

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

+ COMPORTAMENTO DA ONDA NO LEITO E SUA APLICAÇÃO
À MEDIÇÃO DA DESCARGA DE SEDIMENTOS POR ARRASTO

por

LÍLIA DANTAS CUNHA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

NOVEMBRO - 1978



C972c

Cunha, Lília Dantas.

Comportamento da onda no leito e sua aplicação à medição da descarga de sedimentos por arrasto / Lília Dantas Cunha. - Campina Grande, 1978. 74 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1978. "Orientação : Prof. Dr. Takao Shirasuna". Referências.

1. Sedimentos - Transporte. 2. Sedimentos - Medições da Descarga. 3. Onda do Leito - Comportamento. 4. Dissertação - Ciências. I. Shirasuna, Takao. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 627.157(043)

COMPORTAMENTO DA ONDA NO LEITO E SUA APLICAÇÃO
À MEDIÇÃO DA DESCARGA DE SEDIMENTOS POR ARRASIO

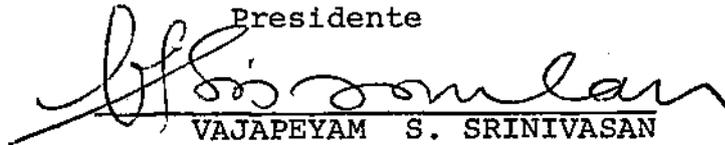
LÍLIA DANTAS CUNHA

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

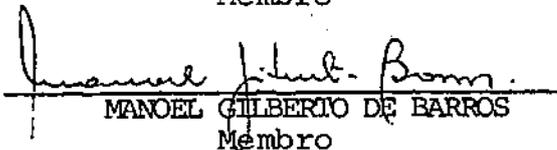
COMISSÃO JULGADORA:



TAKAO SHIRASUNA
Presidente



VAJAPEYAM S. SRINIVASAN
Membro



MANOEL GILBERTO DE BARROS
Membro

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL
NOVEMBRO - 1978

AGRADECIMENTOS

Ao Orientador Prof. Ph.D. TAKAO SHIRASUNA cooperante da JICA (JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY), pela grande ajuda e incentivo aliada a dedicação sem a qual esta pesquisa não teria êxito;

ao Co-Orientador e amigo Prof. Ph.D. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, que através de observações e valiosos comentários muito contribuiu para o término deste trabalho;

ao Prof. M.Sc. Manoel Gilberto de Barros, da Universidade Federal da Paraíba, pela dedicação com que me estimulou durante todo o transcorrer da pesquisa;

ao Técnico do Laboratório de Hidráulica do UFPb, Sr. Nelson Barbosa como também ao auxiliar técnico Sr. Luis do Nascimento pelo grande auxílio na montagem dos equipamentos e a todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

R E S U M O

Esta pesquisa visa analisar a relação entre a quantidade de sedimentos transportada e o comportamento da onda do leito, baseando-se em equação estabelecida a partir da equação bi-dimensional da continuidade para sedimentos.

Para este fim, foram realizadas várias experiências no laboratório para observar o comportamento da onda no leito como também para medir diretamente a quantidade de sedimentos transportada. A comparação dos resultados da análise e medição indicam que o cálculo do transporte através da observação do movimento da onda no leito é satisfatório.

A B S T R A C T

The present study is an attempt to analyse the relationship between the movement of the bed forms and the quantity of sediment transported. The analysis is based on the equation of continuity for sediment motion.

With this objective, experiments were conducted in a laboratory flume in order to observe the movement of the bed forms as well as to directly measure the quantity of sediments transported. The comparison of the results of analysis and measurement indicates that the calculation of the quantity of sediment transported through the observation of the movement of bed forms is quite satisfactory.

Í N D I C E

	<u>Página</u>
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	01
1.1 - Generalidades.....	01
1.2 - Objetivo desta Pesquisa.....	05
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	07
2.1 - Generalidades.....	07
2.2 - Formas de Leito e seus Respective ^s Comportamentos.....	07
2.3 - Métodos de Avaliação da Descarga de Sedimentos do Leito.....	16
CAPÍTULO III - COMPORTAMENTO DA ONDA NO LEITO E SUA APLICAÇÃO A MEDIÇÃO DA DESCARGA DE SEDIMENTOS DOS LEITOS.....	27
3.1 - Comportamento da Onda no Leito.....	27
3.2 - Aplicação do Comportamento das Formas do Leito à Medição do Transporte de Sedimentos	38
CAPÍTULO IV - PROCEDIMENTO DAS EXPERIÊNCIAS E RESULTADOS OBTIDOS.....	43
4.1 - Generalidades.....	43
4.2 - Equipamentos e Materiais Usados.....	43
4.3 - Procedimento das Experiências.....	47
4.4 - Resultados Obtidos.....	
CAPÍTULO V - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	61
5.1 - Generalidades.....	61
5.2 - Distribuição da Quantidade de Sedimentos Transportados ao Longo da Onda no Leito....	61

Página

5.3 - Comparação entre a Descarga de Sedimentos Calculada "Qc" através da Equação (3.6) e Descarga de Sedimentos Obtidos Diretamente do Canal pela Coleta "Q _o ".....	62
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E COMENTÁRIO.....	69
6.1 - Conclusões.....	69
6.2 - Comentário.....	72
BIBLIOGRAFIA.....	74

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - GENERALIDADES

O transporte de sedimentos é um fenômeno que vem sendo observado nos cursos d'água durante todo o transcorrer da história da humanidade. Entretanto, este transporte nem sempre foi considerado pelo homem como prejudicial, quando se fazia o aproveitamento dos recursos hídricos existentes, porque antigamente a quantidade de água necessária para suprir as necessidades humanas era pequena, não havendo necessidade da construção de grandes obras hidráulicas para represar uma maior quantidade.

Com o aumento das populações, aliado ao desenvolvimento das civilizações, muitas vezes a água disponível passou a ser escassa, sendo preciso armazená-la para suprir as necessidades humanas, ou seja, aproveitamento d'água

para abastecimento, geração de energia, irrigação e uso industrial. Afim de atender essas necessidades surgiram as grandes obras hidráulicas, que devido as localizações nos leitos dos cursos d'água alteram as características do escoamento bem como o regime de transporte.

Os fenômenos de deposição e erosão dos sedimentos influem consideravelmente nas obras hidráulicas causando danos e para solucionar esse problema é necessário conhecer a quantidade e a qualidade dos sedimentos transportados, além de outros aspectos ligados ao problema.

A qualidade pode ser determinada retirando amostras do material do leito e analisando-as no laboratório. A quantidade é um problema difícil de determinar. Tem-se procurado avaliar a quantidade de sedimentos transportada através de inúmeras pesquisas em vários países. Essa avaliação do transporte é de importância básica em situações tais como, na determinação da vida útil dos reservatórios, na manutenção da capacidade de transporte dos canais, etc.

O problema da necessidade de uma avaliação do transporte de sedimentos vem sendo sentido no Nordeste do Brasil e em todo o país, sempre quando se necessita a utilização dos recursos hídricos existentes. Mas mesmo assim principalmente nesta região (Nordeste), são poucos os trabalhos de medição da quantidade de sedimentos transporta

das como também são poucos os postos fluviométricos em que se efetuam a medição do transporte de sedimentos.

O transporte de sedimento nos canais ou cursos d'água pode ocorrer de 3 modos distintos ou numa combinação destes modos. Um modo desse transporte é através do deslizamento ou rolamento das partículas sobre o leito, o qual é denominado de "arrastamento" ou transporte de sedimentos por arrasto. Esse tipo de transporte é caracterizado pelas formas do leito que serão descritas posteriormente no Capítulo II. Um outro modo de ocorrer esse transporte é pelo saltamento das partículas permanecendo parcialmente em suspensão e depois retornando ao leito, sendo este transporte denominado de "saltação". Ainda os sedimentos podem ser sustentados pelo fluxo durante o seu movimento, ou transporte de sedimentos em "suspensão".

Em geral, o transporte que muito contribui para o assoreamento dos reservatórios e à diminuição da capacidade de transporte dos canais é o transporte de sedimentos ocasionado pelas formas do leito ou transporte de sedimentos por arrasto. Levando-se em conta esse fator, este trabalho se prende a avaliação deste transporte, de uma maneira bastante simples mas que serve eficientemente para esta finalidade.

Para avaliar este tipo de transporte pode-se

proceder de 3 maneiras. Uma maneira é basear-se nas fórmulas estimativas deste transporte, estabelecidas através de modelos matemáticos e físicos. Estas fórmulas estimativas como será explicado posteriormente, não apresentam resultados condizentes com o valor real da quantidade de sedimentos transportada, variando consideravelmente os resultados em um mesmo curso com a aplicação de uma fórmula à outra, portanto não podendo-se com o emprego destas assegurar um certo grau de confiança.

Um outro meio de avaliar este transporte é a medição através de aparelhos denominados de amostradores, sendo que os resultados com a aplicação deste método, como será referido no capítulo seguinte, também não podem ser considerados como satisfatórios, levando-se em conta os vários fatores envolvidos.

O outro método de avaliação é o processo no qual observa-se o comportamento da forma do leito relacionando-o ao transporte de sedimentos através de uma fórmula. Este método apesar de não muito difundido ainda no campo, foi estudado por Simons e outros (3), apresentando bons resultados. Por este motivo é necessário avaliar e comprovar a sua eficiência, para a indicação na solução dos problemas de medição do transporte de sedimentos do leito.

1.2 - OBJETIVO DESTA PESQUISA

Considerando-se os assuntos já referidos acima pode-se resumir que o transporte de sedimentos por arrastamento é caracterizado pelas formas do leito, e que a quantidade de sedimentos transportada por arrastamento pode ser relacionada ao comportamento da forma do leito.

Esta pesquisa visa analisar a relação entre a quantidade de sedimentos transportada e o comportamento da onda no leito, ou o comportamento da forma do leito, baseando-se em equação estabelecida a partir da equação bi-dimensional da continuidade, para sedimentos.

Esse tema foi assim escolhido com o intuito de se avaliar um método de medição que seja eficiente e que possa facilmente ser utilizado nos trabalhos de medição de sedimentos do leito desta região e de todo o país.

Primeiramente, será feita uma interpretação da equação que estabelece a relação entre o comportamento da onda no leito e a distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo do leito para cada forma do leito em particular.

Em seguida, será feito um estudo detalhado do método de medição da descarga de sedimentos do leito baseado nos parâmetros observados diretamente do comportamen

to das formas do leite durante o seu movimento, relacionando estes parâmetros com uma equação para comprovar e reforçar a eficiência deste método de medição.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - GENERALIDADES

O transporte de sedimentos por arrasto depende da forma do leito existente. Por este motivo, serão considerados neste capítulo as várias características do leito incluindo, as condições de desenvolvimento, diferenças no comportamento, como são entendidas através de vários materiais bibliográficos encontrados.

Em termos da avaliação da quantidade de sedimentos transportada por arrasto serão analisados os métodos existentes para estimar este transporte.

2.2 - FORMAS DO LEITO E SEUS RESPECTIVOS COMPORTAMENTOS

2.2.1 - Ocorrência das Formas do Leito

Em decorrência do escoamento sobre um leito erodível, várias formas de leito aparecem como resultado da interação entre o escoamento e o próprio leito.

O tipo de forma de leito resultante e a di men são, depende das propriedades do escoamento e do mate rial constituente do leito.

A descrição e a definição dos principais ti pos de formas foram estabelecidas de acôrdo com o Comitê em Sedimentação da ASCE Task Force on Bed Forms in Alluvial Channels (1966), (6), como também a sequência de aparecimentu os destas formas em um leito erodível.

2.2.2 - Sequência de Aparecimento das Formas de Leito

As configurações ou formas de leito que apa recem em um canal aluvial em decorrência do escoamento, pe lo aumento da velocidade a uma profundidade constante ou consequentemente do aumento do número de Froude (F_r), em or dem de sequência são as seguintes: Ripples, Dunas, Leito Plano com movimento de sedimentos, Antidunas, Chutes e Pools.

Essas formas foram relacionadas por ordem de ocorrência com o aumento de F_r , se o material do leito fôr menor que 0,6 mm. Para leitos cujo material, ou cujo diâmetro médio das partículas constituintes (D_{50}) for maior que 0,6 mm, a configuração do leito é dunas ao invés de ripples, logo após o início do movimento, mesmo em relativamente baixos valores de F_r (4). A figura 1 ilustra estas formas.

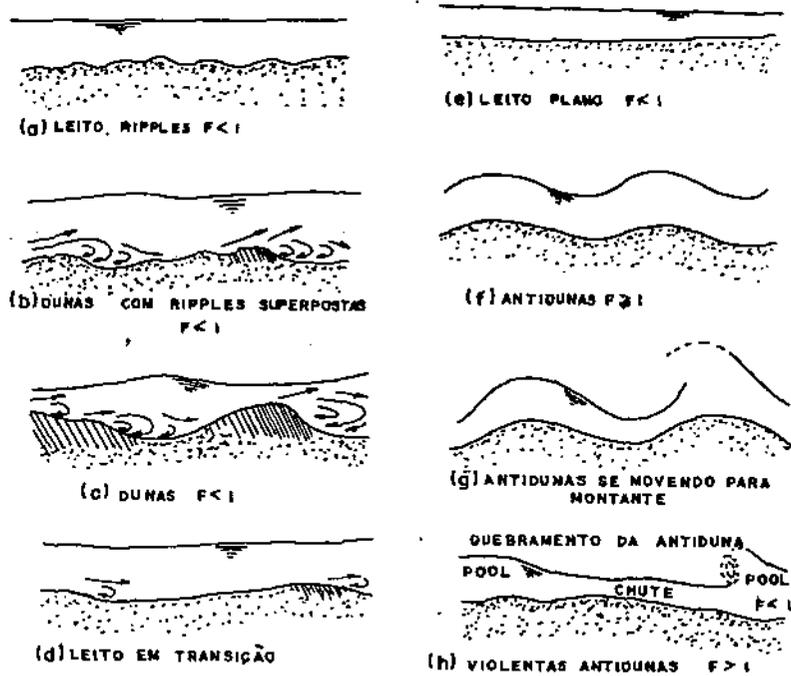


FIG. 01 - FORMAS DE LEITO (Ref. 4 - pág. 222)

2.2.3 - Características e Comportamento das Formas de Leito (6), (4).

O leito artificial plano sem qualquer movimento de sedimentos, após o início do escoamento se transforma em ripples, se o material for constituído de areia fina com D_{50} menor que 0,6 mm e em dunas em caso contrário.

Ripples são formas de leito que aparecem em relativamente baixas velocidades de escoamento e raramente aparecem em leitos constituídos de sedimentos maiores que 0,6 mm. A forma das ripples é ligeiramente triangular em perfil, com suave declividade na face montante e declividade na face jusante quase igual ao ângulo de repouso do material do leito.

