

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

UM ESTUDO COMPARATIVO DA CONFIABILIDADE  
DAS EQUAÇÕES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

RAUL GALVÃO CAVALCANTE

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA  
OUTUBRO - 1992

RAUL GALVÃO CAVALGANTE

UM ESTUDO COMPARATIVO DA CONFIABILIDADE  
DAS EQUAÇÕES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

Dissertação apresentada ao  
Curso de Pós-graduação em  
Engenharia Civil, na área de  
Recursos Hídricos, em  
cumprimento às exigências para  
obtenção do Grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

ORIENTADOR: VAJAPÉYAM SRIRANGACHAR SRINIVASAN

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA.  
OUTUBRO - 1992



C376e Cavalcante, Raul Galvao  
Um estudo comparativo da confiabilidade das equacoes de transporte de sedimentos / Raul Galvao Cavalcante. - Campina Grande, 1992.  
176f. : il. col.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

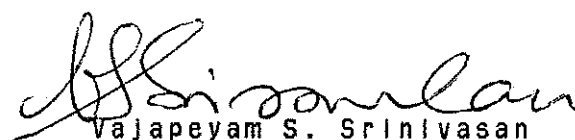
1. Sedimentacao 2. Recursos Hidricos 3. Engenharia Civil 4. Sedimentos - Transporte 5. Dissertacao I. Srinivasan, Vajapeyam Srirangachar. II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB). III. Título

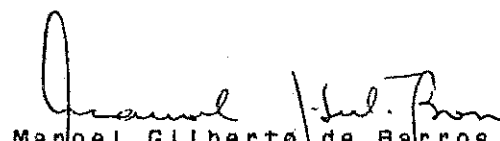
CDU 66.066.7(043)


UM ESTUDO COMPARATIVO DA CONFIABILIDADE  
DAS EQUAÇÕES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

RAUL GALVAO CAVALCANTE

Dissertação aprovada em: 14 de Outubro de 1992

  
Vajapeyam S. Srinivasan  
- Orientador -

  
Manoel Gilberto de Barros  
- Componente da Banca -

  
Manoel Lucas Filho  
- Componente da Banca -

---

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA  
OUTUBRO - 1992

A minha esposa e filhos.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Vajapeyan Srirangachar Srinivasan pela segura orientação e incentivo.

Ao professor Manoel Gilberto de Barros pelo apoio e fornecimento de material didático.

Ao professor Eduardo Eneas Figueiredo pelo auxílio na área de computação.

Aos demais professores da área de Recursos Hídricos pelo incentivo.

Ao professor Masaharu Fujita, do Convênio de Cooperação com o Japão, pelo apoio técnico durante as pesquisas.

Ao técnico Ismael José Pereira, pela dedicação, entusiasmo e profissionalismo. Sem o seu apoio seria impossível concluir os trabalhos de laboratório.

Aos demais funcionários e técnicos do Laboratório de Hidráulica, pelo apoio e compreensão.

Aos colegas de curso pelo apoio durante a caminhada.

A minha esposa Cleris G. de Carvalho Cavalcante pela participação na digitação e edição deste trabalho, pela paciência e abnegação demonstradas nos dois anos em que estive à disposição do curso de mestrado.

Aos meus filhos pela espera.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para elaboração desta dissertação.

## RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo principal verificar a adequação de algumas teorias sobre transporte de sedimentos a cada tipo de forma do leito, utilizando dados obtidos através de ensaios realizados em um canal de recirculação de fluxo, de última geração, totalmente automatizado.

As equações selecionadas foram as seguintes: E. Meyer-Peter e R. Muller (1948), F. Engelund e E. Hansen (1956), Leo C. van Rijn (1982), Yang (1973), U. Zanke (1982), L. Pernecker e J. Vollmers (1965), Bagnold (1966), Einstein (1950) e Laursen (1958).

Os resultados mostraram que nenhuma das equações é consistente quando a formação é Ripples, com taxa de transporte de sedimentos excessivamente pequena. A equação de Yang apresentou excelente resultado para o caso de dunas. As equações de Bagnold, Laursen e de Einstein foram as melhores para a forma de leito plana.

## ABSTRACT

The principal objective of this work is to confirm certain theories of sediment transport for each type of bed form. Data was gathered in experiments using a completely automatic, late generation recirculation canal.

The chosen equations include: E. Meyer-Peter and R. Muller (1948), F. Engelund and E. Hansen (1956), Leo C. van Rijn (1982), Yang (1973), U. Zanke (1982), L. Pernecker and J. Volimers (1965), Bagnold (1966), Einstein (1950), and Laursen (1958).

The results show that all of the equations predict excessively low sediment transports for rippled conditions. The Yang equation gives excellent result for dunes; and the Bagnold, Laursen and the Einstein equations are especially applicable for level beds.



## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a$  - Nível de referência. Espessura da zona do leito.
- $A$  - Área da seção do canal ou de uma seção da partícula.
- $b$  - Largura do canal.
- $c'$  - Coeficiente de Chézy relativo aos grãos de sedimento.
- $C$  - Concentração total média do sedimento, em peso, por unidade de volume do fluido.
- $C_a$  - Concentração volumétrica no nível de referência (equação de Rijn).
- $C_o$  - Máxima concentração volumétrica no leito.
- $C_D$  - Coeficiente de arrasto.
- $D$  - Diâmetro do grão representativo do material do leito.
- $D_x$  - Diâmetro da partícula para o qual  $x\%$  dos sedimentos da amostra são mais finos.
- $D_*$  - Diâmetro adimensional relativo ao tamanho da partícula.
- $d$  - Profundidade do fluxo.
- $e_b$  - Eficiência de transporte da carga do leito.
- $e_s$  - Eficiência de transporte da carga suspensa.
- $f$  - Coeficiente de atrito de Darcy-Weissbach relativo ao ao canal ( ou  $ATRI$  ).
- $f_b$  - Coeficiente de atrito de Darcy-Weissbach relativo ao leito do canal ( ou  $ATRI1$  ).
- $f_b'$  - Coeficiente de atrito de Darcy-Weissbach à superfície do leito do canal ( ou  $ATRI2$  ).

- $f_w$  - Coeficiente de atrito de Darcy-Weissbach relativo às paredes do canal ( ou ATRIPA ).
- $F$  - Parâmetro de Transporte.
- $F_d$  - Força de arrasto ( ou  $F$  ).
- $F_L$  - Força de levantamento.
- $F_g$  - Força devido à gravidade.
- $F_{r_{cr}}$  - Parâmetro de Rijn para o início do movimento dos sedimentos.
- $Fr$  - Número de Froude.
- $G_*$  - Número de transporte de sedimentos de Volimers.
- $g$  - Aceleração da gravidade.
- $I$  - Integrais de Einstein.
- $k$  - Uma constante adimensional.
- $K_S$  - Altura da rugosidade equivalente de Nikuradse.
- $Kr$  - Coeficiente de rugosidade relativo à energia total perdida.
- $Kr'$  - Coeficiente de rugosidade relativo à energia perdida devido à resistência do grão.
- $K_1$  - Constante de Von Karman.
- $\lambda$  - Comprimento da mistura.
- $P_E$  - Parâmetro de transporte na equação de Einstein.
- $P$  - Peso da partícula.
- $p$  - Perímetro molhado ou porosidade.
- $p_b$  - Perímetro molhado de um canal equivalente.
- $p_w$  - Perímetro molhado de um canal equivalente.
- $Q$  - Vazão líquida por unidade de largura.
- $q_b$  - Carga do leito, em peso seco por unidade de largura.
- $q'_b$  - Carga do leito, expressa em peso submerso por unidade de

tempo e largura.

- $q_s$  - Carga suspensa, em peso seco por unidade de largura.
- $q_T$  - Descarga de sedimento total, em peso por unidade de tempo e largura.
- $R$  - Raio hidráulico da seção do fluxo ( ou  $RH$  ).
- $R_b$  - Raio hidráulico do leito ( ou  $RH_1$  ou  $RH_*$  ).
- $R'_b$  - Raio hidráulico da superfície do leito ( ou  $RH_2$  ou  $RH'_*$  ).
- $R''_b$  - Raio hidráulico relativo às formas do leito.
- $Re$  - Número de Reynolds ( ou  $REl$  ).
- $S$  - Declividade da superfície da água. Declividade da linha de energia do escoamento. Gradiente de energia.
- $S'$  - Taxa de queda da energia relativa à resistência do grão de sedimento.
- $S''$  - Taxa de queda da energia relativa à resistência da forma do leito.
- $T$  - Temperatura da água.
- $T_1$  - Parâmetro de transporte na equação de Rijn.
- $U$  - Velocidade média do fluxo.
- $U_*$  - Velocidade de cisalhamento do leito (ou  $U_{*b}$  ).
- $U_{cr}$  - Velocidade média crítica para o movimento incipiente da partícula.
- $U_s$  - Velocidade média do sedimento em suspensão.
- $u$  - Velocidade média (temporal) do fluxo.
- $U'_*$  - Velocidade de cisalhamento da superfície do leito (ou  $U'_{*b}$  ).
- $U_{*cr}$  - Velocidade de cisalhamento crítica.
- $V$  - Volume da partícula.
- $y$  - Profundidade arbitrária.

- $W$  - Velocidade de queda na água, de uma partícula de diâmetro médio  $D$ .
- $Z$  - Parâmetro de suspensão.
- $Z_1$  - Parâmetro de suspensão.
- $Z_2$  - Parâmetro de suspensão.
- $\alpha$  - Coeficiente de atrito sólido (Equação de Bagnold).
- $\beta$  - Parâmetro de Einstein.
- $\Delta$  - Rugosidade aparente da superfície do leito.
- $\delta$  - Espessura da sub-camada limite laminar.
- $\gamma$  - Peso específico do fluido.
- $\gamma_s$  - Peso específico do sedimento.
- $\gamma_s^v$  - Peso específico submerso.
- $\mu$  - Viscosidade dinâmica do fluido.
- $\nu$  - Viscosidade cinemática do fluido.
- $\Phi$  - Parâmetro da taxa de transporte da carga do leito (Equação de Einstein).
- $\Psi$  - Parâmetro de intensidade de cisalhamento (Equação de Einstein).
- $\rho$  - Massa específica do fluido.
- $\rho_s$  - Massa específica do sedimento.
- $\tau_c$  - Tensão de cisalhamento crítica.
- $\tau_o$  - Tensão de cisalhamento no fundo do canal ( ou  $T_*$  ).
- $\tau_{ob}^i$  - Tensão de cisalhamento na superfície do leito ( ou  $T_*^i$  ).
- $\tau_{ob}''$  - Tensão de cisalhamento referente às formas do leito.
- $\theta$  e  $\theta'$  - Parâmetros de Engelund e Hansen de mobilidade das partículas de sedimento.

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1.

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| INTRODUÇÃO.....                | 1 |
| 1.1 Considerações Gerais.....  | 1 |
| 1.2 Objetivos do Trabalho..... | 4 |

### CAPÍTULO 2.

|   |    |
|---|----|
| TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....                               | 6  |
| 2.1 Canais de Fundo Rígido e de Fundo Móvel.....            | 6  |
| 2.2 Características Gerais do Transporte de Sedimentos..... | 8  |
| 2.3 Início do Movimento do Sedimento.....                   | 11 |
| 2.4 Formas do Leito.....                                    | 15 |
| 2.5 Hidráulica dos Escoamentos com Fundo Móvel.....         | 25 |
| 2.6 Resistência ao Escoamento em Canais com Fundo Móvel.... | 27 |
| 2.7 Efeitos da Turbulência.....                             | 29 |

### CAPÍTULO 3.

|   |    |
|---|----|
| EQUAÇÕES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....             | 32 |
| 3.1 Aspectos Gerais.....                              | 32 |
| 3.2 As Equações de Transporte Seleccionadas.....      | 34 |
| 3.3 Análise das Equações de Transporte.....           | 36 |
| 3.3.1 Equação de E.MEYER-PETER e R.MULLER (1948)..... | 36 |
| 3.3.2 Equação de F.ENGELUND e E.HANSEN (1967).....    | 39 |
| 3.3.3 Equação de LEO C.V.RIJN (1982).....             | 40 |
| 3.3.4 Equação de YANG (1973).....                     | 41 |
| 3.3.5 Equação de U.ZANKE (1982).....                  | 43 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.3.6 | Equação de L.PERNECKER e J.VOLLMERS (1965)..... | 44 |
| 3.3.7 | Equação de BAGNOLD (1966).....                  | 44 |
| 3.3.8 | Equação de EINSTEIN (1950).....                 | 47 |
| 3.3.9 | Equação de LAURSEN (1958).....                  | 54 |
| 3.4   | Considerações Finais.....                       | 56 |

## CAPÍTULO 4.

|  |    |
|--|----|
| INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS.....                               | 58 |
| 4.1 Aspectos Gerais.....                                     | 58 |
| 4.2 Componentes do Sistema.....                              | 59 |
| 4.3 Funcionamento dos Componentes Principais do Sistema...62 |    |
| 4.3.1 Sistema de Controle.....                               | 62 |
| 4.3.2 Perfilador do Fundo.....                               | 65 |
| 4.3.3 Registrador da Altura da Superfície da Água.....       | 66 |
| 4.3.4 Controle da Profundidade .....                         | 66 |
| 4.4 Limitações do Sistema.....                               | 67 |

## CAPÍTULO 5.

|  |    |
|--|----|
| PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E COLETA DE DADOS.....       | 73 |
| 5.1 Procedimento Experimental.....                     | 73 |
| 5.2 Coleta de Dados.....                               | 76 |
| 5.2.1 Vazão Líquida do Fluxo.....                      | 77 |
| 5.2.2 Declividade do Canal e da Superfície Líquida.... | 77 |
| 5.2.3 Profundidade do Fluxo.....                       | 79 |
| 5.2.4 Tamanho dos Sedimentos.....                      | 79 |
| 5.2.5 Viscosidade do Fluido.....                       | 80 |
| 5.2.6 Vazão Sólida.....                                | 80 |
| 5.3 Organização dos Dados Coletados.....               | 81 |

|   |  |    |           |
|---|--|----|-----------|
| 3.3.6   | Equação de L.PERNECKER e J.VOLLMERS (1965).....          | 44 |           |
| 3.3.7   | Equação de BAGNOLD (1966).....                           | 44 |           |
| 3.3.8   | Equação de EINSTEIN (1950).....                          | 47 |           |
| 3.3.9   | Equação de LAURSEN (1958).....                           | 54 |           |
| 3.4   | Considerações Finais.....                                | 56 |           |
| <b>CAPÍTULO 4.</b>                                      |  |    |           |
| <b>INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS.....</b>                   |  |    | <b>58</b> |
| 4.1   | Aspectos Gerais.....                                     | 58 |           |
| 4.2   | Componentes do Sistema.....                              | 59 |           |
| 4.3   | Funcionamento dos Componentes Principais do Sistema...62 |    |           |
| 4.3.1   | Sistema de Controle.....                                 | 62 |           |
| 4.3.2   | Perfilador do Fundo.....                                 | 65 |           |
| 4.3.3   | Registrador da Altura da Superfície da Água.....         | 66 |           |
| 4.3.4   | Controle da Profundidade .....                           | 66 |           |
| 4.4   | Limitações do Sistema.....                               | 67 |           |
| <b>CAPÍTULO 5.</b>                                      |  |    |           |
| <b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E COLETA DE DADOS.....</b> |  |    | <b>73</b> |
| 5.1   | Procedimento Experimental.....                           | 73 |           |
| 5.2   | Coleta de Dados.....                                     | 76 |           |
| 5.2.1   | Vazão Líquida do Fluxo.....                              | 77 |           |
| 5.2.2   | Declividade do Canal e da Superfície Líquida....         | 77 |           |
| 5.2.3   | Profundidade do Fluxo.....                               | 79 |           |
| 5.2.4   | Tamanho dos Sedimentos.....                              | 79 |           |
| 5.2.5   | Viscosidade do Fluido.....                               | 80 |           |
| 5.2.6   | Vazão Sólida.....  | 80 |           |
| 5.3   | Organização dos Dados Coletados.....                     | 81 |           |

## CAPÍTULO 6.

|  |    |
|--|----|
| ANÁLISE DOS DADOS.....                             | 83 |
| 6.1 Análise dos Dados Experimentais.....           | 83 |
| 6.2 Parâmetros para as Equações de Transporte..... | 84 |
| 6.3 Resultados Obtidos.....                        | 87 |

## CAPÍTULO 7.

|   |     |
|---|-----|
| DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....                         | 118 |
| 7.1 Análise dos Resultados.....                       | 118 |
| 7.2 Avaliação das Equações de Transporte.....         | 131 |
| 7.2.1 Equação de E.MEYER-PETER e R.MULLER (1948)..... | 131 |
| 7.2.2 Equação de F.ENGELUND e E.HANSEN (1967).....    | 132 |
| 7.2.3 Equação de LEO G.V.RIJN (1982).....             | 133 |
| 7.2.4 Equação de YANG (1973).....                     | 135 |
| 7.2.5 Equação de U.ZANKE (1982).....                  | 136 |
| 7.2.6 Equação de L.PERNECKER e J.VOLLMERS (1965)..... | 137 |
| 7.2.7 Equação de BAGNOLD (1966).....                  | 138 |
| 7.2.8 Equação de EINSTEIN (1950).....                 | 139 |
| 7.2.9 Equação de LAURSEN (1958).....                  | 141 |

## CAPÍTULO 8.

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 143 |
| 8.1 Conclusões.....             | 143 |
| 8.2 Recomendações.....          | 145 |

## ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| Anexo 1 - Método de VANONI-BROOKS.....         | 147 |
| Anexo 2 - Método de EINSTEIN e BARBAROSSA..... | 151 |



|   |     |
|---|-----|
| Anexo 3 - Equação de E.MEYER-PETER e R.MULLER (1948)..... | 154 |
| Anexo 4 - Equação de F.ENGELUND e E.HANSEN (1967).....    | 156 |
| Anexo 5 - Equação de LEO C.V.RIJN (1982).....             | 158 |
| Anexo 6 - Equação de YANG (1973).....                     | 161 |
| Anexo 7 - Equação de U.ZANKE (1982).....                  | 163 |
| Anexo 8 - Equação de L.PERNECKER e J.VOLLMERS (1965)....  | 165 |
| Anexo 9 - Equação de BAGNOLD (1966).....                  | 166 |
| Anexo 10 - Equação de EINSTEIN (1950).....                | 168 |
| Anexo 11 - Equação de LAURSEN (1958).....                 | 172 |
| Anexo 12 - Bibliografia.....                              | 174 |

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.

### 1.1 Considerações Gerais.

Embora o transporte de sedimentos seja um problema antigo e que afeta a sociedade desde os primórdios da humanidade, sómente agora, neste século, vem sendo objeto de pesquisa, despertando grande interesse em diversos países, principalmente naqueles que têm seus recursos hídricos seriamente ameaçados pelo processo de erosão e sedimentação.

O sedimento se constitui um grande problema no controle e utilização das águas na superfície da terra. Vários problemas relacionados com sedimentos são encontrados nos projetos de irrigação e drenagem, como por exemplo obstrução de tubulações e diminuição da eficiência do sistema como um todo, podendo até mesmo ser um fator impositivo para a utilização de determinadas práticas agrícolas: nos melhoramentos e estabilização dos rios e canais de navegação, pois podem provocar perda da capacidade de navegação ao inviabilizar o tráfego de determinados tipos de embarcações ou até mesmo exigir a construção de certos tipos de obras hídricas; nos controles de enchentes e no planejamento de reservatórios, pelo assoreamento do próprio reservatório e conseqüente diminuição de sua vida útil, ou pelo aumento da capacidade de erosão dos cursos de água à jusante da barragem; além de outras áreas específicas como manutenção de portos, erosão de praias, purificação de água para abastecimento público

e controle da erosão do solo. Além disto, as medidas corretivas que venham a ser adotadas para restabelecer as condições de projeto das obras hidráulicas, são sempre muito onerosas e por vezes impraticáveis.

Os administradores e planejadores dos recursos hídricos devem abordar de maneira coerente o problema de sedimentos, de forma a minimizar os aspectos negativos e os prejuízos que podem advir quando da construção de obras hídricas mal projetadas ou mal localizadas.

O Brasil não possui um controle adequado de seus recursos hídricos e das possibilidades regionais da ocorrência de sedimentação e transporte de sedimentos. No entanto, verifica-se no país, áreas que sofrem enormes processos de erosão e que terminam perdendo a camada produtiva do solo, que é carregada para os cursos de água provocando sérias consequências ao meio ambiente.

Os estudos sobre transporte de sedimentos incluem o comportamento de um rio, sua forma e o processo de alcançar a estabilidade, o comportamento ambiental das regiões circunvizinhas como perda de solos e da vegetação nativa, as condições hidrológicas, etc.

Dentre todos os estudos, destaca-se a importância da estimativa da produção de sedimentos, ou seja, a avaliação do transporte de sedimentos. Esta estimativa pode ser feita através de amostradores, da observação do comportamento das formas do leito ou através de fórmulas estimativas baseadas em modelos matemáticos, físicos ou empíricos. Todos os métodos, porém, têm suas limitações. O uso de amostradores nas medições no campo em

canais aluviais torna-se ineficiente, principalmente na determinação da carga do leito, já que a própria presença do aparelho medidor junto ao leito, modifica completamente as condições de escoamento. Além disto, a medição num dado ponto de uma seção transversal não representa o comportamento da mesma como um todo, pois a velocidade e o movimento do sedimento variam consideravelmente no tempo e no espaço [Simon e Senturk(1977)]. Caracteriza-se então, no campo, a dificuldade em estabelecer os limites do leito móvel. Além disto, seria necessário um monitoramento permanente e abrangente, considerando vários pontos numa mesma seção e ao longo de grandes trechos do curso de água em estudo.

O comportamento das formas do leito, observado através de aparelhos ultrasônicos, pode fornecer dados a respeito da carga do leito, porém mascara dados qualitativos do material e não leva em conta a carga em suspensão [Simon e Senturk(1977)].

As equações estimativas, apesar da facilidade, fornecem resultados bastante imprecisos, com erros da ordem de mais de 500% [Vanoni(1975) e Simon e Senturk(1977)], seja devido à própria hipótese de cálculo, base de seu desenvolvimento, ou aos ajustes empíricos que são impostos à maioria das equações.

Assim, o pesquisador se defronta com vários obstáculos na busca de estimar a quantidade de sedimentos transportada. De qualquer forma, deve, sempre que possível utilizar dados obtidos a partir de um monitoramento permanente, submetidos posteriormente a um trabalho estatístico, visando uma aproximação cada vez maior da realidade nas suas avaliações.

## 1.2 Objetivos do Trabalho.

Existem inúmeras teorias sobre o transporte de sedimentos, desenvolvidas através de experiências em laboratório, análise dimensional, observações de campo e outros meios. Pode-se citar as metodologias de YANG, de EINSTEIN, de LAURSEN, de TOFALETTI, de BLENCH, de BAGNOLD, de ENGELUND e HANSEN, de GRAFF e ACAROGLU, dentre várias outras, mas não se pode eleger qualquer uma delas como a mais precisa, pois apresentam sensíveis diferenças entre si nos resultados de uma mesma situação estudada, tornando-se imprescindível a experiência de campo e o bom senso do engenheiro especialista. Todas, no entanto, procuram estabelecer o princípio que a natureza utiliza para regular o fenômeno do movimento das partículas sólidas como parte do complexo água-sedimento. Porém, a maioria delas não faz distinção entre o regime que resulta com cada formação do leito e as características específicas de cada uma. Julgou-se então que seria útil relacionar uma teoria à uma forma do leito, procurando direcionar sua aplicação, facilitar o trabalho dos engenheiros que lidam com esta área e, conseqüentemente, diminuir a imprecisão dos resultados fornecidos.

O objetivo principal deste trabalho é verificar a adequação de algumas teorias existentes sobre transporte de sedimentos a cada tipo de leito formado, através de dados obtidos em ensaios realizados num canal de recirculação de fluxo, relacionando a quantidade transportada calculada por cada teoria com a quantidade medida em laboratório.

Como objetivo secundário, verificar a sensibilidade de

cada teoria, ao raio hidráulico do leito e ao raio hidráulico da superfície do leito.

Para alcançar estes objetivos foi realizada uma série de ensaios num canal de recirculação no Laboratório de Hidráulica do CGT - UFPB, Campus II.

A descrição do sistema experimental, a coleta e análise dos dados, bem como, a discussão dos resultados, são apresentados neste trabalho. Os principais conceitos do transporte de sedimentos encontrados na bibliografia, são sintetizados no Capítulo a seguir.

## CAPÍTULO 2. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O estágio atual do conhecimento sobre o transporte de sedimentos, parece estar longe de definir uma equação geral que permita estimar a quantidade de sedimentos transportada pelo fluxo. Esta condição impõe que se realizem cada vez mais pesquisas, de forma a diminuir as lacunas existentes nesta área do conhecimento científico.

O estudo específico das formas do leito, como elemento resultante da interação entre as condições de fluxo e as características gerais do sedimento, parece ser um caminho adequado para melhorar o nível de entendimento sobre o assunto e para definir a equação que melhor trata do problema específico do transporte de sedimentos.

Para facilitar este entendimento há necessidade de se rever alguns conceitos básicos imprescindíveis a todo estudo sobre transporte de sedimentos.

### 2.1 Canais de Fundo Rígido e de Fundo Móvel

As principais diferenças entre o fluxo em canais abertos com fundo móvel e com fundo rígido [Simons e Senturk(1977)] são as seguintes:

a) Em canais aluviais, o fluxo e a forma da fronteira são interrelacionados. Após o movimento do leito ter tido início, o leito começa a sofrer distorção, o que provoca o

aparecimento das formas do leito. A forma, o tamanho e a taxa de movimento dessas formas do leito variam com as condições do fluxo.

b) A magnitude dos elementos rugosos, representados pelas formas do leito, podem ser da mesma ordem de magnitude da profundidade do fluxo. Uma rugosidade relativa dessa grandeza não é geralmente encontrada em sistemas rígidos.

c) Um leito aluvial não é impermeável. Há a possibilidade de ocorrer o fluxo pelo interior do leito.

d) No leito aluvial há o movimento dos grãos e o movimento das formas do leito. O rolamento dos grãos sobre a fronteira pode introduzir um cisalhamento adicional devido à sua própria rotação, além disto, as esteiras, fenômeno que ocorre no fluxo à jusante de cada rugosidade do leito, provocam turbulência próximo à fronteira. Em adição, o movimento das formas do leito cria irregularidades de fluxo na vertical devido à mudança de elevação do leito e do padrão de fluxo resultante.

e) Nos estágios avançados do movimento do sedimento algumas partículas do leito são sustentadas pelo fluxo, e o material é dito em suspensão. A presença de material em suspensão afeta a turbulência, o peso específico e a viscosidade do fluido.

f) Como as formas do leito alcançam dimensões comparáveis à profundidade do fluxo, o mesmo não é mais uniforme, acontecendo variações de profundidade e de velocidade ao longo e transversalmente ao canal.

Essas diferenças não podem ser ignoradas e devem ser



consideradas na análise do fluxo em canais aluviais.

