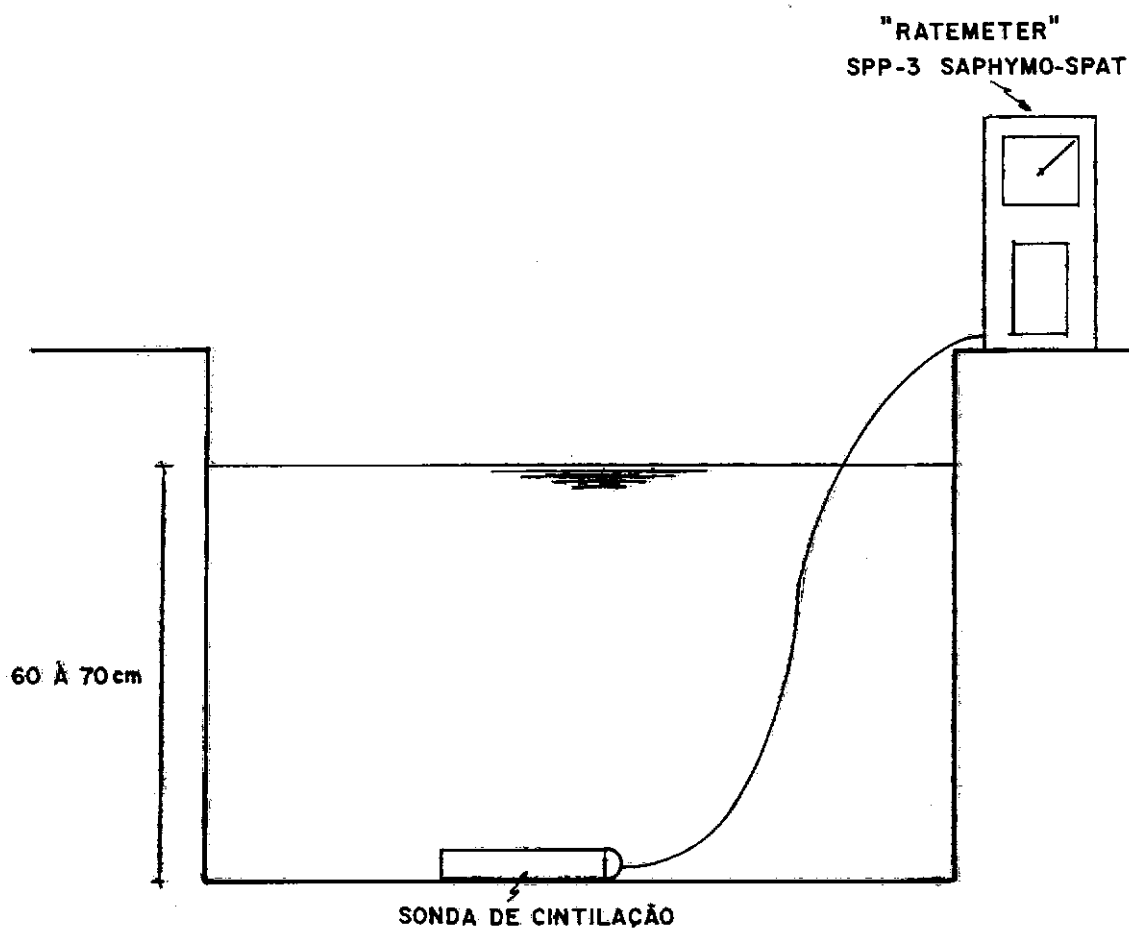


FIGURA 9 - GEOMETRIA DE MEDIÇÃO DE TRACADORES RADIOATIVOS. UTILIZANDO-SE "RATEMETER" ACOPLADO A UMA Sonda DE CINTILAÇÃO.



no campo, para posterior análise em laboratório.

O aparelho utilizado foi o espectrofluorímetro da marca Espectro-JY3, fabricado por JOBIN YVON. INSTRUMENTS S.A. (FRANÇA).

Basicamente, este aparelho provoca a excitação da substância fluorescente através da utilização de luz incidente com um comprimento de onda adequado e é capaz de medir a intensidade de fluorescência, transformando essa informação em diferenças de potencial.

A luz é oriunda de lâmpada de Xenônio de alta potência (150W) e a otimização dos comprimentos de excitação da fluorescência é feita através de dois monocromadores.

A intensidade luminosa da fluorescência é medida através de válvula fotomultiplicadora e transformada em diferença de potencial com a qual é correlacionada a Intensidade de Fluorescência.

A relação entre concentração e Intensidade de Fluorescência (medida em unidades arbitrárias) é linear, e pode ser obtida através de uma reta de calibração (ver item III.6.2.).

A abertura do diafragma do espectrofluorímetro é de 10 nm, tendo sido utilizada cubeta de quartzo com capacidade de 4 mL, para colocação de amostra de esgoto a ser analisada. Os comprimentos de excitação máxima podem ser vistos na TABELA III.2,

deste capítulo.

Maiores informações a respeito dos experimentos e materiais envolvidos nas experiências podem ser obtidos no trabalho de SOARES, J.H.P. [17], em fase final de elaboração e nas instruções de operação do espectrofluorímetro [16].

### III.5.2 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS NO CAMPO

O ponto selecionado para injeção de traçadores na ETIG foi o final do canal afluente ao Decantador Primário, em uma caixa de mistura existente imediatamente à montante do decantador.

Esta caixa foi escolhida em virtude da turbulência localizada nela provocar uma mistura adicional do traçador, antes de alcançar o Decantador Primário.

Para que fosse efetuada medição de vazões com o auxílio de micromolinetes e/ou de flutuador, o local escolhido foi um trecho situado cerca de dois metros à jusante do posto de coleta acima referido.

Este trecho foi delimitado através de duas seções de medição distanciadas de 10 metros e materializadas pela colocação de uma corda fina por sobre o canal. A profundidade da seção de montante foi medida a cada lançamento do flutuador e no caso de utilização de micromolinetes, à cada contagem de rota

ções.

A massa de traçador fluorescente a ser injetada foi escolhida como sendo de 20 gramas (com exceção de uma experiência em que foi injetada 200 gramas por engano), após uma experiência piloto.

O critério de fixação desta massa foi o de se obter uma curva-resposta que apresentasse valores de concentração com ordens de grandeza bem mais elevados do que as concentrações de "back-ground".

Quanto à atividade injetada de traçador radioativo, foi fixada em torno de 20 mCi em função dos resultados experimentais anteriormente obtidos com traçador fluorescente.

Não foram feitos cálculos mais precisos quanto ao critério de massa a ser injetada, devido ao relativo pequeno volume do decantador estudado que implicou no emprego de massas relativamente pequenas.

### III.5.2.1 - PREPARAÇÃO E INJEÇÃO DE TRAÇADORES

#### a) Traçadores fluorescentes

As massas dos traçadores fluorescentes foram pesadas em laboratório, em balança de precisão e colocadas a seguir em frascos de polietileno, com capacidade de 1 (um) litro de volume

me.

Posteriormente, no campo, a massa foi diluída em 1 (um) litro de água e homogeneizada (concentração inicial). Em momento aprazado, foi introduzido o traçador instantaneamente, na entrada do Decantador Primário ( $t=0$ ).

#### b) Traçador radioativo

As pastilhas de brometo de potássio (K Br), em número de cinco, pesando cada uma seis gramas foram irradiadas no reator TRIGA II, do CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear) da Nuclebrás em Belo Horizonte, sendo transportadas por via aérea ao Rio de Janeiro. A blindagem de transporte aéreo foi um cilindro oco de chumbo de 100 kg de massa que foi levado imediatamente para o local da experiência.

A preparação da mistura de injeção, no frasco de polietileno, onde já havia sido diluído previamente o traçador fluorescente, foi feita seguindo as etapas seguintes:

- Introdução de massa de traçador fluorescente, previamente diluída em água não radioativa.

- Com a ajuda do manipulador com aproximadamente 1,80 metros de comprimento introduziram-se pastilhas de Bromo 82, e que após 5 minutos de mistura com um homogeneizador elétrico, para que se efetivasse a diluição completa do traçador radioativo com o traçador fluorescente, foram ambos os traçadores lançados

na entrada do Decantador Primário.

A injeção da mistura de traçadores foi realizada, por pessoal qualificado, treinado no manuseio de material radioativo, usando botas e luvas de borracha, de cano longo e macacão plástico, de modo a se evitar contaminação direta.

### III.5.2.2 - COLETA DE AMOSTRAS

#### a) Traçador Fluorescente

Para o caso de traçadores fluorescentes, as amostras foram coletadas através de um amostrador de plástico e colocadas em frascos de polietileno de 60 ml de volume, previamente etiquetados no laboratório. Nas etiquetas foram anotadas no momento da coleta, a data e a hora e um código referente ao equipamento da ETIG estudado.

No posto de amostragem foram retiradas amostras de esgoto para determinação do "back-ground" existente, a fim de se obter uma medida de radioatividade e da fluorescência, naturalmente presentes.

As amostras contendo traçador fluorescente, foram armazenadas em sacos plásticos, pretos, opacos, para se evitar a incidência dos raios solares que pudessem provocar foto-decaimento das amostras e a seguir foram transportadas para o laboratório, para serem analisadas.

Além disso, foram tomadas amostras de 15 a 20 litros de esgoto bruto na entrada do Decantador, para construção da curva de calibração do traçador fluorescente empregado no dia.

#### b) Traçador radioativo

Nas duas sondas de cintilação colocadas após a saída do Decantador Primário as leituras de taxas de contagens foram efetuadas de 2 em 2 minutos, logo após a injeção durante uma hora consecutiva e posteriormente se chegando à frequência de leitura de 5, 10, 15 e 30 minutos sucessivamente até o final da experiência e devidamente anotadas em formulário apropriado.

### III.5.2.3 - MEDIÇÃO DE VAZÃO E DE VOLUMES DO SISTEMA DE DECANTAÇÃO PRIMÁRIA

Os dados de vazão média foram obtidos por três métodos:

a) O primeiro método empregado foi a utilização direta de uma Calha Parshall existente no canal efluente à Caixa de Areia.

Por problemas construtivos da Caixa de Areia, situada imediatamente à montante da Calha Parshall, esta apresentava oscilações de vazão de tal ordem, que se tornava difícil determinar a vazão no instante medido, pois a oscilação de nível d'água na régua proporcionava uma variação de cerca de 40 l/s,

entre duas leituras efetuadas quase no mesmo instante que representa um valor percentualmente bastante elevado.

Por isso, como vazão instantânea foi tomada a média aritmética das vazões máxima e mínima (estimadas visualmente) e lidas instantaneamente na régua graduada.

b) O segundo método utilizado, foi o emprego de flutuadores:

O flutuador consistia basicamente de uma haste metálica de aproximadamente 20 cm de comprimento, dotada de um pedaço de isopor, de seção circular com diâmetro de 5,5 cm na superfície e ligado a um pedaço de chumbo acoplado de 20 gramas que servia de lastro, para que a haste se mantivesse em equilíbrio e se minorassem os efeitos do vento sobre o pedaço de isopor.

O flutuador, era lançado no canal e recolhido 10 metros à jusante, sendo o tempo decorrido entre o lançamento do flutuador e a sua retirada do canal medido com o auxílio de um cronômetro. A profundidade foi medida junto à seção transversal montante do canal.

A velocidade média do escoamento foi medida através da razão entre a distância entre as seções e o tempo de passagem gasto entre elas.

As medições eram repetidas três vezes consecutivas tirando-se a média das três como velocidade média, e sendo re

jeitadas as medições em que o flutuador se afastava consideravelmente do eixo longitudinal do canal.

De modo a se determinar a vazão adotou-se o valor de 0,80 como sendo o do coeficiente de redução que permite transformar a velocidade quase-superficial medida pelo flutuador em velocidade média do escoamento. Este valor é um dos comumentes sugeridos em manuais de hidrometria (13).

c) O terceiro e último método empregado na obtenção de dados de vazão de esgoto foi a utilização de um micromolinetete.

Neste caso, analogamente ao efetuado quando da utilização de flutuadores, foram medidas as profundidades junto à seção de medição, com o auxílio de uma régua metálica.

Com o auxílio de um cronômetro, foi determinado o número de rotações por minuto do micromolinete mergulhado à meia profundidade. Foram efetuadas três determinações, tomando-se a média aritmética desses três valores, como a velocidade angular média naquele instante.

A conversão de velocidade de rotação do molinete para velocidade do escoamento foi feita através do uso da curva de calibração do micromolinete, no caso um Gurley modelo 625.

O emprego de micromolinetes foi abandonado logo no início do trabalho, devido a grande quantidade de material orgâ



nico que se depositava nas suas pãs, retardando a sua velocidade e falseando os resultados obtidos.

### III.6 - ANÁLISES DE LABORATÓRIO

Após a coleta das amostras no campo, estas eram enviadas imediatamente ao L.T., do Programa de Engenharia Civil, para serem analisadas.

#### III.6.1 - PREPARAÇÃO E ANÁLISE DAS AMOSTRAS

O espectrofluorímetro já previamente ligado e aquecido era colocado em condições de trabalho de acordo com o traçador fluorescente empregado posicionando-se os monocromadores de excitação e de fluorescência no seu máximo.

A cada sete leituras, era verificada a calibração do espectrofluorímetro utilizando-se padrão com concentração arbitrária de Amidorodamina G-Extra.

As leituras eram iniciadas pelas amostras coletadas antes da injeção de traçador, de modo a se determinarem valores de "back ground" e depois em sequência cronológica.

Dos frascos de 60 *ml* eram retiradas com o máximo cuidado para se evitar agitação, parcelas de líquido que eram colocadas na cubeta e levadas ao espctrofluorímetro para leitura.

Cada amostra foi medida em escala adequada, pelo menos três vezes, e caso se observasse algum valor muito discrepante dos demais, a amostra era lida tantas vezes quanto fosse necessário, para se obter uma nítida convergência.

Durante algumas experiências foi tentada uma separação do material sólido em suspensão, existente na amostra, com a utilização de três técnicas de remoção de material sólido.

A primeira técnica utilizada foi a decantação proporcionada pela adição de material flocculante na amostra de esgoto, no caso o sulfato de alumínio.

A segunda técnica utilizada foi a de filtração simples onde foram utilizados filtros de papel no qual ficavam retidos grande parte dos sólidos em suspensão existentes na amostra de esgoto.

A terceira técnica utilizada foi a centrifugação das amostras, sendo empregada uma centrífuga existente no L.T., marca IECCS CENTRIFUGE, fabricada pela DAMON IEC DIVISION- U.S.A., com 6000 rpms de rotação máxima.

As amostras a serem centrifugadas eram colocadas em número de quatro, de cada vez, e a centrífuga era acionada até 4000 rpms, durante 5 minutos. Com isso o material sólido em suspensão se depositava diretamente no fundo do frasco de 60 ml.

Comparando-se diferentes amostras obtidas com a utilização destas três técnicas de separação de material sólido em suspensão do esgoto líquido com amostras onde não foi utilizada nenhuma técnica de separação, não se observou desvios de leitura, que justificassem a continuidade de execução desse tipo de trabalho.

Maiores detalhes a respeito da preparação e análise das amostras podem ser obtidos no trabalho de SOARES, J.H.P.<sup>17</sup>, em fase de elaboração final.

### III.6.2 - DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE TRAÇADOR FLUORESCENTE

Os valores de intensidade de fluorescência são apresentados através de uma grandeza denominada "Intensidade de Fluorescência" (L), cuja unidade de medida foi convencionada no L.T. com o nome de "U.F.".

Para que se obtenha a concentração de cada amostra em ppb, é necessário que seja previamente conhecida uma reta de calibração que correlacione intensidade de fluorescência com concentração.

Para cada traçador fluorescente empregado e a cada experiência realizada, foi determinado experimentalmente a sua respectiva reta de calibração.

Apresentamos na FIGURA [10], que se segue, um exemplo de reta obtida através de experiências em que se empregou a Amidorodamina G-Extra como traçador.

Para a construção destas retas, eram tomadas amostras de esgoto isento de traçadores, em um recipiente de 20 litros. No laboratório, uma grama do traçador, do qual se queria obter a reta de calibração era diluída em 1 litro de água pura. Em seguida eram retirados 10 ml deste volume e este era diluído sucessivamente até que se chegasse a diluições da ordem de  $10^{-9}$  mg/l, em balões volumétricos com capacidade de 1000 ml.

Foram preparadas em laboratório, concentrações padrões do traçador usado, variando estas concentrações entre os valores de 0,5 ppb até 20,0 ppb (0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 7,0; 10,0; 12,0; 15,0 e 20,0 ppb).

Essa faixa de variação abrangia as concentrações mínimas e máximas em todos os experimentos efetuados.

Cada concentração acima diluída, foi lida no espectrofluorímetro, três vezes. A média das três leituras de cada concentração previamente escolhida, foi lançada em papel milimetrado, colocando-se no eixo das abcissas as concentrações padrões, conhecidas, em ppb, e no eixo das ordenadas, as concentrações lidas no espectrofluorímetro, em Unidades Fluorimétricas (U.F.).

Após plotados os pontos, foi ajustada uma reta, da qual, foi determinado o coeficiente angular (tangente do ângulo

de inclinação da reta) e o coeficiente linear (constante da reta).