Na Figura (1), ítem (a), aparece o esboço deste tipo de leito. O movimento das ripples é para jusante, sendo sua velocidade muito pequena se comparada com as das outras formas subsequentes. O comprimento dessas formas é aproximadamente menor que 30,0 cm e suas alturas também são menores que 5 cm.

O aumento do número de Froude implica numa mudança na configuração do leito de ripples para dunas. No leito dunas muitas vezes ocorre tal como mostra a Figura 1, ítem (b), ripples superpostas as dunas. As superposições

das ripples tendem a desaparecer com o aumento de F_r ficando o leito totalmente coberto de dunas.

Dunas são formas de leito com formato similar às ripples, mas com o comprimento e altura maiores que as ripples. No leito dunas, tal como mostra a Figura 1, item (c), a superfície da água é ondulada e está fora de fase com a superfície do leito, ou seja, a superfície da água se contrae sobre a crista da duna e se dilata sobre a depressão.

Se tem comprovado em canais de laboratórios que nos leitos dunas, F_r é geralmente menor que 1. O transporte de sedimentos ocasionado por estas formas é pequeno, quando comparado com o transporte de sedimentos devido às formas de leito que sucedem este tipo de leito, e grande quando comparado ao transporte ocasionado por ripples.

Observações no campo (4) indicam que as dunas se formam em qualquer canal independentemente do tamanho do material do leito - se a velocidade for suficiente para causar o transporte deste material, embora exista evidência para o aparecimento do leito plano em sequência ao leito ripples, sem ocorrer durante a transformação do leito ripples para leito plano, ou vice-versa, o aparecimento de dunas em leitos constituídos de materiais muito finos (1).

Alguns pesquisadores não concordam com a existência de diferenças entre o leito ripples e o leito du

nas. Vanoni e outros (Ref. 4 pág. 227) são alguns dos que viram poucas razões para distinção entre ripples e dunas, porque o mecanismo pelo qual elas se formam e se movem, são idênticos. Entretanto as razões que serão descritas agora justificam esta diferença:

- 1) Ripples sòmente se formam se o diâmetro médio do material do leito, D_{50} , for menor que 0,6 mm. (4).
- 2) As dunas movem-se ao longo dos cursos d'água com as alturas variando, enquanto que as ripples movem-se ao longo dos cursos com alturas aproximadamente constantes. (4).
- 3) Os efeitos de uma mudança de profundidade na resistência ao escoamento são contrários. Se o leito é ripples, um aumento na profundidade causa uma diminuição na resistência ao escoamento, mas no leito dunas um aumento na profundidade causa um aumento na resistência ao escoamento se o material do leito for maior que 0,3 mm (D_{50}), enquanto que um aumento na profundidade diminui a resistência ao escoamento se o material do leito é mais fino que 0,3 mm (4).

O aumento do número de Froude no leito dunas, ocasiona o alcance do estado de transição com as dunas dimi

nuindo suas alturas.

O leito no estado de transição não tem forma definida, tal como ocorre nos leitos ripples e dunas. O que acontece, é simplesmente um estágio pelo qual o leito passa durante a transformação de leito dunas para leito plano com movimento de sedimentos.

A configuração do leito em transição, tal como mostra a figura 1, ítem (d), consiste de um arranjo heterogêneo de formas, principalmente de dunas de baixas alturas intercaladas com regiões planas.

O estado de transição pode continuar indefinidamente sob um grande aumento de F_r , até que este seja tão grande que a forma de leito subsequente seja antidunas ao invés de leito plano como se previa.

Em sequência ao estado de transição, um aumento de F_r , ocasiona um total desaparecimento das dunas e deste modo o leito plano será formado. No leito plano, sem movimento de sedimentos, a superfície do leito é praticamente lisa, sem elevações ou depressões notáveis.

A figura 1, ítem (e), mostra um esboço do leito denominado como plano com movimento de sedimentos.

Sob qualquer variação nas condições do fluxo que ocasione um aumento em F_r , o estado de leito plano pode

ser alterado. Acontecendo assim, ondas se formam no leito e na superfície da água. Essas ondas têm o formato ligeiramente sinusoidal em perfil, com a altura da crista comparável ao comprimento da onda. A altura destas ondas crescem até que se tornam instáveis e se quebram, ou então elas continuam estáveis e subsequentemente se modificam.

O movimento destas formas pode ser para montante, jusante ou então elas permanecem estacionárias. Seu movimento para montante levou Gilbert (Ref. 4 - pag. 229), a denominá-las de antidunas.

A figura 1, itens (f) e (g), mostra um esboço deste tipo de leito. Nota-se que a superfície da água e do leito estão sempre em fase. O número de Froude é grande ($F_r > 1$), e o regime de escoamento é rápido.

Alguns autores (4), em continuação a descrição dos tipos de formas de leito, incluem mais uma forma em sequência as antidunas com o aumento de F_r . Estas formas foram denominadas de Chutes e Pools e são responsáveis por um grande transporte de sedimentos.

O leito Chute e Pool consiste de uma pequena montanha de sedimentos, na qual a jusante desta, devido ao talude, o fluxo acelera ou se torna supercrítico e a montante desta, o fluxo desacelera e se torna subcrítico. A Fig. 1, item (h), mostra o fluxo acelerado ou Chute onde $F_r > 1$ e o

fluxo desacelerado ou "Pool" onde $F_r < 1$. O leito constituído de Chutes e Pools é também chamado de violentas antidunas (4).

Pelo assunto referido acima pode-se notar que as características e o comportamento da onda no leito vêm sendo muito estudadas e muitos pesquisadores continuam tentando esclarecer a formação da onda no leito (6), (4). Entretanto não foi encontrado nenhuma referência bibliográfica sobre o movimento da onda no leito em relação a distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo deste.

2.3 - MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA DESCARGA DE SEDIMENTOS DO LEITO

Em geral, na avaliação da descarga de sedimentos dos leitos, 3 processos são usados:

- 1º) Estimativas deste transporte através de fórmulas.
- 2º) A utilização de medidores ou amostradores da descarga de sedimentos do leito.
- 3º) Avaliação da descarga de sedimentos do leito, através

da observação direta do movimento da forma ou onda no leito.

2.3.1 - Estimativas Através de Fórmulas

A estimativa da descarga de sedimentos do leito através de fórmulas há muito tempo vem sendo aplicada. Por exemplo, a equação da função de carga de arrasto no leito de Einstein, a equação de Shields, etc. (4).

O maior problema para o engenheiro é selecionar uma das fórmulas existentes, para aplicação no seu problema particular. Esta seleção não é direta pois os resultados com o emprêgo das várias fórmulas em um mesmo curso sempre diferem não sendo possível determinar qual delas dá o resultado mais preciso.

A figura 2 mostra um gráfico apresentado por Task Committee, da ASCE em 1971, no qual pode-se notar que para uma mesma descarga d'água, por exemplo $Q_a = 8 \text{ft}^3/\text{s} \times \text{ft}$, considerando-se a equação de Laursen e a equação de Shields, os resultados obtidos com a aplicação da equação de Shields são 200 vezes maiores que os obtidos com a aplicação da equação de Laursen.

Considerando-se o método de medição da des carga de sedimentos do leito por arrasto, através da medi ção direta com amostradores, será discutida e analisada a eficiência destes, para um possível emprêgo na avaliação da descarga de sedimentos por arrasto.

Primeiramente, se fará uma breve descrição dos aparelhos desenvolvidos para esta finalidade. Em geral os amostradores existentes podem ser classificados como os seguintes (4): amostrador tipo caixa, amostrador tipo pane la e amostrador tipo poço. Todos estes amostradores são pro jetados para coletar a amostra em um local qualquer do lei to.

O amostrador tipo caixa consiste de um reci piente com grades, onde os sedimentos são acumulados, uma vara e cabos suportes que tornam este amostrador portátil, e ainda um leme para dar uma direção apropriada (4).

Esse amostrador é colocado no leito com a en trada fechada e quando está bem firmado, a entrada é aber ta com o tempo começando a ser registrado.

Com a abertura da entrada, a mistura de sedi mento-água começa a passar e esta sofre uma redução devido a grade existente na saída da caixa que facilita a deposi ção dos sedimentos. Ao final da medição a entrada é fechada e o tempo medido, com o amostrador sendo retirado do leito.

Durante a coleta da amostra uma resistência ao escoamento é observada em face a presença do amostrador, que é responsável pela redução da velocidade de escoamento e do aumento da pressão na entrada do amostrador. Esse efeito da diminuição da velocidade ocasiona uma deposição em frente ao amostrador que atrapalha a eficiência do medidor.

O amostrador tipo panela consiste de uma panela com fundo, e duas paredes laterais. Dentro desta panela existe um sistema de desvio para retardar o escoamento e facilitar a deposição.

O outro tipo de amostrador, o tipo poço, consiste de uma depressão (poço), instalado no canal para capturar os sedimentos que são removidos por dispositivos mecânicos auxiliares.

Dentre estes 3 tipos de amostradores, o amostrador tipo caixa é o mais comum, contudo o emprêgo destes amostradores na medição da descarga de sedimentos do leito sempre foi um problema, em face as alterações que estes ocasionam no escoamento quando colocados nas proximidades do leito dificultando assim o movimento dos sedimentos.

Por este motivo foi desenvolvido um amostrador denominado de amostrador de diferenças de pressões (4), tal como mostra a figura 3, o qual tem uma seção de expansão que assegura que a velocidade de entrada e a velocidade

do curso sejam iguais. A eficiência deste amostrador tem sido considerada boa, e os mais recentes projetos de medidores de descarga do leito são principalmente deste tipo.

Contudo, mesmo se considerando estes fatores a aplicação dos amostradores na avaliação da descarga de sedimentos do leito é ainda discutida, haja visto que estes medidores são utilizados na obtenção de "amostras de pontos", do material do leito, o que não pode ser considerado como representativo da descarga de sedimentos ao longo do canal, já que a velocidade e o movimento dos sedimentos varia consideravelmente no tempo e ao longo do leito. Além desses fatores existe também as possíveis perdas de sedimentos no momento em que se está efetuando a coleta.

Tomando-se por base estes problemas pode-se concluir que com o uso dos amostradores para se obter uma boa estimativa da descarga de sedimentos é necessário um bom conhecimento das características ou do comportamento da onda no leito em relação a quantidade de sedimentos transporta ao longo deste, para uma boa localização destes aparelhos.

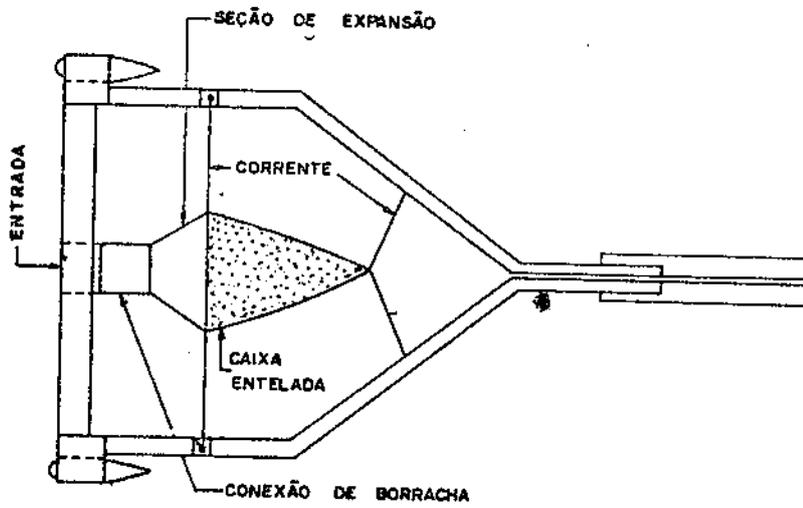
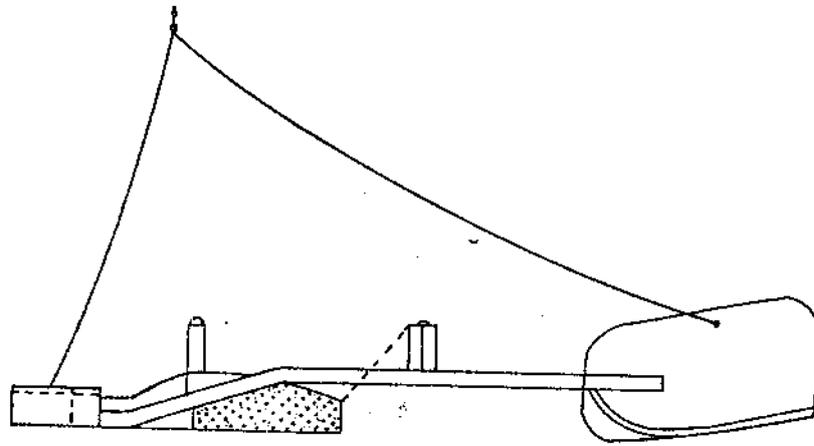


FIG. 03 . AMOSTRADOR DE DIFERENÇAS DE PRESSÕES

2.3.3 - Avaliação da Descarga de Sedimentos do Leito Através da Observação Direta do Comportamento da Onda no Leito

Uma outra maneira de avaliar a descarga de sedimentos do leito é o processo de observação direta do comportamento da onda no leito com o auxílio de uma equação estabelecida por Simons e outros. (3).

Esta equação é a seguinte:

$$q_b = (1 - \lambda) U_b \cdot Y + C_1 \quad (2.1)$$

onde os parâmetros significam:

q_b = descarga de sedimentos (por arrasto) em volume por unidade de largura e por unidade de tempo;

U_b = velocidade média das ripples e dunas na direção do escoamento.

Y = elevação do leito acima de um plano horizontal de referência arbitrário.

λ = porosidade da areia

C_1 = constante representada por parte da carga do leito que não entra na propagação das dunas e ripples.

Simons e outros (3) ainda chegaram a seguinte equação assumindo que dunas e ripples têm o formato triangular.

$$q_b = (1 - \lambda) U_b \cdot \frac{h}{2} + C_1 \quad (2.2)$$

onde:

h = altura média das dunas ou ripples.

A equação (2.1) estabelecida e analisada por Simons e outros (3), basea-se na equação diferencial para a descarga de sedimentos do leito primeiramente sugerida por Exner em 1925 (4). Como é indicado por Simons (3) esta equação não apresenta novas idéias pois o conceito de determinação da carga do leito através das dimensões e das velocidades das formas data do século passado. (3).

Os recentes desenvolvimentos de equipamentos eletrônicos para a medição do perfil do leito dos cursos e das formas geométricas das ondas facilitam uma melhor e mais eficiente maneira de medição, sendo portanto necessário avaliar este método e sua precisão para indicá-lo a me

dição da descarga de sedimentos por arrasto.