## 2.2 Características Gerais do Transporte de Sedimentos.

Os escoamentos com superfície livre podem ocorrer em canais com fronteiras fixas ou móveis. Nos escoamentos com fronteiras erodíveis é intuitivo perceber um processo de erosão do material que compõe a geometria do canal, o transporte deste material e a posterior sedimentação. Quando não ocorre nenhum movimento do leito ou das paredes laterais, pode-se tratar o caso como um canal rígido, do qual já se conhece com segurança a lei da variação da rugosidade.

O transporte do material erodido pode ocorrer de várias maneiras, dependendo da natureza do fluxo, da natureza do fundo e da natureza da energia disponível. De maneira específica pode-se classificar os tipos de movimento do material do leito em um canal erodível da seguinte forma:

- .rolamento, arrastamento, ou ambos
- .saltação
- .suspensão

O movimento do material do leito, está relacionado ao conceito da velocidade de cisalhamento oriundo da força de atrito atuante na fronteira entre o fluxo e o leito. Quando a velocidade de cisalhamento atinge um determinado valor capaz de mover partículas do leito, o movimento de rolamento e arrastamento se iniciará. Neste caso as partículas manterão contínuo contato com o leito [Rijn(1982)]. Com o aumento da velocidade de

cisalhamento, o impacto de uma partícula com outra e a turbulência do fluxo, surge o movimento em salto. Normalmente, a carga do leito ou carga de arrasto, abrange os modos de transporte de rolamento, arrasto e saltação. Quando as forças de turbulência são de ordem mais alta que o peso submerso das partículas, elas podem entrar em suspensão e serem movimentadas sustentadas pelo fluxo [Rijn(1982)].

A carga total transportada por um fluxo é igual à carga de arrasto mais a carga em suspensão.

Outro conceito que deve ser considerado é o da carga de lavagem, que é composta do material oriundo das áreas vizinhas ao leito do rio, carregado através do escoamento superficial das águas da chuva, práticas agrícolas, etc e que permanece em suspensão no fluxo. Esta carga não é levada em conta neste trabalho.

A natureza do material que compõe o fundo do canal erodível, precisa ser avaliada em termos da quantidade e da qualidade. Qualitativamente o material é definido por suas propriedades, tais como: tipo de sedimento, classificação quanto ao tamanho das partículas, tamanho representativo, massa específica seca e submersa, forma, distribuição, densidade e velocidade de queda.

A maioria das propriedades do sedimento podem ser definidas a partir de uma amostra coletada no leito e todas são consideradas especificamente nas fórmulas experimentais que tratam do transporte de sedimentos.

A velocidade de queda das partículas, representada por  $w$ , é obtida através da relação de equilíbrio entre

resistência do fluido e a força da gravidade [Graff(1975), Srinivasan(1990)]. Isto é definido da seguinte maneira:

$$F_A = C_D \cdot \rho \cdot A \cdot W^2 / 2 \quad \text{eq 2.1}$$

$$P = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot V \quad \text{eq 2.2}$$

$$F_A = P \quad \text{eq 2.3}$$

$$C_D \cdot \rho \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \frac{W^2}{8} = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \left( \frac{\pi \cdot D^3}{6} \right) \quad \text{eq.2.4}$$

onde  $F_A$  é a força de atrito ou a resistência imposta ao movimento da partícula,  $P$  é o peso da partícula,  $A$  é a área de uma seção da partícula,  $V$  é o volume da partícula,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto,  $D$  é o diâmetro representativo das partículas,  $\rho$  é a massa específica;

como  $W \cdot D / \nu$  é o Número de Reynolds  $Re$ , o coeficiente de arrasto  $C_D$  pode ser relacionado como função de  $Re$ , ou seja:

$$C_D \cdot Re^2 = \frac{4}{3} \cdot g \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{D^3}{\nu^2} \quad \text{eq 2.5}$$

ou

$$\frac{C_D}{Re} = \frac{4}{3} \cdot g \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{\nu}{W^3} \quad \text{eq 2.6}$$

que permite o estabelecimento de uma curva experimental.

Análiticamente, a queda de uma partícula esférica foi estudada por vários pesquisadores [Srinivasan(1990)] e o valor do coeficiente de arrasto foi estabelecido como uma função do Número de Reynolds.

Porém, para  $Re < 0,1$  o valor do coeficiente de arrasto, pode ser definido por:  $C_D = 24/Re$  (solução de STOKES)[Graff(1975), Simons e Senturk(1977)].

Então, substituindo o valor de  $C_D$  na equação 2.1 tem-se:

$$W = \frac{1}{18 \cdot \nu} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \cdot D^2 \quad \text{eq 2.7}$$

O efeito do movimento de uma partícula em condições não exatamente definidas pelas equações teóricas, representa uma modificação da velocidade de queda, o que, em geral, depende de: forma da partícula, condições do limite da fronteira, turbulência, resistência da superfície das partículas, aglomeração de sedimentos e viscosidade [Srinivasan(1990)].

Em geral, a modificação da velocidade de queda é indicada pela alteração da resistência do fluido dada pela equação de STOKES,  $R = K(3 \cdot \pi \cdot D \cdot \mu \cdot W)$  onde  $K$  é avaliado para cada efeito ou combinação dos efeitos já citados.

### 2.3 Início do Movimento do Sedimento

O início do movimento do sedimento em fluxo de leito arenoso, poderá ser associado a uma velocidade crítica ou a uma tensão de cisalhamento crítica.

O estabelecimento da tensão de cisalhamento crítica depende na realidade de vários fatores, tais como:

. a força do empuxo sobre a partícula;

- . a força de sustentação da partícula;
- . a força de arrasto da partícula;
- . a componente da gravidade para cada movimento;
- . o peso da partícula;
- . a forma da partícula;
- . a rugosidade da superfície;

Na condição crítica, o momento da força de arrasto sobre uma partícula deve ser igual ao momento do peso submerso.

Quando a força de arrasto é menor do que o valor crítico, o material do leito permanece sem movimento. Neste caso o leito pode ser considerado rígido.

Em geral, é difícil determinar exatamente a condição de início de movimento do leito, principalmente em canais aluviais. Os pesquisadores [Simons e Senturk(1977)] definem a condição crítica de forma mais ou menos subjetiva, resultado de observações diretas correlacionando a tensão de cisalhamento ou a velocidade crítica, com o diâmetro médio dos sedimentos.

As forças atuantes sobre uma partícula do leito são o próprio peso submerso da partícula, a força de levantamento e a força de arrasto. Usualmente, a força de levantamento não aparece explicitamente nas análises teóricas, porque o levantamento depende das mesmas variáveis que o arrasto e sempre os coeficientes de ajuste das equações teóricas resultantes são determinados empiricamente. Este procedimento consideraria automaticamente as forças de levantamento. A Fig 2.1 mostra as forças de arrasto ( $F_d$ ) e o peso submerso ( $F_g$ ) atuantes sobre uma partícula em fluxo laminar e em fluxo turbulento. Na figura,

$\theta$  é a declividade do leito,  $\theta$  é o ângulo de repouso do sedimento submerso,  $C$  é o centro de gravidade e  $G$  é o ponto de apoio da partícula. A força de levantamento ( $F_L$ ) está incluída em  $F_g$  e:

$$F_g = C_1 \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot D_s^3 \quad \text{eq 2.8}$$

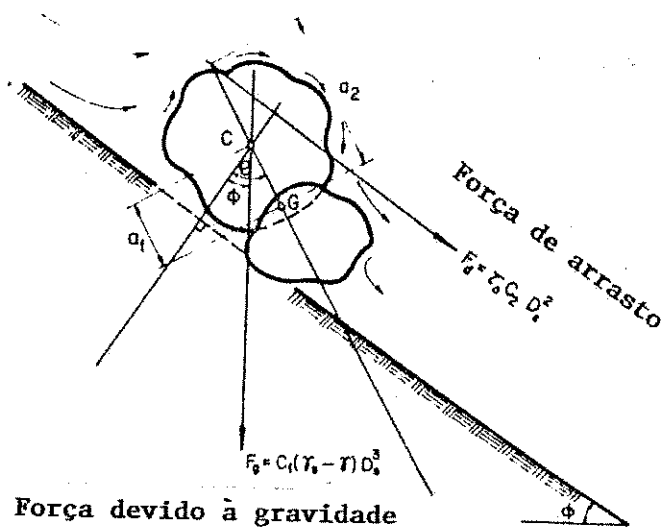


Fig. 1a - Fluxo laminar

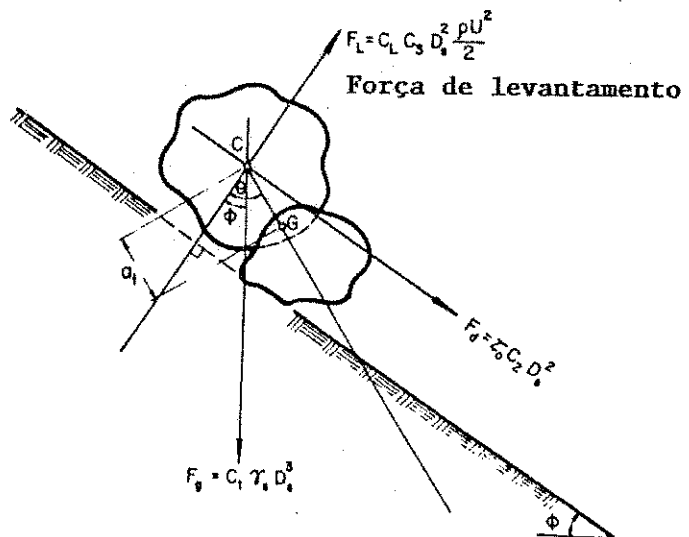


Fig. 1b - Fluxo turbulento

Fig.2.1 Fluxo em torno de uma partícula em repouso e as forças que atuam sobre ela. [Simon e Senturk(1977)]

onde  $C_1$  é um coeficiente de forma,  $D_s$  é o diâmetro característico da partícula,  $\gamma_s$  e  $\gamma$  são os pesos específicos do sedimento e da água respectivamente.

A força de arrasto pode ser avaliada por dois procedimentos:

1) se o fluxo é laminar, efeitos da viscosidade predominam e a resultante da força de arrasto atua acima do ponto C.

2) se o fluxo é turbulento, os efeitos inerciais predominam e a resultante da força de arrasto atua sobre o ponto C.

Analisando as forças atuantes sobre as partículas e considerando o momento que é produzido por cada força, chega-se à conclusão de que é possível se estabelecer a condição crítica para o início do movimento da partícula e que tal condição depende dos seguintes parâmetros:  $b, d, D_s, g, \rho_s, \rho, \nu, U_{*c}$  [Simons e Senturk (1977), Srinivasan(1990)]. Utilizando-se a análise dimensional produz-se:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D_s} = \frac{\rho \cdot U_{*c}^2}{\gamma'_s \cdot D_s} = f\left(\frac{D_s}{b}, \frac{D_s}{d}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{U_{*c} \cdot D_s}{\nu}\right) \quad \text{eq 2.9}$$

onde  $\gamma'_s = (\gamma_s - \gamma)$ ,  $b$  é a largura do canal,  $d$  é a profundidade do fluxo,  $D_s$  é o tamanho efetivo dos grãos ou o elemento rugoso e  $U_{*c}$  é a velocidade de cisalhamento na condição crítica.

Para partículas finas, a influência de  $D_s/b$  e de  $D_s/d$  sobre o equilíbrio das partículas pode ser desprezado

[Simons e Senturk(1977)] . Também se  $\rho$  é constante, a influência de  $\rho_s/\rho$  pode ser incluída no coeficiente da equação final. Então a relação torna-se:

$$\frac{\rho \cdot U_{*c}^2}{\gamma_s \cdot D_s} = f\left(\frac{U_{*c} \cdot D_s}{\nu}\right) \quad \text{eq 2.10}$$

o membro da esquerda desta equação é o Número de Froude, expresso em termos da velocidade de cisalhamento e o segundo é o Número de Reynolds da partícula. A relação define o movimento incipiente.

Muitos experimentos têm sido conduzidos para desenvolver uma solução para a equação 2.9. Uma das soluções largamente aceita é a apresentada como o diagrama de Shields (1936) mostrado na figura 2.2.

#### 2.4 Formas do Leito

Quando a tensão cisalhante excede a tensão cisalhante crítica, as partículas de sedimento começam a mover-se, chegando a ocasionar a formação das irregularidades do leito, conhecidas como ripples, dunas, leito plano e antidunas. Estas formas do leito contribuem de maneira substancial para a variação da resistência ao fluxo e da taxa de transporte de sedimentos.

Muitos pesquisadores [Srinivasan(1969)] acreditam que, estas formas do leito são responsáveis pelas divergências existentes nos resultados das diversas hipóteses adotadas, para explicar o fenômeno do transporte sólido por um fluxo. As formas do leito provocam uma grande variação na rugosidade do



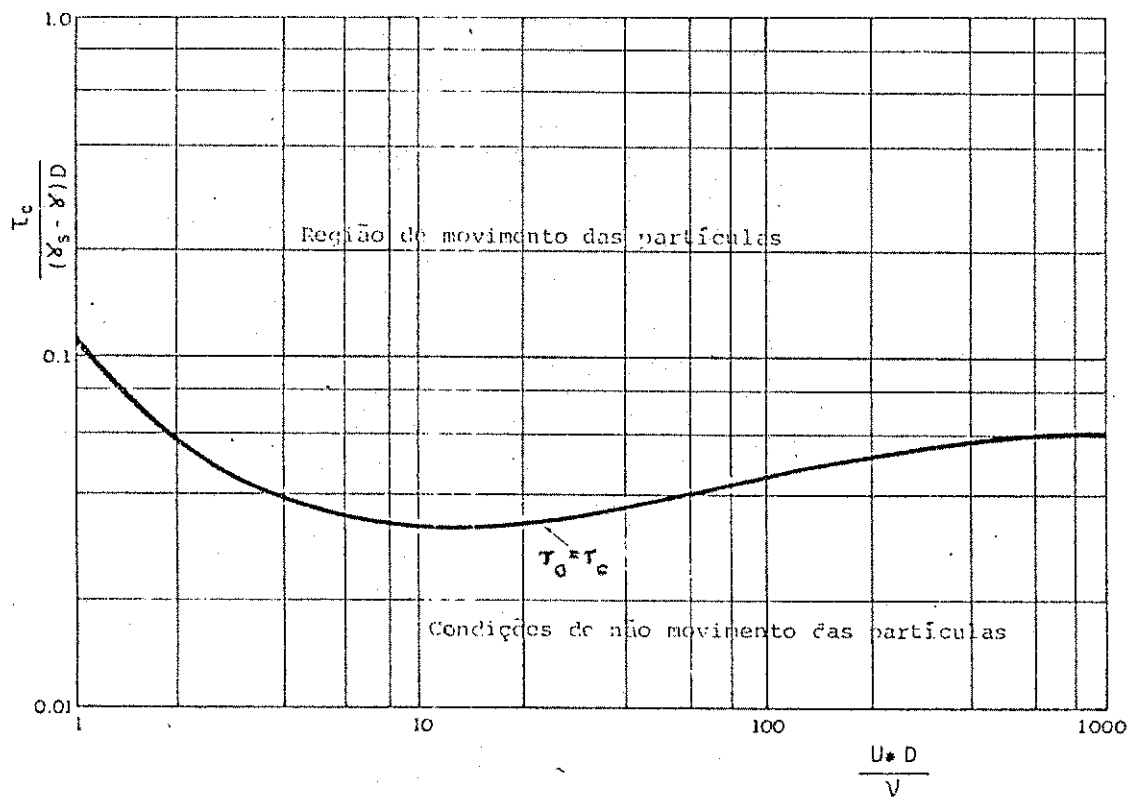


Fig.2.2 Relação de Shields para o início do movimento das partículas.

leito e nas características do transporte, no canal erodível. O efeito da granulometria do sedimento é determinante na formação destas figuras do leito. A taxa de transporte em sedimentos uniformes e não uniformes, diferem substancialmente. Em sedimentos não uniformes, ocorre um transporte de sedimento seletivo, isto é, o fluxo arrasta no seu caminho as partículas mais finas e permite a formação de uma camada mais rígida protetora do fundo, que controla tanto a soma dos sedimentos transportados, quanto o tamanho das formas do leito. Isto mostra, que o estudo considerado com sedimentos uniformes apresenta um comportamento mais homogêneo em toda a camada do leito. No entanto, há necessidade de uma clara definição das condições sob as quais as várias formas do leito ocorreriam e, também, o desenvolvimento de funções de rugosidade e transporte para cada um desses domínios. Implica dizer que a consideração de cada forma do leito em particular, pressupõe o desenvolvimento de uma relação da rugosidade e do transporte, específica para ela, relacionada, naturalmente com determinados tipos de sedimentos (granulometria).

As formas do leito e a taxa de sedimento transportado são determinadas pelas mesmas variáveis de fluxo e do sedimento. Assim, a ocorrência de uma forma do leito não é apenas um modo de variar a resistência do canal ao fluxo mas, também, de atingir a capacidade de transporte sólido do fluxo.

De acordo com a variação da tensão de cisalhamento provocada pelo fluxo num leito inicialmente plano e sem transporte, ocorre o surgimento das formas do leito de acordo com

as condições de fluxo.

Ripples (Foto 2.1): são pequenas elevações de largura menor que 30 cm e altura variando de 6 a 12 cm. Apresentam forma irregular, tanto no plano horizontal como na seção longitudinal, que possui suave declividade na face de montante e declividade quase igual ao ângulo de repouso do material do leito, no lado de jusante. Os ripples movem-se para jusante com velocidade muito menor que a do fluxo e ocorrem geralmente, com sedimentos menores que 0,6 mm de diâmetro [Vanoni(1975), Simon e Senturk(1977)]. Verifica-se que a taxa de transporte de sedimentos na presença de ripples é muito baixa. A faixa de condições que permite o aparecimento de ripples é muito estreita, fazendo com que esta formação seja menos duradoura, ou seja, qualquer variação nas condições do ensaio permite o aparecimento de outra forma do leito.

Dunas (Foto 2.2): são características de leito mais largas e mais altas do que os ripples. O perfil longitudinal das dunas é aproximadamente triangular, com longas e suaves declividades à montante e declividades à jusante aproximadamente iguais ao ângulo de repouso do material do leito [Vanoni(1975), Simons e Senturk(1977)]. A parte de montante das dunas pode aparecer coberta por ripples. As dunas emigram para jusante a uma velocidade maior que a dos ripples e permitem uma taxa de transporte de sedimentos relativamente alta. Nos ensaios de laboratório observou-se que existe uma grande faixa de variação das condições de contorno que permite o aparecimento de dunas. No entanto, para cada situação existe um padrão de duna diferente. Por exemplo: com velocidade de fluxo mais baixa as dunas



Foto 2.1 Ripples obtidos com uma vazão de 16 l/s, profundidade de fluxo de 8,5cm e tamanho de sedimento de 0.35mm.



Foto 2.2 Dunas obtidas com uma vazão de 40 l/s, profundidade de fluxo de 16cm e tamanho de sedimento de 0,74mm.

apresentam-se mais curtas e mais altas; aumentando-se a velocidade ou diminuindo a profundidade do fluxo, as dunas passam a ser mais compridas e mais baixas.

Leito Plano: é uma forma do leito, livre de qualquer irregularidade perceptível na sua superfície. Isto é, não demonstra elevação ou depressão notável no leito formado e está associado a altas taxas de transporte de sedimentos e altas tensões de cisalhamento. Em laboratório, observou-se a grande instabilidade deste tipo de leito, que é formado numa pequena faixa do Número de Froude entre o regime crítico e subcrítico do fluxo.

Antidunas: são formações do leito que acompanham as ondas da superfície líquida [Vanoni(1975), Simons e Senturk(1977)], ou seja, as ondas do leito e da superfície entram em fase. A forma da onda é senusoidal e a direção de propagação pode ser tanto para montante quanto para jusante. São caracterizadas por uma alta taxa de transporte sólido e ocorrem quando o Número de Froude está próximo de 1, o valor crítico.

Alguns pesquisadores não concordam com a existência de diferenças entre as configurações dos leitos rípies e dunas [Vanoni(1975), Cunha(1978)]. Vanoni e outros, por exemplo, viram poucas razões para distingui-las, porque o mecanismo pelo qual elas se formam e se movem são semelhantes. Contudo, alguns fatores justificam essa distinção como por exemplo:

1. Rípies somente se formam se o diâmetro médio do material do leito,  $D_{50}$ , for menor do que 0,6 mm, ou seja, em leitos de sedimentos finos;

2. As dunas movem-se ao longo dos cursos d'água com alturas variadas, enquanto que os ripples movem-se com alturas aproximadamente constantes;

3. Os efeitos de uma mudança de profundidade na resistência ao escoamento são opostos. Se o leito é ripples, um aumento na profundidade causa apenas uma diminuição da 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, e uma diminuição da resistência ao escoamento se o material do leito for mais fino que 0,3 mm [Vanoni(1975)].

O aumento da velocidade no leito dunas, ocasiona o aparecimento do estado de transição, com as dunas diminuindo sua altura e aumentando o comprimento, como se entre as dunas houvesse uma região plana intercalada.

Cada uma das formas do leito estáveis, define um regime particular de escoamento com características próprias de transporte e resistência, ao mesmo tempo em que a forma do leito é determinada por estas características. Da necessidade de se prever corretamente que forma do leito ocorrerá para cada condição, é que muitos pesquisadores abordaram essa questão [Srinivasan(1969)]. Dentre eles pode-se destacar um detalhado trabalho desenvolvido por Srinivasan (1969) que, sobre bases teóricas e empíricas, delimitou graficamente os campos de ocorrência das diversas formas do leito em função dos parâmetros adimensionais  $g.D^3 / v^2$  e  $U_* . D / v$ . Considerando o leito plano com transporte, como o regime estável básico, as outras formas do leito são explicadas como consequência de

Instabilidades no escoamento sobre o leito plano. Quando a tensão de cisalhamento sobre o leito plano diminui gradualmente, este se torna instável e é substituído por ripples ou dunas, dependendo do tamanho do grão e da viscosidade do fluido. As relações encontradas por Srinivasan são mostradas na Fig. 2.3.

Verifica-se que há uma influência recíproca entre o escoamento e o material que constitui a fronteira sólida. A partir de certa condição, o material do fundo começa a mover-se e é transportado no sentido do escoamento. Este transporte é condicionado também pela natureza do escoamento, que é relacionado com as propriedades geométricas do canal: seção, forma e alinhamento; com as propriedades hidráulicas do canal e do fluxo, tais como: declividade, raio hidráulico do canal, vazão, velocidade do fluxo, profundidade, perdas de carga, a turbulência e a tensão de cisalhamento; e com as propriedades do fluido: massa específica e viscosidade; e a aceleração da gravidade.

Além disso, ocorrendo o transporte, a superfície do fundo modifica-se alterando conseqüentemente a sua rugosidade, que por sua vez vai influir no próprio fluxo da água, na medida em que a forma desenvolvida vai oferecer maior resistência ao movimento do fluido. Verifica-se pois, uma recíproca entre os escoamentos líquido e sólido. Esta interação entre os escoamentos líquido e sólido é um fenômeno tão complexo que não é susceptível de uma representação matemática definida e precisa [Da Cunha(1969)].



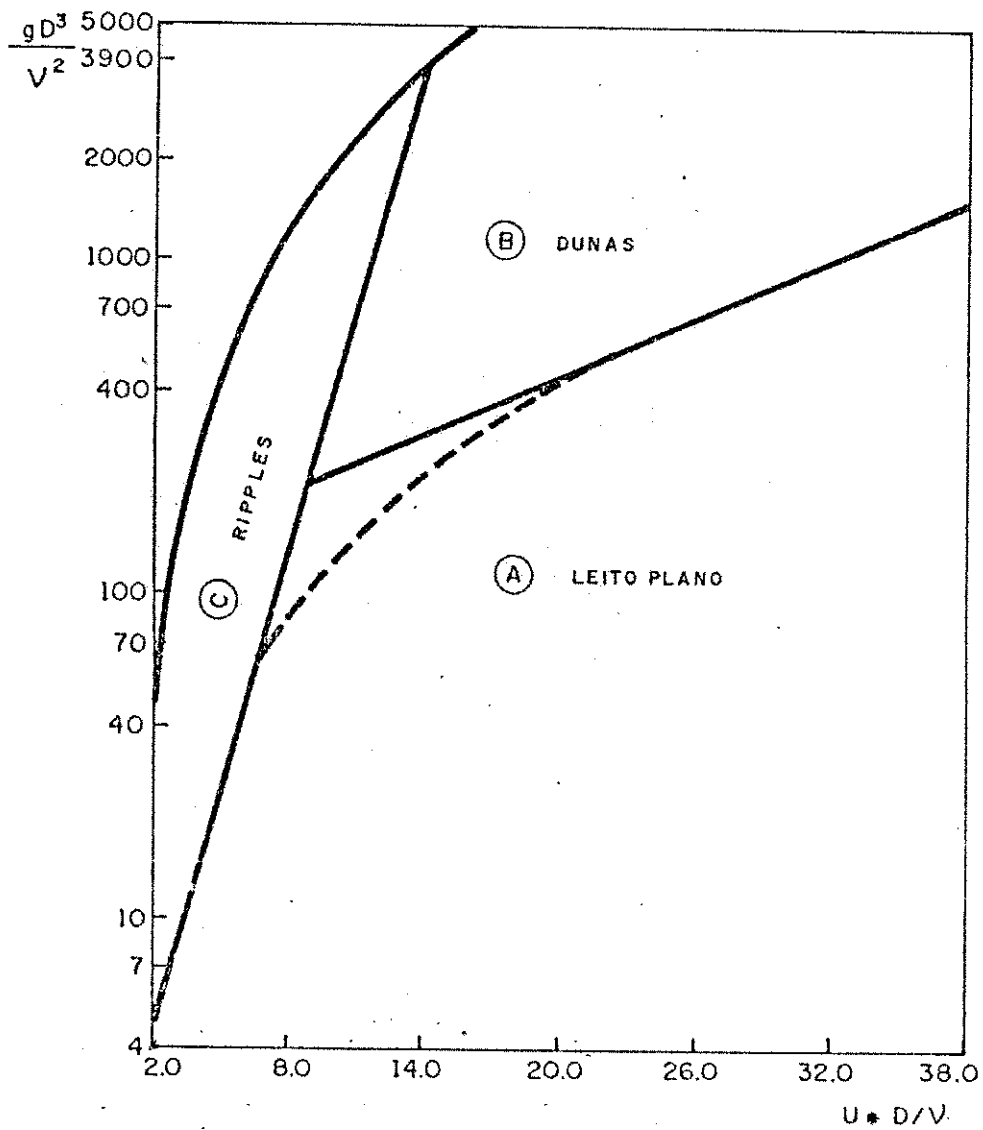


Fig.2.3 Relação de Srinivasan para a determinação da forma do leito. [Srinivasan e Hill (1986)]

## 2.5 Hidráulica dos Escoamentos com Fundo Móvel

Considera-se estável um escoamento com fundo móvel, quando se estabelece um equilíbrio entre a capacidade de transporte e o caudal sólido. Nestas circunstâncias o escoamento é considerado quase uniforme e fica caracterizado na medida em que se define uma lei de distribuição de velocidades e uma lei de perda de carga.