A equação básica da reta de calibração é:

$$C = a.L + b \quad ; \quad \text{onde: (47)}$$

a = coeficiente angular da reta

b = coeficiente linear ou constante da equação da reta

L = leitura no espectrofluorímetro (U.F.) na escala 100 X

C = concentração do traçador em ppb

A equação da reta foi introduzida no programa denominado "CONTRAC" empregado na obtenção das curvas de concentração e dos diferentes parâmetros a serem determinados nesta tese.

Basicamente o programa plota uma curva de concentração de traçadores em função do tempo e realiza o cálculo de todos os parâmetros apresentados no Capítulo IV e no Apêndice II.

Ao serem fornecidas as leituras efetuadas, com as suas respectivas escalas de transformação; obtiveram-se as concentrações em ppb, e concentrações normalizadas ( $E(\theta)$ ), que eram plotadas pelo computador, em relação ao tempo normalizado ( $\theta$ ).

O computador utilizado foi o Burroughs modelo 6700, do Núcleo de Computação Eletrônica da U.F.R.J.

○ ÁGUA DESTILADA - MEDIÇÃO 25/04/83

△ ÁGUA DP - (14/04/83) - EXP. - 13/04/83 - MEDIÇÃO 25/04/83

□ ÁGUA DP - (15/04/83) - EXP. - 14/04/83 - MEDIÇÃO 25/04/83

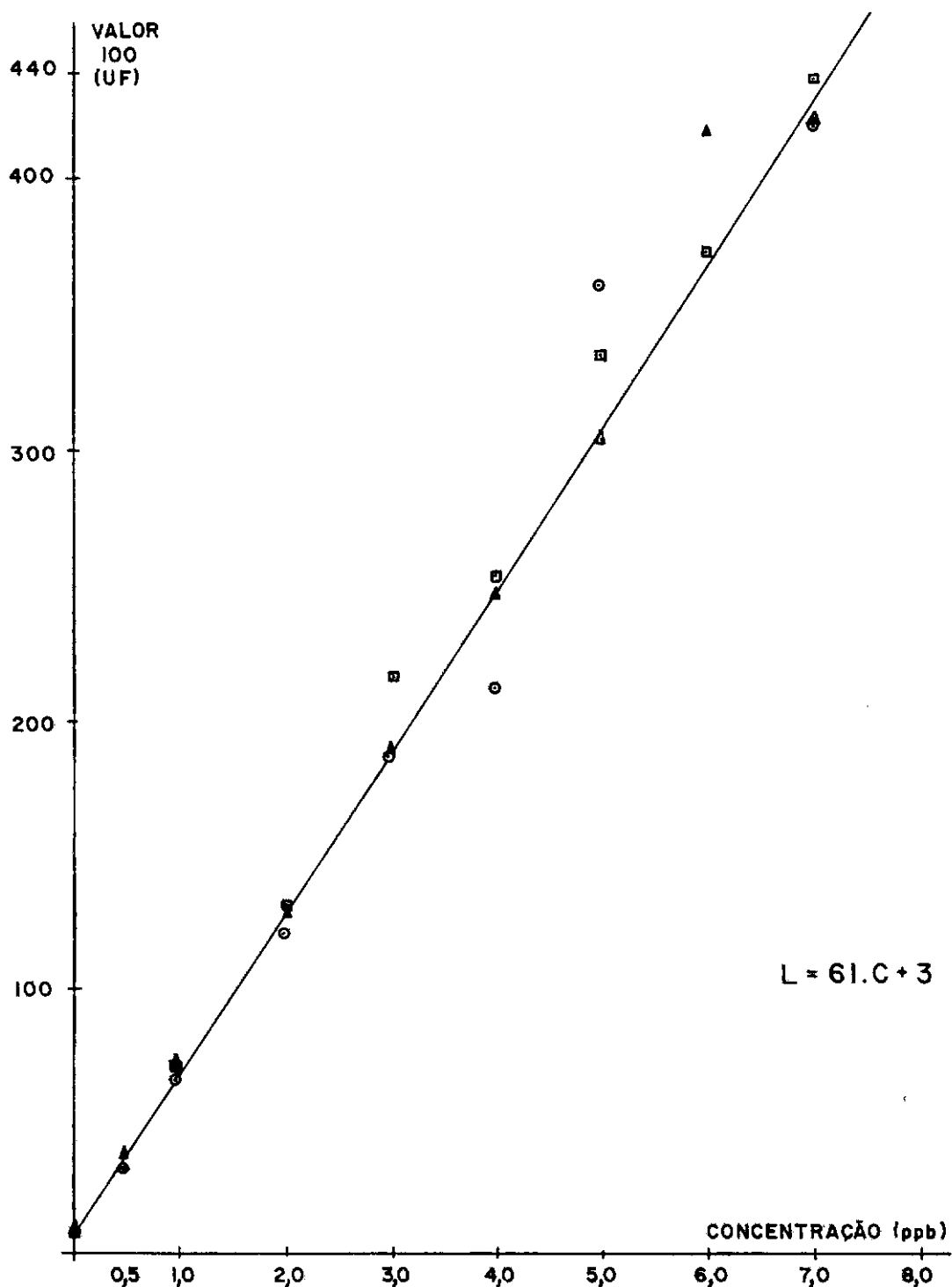


FIGURA 10 - EXEMPLO DE RETA CALIBRAÇÃO APLICANDO-SE AMIDORODAMINA G-EXTRA COMO TRACADOR.

Um diagrama de blocos do que o programa de computador executa é apresentado no Apêndice IV.

A seguir, é apresentada na FIGURA [11] uma curva obtida em experiência efetuada com Bromo-82 com os dados reais de campo.

No Capítulo IV é feita uma análise de modelagem efetuada e de alguns parâmetros calculados.

A modelagem foi executada, utilizando-se o micro-computador SDE-45 fabricado pela EMBRACOMP, dotado de VÍDEO GRÁFICO, existente no Laboratório de Traçadores, pois a sua utilização facilitou sobremaneira, os trabalhos de modelagem.

ETE ILHA DO GOVERNADOR

DEC. PRIMARIO 7/7/82

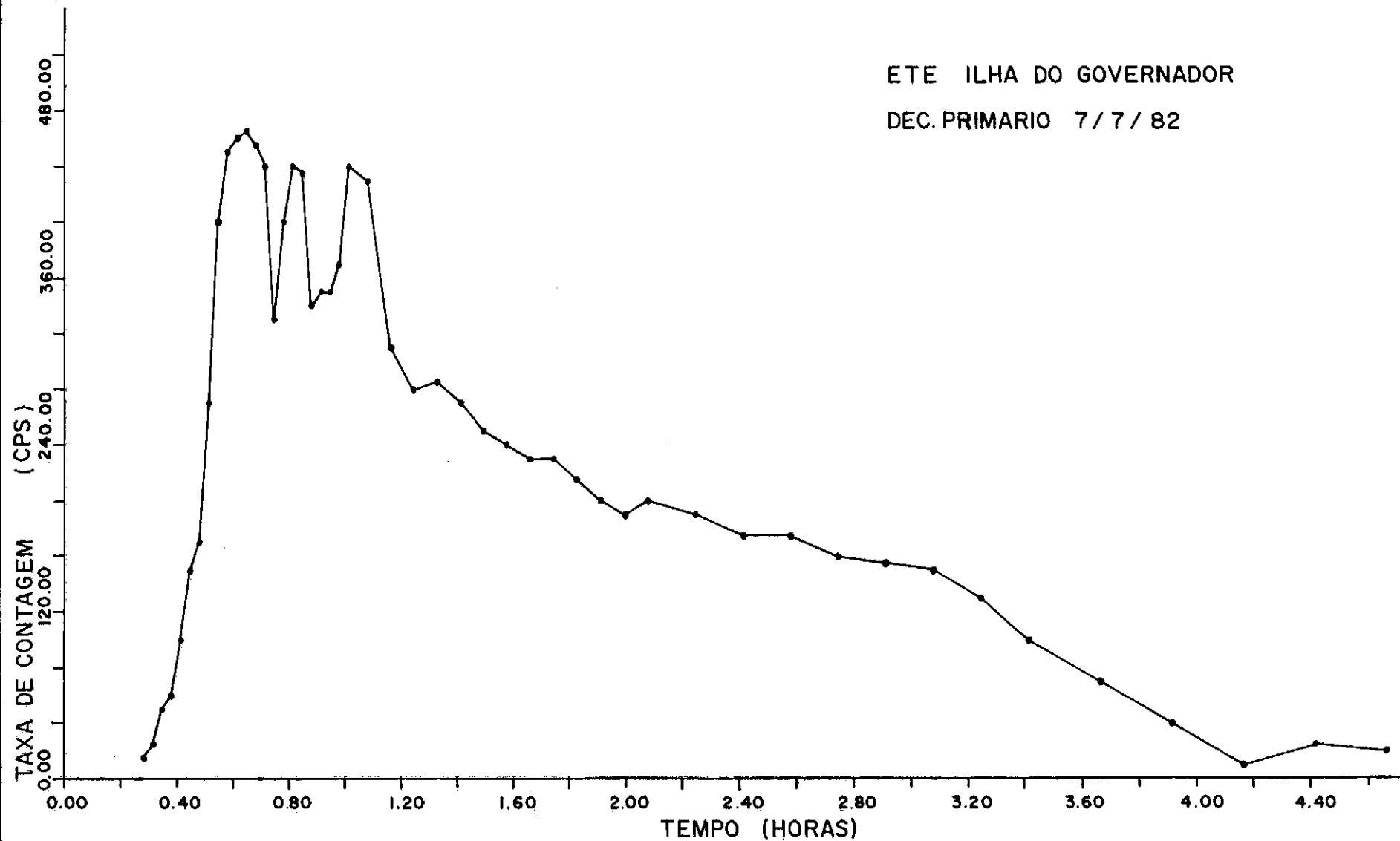


FIGURA 11 - EXEMPLO DE CURVA EXPERIMENTAL OBTIDA APLICANDO-SE BROMO-82 COMO TRACADOR.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### IV.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentaremos os cálculos dos principais parâmetros empregados na caracterização de modelos de escoamento e que são o  $\tau$  (tempo de detenção teórico operacional - T.D.T.O.), o  $\bar{t}$  (tempo de detenção médio experimental - T.D. M. E.), e a relação  $\bar{t}/\tau$  (Índice de tempo de detenção médio - I.T. D.M.), além do percentual da massa injetada de traçador que não é recuperada (a perda de traçador).

Em seguida é feita uma análise de efeitos de fenômenos que afetam a fluorescência dos traçadores (pH, adsorção a material sólido) e das consequências das grandes flutuações temporais das vazões afluentes.

No tratamento dos resultados experimentais brutos, foi feita uma depuração nas experiências em que surgiram resultados anômalos tais como "ganho" de massa ou elevadíssima "perda" de traçador.

É também feita uma análise dos principais parâmetros calculados, conforme explanado no 1º parágrafo deste item, correlacionando-se os parâmetros experimentais com os obtidos a-

través da modelagem, inclusive com o cálculo do percentual de zonas mortas existentes no equipamento estudado.

Após esta fase preliminar é efetuada uma avaliação da modelagem hidrodinâmica efetuada no decantador primário, analisando-se as experiências que foram passíveis de representação.

Finalmente são apresentadas algumas conclusões obtidas com ênfase nos modelos empregados e no desempenho dos traçadores utilizados.

#### IV.2 - CODIFICAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS

As experiências estão codificadas da seguinte forma:

R-1 - Corresponde à experiência onde foi utilizada a sonda nº 1, na detecção do traçador  $^{82}\text{Br}$  empregado.

R-2 - Idem, utilizando-se a sonda nº 2.

R-3 - Idem, utilizando-se a sonda nº 3.

R-5 - Idem, utilizando-se a sonda nº 5.

AR - Corresponde às experiências onde foi empregada a Amidoro - damina G-Extra como traçador (AR-1 a AR-8).

U - Corresponde às experiências onde foi empregada a Uranina como traçador (U-1 e U-2).

RM - Corresponde à experiência onde foi empregada a Rodamina B como traçador.

E - Corresponde à experiência onde foi empregada a Eosina como traçador.

As experiências, à exceção da R-2, foram "truncadas", para valores de tempo de duração superiores ao valor  $2,5\tau$ , visto que foi observado graficamente que, após este tempo, o traçador detectado oscilava com valores próximos ao do "back-ground". No caso da experiência R-2 necessitou-se de se utilizar a sonda 2 na mesma hora em outro posto de observação, o que provocou a interrupção da coleta de dados para  $t = 1,5\tau$ .

Os resultados experimentais relativos ao tempo de detenção médio experimental ( $\bar{t}$ ) e à perda de traçador são apresentados na Tabela IV.1.

CÓDIGO	DATA	VAZÃO MÉDIA DIÁRIA ( $\ell$ )	$\tau$ (HORAS)	$\bar{t}$ (HORAS)	$\bar{t}/\tau$ (I.T.D.M.)	PERDA DE TRAÇADOR
R-1	07-07-82	169	1,99	1,83	0,92	-
R-2	07-07-82	169	1,99	1,33	0,67	-
R-3(1)	28-03-84	162	2,07	1,50	0,72	-
R-5(1)	28-03-84	162	2,07	1,59	0,76	-
R-3(2)	29-03-84	160	2,08	1,58	0,76	-
R-5(2)	29-03-84	160	2,08	1,46	0,70	-
AR-1	07-07-82	169	1,99	1,78	0,61	62
AR-2	16-09-82	174	1,93	2,21	1,14	19
AR-3	13-04-83	159	2,12	1,30	0,61	27
AR-4	04-04-83	157	2,14	2,13	0,99	27
AR-5	16-06-83	184	1,83	1,27	0,69	10
AR-6	07-07-83	192	1,75	1,44	0,82	22
AR-7	25-07-83	206	1,63	1,22	0,74	29
AR-8	29-03-84	160	2,08	1,47	0,70	35
U-1	15-06-83	164	2,05	1,77	0,86	55
U-2	28-03-84	162	2,07	1,78	0,86	68
RM	06-07-83	173	1,94	0,83	0,42	92
E	22-07-83	194	1,72	1,39	0,80	10

TABELA IV.1 - APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PARÂMETROS DAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS

Observações sobre a Tabela IV.1:

R-3(1) ou R-5(1) - Primeira utilização das sondas 3 ou 5.

R-3(2) ou R-5(2) - Segunda utilização das sondas 3 ou 5.

Os valores  $\bar{t}$  e a perda de traçador foram calculados a partir das curvas de concentração de traçador à saída do decantador em função do tempo, utilizando-se os resultados experimentais completos (sem tratamento) e empregando-se as equações (48) e (49), que se seguem:

$$\bar{t} = \frac{\sum t C(t) \Delta t}{\sum C(t) \Delta t} \quad (48)$$

$$R = \left| \frac{Q \sum C(t) \Delta t}{m} \right| \times 100\% \quad (49)$$

onde:

R = recuperação em termos percentuais da massa de traçador injetada.

Esta recuperação de traçador é subestimada devido ao fato de que a vazão média diária deve ser bem menor do que a que foi efetivamente calculada.

Quanto à recuperação de traçador radioativo, esta não pôde ser calculada porque, neste caso, existe um erro considerável (em torno de 20%) na medição da atividade fornecida pelo fabricante, além do fator de calibração das condições de medição de campo ser de difícil determinação.

#### IV-3 - FATORES QUE INFLUENCIAM A PERDA DE TRAÇADOR

Como já foi visto anteriormente no Capítulo III , existem alguns fatores que influenciam negativamente na fluorescência.

No caso dos traçadores empregados e com as condições de trabalho do dia da experiência detectou-se os seguintes fatores que poderiam ter influenciado negativamente na fluorescência e provocado uma superestimação no cálculo da perda de traçador.

Para o caso da Uranina, por exemplo, os valores de pH nos dias das experiências se situaram entre os valores 6 e 8, faixa essa onde a taxa de decréscimo do valor do pH é praticamente nula, tendo o mesmo ocorrido quando do emprego da Rodamina B. A Amidorodamina G-Extra e a Eosina praticamente não são afetadas pela variação do pH.

Depreende-se, portanto, que a variação no pH parece não ter provocado distorção nos resultados obtidos experimentalmente.

Para estudar a possibilidade de adsorção à matéria orgânica devemos nos referir aos resultados obtidos por FEUERSTEIN e SELLECK<sup>(1)</sup> com Rodamina B na Baía de São Francisco, nos Estados Unidos.

Eles observaram que para concentrações de 25 ppm

de material sólido, a adsorção resultou em uma perda de 12% de Rodamina B, em relação a esta injetada em água pura, sem a presença de material sólido em suspensão.

No caso dos esgotos da ETIG, as concentrações de material sólido variaram, na entrada do Decantador Primário, com valores médios em torno de 150 ppm e na saída do mesmo D.P., com valores em torno de 5 ppm.

Entrando-se com esses valores nas curvas obtidas por FEUERSTEIN e SELLECK<sup>(11)</sup>, encontrou-se que a perda de Rodamina B por adsorção a material sólido teria a tendência a variar de 46 a 92%, o que demonstra coerência no valor obtido na experiência realizada, que forneceu uma perda calculada de traçador de 92%.

Há que se frizar o caráter um tanto especulativo desta comparação, pois a adsorção depende fortemente das características físicas e químicas dos sólidos em suspensão.