A avaliação da eficiência da equação (2.2) foi realizada em um canal de recirculação, onde a altura média h , e a velocidade média U_b , das dunas e ripples foram registradas. Estas velocidades e alturas foram determinadas por observação visual através das paredes transparentes do canal e pela utilização do fatômetro sônico. (3).

A conclusão a que chegaram estes pesquisadores, foi que a equação (2.2) é de grande ajuda na determinação da descarga de sedimentos do leito, se o leito for constituído de material fino com formas ripples, onde praticamente não existe material em suspensão (3), na qual pode-se considerar esta estimativa como a descarga de sedimentos total (suspensão e arrasto). Como também, se o leito for dunas onde existe muito material em suspensão, esta equação é uma boa estimativa para a descarga de sedimentos do leito.

Na dedução da equação (2.2), Simons e outros (3) reconheceram como limitações à sua aplicação, os parâmetros estabelecidos para a sua formação, isto é:

- 1º) ripples e dunas são de formato triangular;
- 2º) ripples e dunas são bi-dimensionais ou seja, a velocidade média U_b e a altura média h são supostas constantes

através da largura total do curso;

39) a porosidade é constante ao longo do curso.

A equação (2.1) deduzida baseada na equação da continuidade para sedimentos foi transformada na equação (2.2) para o caso de ripples e dunas e aplicada à medição da descarga de sedimentos do leito e mesmo considerando os fatores acima citados, resultados razoáveis foram atingidos.

Contudo com respeito a interpretação da equação (2.1) para as diversas formas de leito existentes, não foi encontrada nenhuma referência bibliográfica sobre o assunto e portanto a interpretação desta equação é muito útil para trazer mais informações sobre a formação e o comportamento da onda no leito. Além disso se o movimento dos sedimentos for esclarecido pode-se empregar devidamente os medidores a fim de se obter um melhor resultado na medição da descarga de sedimentos do leito.

Para um melhor entendimento do assunto referido, no próximo capítulo, esta equação será desenvolvida e será interpretada para as diversas formas de leito.

CAPÍTULO III

COMPORTAMENTO DA ONDA NO LEITO E SUA APLICAÇÃO A MEDIÇÃO DA DESCARGA DE SEDIMENTOS DOS LEITOS

3.1 - COMPORTAMENTO DA ONDA NO LEITO

A equação da continuidade para sedimentos baseada no movimento bi-dimensional da onda no leito é a seguinte:

$$\frac{\delta y}{\delta t} (x, t) + \frac{\delta q_b}{\delta x} (x, t) = 0 \quad (3.1)$$

nesta equação os parâmetros serão definidos de acordo com a figura 4. Estes parâmetros são os seguintes:

$q_b (x, t)$ = carga transportada em volume aparente por unidade de largura e por unidade de tempo;

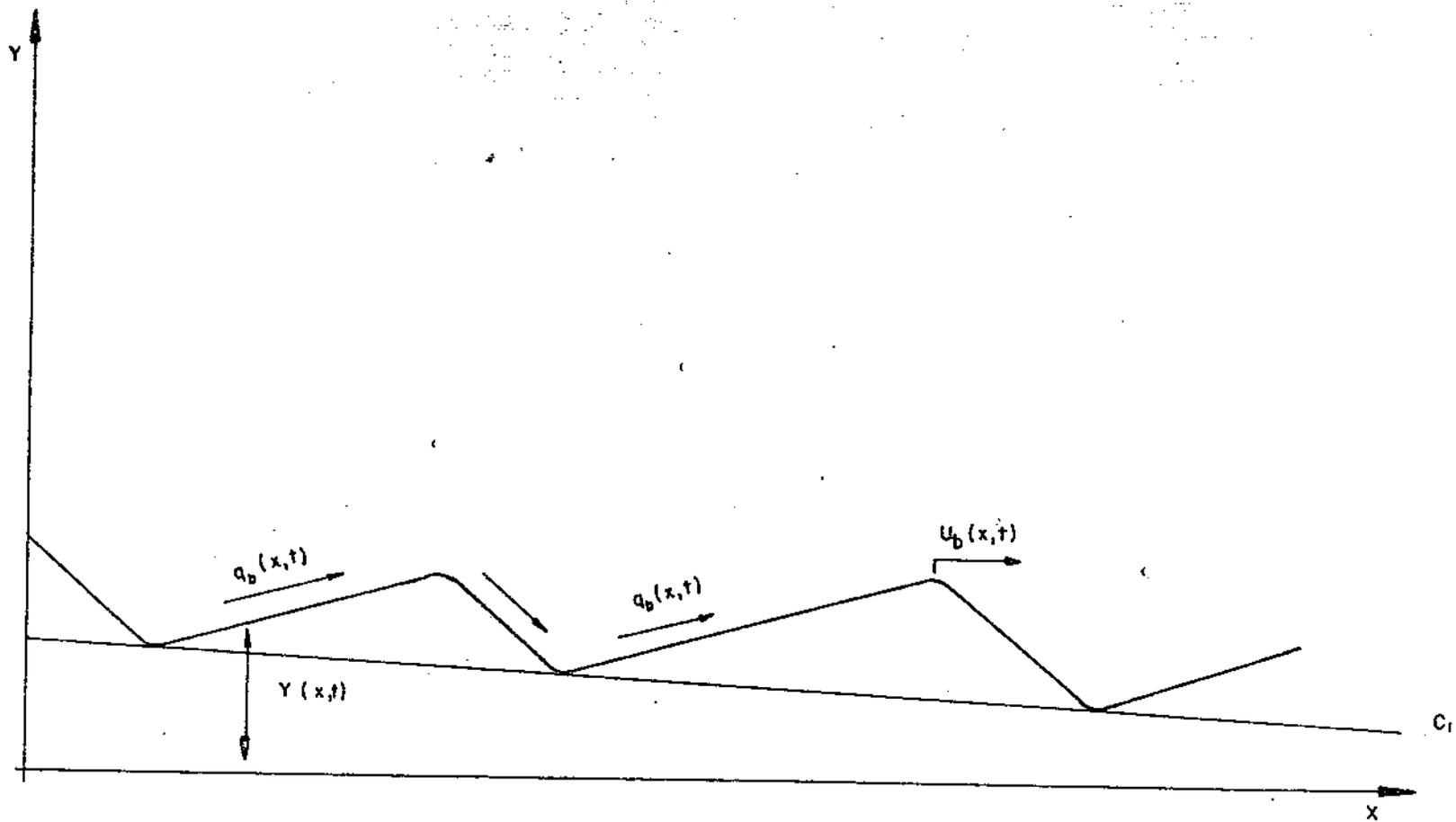


FIG.04 VELOCIDADE E ELEVAÇÃO DA ONDA NO LEITO EM
RELAÇÃO A UM PLANO DE REFERÊNCIA ARBITRÁRIO

$Y(x, t)$ = elevação do leito, com o sinal positivo acima de um plano de referência arbitrário.

x = distância paralela ao escoamento ou plano de referência;

t = tempo.

No caso de deslocamento da onda no leito sem deformações significativas, com velocidade $U_b(x, t)$, pode-se expressar a seguinte relação conhecida como a hipótese de Taylor, (Ref. 5 - pág. 40):

$$\frac{\delta}{\delta t} = -U_b(x, t) \frac{\delta}{\delta x} \quad (3.2)$$

onde:

$U_b(x, t)$ = velocidade da onda no leito com o sinal positivo na direção do escoamento.

Substituindo a equação (3.2), na equação (3.1) obtém-se a equação (3.5).

$$-U_b \frac{\delta y}{\delta x} + \frac{\delta q_b}{\delta x} = \quad (3.3)$$

Considerando-se U_b como a velocidade média da onda no leito, este valor será aproximadamente constante ao longo do leito com o tempo, então:

$$\frac{\delta}{\delta x} (-U_b \cdot y + q_b) = 0 \quad (3.4)$$

$$q_b = U_b \cdot y + C_1, \text{ ou}$$

$$q_b(x, t) = U_b \cdot y(x, t) + C_1 \quad (3.5)$$

Na equação (3.5) a constante de integração C_1 é a quantidade de sedimentos transportadas pelas camadas situadas abaixo das formas do leito, tal como mostra a figura 4.

A equação (3.5) também foi obtida por A. G. Mercer (Da ref. 2 - pág. 209), Simons e outros (3), entre tanto estes pesquisadores só consideravam o comportamento da onda no leito para o caso de ripples e dunas. Neste caso o movimento da onda no leito é sempre para jusante, ou seja, $U_b > 0$. Mas no caso das formas, leito plano e antidunas o comportamento da onda no leito difere do leito ripples e dunas. Tomando-se em consideração estes fatores, a equação (3.5) poderá ser analisada ou interpretada para satisfazer as condições de transporte para todas as formas do leito.

Estas interpretações são as seguintes:

19) No caso do leito ser constituído por ripples ou dunas, ou de dunas com ripples superpostas, o movimento dessas formas é para jusante, então $U_b > 0$. Nestes tipos de leitos, nas depressões destas configurações o transporte é considerado nulo, logo tomando-se como referência a linha que une duas depressões consecutivas destas configurações, abaixo desta linha não vai existir transporte e pode-se considerar C_1 como sendo igual a zero. Com $C_1 = 0$ a distribuição da quantidade de sedimentos transportados ao longo da onda no leito é proporcional a altura da onda no leito, ou analiticamente

$$q_b \propto Y$$

A figura 5 mostra graficamente esta proporcionalidade.

29) No caso do leito ser plano com movimento de sedimentos, a elevação da onda no leito é zero (0) e a distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo da onda no leito é expressa analiticamente por:

$$q_b = C_1$$

A figura 7 expressa graficamente esta relação. Pode-se observar através desta figura que a distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo da onda no leito é uniforme e não depende da elevação da onda no leito.

39) No caso do leito ser antidunas. Pode acontecer, que estas se movam para montante, jusante ou permaneçam estacionárias. O valor de C_1 é também considerado como a quantidade de sedimentos transportada pelas camadas abaixo das formas do leito.

a) Se as antidunas se movem para montante ($U_b < 0$), a distribuição da quantidade de sedimentos transportado ao longo da onda no leito, pode ser expressa analiticamente como

$$q_b \propto (C_2 - Y)$$

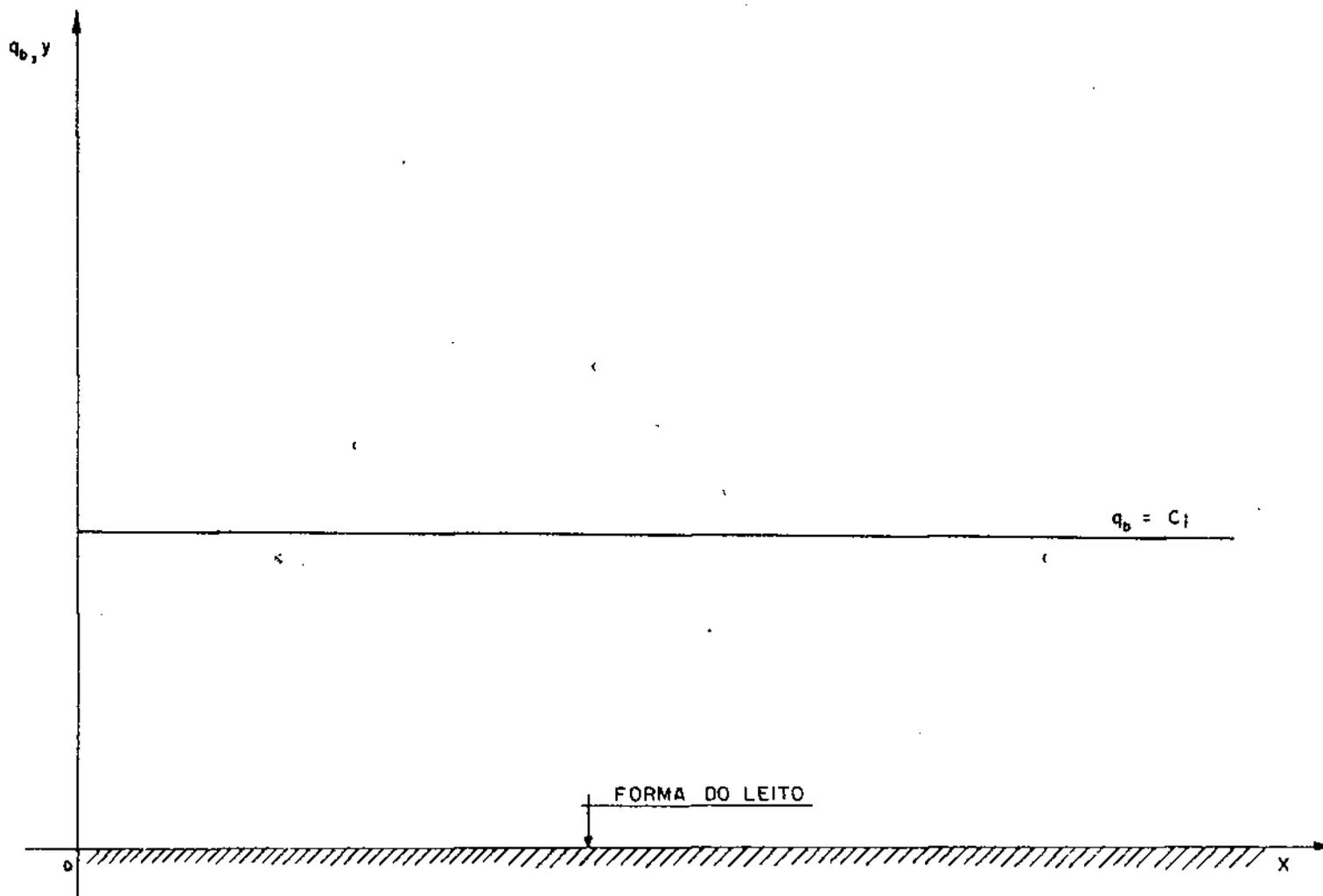


FIG. 07 - NO LEITO PLANO A DISTRIBUIÇÃO DA QUANTIDADE DE SEDIMENTOS TRANSPORTADA É HOMOGÊNEA E IGUAL A C_1

onde
$$C_2 = \frac{C_1}{U_b}$$

A figura 6 mostra graficamente a distribuição da quantidade de sedimentos transportada para esta situação.

Interpretando-se a figura 6 pode-se concluir que a distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo da onda no leito é tanto maior quanto menor a elevação da onda no leito e tanto menor quanto maior a elevação da onda no leito.