A equação 2.11 dá a tensão tangencial em qualquer ponto de um escoamento turbulento em contato com uma superfície sólida, onde o gradiente de velocidade à distância  $y$  da superfície sólida é representado por  $du/dy$  e  $l$  é o comprimento da mistura que se admite proporcional a  $y$  [Da Cunha(1969)].

$$\tau_y = \rho \cdot l^2 \cdot (du/dy)^2 \quad \text{eq 2.11}$$

Fazendo  $\tau_y = \tau_0$ , tensão tangencial no fundo, a expressão 2.11 pode ser escrita:

$$du = (U_* / K) \cdot (dy/y) \quad \text{eq 2.12}$$

onde  $U_* = \sqrt{\tau / \rho}$  se chama velocidade de atrito junto ao fundo e o  $K = l / y$  é a constante de Von Karman, cujo valor depende da turvação da água e é 0,4 para água límpida [Da Cunha(1969)]. A tensão de cisalhamento é  $\tau = \gamma \cdot R \cdot S$  sendo  $\gamma$  o peso específico,  $R$  o raio hidráulico e  $S$  a declividade da linha de energia.

Integrando a expressão 2.12 obtém-se:

$$U = \left(\frac{2,3}{K}\right) \cdot U_* \cdot \log \left(\frac{y}{y_0}\right) \quad \text{eq 2.13}$$

que é a lei universal de distribuição de velocidades, de Von Karman. Einstein verificou que essa lei se adaptava muito bem à descrição dos escoamentos com fundo móvel, se a constante de integração assumisse o valor proposto por Keulegan, em 1938:

$$y_0 = \frac{k_s}{30,2} \cdot x \quad \text{eq 2.14}$$

onde  $k_s$  é a rugosidade equivalente de Nikuradse para o leito,  $x$  é um coeficiente de correção sendo função de  $k_s/\delta$  (Fig. 2.4) e o  $\delta$  é a espessura da subcamada limite laminar junto a uma parede lisa. Substituindo  $y_0$  pelo seu valor a equação 2.13 transforma-se em:

$$U = \left(\frac{2,3}{K}\right) \cdot U_* \cdot \log (30,2 \cdot x \cdot y / k_s) \quad \text{eq 2.15}$$

Esta lei não é válida na vizinhança imediata da fronteira, isto é, no interior da subcamada limite laminar onde a velocidade varia linearmente com a distância à parede. No entanto, nos escoamentos com fundo móvel a espessura da película laminar tem sempre valores muito pequenos sendo por isto suficiente utilizar a expressão 2.13.

A partir da lei de distribuição desta velocidade, é possível determinar a distância do fundo  $y$ , para a qual a velocidade  $u$  é igual à velocidade média do escoamento. Exprimindo

y em função do raio hidráulico R a expressão 2.13 torna-se:

$$U = \left(\frac{2,3}{K}\right) \cdot U_* \cdot \log (12,27 \cdot R \cdot x/k_s) \quad \text{eq 2.16}$$

que normalmente é utilizada sob a forma

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \cdot \log (12,27 \cdot R / k_s) \quad \text{eq 2.17}$$

que corresponde ao escoamento turbulento rugoso ( $x=1$  e  $\frac{k_s}{\delta} > 5$ ) [Da Cunha(1969)].

## 2.6 Resistência ao Escoamento em Canais com Fundo Móvel

Nos escoamentos em canais erodíveis costuma-se considerar separadamente, as resistências ao escoamento correspondentes às margens e ao fundo, decompondo-se ainda esta última na resistência devida à rugosidade superficial e naquela devida às configurações do leito. Traduzindo a influência da rugosidade pela tensão tangencial, ter-se-á [Da Cunha(1969), Vanoni(1975)]:

$$\tau_b = \tau_b' + \tau_b'' \quad \text{eq 2.18}$$

Sendo  $\tau_b$  a tensão de cisalhamento correspondente ao fundo do canal,  $\tau_b'$  e  $\tau_b''$  respectivamente, a tensão de cisalhamento correspondente à superfície do leito e a tensão relativa às formas do leito.

A relação entre a tensão de cisalhamento  $\tau$  e o

coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach  $f$  pode ser expressa por:

$$f_b = 8.\tau_b / (U^2.\rho) \quad \text{eq 2.19}$$

tem-se que  $f_b = f_b' + f_b''$  [Vanoni(1975)].

Einstein propôs decompor o raio hidráulico relativo ao leito,  $R_b$ , em  $R_b'$ , raio hidráulico relativo à superfície do leito, e  $R_b''$ , raio hidráulico correspondente às formas do leito. Assim:

$$\tau_b' = \gamma.R_b'.S \quad \text{e} \quad \tau_b'' = \gamma.R_b''.S \quad \text{eq 2.20}$$

ou

$$f_b' = 8.g.R_b'.S/U^2 \quad \text{e} \quad f_b'' = 8.g.R_b''.S/U^2 \quad \text{eq 2.21}$$

Como a relação entre os dois raios hidráulicos não pode ser obtida simplesmente pelo valor de  $R_b$ , Einstein desenvolveu um método iterativo para separar os efeitos, das formas do leito e da superfície do leito, ou seja separar  $R_b'$  e  $R_b''$ .

Dispõe-se, então, do método de VANONI e BROOKS (Anexo 1) para separar a influência das paredes laterais, da influência do fundo como um todo, o que tem que ser feito quando se utiliza canais de laboratório, e do método de EINSTEIN (Anexo 2) para determinar o raio hidráulico da superfície do leito e o referente às formas do leito.

A determinação da tensão de cisalhamento na superfície do leito bem como do raio hidráulico da superfície do mesmo, são

procedimentos importantes pois, permitem calcular a taxa de transporte de sedimentos eliminando a resistência imposta ao transporte oriunda das formas do leito.

O método de Einstein (Anexo 2.2) para a determinação de  $R'_b$  segue um processo iterativo que pode ser sintetizado nas seguintes etapas [Simons e Senturk(1977)]: estimar um valor razoável de  $R'_b$  ; aplicar a equação 2.13 de distribuição de velocidade citada no item anterior e a Figura 2.4, para determinar a velocidade de fluxo  $U$  ; calcular o parâmetro de transporte  $\psi'$  e através do gráfico da Figura 2.5 retirar o valor da relação  $U/U_*''$  ; calcular o valor de  $U_*''$  e, em seguida, o valor de  $R_b''$  ; calcular  $R'_b = R_b - R_b''$  . Se este valor concorda com o valor do raio hidráulico da superfície do leito, estimado inicialmente, o problema está resolvido.

## 2.7 Efeitos da Turbulência

A turbulência é responsável pelo transporte sólido em suspensão. Quando o efeito da turbulência supera a velocidade de queda da partícula no fluxo, esta partícula passa a ser transportada em suspensão. Isto acontece mesmo num escoamento permanente, porque em escoamento turbulento a velocidade em cada ponto está sujeita à variação tanto de intensidade como de direção, ao contrário do fluxo laminar onde a velocidade seria fixa num dado ponto. No caso de fluxo turbulento, somente os valores médios temporais das flutuações podem ser determinados analiticamente.

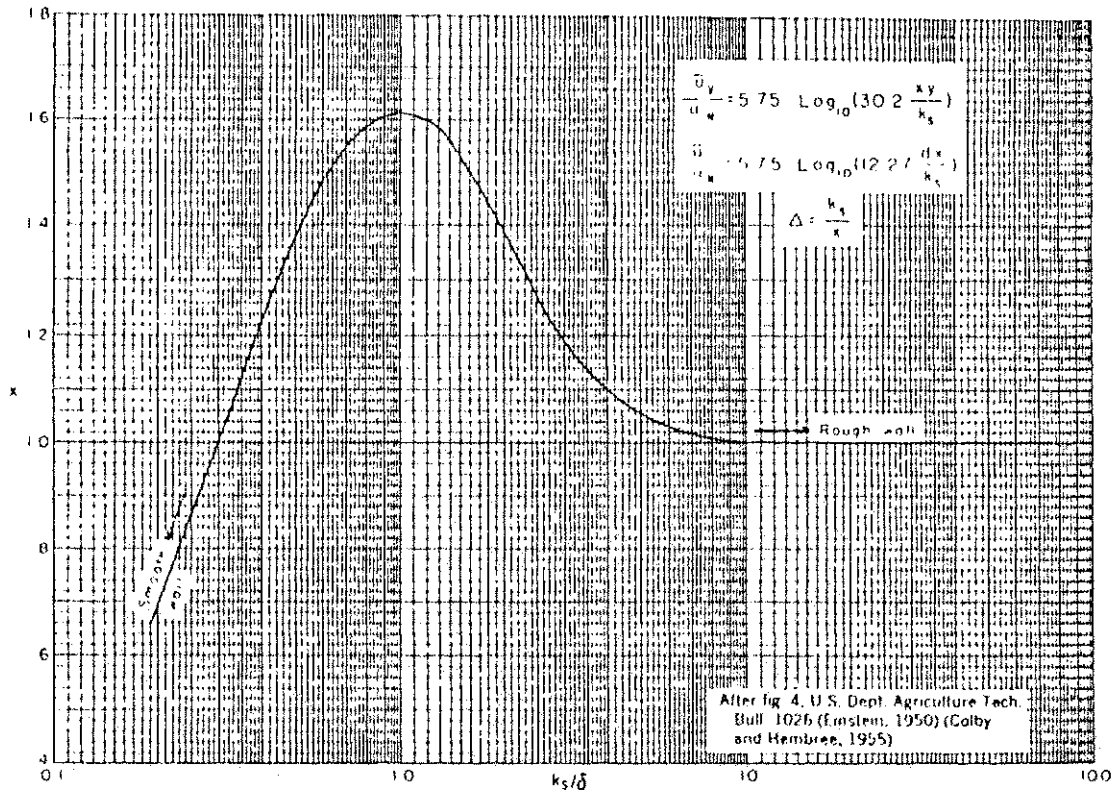


Fig.2.4 Fator x da equação de distribuição de velocidade.

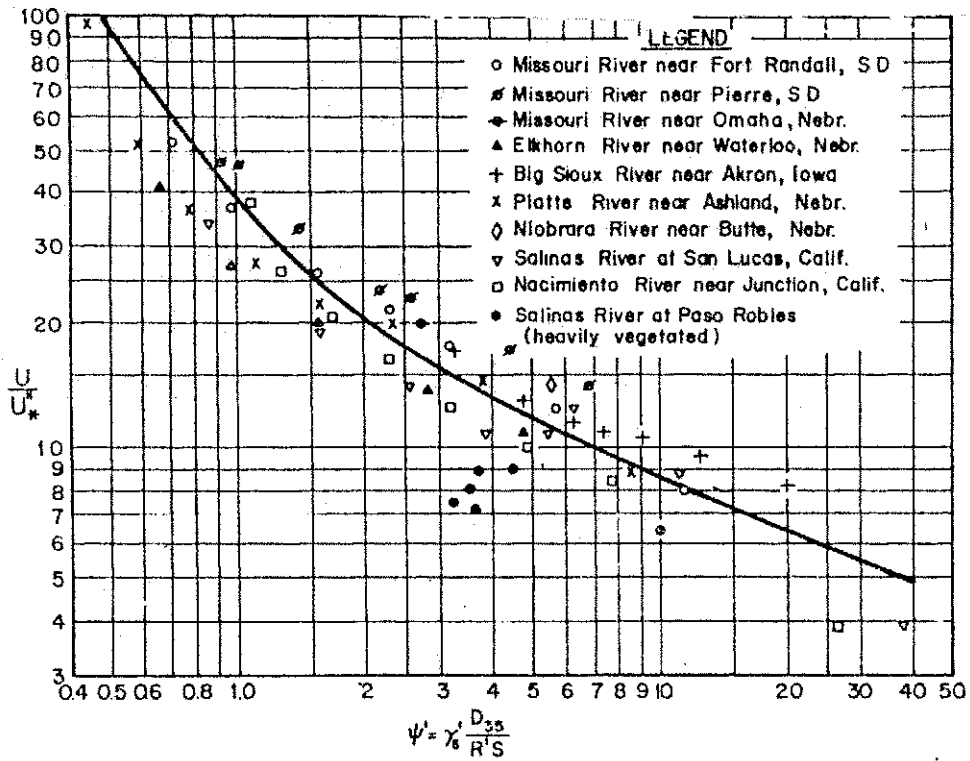


Fig.2.5 Perdas devido à resistência das irregularidades do leito como uma função do transporte (Einstein e Barbarossa, 1952).

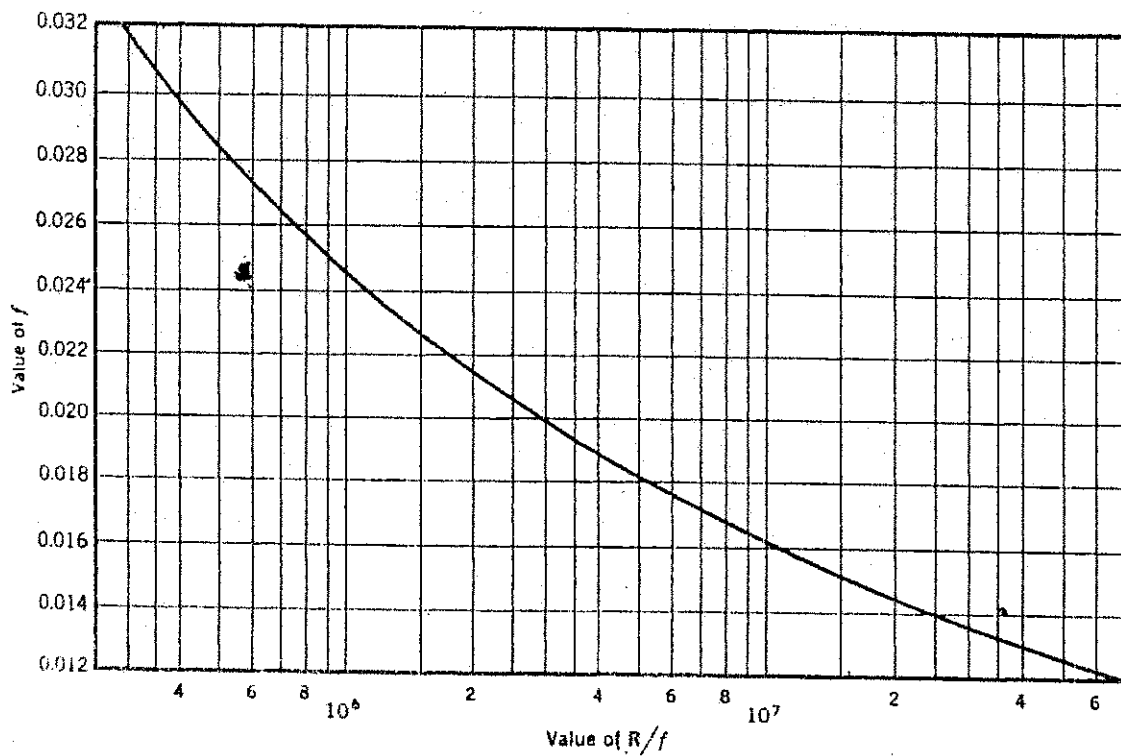


Fig.2.8 Coeficiente de atrito como função de  $R/f$  para canais com fronteiras lisas. Desenvolvido por VANONI e BROOKS em 1957.



## CAPÍTULO 3. EQUAÇÕES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

### 3.1 Aspectos Gerais

A necessidade de se estimar a descarga de sedimentos para servir de base em diversos projetos hídricos, motivou muitos pesquisadores a estudarem o assunto e desenvolverem desde simples correlações, apresentadas sob a forma de gráficos, até teorias complexas. Neste processo, têm sido desenvolvida uma grande variedade de equações ou relações de transporte sólido. As diversas equações existentes que tratam da quantidade de sedimentos transportada pelo fluxo, fornecem resultados bastante diferenciados para uma mesma situação considerada. [Raudkivi (1978)].

Levando-se em conta que o movimento de sedimentos em canais exerce um papel determinante na estabilidade e no regime dos mesmos, e que, em virtude dos diferentes resultados que cada equação fornece, ainda não existe uma maneira satisfatória para a previsão da carga de sedimentos em canais naturais, alguns pesquisadores [Wilcock e Southard (1989)] acham que devem ser desenvolvidas fórmulas regionais, baseadas em dados de campo, o que diminuiria as incertezas que influenciam todo o processo até que se chegue ao desenvolvimento das equações de carga de sedimento mais precisas.

Embora as equações existentes forneçam resultados não totalmente confiáveis, elas se constituem numa forma de avaliação

que pode servir, pelo menos, para uma estimativa preliminar da quantidade de transporte nos estudos de um determinado projeto. A este procedimento deve-se somar a experiência prática no desenvolvimento de projetos e o conhecimento teórico dos processos envolvidos.

Selecionar a equação que, para um determinado tipo de forma do leito, forneça a carga de transporte total, implica que os valores calculados se aproximem daqueles que podem ser medidos nos experimentos de laboratório ou no campo. Porém não há indicações a priori para tal escolha. Assim, a seleção deve ser baseada nas verificações no laboratório, o que é um dos objetivos deste trabalho.

A complexidade dos fatores envolventes no escoamento com fronteiras não rígidas, bem como a caracterização do interrelacionamento de tais fatores, são um grande obstáculo aos pesquisadores e que acabam restringindo a aplicação de cada fórmula às situações semelhantes àquelas para as quais cada relação foi desenvolvida. Ou seja, as fórmulas não têm uma aplicação irrestrita.

Com a intensificação das pesquisas neste campo, surgiram análises teóricas paralelamente às soluções técnicas e práticas aplicadas, permitindo a distinção de três métodos gerais de abordagem do problema [Curi(1986)], apresentados a seguir:

a) Métodos teóricos: fundamentados no processo físico geral do transporte de sedimentos ou na mecânica do problema específico.

b) Métodos empíricos: baseados na experiência adquirida pela observação do comportamento dos canais aluviais,

principalmente suas evoluções morfológicas.

c) Métodos semi-empíricos: baseados, em parte, nos mecanismos de transporte e, em parte, na experiência prática, comparando resultados teóricos com medidas de escoamento no campo ou em condições de laboratório.

Tais métodos direcionaram a seleção das equações que foram utilizadas neste trabalho.

### 3.2 As Equações de Transporte Seleccionadas

Para realizar este trabalho dentro de um prazo razoável, foi necessário limitar o número de equações a serem analisadas e alguns critérios aleatórios foram adotados nesta escolha.

Procurou-se, de forma geral, as equações dimensionalmente homogêneas que pudessem ser utilizadas em qualquer sistema consistente de unidades, que fossem desenvolvidas por variados caminhos que pudessem representar as metodologias citadas no item anterior e que pudessem, em função dos limites de validade do método, enquadrar a pesquisa ora realizada. As equações escolhidas foram:

E.MEYER-PETER e R.MULLER (1948), por ser citada na bibliografia como uma das mais antigas e mais empregadas na Europa. Possui uma alta conotação teórica pois a maior parte do seu desenvolvimento foi baseado num conceito estabelecido por DU BOUYS, apesar de utilizar vários ensaios para estabelecer os parâmetros necessários à sua metodologia.

F.ENGELUND e E.HANSEN (1966), por estar baseada no princípio de energia e pelo caráter empírico do seu desenvolvimento apoiado em dados de quatro séries de experimentos com sedimentos de tamanho relativamente uniforme entre 0,19mm e 0,93mm.

L.G.V.RIJN (1984), por ser uma das metodologias mais recentes e possuir um caráter semi-empírico, pois foi desenvolvida a partir da análise de dados de transporte de sedimentos originários de várias fontes e verificados estatisticamente. O método, apesar de estar baseado em conceitos de tensão de cisalhamento, enfatiza a concentração de referência e conseqüentemente a carga em suspensão.

C.T.YANG (1973), por ter sido apresentada no trabalho de WHITE, MILLI e GRABE [Anandale(1984)] como a teoria que apresentava a mais coerente avaliação da quantidade de sedimentos transportada pelo fluxo. O método segue o modelo conceitual de energia porém, foi desenvolvido empiricamente e o seu grau de confiabilidade foi estabelecido estatisticamente.

U.B.ZANKE (1987), por ser uma das mais recentes. O método, baseado no conceito principal de tensão de cisalhamento, pode ser considerado semi-empírico.

L.PERNECKER e J.VOLLMERS (1965), por ter sido desenvolvida empiricamente e ajustada estatisticamente.

BAGNOLD (1966), por ter apresentado bons resultados na avaliação da quantidade de sedimentos transportada em outros trabalhos [Curi(1986)]. Embora baseada em conceitos de balanço de energia pode ser classificada como semi-empírica. Segundo SIMONS

e SENTURK(1977) o método é indicado para fluxos com altas taxas de transporte.

EINSTEIN (1950), por ser considerada por diversos pesquisadores como a que possui um desenvolvimento teórico mais completo e também ser muito utilizada na prática. Pode ser considerado um método teórico apesar de muitos coeficientes utilizados no seu desenvolvimento terem sido oriundos de experiências em laboratório.

LAURSEN (1958), por ter sido considerada no trabalho de R.C.CURI(1986) como a que forneceu melhores resultados na avaliação da quantidade de sedimentos transportada, com leito plano. O método, baseado conceitualmente na tensão de cisalhamento, pode ser considerado semi-empírico e foi ajustado utilizando dados de diversos pesquisadores.

### 3.3 Análise das Equações de Transporte.

3.3.1 Equação de E.MEYER-PETER e R.MULLER (1948)  
[Vanoni (1975), Simons e Senturk (1977), Raudkivi (1976)]

E.Meyer-Peter e R.Muller utilizaram dados experimentais com partículas de areia de tamanho uniforme, partículas de areia de tamanho misturado, cascalhos naturais e carvão mineral para desenvolver uma equação de avaliação do transporte de sedimentos. Procuraram explicar a mecânica do transporte postulando que o gradiente de energia é uma característica da interação entre o movimento sólido e líquido de um fluxo carregado de sedimentos. Parte da energia é gasta no

transporte sólido e o restante no movimento do líquido.

Consideraram também que parâmetros similares governam o transporte de sedimento e o início do movimento das partículas de sedimento. Apresentaram então uma fórmula para definir a condição do início do movimento e outra, apresentada a seguir e cujo fluxograma encontra-se no anexo 3, para exprimir o transporte de sedimentos, especificamente a carga do leito  $q_b$ .

$$\left(\frac{K_r}{K_r'}\right) \cdot \gamma \cdot R_b \cdot S = 0,047 (\gamma_s - \gamma) \cdot D + 0,25 \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right) \cdot q_b^{2/3} \quad \text{eq 3.1}$$

A partir de suas premissas estabeleceram dois parâmetros  $K_r$  e  $K_r'$ , representando respectivamente o coeficiente de rugosidade total, relativo à energia total dispendida  $S$  e o coeficiente de rugosidade relativo à parte da energia perdida devido a resistência dos grãos  $S'$ . A relação entre  $K_r$  e  $K_r'$  foi definida da seguinte forma:

$$\frac{K_r}{K_r'} = \sqrt{\frac{f_b'}{8}} \cdot \frac{U}{\sqrt{g \cdot R_b \cdot S}} \quad \text{eq 3.2}$$

O coeficiente de atrito  $f_b'$ , é obtido do gráfico de fricção para tubos, definido por Nikuradse, no qual o fator de atrito  $f$ , é expresso como uma função do Número de Reynolds,  $U \cdot d / \nu$ , e da rugosidade relativa,  $d / K_s$ , em que,  $d$  é o diâmetro do tubo;  $\nu$  é a viscosidade cinemática da água; e  $K_s$  é o tamanho do grão de areia que forma a rugosidade da parede do tubo. Para se obter  $f_b'$  (fator de atrito para o leito do canal)

a partir do gráfico específico para tubos, é suficiente trocar  $d$  por  $4.R_b$  e  $K_s$  por  $D_{90}$ , que é o tamanho do grão do leito de sedimentos, correspondente a 90% das partículas existentes. Quando o Número de Reynolds da camada de sedimentos iguala ou excede ao valor 100, a camada será considerada hidráulicamente rugosa e  $Kr'$  será dado por

$$Kr' = \frac{26}{D_{90}^{1/6}} \quad \text{eq 3.3}$$

sendo  $D_{90}$  em metros.

O parâmetro  $Kr/Kr'$  varia de 0,5 para fluxos com dunas e ripples à 1,0 para leito plano.

A equação apresentada é dimensionalmente homogênea, e, assim, qualquer sistema consistente de unidades pode ser utilizado, no entanto a unidade deverá ser métrica, quando a camada de sedimentos for considerada hidráulicamente rugosa.

A fórmula de E.Meyer-Peter e R.Muller é baseada nos dados de experimentos em canais variando de 15cm a 200cm de largura, com declividades variando de 0,0004 a 0,02 e profundidade de água variando de 1cm a 120cm. Os tipos de sedimentos utilizados nos experimentos variaram desde o carvão, com densidade 1,25, até barita, de densidade 5,25. O tamanho médio e o diâmetro efetivo variaram de 0,4mm a 30mm.

A maioria dos dados utilizados para o desenvolvimento do método foi obtida de fluxos com pouca ou nenhuma carga suspensa, o que sugere que a metodologia pode não

ser válida para fluxos com apreciável carga em suspensão.

### 3.3.2 Equação de F. ENGELUND e E. HANSEN (1967) [Vanoni (1975), Raudkivi (1976)].

Utilizando a análise dimensional e baseados em conceitos de energia, F. Engelund e E.Hansen (1967) relacionaram potência fornecida por unidade de área na fronteira do canal, com o transporte de sedimentos e propuseram a relação a seguir e que está detalhada no fluxograma do anexo 4.

$$q_T = \frac{U^2}{20.g.d.S} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} . g . D^3} \cdot \left( \frac{\rho . g . d . S}{(\gamma_s - \gamma) . D} \right)^{5/2} \quad \text{eq 3.4}$$

F.Engelund e E.Hansen definiram um parâmetro de mobilidade das partículas ( $\theta$ ) relacionando o raio hidráulico do leito e o gradiente de energia, com o diâmetro representativo da partícula e a massa específica aparente do sedimento, e, por um processo empírico corrigiram o parâmetro de mobilidade, chamado após a correção de  $\theta'$ , e utilizaram-no para obter uma velocidade de cisalhamento relativa aos grãos, que serviu para determinar uma velocidade de fluxo corrigida utilizada no relacionamento final para a determinação direta da carga total.

As limitações explícitas do método, estão caracterizadas pelo fato dos pesquisadores terem apresentado uma forma gráfica representativa do método [Vanoni (1975)] que não é recomendada para leitos com ripples e, também, pelas aplicações confiáveis do método serem citadas para o diâmetro representativo



do sedimento maior ou igual a 0,15mm e o desvio padrão do tamanho das partículas de sedimentos menor do que 2.