FEUERSTEIN e SELLECK não empregaram a Uranina em seus estudos, mas ficou constatado neste trabalho experimental uma perda de traçador elevada, de 55% e de 68% nas duas experiências realizadas.

Os outros traçadores utilizados não parecem sofrer sérios problemas de perda por adsorção a material orgânico, conforme pode ser observado na Tabela IV-1.

#### IV - 4 - OBSERVAÇÕES A RESPEITO DE VAZÕES DE OPERAÇÃO

A vazão afluente ao Decantador Primário é extremamente variável, oscilando entre valores de 60,0ℓ e 380,0ℓ.

Para efeito de cálculo dos parâmetros da Tabela IV.1, tomou-se a média das médias como valor da vazão média diária, isto é, a média aritmética dos valores obtidos empregando-se a calha Parshall, somando-se a seguir com a média aritmética de 80% de todos os valores obtidos com o emprego de flutuadores e dividindo-se finalmente as duas médias aritméticas pelo valor dois. Este valor de vazão média diária obtido foi empregado no cálculo da recuperação de traçador injetado, ao invés da média ponderada de vazões, o que obviamente provocou erros no cálculo da recuperação de massa.

Outros erros podem ter decorrido das grandes oscilações de lâmina d'água existentes na Calha Parshall no momento da leitura.

Nenhum dos métodos utilizados na determinação de vazões é preciso, incorrendo todos eles em erros estimados em torno de 20-30%. Na Figura 12 são apresentadas hidrógrafas diárias de vazões obtidas com a utilização dos métodos de medição empregados, onde são visíveis as grandes flutuações de vazão observadas.

Procurou-se comparar as vazões obtidas com a aplicação dos dois métodos de medição efetivamente empregados (Ca -

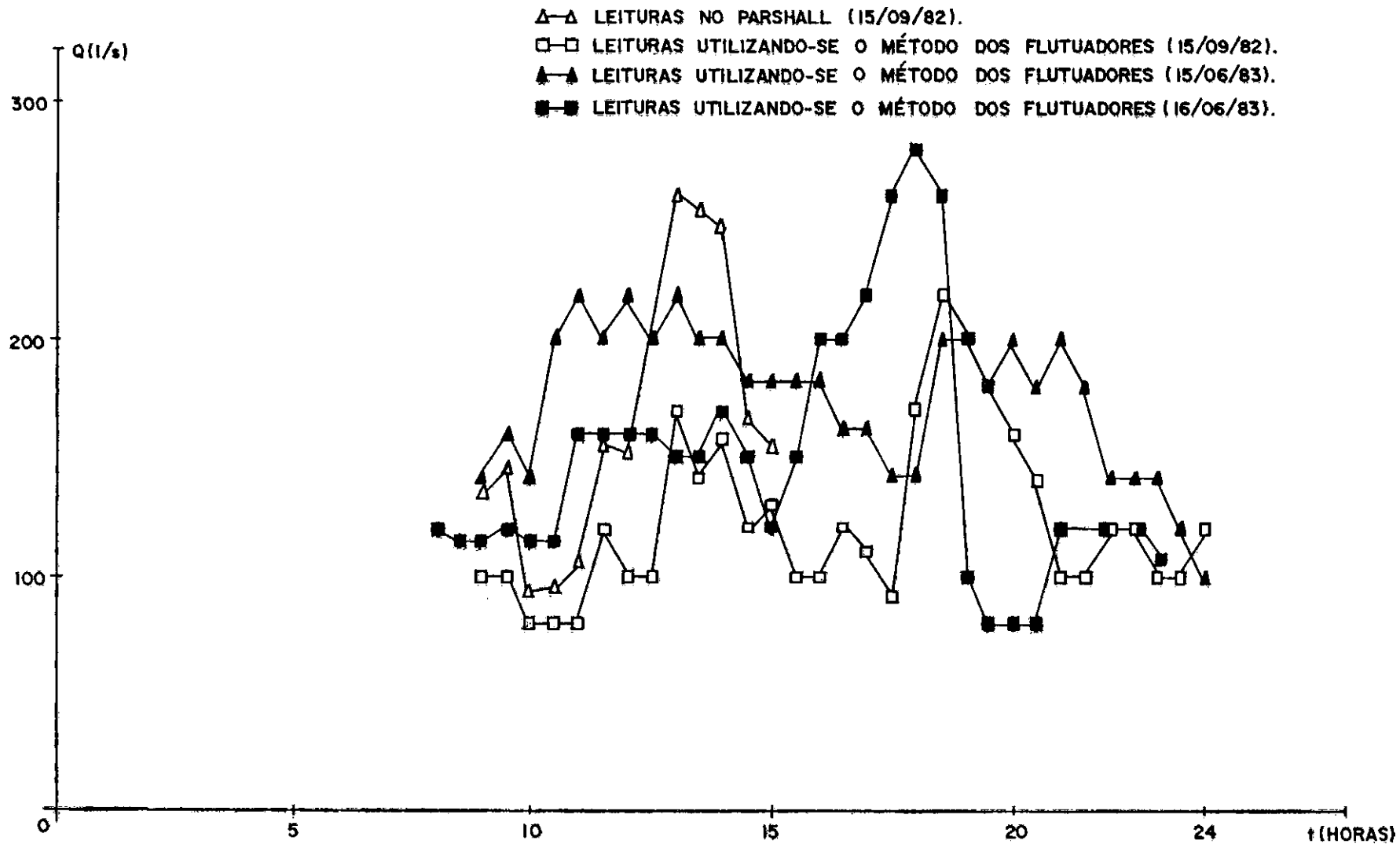


FIGURA 12 - HIDRÓGRAFAS TÍPICAS DE LEITURAS DE VAZÕES.



lha de Parshall e Flutuador) e, com isso, se chegar a um valor de vazão média diária a ser aplicado no cálculo dos diferentes parâmetros.

Utilizando-se o Método dos Mínimos Quadrados, obteve-se a equação da seguinte reta de correlação de vazões, e que é apresentada na Figura 13 .

$$FL = 1,210P - 9,501 \quad (50)$$

onde:

FL = vazão em  $\ell/s$  , obtida utilizando-se o Método dos Flutuadores

P = vazão em  $\ell/s$  obtida utilizando-se o Método da Cálha Parshall.

Rearrmando-se a equação ( 50 ), temos:

$$P = \frac{FL - 9,501}{1,210} = \frac{FL}{1,210} - 7,75 \quad (51)$$

Ora, como o valor  $7,75 \ell/s$  é bem inferior à ordem de grandeza média de vazões, em torno de  $200 \ell/s$ , ficando inclusive dentro da faixa de imprecisão de cálculos, podemos desprezar esse valor, ficando a equação na forma:

$$P = \frac{FL}{1,210} \approx 0,80 FL \quad (52)$$

A equação ( 52 ) confirma a assertiva de que a velocidade medida no caso de flutuadores se aproxima da máxima, sendo por isso necessário o emprego de um fator de redução igual a 80% do valor da velocidade medida.

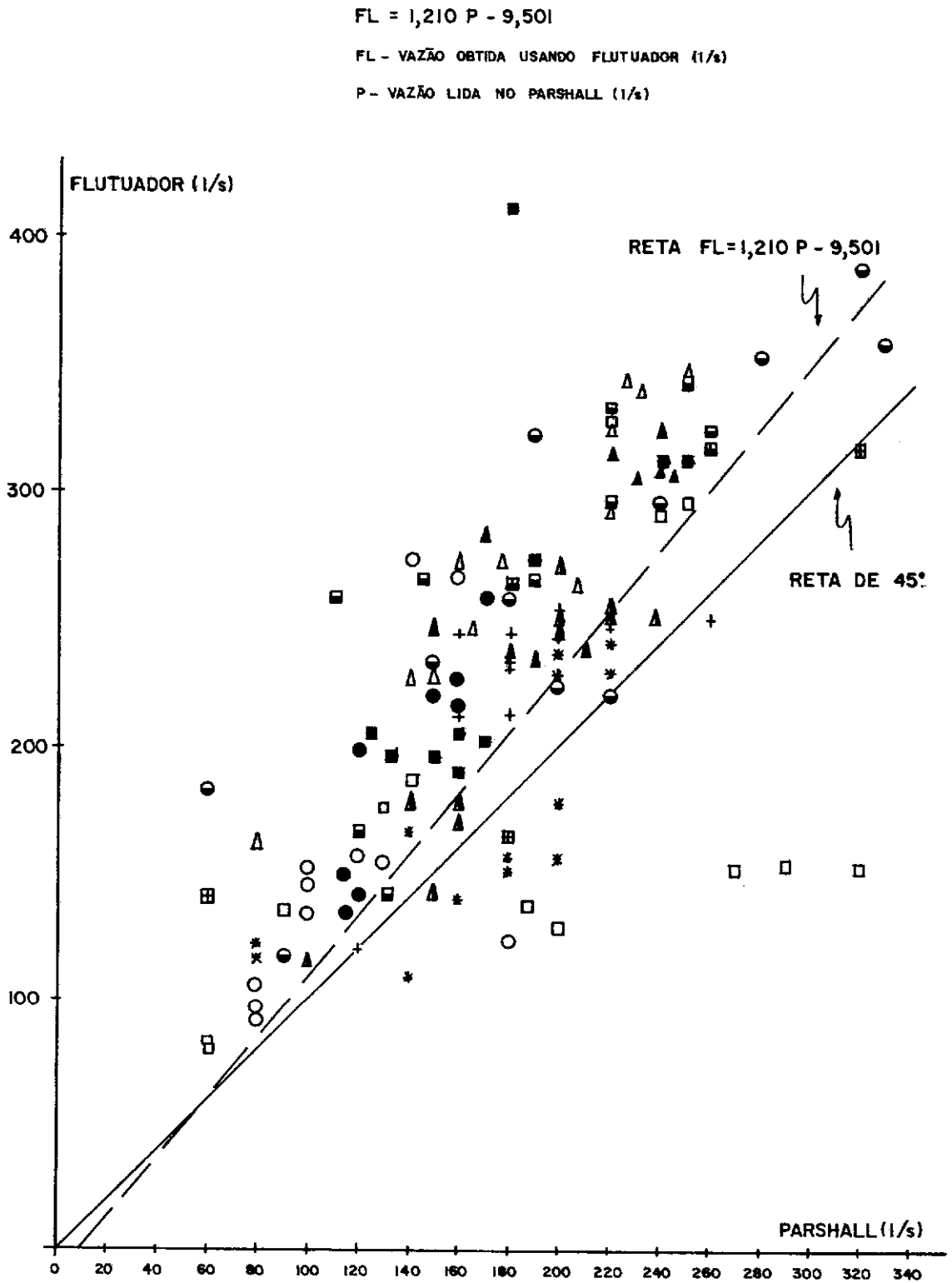


FIGURA 13-RETA DE CORRELAÇÃO DE VAZÕES CALCULADAS UTILIZANDO-SE FLUTUADORES POR VAZÕES CALCULADAS UTILIZANDO-SE A CALHA PARSHALL.

#### IV.5 - ANÁLISE PRELIMINAR - SELEÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Analisando-se a Tabela IV-1, observou-se experiências que apresentaram resultados difíceis de serem explicados e que foram descartados.

Na experiência AR-2, houve um aparente "ganho" de massa, em relação à massa inicial de traçador injetada, da ordem de 20%.

A explicação para o que ocorreu, foi que se utilizou a reta de calibração do espectrofluorímetro, obtida na experiência AR-1, na obtenção dos diferentes parâmetros da experiência AR-2. Com isso, os parâmetros calculados não são confiáveis, e a experiência teve que ser descartada.

No caso da experiência RM, houve uma "perda" de traçador da ordem de 92%, elevadíssima, o que não ocorreu em nenhuma das outras experiências efetuadas. Com isso, consideramos muito pouco representativos os 8% de massa captada nessa experiência, pois que grande parte da Rodamina-B injetada, ficou provavelmente adsorvida no material orgânico existente no Decantador Primário, e com isso não se conseguiu representar corretamente o escoamento no equipamento.

Além disso, a relação  $\bar{t}/\tau$  é igual a 0,42, que é um valor muito baixo para essa relação (foi o menor valor encontrado entre todas as experiências). Estas observações confirmam provavelmente a pouca utilidade do traçador Rodamina B em expe-

riências efetuadas em Estações de Tratamento de Esgotos.

Na Figura ( 11 ), foi apresentado um exemplo característico de curva resposta completa  $C(t)$  , obtida em experiência efetuada em 07-07-82 (R-1 ) .

Vemos que a oscilação de pontos na curva é extremamente acentuada. Em virtude disso, foi efetuado um tratamento preliminar dos resultados brutos, construindo-se uma curva ajustada visualmente por entre os pontos reais, surgindo daí, uma curva média, à qual se procurou ajustar os modelos de escoamento.

É de se ressaltar que os diversos parâmetros foram calculados com pontos obtidos da curva real. Estes parâmetros estão definidos, calculados e interpretados no item IV.6 deste capítulo e no Apêndice II.

#### IV.6 - PARÂMETROS ESPECÍFICOS DO ESCOAMENTO

##### IV.6.1 - TEMPO DE DETENÇÃO MÉDIO EXPERIMENTAL E FRAÇÃO DE ZONAS MORTAS

O cálculo do parâmetro  $\bar{t}$  é importante, porque ele é facilmente correlacionado às zonas mortas, pois a Fração de Volume Morto (F.V.M.) é dada pela relação:

$$F.V.M = 1 - \frac{\bar{t}}{\tau} \quad (53)$$

A F.V.M. quantifica o percentual de volume do sistema de decantação que não é acessível ao traçador, isto é, informa o total de zonas mortas.

Na Figura 14, foram plotados os valores da relação  $(1 - \frac{\bar{t}}{\tau})$ , em função da vazão média diária, não se observando nenhuma tendência de influência da vazão na fração de zonas mortas, que ficou compreendida entre 1 e 39% para o conjunto das experiências realizadas.

Os ensaios R-1 e AR-4 apresentaram as frações de zonas mortas com percentuais mais baixos (8 e 1% respectivamente) e os ensaios AR-1 e AR-3 os percentuais mais elevados (39%).

A relação  $\bar{t}/\tau$  será utilizada na análise, feita mais adiante no item IV.7 deste capítulo da modelagem hidrodinâmica do Decantador Primário.

#### IV.6.2 - ANÁLISE DA PERDA DE TRAÇADORES

Pelos valores tabulados na Tabela IV.1, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- a) A Rodamina B mostrou ser um traçador inadequado a este tipo de utilização em decorrência de sua alta tendência de adsorção pelo material orgânico.
- b) A Uranina pareceu também ter um grau elevado de adsorção, em torno de 50%.

CÓDIGO	Q	$1 - \tilde{r}/\tau$	CÓDIGO	Q	$1 - \tilde{r}/\tau$
R-1	169	0,08	AR-6	192	0,18
R-2	169	0,33	AR-7	206	0,26
R-3(1)	162	0,28	AR-8	160	0,30
R-5(1)	162	0,24	U-1	164	0,14
AR-1	169	0,39	U-2	162	0,14
AR-3	159	0,39	E	194	0,20
AR-4	157	0,01	R-3(2)	160	0,24
AR-5	184	0,31	R-5(2)	160	0,30

TABELA DE RELAÇÃO Q x F.V.M.

⊕ EXPERIÊNCIA TRUNCADA ANTES DE  
DECORRIDO O TEMPO 2,5T.

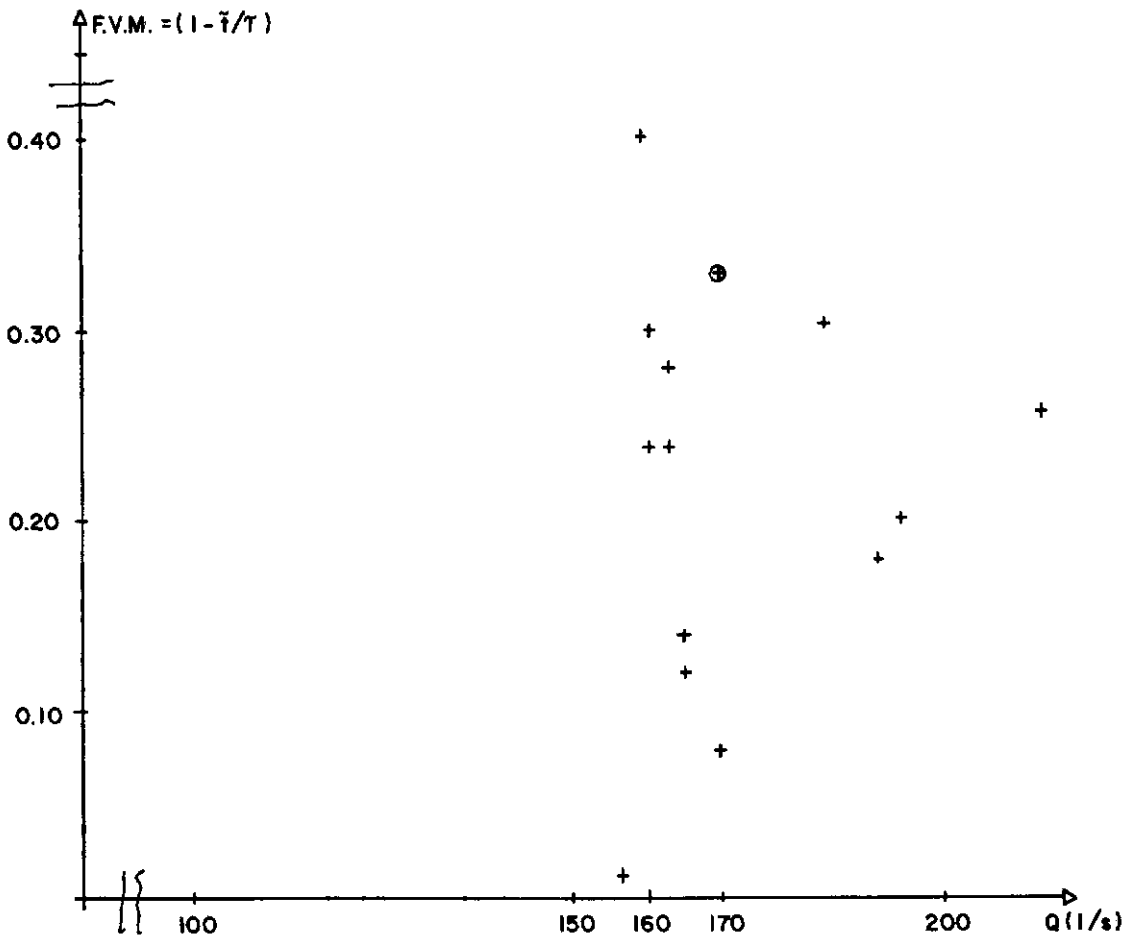


FIGURA 14 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE A F.V.M. E A  
RESPECTIVA VAZÃO MÉDIA DIÁRIA.