- b) Se as antidunas se movem para jusante ($U_b > 0$) a distribuição da quantidade de sedimentos transportada é expressa analiticamente como

$$q_b \propto (C_2 + Y)$$

onde

$$C_2 = \frac{C_1}{U_b}$$

A figura 8 expressa graficamente a distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo do

leito. Observando-se esta figura, pode-se concluir que a distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo da onda no leito é tanto maior quanto maior for a elevação da onda no leito e tanto menor quanto menor a elevação da onda no leito.

- c) Se as antidunas permanecem estacionárias ($U_b = 0$). A distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo da onda no leito é expressa analiticamente por

$$q_b = C_1$$

como também pode ser expressa graficamente através da figura 9. Observando-se esta figura pode-se concluir que a distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo do leito é homogênea e não depende da elevação da onda no leito.

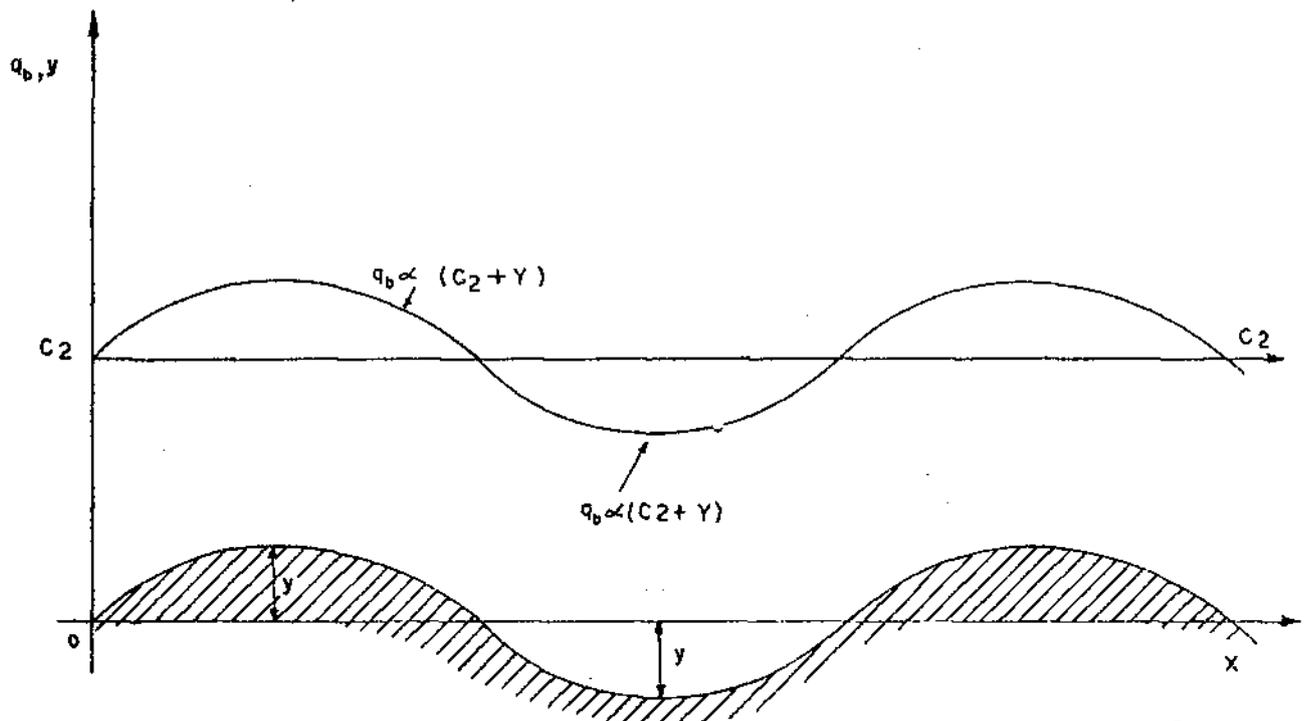


FIG.08 - LEITO ANTIDUNAS SE MOVENDO PARA JUSANTE ($U_b > c$), A DISTRIBUÇÃO DA QUANTIDADE DE SEDIMENTOS TRANSPORTADA AO LONGO DO LEITO. É PROPORCIONAL A UMA CONSTANTE MAIS A ELEVÇÃO DA ONDA NO LEITO.

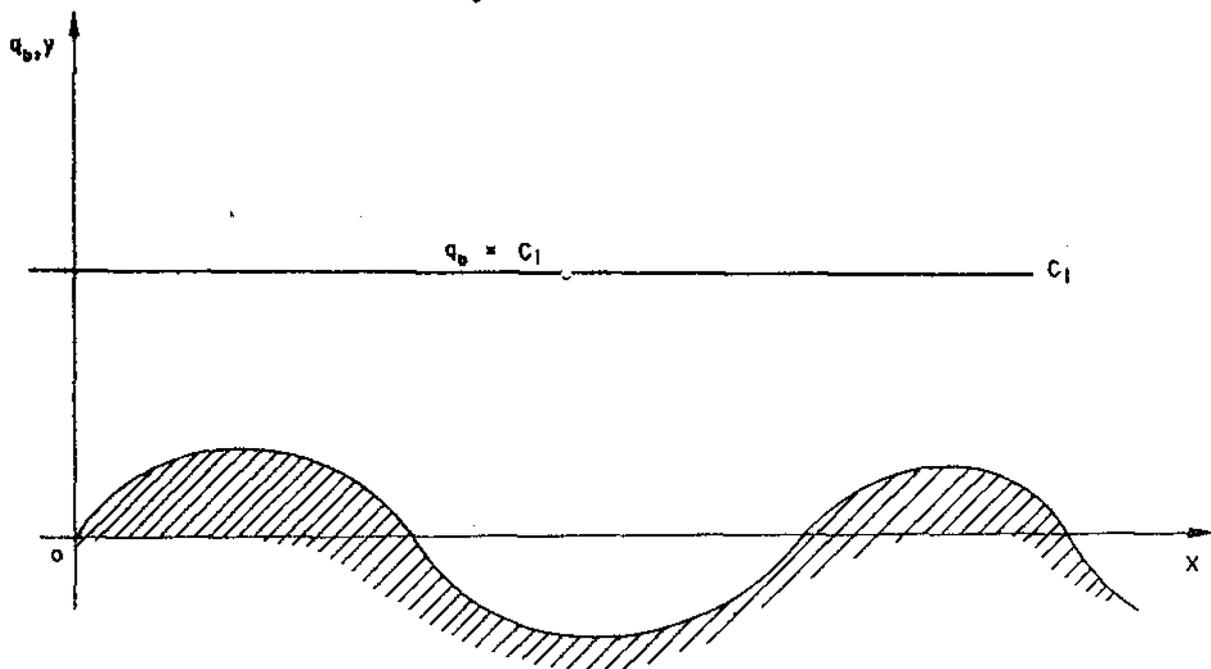


FIG.09 - NO CASO DE ANTIDUNAS ESTACIONARIAS A DISTRIBUÇÃO DA QUANTIDADE DE SEDIMENTOS TRANSPORTADA AO LONGO DO LEITO É CONSTANTE E IGUAL A C_1 .

3.2 - Aplicação do Comportamento das Formas do Leito à Medi- ção do Transporte de Sedimentos

Como já foi visto no item anterior, em quase todos os casos estudados, a distribuição da quantidade de sedimentos transportada por arrastamento varia ao longo do leito em função da elevação da onda. Por este motivo não é suficiente medir um ponto qualquer do leito, para avaliar a descarga de sedimentos por arrasto. É necessário avaliar uma descarga média ao longo do leito para se obter um resultado satisfatório o que não pode se fazer facilmente com os amostradores devido as dificuldades em operá-los.

Considerando-se o método de medição que observa o comportamento da onda no leito, a descarga média pode ser obtida integrando-se e fazendo-se a média ao longo do curso d'água, da equação da distribuição da quantidade de sedimentos transportada, isto é:

$$q_b = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} U_b \cdot Y(x, t) dx + C_1$$

onde "L" é um intervalo ao longo do leito considerado.

O uso desta equação para estimar a quantidade de sedimentos transportada implica no conhecimento da ve

locidade e da altura da onda no leito.

A quantidade de sedimentos que são transportados pelas camadas abaixo das configurações do leito, C_1 , é difícil de determinar visualmente e analiticamente para todas as formas do leito exceto para ripples e dunas onde praticamente não existe transporte abaixo das depressões, então $C_1 = 0$.

Partindo-se desta consideração a descarga de sedimentos do leito através da equação (3.5) só pode ser avaliada para leitos constituídos de ripples e dunas.

Pela equação (3.5.) assumindo-se que dunas e ripples têm o formato triangular, com velocidade U_b constante esta equação se torna:

$$q_b = U_b \cdot \frac{h}{2} \quad (3.6)$$

ou seja, a descarga média ao longo de um trecho considerado do leito, por unidade de largura e por unidade do tempo depende somente da altura média "h" e da velocidade média das dunas ou ripples no leito.

Na equação (3.6), a altura média é obtida fazendo-se a média das várias alturas das dunas ou ripples no leito no trecho considerado, sendo que estas alturas são medidas no perfil longitudinal destas configurações tirando-se uma perpendicular à linha que une duas depressões consecutivas.

cutivas de cada onda, pela sua crista.

A velocidade média na equação (3.6) é a média das velocidades de cada configuração, sendo a velocidade de cada duna ou ripple, determinada medindo-se o espaço percorrido por estas em um certo intervalo de tempo considerado em relação ao deslocamento de cada crista da onda. A velocidade média será a média das velocidades de cada onda no leito. A figura 10 mostra graficamente a altura e a distância percorrida por duas dunas em um certo intervalo de tempo considerado.

As alturas médias e a velocidade média utalizada para verificar a eficiência e aplicabilidade desta equação foram obtidas em laboratórios para diversos leitos dunas com o auxílio de fotografias. Já quando se deseja aplicar este método ao campo pode-se conseguir a altura média com os perfis longitudinais do leito registrados pelo fatômetro sônico se os cursos tiverem grande profundidade ou através de réguas limnimétricas se os cursos d'água tiverem pequenas profundidades.

A avaliação da descarga de sedimentos do leito através da equação (3.6) mesmo já sendo um procedimento conhecido e estudado por outros pesquisadores (2) (3), necessita de mais medições que comprovem e reforcem os resultados obtidos anteriormente, principalmente pela facilidade de aplicação deste método de medição o que não ocorre com os outros métodos.

Afim de verificar o comportamento da onda no leito e sua aplicação a medição da descarga de sedimentos por arrasto, foram realizadas várias experiências no laboratório, as quais tinham por objetivo obter uma grande variação nas dimensões das ondas no leito para se coletar uma máxima quantidade de dados para serem aplicados na equação (3.6) e comparados a outros valores da descarga de sedimentos do leito obtidos através de medição direta.

Além de uma máxima variação nas dimensões das ondas objetiva-se também o aspecto bi-dimensional da onda no leito, levando-se em consideração que a equação (3.6) foi estabelecida com base no movimento bi-dimensional da onda no leito.

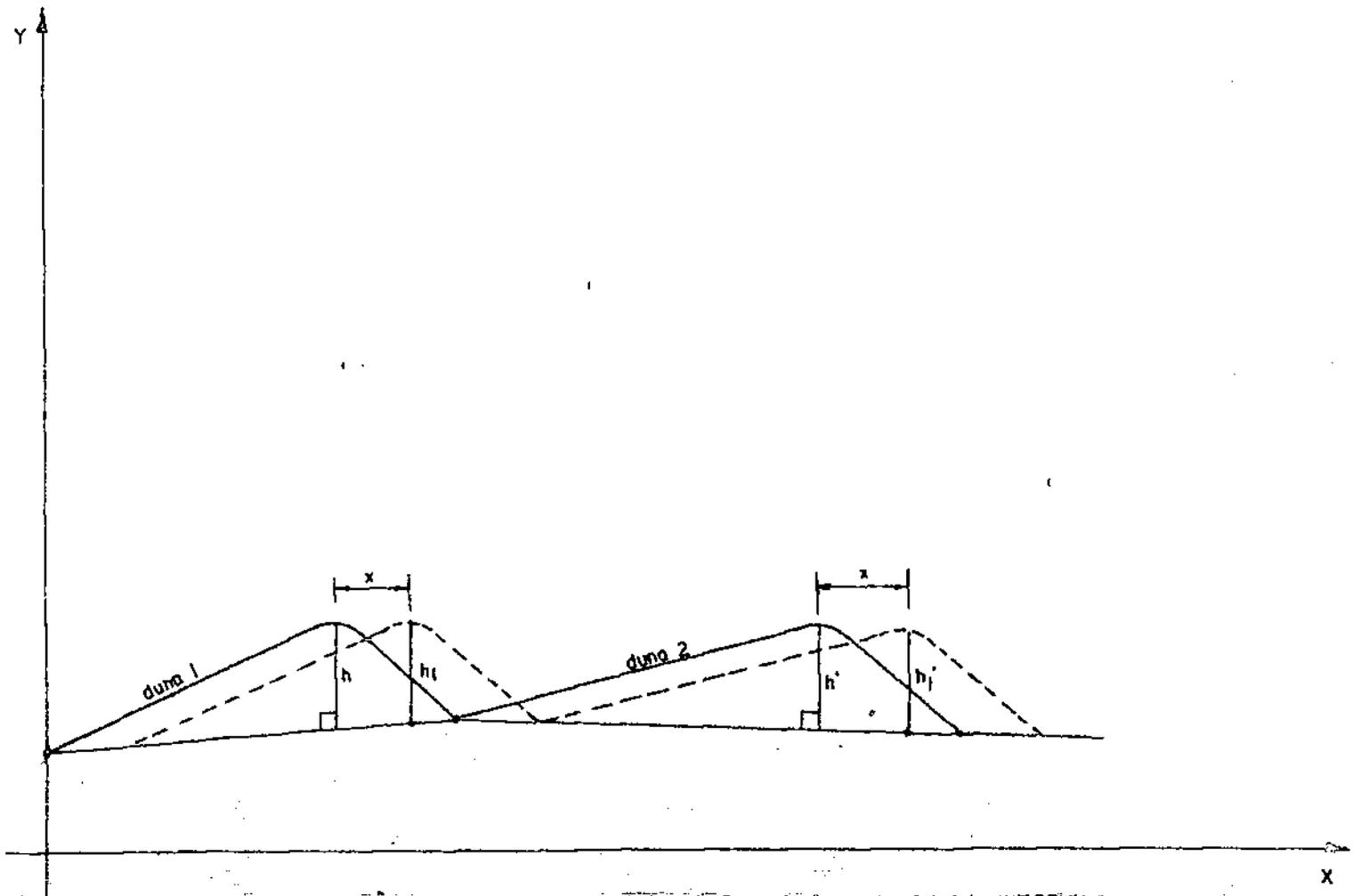


FIG. 10 - DISTÂNCIA PERCORRIDA POR DUAS DUNAS EM UM CERTO INTERVALO DE TEMPO CONSIDERADO. A ALTURA DE CADA DUNA É MEDIDA TIRANDO-SE UMA PERPENDICULAR PASSANDO PELA CRISTA À RETA QUE UNE DUAS DEPRESSÕES CONSECUTIVAS DE CADA DUNA.