### 3.3.3 Equação de LEO C.VAN RIJN (1982) (RIJN (1984))

Em 1982, LEO C. VAN RIJN desenvolveu uma expressão para o transporte da carga do leito ( $q_b$ ) e outra para o transporte em suspensão ( $q_s$ ) utilizando dados de várias fontes e avaliando estatisticamente a adequação dos mesmos. Baseado no raciocínio de que o aspecto mais importante nos cálculos de transporte sólido total, nos casos onde há considerável transporte de sedimentos em suspensão, é o uso da concentração de referência, pois permite identificar o limite do leito móvel, ele definiu as equações a seguir cujo fluxograma está no anexo 5.

$$q_b = 0,053 \cdot \left( \frac{T_1}{D_*} \right)^{2.1} \cdot \sqrt{\rho' \cdot g} \cdot D_{50}^{1.5}$$

$$q_s = F. U. d. Ca$$

eq 3.5

$$q_T = q_b + q_s$$

Utilizando o coeficiente de Chézy relativo aos grãos de sedimento, a velocidade média do fluxo, a densidade relativa dos sedimentos submersos e um Número de Froude crítico, estimado a partir de um parâmetro relativo ao tamanho do sedimento, ele determinou uma velocidade de cisalhamento crítica

e também uma velocidade de cisalhamento relativa aos grãos de sedimento; destas duas velocidades ele definiu um parâmetro de transporte e em seguida a carga do leito. O parâmetro de transporte permitiu também o cálculo da concentração de referência .

A concentração de referência  $C_a$  , a máxima concentração volumétrica possível  $C_o$  e outros parâmetros de suspensão oriundos da relação entre a velocidade de queda da partícula e a velocidade de cisalhamento na superfície do leito, permitiram estimar a carga em suspensão. Esta última relação variando entre 0,1 e 1 define o campo de aplicação do método.

**3.3.4 Equação de YANG (1973) [Yang (1991), Annandale (1986)].**

Yang concluiu que a taxa de dissipação de energia potencial por unidade de peso da água, ou o potencial de fluxo unitário, deveria determinar a composição dos sistemas de rios e seus perfis longitudinais. Os sistemas de rios observados hoje são resultado do transporte de sedimentos. Então Yang achou que o potencial de fluxo unitário poderia ser capaz de explicar o processo do transporte de sedimentos. Esse potencial definido pela multiplicação da velocidade média do fluxo, pela declividade da linha de energia poderia ser relacionado à concentração de sedimentos a partir de uma teoria bem elaborada, baseada nos conceitos de mecânica dos fluidos e da turbulência. Baseado numa equação de dissipação de energia e na equação de Rouse [Chiew(1991)], Yang e Molinas(1982) mostraram que a distribuição da concentração de sedimentos em uma vertical é diretamente

relacionada à taxa de distribuição vertical de energia produzida devido à turbulência. Yang obteve sua equação empiricamente, através da manipulação de dados experimentais e incluiu, posteriormente, o critério do movimento incipiente das partículas. A equação de Yang, a seguir apresentada, foi confirmada teoricamente por Rouseboom, em 1974, e estabelece diretamente a carga total.

$$\log C = 5,435 - 0,286 \log (W.D_{50}/\nu) - 0,457 (U_{*b} / W) + \\ + [1,799 - 0,409 \log (W.D_{50}/\nu) - 0,314 \log (U_{*b} / W)]. \quad \text{eq 3.6}$$

$$. \log [U.S/W - U_{cr}.S/W]$$

$$q = C.0,001.d.U \quad \text{eq 3.7}$$

onde C é a concentração ou massa de sedimentos por unidade de volume de água.

O anexo B mostra o fluxograma do método e define os demais parâmetros da fórmula além de, claramente, ressaltar a importância da velocidade de queda da partícula na formulação para a determinação da concentração de sedimentos.

Os sedimentos e as condições de fluxo que permitiram o desenvolvimento da equação podem ser caracterizados da seguinte forma: diâmetro representativo do sedimento entre 0,137mm e 1,71mm, profundidade média entre 0,01m e 15,2m, gradiente de energia entre 0,0043% e 2,79%, velocidade média entre 0,229m/s e 1,966m/s, temperatura entre 0 C e 33 C e concentração entre 10mg/l e 585000mg/l. Assim, alguns destes aspectos podem definir o limite de aplicação do método.

3.3.5 Equação de U. ZANKE (1982) [DVWK bulletin 17 (1990)].

O modelo de U. Zanke enfatiza a tensão de cisalhamento provocada pelas partículas em suspensão e pela carga do leito e define separadamente a carga do leito e a carga em suspensão. Para estas definições, como mostra a equação a seguir apresentada, fica bastante claro a grande influência da velocidade de queda e do tamanho dos grãos que representa os sedimentos. O anexo 7 mostra o fluxograma do método, que permite verificar todo o desenvolvimento seguido pelo pesquisador.

$$q_b = \frac{6,36 \cdot 10^{-4}}{p} \cdot \left( \frac{U_*^2 - U_{*cr}^2}{W^2} \right)^2 \cdot D_*^4 \cdot v \quad \text{eq 3.8}$$

$$q_s = \frac{6,36 \cdot 10^{-5}}{p} \cdot \frac{d}{0,01} \cdot \frac{(U_*^2 - U_{*cr}^2) (U_*^2 - U_o^2)}{W^4} \cdot D_*^4 \cdot v \left( \frac{v}{v_o - v} \right)^{1/4} \quad \text{eq 3.9}$$

$$q_T = q_b + q_s \quad \text{eq 3.10}$$

A carga do leito foi definida a partir de uma relação entre a velocidade de cisalhamento no leito, a velocidade de cisalhamento crítica e a velocidade de queda da partícula, levando em consideração a porosidade do sedimento. Estes mesmos parâmetros e mais a velocidade de cisalhamento crítica devido as partículas em suspensão permitiram também a definição da carga em suspensão.





realizada pelo transporte da carga do leito.

A descarga total de sedimentos é a soma das descargas da carga do leito ( $q_b$ ) e da carga suspensa ( $q_s$ ).

$$q_T = \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \cdot \tau_o \cdot U \cdot \left( \frac{e_b}{\tan \alpha} + 0,01 \cdot \frac{U}{W} \right) \quad \text{eq 3.15}$$

Os resultados obtidos com a equação de Bagnold (fluxograma do anexo 9), foram comparados com dados de Gilbert (1914), e a melhor correlação foi obtida para altas taxas de transporte. Isto provavelmente significa que a equação de Bagnold deva ser aplicada para fluxos turbulentos com alta taxa de transporte de sedimentos.

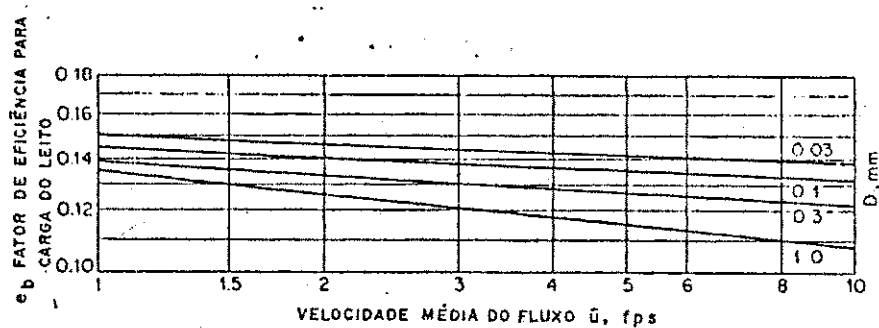


Fig.3.1 Fator de eficiência da carga do leito,  $e_b$  [Bagnold (1966)]

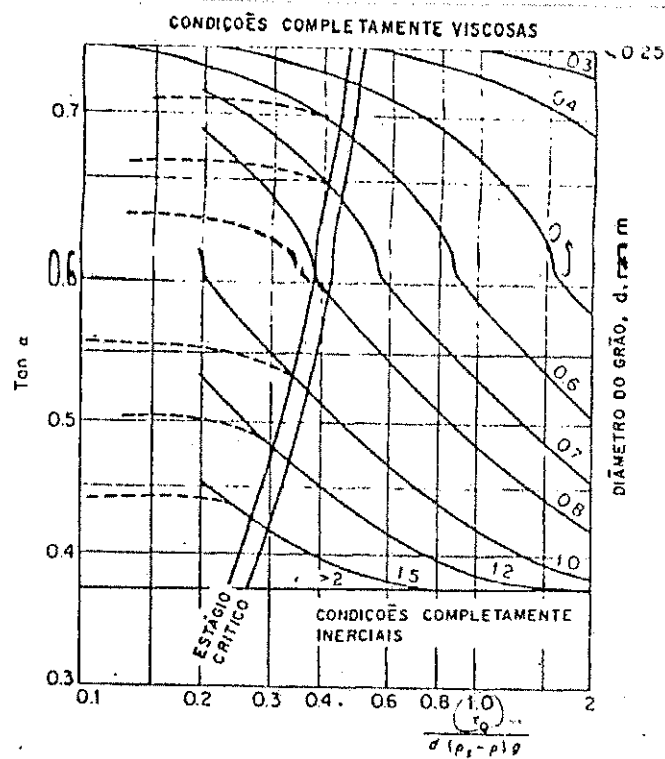


Fig.3.2 O coeficiente de atrito sólido [por Bagnold (1966)]

### 3.3.8 Equação de EINSTEIN (1950) [Vanoni (1975) et al.]

Einstein partiu de conceitos utilizados por pesquisadores como Du Buoy e Schoklisch, porém considerou duas idéias básicas diferentes do que até então existia para a determinação da carga do leito:

a) evitou o critério crítico, porque a condição crítica a partir da qual tem início o movimento do sedimento é difícil de ser definida.

b) afirmou que o transporte da carga do leito está relacionado às variações do fluxo turbulento, ao invés do valor médio das forças do fluxo exercidas sobre as partículas de sedimento.

Conseqüentemente, definiu uma teoria, afirmando que o início e o término do movimento do sedimento estão ligados



ao conceito de probabilidade de erosão de uma partícula. Este conceito relaciona as forças de levantamento hidrodinâmicas com o peso submerso da partícula.

Baseado em experiências, Einstein achou que:

a) existe uma troca permanente e constante entre o material do leito e a carga do leito.

b) as partículas de sedimento são transportadas ao longo do leito em uma série de passos. O comprimento médio do passo é proporcional ao tamanho da partícula. Uma determinada partícula não permanece em movimento continuamente mas é depositada no leito após alguns passos.

c) a taxa de deposição por unidade de área depende da taxa de transporte que passa numa dada seção tanto quanto da probabilidade de que a força hidromecânica seja tal que supere o peso submerso. Para que o leito seja considerado estável, a taxa de deposição deve ser igual à taxa de erosão.

Einstein utilizando seus conceitos definiu e relacionou dois parâmetros: o parâmetro de intensidade de cisalhamento  $\psi$ , e o parâmetro de carga do leito,  $\phi$ .

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{D}{R_b' \cdot S}$$

$$\phi = \frac{q_s}{\gamma_s} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{g \cdot \gamma_s' \cdot D^3}} \quad \text{eq 3.16}$$

$$q_b = \frac{\phi \cdot \gamma_s}{\sqrt{\frac{\gamma}{g \cdot \gamma_s' \cdot D^3}}} \quad \text{eq 3.17}$$

onde o significado de cada elemento está definido no fluxograma da fórmula, no anexo 10.

A Figura 3.3 mostra graficamente a relação experimental entre  $\Phi$  e  $\Psi$ . A partir das características do sedimento e das condições de fluxo, o valor de  $\Psi$  pode ser calculado e, através do gráfico, se obter  $\Phi$ . Com o valor de  $\Phi$  e utilizando a equação 3.17, é calculado o transporte da carga do leito.

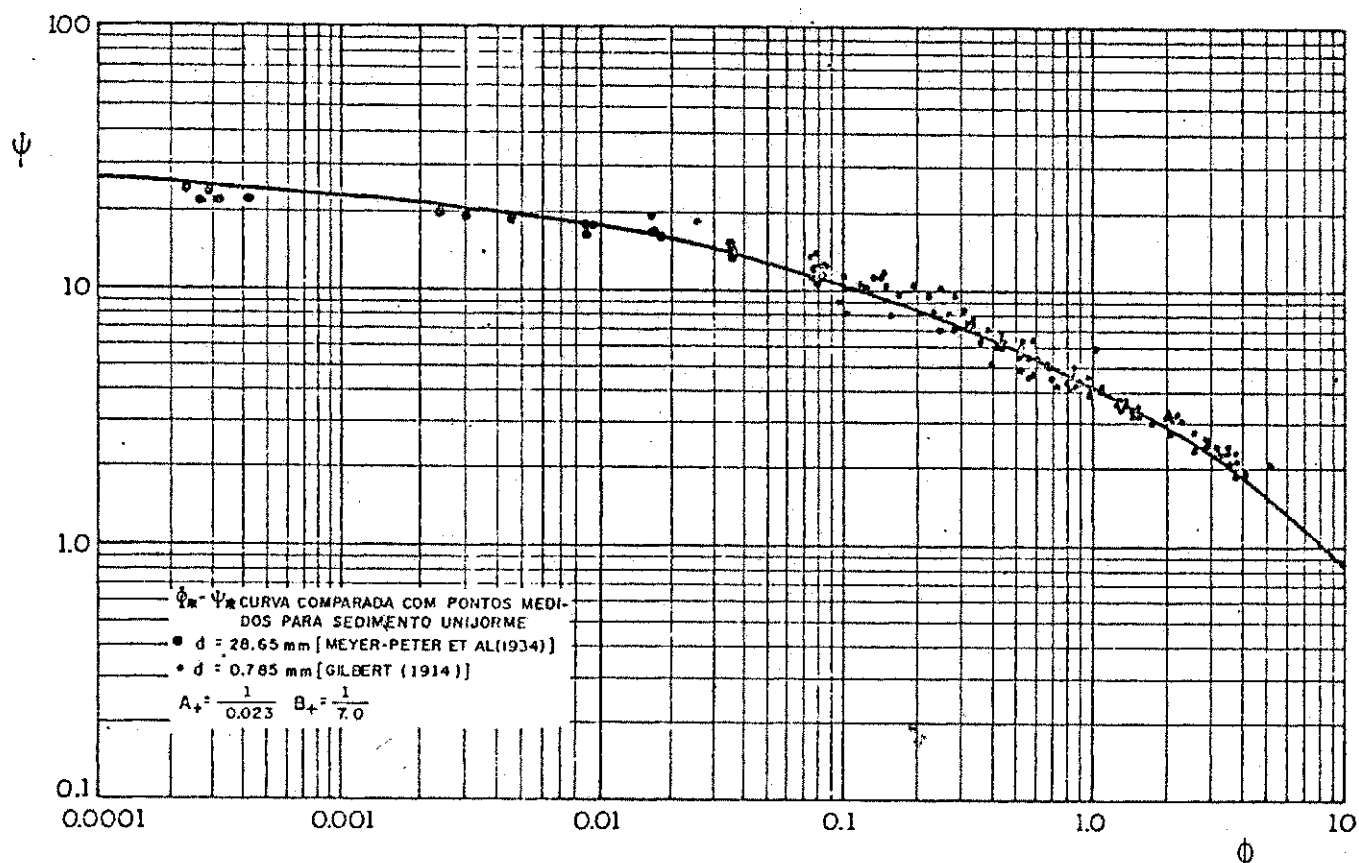


Fig.3.3 Relação de Einstein ( $\Phi$  versus  $\Psi$ ) [por Einstein (1950)]

Para a determinação da carga de transporte total era necessário a determinação da carga em suspensão. Einstein propôs um dos métodos mais largamente utilizados para a determinação da carga em suspensão, considerando a variação da concentração de sedimentos sobre uma profundidade a partir do fundo, uma espessura da camada limite equivalente a duas vezes o diâmetro da partícula representativa do sedimento, velocidade de cisalhamento devido à rugosidade do grão, além de considerar que no interior da camada limite é impossível encontrar material em suspensão. Devido à flutuação da velocidade turbulenta, há uma troca contínua de partículas de sedimento atravessando uma espessura arbitrária do fluxo e se considera que a concentração média ao longo do leito é constante. Einstein estabeleceu que a carga em suspensão é definida pela seguinte equação:

$$q_s = q_b \cdot (P_E \cdot I_1 + I_2) \quad \text{eq 3.18}$$

onde  $P_E$  é um parâmetro de transporte e  $I_1$  e  $I_2$  são integrais assim definidas:

$$I_1 = \int f_1(E, Y, Z) dy \quad \text{eq 3.19}$$

$$I_2 = \int f_2(E, Y, Z) dy \quad \text{eq 3.20}$$

onde  $E = a/d$ , sendo  $a = 2D$  (duas vezes o diâmetro representativo do sedimento) e  $d$  a profundidade do fluxo, e  $Y = y/d$ , sendo  $y$  uma profundidade arbitrária a partir da espessura  $a$ .

As integrais  $I_1$  e  $I_2$  podem ser obtidas em função de  $E$  para valores de  $Z$  a partir das Figuras 3.4 e 3.5.

$$Z = Z_1 \cdot \beta \quad \text{eq 3.21}$$

$$Z_1 = W / (0,4 \cdot U_*') \quad \text{eq 3.22}$$

$$\beta = \log 10,6 \quad \text{eq 3.23}$$

onde  $U_*'$  é a velocidade de cisalhamento relativa à rugosidade do grão e,  $W$  é a velocidade de queda na água de uma partícula de diâmetro médio  $D$ .

O parâmetro de transporte  $P_E$  é definido como

$$P_E = 2,303 \cdot \log (30,2 \cdot d/\Delta) \quad \text{eq 3.24}$$

onde  $d$  é a profundidade do fluxo e  $\Delta$  é a rugosidade aparente da superfície do leito que é dado por:

$$\Delta = D_{65}/X \quad \text{eq 3.25}$$

com  $X = f(D_{65}/\delta)$  (Fig 2.4) em que  $\delta$  representa a espessura da subcamada limite laminar.

$$\delta = 11,6 \cdot \nu/U_*' \quad \text{.....eq 3.26}$$

A equação de Einstein (fluxograma do anexo 10), foi proposta para uso em fluxos com alta taxa de transporte, leitos hidráulicamente rugosos e para fluxos cuja carga do leito seja uma significativa parte da carga total [Vanoni (1975)].

$$q_T = q_b (1 + P_E \cdot I_1 + I_2) \quad \text{eq 3.27}$$

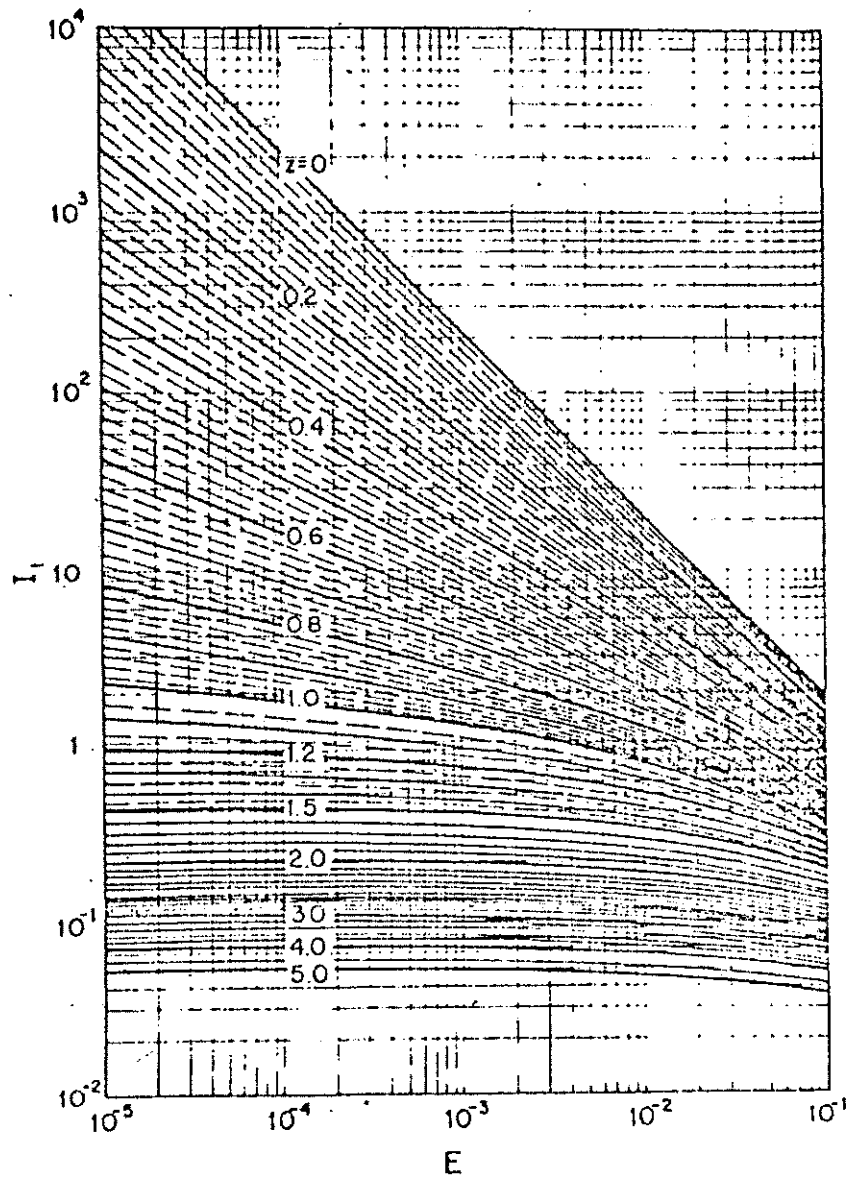


Fig.3.4  $I_1$  como função de E para valores de Z. [Einstein (1950)]

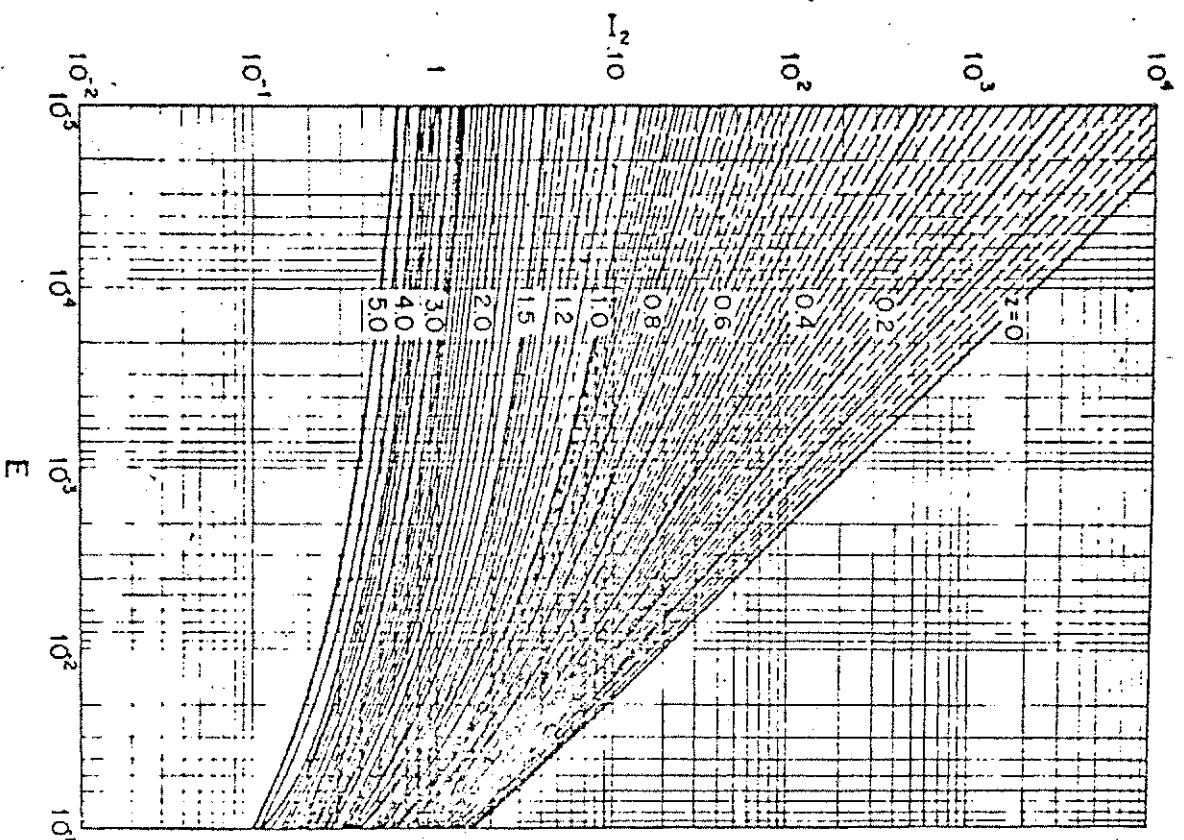


Fig. 3.5  $I_2$  como função de  $E$  para valores de  $Z$  (Einstein (1950)).

3.3.9 Equação de LAURSEN (1958) [Simons e Senturk (1977), Raudkivi (1976), Vanoni (1975)]

Laursen desenvolveu a relação funcional entre a condição de fluxo e a descarga de sedimentos resultante. Ele preferiu não fazer distinção entre a carga do leito e a carga em suspensão, com a justificativa de que as forças hidrodinâmicas envolvidas tanto na ascensão das partículas como no arrasto são as mesmas, sendo desnecessário definir uma linha de separação. Mesmo assim, os parâmetros  $(\tau_o/\tau_c - 1)$  e  $U_* / W$  são importantes para a determinação da carga do leito e da carga suspensa respectivamente, pois o movimento dos sedimentos por arrasto inicia-se quando  $\tau_o$  excede o valor de  $\tau_c$  e a partir deste ponto a carga do leito seria diretamente proporcional a  $(\tau_o - \tau_c)$ . O parâmetro  $U_* / W$ , que expressa a ação da turbulência da mistura, foi utilizado para a determinação da carga suspensa porque a partir dele foi estabelecida uma função  $f(U_* / W)$  baseada em dados obtidos de canais e ajustada em função de dados coletados (Figura 3.6) por vários pesquisadores. A fórmula de Laursen (fluxograma do anexo 11) a seguir apresentada, é indicada para sedimentos naturais com peso específico de 2,65.

$$C = 0,01 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{7/6} \cdot \left(\frac{\tau_o}{\tau_c} - 1\right) \cdot f\left(\frac{U_*}{W}\right)$$
$$q_T = Q \cdot C \quad \text{eq 3.28}$$

Laursen também comparou os valores da descarga de

sedimentos calculada com os valores medidos de três rios: O Niobrara, o Mountain Creek e o West Goose Creek. Estes fluxos tinham profundidade entre 0,12ft e 1,3ft e tamanho de sedimento médio 0,277mm, 0,287mm e 0,86mm do material de cada rio. A concordância entre os valores observados e medidos foi boa para o Niobrara, mas apenas regular para os outros dois rios.

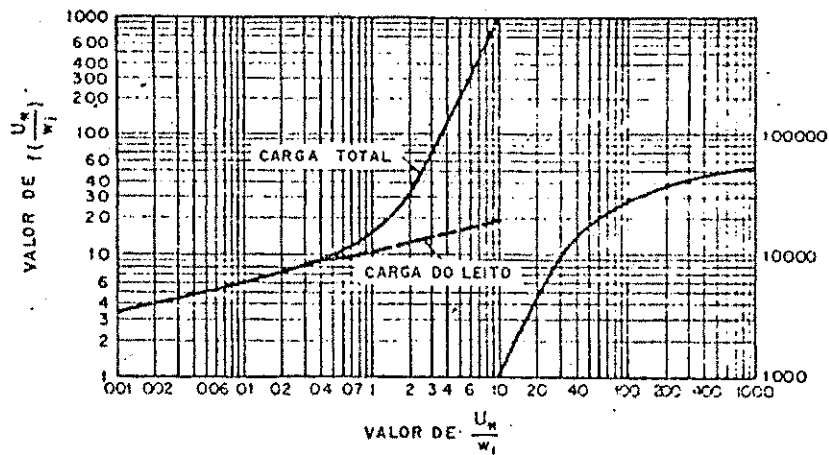


Fig.3.6 Valores da função  $f(U_*/W)$  para a aplicação do método de Laursen [por Laursen (1958)].