- c) A Eosina aparenta ter baixo grau de adsorção, da ordem de 10% da massa injetada, embora tenha sido utilizada em um único experimento.
- d) O conjunto formado por sete experimentos, onde a Amidorodamina G-Extra foi empregada mostra que a perda deste traçador é em geral inferior a dos outros traçadores. Na realidade, essa perda poderá ser inferior aos valores observados, pois estes estão afetados pelas imprecisões das vazões medidas. Esta tendência pode ser confirmada a partir das curvas mostradas na Figura 15, onde o aspecto da curva de Amidorodamina é comparado com as curvas oriundas do emprego do Bromo-82, as quais são potencialmente menos afetadas pela adsorção ao material orgânico em suspensão.

#### IV.7 - ANÁLISE DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO DECANTADOR PRIMÁRIO

##### IV.7.1 - PRELIMINARES

Em todas as experiências realizadas, procurou-se modelar o comportamento do fluido no equipamento basicamente utilizando-se o Modelo de Escoamento A (Figura 3) e o Modelo de Escoamento B (Figura 4), já anteriormente definidos (Capítulo II).

Das 16 (dezesesseis) experiências modeladas, 7 (sete) apresentaram modelagem satisfatória, 4 (quatro) apresenta -

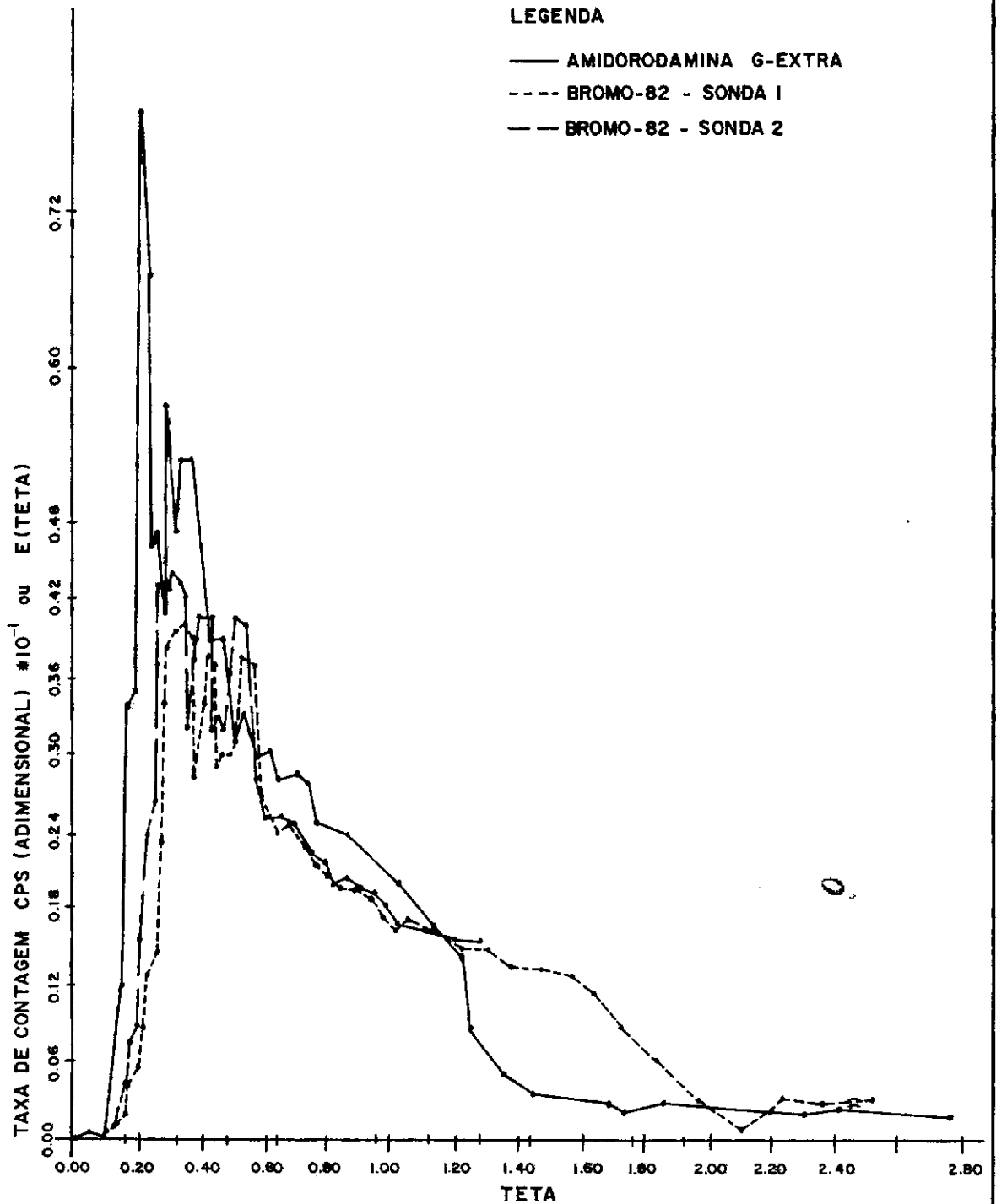


FIGURA 15 - EXEMPLO DA REPRODUTIBILIDADE DAS CURVAS DE CONCENTRAÇÃO REAIS UTILIZANDO-SE TRACADORES DIFERENTES (AMIDORODAMINA G-EXTRA E BROMO-82) E GEOMETRIAS DE MEDIÇÃO DIFERENTES (SONDAS 1 e 2).



ram modelagem razoável e 5 (cinco) não puderam ser modeladas através destes modelos de escoamento.

#### IV.7.2 - MODELAGEM SATISFATÓRIA

As experiências R-1, R-2, AR-1, AR-3, AR-5, AR-7 e E, foram as que apresentaram melhor modelagem, que podem ser ilustradas pelas Figs. 16.a, 16.b, 17.a, 17.b, 18.a, 18.b, 19.a, 19.b e 20, e se encontram tabuladas na Tab. IV.2, que apresenta o modelo de escoamento mais adequado a cada caso, os parâmetros que melhor ajustaram o modelo, a relação  $\bar{t}/\tau$  no modelo e a relação  $\bar{t}/\tau$  experimental. Para o caso das experiências onde foi encontrado o Modelo B, como o de melhor ajuste, os valores de  $m'$  (da parcela de fluido que escoar tipo Mistura Perfeita) variaram entre um mínimo de 0,60 e um máximo de 0,67, significando que há um percentual elevado de escoamento tipo mistura perfeita no sistema de decantação, chegando a valores percentuais em torno de 65% do volume total.

Muito embora o ajuste tenha sido satisfatório, o modelo não prevê a existência de zonas mortas (isto é, a relação  $\bar{t}/\tau = 1,0$  para o modelo); no entanto, a relação  $\bar{t}/\tau$  experimental parece indicar a existência de zonas mortas na proporção de 8 a 33%, que podem ser observadas na Tabela IV.2 e na Figura 21.a.

Já no caso das experiências onde foi encontrado o Modelo A, como o de melhor ajuste, a parcela de fluido em mistu

ra perfeita ( $a+c$ ) esteve compreendida entre 61 e 82% do volume do sistema de sedimentação. O parâmetro  $p$ , em todos os casos, foi nulo, e dessa forma, o modelo se reduziu a duas regiões perfeitamente agitadas em série, com a primeira apresentando zonas mortas.

A Figura 21.b ilustra a variação da relação ( $a+c$ ) em cada experimento, indicando a contribuição individual de cada parâmetro, verificando-se portanto que tanto  $a+c$  como a relação  $a/c$ , não sofrem acentuadas variações de experiência a experiência, confinando-se estas variações em intervalos relativamente estreitos.

Verificou-se neste modelo, a existência de percentuais elevados de zonas mortas no equipamento, chegando a valores da ordem de 40% do volume total.

Neste caso, a fração de zonas ativas previstas pelo modelo ( $a+c$ ) coincide, na maioria dos casos, com a relação  $\bar{t}/\tau$ , como é indicado na Tabela IV.2 e ilustrado na Figura 22 .

A seguir, são apresentadas as 8 (oito) curvas de concentração referentes a estas experiências, juntamente com os modelos que melhor se ajustaram a cada caso.

Na Fig. 22 é apresentada uma reta de correlação entre o  $\bar{t}/\tau$  do modelo e o  $\bar{t}/\tau$  experimental.