CAPÍTULO IV

PROCEDIMENTOS DAS EXPERIÊNCIAS E RESULTADOS

OBTIDOS

4.1 - GENERALIDADES

Neste capítulo será feita uma descrição dos equipamentos utilizados nas experiências efetuadas com o intuito de confirmar a relação entre o comportamento da onda no leito e a distribuição da quantidade de sedimentos transportada, como também comprovar ou reforçar os resultados obtidos por pesquisadores (3), para a aplicação da equação (3.6) a avaliação da descarga de sedimentos do leito nos trabalhos de campo.

4.2 - EQUIPAMENTOS E MATERIAIS USADOS

As experiências foram realizadas em um canal

de recirculação com 16 metros de comprimento, 40 centímetros de largura e 50 centímetros de altura. Este canal é de aço e suas paredes laterais de vidro, o que facilita as observações visuais como mostra a figura 11.

O leito do canal é totalmente liso e este assume declividade variando até 3,125%, devido a um mecanismo de mudança de declividades. Na extremidade montante do canal está acoplada uma cuba alimentadora de 3 metros de comprimento, por 1 metro de largura e 1 metro de profundidade. A tubulação que mantém a recirculação no canal descarrega nesta cuba onde existe um sistema para tranquilizar o escoamento.

A alimentação do sistema é feita a partir de um reservatório com 9 m^3 de volume ligado ao poço de sucção.

Na tubulação de sucção houve problema de penetração de bôlhas de ar, diminuindo assim a vazão do sistema. Para solucionar tal fator foram colocadas tábuas de madeira inclinadas, no poço de sucção, atenuando assim a queda da lâmina d'água que ocasionava a turbulência na superfície da água. Esta solução só se mostrou eficiente para vazões até 57 l/s, razão pela qual este foi o valor máximo atingido na instalação.

Um conjunto moto-bomba fazia a recirculação no canal. A bomba é do tipo centrífuga possuindo rotor abe

to. Ela é acionada por um motor trifásico de 30 HP com 1.760 R.P.M. A capacidade máxima da bomba é de 70 l/s.

Na tubulação de recalque a 1 (um) metro da bomba foi fixado um registro de gaveta para controlar as vazões, e a uns 5 metros à jusante deste registro foi instalado um medidor Venturi, acoplado a um manômetro diferencial como mostra a figura 12.

A aferição do medidor Venturi foi realizada através de um vertedor triangular tipo Thompson como mostra a figura 13, que foi instalado na cuba alimentadora a montante do canal. O valor da vazão registrada no vertedor era relacionado com o valor da diferença de pressão registrada no manômetro diferencial, estabelecendo-se deste modo uma curva, descarga "Q" em função da diferença de pressão "Ah" como mostra a figura 14. Não se poderia usar o vertedor para medir vazões devido ao problema de deposição de sedimentos a montante deste, na cuba alimentadora.

Após o estabelecimento da curva de calibragem do Venturi "Q" x "Ah", o vertedor triangular foi retirado e em seu lugar foi acoplado uma outra placa de mesmas dimensões que a seção transversal do canal, para não haver alterações no escoamento. Dentro da cuba também pelo mesmo motivo, o leito foi continuado como mostra a figura 15.

Um outro equipamento ajustado ao canal a fim de se medir a declividade do leito foi um conjunto de 2 tubos piezométricos instalados em 2 seções previamente

escolhidas, com a declividade da superfície d'água sendo considerada como a declividade do leito, a qual é a perda de carga piezométrica entre estas 2 secções.

O material constituinte do leito que foi utilizado nas experiências, consistia de areia, cujo diâmetro médio das partículas constituintes " D_{50} " é 0,8 mm, o que segundo a A.B.N.T. (Associação Brasileira de Normas Técnicas) é considerada como areia grossa.

O material do leito foi assim escolhido com base em investigações realizadas anteriormente por pesquisadores (6), (4), que concluíram que acima de 0,6 mm, ou se $D_{50} > 0,6$ mm no leito não se formam ripples, porque se caso estas aparecem devido ao seu aspecto tri-dimensional, dificultariam a observação direta do comportamento das dunas no leito.

A densidade da areia escolhida foi $2,62 \text{ g/cm}^3$. A figura 17 apresenta a curva granulométrica desta areia.

Já o material utilizado na coleta da amostra que era descarregada pelo canal, constava de um saco de tecido bem "compacto" que impedia assim a passagem dos sedimentos. A amostra coletada era medida em volume aparente com auxílio de provetas ou beakers, por um determinado período de tempo pre-fixado, medido com o auxílio de um cronômetro. A figura 16 mostra os instrumentos utilizados nesta medição.

4.3 - PROCEDIMENTO DAS EXPERIÊNCIAS

Como já foi referido anteriormente as experiências foram realizadas com o intuito de se observar o comportamento da onda no leito, como também aplicar este comportamento, no caso de dunas através da equação (3.6), à medição da descarga de sedimentos do leito.

Primeiramente, o leito do canal foi preenchido com a areia selecionada com uma altura de aproximadamente 15 cm. Em seguida a vazão desejada era ajustada pelo registro e lida no manômetro diferencial. Uma declividade de era dada ao canal e após 3 horas de escoamento, quando o fluxo atingia uma situação de equilíbrio com relação a profundidade, a declividade do leito e ao perfil da onda no leito, várias fotografias acompanhando o movimento de 3 ondas eram feitas consecutivamente em um período de tempo determinado. A secção do canal escolhida para as fotografias tinha 4 metros de comprimento e estava equidistante 6 metros de montante e jusante para não haver influências devidas aos efeitos de entrada e saída do canal.

Com o auxílio das fotografias obtinha-se a velocidade média e a altura média de cada onda no leito, no trecho do canal considerado. A velocidade média das ondas a ser empregada na equação (3.6), U_b , é a média das velocidades de cada onda no leito. A altura média, h , é a

média das alturas de cada onda no leito. A figura 18 ilustra o movimento e a altura de 3 dunas do instante $t = 0$ seg à $t = 100$ seg.

Para se comparar a descarga de sedimentos por arrasto, calculada através da equação (3.6), " Q_c ", continuando com as experiências, várias amostras à jusante do canal de depressões, médias e altas eram coletadas em um período de tempo determinado. A descarga média ao longo do leito obtida através da coleta foi considerada como a média aritmética destas descargas, " Q_o ".

As coletas eram efetuadas nas depressões, nas médias e nas altas das ondas por que como fôra previsto teoricamente a quantidade de sedimentos transportada em cada ponto ao longo de um leito constituído de dunas é proporcional a elevação da onda no leito.

Em geral, o número de ondas na qual se efetuavam as coletas giravam em tórno de 9 (nove), para se obter um valor bem representativo da descarga de sedimentos do leito.

O acompanhamento do movimento de 3 ondas se deve ao fato de que no início das experiências em termos comparativos, entre os valores calculados e os obtidos diretamente do canal, os resultados calculados foram mais condizentes com os obtidos pela coleta quando se consideravam 3 ondas ao invés de 2 (duas).

Levando-se em conta este fator seria ainda melhor acompanhar o movimento de mais de 3 ondas já que assim o resultado seria ainda mais representativo da descarga de sedimentos do leito. Mas, este acompanhamento não pode ser realizado em face ao problema da localização da máquina fotográfica, pois se esta fôsse colocada bem distante poder-se-ia acompanhar o movimento de mais de 3 ondas, mas em compensação, não seria possível ler com precisão as distâncias e as alturas de cada onda durante o seu movimento na escala colada a parêde lateral do canal como mostra a figura 18.

Como um dos objetivos das experiências era conseguir uma grande variação nas dimensões das ondas no leito, a fim de analisar a eficiência da equação (3.6). Estas várias situações foram obtidas através de variações do fluxo.

Os parâmetros que sofreram variações foram a vazão, porque esta influe diretamente numa maior ou menor dimensão da onda no leito, a largura, porque influe na bi-dimensionalidade ou tri-dimensionalidade da onda no leito, como também a declividade do canal por que esta influe indiretamente na declividade do leito e logicamente no comportamento da onda no leito.

As vazões empregadas variaram entre 16 l/s e 57 l/s na seguinte ordem: 16, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 e 57 l/s.

apresentavam aspecto tri-dimensional o que dificultava o emprego da equação (3.6) considerando-se que esta equação foi deduzida à partir da equação

Duas larguras foram testadas 40 cm e 29,8 cm porque durante as experiências com a largura do canal 40 cm, em muitas situações ocorreu que as formas do leito apresentavam aspecto tri-dimensional o que dificultava o emprego da equação (3.6) considerando-se que esta equação foi deduzida à partir da equação da continuidade para sedimentos, baseada no movimento bi-dimensional da onda no leito. Este aspecto tri-dimensional da onda no leito foi bastante observado quando a vazão variou de 16 à 35 l/s. Então para uma melhor observação do comportamento da onda no leito, para aquelas vazões cujo leito assumiu o aspecto tri-dimensional, a largura do canal foi diminuída com o auxílio de placas de isonor de 10,2 cm de espessura coladas a parede lateral do canal, desta maneira a largura passou a ser 29,8 cm e para aquelas vazões na qual ocorreu a tri-dimensionalidade da onda no leito as experiências foram repetidas..

Para cada vazão também foram imprimidas 4 declividades ao canal, em escalas $\frac{1}{160}$, $\frac{1}{250}$, $\frac{1}{500}$, $\frac{1}{1.000}$ o que influiu indiretamente na velocidade do escoamento, no próprio escoamento e na dimensão da onda no leito.

4.4 - RESULTADOS OBTIDOS

As tabelas 1, 2 e 3 indicam os resultados ob

tidos em 60 experiências no canal já referido anteriormente. Nestas tabelas estão registrados os valores da descarga de sedimentos calculada através da equação (3.6), a partir da observação das alturas e velocidades das dunas no leito, os valores das descargas de sedimentos do leito obtidos diretamente através da coleta a jusante do canal, a declividade, dada ao canal e a respectiva declividade do leito como também o número de Froude (F_r) para cada atuação.

Este número de Froude ($F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h_i}}$) é uma

função da velocidade do escoamento ou seja

$$V = \frac{Q}{B \times h_i} \quad \text{onde}$$

Q = vazão do escoamento

B = largura do canal

h_i = altura média do escoamento obtida com o auxílio das fotografias pela medição da cota do leito até a superfície da água nas depressões, médias e altas e considerando essa altura como a média dessas cotas nestes pontos.

V = velocidade média do escoamento.

O aspecto do leito com relação a bi-dimensionalidade e a tri-dimensionalidade também foi observado e citado na coluna das observações. No capítulo seguinte estes resultados serão discutidos.

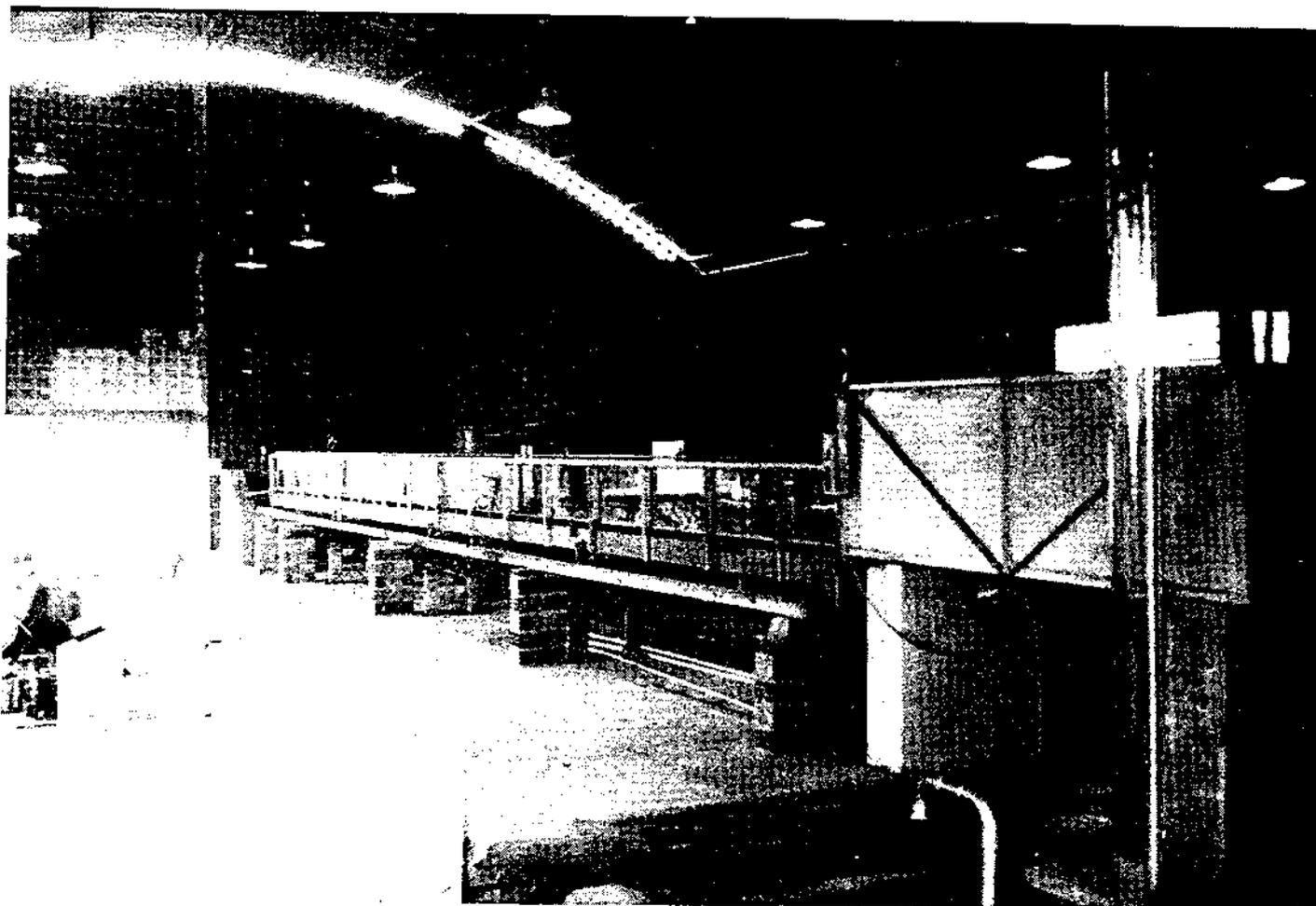


Figura II- Canal de recirculação, com 16 metros de comprimento, 40cm de largura e 50cm de altura.