### 3.4 Considerações Finais.

As equações de transporte de sedimentos envolvem uma série de variáveis que podem ser classificadas como independentes e dependentes. As variáveis dependentes podem ser determinadas como função das variáveis independentes. Em alguns casos as funções são conhecidas e as variáveis dependentes podem ser facilmente determinadas. Para o caso de fluxo em canais de laboratório, as variáveis independentes relacionadas às propriedades do fluido são a viscosidade cinemática e a massa específica; relacionadas aos sedimentos são a massa específica, o diâmetro médio, o desvio padrão do tamanho das partículas, a velocidade de queda da partícula e a aceleração da gravidade; e relacionadas ao sistema tem-se a vazão, a largura do canal e a profundidade de fluxo.

As variáveis dependentes são a descarga de sedimentos, a velocidade média do fluxo, o raio hidráulico da seção crítica, o gradiente de energia e o coeficiente de atrito de Darcy Weisbach.

Então, a descarga de sedimentos pode ser expressa pela seguinte relação funcional abrangendo as variáveis independentes:

$$q = f( Q, d, b, v, \rho, \rho_s, D_s, \sigma_g, W, g )$$

Pela existência de diversas interações entre um grande número de variáveis, as variáveis básicas precisam ser medidas de forma mais precisa possível, para dar confiabilidade ao cálculo da quantidade de sedimentos transportada através das equações. A

possibilidade de se obter tais dados utilizando um sistema de alta precisão motivou a realização de novos experimentos, que podem proporcionar uma avaliação mais precisa das relações de transporte sólido.

## CAPÍTULO 4. INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS

### 4.1 Aspectos Gerais

O objetivo da pesquisa foi definido em função da possibilidade de se obter dados de transporte de sedimentos, utilizando um sistema de recirculação de água e sedimentos que fornecesse resultados experimentais, com altos níveis de precisão e que permitisse obter condições específicas de equilíbrio com diversas formas do leito e com o fluxo quase uniforme no trecho principal do canal.

O sistema utilizado constituía-se de um canal de recirculação, de fabricação japonesa, disponível no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, Campus II, cuja vantagem principal era dispor de um sistema de controle quase totalmente computadorizado, capaz de controlar automaticamente uma vazão pre-estabelecida e de se obter, diretamente, os parâmetros importantes como profundidade do fluxo, velocidade de fluxo e o perfil do leito de sedimentos, necessários ao estudo do transporte de sedimentos.

Este sistema de controle permitiu a realização dos ensaios de maneira mais eficiente, além da obtenção de dados bastante precisos em diversas condições do fluxo.

## 4.2 Componentes do Sistema

O canal de aço, com 16m de comprimento, 0,50m de largura e 0,50m de profundidade, tem paredes laterais de vidro, para facilitar a visualização do fluxo e a verificação da forma do leito. Estão acoplados ao canal duas bombas, uma de recirculação de sedimento e outra de água, um reservatório de água de 16m<sup>3</sup> de capacidade e um coletor de sedimentos, posicionado à jusante do canal. As Fotos 4.1 e 4.2 mostram uma visão geral do sistema.



Foto 4.1 Vista da parte jusante do canal.

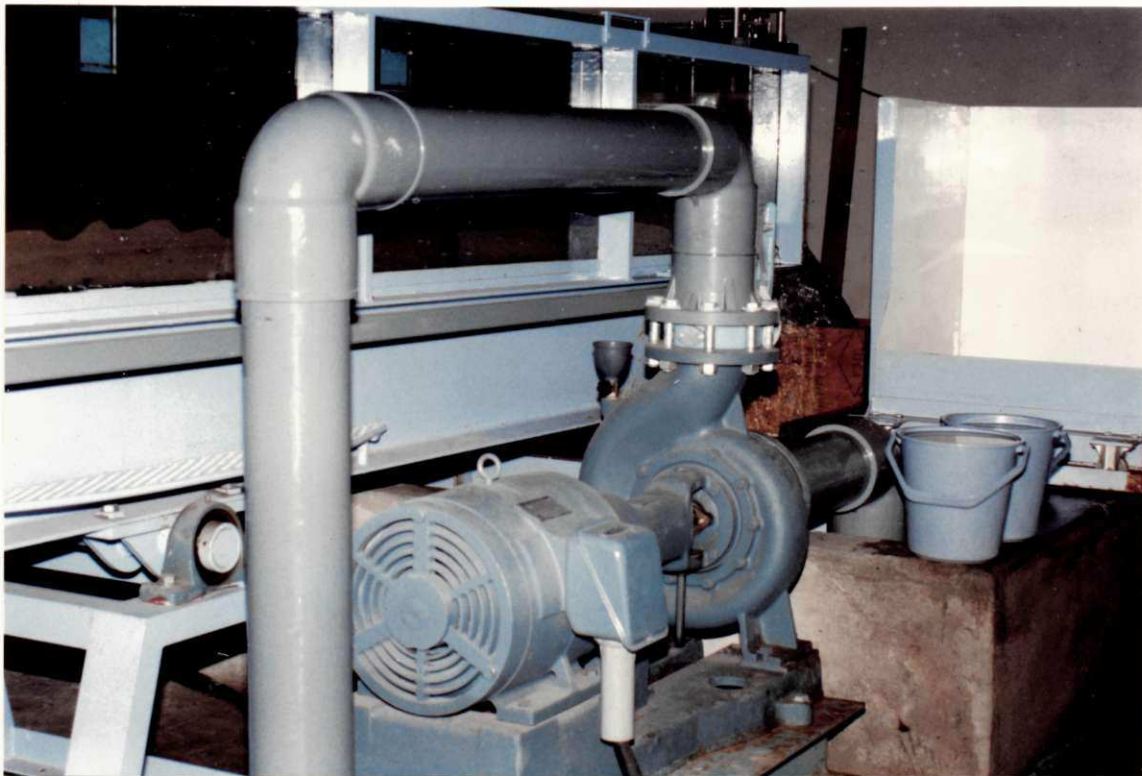


Foto 4.2 Vista da bomba de recirculação de água e do coletor de sedimentos.

No fundo (leito) do canal estão instalados dois registradores de pressão, distanciados 10m entre si, que permitem a medida da declividade da superfície. Um dispositivo eletromecânico permite o ajuste da declividade do fundo do canal para os níveis desejados.

Sobre a estrutura do canal, como mostra a Foto 4.3, está montado um par de trilhos metálicos por onde circula um "Trolley" ao longo de todo o corpo do canal. Sobre o "Trolley" estão montados um registrador da velocidade do fluxo da água e um perfilador do fundo do canal que utiliza o princípio da reflexão



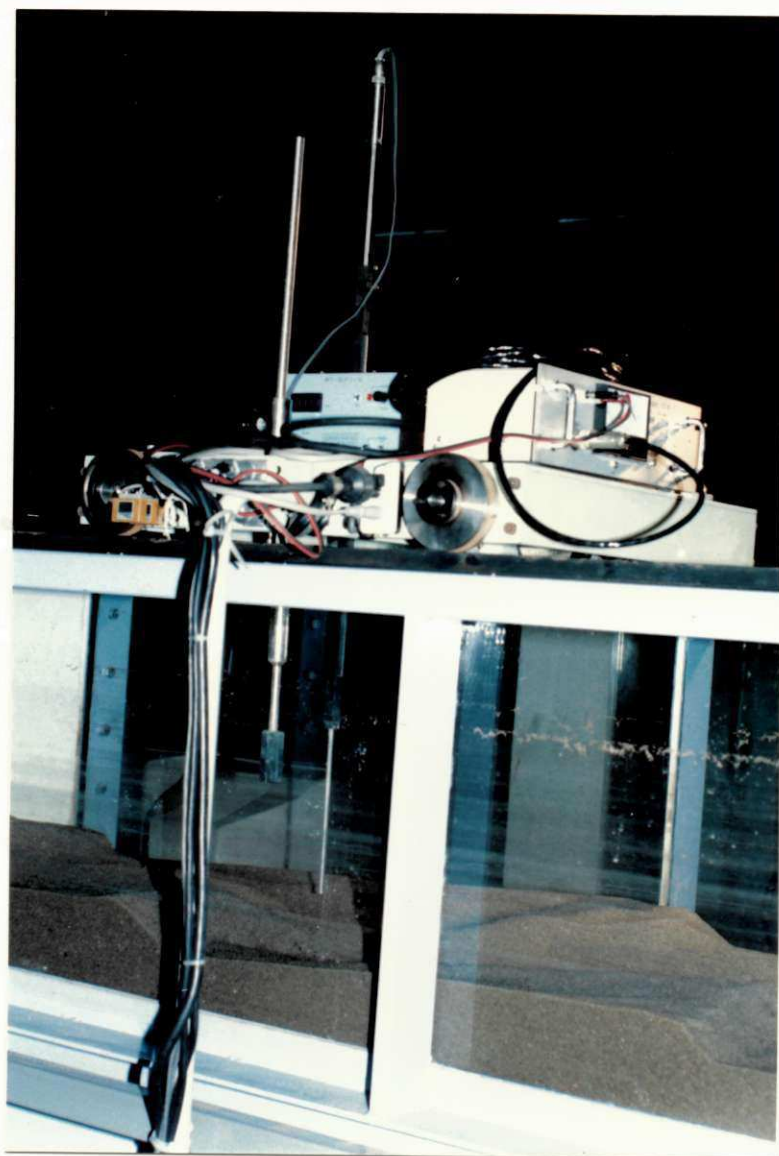


Foto 4.3 Vista dos trilhos sobre o canal e do "Trolley" que conduz os aparelhos de medição.

de uma luz infravermelha, para registrar o perfil do leito de areia, tendo evidentemente, uma referência básica que é o próprio fundo de aço do canal.

Instalado na tubulação de adução de água ao canal encontra-se um medidor eletromagnético de vazão, que permite o registro da vazão real e o ajuste pelo computador a uma vazão preestabelecida; no final do corpo do canal está instalada uma comporta de aço inoxidável, de abertura horizontal e acionamento manual, que permite o controle da profundidade do fluxo; o sistema dispõe ainda das tubulações de recirculação da água e a de sedimentos, da câmara de tranquilização do fluxo situada à montante do canal e que faz parte do corpo do próprio canal. O sistema de operação citado anteriormete é ligado ao canal através de dois computadores que asseguram o controle e a precisão dos ensaios.

#### **4.3. Funcionamento dos Componentes Principais do Sistema**

##### 4.3.1. Sistema de Controle

O sistema de controle e aquisição dos dados mostrados na Foto 4.4, é composto por três computadores e uma impressora, possui grande precisão e sua função é controlar a vazão, o movimento do carrinho (Trolley) ao longo do canal e registrar os dados básicos. O controle da vazão é feito por um comando elétrico de um motor de rotação variável, através de um conversor transistorizado de frequência e torque. Cada um dos computadores possui uma função de controle específica. Um deles,

através de programas desenvolvidos pelo fabricante, controla uma determinada vazão pré-fixada ou uma sequência de vazões pré-estabelecidas na forma de um hidrograma. Em princípio, a vazão real do sistema é medida pelo aparelho eletromagnético situado na tubulação de adução de água para o canal, o qual produz um sinal analógico. Este sinal corresponde a uma vazão que é comparada àquela que foi previamente ajustada e caso haja alguma diferença, um sinal é emitido para o conversor que altera a frequência da corrente que chega ao motor de recirculação de água provocando alteração de rotação, corrigindo assim, o fluxo de água aduzido ao canal. A precisão do sistema é da ordem de 0,5% quando trabalhando na capacidade máxima de 80 l/s.



Foto 4.4 Vista do sistema de controle.



Outro computador, também através de programas desenvolvidos pelo fabricante, controla o movimento do "Trolley" sobre a estrutura do canal, sendo possível fazer medições sobre um único ponto, variando apenas o intervalo do tempo das mesmas, ou programá-lo para executar medições em vários pontos ao longo de todo o comprimento do canal. É possível variar a velocidade do "Trolley", seleccionar uma região do canal onde se deseja realizar as medições além de se escolher o espaçamento desejado entre os pontos de medição. A posição do "Trolley" é estabelecida através de um codificador de rotação com uma precisão de até 1mm. O "Trolley" também conta com limitadores, que evitam a ultrapassagem das posições inicial e final sobre o canal, evitando que por erro de programação, se ultrapasse a faixa máxima de movimento.

O terceiro computador disponível no sistema de controle, tem a função, através de programas desenvolvidos pelo fabricante, de armazenar os dados referentes às medições realizadas durante os experimentos. Ele recebe informações referentes às velocidades do fluxo e ao perfil do fundo; dos registradores do nível d'água, colhe dados de altura de água em dois pontos do canal; do registrador de vazão, colhe a vazão real ajustada; e do programa que controla o "Trolley", dados referentes à posição do mesmo ao longo do trecho limitado para pesquisa. Normalmente todas as informações são colhidas através de impulsos elétricos em microvolts e transformados para a unidade de trabalho através de fórmulas de calibração.

Faz parte também do sistema de controle, um painel onde

encontram-se as chaves interruptoras, o dispositivo manual de regulagem de frequência, o indicador digital de vazão e dois indicadores digitais que registram as medições do nível da água em dois pontos distintos distanciados de 10m, permitindo aquilatar diretamente o nível de equilíbrio do fluxo, ou seja, através de uma verificação visual observar quando a diferença entre os dois relógios registradores permanece constante. No painel encontra-se ainda um indicador digital da posição do "Trolley" em relação a uma posição inicial pré-estabelecida.

#### 4.3.2. Perfilador do Fundo

A identificação da geometria do leito erodível é essencial para permitir a determinação da profundidade média do fluxo. Esta identificação é realizada pelo perfilador do fundo, que utiliza o princípio da reflexão de uma luz infra-vermelha, para sempre se manter a uma mesma distância acima do fundo. O equipamento dispõe de um sistema de ajuste que é zerado em relação ao fundo de aço do canal, ou seja, a haste do perfilador é encostada no fundo do canal, que passa a ser o "Zero" do aparelho e a referência para registro das espessuras do leito. Em seguida a haste é posicionada sobre o leito de areia a uma distância mínima automaticamente definida pelo aparelho e a reflexão da luz infra-vermelha neste leito, registra a altura do mesmo em relação ao fundo do canal. A reflexão de luz infra-vermelha faz com que a haste acompanhe permanentemente o leito de areia e registre as alturas nos pontos previamente estabelecidos, onde o "Trolley" que conduz o perfilador

estaciona.

#### 4.3.3.Registrador da Altura da Superfície da Água

O registro da altura de água no canal é essencial para se estabelecer a declividade da superfície da mesma ou a declividade da linha de energia já que o fluxo é considerado uniforme. Para isto, dois registradores estão situados distantes 10m entre si e sob o canal, e enviam aos mostradores do painel de controle, o registro do nível de água em relação ao fundo do canal. A diferença de nível entre os dois registros dividido pelo espaçamento entre os registradores define a declividade da superfície da água.

#### 4.3.4.Controle da Profundidade

A comporta de aço instalada no final do canal exerce o importante trabalho de controlar a profundidade do fluxo. Seu ajuste é feito manualmente. O ajuste da abertura da comporta altera a profundidade e conseqüentemente a velocidade do fluxo, permitindo a formação das diversas formas do leito . A Foto 4.5 mostra o tipo de comporta e dá uma idéia do seu funcionamento.

A determinação do valor da profundidade pode ser feita utilizando um programa de computador que registra o perfil da superfície da água e o perfil do leito de areia, calculando em seguida, as diferenças entre os perfis nos pontos de medição e estabelecendo uma média.

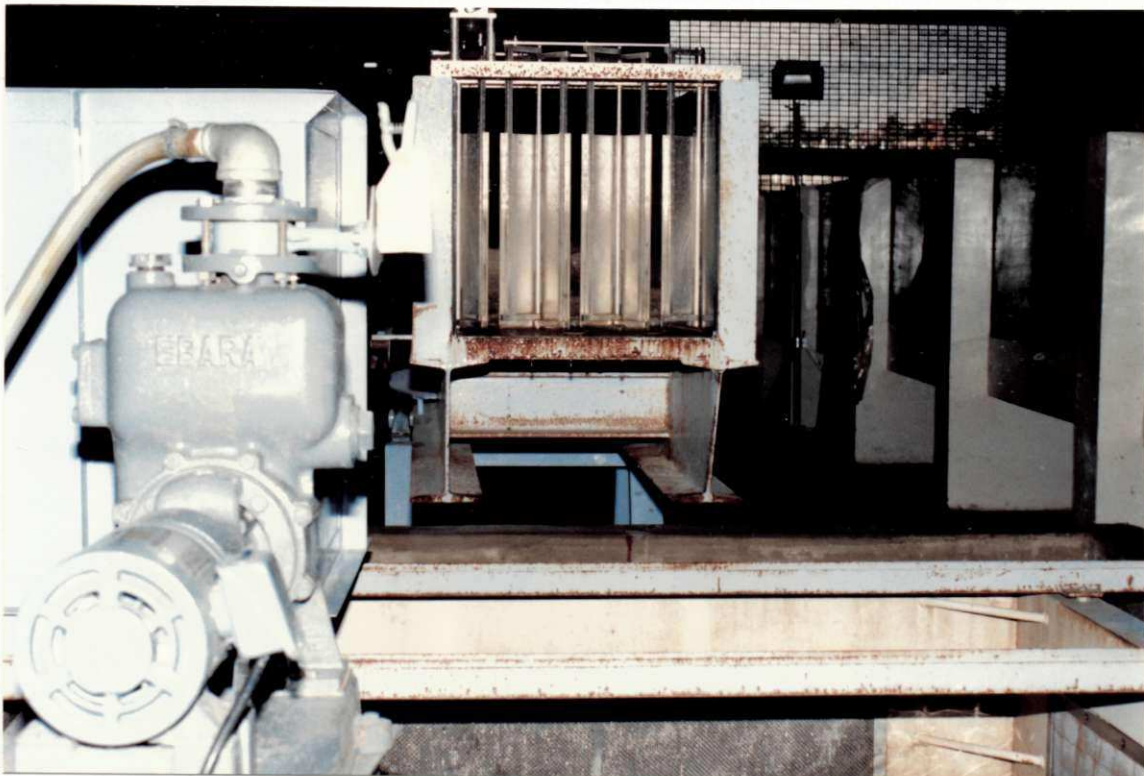


Foto 4.5 Vista da bomba de recirculação de sedimentos e da comporta.

#### 4.4 Limitações do Sistema

O sistema utilizado possui algumas limitações que poderiam ter influenciado no seu funcionamento e conseqüentemente nos resultados dos experimentos.

Foi verificado que a caixa coletora de sedimentos situada à jusante do canal não era apropriada para a coleta de

sedimentos finos. Foi necessário então, se confeccionar um coletor de tecido especial que, colocado dentro da caixa coletora, eliminava o problema, retendo todas as partículas de sedimento. A Foto 4.6 mostra o tipo de coletor utilizado.

Um outro aspecto que poderia limitar a sensibilidade do sistema diz respeito ao reservatório de água, que é constituído por um tanque de concreto e um outro tanque interno, metálico, na forma de uma pirâmide invertida, cuja finalidade é direccionar os sedimentos para o fundo do reservatório aonde estava instalada a tubulação de sucção da bomba de sedimentos. A água deveria passar pelas telas existentes nas paredes do tanque metálico para que pudesse ser recirculada. Tais telas não funcionavam bem e permitiam também a passagem de sedimentos mantidos em suspensão pela turbulência. Para diminuir este efeito foi construída uma caixa de madeira, cuja função era direccionar mais eficientemente os sedimentos para o fundo do reservatório. A Foto 4.7 mostra a caixa de madeira.

Com estas modificações o sistema funcionou satisfatoriamente e foram realizados diversos ensaios variando o tamanho dos sedimentos, a vazão, a profundidade e a forma do leito, conforme está descrito no Capítulo a seguir. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram a planta e a vista lateral do sistema de recirculação.



Foto 4.6 Vista do coletor de sedimentos confeccionado para melhorar a eficiência da caixa coletora.





Foto 4.7 Vista da bomba de sedimento, da caixa coletora e da caixa de madeira construída para direcionar o fluxo para o fundo do reservatório.

## CANAL DE RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA E SEDIMENTOS

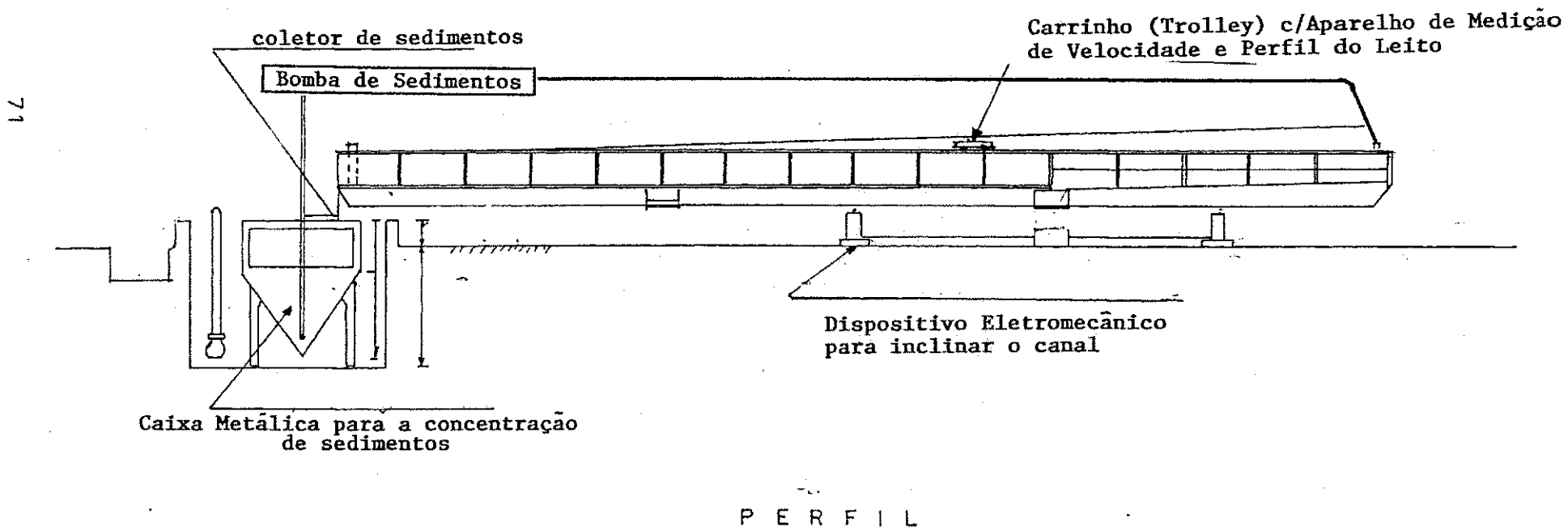
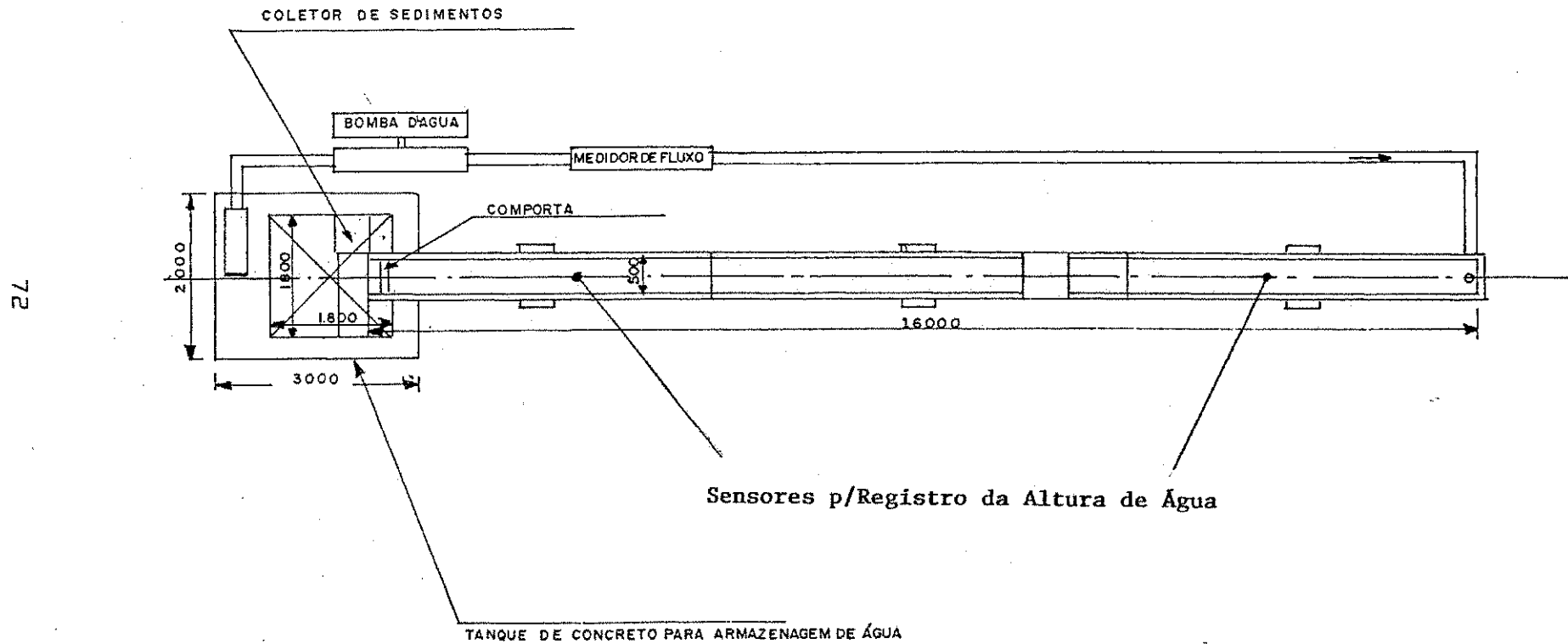


Figura 4.1 Vista lateral do sistema de recirculação.



## CANAL DE RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA E SEDIMENTOS



PLANTA BAIXA

Figura 4.2 Vista em planta do sistema de recirculação.

## CAPÍTULO 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E COLETA DE DADOS.

### 5.1 Procedimento Experimental

Foram utilizados dois tamanhos de sedimento nos experimentos, um com diâmetro médio de 0,35 mm e outro com diâmetro médio de 0,74 mm. O planejamento inicial dos experimentos previa a utilização de mais um tamanho de sedimento que seria constituído da mistura dos dois tipos de sedimento utilizados anteriormente, no entanto, um problema técnico na bomba de sedimentos impediu a continuação dos ensaios.

A seleção dos sedimentos foi feita através do peneiramento da areia disponível na região, o que propiciou uma certa uniformidade no material. Para se ter um controle sobre o tamanho do sedimento foram realizados ensaios granulométricos antes e depois da realização dos experimentos.