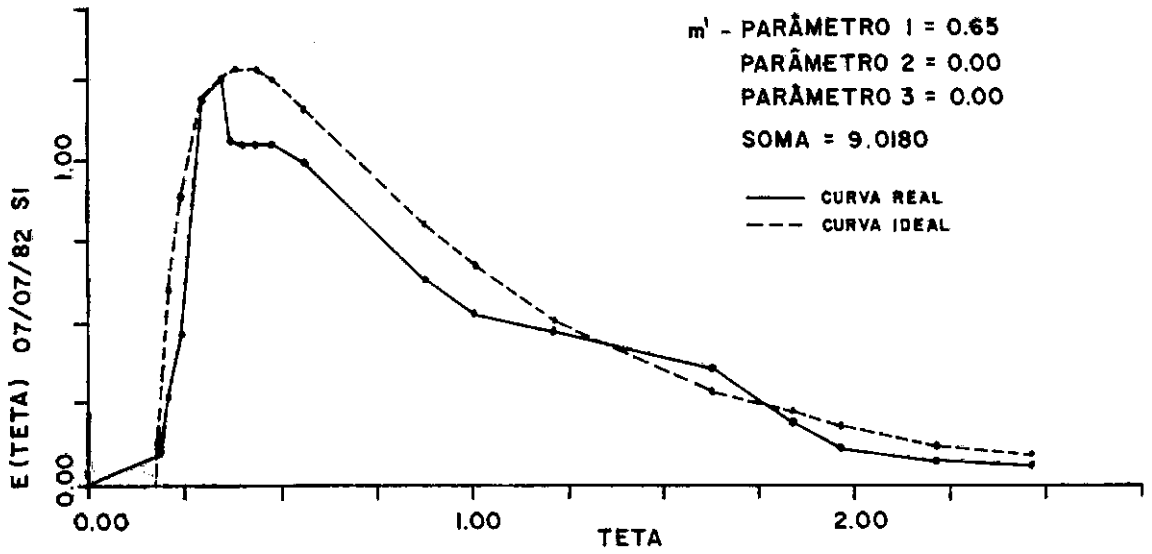


FIGURA 16a - MODELO B - EXPERIÊNCIA R-1

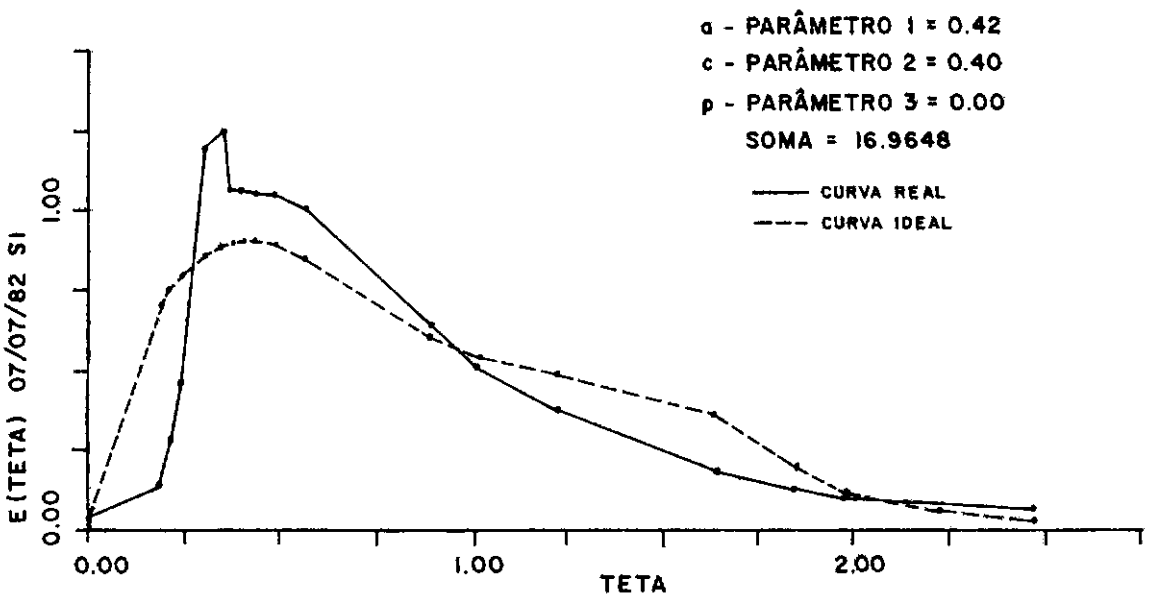


FIGURA 16b - MODELO A - EXPERIÊNCIA R-1

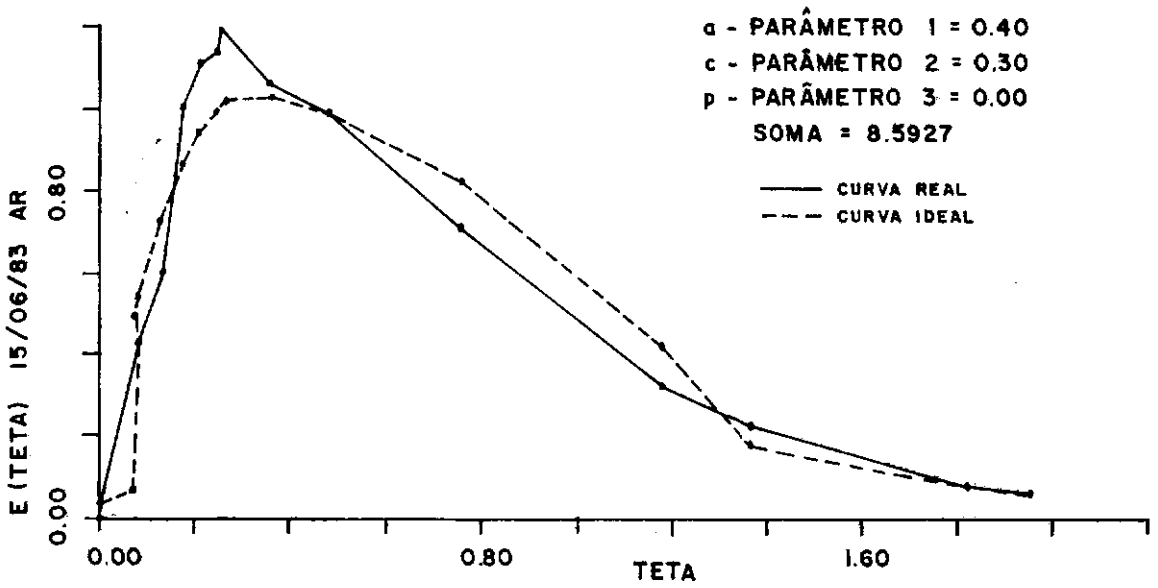


FIGURA 17a-MODELO A - EXPERIÊNCIA AR-5

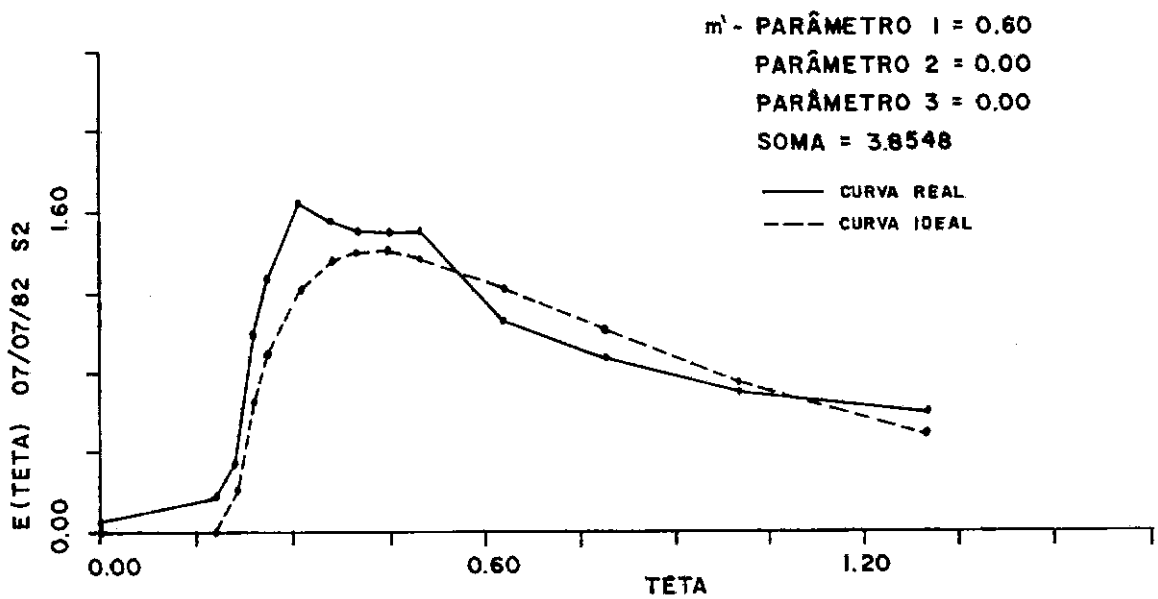


FIGURA 17b-MODELO B - EXPERIÊNCIA R-2

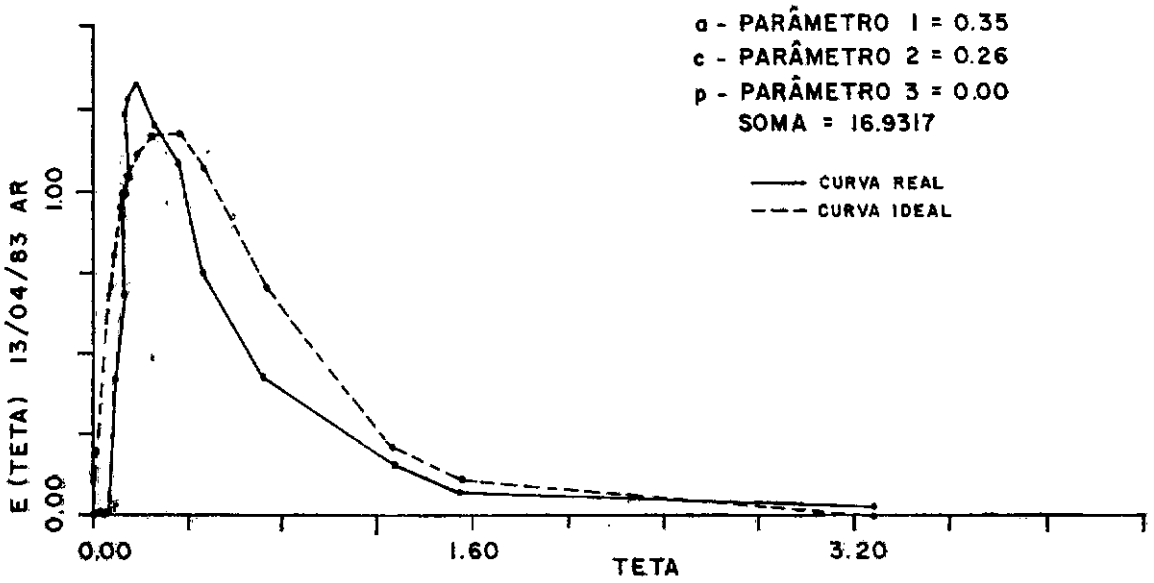


FIGURA 18a - MODELO A - EXPERIÊNCIA AR-3

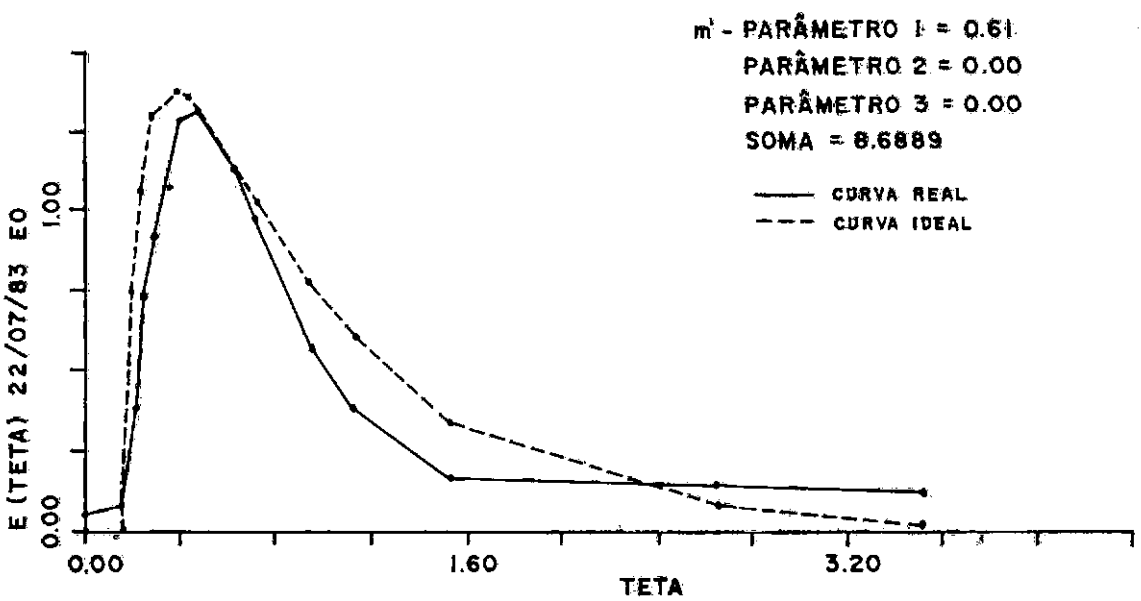


FIGURA 18b - MODELO B - EXPERIÊNCIA E

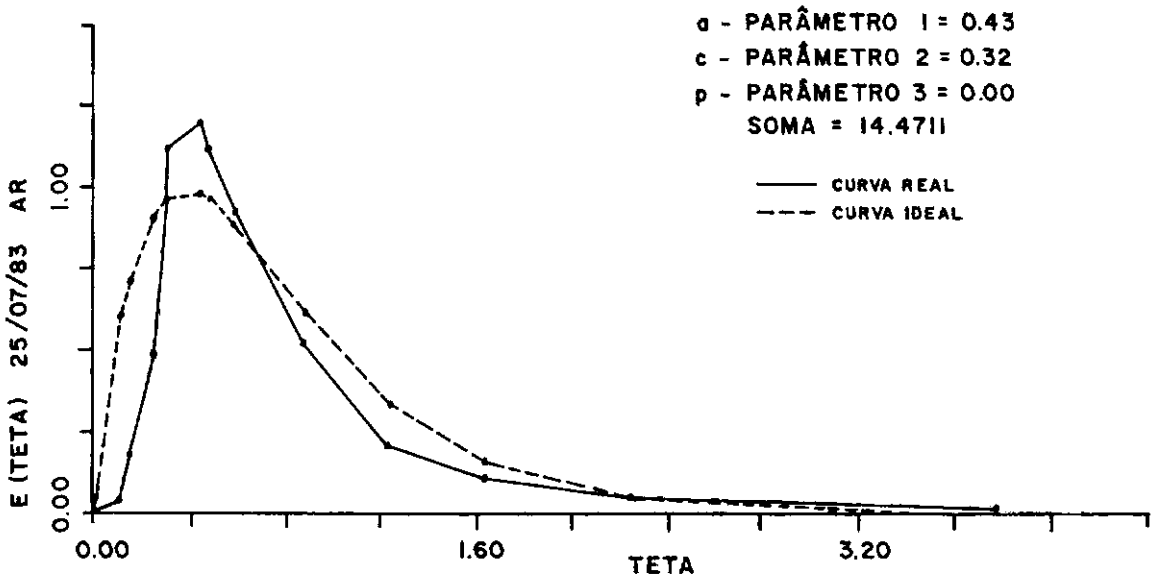


FIGURA 19a - MODELO A - EXPERIÊNCIA AR-7

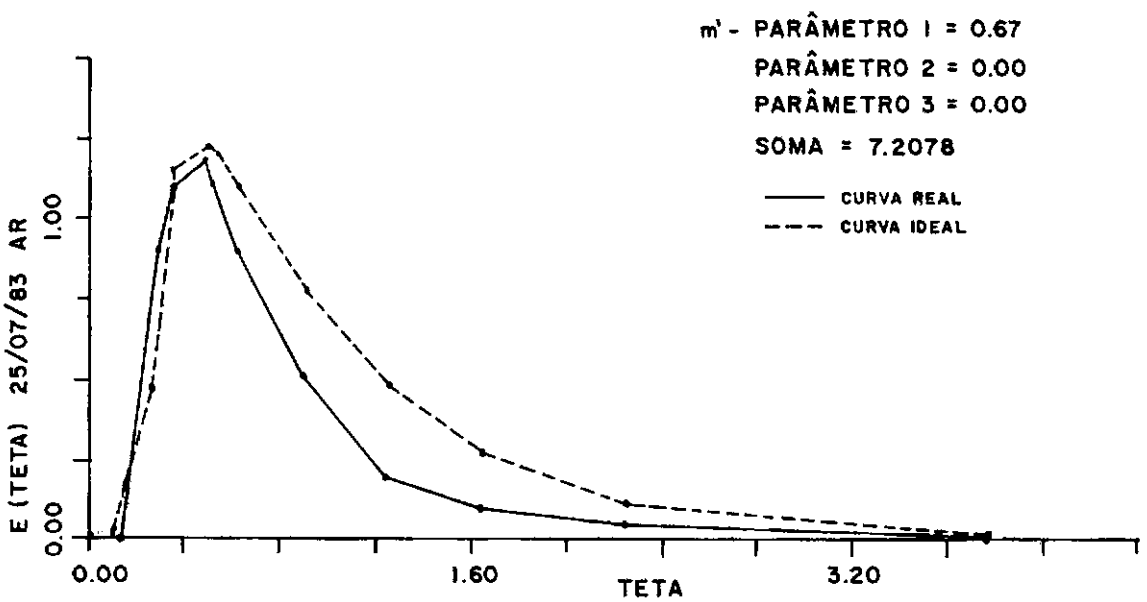


FIGURA 19b - MODELO B - EXPERIÊNCIA AR-7

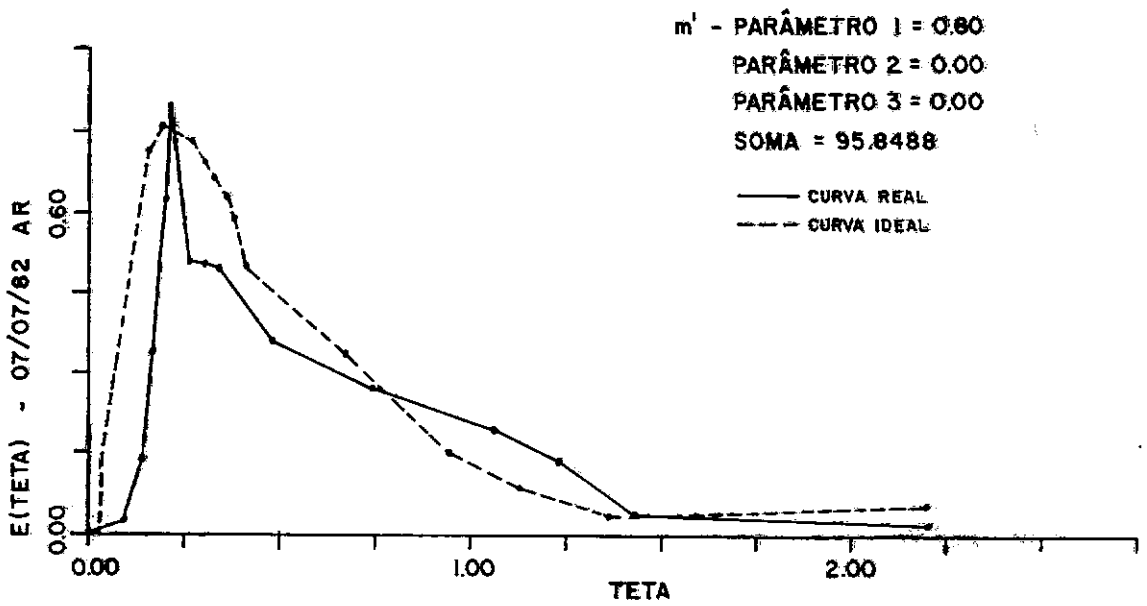


FIGURA 20 - MODELO B - EXPERIÊNCIA AR-1

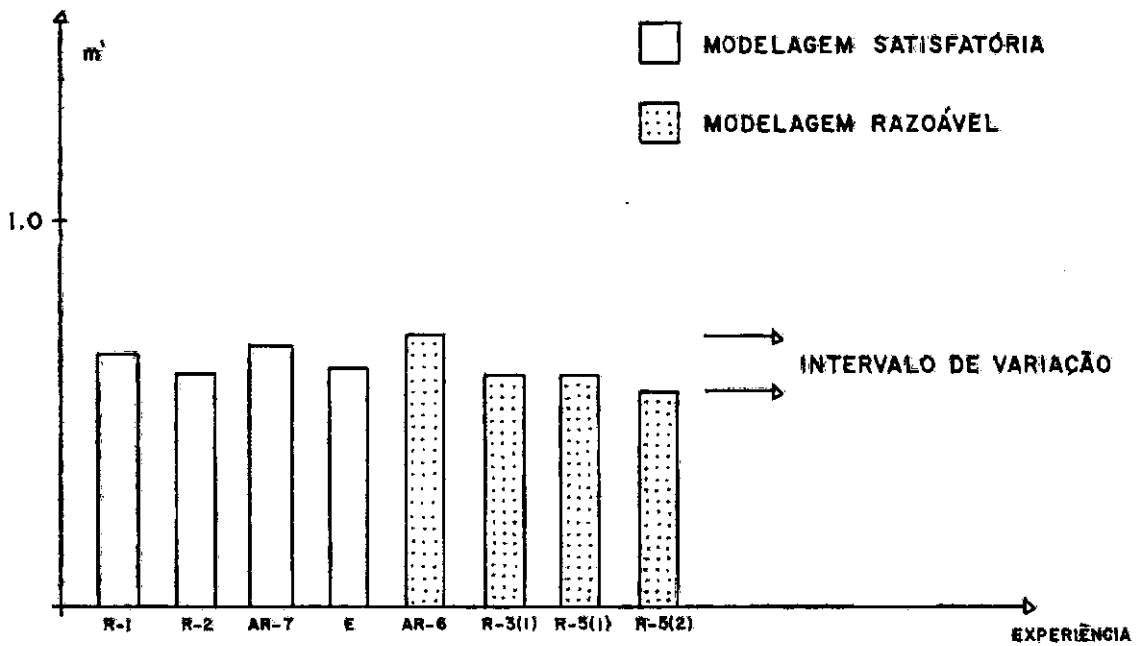


FIGURA 21a - GRÁFICO REPRESENTATIVO DO PARÂMETRO  $m'$  NAS EXPERIÊNCIAS QUE APRESENTARAM MODELAGEM SATISFATÓRIA E RAZOÁVEL.

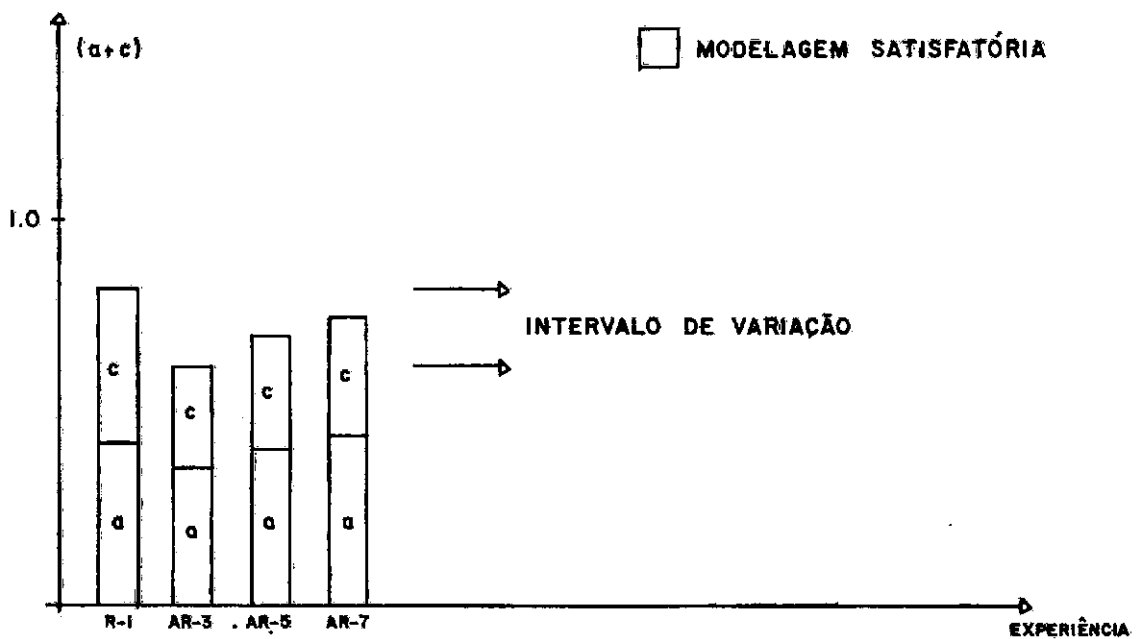


FIGURA 21b - GRÁFICO REPRESENTATIVO DA SOMA DE PARÂMETROS  $a+c$  NAS EXPERIÊNCIAS QUE APRESENTARAM MODELAGEM SATISFATÓRIA.