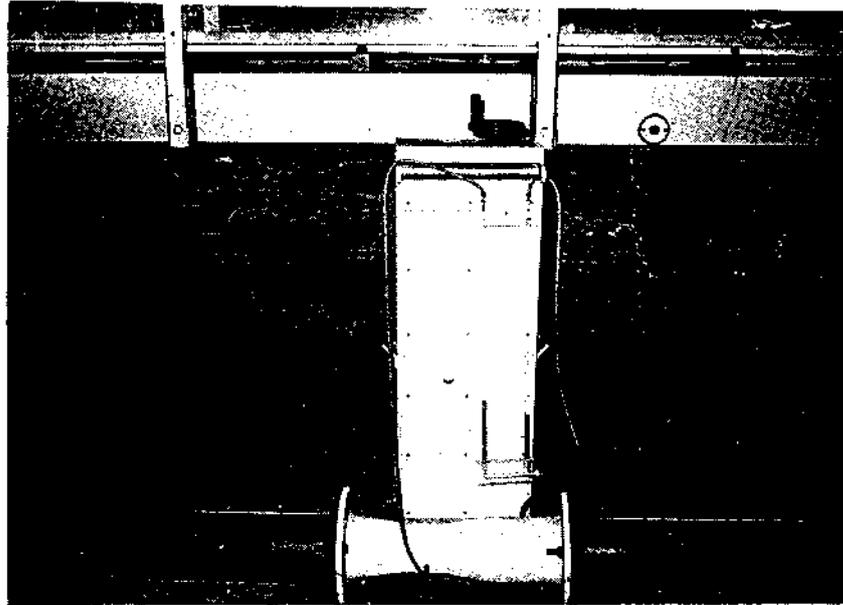


Fig. 12 - Medidor Venturi acoplado e um manômetro diferencial.

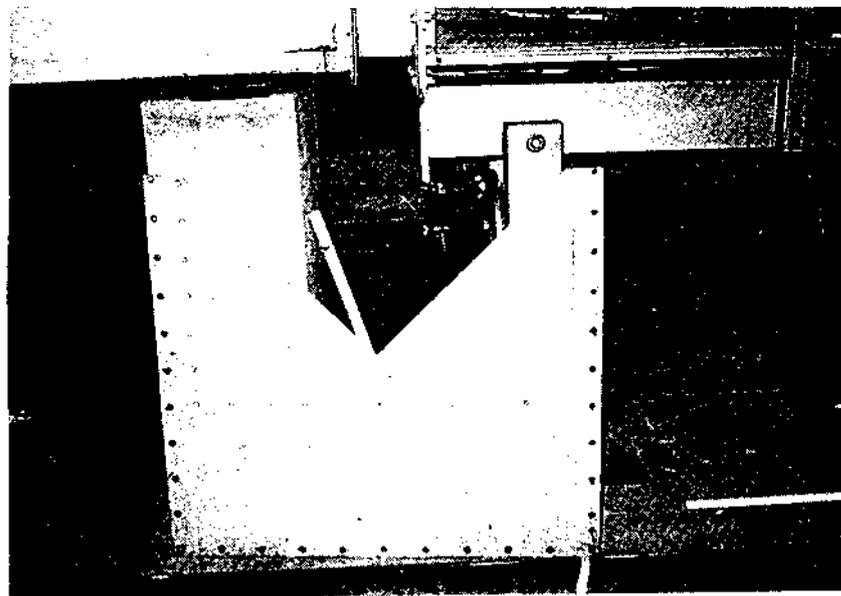


Fig. 13 - Vertedor triangular tipo Thompson usado na calibragem do medidor Venturi.

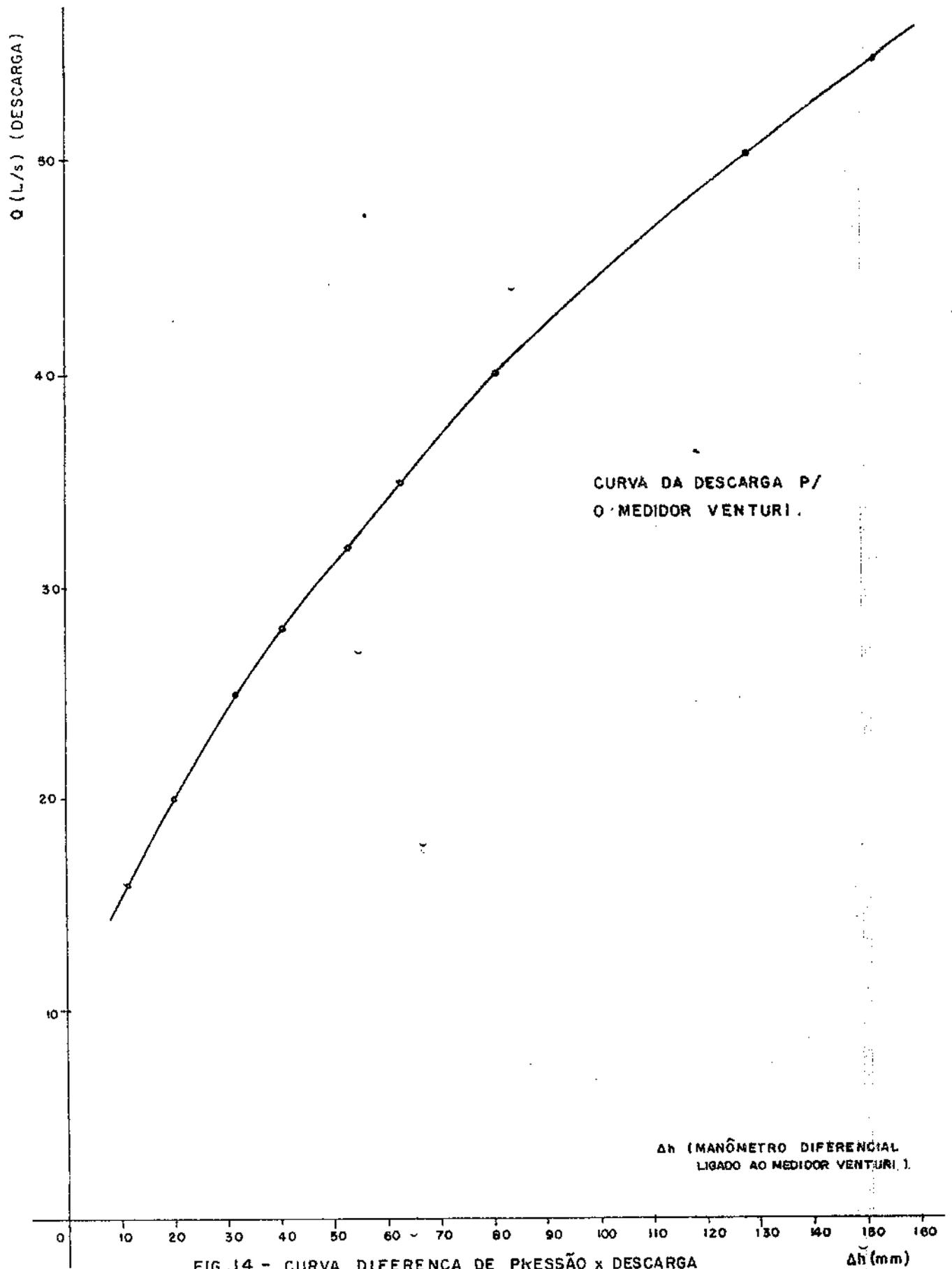


FIG.14 - CURVA DIFERENÇA DE PRESSÃO x DESCARGA

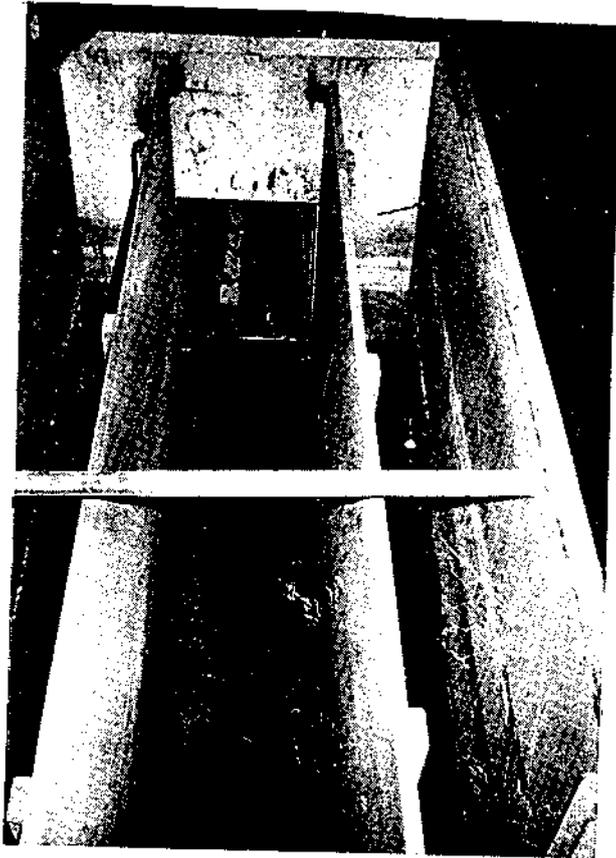


Fig. 15 - Continuação do leito dentro da caixa para não haver alterações no escoamento.



Fig. 16 - Instrumentos utilizados na coleta e na medição do material do leito.

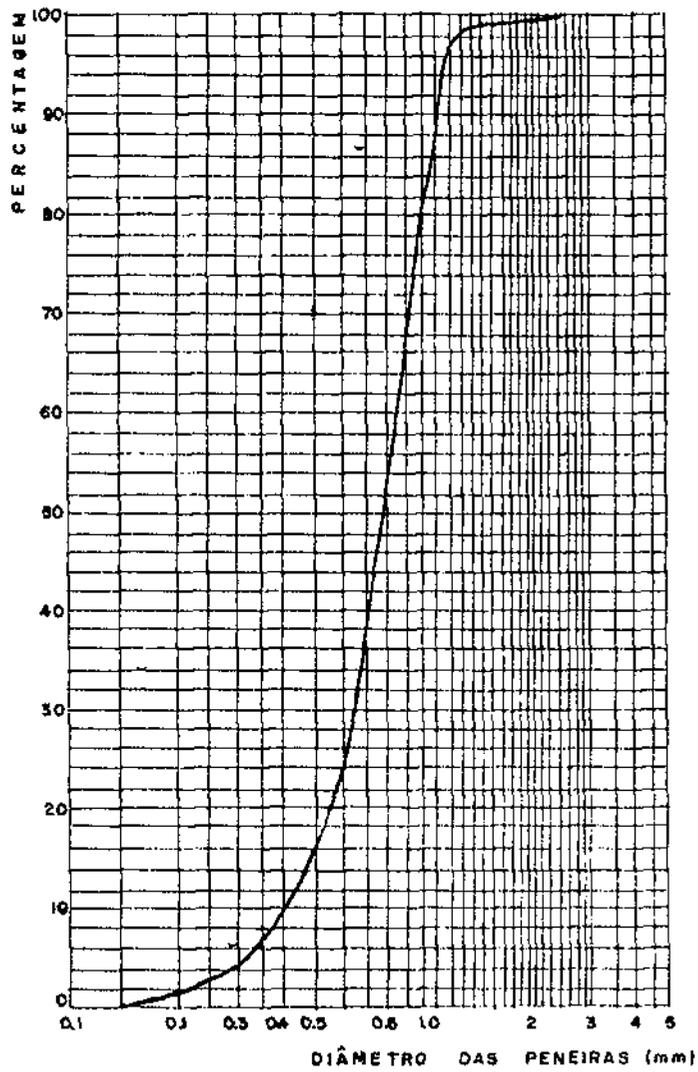


FIG 17 CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA ESCOLHIDA PARA OS EXPERIMENTOS.