Para se realizar os experimentos, duas opções eram possíveis: a primeira era manter a comporta com uma determinada abertura e variar a vazão obtendo assim diversas profundidades; a segunda, era fixar a vazão e ajustando a abertura da comporta alterar a profundidade do fluxo. Optou-se pelo segundo procedimento, pois se entendeu ser mais simples o controle do fluxo e que se teria um controle maior no processo de obtenção das formas do leito. Assim, o princípio básico na realização dos ensaios foi fixar a declividade do fundo do canal, fixar determinadas vazões e, variando a profundidade, permitir a

formação, sob variadas condições de fluxo, de uma das três formas do leito desejadas. Como o movimento de abertura e fechamento da comporta era feito manualmente, foi preciso se estabelecer os limites de regulação da mesma, de modo a se ter certeza de qual formação do leito surgiria para uma determinada abertura da comporta. Foi então realizada uma série de ensaios preliminares que permitiu adquirir a sensibilidade e a experiência necessárias para não se perder muito tempo na tentativa da obtenção das variadas formas do leito durante os experimentos.

Todos os ensaios seguiram o mesmo procedimento e em geral foram realizados da maneira que se segue:

Após o lançamento do leito de sedimentos (aproximadamente 13 cm de espessura), escolhido para aquela série de ensaios, e ajustada a declividade do canal para um valor inicial, ligava-se a bomba de recirculação de sedimentos e, em seguida, a bomba principal, que aduzia uma vazão pre-estabelecida. Para cada vazão tentar-se-ia obter, através da manipulação da comporta, fazendo variar a profundidade do fluxo, as formas do leito ripples, dunas e leito plano.

Depois de estabelecida uma determinada profundidade, esperava-se o tempo necessário para que o fluxo atingisse o equilíbrio com uma determinada forma do leito. Este tempo de equilíbrio oscilava entre 2 horas para ensaios com maiores taxas de transporte, com formação de leito plano, e até 10 horas com a taxa de transporte pequena, com formação de ripples. Além do tempo decorrido para a estabilização, a condição de equilíbrio era verificada também, principalmente para caso de ripples e leito

piano, pelo valor constante da declividade da superfície da água e pelo aspecto uniforme da formação do leito ao longo de todo o canal.

Em seguida procedia-se a coleta de sedimentos transportados pelo fluxo de água. Simultaneamente a essa coleta, procedia-se o levantamento do perfil do leito e se coletava os dados referentes à altura de água sobre os sensores, os quais permitiriam a definição da declividade do nível da superfície de água.

Em cada experimento eram coletadas oito amostras de sedimentos. A finalidade era, além de verificar as variações na amostragem obter uma estimativa da quantidade média de sedimentos transportada durante o ensaio.

Em cada experimento foram realizados três levantamentos do perfil do fundo. Durante todo o tempo decorrido para fazer o levantamento do fundo, foram registrados os níveis da superfície da água. Estes procedimentos permitiram estabelecer uma profundidade média entre o nível da superfície da água e o leito de sedimentos, parâmetro este, fundamental nos cálculos de transporte de sedimentos.

Procurou-se, repetir alguns experimentos. Evidentemente, não se conseguia estabelecer condições idênticas. O controle manual da comporta e outros procedimentos, dificultavam a repetição exata de ensaios.

Os experimentos foram realizados de uma forma geral para vazões correspondentes a 16l/s, 20l/s, 24l/s, 28l/s, 32l/s, 36l/s e 40l/s. Como a vazão da bomba de sedimentos era de 1 l/s, as vazões reais necessitavam, para efeito de cálculo, de serem

acrescidas deste valor.

A idéia inicial era realizar para cada vazão pelo menos um ensaio com cada formação do leito. Pensava-se também em realizar ensaios com vazões próximas à capacidade máxima do canal, o que operacionalmente foi impossível alcançar. Foram então realizados os seguintes ensaios: com o sedimento de 0,35mm de diâmetro médio, 31 ensaios ao todo, sendo 7 com ripples, 12 com dunas e 12 com leito plano; com o sedimento de 0,74mm de diâmetro médio, 15 ensaios ao todo, sendo 11 com dunas e 4 com leito plano. As profundidades registradas variaram de 6,3cm a 24 cm. As declividades da superfície da água variaram de 0,00067 a 0,0125. A quantidade total de sedimentos transportada pelo fluxo nos ensaios variou entre 0,015 e 299,80 g/s.

## 5.2 . Coleta de Dados

Além do transporte total de sedimentos, obtidos com os ensaios, foram coletados os dados necessários ao cálculo do transporte através das diversas equações selecionadas para o estudo comparativo. São eles:

- a) Vazão líquida do fluxo;
- b) Declividade do canal e da superfície líquida;
- c) Profundidade do fluxo;
- d) Tamanho dos Sedimentos;
- e) Viscosidade do líquido em recirculação;

### 5.2.1 Vazão Líquida do Fluxo

A vazão líquida do fluxo era pre-estabelecida, ou seja, a vazão líquida era pré-escolhida e mantida constante através dos computadores, ou mesmo manualmente por um dispositivo existente no painel de controle. O controle da vazão era efetuado variando a rotação da bomba de água. O medidor eletromagnético na tubulação de adução registrava eletronicamente a quantidade de água aduzida ao canal. No painel de controle do equipamento, a vazão desejada era fixada em termos de percentagem da vazão máxima possível (80 l/s) para o equipamento. Por exemplo, fixar uma vazão de 20% significava fixar 16 l/s. O software existente registrava a vazão através de impulsos eletrônicos, em microvolts, e a mesma era transformada, por uma fórmula de calibração do sistema, em l/s.

### 5.2.2 Declividade do Canal e da Superfície Líquida

No canal de recirculação era possível o ajuste da declividade do fundo, através de um sistema eletromecânico instalado na base do mesmo. A declividade do canal era estabelecida previamente, normalmente um valor positivo, para permitir que o sistema atingisse a condição de equilíbrio o mais rápido possível. Esta condição de equilíbrio entre a declividade do leito arenoso e o fluxo de água, em certos casos, como os de dunas, não era facilmente perceptível. Quando o leito arenoso apresentava ripples ou leito plano como formação, a condição de equilíbrio era facilmente percebida porque não havia modificações sensíveis nesses tipos de formação e se notava um comportamento

estável da superfície líquida, pois, a diferença entre os níveis de água registrados era praticamente constante. No entanto, quando a formação era dunas, a condição de equilíbrio não era tão evidente, em virtude da variação das formas das dunas e pela instabilidade que as mesmas provocavam na superfície líquida. Então, o tempo de estabilização foi utilizado como um critério adicional para se definir a condição de equilíbrio. Este tempo oscilava entre 2 horas, para ensaios com maior velocidade, e 10 horas para ensaios lentos.

A declividade da superfície líquida (igual ao gradiente de energia em um escoamento uniforme) foi obtida diretamente da leitura da altura de coluna d'água registrada pelo par de sensores situados no fundo do canal, distanciados 10m entre si, conforme mostra o esquema da Figura 4.1. Como nos experimentos realizados se admitia a formação de diversas formas do leito, a determinação da declividade da superfície da água pelo método citado para leito plano e ripples poderia ser considerada excelente. De qualquer forma, desde que a medição do leito era realizada apenas no sentido longitudinal desconsiderando a variação transversal das formas do leito, já havia um claro sentido de aproximação. No entanto, no caso de dunas, os sensores registravam durante os experimentos vários níveis pontuais da superfície, ou seja, quando uma duna passava sobre o sensor era registrado um nível de água, normalmente mais baixo; com a continuação do fluxo a duna se movimentava e ultrapassava o sensor, que passava a registrar um nível de superfície mais alto. Como os ciclos de medição duravam em média

45 minutos, e cada ciclo de registros 15 minutos em média, era possível ter neste intervalo vários níveis registrados para um mesmo ponto. Estabelecia-se então uma média dos valores, considerada como o nível daquele ponto aonde estava o sensor. Então, desta forma, passou-se a ter dois níveis médios da superfície nos locais dos sensores, permitindo assim o traçado da declividade da superfície da água.

### 5.2.3 Profundidade do Fluxo

A determinação da profundidade do fluxo, tendo se estabelecido o perfil do fundo arenoso e a declividade da superfície da água, era relativamente simples. O procedimento para determinar a profundidade média do fluxo, consistia em fazer o somatório da diferença entre a altura do nível de água  $h$  e a altura do leito de sedimento  $h'$ , ou seja,  $\Sigma(h - h')$ , e, dividi-lo pelo número de pontos de medição, ou seja,  $\Sigma(h - h')/n$ .

### 5.2.4 Tamanho dos Sedimentos

Coletaram-se amostras dos sedimentos utilizados nos experimentos e realizaram-se os ensaios granulométricos. O tamanho dos sedimentos constituintes do leito, foi definido através das curvas de granulometria. Foram utilizados durante o trabalho apenas dois tipos de sedimentos, sendo um bastante fino que permitia a formação de todas as formas do leito (ripples, dunas e leito plano) e outro com diâmetro médio maior do que 0,6mm, com o qual apenas a formação de dunas e leito plano foram possíveis na temperatura ambiente e nas condições dos ensaios.



### 5.2.5 Viscosidade do Fluido

A viscosidade do fluido foi obtida pelas curvas que relacionam esta variável com a temperatura do fluido, medida por um termômetro comum. Convém observar que durante todos os ensaios a temperatura da água variou apenas entre 22°C e 24°C, assim a viscosidade do fluido praticamente manteve-se constante em todos os ensaios (Tabela 5.1).

### 5.2.6 Vazão Sólida

A quantidade de sedimentos transportada pelo fluxo foi determinada em volume e em peso, embora em alguns casos, quando a taxa de transporte era muito pequena, a medição em volume se tornava impraticável. A quantidade de material coletada era, então, nestes casos, medida apenas em peso. O sistema dispunha de um dispositivo de coleta de sedimentos localizado na saída do canal. No entanto, para que tal sistema se tornasse eficiente foi necessário adaptar um filtro de tecido que deixasse passar a água e retivesse os sedimentos. A cada ensaio este filtro era retirado e cuidadosamente lavado sobre uma caixa coletora de sedimentos. Daí o sedimento era transferido para baldes, onde ocorria a decantação das partículas de sedimento, para em seguida, após a retirada da água do balde, ser transferido para as provetas graduadas, onde era efetuada a medição em volume. Posteriormente o sedimento era colocado em cápsulas de alumínio ou ágata e levados à estufa por 24 horas, e em seguida, pesados em balança de precisão.

### 5.3. Organização dos Dados Coletados

Os dados que foram coletados foram organizados na Tabela 5.2 e se constituem basicamente nas variáveis essenciais para o cálculo de transporte sólido pelas equações de transporte. A Tabela 5.2 apresenta para cada ensaio realizado os seguintes dados: forma do leito, diâmetro médio em mm, a vazão em l/s, a declividade do canal, a profundidade média em metros, a declividade média da superfície da água ou gradiente de energia e a descarga de sedimentos medida em laboratório em  $\text{cm}^3/\text{s}$  e em  $\text{g/s}$ .

O processamento, análise e interpretação dos dados coletados serão apresentados no capítulo a seguir.

| Temperatura em Graus Celsius | Massa Específica em $\text{g/cm}^3$ | Viscosidade Cinemática em $\text{cm}^2/\text{s}$ |
|------------------------------|-------------------------------------|--|
| 21.7                         | 0.9978                              | 0.00965  |
| 22                           | 0.9978                              | 0.00957  |
| 22.2                         | 0.9977                              | 0.00952  |
| 22.8                         | 0.9976                              | 0.00940  |
| 23                           | 0.9975                              | 0.00935  |
| 23.3                         | 0.9975                              | 0.00928  |
| 23.9                         | 0.9973                              | 0.00916  |
| 24                           | 0.9973                              | 0.00914  |
| 24.4                         | 0.9972                              | 0.00905  |
| 25                           | 0.9970                              | 0.00893  |
| 25.6                         | 0.9969                              | 0.00882  |
| 26                           | 0.9968                              | 0.00873  |
| 26.1                         | 0.9968                              | 0.00871  |
| 26.7                         | 0.9966                              | 0.00861  |
| 27                           | 0.9965                              | 0.00854  |
| 27.2                         | 0.9965                              | 0.00850  |
| 27.8                         | 0.9963                              | 0.00840  |
| 28                           | 0.9962                              | 0.00836  |
| 28.3                         | 0.9961                              | 0.00830  |
| 28.9                         | 0.9960                              | 0.00820  |
| 29                           | 0.9959                              | 0.00818  |
| 29.4                         | 0.9958                              | 0.00811  |
| 30                           | 0.9956                              | 0.00801  |
| 30.6                         | 0.9955                              | 0.00792  |
| 31                           | 0.9954                              | 0.00785  |
| 31.1                         | 0.9953                              | 0.00783  |
| 31.7                         | 0.9951                              | 0.00774  |

Tabela 5.1 Viscosidade e massa específica, em função da temperatura.

| Ensaio | Forma do Leito | D50 (mm) | Vazão (l/s) | Declividade do Canal | Profundidade (m) | Declividade da Superf. de água | Desc. de Sedimento (cm <sup>3</sup> /s) / (g/s) |
|--------|----------------|----------|-------------|----------------------|------------------|--------------------------------|---|
| 01     | Dunas          | 0,35     | 28          | 0,0026               | 0,11657          | 0,00310                        | 16,06 / 22,94                                   |
| 02     | Dunas          | 0,35     | 20          | 0,0026               | 0,12040          | 0,00342                        | 17,76 / 23,01                                   |
| 03     | Dunas          | 0,35     | 28          | 0,0026               | 0,14733          | 0,00136                        | 6,16 / 9,10                                     |
| 04     | Leito Plano    | 0,35     | 32          | 0,0026               | 0,07573          | 0,00374                        | 62,10 / 72,20                                   |
| 05     | Dunas          | 0,35     | 32          | 0,0026               | 0,16707          | 0,00147                        | / 2,00  |
| 06     | Leito Plano    | 0,35     | 36          | 0,0026               | 0,10530          | 0,00360                        | 55,12 / 77,70                                   |
| 07     | Dunas          | 0,35     | 36          | 0,0026               | 0,15117          | 0,00350                        | 14,94 / 21,74                                   |
| 08     | Dunas          | 0,35     | 36          | 0,0026               | 0,17177          | 0,00113                        | 4,73 / 3,36                                     |
| 09     | Leito Plano    | 0,35     | 36          | 0,0026               | 0,11177          | 0,00432                        | 50,60 / 74,00                                   |
| 10     | Dunas          | 0,35     | 36          | 0,0026               | 0,15597          | 0,00217                        | 7,31 / 13,53                                    |
| 11     | Leito Plano    | 0,35     | 32          | 0,0026               | 0,10323          | 0,00465                        | 54,69 / 70,467                                  |
| 12     | Dunas          | 0,35     | 32          | 0,0026               | 0,14403          | 0,00319                        | 5,74 / 7,15                                     |
| 13     | Ripples        | 0,35     | 20          | 0,0026               | 0,17207          | 0,00154                        | / 0,50  |
| 14     | Leito Plano    | 0,35     | 28          | 0,0026               | 0,07633          | 0,00401                        | 47,07 / 70,14                                   |
| 15     | Dunas          | 0,35     | 24          | 0,0026               | 0,12143          | 0,00276                        | 15,74 / 23,59                                   |
| 16     | Leito Plano    | 0,35     | 24          | 0,0026               | 0,08217          | 0,00391                        | 43,77 / 64,50                                   |
| 17     | Dunas          | 0,35     | 20          | 0,0026               | 0,10263          | 0,00244                        | 5,33 / 7,92                                     |
| 18     | Leito Plano    | 0,35     | 20          | 0,0026               | 0,07557          | 0,00506                        | 43,01 / 61,43                                   |
| 19     | Dunas          | 0,35     | 16          | 0,0026               | 0,08407          | 0,00250                        | 6,62 / 9,175                                    |
| 20     | Leito Plano    | 0,35     | 40          | 0,0026               | 0,10423          | 0,00440                        | 72,35 / 97,47                                   |
| 21     | Dunas          | 0,35     | 40          | 0,0026               | 0,22007          | 0,00112                        | / 1,713   |
| 22     | Ripples        | 0,35     | 20          | 0,0026               | 0,14530          | 0,00130                        | / 0,044   |
| 23     | Ripples        | 0,35     | 16          | 0,0026               | 0,10503          | 0,00193                        | / 0,071   |
| 24     | Ripples        | 0,35     | 20          | 0,0026               | 0,14663          | 0,00093                        | / 0,0222  |
| 25     | Ripples        | 0,35     | 24          | 0,0026               | 0,16200          | 0,00115                        | / 0,030   |
| 26     | Ripples        | 0,35     | 28          | 0,0026               | 0,20600          | 0,00067                        | / 0,015   |
| 27     | Ripples        | 0,35     | 32          | 0,0026               | 0,23070          | 0,00000                        | / 0,04  |
| 28     | Leito Plano    | 0,35     | 16          | 0,0026               | 0,06307          | 0,00542                        | 50,40 / 72,71                                   |
| 29     | Leito Plano    | 0,35     | 20          | 0,0026               | 0,06773          | 0,00493                        | 54,00 / 76,05                                   |
| 30     | Leito Plano    | 0,35     | 24          | 0,0026               | 0,07777          | 0,00477                        | 65,744 / 88,634                                 |
| 31     | Leito Plano    | 0,35     | 28          | 0,0026               | 0,00700          | 0,00530                        | 73,20 / 99,27                                   |
| 32     | Dunas          | 0,74     | 16          | 0,0026               | 0,08407          | 0,00334                        | 10,15 / 13,72                                   |
| 33     | Dunas          | 0,74     | 24          | 0,0026               | 0,11400          | 0,00254                        | 12,09 / 16,60                                   |
| 34     | Dunas          | 0,74     | 20          | 0,0026               | 0,09397          | 0,00401                        | 16,58 / 22,17                                   |
| 35     | Dunas          | 0,74     | 20          | 0,0026               | 0,13453          | 0,00276                        | 10,694 / 14,043                                 |
| 36     | Dunas          | 0,74     | 32          | 0,0026               | 0,14593          | 0,00292                        | 16,71 / 23,206                                  |
| 37     | Dunas          | 0,74     | 36          | 0,0026               | 0,15267          | 0,01017                        | 7,17 / 10,46                                    |
| 38     | Leito Plano    | 0,74     | 20          | 0,01360              | 0,06380          | 0,01197                        | 124,04 / 167,21                                 |
| 39     | Leito Plano    | 0,74     | 24          | 0,01360              | 0,07010          | 0,01135                        | 141,01 / 192,6                                  |
| 40     | Leito Plano    | 0,74     | 16          | 0,01360              | 0,05677          | 0,01444                        | 127,07 / 177,35                                 |
| 41     | Leito Plano    | 0,74     | 28          | 0,01360              | 0,07343          | 0,01240                        | 210,65 / 299,00                                 |
| 42     | Dunas          | 0,74     | 16          | 0,00005              | 0,08750          | 0,00410                        | 7,034 / 12,473                                  |
| 43     | Dunas          | 0,74     | 24          | 0,00005              | 0,12393          | 0,00322                        | 6,603 / 9,29                                    |
| 44     | Dunas          | 0,74     | 40          | 0,00005              | 0,13030          | 0,00420                        | 13,06 / 25,31                                   |
| 45     | Dunas          | 0,74     | 32          | 0,00005              | 0,13077          | 0,00469                        | 25,145 / 33,705                                 |
| 46     | Dunas          | 0,74     | 20          | 0,00005              | 0,14110          | 0,00276                        | 5,304 / 3,02                                    |
| 47     | Dunas          | 0,35     | 20          | 0,0026               | 0,1701           | 0,00112                        | / 0,217   |
| 48     | Dunas          | 0,35     | 32          | 0,0026               | 0,1331           | 0,00221                        | 17,42 / 25,37                                   |
| 49     | Dunas          | 0,35     | 20          | 0,0026               | 0,1390           | 0,00210                        | 6,62 / 10,00                                    |
| 50     | Dunas          | 0,35     | 16          | 0,0026               | 0,1156           | 0,00152                        | / 0,014   |
| 51     | Dunas          | 0,74     | 16          | 0,0026               | 0,1019           | 0,00112                        | 0,523 / 0,755                                   |

Tabela 5.2 Experimentos realizados e os respectivos dados coletados.

## CAPITULO 6. ANÁLISE DOS DADOS.

### 6.1 Análise dos Dados Experimentais.

Os dados obtidos nas duas séries de ensaios e apresentados na Tabela 5.2 no Capítulo anterior, constituem-se nas variáveis básicas que caracterizam as condições de fluxo e que servirão para o cálculo dos parâmetros necessários às diversas fórmulas de transporte.

Na análise dos dados brutos experimentais verificou-se que alguns dos ensaios realizados forneceram resultados incoerentes, como por exemplo: a quantidade de sedimentos transportada quando a formação era dunas ter sido da mesma ordem de grandeza do que a obtida quando a formação era ripples.

Verificou-se que em alguns ensaios, principalmente quando as dunas formadas eram curtas e altas, acontecia o aparecimento do fundo do canal, prejudicando o potencial do fluxo em transportar sedimentos. Em alguns ensaios o perfilador do fundo caía muitas vezes no canal, deixando de registrar a espessura correta do material do leito, prejudicando o levantamento do perfil do mesmo.

Dessa forma alguns dos ensaios, como por exemplo do 47 ao 51, foram considerados impróprios para comparação e não foram analisados.

## 6.2 Parâmetros para as Equações de Transporte.

Os dados da Tabela 5.2 permitiram gerar parâmetros necessários às equações de transporte. Apresenta-se em seguida os diversos parâmetros calculados e o procedimento adotado para obtê-los:

.Número de Reynolds(Re): foi obtido através da relação  $U.R/\nu$ . A velocidade de fluxo U, foi obtida através da relação entre a vazão de água Q e a área da seção do canal A. O raio hidráulico do canal R foi obtido da relação entre a área útil A da seção do canal e o perímetro molhado p. A viscosidade foi obtida em função da temperatura da água na Tabela 5.1.

.Raio Hidráulico do Leito (apresentado na tabela 6.1 como RH1). Para obtenção deste parâmetro foi utilizado o método de VANONI e BROOKS [Vanoni (1975)], que permite eliminar os efeitos das paredes laterais do canal. O raio hidráulico do leito simboliza o raio hidráulico de um canal de largura infinita com as mesmas características do fundo, obtido nos ensaios. Assim, os resultados teriam uma aplicabilidade geral, sendo eliminada a influência das paredes de vidro do canal na avaliação dos parâmetros de transporte.

.Coeficiente de atrito do canal (apresentado na tabela 6.1 como ATRI). Este parâmetro é definido pela seguinte relação

$$f = 8.g.R.S/U^2 \quad \text{eq 6.1}$$

onde S significa a declividade da linha de energia do fluxo

aproximada pela declividade da superfície da água; os demais componentes da relação já foram definidos anteriormente.

.Coeficiente de atrito das paredes do canal (apresentado na tabela 6.1 como ATRIPA). Este parâmetro foi definido pela divisão da seção do canal em duas partes independentes, a seção das paredes e a seção do fundo, seguindo o método de VANONI e BROOKS [Vanoni (1975)].

.Coeficiente de atrito do fundo (apresentado na tabela 6.1 como ATRI1). Também, como no caso anterior, foi definido pela divisão do canal em duas partes independentes, a seção das paredes e a seção do fundo. Após a determinação do coeficiente de atrito das paredes do canal, o método de VANONI e BROOKS [Vanoni (1975)] permite a aplicação da relação a seguir, de DARCY-WEISBACH, para cada parte da seção dividida como se fosse para o canal como um todo.

$$\frac{U^2}{S} = \frac{8 \cdot g \cdot A}{f \cdot p} = \frac{8 \cdot g \cdot A_b}{f_b \cdot p_b} = \frac{8 \cdot g \cdot A_w}{f_w \cdot p_w} \quad \dots \dots \text{eq 6.2}$$

onde  $p$ ,  $p_b$  e  $p_w$  são, respectivamente, o perímetro molhado do canal como um todo, do fundo e das paredes laterais; e  $f$ ,  $f_b$  e  $f_w$  os coeficientes de atrito da seção total, da seção do leito e da seção das paredes.

.Raio hidráulico da superfície do leito (apresentado na tabela 6.1 como RH2). Este parâmetro foi definido após a eliminação da influência das rugosidades advindas das formas do leito, utilizando o método proposto por Einstein [Simons e Senturk (1977)]. O sentido deste raio hidráulico é

gerar a parte da tensão de cisalhamento do fundo que seja responsável pelo transporte sólido após superar a resistência adicional devido às formas do leito. O procedimento de Einstein está demonstrado na forma de fluxograma no anexo 2.2.

.Coeficiente de atrito da superfície do leito (apresentado na tabela 6.1 como  $ATR_{12}$ ). Este parâmetro foi calculado utilizando raio hidráulico da superfície do leito ( $R'_b$ ), através da seguinte relação

$$f = 8 \cdot g \cdot R'_b \cdot S / U^2 \quad \dots\dots eq 6.3$$

Outros parâmetros, apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.3, são definidos a seguir:

.Velocidade de queda da partícula (apresentada na tabela como  $W$ ). Este parâmetro foi definido através da equação de Rubey que foi apresentada no Anexo 10, Fórmula de EINSTEIN.

.Declividade da linha de energia ( $S$ ). Esta declividade pode ser aproximada pela declividade da superfície da água quando o fluxo é subcrítico, porque nestes casos as forças de inércia, proporcionais ao quadrado da velocidade são menores que os efeitos da força de gravidade e a variação da carga de velocidade ( $\Delta V^2 / 2g$ ) ao longo do canal é desprezível.

.Velocidade de cisalhamento da superfície do leito ( $U'_*$ ) e velocidade de cisalhamento do leito ( $U_*$ ). Foram respectivamente definidas pelas seguintes relações:

$$U'_* = \sqrt{g \cdot R'_b \cdot S} \quad \dots\dots eq 6.4$$

$$U_* = \sqrt{g \cdot R_b \cdot S} \quad \dots\dots \text{eq 6.5}$$

.Tensão de cisalhamento da superfície do leito ( $\tau_o$ ) e tensão de cisalhamento do leito ( $\tau_o$ ). Foram, respectivamente, definidas pelas seguintes relações:

$$\tau_o' = \gamma \cdot R_b' \cdot S \quad \dots\dots \text{eq 6.6}$$

$$\tau_o = \gamma \cdot R_b \cdot S \quad \dots\dots \text{eq 6.7}$$

Todos estes parâmetros e os próprios dados da Tabela 5.2 foram utilizados nas equações de transporte no cálculo da quantidade de sedimento transportado pelo fluxo.

Estas quantidades medidas nos ensaios e as quantidades de sedimentos estimadas pelas equações de transporte (utilizando o raio hidráulico da superfície do leito e o raio hidráulico do leito, separadamente) são apresentadas nas Tabelas 6.4 e 6.5. O cálculo do transporte sólido foi feito através de um programa de computador baseado nos fluxogramas apresentados no Capítulo 3.

### 6.3 Resultados Obtidos.

Para analisar os resultados obtidos pelas equações de transporte precisava-se de um elemento de comparação, justamente os valores da quantidade total de sedimentos medida nos experimentos. Para fazer a comparação dos valores utilizou-se



dois processos, gráfico e numérico.