CÓDIGO DA EXPERIÊNCIA	MODELO ADEQUADO	PARÂMETROS DE MELHOR AJUSTE	$\bar{t}/\tau$ (MODELO)	$\bar{t}/\tau$ (EXPERIMENTAL)
R-1	MODELO B	$m' = 0,65$	1,0	0,92
	MODELO A	$a=0,42$ e $c=0,40$	0,82	0,92
R-2	MODELO B	$m' = 0,60$	1,00	0,67
AR-1	MODELO B	$m' = 0,52$	1,00	0,61
AR-3	MODELO A	$a=0,35$ e $c=0,26$	0,61	0,61
AR-5	MODELO A	$a=0,40$ e $c=0,30$	0,70	0,69
AR-7	MODELO B	$m' = 0,67$	1,00	0,75
	MODELO A	$a=0,43$ e $c=0,32$	0,75	0,75
E	MODELO B	$m' = 0,61$	1,00	0,81

TABELA IV.2 - VALORES DE PARÂMETROS DE MELHOR AJUSTE  
DA MODELAGEM SATISFATÓRIA

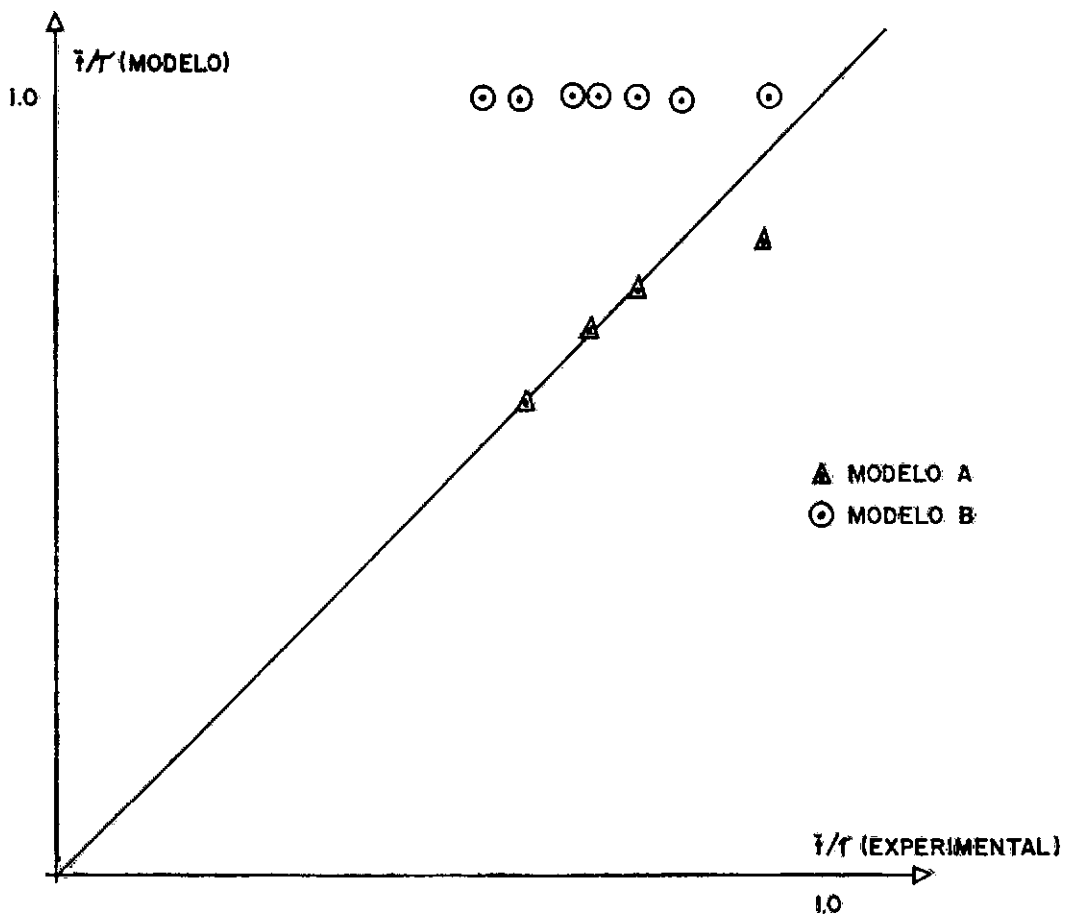


FIGURA 22 - RETA DE CORRELAÇÃO  $\bar{\tau}/\tau$  (MODELO) x  $\bar{\tau}/\tau$  (EXPERIMENTAL).

#### IV.7.3 - MODELAGEM RAZOÁVEL

As experiências AR-6, AR-8, R-3(1) e R-5(1) foram as que apresentaram modelagem razoável e são apresentadas na Tabela IV.3, que mostra os valores do parâmetro  $m'$  do Modelo B que conduziram ao melhor ajuste.

Nas experiências onde foi encontrado o Modelo B como o de ajuste razoável, os valores de  $m'$  variaram entre um mínimo de 0,55 e um máximo de 0,70, o que, analogamente ao ocorrido nos casos de modelagem satisfatória, denota a existência de elevado percentual de escoamento tipo Mistura Perfeita no Sistema de Decantação Primária, alcançando percentuais de até 70% do volume total, estando estes resultados ilustrados na Figura 21.a.

Como já observado anteriormente, também neste caso, a relação  $\bar{t}/\tau$  experimental esteve sempre inferior a 1,0, que seria o valor previsto pelo modelo.

O Modelo A não conseguiu representar os resultados das experiências supracitadas.

As Figs. 23.a, 23.b e 24.a ilustram três curvas de concentração representativas deste tipo de modelagem, bem como os modelos que melhor se ajustaram a cada caso.

CÓDIGO DE EXPERIÊNCIA	MODELO ADEQUADO	PARÂMETROS DE MELHOR AJUSTE	$\bar{t}/\tau$ (MELHOR AJUSTE)	$\bar{t}/\tau$ (EXPERIMENTAL)
AR-6	MODELO B	$m' = 0,70$	1,00	0,83
AR-8	MODELO B	$m' = 0,60$	1,00	0,95
R-3(1)	MODELO B	$m' = 0,60$	1,00	0,73
R-5(1)	MODELO B	$m' = 0,60$	1,00	0,77

TABELA IV.3 - VALORES DE PARÂMETROS DE MELHOR AJUSTE  
DA MODELAGEM RAZOÁVEL

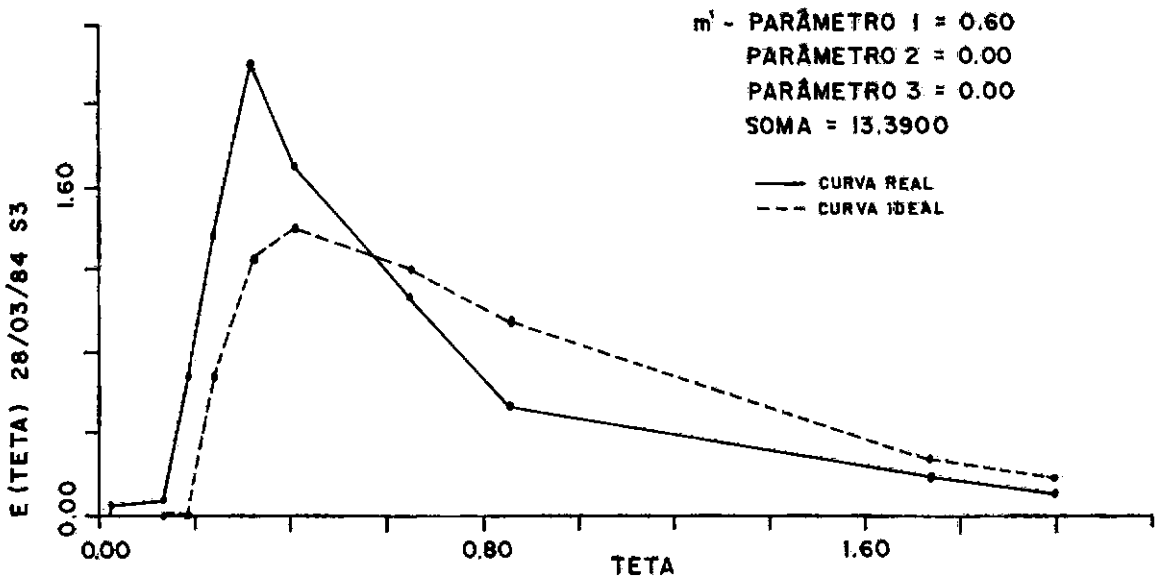


FIGURA 23a - MODELO B - EXPERIÊNCIA R-3(1)

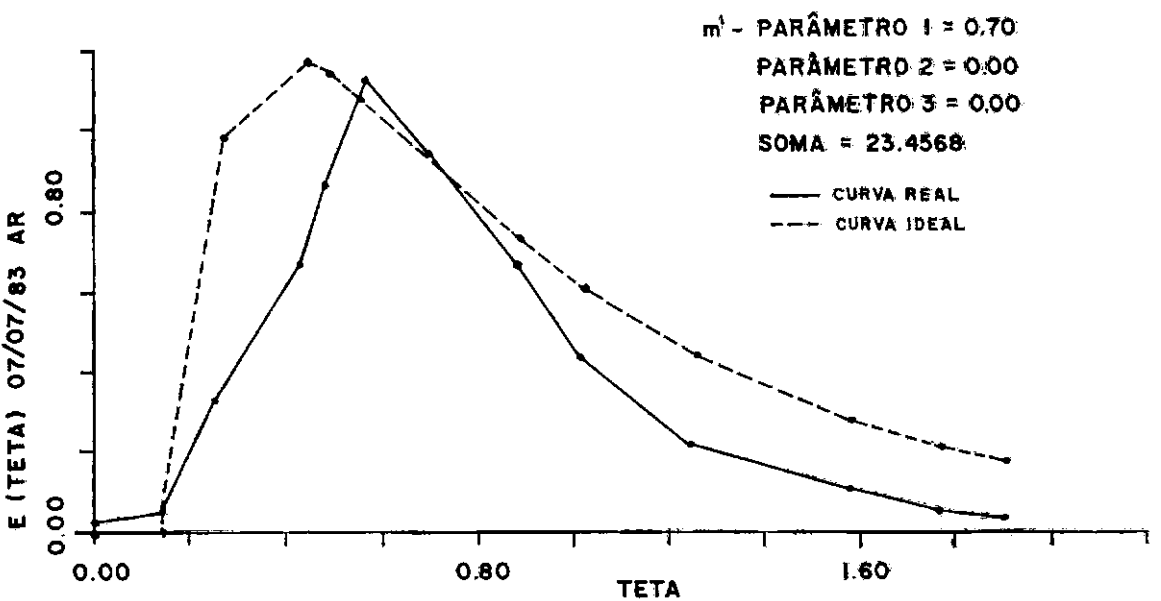


FIGURA 23b - MODELO B - EXPERIÊNCIA AR-6

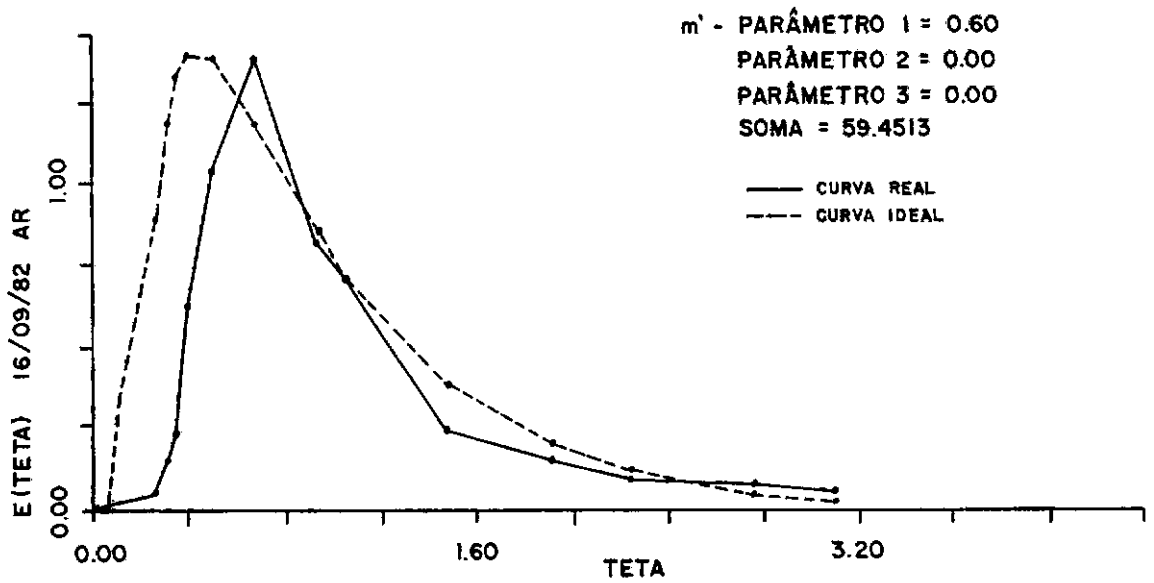


FIGURA 24a - MODELO B - EXPERIÊNCIA AR-8

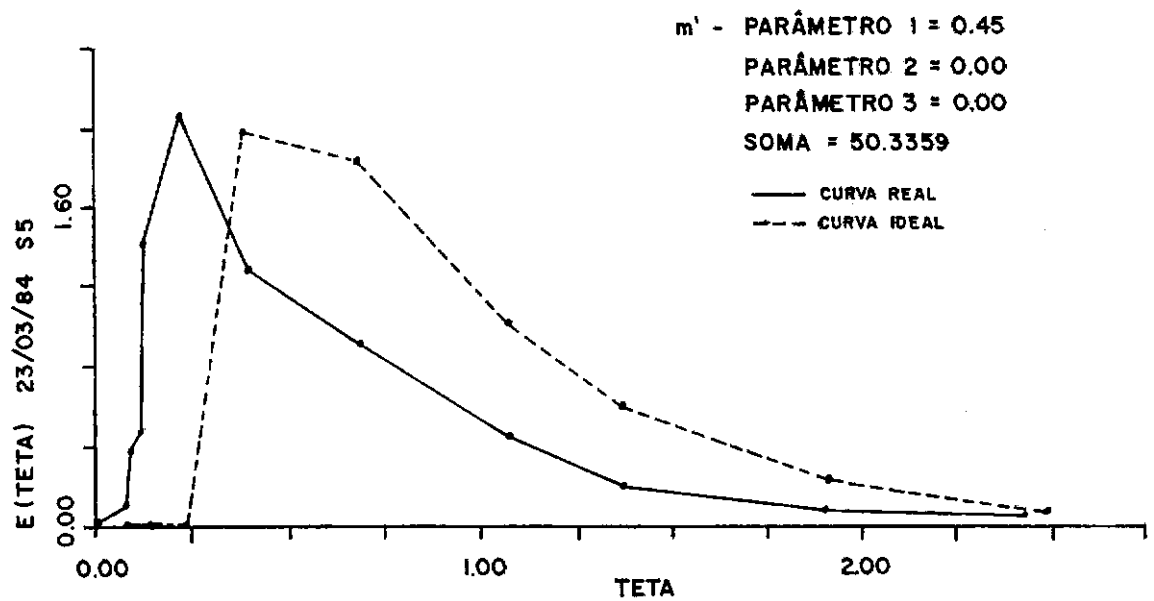


FIGURA 24b - MODELO B - EXPERIÊNCIA R-5(2)

#### IV.7.4 - MODELAGEM INADEQUADA

As experiências AR-4, U-1, R-3(2) e R-5(2) tiveram sua modelagem considerada inadequada para os modelos de escoamento escolhidos.

Como causas principais desta inadequação, podemos citar a adsorção de traçador pelo material orgânico existente no esgoto que coincidentemente foi o caso ocorrido principalmente com a Urantina, e a ocorrência de variações extremamente elevadas de vazão durante as experiências, que pode ter acarretado uma grande distorção na curva de concentração.

Apresentamos uma curva de concentração representativa destes casos, juntamente com a curva gerada pelos modelos aplicados a este exemplo que não se ajustaram de forma adequada. (Fig. 24.b).

#### IV.7.5 - INTERPRETAÇÃO FÍSICA DOS RESULTADOS

Uma interpretação física dos modelos ajustados pode ser vista nas Figuras 25.a e 25.b.

Na Figura 25.b, vemos uma representação do Modelo de Escoamento B, na qual o esgoto entra no D.P. através da tubulação afluente, avançando neste regime de escoamento do centro para a periferia, quando então passa a apresentar maior grau de turbulência, que se acentua no canal circundjacente ao D.P.