Foto 1

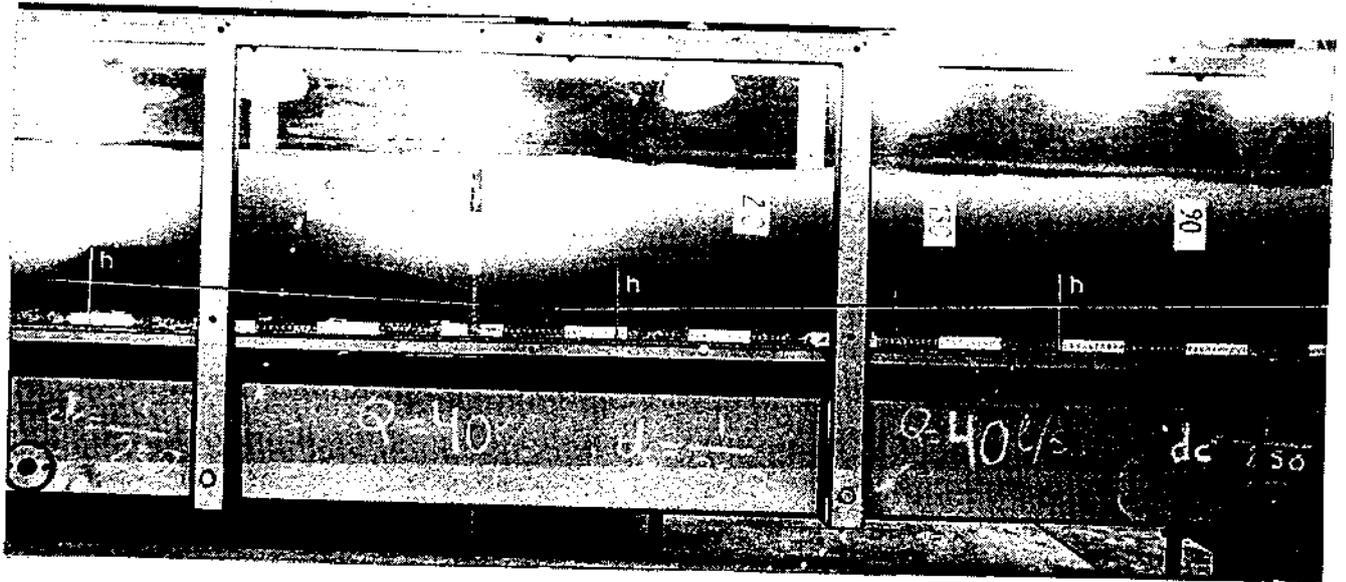


Foto 2

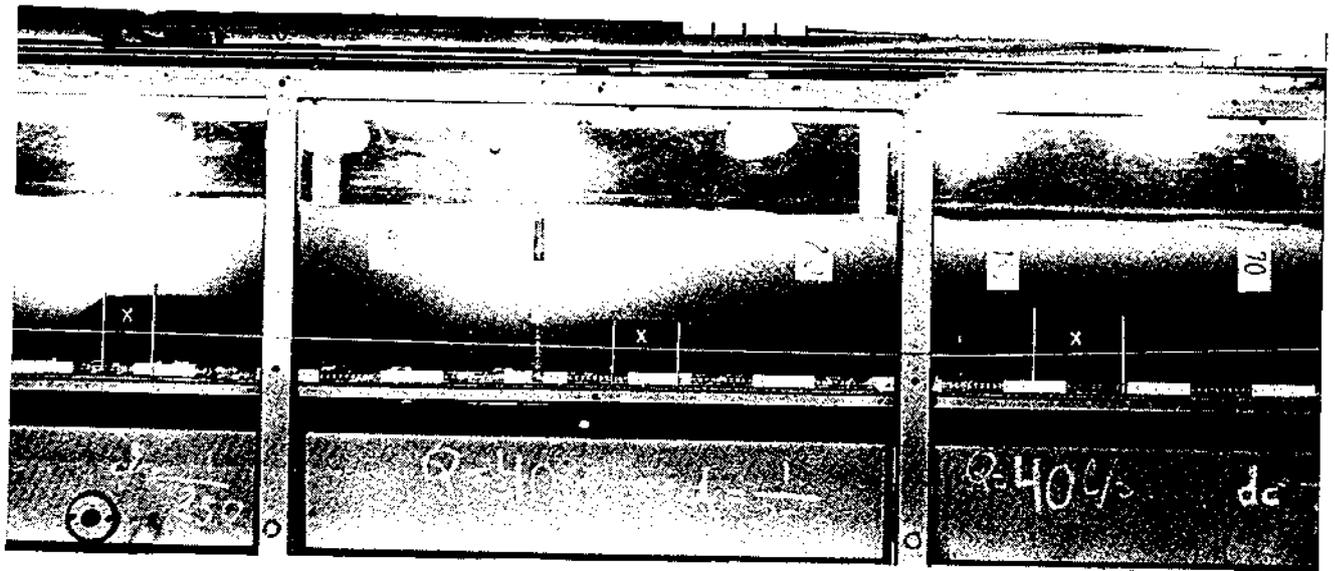


Fig. 18 - As duas fotografias mostram o movimento e altura de 3 dunas, sendo a primeira no tempo $t=0$ e a segunda no tempo $t = 100$ seg. A foto 2 mostra a distância per corrida por cada duna depois de transcorridos 100 seg.

TABELA I

LARGURA DO CANAL BR-400M

EXPERIÊNCIAS	VAZÃO $Q(L/s)$	DECLIVIDADE DO CANAL d_c	DESCARGA DE SEDIMENTOS CALCULADA. $Q_c(cm^2/s)$	DESCARGA DE SEDIMENTOS OBTIDOS DIRETAMENTE DO CANAL $Q_{obd}(cm^2/s)$	NÚMERO DE FROUDE F_q	DECLIVIDADE DO LEITO d_{leito}	VELOCIDADE DE ESCOAMENTO (m/s)	OBSERVAÇÕES	
1	16 L/s	1/1000	0	0	0,15	1/8000	0,21	FORMAS DO LEITO TRI-DIMENSIONAIS E QUASE QUE NÃO EXISTE TRANSPORTE	
2		1/500	0	0	0,19	1/8000	0,24		
3	1/250	0	0	0,26	1/8000	0,29			
4	1/160	3,24	1,55	0,31	1/666	0,33			
5	20 L/s	1/1000	0,13	0,06	0,20	1/2667	0,27		FORMAS DO LEITO TRI-DIMENSIONAIS
6		1/500	0,23	0,20	0,22	1/1333	0,30		
7		1/250	1,34	1,14	0,30	1/1000	0,36		
8	1/160	3,93	3,40	0,35	1/471	0,39	FORMAS DO LEITO TRI-DIMENSIONAIS		
9	1/1000	0,77	0,43	0,31	1/1000	0,39			
10	25 L/s	1/500	2,72	1,06	0,31	1/666	0,39		FORMAS DO LEITO TRI-DIMENSIONAIS
11		1/250	4,72	4,15	0,34	1/571	0,42		
12		1/160	6,12	5,76	0,35	1/400	0,43		
13		1/1000	3,68	2,18	0,25	1/800	0,35		
14	30 L/s	1/500	4,70	3,07	0,29	1/533	0,40	FORMAS DO LEITO TRI-DIMENSIONAIS	
15		1/250	12,56	6,05	0,32	1/400	0,43		
16		1/160	7,32	6,00	0,36	1/363	0,45		
17	35 L/s	1/1000	4,28	2,77	0,29	1/533	0,42	FORMAS DO LEITO ASSUMEM O ASPECTO TRI-DIMENSIONAIS	
18		1/500	8,07	6,07	0,31	1/444	0,42		
19		1/250	7,00	5,43	0,31	1/400	0,44		
20		1/160	23,92	19,17	0,36	1/320	0,45		

TABELA 2

LARGURA DO CANAL B=40 cm

EXPERIÊNCIAS	VAZÃO Q (L/s)	DECLIVIDADE DO CANAL d_c	DESCARGA DE SEDIMENTOS CALCULADA. Q_{sed} (cm ³ /s)	DESCARGA DE SEDIMENTOS DIRETAMENTE DO CANAL Q_{sed} (cm ³ /s)	NÚMERO DE FROUDE Fr	DECLIVIDADE DO LEITO d_{leito}	VELOCIDADE DE ESCOAMENTO (m/s)	OBSERVAÇÕES
21	40 L/s	1/1000	6,16	3,25	0,39	1/500	0,53	FORMAS DO LEITO APROXIMADAMENTE BI-DIMENSIONAIS
22		1/500	9,20	6,68	0,41	1/533	0,53	
23		1/250	11,68	7,22	0,42	1/226	0,55	
24		1/160	25,59	23,75	0,42	1/200	0,57	
25	45 L/s	1/1000	4,60	4,37	0,35	1/533	0,51	FORMAS DO LEITO QUASE BI-DIMENSIONAIS
26		1/500	13,45	12,33	0,43	1/400	0,59	
27		1/250	29,68	19,78	0,43	1/320	0,66	
28		1/160	31,32	27,27	0,45	1/228	0,67	
29	50 L/s	1/1000	17,47	9,47	0,38	1/470	0,56	FORMAS DO LEITO BI-DIMENSIONAIS
30		1/500	17,80	11,58	0,42	1/380	0,59	
31		1/250	34,18	20,33	0,43	1/320	0,69	
32		1/160	64,80	41,17	0,44	1/266	0,68	
33	55 L/s	1/1000	16,96	13,33	0,36	1/444	0,57	FORMAS DO LEITO BI-DIMENSIONAIS
34		1/500	29,00	14,93	0,40	1/363	0,60	
35		1/250	43,20	27,67	0,45	1/228	0,66	
36		1/160	45,60	45,33	0,49	1/210	0,69	
37	57 L/s	1/1000	14,00	9,85	0,40	1/470	0,61	FORMA DO LEITO É BI-DIMENSIONAL. QUANDO O LEITO ASSUMIU A DECLIVIDADE 1/200 ERA PLANO
38		1/500	28,14	12,62	0,48	1/320	0,70	
39		1/250	41,40	22,05	0,49	1/266	0,68	
40		1/160	—	25,60	0,58	1/200	0,78	

TABELA 3

LARGURA DO CANAL B = 29,9 cm

EXPERIÊNCIAS	VAZÃO Q (L/s)	DECLIVIDADE DO CANAL d_c	DESCARGA DE SEDIMENTOS CALCULADA. Q_c (cm ³ /s)	DESCARGA DE SEDIMENTOS DIRETAMENTE DO CANAL. Q_{abd} (cm ³ /s)	NÚMERO DE FROUDE F_R	DECLIVIDADE DO LEITO d_{leito}	VELOCIDADE DE ESCOAMENTO (m/s)	OBSERVAÇÕES
41	16 L/s	1/1000	0	0	0,23	1/800	0,30	FORMAS DO LEITO BI-DIMENSIONAIS E QUASE QUE NÃO EXISTE TRANSPORTE
42		1/500	0	0	0,24	1/800	0,32	
43		1/250	0	0	0,28	1/800	0,34	
44		1/160	3,19	2,98	0,31	1/296	0,38	
45	20 L/s	1/1000	0	0	0,24	1/1142	0,33	FORMAS DO LEITO BI-DIMENSIONAIS
46		1/500	0	0	0,27	1/1142	0,36	
47		1/250	4,85	4,00	0,29	1/800	0,36	
48		1/160	6,50	4,60	0,38	1/666	0,39	
49	25 L/s	1/1000	2,20	1,34	0,29	1/571	0,50	FORMAS DO LEITO BI-DIMENSIONAIS
50		1/500	3,43	1,85	0,34	1/444	0,52	
51		1/250	6,20	4,11	0,35	1/347	0,55	
52		1/160	11,75	9,87	0,41	1/296	0,62	
53	30 L/s	1/1000	12,11	8,74	0,46	1/296	0,59	FORMAS DO LEITO BI-DIMENSIONAIS
54		1/500	19,10	15,05	0,54	1/160	0,63	
55		1/250	15,49	14,91	0,55	1/267	0,64	
56		1/160	18,95	16,20	0,57	1/186	0,68	
57	35 L/s	1/1000	25,15	18,35	0,47	1/266	0,63	FORMAS DO LEITO BI-DIMENSIONAIS
58		1/500	22,70	19,80	0,48	1/296	0,64	
59		1/250	24,10	20,10	0,49	1/235	0,65	
60		1/160	33,07	27,42	0,59	1/150	0,70	

CAPÍTULO V

DISCUSSÃO E RESULTADOS

5.1 - GENERALIDADES

Uma análise da distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo da onda no leito bem como dos resultados obtidos experimentalmente na medição da descarga de sedimentos do leito será feita neste capítulo.

5.2 - DISTRIBUIÇÃO DA QUANTIDADE DE SEDIMENTOS TRANSPORTA DA AO LONGO DA ONDA NO LEITO

Através de medições diretas do transporte de sedimentos efetuadas durante as experiências nas depressões das dunas, pôde-se concluir que nestas, praticamente não havia transporte de sedimentos. Este transporte passou

a existir a medida que a altura da onda no leito ia aumentando (no caso das dunas) até atingir o seu valor máximo na crista e diminuindo a jusante desta, de acordo com o ângulo de repouso do material no leito, como mostra a figura 19 e tal como fôra previsto teoricamente. Então, como nas experiências, o leito era sempre constituído de dunas pôde-se considerar de acordo com o que fôra previsto que $C_1 = 0$.

5.3 - COMPARAÇÃO ENTRE A DESCARGA DE SEDIMENTOS CALCULADA " Q_c " ATRAVÉS DA EQUAÇÃO (3.6) E DESCARGA DE SEDIMENTOS OBTIDOS DIRETAMENTE DO CANAL PELA COLETA " Q_o "

Considerando-se os resultados da descarga de sedimentos do leito obtidos diretamente através de coleta da amostra no canal " Q_o ", e os resultados calculados, " Q_c ", através da equação (3.6) pela observação do comportamento da onda no leito, foram elaboradas representações gráficas destas quantidades, e a partir destas representações (gráficos 1 e 2) será feita uma discussão dos resultados e uma avaliação da eficiência do método de medição empregado.

É importante ressaltar que embora a interpretação da equação (3.6) tenha sido efetuada para todas as formas de leito (Capítulo 3), somente foi calculada a descarga de sedimentos do leito através das dunas com o auxílio

lio da equação (3.6) por não se poder avaliar para as demais formas do leito o valor da constante C_1 .

Nos gráficos (1 e 2) nas ordenadas foram colocadas as descargas de sedimentos calculados " Q_c " e nas abcissas as descargas de sedimentos obtidos diretamente do canal " Q_o ". Analisando-se estes gráficos, uma certa tendência da descarga de sedimentos calculada ser maior que a descarga de sedimentos obtida diretamente do canal é constatada.

Nestes gráficos será adotada como linha 1, a linha que representaria a situação ideal, na qual a descarga de sedimentos calculada coincide com a descarga de sedimentos obtidos diretamente do canal, ou ainda a situação em que os pontos plotados estejam alinhados.

Tomando-se esta linha como referência, a linha que representará 30% de diferença entre os valores calculados e os valores obtidos será denominada por linha 2, e a linha que representará 60% dessa diferença será denominada de linha 3.

No gráfico 1, com a largura do canal 40 cm, observa-se que os pontos plotados vão acima da linha 3, o que indica que " Q_c " é maior que " Q_o ". Este fato pode ser explicado devido as dificuldades existentes em sustentar manualmente o saco coletor, principalmente para grandes vazões onde verificou-se graficamente muita dispersão dos pontos.

No gráfico 2, com a largura do canal de 29,8cm, praticamente todos os pontos plotados não ultrapassam a linha

de 60% de diferença, ou linha 3. Esta observação vem a comprovar o que foi citado anteriormente, pois somente se consideram pequenas vazões e como a largura do canal era menor foi mais fácil sustentar o saco e coletar neste, todos os sedimentos transportados.

Dado a falta de precisão na coleta da amostra pode-se concluir que se o sistema de coleta fosse meccânico e não manual obter-se-ia melhores resultados.

Um outro fator que deve ser referido e que influiu na diferença entre os valores calculados e os obtidos diretamente do canal, foi muitas vezes, a obliquidade da onda no leito, fato este que não era observado nas fotografias já que estas registravam lateralmente o movimento da onda no leito, mas que era sentido durante a coleta pois somente parte da onda estava sendo coletada, não podendo a amostra ser representativa do movimento total da mesma no leito. Esse fator influiu em uma diminuição das descarga média de sedimentos do leito que era a média de várias a mostras incluindo a da onda oblíqua, Com a diminuição da largura do canal esta situação foi contornada e resultou em valores mais precisos como mostra o gráfico 2.

Se tal situação também ocorrer no campo pode se solucioná-la dividindo-se a largura total em várias largura incrementais, adotando-se a descarga de sedimentos do leito como a soma das descargas de sedimentos para cada largura incremental.

Levando-se em conta as explicações acima referidas, pode-se concluir sem contestação que as experiências apresentaram bons resultados e a sua aplicação para medição da descarga de sedimentos do leito no campo será de grande confiança.