Os valores medidos nos experimentos foram utilizados como referência para a comparação gráfica. Foram feitos gráficos em cuja abscissa foram registrados os valores medidos nos experimentos e nas ordenadas os valores estimados pelas equações. Para permitir uma comparação imediata entre os valores medidos e os calculados, foi traçada uma reta com um ângulo de  $45^{\circ}$  com os eixos, que corresponde à situação em que os valores calculados são exatamente iguais aos valores medidos e que serviria de referência para se verificar a faixa de variação percentual ou a dispersão dos valores calculados em torno dos valores medidos.

A interpretação numérica dos resultados foi feita dividindo-se os valores calculados pelos valores medidos, obtendo-se dados numéricos que exprimissem a proporção de cada quantidade de sedimentos transportada calculada, em relação à medida.

O objetivo deste trabalho incluía também a verificação da sensibilidade das equações ao raio hidráulico do leito e ao raio hidráulico da superfície do leito, de forma a se concluir que o resultado fornecido por uma equação poderia ser sensivelmente influenciado por uma possível inconsistência nos métodos de cálculo do transporte, quando for utilizado outro valor do raio hidráulico não recomendado pelo método. Assim, para cada fórmula e cada ensaio foram obtidos dois resultados, um utilizando nas equações de transporte, o raio hidráulico da superfície do leito e o outro, utilizando o raio hidráulico do leito.

Os resultados foram também separados por tipo de forma

do leito, visando identificar a equação que mais se adequava à cada uma das formas.

Os resultados da análise quantitativa são apresentados na Tabela 6.6 para ripples, na Tabela 6.7 para dunas, e na Tabela 6.8 para leito plano. Nestas tabelas são indicados para cada fórmula e cada ensaio dois resultados; o primeiro, obtido empregando-se nas fórmulas de transporte o raio hidráulico da superfície do leito, e o segundo, empregando-se nas fórmulas, o raio hidráulico do leito. De qualquer forma, ao se discutir os resultados obtidos considerou-se a metodologia do próprio autor e o emprego conceitualmente correto do tipo do raio hidráulico.

A análise gráfica dos resultados está apresentada nos Gráficos de Dispersão das Páginas 100 a 117, cada um mostrando os resultados da aplicação de uma equação com os dados dos ensaios específicos para cada forma do leito. O significado destes resultados serão discutidos no próximo Capítulo.

| ENSAIO | REI          | RH1<br>(m) | ATRI    | ATRIPA  | ATRI 1  | RH 2<br>(m) | ATRI 2  |
|--------|--------------|------------|---------|---------|---------|-------------|---------|
| 01     | 163387.75167 | 0.10703    | 0.08381 | 0.02157 | 0.11283 | 0.03434     | 0.03620 |
| 02     | 161698.29408 | 0.11168    | 0.10082 | 0.02246 | 0.13856 | 0.04497     | 0.05579 |
| 03     | 149983.84326 | 0.13261    | 0.07895 | 0.02124 | 0.10065 | 0.01803     | 0.01368 |
| 04     | 197984.54823 | 0.08534    | 0.04789 | 0.01878 | 0.05904 | 0.03044     | 0.02106 |
| 05     | 163335.95309 | 0.15106    | 0.08120 | 0.02144 | 0.12162 | 0.02446     | 0.01969 |
| 06     | 216428.74534 | 0.09334    | 0.04636 | 0.01836 | 0.05021 | 0.03334     | 0.02079 |
| 07     | 191951.90965 | 0.14008    | 0.11407 | 0.02221 | 0.16962 | 0.08155     | 0.09074 |
| 08     | 182490.10023 | 0.14573    | 0.05155 | 0.01930 | 0.07373 | 0.01743     | 0.00882 |
| 09     | 212057.19544 | 0.10112    | 0.06310 | 0.01947 | 0.08261 | 0.05334     | 0.04358 |
| 10     | 189682.35976 | 0.13988    | 0.07676 | 0.02061 | 0.11178 | 0.03404     | 0.02720 |
| 11     | 193780.81664 | 0.09440    | 0.06937 | 0.02012 | 0.08970 | 0.05150     | 0.04097 |
| 12     | 173363.72074 | 0.13448    | 0.11757 | 0.02291 | 0.17241 | 0.05857     | 0.07509 |
| 13     | 141903.11590 | 0.15765    | 0.11630 | 0.02391 | 0.17989 | 0.02703     | 0.03085 |
| 14     | 172936.35587 | 0.08793    | 0.06475 | 0.02030 | 0.08188 | 0.03381     | 0.03148 |
| 15     | 138214.19486 | 0.11305    | 0.11330 | 0.02391 | 0.15672 | 0.03241     | 0.04493 |
| 16     | 154550.07495 | 0.07481    | 0.05561 | 0.02014 | 0.06727 | 0.02302     | 0.02070 |
| 17     | 121319.08420 | 0.09498    | 0.09172 | 0.02348 | 0.11973 | 0.01966     | 0.02479 |
| 18     | 131402.61284 | 0.07078    | 0.08225 | 0.02248 | 0.10032 | 0.03019     | 0.04279 |
| 19     | 102202.64261 | 0.07894    | 0.08744 | 0.02412 | 0.10894 | 0.01724     | 0.02379 |
| 20     | 241542.21078 | 0.09156    | 0.04312 | 0.01781 | 0.05367 | 0.04137     | 0.02425 |
| 21     | 181709.38333 | 0.19334    | 0.07857 | 0.02088 | 0.12953 | 0.02634     | 0.01765 |
| 22     | 108223.49776 | 0.13434    | 0.12371 | 0.02538 | 0.18005 | 0.01674     | 0.02253 |
| 23     | 96182.44367  | 0.09922    | 0.12318 | 0.02588 | 0.16437 | 0.01560     | 0.02584 |
| 24     | 107860.59719 | 0.13286    | 0.09552 | 0.02427 | 0.13731 | 0.01321     | 0.01365 |
| 25     | 124362.64146 | 0.14779    | 0.10236 | 0.02393 | 0.15343 | 0.01689     | 0.01753 |
| 26     | 131344.40379 | 0.18010    | 0.08036 | 0.02236 | 0.12815 | 0.01406     | 0.01001 |
| 27     | 140063.83847 | 0.21299    | 0.10665 | 0.02352 | 0.18601 | 0.01912     | 0.01670 |
| 28     | 109319.31814 | 0.05948    | 0.08322 | 0.02352 | 0.09828 | 0.02202     | 0.03771 |
| 29     | 134644.97738 | 0.06262    | 0.05912 | 0.02094 | 0.06946 | 0.02199     | 0.02440 |
| 30     | 156624.76247 | 0.07158    | 0.06098 | 0.02046 | 0.07350 | 0.03032     | 0.03117 |
| 31     | 177724.17842 | 0.08008    | 0.06577 | 0.02026 | 0.08161 | 0.04434     | 0.04510 |
| 32     | 102202.64261 | 0.08020    | 0.11682 | 0.02538 | 0.14787 | 0.01094     | 0.02017 |
| 33     | 141035.43515 | 0.10489    | 0.08804 | 0.02247 | 0.11794 | 0.01150     | 0.01293 |
| 34     | 124373.40799 | 0.08865    | 0.11062 | 0.02459 | 0.15397 | 0.01660     | 0.02897 |
| 35     | 155756.50308 | 0.12459    | 0.10934 | 0.02309 | 0.15574 | 0.02110     | 0.02630 |
| 36     | 172082.06971 | 0.13488    | 0.10978 | 0.02256 | 0.16070 | 0.02311     | 0.02753 |
| 37     | 191236.86292 | 0.14793    | 0.34015 | 0.02786 | 0.53085 | 0.12947     | 0.46460 |
| 38     | 136331.25769 | 0.06121    | 0.12147 | 0.02429 | 0.14627 | 0.03168     | 0.07572 |
| 39     | 160377.68946 | 0.06675    | 0.10401 | 0.02267 | 0.12602 | 0.03487     | 0.06625 |
| 40     | 111491.67323 | 0.05527    | 0.16665 | 0.02679 | 0.19852 | 0.03168     | 0.11379 |
| 41     | 185180.86797 | 0.06966    | 0.09558 | 0.02159 | 0.11731 | 0.04235     | 0.07132 |
| 42     | 181406.21905 | 0.08364    | 0.15897 | 0.02708 | 0.20514 | 0.01528     | 0.03747 |
| 43     | 137290.13023 | 0.11661    | 0.13958 | 0.02487 | 0.19644 | 0.01947     | 0.03280 |
| 44     | 208533.99380 | 0.14943    | 0.12926 | 0.02243 | 0.19776 | 0.04673     | 0.06185 |
| 45     | 179765.20698 | 0.12283    | 0.13194 | 0.02333 | 0.18875 | 0.03584     | 0.05507 |
| 46     | 153139.98499 | 0.13185    | 0.13302 | 0.02418 | 0.19444 | 0.02188     | 0.03227 |

Tabela 6.1 Parâmetros básicos para a aplicação nas equações de transporte: REI é o Número de Reynolds, RH é o raio hidráulico em unidades métricas (o do leito é RH1 e o da superfície do leito é RH2), ATRI é o coeficiente de atrito do canal (ATRIPA é aquele referente às paredes do canal, ATRI1 se refere ao fundo do canal e ATRI2 à superfície do leito).

| ENSAIO | W<br>(m/s) | S<br>(m/m) | U<br>(m/s) | U*<br>(m/s) | RH*<br>(m) | T*<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
|--------|------------|------------|------------|-------------|------------|---------------------------|
| 01     | 0.04748    | 0.00310    | 0.48040    | 0.03231     | 0.03434    | 1.04421                   |
| 02     | 0.04748    | 0.00342    | 0.46512    | 0.03084     | 0.04497    | 1.50060                   |
| 03     | 0.04748    | 0.00136    | 0.37501    | 0.01551     | 0.01803    | 0.24055                   |
| 04     | 0.04748    | 0.00394    | 0.66855    | 0.03430     | 0.03044    | 1.17645                   |
| 05     | 0.04748    | 0.00147    | 0.37854    | 0.01878     | 0.02446    | 0.35273                   |
| 06     | 0.04748    | 0.00368    | 0.68053    | 0.03469     | 0.03334    | 1.20374                   |
| 07     | 0.04748    | 0.00350    | 0.47628    | 0.05291     | 0.08155    | 2.79995                   |
| 08     | 0.04748    | 0.00113    | 0.41668    | 0.01390     | 0.01743    | 0.19317                   |
| 09     | 0.04748    | 0.00432    | 0.64418    | 0.04755     | 0.05334    | 2.26066                   |
| 10     | 0.04748    | 0.00217    | 0.46163    | 0.02692     | 0.03404    | 0.72465                   |
| 11     | 0.04748    | 0.00465    | 0.61997    | 0.04851     | 0.05158    | 2.35291                   |
| 12     | 0.04748    | 0.00319    | 0.44190    | 0.04281     | 0.05857    | 1.03299                   |
| 13     | 0.04748    | 0.00154    | 0.32545    | 0.02021     | 0.02703    | 0.40842                   |
| 14     | 0.04748    | 0.00401    | 0.58133    | 0.03647     | 0.03381    | 1.32988                   |
| 15     | 0.04748    | 0.00276    | 0.39529    | 0.02962     | 0.03241    | 0.87748                   |
| 16     | 0.04748    | 0.00391    | 0.58415    | 0.02972     | 0.02302    | 0.88389                   |
| 17     | 0.04748    | 0.00244    | 0.38975    | 0.02170     | 0.01966    | 0.47071                   |
| 18     | 0.04748    | 0.00506    | 0.52931    | 0.03871     | 0.03019    | 1.49868                   |
| 19     | 0.04748    | 0.00250    | 0.37705    | 0.02056     | 0.01724    | 0.42276                   |
| 20     | 0.04748    | 0.00440    | 0.76753    | 0.04226     | 0.04137    | 1.78577                   |
| 21     | 0.04748    | 0.00112    | 0.36220    | 0.01701     | 0.02634    | 0.28944                   |
| 22     | 0.04748    | 0.00130    | 0.27529    | 0.01461     | 0.01674    | 0.21342                   |
| 23     | 0.04748    | 0.00193    | 0.30237    | 0.01718     | 0.01560    | 0.29527                   |
| 24     | 0.04748    | 0.00098    | 0.27280    | 0.01127     | 0.01321    | 0.12698                   |
| 25     | 0.04748    | 0.00115    | 0.29484    | 0.01380     | 0.01689    | 0.19049                   |
| 26     | 0.04748    | 0.00067    | 0.27184    | 0.00961     | 0.01406    | 0.09244                   |
| 27     | 0.04748    | 0.00080    | 0.26812    | 0.01225     | 0.01912    | 0.15004                   |
| 28     | 0.04748    | 0.00542    | 0.50737    | 0.03483     | 0.02282    | 1.21334                   |
| 29     | 0.04748    | 0.00493    | 0.59058    | 0.03261     | 0.02199    | 1.06369                   |
| 30     | 0.04748    | 0.00499    | 0.61720    | 0.03853     | 0.03032    | 1.48427                   |
| 31     | 0.04748    | 0.00538    | 0.64368    | 0.04837     | 0.04434    | 2.33995                   |
| 32     | 0.08210    | 0.00334    | 0.37705    | 0.01893     | 0.01094    | 0.35847                   |
| 33     | 0.08210    | 0.00254    | 0.42105    | 0.01693     | 0.01150    | 0.28653                   |
| 34     | 0.08210    | 0.00401    | 0.42567    | 0.02562     | 0.01668    | 0.65622                   |
| 35     | 0.08210    | 0.00276    | 0.41626    | 0.02390     | 0.02110    | 0.57139                   |
| 36     | 0.08210    | 0.00292    | 0.43857    | 0.02573     | 0.02311    | 0.66194                   |
| 37     | 0.08210    | 0.01017    | 0.47161    | 0.11365     | 0.12947    | 12.91669                  |
| 38     | 0.08210    | 0.01197    | 0.62696    | 0.06100     | 0.03160    | 3.72057                   |
| 39     | 0.08210    | 0.01135    | 0.68474    | 0.06231     | 0.03487    | 3.88266                   |
| 40     | 0.08210    | 0.01444    | 0.56170    | 0.06699     | 0.03168    | 4.48757                   |
| 41     | 0.08210    | 0.01248    | 0.76263    | 0.07201     | 0.04235    | 5.18510                   |
| 42     | 0.08210    | 0.00418    | 0.36571    | 0.02503     | 0.01528    | 0.62640                   |
| 43     | 0.08210    | 0.00322    | 0.38732    | 0.02480     | 0.01947    | 0.61314                   |
| 44     | 0.08210    | 0.00420    | 0.49906    | 0.04388     | 0.04673    | 1.92543                   |
| 45     | 0.08210    | 0.00469    | 0.48941    | 0.04061     | 0.03584    | 1.64884                   |
| 46     | 0.08210    | 0.00296    | 0.39688    | 0.02521     | 0.02188    | 0.63547                   |

Tabela 6.2 Parâmetros básicos para a aplicação nas equações do transporte: W é a velocidade de queda das partículas (m/s), S é a declividade da linha de energia, U é a velocidade do fluxo (m/s), U\* é a velocidade de cisalhamento da superfície do leito (m/s), RH\* e T\* são, respectivamente, o raio hidráulico (m) e a tensão de cisalhamento (N/m<sup>2</sup>) referentes à velocidade de cisalhamento da superfície do leito.

| ENSAIO | W<br>(m/s) | S<br>(m/m) | U<br>(m/s) | U <sub>*</sub><br>(m/s) | RH <sub>*</sub><br>(m) | T <sub>*</sub><br>(N/m <sup>2</sup> ) |
|--------|------------|------------|------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 01     | 0.04748    | 0.00310    | 0.48040    | 0.05705                 | 0.10703                | 3.25492                               |
| 02     | 0.04748    | 0.00342    | 0.46512    | 0.06121                 | 0.11168                | 3.74691                               |
| 03     | 0.04748    | 0.00136    | 0.37501    | 0.04206                 | 0.13261                | 1.76926                               |
| 04     | 0.04748    | 0.00394    | 0.66855    | 0.05743                 | 0.08534                | 3.29841                               |
| 05     | 0.04748    | 0.00147    | 0.37854    | 0.04667                 | 0.15106                | 2.17039                               |
| 06     | 0.04748    | 0.00368    | 0.68053    | 0.05805                 | 0.09334                | 3.36954                               |
| 07     | 0.04748    | 0.00350    | 0.47628    | 0.06935                 | 0.14088                | 4.80964                               |
| 08     | 0.04748    | 0.00113    | 0.41868    | 0.04019                 | 0.14573                | 1.61542                               |
| 09     | 0.04748    | 0.00432    | 0.64418    | 0.06546                 | 0.10112                | 4.28532                               |
| 10     | 0.04748    | 0.00217    | 0.46163    | 0.05457                 | 0.13988                | 2.97766                               |
| 11     | 0.04748    | 0.00465    | 0.61997    | 0.06565                 | 0.09448                | 4.30970                               |
| 12     | 0.04748    | 0.00319    | 0.44190    | 0.06487                 | 0.13448                | 4.20896                               |
| 13     | 0.04748    | 0.00154    | 0.32545    | 0.04880                 | 0.15765                | 2.38163                               |
| 14     | 0.04748    | 0.00401    | 0.58133    | 0.05881                 | 0.08793                | 3.45896                               |
| 15     | 0.04748    | 0.00276    | 0.39529    | 0.05533                 | 0.11385                | 3.06093                               |
| 16     | 0.04748    | 0.00391    | 0.58415    | 0.05357                 | 0.07481                | 2.86940                               |
| 17     | 0.04748    | 0.00244    | 0.38975    | 0.04768                 | 0.09498                | 2.27354                               |
| 18     | 0.04748    | 0.00506    | 0.52931    | 0.05927                 | 0.07078                | 3.51318                               |
| 19     | 0.04748    | 0.00250    | 0.37705    | 0.04400                 | 0.07894                | 1.93595                               |
| 20     | 0.04748    | 0.00440    | 0.76753    | 0.06287                 | 0.09156                | 3.95212                               |
| 21     | 0.04748    | 0.00112    | 0.36220    | 0.04609                 | 0.19334                | 2.12422                               |
| 22     | 0.04748    | 0.00130    | 0.27529    | 0.04139                 | 0.13434                | 1.71325                               |
| 23     | 0.04748    | 0.00193    | 0.30237    | 0.04334                 | 0.09922                | 1.87850                               |
| 24     | 0.04748    | 0.00098    | 0.27280    | 0.03574                 | 0.13286                | 1.27728                               |
| 25     | 0.04748    | 0.00115    | 0.29484    | 0.04083                 | 0.14779                | 1.66726                               |
| 26     | 0.04748    | 0.00067    | 0.27184    | 0.03441                 | 0.18010                | 1.18376                               |
| 27     | 0.04748    | 0.00080    | 0.26812    | 0.04088                 | 0.21299                | 1.67151                               |
| 28     | 0.04748    | 0.00542    | 0.50737    | 0.05624                 | 0.05948                | 3.16251                               |
| 29     | 0.04748    | 0.00493    | 0.59058    | 0.05503                 | 0.06262                | 3.02829                               |
| 30     | 0.04748    | 0.00499    | 0.61720    | 0.05919                 | 0.07158                | 3.50392                               |
| 31     | 0.04748    | 0.00538    | 0.64368    | 0.06501                 | 0.08008                | 4.22660                               |
| 32     | 0.08210    | 0.00334    | 0.37705    | 0.05126                 | 0.08020                | 2.62767                               |
| 33     | 0.08210    | 0.00254    | 0.42105    | 0.05112                 | 0.10489                | 2.61353                               |
| 34     | 0.08210    | 0.00401    | 0.42567    | 0.05905                 | 0.08865                | 3.40725                               |
| 35     | 0.08210    | 0.00276    | 0.41626    | 0.05808                 | 0.12459                | 3.37335                               |
| 36     | 0.08210    | 0.00292    | 0.43857    | 0.06216                 | 0.13480                | 3.86359                               |
| 37     | 0.08210    | 0.01017    | 0.47161    | 0.12148                 | 0.14793                | 14.75847                              |
| 38     | 0.08210    | 0.01197    | 0.62696    | 0.08478                 | 0.06121                | 7.18714                               |
| 39     | 0.08210    | 0.01135    | 0.68474    | 0.08621                 | 0.06675                | 7.43261                               |
| 40     | 0.08210    | 0.01444    | 0.56170    | 0.08848                 | 0.05527                | 7.82941                               |
| 41     | 0.08210    | 0.01248    | 0.76263    | 0.09235                 | 0.06966                | 8.52889                               |
| 42     | 0.08210    | 0.00418    | 0.36571    | 0.05856                 | 0.08364                | 3.42953                               |
| 43     | 0.08210    | 0.00322    | 0.38732    | 0.06069                 | 0.11661                | 3.68354                               |
| 44     | 0.08210    | 0.00420    | 0.49906    | 0.07847                 | 0.14943                | 6.15690                               |
| 45     | 0.08210    | 0.00469    | 0.48941    | 0.07517                 | 0.12283                | 5.65126                               |
| 46     | 0.08210    | 0.00296    | 0.39688    | 0.06187                 | 0.13185                | 3.82848                               |

Tabela 6.3 Parâmetros básicos para a aplicação nas equações de transporte: W é a velocidade de queda das partículas (m/s), S é a declividade da linha de energia, U é a velocidade do fluxo (m/s), U<sub>\*</sub> é a velocidade de cisalhamento do leito (m/s), RH<sub>\*</sub> e T<sub>\*</sub> são, respectivamente, o raio hidráulico (m) e a tensão de cisalhamento (N/m<sup>2</sup>) referentes à velocidade de cisalhamento do leito.

| ENSAIO | MULLER  | HANSEN  | RIJN    | YANG    | ZANKE   | VOLLMERS | BAGNOLD | EINSTEIN | LAURSEN | Q. MED  |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|
| 01     | 0.01031 | 0.02065 | 0.01504 | 0.02358 | 0.00137 | 0.00997  | 0.01150 | 0.06710  | 0.00913 | 0.02294 |
| 02     | 0.00980 | 0.03599 | 0.01294 | 0.02642 | 0.00368 | 0.02713  | 0.01604 | 0.07890  | 0.00813 | 0.02894 |
| 03     | 0.00237 | 0.00212 | 0.00375 | 0.00272 | 0.00000 | 0.00002  | 0.00194 | 0.03405  | 0.00171 | 0.00910 |
| 04     | 0.03045 | 0.02005 | 0.07255 | 0.06811 | 0.00172 | 0.01385  | 0.02044 | 0.07593  | 0.03615 | 0.00828 |
| 05     | 0.00263 | 0.00496 | 0.00365 | 0.00429 | 0.00000 | 0.00030  | 0.00288 | 0.03533  | 0.00168 | 0.00200 |
| 06     | 0.03099 | 0.02249 | 0.07377 | 0.07217 | 0.00192 | 0.01474  | 0.02144 | 0.07809  | 0.03672 | 0.07778 |
| 07     | 0.01070 | 0.10069 | 0.01305 | 0.03878 | 0.01803 | 0.13772  | 0.03870 | 0.17911  | 0.00835 | 0.02174 |
| 08     | 0.00339 | 0.00154 | 0.00596 | 0.00329 | 0.00000 | 0.00000  | 0.00179 | 0.03415  | 0.00292 | 0.00836 |
| 09     | 0.02870 | 0.05827 | 0.05731 | 0.08316 | 0.00935 | 0.07898  | 0.03727 | 0.14320  | 0.03168 | 0.07480 |
| 10     | 0.00742 | 0.01608 | 0.01038 | 0.01629 | 0.00051 | 0.00351  | 0.00763 | 0.04671  | 0.00609 | 0.01353 |
| 11     | 0.02672 | 0.05820 | 0.05109 | 0.07645 | 0.00984 | 0.08766  | 0.03677 | 0.14844  | 0.02892 | 0.07846 |
| 12     | 0.00796 | 0.05970 | 0.00926 | 0.02561 | 0.00658 | 0.04554  | 0.01823 | 0.11051  | 0.00502 | 0.00915 |
| 13     | 0.00123 | 0.00710 | 0.00149 | 0.00277 | 0.00003 | 0.00054  | 0.00276 | 0.03583  | 0.00024 | 0.00058 |
| 14     | 0.02003 | 0.02435 | 0.03960 | 0.04826 | 0.00239 | 0.01933  | 0.01902 | 0.08675  | 0.02216 | 0.07010 |
| 15     | 0.00490 | 0.01662 | 0.00579 | 0.01124 | 0.00004 | 0.00611  | 0.00756 | 0.05602  | 0.00339 | 0.02359 |
| 16     | 0.02006 | 0.01114 | 0.04415 | 0.03916 | 0.00071 | 0.00622  | 0.01272 | 0.05566  | 0.02324 | 0.06458 |
| 17     | 0.00428 | 0.00494 | 0.00590 | 0.00654 | 0.00006 | 0.00090  | 0.00398 | 0.03486  | 0.00331 | 0.00792 |
| 18     | 0.01778 | 0.02390 | 0.03086 | 0.03999 | 0.00290 | 0.02666  | 0.01809 | 0.09703  | 0.01810 | 0.06143 |
| 19     | 0.00300 | 0.00246 | 0.00566 | 0.00480 | 0.00003 | 0.00062  | 0.00343 | 0.03418  | 0.00310 | 0.00918 |
| 20     | 0.04614 | 0.04127 | 0.12576 | 0.12475 | 0.00517 | 0.04250  | 0.03700 | 0.11471  | 0.05891 | 0.09947 |
| 21     | 0.00168 | 0.00491 | 0.00244 | 0.00292 | 0.00000 | 0.00011  | 0.00223 | 0.03622  | 0.00079 | 0.00171 |
| 22     | 0.00020 | 0.00188 | 0.00046 | 0.00046 | 0.00000 | 0.00000  | 0.00117 | 0.03386  | 0.00000 | 0.00005 |
| 23     | 0.00098 | 0.00239 | 0.00136 | 0.00140 | 0.00000 | 0.00013  | 0.00182 | 0.03358  | 0.00025 | 0.00007 |
| 24     | 0.00006 | 0.00060 | 0.00045 | 0.00009 | 0.00000 | 0.00000  | 0.00069 | 0.03294  | 0.00000 | 0.00002 |
| 25     | 0.00038 | 0.00175 | 0.00078 | 0.00058 | 0.00000 | 0.00000  | 0.00114 | 0.03412  | 0.00000 | 0.00003 |
| 26     | 0.00000 | 0.00050 | 0.00027 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000  | 0.00050 | 0.03437  | 0.00000 | 0.00002 |
| 27     | 0.00000 | 0.00202 | 0.00012 | 0.00015 | 0.00000 | 0.00000  | 0.00080 | 0.03614  | 0.00000 | 0.00004 |
| 28     | 0.01624 | 0.01407 | 0.02869 | 0.03199 | 0.00157 | 0.01506  | 0.01446 | 0.07760  | 0.01661 | 0.07291 |
| 29     | 0.02399 | 0.01202 | 0.05279 | 0.04605 | 0.00113 | 0.01049  | 0.01555 | 0.06746  | 0.02743 | 0.07605 |
| 30     | 0.02726 | 0.02375 | 0.05888 | 0.06154 | 0.00287 | 0.02598  | 0.02305 | 0.09636  | 0.03116 | 0.08868 |
| 31     | 0.03163 | 0.05101 | 0.06660 | 0.08572 | 0.00894 | 0.08641  | 0.03854 | 0.14689  | 0.03612 | 0.09927 |
| 32     | 0.00128 | 0.00093 | 0.00368 | 0.00384 | 0.00000 | 0.00000  | 0.00355 | 0.09505  | 0.00072 | 0.01392 |
| 33     | 0.00228 | 0.00104 | 0.00563 | 0.00529 | 0.00000 | 0.00000  | 0.00328 | 0.09495  | 0.00193 | 0.01660 |
| 34     | 0.00411 | 0.00303 | 0.00694 | 0.01051 | 0.00000 | 0.00051  | 0.00762 | 0.09816  | 0.00306 | 0.02217 |
| 35     | 0.00232 | 0.00312 | 0.00459 | 0.00847 | 0.00000 | 0.00022  | 0.00644 | 0.09835  | 0.00124 | 0.01404 |
| 36     | 0.00357 | 0.00551 | 0.00583 | 0.01233 | 0.00000 | 0.00053  | 0.00800 | 0.09931  | 0.00213 | 0.02329 |
| 37     | 0.01389 | 0.02817 | 0.00907 | 0.09211 | 0.97507 | 3.11947  | 0.17144 | 1.00589  | 0.00575 | 0.01046 |
| 38     | 0.04033 | 0.04492 | 0.06422 | 0.07410 | 0.04015 | 0.12568  | 0.07092 | 0.30584  | 0.03948 | 0.16921 |
| 39     | 0.05117 | 0.05328 | 0.08856 | 0.12169 | 0.04602 | 0.14068  | 0.08193 | 0.31759  | 0.05271 | 0.19260 |
| 40     | 0.03152 | 0.06016 | 0.04208 | 0.07780 | 0.06017 | 0.20588  | 0.07449 | 0.35700  | 0.02815 | 0.17765 |
| 41     | 0.07292 | 0.09313 | 0.13809 | 0.18254 | 0.09208 | 0.30020  | 0.12416 | 0.40778  | 0.07957 | 0.29980 |
| 42     | 0.00137 | 0.00276 | 0.00204 | 0.00574 | 0.00000 | 0.00039  | 0.00597 | 0.09774  | 0.00016 | 0.01247 |
| 43     | 0.00157 | 0.00428 | 0.00305 | 0.00737 | 0.00000 | 0.00035  | 0.00631 | 0.09838  | 0.00019 | 0.00929 |
| 44     | 0.00955 | 0.03547 | 0.01101 | 0.03800 | 0.01000 | 0.02000  | 0.02746 | 0.16551  | 0.00622 | 0.02531 |
| 45     | 0.00951 | 0.02352 | 0.01147 | 0.03258 | 0.00544 | 0.01338  | 0.02294 | 0.14108  | 0.00659 | 0.03371 |
| 46     | 0.00172 | 0.00526 | 0.00321 | 0.00039 | 0.00000 | 0.00043  | 0.00673 | 0.09896  | 0.00025 | 0.00882 |