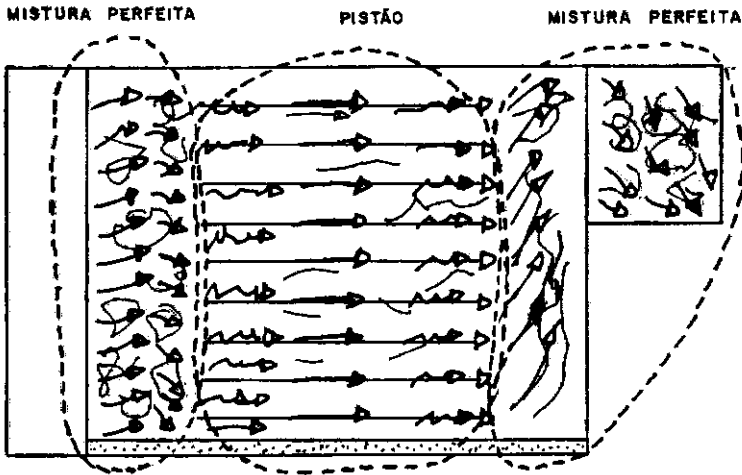


FIGURA 25a-ESQUEMA REPRESENTATIVO DE ESCOAMENTO TIPO PISTÃO EM SÉRIE COM ESCOAMENTO TIPO MISTURA PERFEITA COM CAMADA DE LODO NO FUNDO E EM SÉRIE COM ESCOAMENTO TIPO MISTURA PERFEITA SIMPLES (MODELO A).

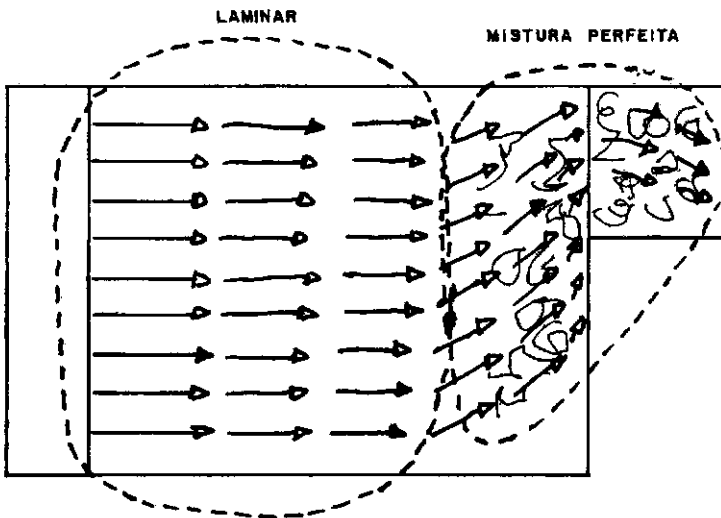


FIGURA 25b-ESQUEMA REPRESENTATIVO DE ESCOAMENTO TIPO LAMINAR EM SÉRIE COM ESCOAMENTO TIPO MISTURA PERFEITA (MODELO B).



Na Figura 25.a , vemos uma representação do Modelo de Escoamento A, o qual apresenta uma turbulência inicial devido à entrada, seguida de um escoamento quiescente do tipo pistonado (que não se verificou na prática) e seguido de um aumento da turbulência provocada pela região de saída e pela mistura no canal circundjacente.

Como o escoamento num decantador se dá com velocidades baixas, seríamos a princípio levados a acreditar que as regiões de mistura perfeita seriam muito reduzidas. No entanto , a noção de mistura perfeita está associada a uma uniformidade de concentração e não necessariamente à alta turbulência.

Assim, devido ao tempo relativamente longo de residência do líquido, o traçador sofre uma dispersão acentuada em grande parte do volume do sistema de sedimentação.

Os resultados experimentais indicam também a existência de frações de volume do fluido, inacessíveis ao traçador (zonas mortas), que estariam a nosso ver, situadas junto ao fundo do decantador (camada de lodo).

## IV.7.6 - COMENTÁRIOS A RESPEITO DA MODELAGEM

Os modelos que melhor se ajustaram ao equipamento em questão foram os Modelos de Escoamento A e B, embora tenham sido testados outros tipos de modelos mais simplificados.

No caso das porções de escoamento classificadas como em Mistura Perfeita, isto não significa a existência de elevada turbulência, mas sim que o tempo médio de trânsito é relativamente grande, o que permite que o traçador se disperse no equipamento rápida e uniformemente, o que se traduz, sob o ponto de vista da análise global do escoamento, como regiões de mistura perfeita.

Como comentários finais a respeito de Modelagem de Decantadores Primários em Estações de Tratamento de Esgotos, podemos listar:

- Nenhum modelo aplicado representou todos os casos razoavelmente.
- O Modelo B foi o que maior número de experiências melhor representou, sendo que o parâmetro  $m'$  apresentou uma constância satisfatória, como ficou ilustrado na Figura 21.a.

No entanto, o modelo não prevê a existência de zonas mortas, que experimentalmente foram constatadas pela relação  $\bar{t}/\tau < 1$ .

- O Modelo A, embora prevendo a existência de zonas mortas indicadas experimentalmente pela relação  $\bar{t}/\tau < 1$ , só se mostrou

adequado para quatro das experiências, sendo que nestes casos o parâmetro  $p$  foi nulo, permitindo a simplificação do modelo.

- Dos estudos realizados, aplicando-se os dois modelos, depreende-se que o sistema de decantação apresenta volume de líquido onde a dispersão do traçador se processa de modo rápido e uniforme, o que é conceitualmente definido como mistura perfeita.
- Dos testes realizados, pode-se observar que os traçadores que conduziram a resultados mais expressivos foram a Amidorodamina G-Extra e o Bromo-82, sendo que os demais não se mostraram muito convenientes.

Analisando-se a Figura 15, observamos a boa reprodutibilidade das curvas obtidas aplicando-se o Bromo-82 como traçador em relação à curva obtida aplicando-se Amidorodamina G-Extra, que foi considerado como o traçador que produziu melhores resultados.

- A modelagem hidráulica de um Decantador Primário não é trivial, pois este equipamento possui um fluxo de escoamento com variações de direção e um vertedouro que provoca turbulência no seio da massa líquida. Além disso, devemos considerar que os modelos de escoamento aplicados supõem um regime de escoamento permanente e uniforme, o que não ocorreu no caso estudado, onde as flutuações de vazão foram consideráveis.
- Devemos observar também que a operação inadequada da Esta-

ção de Tratamento, que provoca oscilações de vazão artificialmente prejudicou de forma considerável os experimentos efetuados. O regime de operação da ETIG é uma função de um conjunto de diversas estações elevatórias de esgoto existentes na Ilha do Governador, havendo inclusive, momentos de retenção de esgoto na rede coletora. Acreditamos que se o regime de operação da ETIG fosse natural, as diferenças de vazões seriam menos acentuadas, e com isso o cálculo da recuperação de massa e a modelagem hidráulica seriam feitos em melhores condições de trabalho.

CAPÍTULO VCONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Como conclusões básicas deste trabalho, podemos considerar que é possível o emprego de traçadores em tanques de sedimentação, que podem fornecer informações importantes a respeito de escoamento neste tipo de equipamento.

Como traçadores mais adequados para emprego nestes equipamentos, obtivemos o Bromo-82 e a Amidorodamina G-Extra, sendo esta mais indicada devido a menores dificuldades logísticas e organizacionais e menor custo.

Temos ainda a considerar que, apesar das limitações de trabalho em escala real, das 18 (dezoito) experiências realizadas, onze puderam ser selecionadas e modeladas de modo conveniente.

Os dois modelos empregados, "Dois tanques em série em mistura perfeita, sendo o primeiro deles com zonas mortas" e o "Laminar seguido por uma mistura perfeita", conseguiram representar as onze experiências supra-citadas, e observou-se desta modelagem que grandes porções do sistema de decantação, onde o traçador se dispersa rápida e uniformemente, caracterizam-se como regiões em mistura perfeita quando seria de se esperar um escoamento mais do tipo pistonado.

Ficou constatada também, a existência de frações de volume morto, no decantador, que são inacessíveis ao traçador, e que consistem nas denominadas zonas mortas, que variam entre percentuais de 8 a 40% do volume total.

Não foi detectada nenhuma influência de variação de vazões na escolha dos modelos de escoamento, seus tipos (A ou B) e parâmetros de modelagem ( $a, c$  e  $m'$ ) e ainda as flutuações de vazões durante as experiências podem ser atribuídas em parte como um dos motivos das dificuldades de modelagem do equipamento.

Em teste futuros, deve-se trabalhar com melhores condições de controle operacional, para que as vazões se tornem menos flutuantes e sejam determinadas com maior precisão.

Os testes devem ser efetuados aplicando-se traçadores alternativos à Amidorodmina **G-Extra**, principalmente a Eosina, que é fabricada no Brasil, e que só foi utilizada uma vez no trabalho.

Além disso, devem ser empregados dois tipos diferentes de traçadores, que marquem líquidos e sólidos separadamente, para comparação do movimento relativo líquido/sólido.

Finalmente, deve-se procurar aplicar modelos de escoamento mais complexos, para que se consiga modelagem mais adequada no que diz respeito à escoamento em Decantadores Primários em Estações de Tratamento de Esgotos.

## APÊNDICE I

## RESOLUÇÃO DA INTEGRAL DA EQUAÇÃO (41)

$$E(\theta) = \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{1}{(1 - m')} \cdot \frac{(1 - m')^3}{2 T^3} \cdot \frac{1}{m'} e^{\theta_0/m'} \cdot e^{-(\theta-T)/m'} dT$$

$$E(\theta) = \frac{(1 - m')^2}{2m'} e^{\theta_0/m'} \cdot e^{-\theta/m} \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{e^{T/m'}}{T^3} dT \quad (54)$$

então:

$$\int \frac{e^{T/m'}}{T^3} dT = \left[ \left( -\frac{1}{2} \cdot \frac{e^{T/m'}}{2} + \frac{1}{2m'} \int \frac{e^{T/m'}}{2} dT \right) \right]$$

$$\int \frac{e^{T/m'}}{T^2} dT = \left[ \frac{-e^{T/m'}}{T} + \frac{1}{m'} \int \frac{e^{T/m'}}{T} dT \right] \quad (55)$$

e:

$$\int \frac{e^{T/m'}}{T} dT = \ln T + \frac{T}{m' \cdot 1!} + \frac{T^2}{2m'^2 \cdot 2!} + \frac{T^3}{3m'^3 \cdot 3!} + \dots$$

$$\int \frac{e^{T/m'}}{T^3} dT = \left[ \left( \frac{-1}{2} \cdot \frac{e^{T/m'}}{T^2} + \frac{1}{2m'} \left( \frac{-e^{T/m'}}{T} + \frac{1}{m'} \left( \ln T + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{T}{m' \cdot 1!} + \frac{T^2}{2m' \cdot 2!} + \frac{T^3}{3m' \cdot 3!} + \dots \right) \right) \right] \quad (56)$$

$E(\theta)$  então assumirá a forma:

$$E(\theta) = e^{\frac{(1 - m')}{2m'}} \cdot \frac{(1 - m')^2}{2m'} e^{-\theta/m'} \left\{ \left[ \frac{-1}{2} \cdot \frac{e^{\theta/m'}}{\theta^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{2m'} \left( \frac{-e^{\theta/m'}}{\theta} + \frac{1}{m'} \left( \ln \theta + \frac{\theta}{m' \cdot 1!} + \frac{\theta^2}{2m' \cdot 2!} + \frac{\theta^3}{3m' \cdot 3!} + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \dots \right) \right] - \left[ \left( \frac{-1}{2} \cdot \frac{e^{\theta_0/m'}}{\theta_0^2} + \frac{1}{2m'} \left( \frac{-e^{\theta_0/m'}}{\theta_0} + \frac{1}{m'} \left( \ln \theta_0 + \right. \right. \right. \right. \right. \right.$$



$$+ \frac{\theta_0}{m' \cdot 1!} + \frac{\theta_0^2}{2m' \cdot 2!} + \frac{\theta_0^3}{3m' \cdot 3!} + \dots \left. \right\} \quad (57)$$

A equação (45), para facilidade computacional, pode ser expressa como:

$$E(\theta) = A e^{-\theta/m'} [B(\theta) - B(\theta_0)] \quad \text{onde:} \quad (58)$$

$$B(\theta) = \left\{ -\frac{1}{2} \frac{e^{\theta/m'}}{\theta^2} + \frac{1}{2m'} \left[ \frac{-e^{\theta/m'}}{\theta} + \left( \ln \theta + \theta/m' + \right. \right. \right.$$

$$+ \frac{\theta^2}{4m'^2} + \frac{\theta^3}{18m'^3} + \frac{\theta^4}{96m'^4} + \frac{\theta^5}{600m'^5} + \frac{\theta^6}{4329m'^6} + \frac{\theta^7}{35280m'^7} +$$

$$\left. + \frac{\theta^8}{322560m'^8} \right] \right\} \quad (59)$$

$$e \quad A = e^{(1 - m')/2m'} \cdot \frac{(1 - m')^2}{2m'} \quad (50)$$

Testes com a equação revelaram que a série poderia ser truncada no termo relativo a potência oito, sem prejuízo da precisão.

APÊNDICE IIPARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA

(Baseado no trabalho de HART e GUPTA<sup>(8)</sup>)

## A.I.1 - ÍNDICE DE TEMPO DE DETENÇÃO MEDIANO (I.T.D.Me.)

É definido pela relação:

$$I.T.D.Me. = \frac{t_{50}}{\tau} \quad (62) \quad , \quad \text{onde:}$$

$t_{50}$  - tempo necessário para passar metade da concentração de traçador injetado

$\tau$  - tempo de detenção teórico operacional (T.D.T.O.) ou tempo de passagem do fluido no equipamento.

Esse índice dá uma idéia de quão próxima a curva normal (ou curva de Gauss) está a curva de concentração de traçadores. Se a curva fosse normal, encontrar-se-ia o valor de I.T.D.Me. igual a 0,50.

## A.I.2 - ÍNDICE DE TEMPO DE DETENÇÃO MODAL (I.T.D.Mo.)

É definido pela relação:

$$I.T.D.Mo. = \frac{t_p}{\tau} \quad (63) \quad , \quad \text{onde:}$$

$t_p$  = tempo no qual é alcançado o pico da curva de concentração

Esse índice dá uma idéia do grau de proximidade que as idades do fluido estão do Tempo de Detenção Teórico Ope

racional, ou seja, de quanto as idades do fluido se aproximam da média de distribuição de idades.

### A.I.3 - ÍNDICE DE DISPERSÃO MORRIL (I.D.M.)

É definido pela relação:

$$I.D.M = \frac{t_{90}}{t_{10}} \quad (64) \quad , \quad \text{onde:}$$

$t_{10}$  - tempo necessário para 10% da massa de traçador injetada sair da unidade estudada.

$t_{90}$  - tempo necessário para 90% da massa de traçador injetada sair do equipamento estudado.

Essa relação dá uma idéia da rapidez com que o líquido afluente ao D.P., leva para sair do equipamento. Também traduz idéia de dispersão da massa de traçador injetada.

### A.I.4 - ANÁLISE DO I.T.D.Me.

Se a curva de concentração (resposta a um impulso) fosse normal e simétrica, o índice I.T.D.Me. deveria ter o valor de 0,50..

Nas experiências efetuadas observou-se que este índice variou entre os valores de 0,32 e 0,88,

Nos dias em que se usou traçador radioativo, po

de-se observar na Tabela A.I.1, que para o caso do I.T.D.Me. calculado usando-se duas sondas diferentes, a diferença entre os valores encontrados é mínima, não chegando a 10%. Isto demonstra a boa reprodutibilidade das curvas de concentração com a utilização de geometrias de medição diferentes, conforme pode ser visto na Figura | 15 |.

A diferença entre os I.T.D.Me's calculados a partir do uso de traçadores fluorescentes e radioativos aplicados simultaneamente é mais acentuada, sendo que uma melhor reprodutibilidade das curvas pode ser observada quando da aplicação de Amidorodamina G-Extra do que no caso de aplicação de Uranina.

A Tabela A.I.1 apresenta os valores dos diferentes I.T.D.Me's bem como dos I.T.D.Mo's e I.D.M's.

#### A.I.5 - ANÁLISE DO I.T.D.Mo

Observando-se a Tabela A.I.1., vemos que em todas as experiências em que se aplicou traçadores fluorescentes radioativos simultaneamente, o pico da curva de concentração é alcançado no mesmo instante, independente do traçador utilizado ou da sonda empregada.

Ora, isto é mais um indicativo da reprodutibilidade das curvas de concentração, conforme já analisado no item anterior.

É de se ressaltar também que em praticamente todas as experiências, o tempo para se alcançar o pico da curva de con

centrações se situou na faixa de 23 a 54% do tempo de detenção teórico operacional do Decantador Primário, mostrando que o ramo ascendente da curva de concentração tem uma inclinação bem mais acentuada do que o ramo descendente.

#### A.I.6 - ANÁLISE DO I.D.M.

Ao se observar a Tabela A.I.1, notamos que na grande maioria das vezes, o  $t_{90}$  é de 3,5 a 6,0 vezes maior que o  $t_{10}$ , isto é, leva-se de 3,5 a 6,0 vezes mais tempo para passar 90% de curva de concentrações do que para passar 10%.