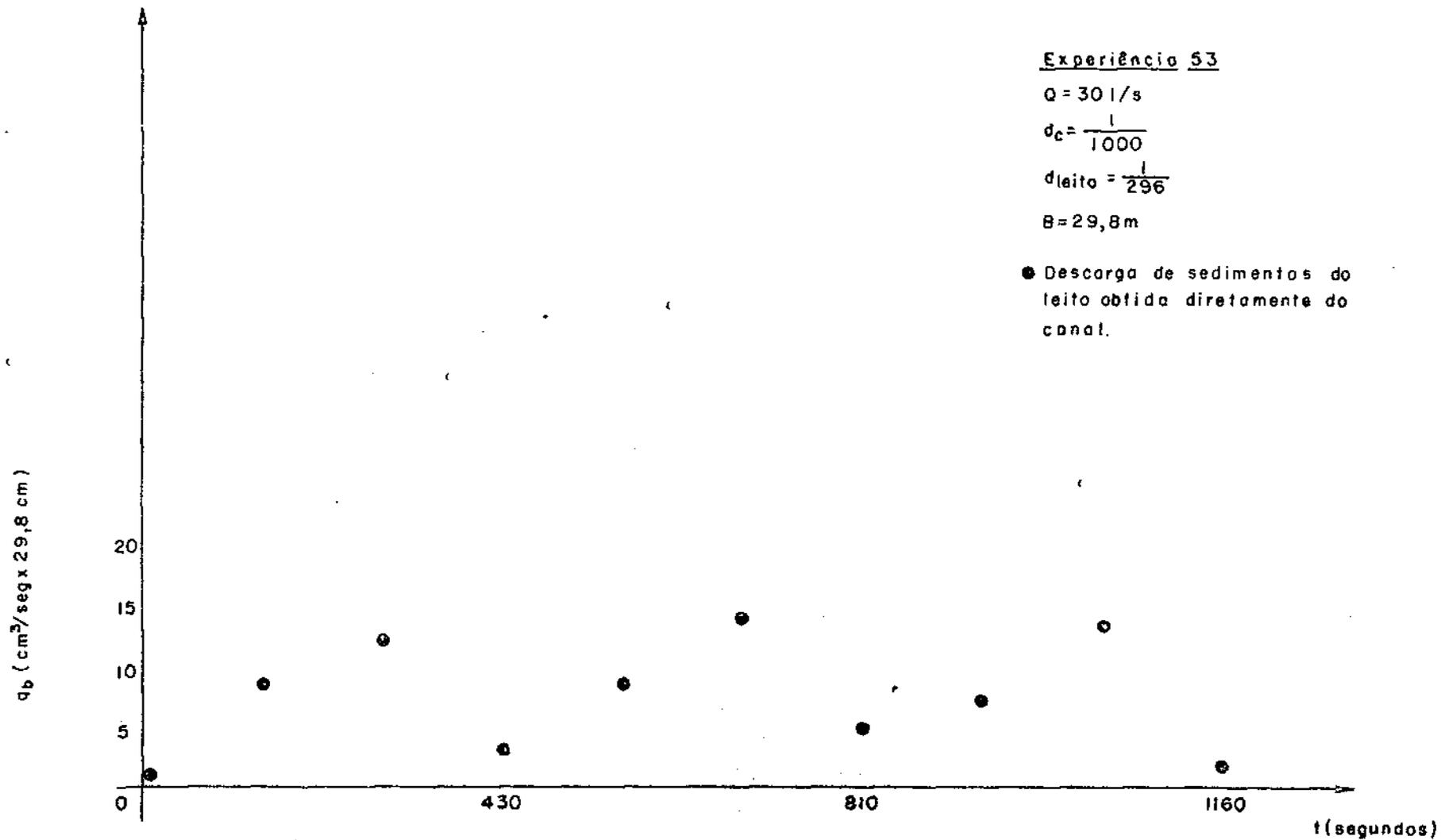
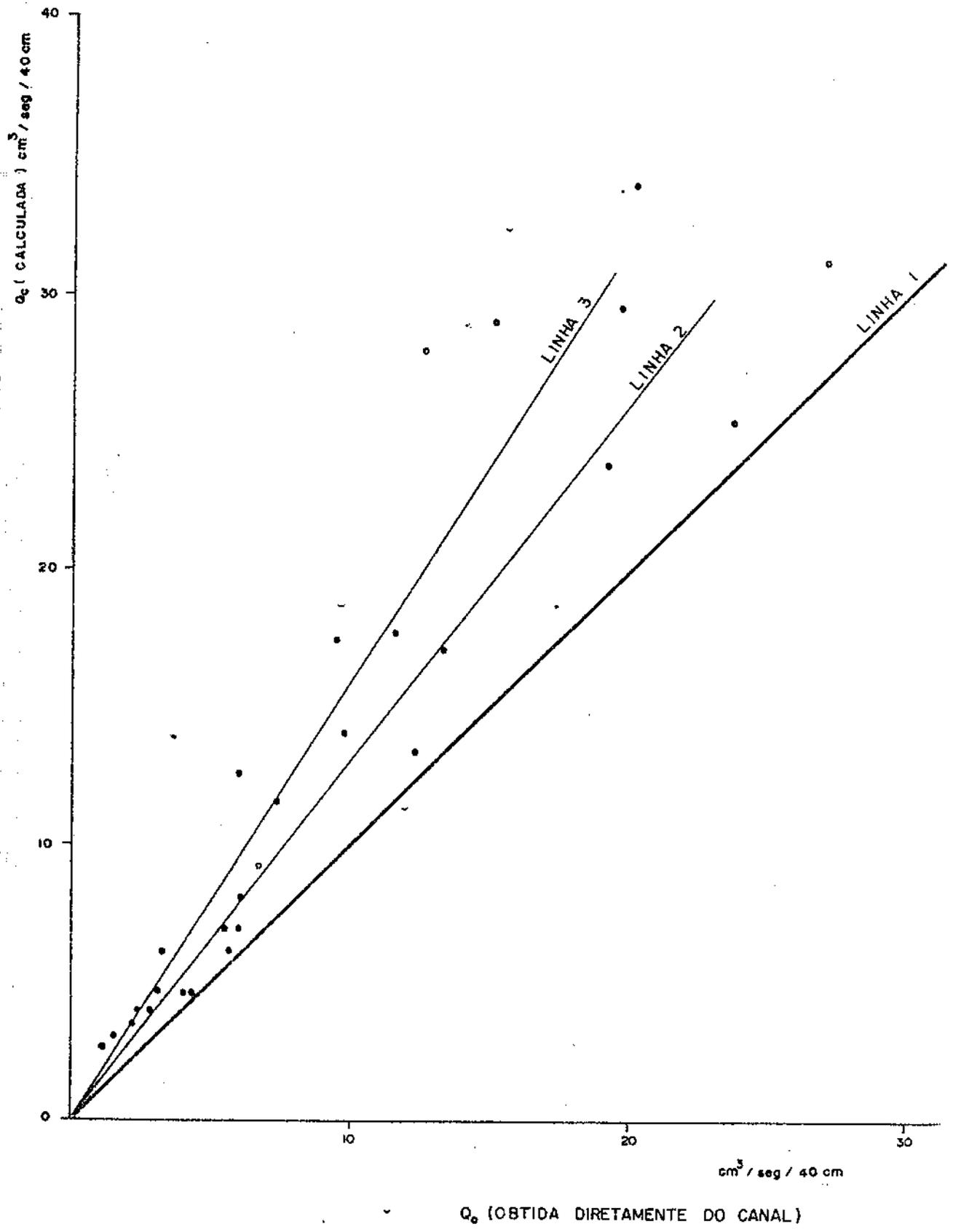
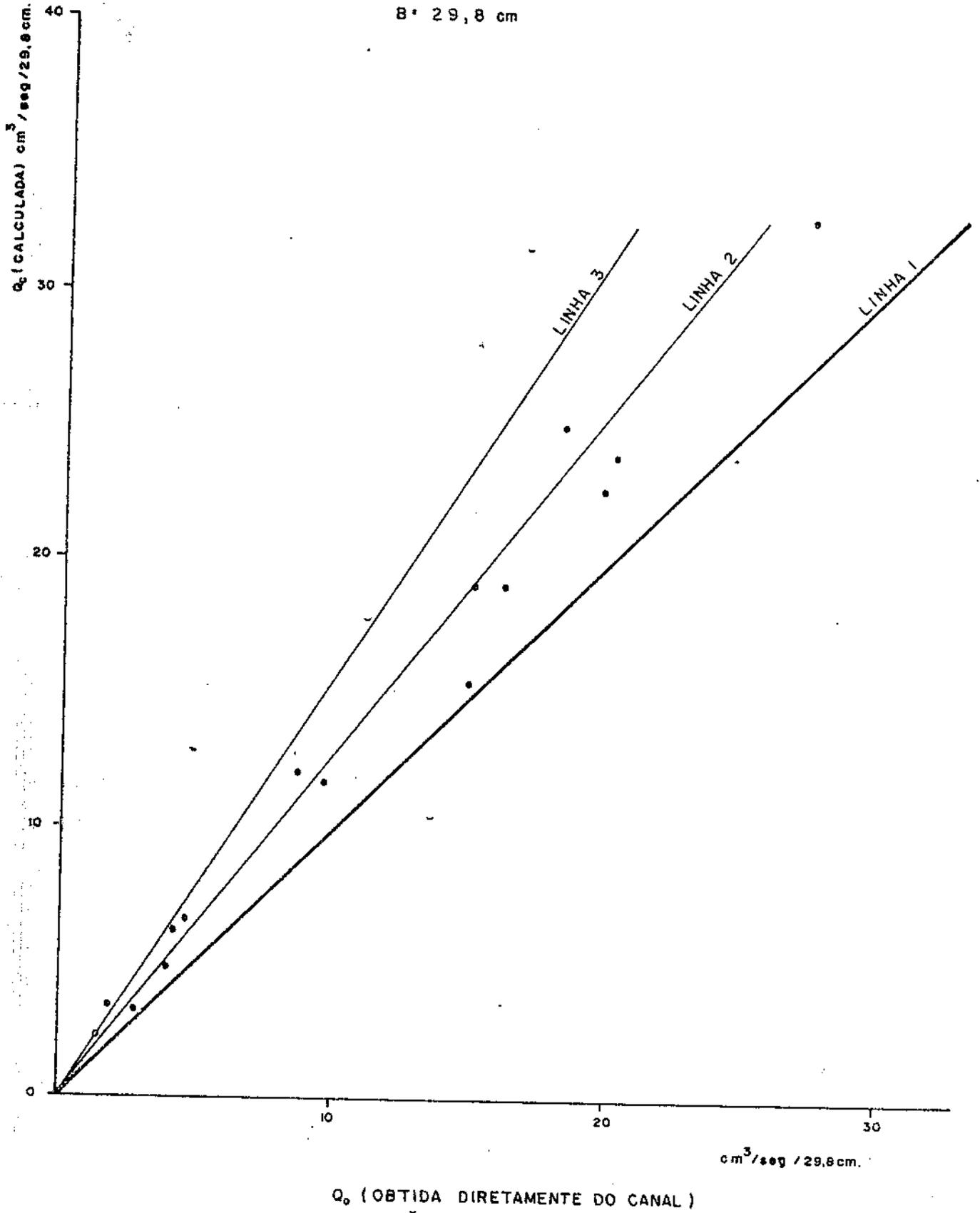


Fig.19 Distribuição da quantidade de sedimentos transportada medida pela coleta durante o deslocamento de 3 dunas no tempo de 1160 segundos.

B = 40 cm





CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

6.1 - CONCLUSÕES

Depois de discutidos e analisados os resultados obtidos durante as experiências, foram estabelecidas várias conclusões partindo-se da equação da distribuição da quantidade de sedimentos transportado ao longo da onda no leito, isto é:

$$q_b(x,t) = U_b \cdot Y(x,t) + C_1$$

onde:

q_b = carga do leito transportada em volume por unidade de largura e unidade de tempo.

Y = elevação da onda no leito com o sinal positivo acima de um plano de referência arbitrário.

U_b = velocidade de deslocamento da onda com o sinal positivo na direção do escoamento.

Y = elevação da onda no leito com o sinal positivo acima de um plano de referência arbitrário.

C_1 = quantidade de sedimentos transportada pelas camadas abaixo das ondas no leito.

Em consequência da interpretação da equação acima as conclusões são as seguintes:

1º) No caso do leito ser constituído de dunas ou ripples, a onda no leito se desloca para jusante e a equação da distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo da onda no leito é proporcional a elevação da onda no leito, ou seja,

$$q_b \propto Y$$

2º) No caso do leito ser plano com movimento de sedimentos.

$$q_b = C_1$$

A quantidade de sedimentos transportada ao longo do leito é constante.

39) No caso do leito ser constituído de antidunas. Estas podem se mover para montante, jusante ou permanecerem estacionárias:

a) Se as antidunas se movem para jusante ($U_b > 0$)

$$q_b \propto (C_2 + Y)$$

Neste caso, a distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo da onda no leito é tanto maior quanto maior a elevação da onda no leito e tanto menor quanto menor a elevação da onda no leito.

b) Se as antidunas se movem para montante ($U_b < 0$)

$$q_b \propto (C_2 - Y)$$

As distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo da onda no leito é tanto maior quanto menor a elevação da onda no leito e tanto menor quanto maior a elevação da onda no leito.

c) Se as antidunas permanecem estacionárias ($U_b = 0$)

$$q_b = C_1$$

A distribuição da quantidade de sedimentos transportada ao longo da onda no leito é homogênea e independente da elevação da onda no leito.

49) Considerando-se o comportamento da onda no leito e levando-se em conta o movimento das dunas, foi reconhecido neste tipo de leito que nas depressões de cada duna o transporte pode ser considerado nulo, aumentando gradativamente com relação a altura máxima ou a crista da duna.

59) No caso das dunas baseando-se no item anterior pode-se empregar a equação

$$q_b = \frac{U_b \cdot h}{2}, \text{ para calcular a descarga média}$$

de sedimentos do leito já que analisando os resultados obtidos com sua aplicação as experiências no laboratório, pode-se considerar estes como satisfatórios tal como previa a teoria.

6.2 - COMENTÁRIO

Considerando-se que as dunas são as formas de leito mais observadas no campo, e a facilidade de obter a altura média "h" e a velocidade média "U_b" dessas

ondas no leito, o método de medição baseando-se na equação (3.6) satisfaz as necessidades do campo.

BIBLIOGRAFIA

1. Hill, H.M. & Srinivasan, V.S. & Unny, T.E., "Instability of flat bed in Alluvial Channels", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, setembro, 1969.
2. Raudkivi, A. J., "Loose Boundary Hydraulics", Pergamon Press, 1967.
3. Simons, D. B., & Richardson, E. V., & Nordin, C. F., "Unsteady movement of ripples and dunes related to bed-load transport" Proceedings IAHR - Leningrad-1965.
4. Simons, D. B., & Sentürk, Fuat, "Sediment transport technology" - Water resources publications, Colorado, 1977.
5. Hinze, J. O., "Turbulence", McGraw-Hill book Co., Inc., 1959.
6. Vanoni, Vito A., editor chefe, ASCE - Manuals and reports on engineering practice - NO. 54, "Sedimentation Engineering", New York, 1975.