CÓDIGO	DATA	Q(l/s)	I.T.D.Me.	I.T.D.Mo.	I.T.D.M
R-1	07-07-82	169	0,46	0,32	4,23
R-2	07-07-82	169	0,43	0,32	3,45
R-3(1)	28-03-84	162	0,35	0,30	3,73
R-5(1)	28-03-84	162	0,36	0,30	4,34
R-3(2)	29-03-84	160	0,32	0,23	5,91
R-5(2)	29-03-84	160	0,35	0,23	5,99
AR-1	07-07-82	169	0,37	0,32	5,48
AR-2	16-09-82	174	0,84	0,82	4,54
AR-3	13-04-83	159	0,53	0,17	8,50
AR-4	14-04-83	157	0,88	0,78	1,98
AR-5	16-06-83	184	0,48	0,32	9,43
AR-6	07-07-83	192	0,73	0,52	3,91
AR-7	25-07-83	206	0,68	0,41	4,89
AR-8	29-03-84	160	0,41	0,23	7,01
U-1	15-06-83	164	0,75	0,37	4,99
U-2	28-03-84	162	0,70	0,30	4,34
RM	06-07-83	173	0,39	0,51	1,51
E	22-07-83	194	0,70	0,54	4,08

TABELA A.I.1 - VALORES DOS DIFERENTES PARÂMETROS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA DO TRABALHO DE HART E GUPTA<sup>8</sup>.

APENDICE IIIMANUSEIO DOS TRAÇADORES

Quanto ao manuseio dos traçadores, os principais cuidados a serem tomados são os seguintes:

a) Sendo os traçadores fluorescentes, pigmentos capazes de manchar temporariamente ou permanentemente o corpo, materiais e roupas, muito cuidado na pesagem embalagem e transporte é necessário. Deve-se evitar correntes de ar ao se manipular os traçadores, bem como a umidade excessiva. O uso de luvas é necessário e para manuseio de massas maiores a utilização de vestimentas especiais plastificadas é recomendada.

A pessoa encarregada da injeção dos traçadores no decantador não deve ser encarregada de coletar amostras.

Frascos de coleta devem ficar completamente isolados do frasco onde foi feita a diluição do traçador, para se evitar contaminação.

Durante a obtenção da curva de calibração, frascos e pipetas devem ser removidos para utilização em faixas de concentração de mesma ordem de grandeza.

b) Quanto ao manuseio dos traçadores radioativos, os cuidados devem ser maiores:

O traçador escolhido deve ser seguro quanto a sua manipulação, ter atividade, meia-vida, radiação e energia adequadas, baixo grau de toxidez e ser de fácil transporte, se possível.

O traçador utilizado nas experiências foi o Bromo-82, e o seu emprego, assim como todos os outros nuclídeos radioativos, está condicionado ao licenciamento prévio da CNEN (Comisão Nacional de Energia Nuclear). A norma NBPR, resolução CNEN 6/73, têm por finalidade garantir a segurança da população, eventualmente sujeita aos efeitos da radiação no meio ambiente, e a segurança da equipe de trabalho, diretamente envolvida no manuseio das radiações ionizantes.

As normas consideram, para ambos os casos, duas possibilidades de exposição às radiações: exposição externa e exposição interna (incorporação).

A segurança radiolôgica, no nosso estudo, deve ser vista sob dois aspectos:

a) Exposição da equipe de trabalho na área em estudo:

O limite anual, para exposição externa, no corpo inteiro, para profissional, é igual a 5,0 Rem (Tabela 2, pág. 13, NBPR/CNEN), o que ocasiona um limite de 2,5m Rem/hora ou 20m Rem/semana.

Para o cálculo da taxa de dose recebida pelo encarregado da manipulação das pastilhas de Bromo-82, utilizou-se a fórmula:

$$T.D = K^* \cdot \frac{A}{d^2} \quad (65) \quad , \quad \text{onde:}$$

T.D = taxa de dose ( mRem/hora)

$K^* = 1,46 \text{ mRem/hora} \times \text{m}^2/\text{mCi}$  (coeficiente de taxa de dose)

$A = 21,0 \text{ mCi}$  (atividade injetada no decantador primário)

$d$  = distância entre a fonte emissora e o indivíduo encarregado da manipulação. No caso, 1,80 m.

Com isso, o valor encontrado para a taxa de dose foi de 9,50 mRem/hora.

Quando da manipulação do traçador, foi utilizado além do anteparo de chumbo, um manipulador com 1,80m de comprimento, para a colocação das pastilhas dentro do frasco de diluição, e com isso, o perigo de contaminação e de exposição da equipe de trabalho ficou bastante minimizado, além da possível utilização de misturador elétrico, que evita um contato muito prolongado entre o profissional e o material radioativo.

Como o tempo de manipulação foi inferior a 15 minutos, a dose recebida pelo manipulador das pastilhas não ultrapassou o valor de 2,38 mRem, valor este inferior ao limite de 2,50 mRem/hora estipulado pela Norma, para exposição externa.

Além disso, a pessoa encarregada da diluição e injeção do traçador usava um anteparo de chumbo que atuava como blindagem parcial à sua exposição ao material radioativo.

Devido à alta energia de emissão gama do Bromo-82 ,



existiu realmente potencial perigo de exposição externa de um indivíduo da equipe de trabalho. A radiação foi porém acentuadamente absorvida pelo cilindro de chumbo que serviu como blindagem durante a operação de transporte do material radioativo irradiado pelo CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear), dentro das normas internacionais de transporte aéreo deste tipo de carga.

A exposição interna, decorrente de eventual ingestão por alguma pessoa da água traçada, não teve possibilidade quase nenhuma de ocorrer por ser o diluente do traçador radioativo, o esgoto bruto. De qualquer forma, calculou-se a radioatividade ingerida por uma pessoa que porventura viesse a cair no Decantador Primário e viesse a beber alguma quantidade de esgoto marcado com traçador radioativo.

Para isso, usamos a relação:

$$C = \frac{A}{V_D} \quad (66) \quad , \quad \text{onde:}$$

$C$  = Concentrador de traçador (mg/l)

$A$  = Atividade do traçador injetada no decantador = 21 mCi

$V_D$  = volume teórico de diluição ( $m^3$ )

O volume teórico de diluição foi obtido dos experimentos realizados no mesmo local com traçador fluorescente e foi expresso pela relação:

$$V_D = \frac{m}{C_{\max}} \quad (67) \quad , \quad \text{onde:}$$

$m$  = massa de traçador injetada = 200 gramas

$$C_{m\bar{x}} = 96 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$$

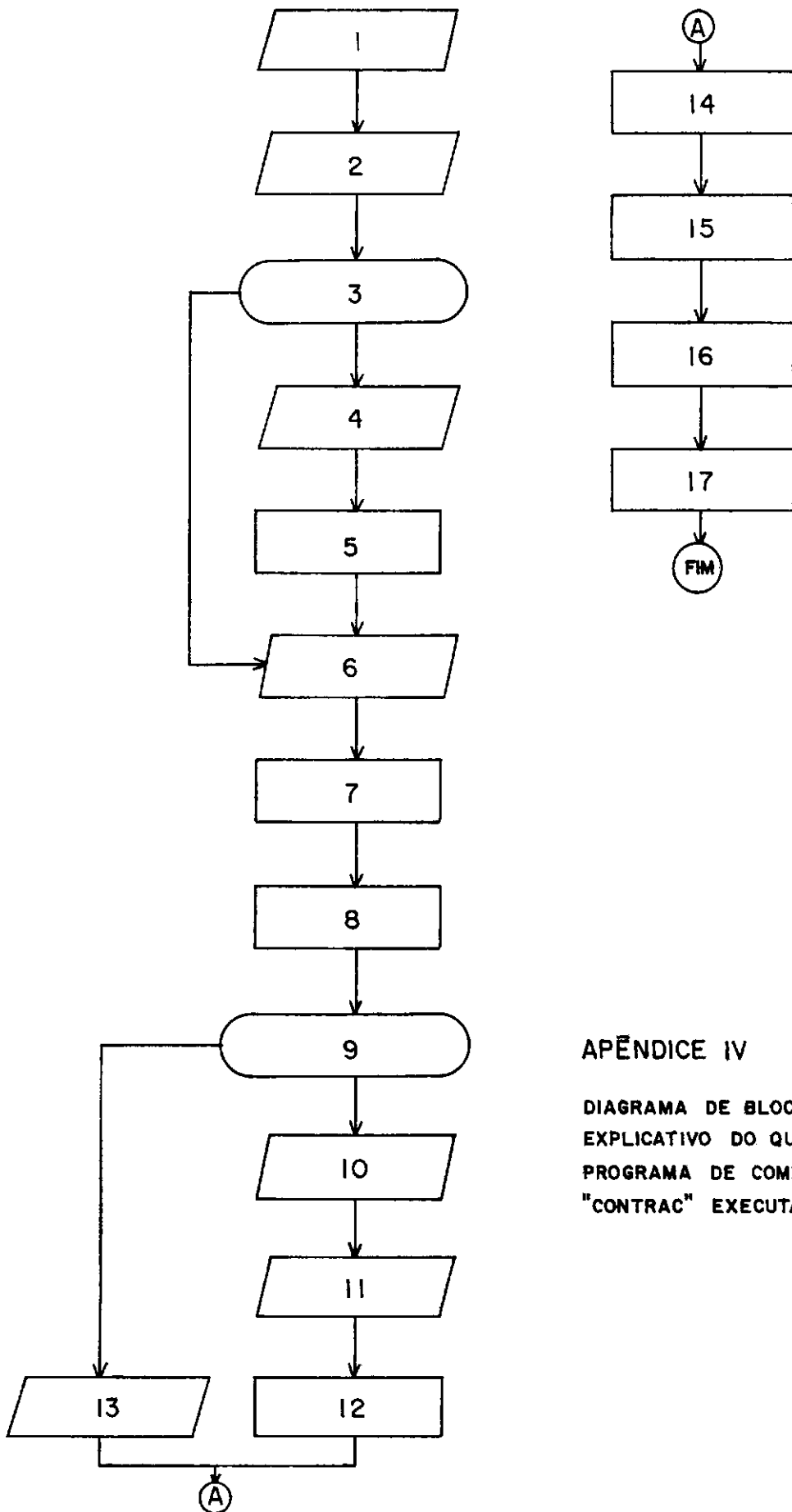
$$\text{daí, } v_D = 2,083 \text{ m}^3$$

Com isso, obteve-se  $C = 10,1 \text{ uCi/m}^3$ , valor este muito inferior ao valor máximo previsto pela Norma, que é de  $500 \text{ uCi/m}^3$ , para consumo contínuo durante o ano inteiro.

b) Exposição da população em geral na área em estudo (no caso, os operadores da Estação de Tratamento de Esgotos)

Na realidade, a possibilidade de exposição externa de um indivíduo da população foi muito remota, devido a fatores adicionais de diluição do material radioativo, tempo de exposição relativamente curto e poder de blindagem adicional da água, que não são considerados no cálculo de exposição externa. Na pior das hipóteses, a equipe de operação da Estação recebeu a mesma taxa de dose, ou pôde consumir a mesma quantidade de água da equipe de trabalho, o que foi considerado admissível em relação às Normas que tratam do assunto.(12)

Os fatores adicionais de diluição acima referidos são o fato de que ao avançar sucessivamente para as outras unidades de tratamento da ETIG, o traçador injetado foi sendo cada vez mais diluído, e as condições de contato de um indivíduo da equipe de trabalho ou da população foram ficando cada vez menos significativas.



#### APÊNDICE IV

DIAGRAMA DE BLOCOS  
EXPLICATIVO DO QUE O  
PROGRAMA DE COMPUTADOR  
"CONTRAC" EXECUTA.

Onde cada bloco executa as tarefas abaixo discriminadas:

- 1) LEITURA DO LOCAL DA EXPERIÊNCIA, UNIDADE ESTUDADA, TEMPO DE DETENÇÃO DE PROJETO, VOLUME DA UNIDADE E CÓDIGO DO TRAÇADOR.
- 2) LEITURA DE DADOS DO SEDIMENTADOR, HORA DE INJEÇÃO, TIPO DE TRAÇADOR, Nº DA Sonda (TRAÇADOR RADIOATIVO).
- 3) SE CÓDIGO DO TRAÇADOR FOR RADIOATIVO VAI PARA 6.
- 4) LEITURA DE DADOS REFERENTES À RETA DE CALIBRAÇÃO (TRAÇADOR FLUORESCENTE).
- 5) CÁLCULO DA RETA DE CALIBRAÇÃO - MÍNIMOS QUADRADOS.
- 6) LEITURA DE VAZÕES.
- 7) CÁLCULO DA VAZÃO MÉDIA.
- 8) CÁLCULO DE T.A.U. (TEMPO DE DETENÇÃO TEÓRICO OPERACIONAL)
- 9) SE CÓDIGO DO TRAÇADOR FOR RADIOATIVO, VAI PARA 13.
- 10) LEITURA DE DADOS GERAIS DA EXPERIÊNCIA: TEMPO DE CONCENTRAÇÃO INICIAL, DIA, MÊS, ANO DA EXPERIÊNCIA E DE LEITURAS NO ESPECTRO-FLUORÍMETRO - MASSA DE TRAÇADOR INJETADA, NOME DO TRAÇADOR INJETADO.

- 11) LEITURA DE DADOS REFERENTES ÀS AMOSTRAS COLETADAS EM CAMPO; HORA E MINUTO DA COLETA , LEITURAS E ESCALAS OBTIDAS NO ESPECTROFLUORÍMETRO.
- 12) CRIAÇÃO DOS VETORES REFERENTES À CONCENTRAÇÃO DE TRAÇADOR, TEMPO EM RELAÇÃO AO INÍCIO DA INJEÇÃO E TEMPO ADIMENSIONAL,
- 13) LEITURA DOS DADOS OBTIDOS EM CAMPO PARA O CASO DE TRAÇADOR RADIOATIVO E CRIAÇÃO DE VETORES REFERENTES AO TEMPO EM RELAÇÃO AO INÍCIO DA INJEÇÃO E CONTAGEM OBTIDAS DA SONDA DE CINTILAÇÃO.
- 14) CÁLCULO DOS TEMPOS RELATIVOS A 10%, 50% E 90% DA CONTAGEM TOTAL.
- 15) CÁLCULO DA MASSA DE TRAÇADOR RECUPERADA - SE FOR TRAÇADOR FLUORESCENTE.
- 16) IMPRESSÃO DE RESULTADOS.
- 17) APRESENTAÇÃO DA CURVA CONCENTRAÇÃO X TEMPO E  $E(\theta)$  X  $\theta$  EM PLOTTER.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DANCKWERTS, P.V. - Continuous Flow Systems, Chem. Eng. Sci., Vol 2, 1953, pags. 1 a 13.
2. LEVENSPIEL, O. - Chem. Reaction Engineering, John Wiley & Sons Inc., New York, 2<sup>nd</sup> ed., (1972).
3. SANT'ANNA JR, G.L. - Contribution a l'etude de L'Hydrodynamique des Reacteurs Biologiques Utilises en Traitement des Eaux Usees - L'Institut National des Sciences Appliques de Toulouse, 1980, Jun, 187p.
4. MURPHY, K.L.; BOYKO, B.I - Longitudinal Mixing in Spiral Flow Aeration Tanks. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1970, April SA 2, 211p.
5. MURPHY, K.L.; TINPANY, P.L. - Design and Analysis of Mixing for an Aeration Tank. - Journal of the Sanitary Engineering Division, 1967, October
6. MURPHY, K.L.; WILSON, A.W. Characterization of Mixing for an Aeration Tank-Journal of the Environmental Engineering Division, 1974, October.
7. CHEN, G.K.; FAN, L.T.; ERICKSON, L.E. - Computer Software for Wastewater Treatment Plant Design - Journal of Water Pollution Control Federation, 1972, May

8. HART, F.L. ; GUPTA, S.K. - Hydraulic Analysis of Model Treatment Units - Journal of the Environmental Engineering Division, 1978, August.
9. FITZ, L.W. - The Use of Tracers in Sedimentation Studies - Faculty of Graduate Studies - McMaster University - Hamilton - Ontario - Canada
10. ECKENFELDER, W.W.; FORD, D.L. - Water Pollution Control - Jenkins Publishing Co - Austin - Texas, 1970
11. FEUERSTEIN, D.L.; SELLECK, R.E. - Fluorescent Tracers for Dispersion Measurements - Journal of the Sanitary Engineering Division, 1963, August, p. 1-21.
12. RADIOLOGICAL HEALTH HANDBOOK - Division of Radiological Health - U.S. Department of Health Education and Welfare, 1960, September.
13. AZEVEDO NETTO, J.M.; ALVAREZ, G.A. - Manual de Hidráulica - Editora Edgard Blucher Ltda, 1983, São Paulo, Brasil.
14. WILLARD, H.; MENNITT, L.; DEAN, J. - Análise Instrumental - Fundação Calouste Gulbenkian, 1974, Lisboa, Portugal, 2<sup>a</sup> edição.
15. NORMAS BÁSICAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA - Resolução CNEN 06/73 - Departamento de Fiscalização do Material Radioativo - Comissão Nacional de Energia Nuclear - D-0.nº180, Seção I, Parte II.

16. OPERATING INSTRUCTIONS - Spectrofluoremeter JY3 - Jobin von Division d'Instruments S.A. - France
17. SOARES, J.H.P. - Uso de Traçadores na Modelagem de Unidades de Aeração e Decantação em Estações de Tratamento de Esgotos, COPPE/UFRJ, 1985, Maio.