Tabela 6.4 Quantidade de sedimentos transportada pelo fluxo, calculada pelas equações de transporte utilizando o ralo hidráulico da superfície do leito, e a quantidade medida em laboratório (todos os valores em Kg/s).

| ENSAIO | MULLER  | HANSEN  | RIJN    | YANG    | ZANKE   | VOLLMERS | BAGNOLD | EINSTEIN | LAURSEN | Q.MED   |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|
| 01     | 0.10706 | 0.14183 | 0.24714 | 0.02650 | 0.02174 | 0.20314  | 0.03609 | 0.06718  | 0.07497 | 0.02294 |
| 02     | 0.13456 | 0.20404 | 0.33328 | 0.02879 | 0.03012 | 0.29166  | 0.03983 | 0.09890  | 0.08820 | 0.02894 |
| 03     | 0.03818 | 0.03276 | 0.06345 | 0.00532 | 0.00616 | 0.04147  | 0.01425 | 0.03405  | 0.02325 | 0.00910 |
| 04     | 0.10941 | 0.13755 | 0.26422 | 0.07031 | 0.02023 | 0.21020  | 0.05730 | 0.07593  | 0.10987 | 0.08828 |
| 05     | 0.05479 | 0.05706 | 0.10033 | 0.00716 | 0.01088 | 0.07168  | 0.01776 | 0.03533  | 0.03109 | 0.00208 |
| 06     | 0.11328 | 0.14803 | 0.27620 | 0.07463 | 0.02230 | 0.22206  | 0.06002 | 0.07809  | 0.11339 | 0.07778 |
| 07     | 0.20067 | 0.40509 | 0.56765 | 0.04038 | 0.05800 | 0.55221  | 0.05274 | 0.17911  | 0.12364 | 0.02174 |
| 08     | 0.03247 | 0.02676 | 0.05241 | 0.00656 | 0.00537 | 0.03257  | 0.01498 | 0.03415  | 0.02219 | 0.00836 |
| 09     | 0.16696 | 0.27766 | 0.45627 | 0.00421 | 0.03870 | 0.41129  | 0.07065 | 0.14320  | 0.14951 | 0.07488 |
| 10     | 0.09251 | 0.12212 | 0.20214 | 0.02013 | 0.02108 | 0.16147  | 0.03135 | 0.04671  | 0.06042 | 0.01353 |
| 11     | 0.16848 | 0.27631 | 0.46103 | 0.07734 | 0.03759 | 0.41731  | 0.06735 | 0.14844  | 0.14699 | 0.07846 |
| 12     | 0.16219 | 0.20694 | 0.42488 | 0.02791 | 0.04303 | 0.39267  | 0.04185 | 0.11851  | 0.09575 | 0.00915 |
| 13     | 0.06375 | 0.07212 | 0.12061 | 0.00497 | 0.01352 | 0.09048  | 0.01608 | 0.03583  | 0.03034 | 0.00058 |
| 14     | 0.11821 | 0.15623 | 0.28775 | 0.05055 | 0.02253 | 0.23753  | 0.04940 | 0.08675  | 0.10213 | 0.07010 |
| 15     | 0.09681 | 0.12349 | 0.21292 | 0.01381 | 0.01940 | 0.17338  | 0.02636 | 0.05602  | 0.05611 | 0.02359 |
| 16     | 0.00703 | 0.09346 | 0.19430 | 0.04198 | 0.01383 | 0.14673  | 0.04132 | 0.05566  | 0.00066 | 0.06458 |
| 17     | 0.05893 | 0.05593 | 0.11174 | 0.00917 | 0.00906 | 0.08016  | 0.01923 | 0.03406  | 0.03701 | 0.00792 |
| 18     | 0.12123 | 0.15252 | 0.29651 | 0.04158 | 0.02005 | 0.24722  | 0.04429 | 0.09703  | 0.09099 | 0.06143 |
| 19     | 0.04471 | 0.03550 | 0.07867 | 0.00691 | 0.00568 | 0.05260  | 0.01570 | 0.03418  | 0.02929 | 0.00918 |
| 20     | 0.14663 | 0.22054 | 0.39219 | 0.12463 | 0.03133 | 0.33436  | 0.08366 | 0.11471  | 0.16077 | 0.09947 |
| 21     | 0.05248 | 0.05714 | 0.09453 | 0.00574 | 0.01221 | 0.06711  | 0.01638 | 0.03622  | 0.02744 | 0.00171 |
| 22     | 0.03607 | 0.03034 | 0.05723 | 0.00175 | 0.00560 | 0.03008  | 0.00940 | 0.03386  | 0.01636 | 0.00005 |
| 23     | 0.04242 | 0.03514 | 0.07146 | 0.00304 | 0.00588 | 0.04858  | 0.01159 | 0.03358  | 0.02166 | 0.00007 |
| 24     | 0.02106 | 0.01451 | 0.02926 | 0.00106 | 0.00268 | 0.01733  | 0.00693 | 0.03294  | 0.01046 | 0.00002 |
| 25     | 0.03436 | 0.02907 | 0.05404 | 0.00211 | 0.00561 | 0.03543  | 0.00996 | 0.03412  | 0.01652 | 0.00003 |
| 26     | 0.01821 | 0.01301 | 0.02443 | 0.00086 | 0.00270 | 0.01408  | 0.00639 | 0.03437  | 0.00878 | 0.00002 |
| 27     | 0.03452 | 0.03217 | 0.05384 | 0.00138 | 0.00725 | 0.03567  | 0.00888 | 0.03614  | 0.01415 | 0.00004 |
| 28     | 0.10213 | 0.11134 | 0.23710 | 0.03369 | 0.01537 | 0.18861  | 0.03769 | 0.07760  | 0.08413 | 0.07291 |
| 29     | 0.09512 | 0.10146 | 0.21953 | 0.04788 | 0.01436 | 0.16865  | 0.04426 | 0.06746  | 0.09099 | 0.07685 |
| 30     | 0.12072 | 0.15203 | 0.29935 | 0.06275 | 0.02099 | 0.24555  | 0.05442 | 0.09636  | 0.11445 | 0.08868 |
| 31     | 0.16331 | 0.25103 | 0.44570 | 0.08595 | 0.03316 | 0.39703  | 0.06960 | 0.14689  | 0.15277 | 0.09927 |
| 32     | 0.06148 | 0.02879 | 0.09168 | 0.00701 | 0.01854 | 0.04944  | 0.02604 | 0.09505  | 0.03295 | 0.01392 |
| 33     | 0.06085 | 0.03093 | 0.09099 | 0.00976 | 0.02071 | 0.04872  | 0.02992 | 0.09495  | 0.03475 | 0.01660 |
| 34     | 0.10362 | 0.06032 | 0.17494 | 0.01452 | 0.03992 | 0.10584  | 0.04050 | 0.09016  | 0.05543 | 0.02217 |
| 35     | 0.09763 | 0.06171 | 0.16062 | 0.01281 | 0.04369 | 0.09688  | 0.03804 | 0.09835  | 0.04865 | 0.01484 |
| 36     | 0.12426 | 0.08872 | 0.21790 | 0.01762 | 0.06388 | 0.13887  | 0.04667 | 0.09931  | 0.06154 | 0.02329 |
| 37     | 1.10828 | 2.60050 | 3.97483 | 0.09205 | 1.29103 | 4.37410  | 0.19589 | 1.00589  | 0.43526 | 0.01046 |
| 38     | 0.35328 | 0.32565 | 0.88014 | 0.09373 | 0.18092 | 0.69831  | 0.13700 | 0.30584  | 0.24379 | 0.16921 |
| 39     | 0.37310 | 0.36467 | 0.94989 | 0.12049 | 0.20193 | 0.76126  | 0.15685 | 0.31759  | 0.27494 | 0.19260 |
| 40     | 0.40589 | 0.38952 | 1.05073 | 0.07779 | 0.20932 | 0.86999  | 0.12996 | 0.35700  | 0.25136 | 0.17765 |
| 41     | 0.46588 | 0.52173 | 1.28170 | 0.17901 | 0.27752 | 1.08328  | 0.20422 | 0.40778  | 0.36927 | 0.29900 |
| 42     | 0.10057 | 0.05679 | 0.16638 | 0.00880 | 0.03716 | 0.10124  | 0.03267 | 0.09774  | 0.04704 | 0.01247 |
| 43     | 0.11423 | 0.07535 | 0.19459 | 0.01145 | 0.05210 | 0.12240  | 0.03780 | 0.09830  | 0.05214 | 0.00929 |
| 44     | 0.27416 | 0.29319 | 0.60951 | 0.04335 | 0.20047 | 0.46864  | 0.08701 | 0.16551  | 0.13372 | 0.02531 |
| 45     | 0.23784 | 0.22319 | 0.50707 | 0.03746 | 0.14700 | 0.37541  | 0.07062 | 0.14108  | 0.12019 | 0.03371 |
| 46     | 0.12228 | 0.08613 | 0.21192 | 0.01289 | 0.06133 | 0.13556  | 0.04056 | 0.09096  | 0.05528 | 0.00882 |

Tabela 6.5 Quantidade de sedimentos transportada pelo fluxo, calculada pelas equações de transporte usando o ralo hidráulico de Ielto, e a quantidade medida em laboratório (em Kg/s).

FORMAÇÃO DO LEITO: RIPLES

| ENSAIO | MULLER  | HANSEN | RIJN    | YANG  | ZANKE  | VOLLMERS | BAGNOLD | EINSTEIN | LAURSEN |
|--------|---------|--------|---------|-------|--------|----------|---------|----------|---------|
| * 13   | 2,13    | 12,24  | 2,57    | 4,78  | 0,05   | 0,93     | 4,75    | 61,78    | 0,42    |
| **     | 109,92  | 127,23 | 207,94  | 8,57  | 23,30  | 156,00   | 27,72   | -        | 52,31   |
| * 22   | 4,08    | 37,61  | 9,15    | 9,26  | 0,00   | 0,00     | 23,42   | 677,10   | 0,00    |
| **     | 721,35  | 619,57 | 1144,56 | 35,09 | 112,05 | 761,64   | 187,99  | -        | 327,14  |
| * 23   | 13,94   | 34,20  | 19,47   | 19,96 | 0,00   | 1,80     | 26,01   | 479,69   | 3,55    |
| **     | 605,99  | 511,09 | 1020,89 | 43,46 | 84,05  | 694,03   | 165,50  | -        | 309,49  |
| * 24   | 2,80    | 27,18  | 20,24   | 3,89  | 0,00   | 0,00     | 31,31   | 1477,40  | 0,00    |
| **     | 957,49  | 677,41 | 1329,87 | 48,09 | 121,88 | 787,50   | 314,96  | -        | 475,64  |
| * 25   | 12,61   | 58,46  | 25,97   | 19,45 | 0,00   | 0,00     | 37,94   | 1137,43  | 0,00    |
| **     | 1145,40 | 994,15 | 1907,35 | 70,40 | 187,03 | 1180,94  | 332,00  | -        | 550,60  |
| * 26   | 0,00    | 33,39  | 17,75   | 30,27 | 0,00   | 0,00     | 33,29   | 2291,51  | 0,00    |
| **     | 1214,05 | 897,51 | 1628,82 | 57,10 | 180,12 | 938,79   | 426,27  | -        | 585,24  |
| * 27   | 0,00    | 50,48  | 3,01    | 3,71  | 0,00   | 0,00     | 19,92   | 993,38   | 0,00    |
| **     | 862,95  | 827,56 | 1345,95 | 34,39 | 181,37 | 891,37   | 691,70  | -        | 353,64  |

\* ....refere-se aos valores calculados com raio hidráulico da superfície do leito

\*\* ....refere-se aos valores calculados com raio hidráulico do leito

Tabela 6.6 Relação entre a quantidade de sedimentos calculada e a medida em laboratório, para ripples.



FORMAÇÃO DO LEITO: DUNAS

| ENSAIO | MULLER | HANSEN | RIJN  | YANG | ZANKE | VOLLMERS | BAGNOLD | EINSTEIN | LAURSEN |
|--------|--------|--------|-------|------|-------|----------|---------|----------|---------|
| * 01   | 0,45   | 0,90   | 0,66  | 1,03 | 0,06  | 0,43     | 0,50    | 2,93     | 0,40    |
| **     | 4,67   | 0,33   | 10,77 | 1,16 | 0,95  | 6,86     | 1,57    | -        | 3,27    |
| * 02   | 0,34   | 1,24   | 0,45  | 0,91 | 0,13  | 0,94     | 0,55    | 3,42     | 0,28    |
| **     | 4,65   | 7,20   | 11,52 | 0,99 | 1,04  | 10,06    | 1,38    | -        | 3,05    |
| * 03   | 0,26   | 0,23   | 0,41  | 0,30 | 0,00  | 0,00     | 0,21    | 3,74     | 0,19    |
| **     | 4,20   | 3,72   | 6,97  | 0,58 | 0,68  | 4,56     | 1,57    | -        | 2,55    |
| * 05   | 1,27   | 2,39   | 1,76  | 2,06 | 0,00  | 0,15     | 1,38    | 16,98    | 0,81    |
| **     | 26,34  | 26,26  | 48,24 | 3,44 | 5,23  | 34,46    | 8,54    | -        | 14,95   |
| * 07   | 0,49   | 4,63   | 0,60  | 1,78 | 0,83  | 6,33     | 1,41    | 8,24     | 0,38    |
| **     | 9,23   | 19,02  | 26,11 | 1,86 | 2,70  | 25,40    | 2,43    | -        | 5,69    |
| * 08   | 0,41   | 0,18   | 0,71  | 0,39 | 0,00  | 0,00     | 0,21    | 4,88     | 0,35    |
| **     | 3,88   | 3,34   | 6,27  | 0,78 | 0,64  | 3,90     | 1,79    | -        | 2,65    |
| * 10   | 0,55   | 1,19   | 0,77  | 1,20 | 0,04  | 0,26     | 0,56    | 3,45     | 0,45    |
| **     | 6,84   | 9,29   | 14,94 | 1,49 | 1,56  | 11,93    | 2,32    | -        | 4,47    |
| * 12   | 0,87   | 6,52   | 1,01  | 2,80 | 0,72  | 4,98     | 1,99    | 12,95    | 0,64    |
| **     | 17,73  | 31,99  | 46,43 | 3,05 | 4,70  | 42,91    | 4,57    | -        | 10,46   |
| * 15   | 0,21   | 0,70   | 0,25  | 0,46 | 0,04  | 0,26     | 0,32    | 2,37     | 0,14    |
| **     | 4,10   | 5,34   | 9,03  | 0,59 | 0,82  | 7,35     | 1,12    | -        | 2,38    |
| * 17   | 0,54   | 0,62   | 0,75  | 0,83 | 0,01  | 0,11     | 0,50    | 4,40     | 0,42    |
| **     | 7,44   | 7,22   | 14,11 | 1,16 | 1,14  | 10,12    | 2,43    | -        | 4,67    |
| * 19   | 0,41   | 0,27   | 0,62  | 0,52 | 0,00  | 0,07     | 0,37    | 3,72     | 0,34    |
| **     | 4,87   | 3,95   | 8,57  | 0,75 | 0,62  | 5,73     | 1,71    | -        | 3,19    |
| * 21   | 0,99   | 2,87   | 1,42  | 1,71 | 0,00  | 0,07     | 1,31    | 21,18    | 0,46    |
| **     | 30,69  | 33,41  | 55,28 | 3,35 | 7,14  | 39,25    | 9,58    | -        | 16,05   |

Tabela 6.7 Relação entre a quantidade de sedimentos calculada e a medida em laboratório, para dunas.

| ENSAIO | MULLER | HANSEN | RIJN   | YANG | ZANKE  | VOLLMERS | BAGNOLD | EINSTEIN | LAURSEN |
|--------|--------|--------|--------|------|--------|----------|---------|----------|---------|
| * 32   | 0,09   | 0,07   | 0,26   | 0,25 | 0,00   | 0,00     | 0,26    | 6,83     | 0,05    |
| **     | 4,42   | 2,11   | 6,59   | 0,50 | 1,33   | 3,55     | 1,87    | -        | 2,37    |
| * 33   | 0,14   | 0,06   | 0,34   | 0,32 | 0,00   | 0,00     | 0,20    | 5,72     | 0,12    |
| **     | 3,67   | 1,91   | 5,48   | 0,59 | 1,25   | 2,94     | 1,80    | -        | 2,09    |
| * 34   | 0,19   | 0,14   | 0,31   | 0,47 | 0,00   | 0,02     | 0,34    | 4,43     | 0,14    |
| **     | 4,67   | 2,77   | 7,89   | 0,65 | 1,80   | 4,77     | 1,83    | -        | 2,50    |
| * 35   | 0,16   | 0,21   | 0,31   | 0,57 | 0,00   | 0,01     | 0,43    | 6,63     | 0,08    |
| **     | 6,58   | 4,26   | 10,82  | 0,86 | 2,94   | 6,53     | 2,56    | -        | 3,28    |
| * 36   | 0,15   | 0,24   | 0,25   | 0,53 | 0,00   | 0,02     | 0,34    | 4,26     | 0,09    |
| **     | 5,34   | 3,90   | 9,36   | 0,76 | 2,74   | 5,96     | 2,00    | -        | 2,64    |
| * 37   | 1,33   | 98,30  | 0,87   | 8,81 | 93,22  | 298,23   | 16,39   | 96,17    | 0,55    |
| **     | 105,95 | 250,93 | 380,00 | 8,80 | 123,43 | 410,17   | 18,73   | -        | 41,61   |
| * 42   | 0,11   | 0,22   | 0,23   | 0,46 | 0,00   | 0,03     | 0,48    | 7,84     | 0,01    |
| **     | 8,06   | 4,62   | 13,34  | 0,71 | 2,98   | 8,12     | 2,62    | -        | 3,77    |
| * 43   | 0,17   | 0,46   | 0,33   | 0,79 | 0,00   | 0,04     | 0,68    | 10,59    | 0,02    |
| **     | 12,30  | 8,26   | 20,95  | 1,23 | 5,61   | 13,17    | 4,07    | -        | 5,11    |
| * 44   | 0,38   | 1,40   | 0,43   | 1,50 | 0,40   | 0,82     | 1,09    | 6,54     | 0,25    |
| **     | 10,83  | 11,82  | 24,08  | 1,71 | 7,92   | 18,52    | 3,47    | -        | 5,28    |
| * 45   | 0,28   | 0,70   | 0,34   | 0,97 | 0,16   | 0,40     | 0,68    | 4,19     | 0,20    |
| **     | 7,08   | 6,75   | 15,04  | 1,11 | 4,36   | 11,14    | 2,33    | -        | 3,57    |
| * 46   | 0,20   | 0,60   | 0,36   | 0,95 | 0,00   | 0,05     | 0,76    | 11,22    | 0,03    |
| **     | 13,86  | 9,97   | 24,03  | 1,46 | 6,95   | 15,37    | 4,60    | -        | 6,27    |

\*....refere-se aos valores obtidos com o raio hidraulico da superficie do leito.

\*\*....refere-se aos valores obtidos com o raio hidraulico do leito.

Tabela 6.7 Relação entre a quantidade de sedimentos calculada e a medida em laboratório, para dunas.( Continuação).

FORMAÇÃO DO LEITO: LEITO PLANO

| ENSAIO | MULLER | HANSEN | RIJN | YANG | ZANKE | VOLLMERS | BAGNOLD | EINSTEIN | LAURSEN |
|--------|--------|--------|------|------|-------|----------|---------|----------|---------|
| * 04   | 0,34   | 0,23   | 0,82 | 0,77 | 0,02  | 0,16     | 0,23    | 0,86     | 0,41    |
| **     | 1,24   | 1,61   | 2,99 | 0,80 | 0,13  | 2,38     | 0,65    | -        | 1,24    |
| * 06   | 0,40   | 0,29   | 0,95 | 0,93 | 0,02  | 0,19     | 0,28    | 1,00     | 0,47    |
| **     | 1,46   | 1,98   | 3,55 | 0,96 | 0,29  | 2,85     | 0,77    | -        | 1,46    |
| * 09   | 0,38   | 0,78   | 0,77 | 1,11 | 0,12  | 1,05     | 0,50    | 1,91     | 0,42    |
| **     | 2,23   | 3,81   | 4,09 | 1,12 | 0,52  | 5,49     | 0,94    | -        | 2,00    |
| * 11   | 0,34   | 0,74   | 0,65 | 0,97 | 0,13  | 1,12     | 0,47    | 1,89     | 0,37    |
| **     | 2,15   | 3,61   | 5,68 | 0,99 | 0,48  | 5,32     | 0,86    | -        | 1,87    |
| * 14   | 0,30   | 0,35   | 0,56 | 0,69 | 0,03  | 0,28     | 0,27    | 1,24     | 0,32    |
| **     | 1,69   | 2,29   | 4,10 | 0,72 | 0,32  | 3,89     | 0,71    | -        | 1,46    |
| * 16   | 0,32   | 0,17   | 0,68 | 0,61 | 0,01  | 0,10     | 0,20    | 0,86     | 0,36    |
| **     | 1,35   | 1,49   | 3,01 | 0,65 | 0,21  | 2,27     | 0,64    | -        | 1,25    |
| * 18   | 0,29   | 0,39   | 0,50 | 0,65 | 0,05  | 0,43     | 0,31    | 1,58     | 0,29    |
| **     | 1,97   | 2,53   | 4,83 | 0,68 | 0,34  | 4,02     | 0,72    | -        | 1,61    |
| * 20   | 0,46   | 0,41   | 1,26 | 1,25 | 0,05  | 0,43     | 0,38    | 1,15     | 0,59    |
| **     | 1,47   | 2,30   | 3,94 | 1,25 | 0,31  | 3,36     | 0,84    | -        | 1,62    |
| * 28   | 0,22   | 0,20   | 0,39 | 0,44 | 0,02  | 0,21     | 0,20    | 1,06     | 0,23    |
| **     | 1,40   | 1,55   | 3,25 | 0,46 | 0,21  | 2,59     | 0,52    | -        | 1,15    |
| * 29   | 0,31   | 0,17   | 0,69 | 0,60 | 0,01  | 0,14     | 0,20    | 0,88     | 0,36    |
| **     | 1,24   | 1,35   | 2,86 | 0,62 | 0,19  | 2,19     | 0,58    | -        | 1,18    |
| * 30   | 0,31   | 0,27   | 0,66 | 0,69 | 0,03  | 0,29     | 0,26    | 1,09     | 0,35    |
| **     | 1,36   | 1,76   | 3,38 | 0,71 | 0,24  | 2,77     | 0,61    | -        | 1,29    |

Tabela 6.8 Relação entre a quantidade de sedimentos calculada e a medida em laboratório, para leito plano.

| ENSAIO  | MULLER | HANSEN | RIJN | YANG | ZANKE | VOLLHERS | BAGNOLD | EINSTEIN | LAURSEN |
|---------|--------|--------|------|------|-------|----------|---------|----------|---------|
| *<br>31 | 0,32   | 0,51   | 0,67 | 0,86 | 0,09  | 0,87     | 0,39    | 1,48     | 0,36    |
| **      | 1,65   | 2,59   | 4,49 | 0,87 | 0,33  | 4,00     | 0,70    | -        | 1,54    |
| *<br>38 | 0,24   | 0,27   | 0,38 | 0,56 | 0,24  | 0,74     | 0,42    | 1,81     | 0,23    |
| **      | 2,09   | 1,95   | 5,20 | 0,55 | 1,07  | 4,13     | 0,81    | -        | 1,44    |
| *<br>39 | 0,27   | 0,28   | 0,46 | 0,63 | 0,24  | 0,73     | 0,43    | 1,65     | 0,27    |
| **      | 1,94   | 1,92   | 4,93 | 0,63 | 1,05  | 3,95     | 0,81    | -        | 1,43    |
| *<br>40 | 0,18   | 0,34   | 0,24 | 0,44 | 0,34  | 1,16     | 0,42    | 2,01     | 0,16    |
| **      | 2,28   | 2,22   | 5,91 | 0,44 | 1,18  | 4,90     | 0,73    | -        | 1,41    |
| *<br>41 | 0,24   | 0,31   | 0,46 | 0,61 | 0,31  | 1,00     | 0,41    | 1,36     | 0,27    |
| **      | 1,55   | 1,77   | 4,28 | 0,60 | 0,93  | 3,61     | 0,68    | -        | 1,23    |

\*....refere-se aos valores obtidos com o raio hidraulico da superficie do leito.

\*\*....refere-se aos valores obtidos com o raio hidraulico do leito.

Tabela B.8 Relação entre a quantidade de sedimentos calculada e a medida em laboratório, para leito plano.(Continuação).

EQ DE M. PETER E MULLER - DUNAS

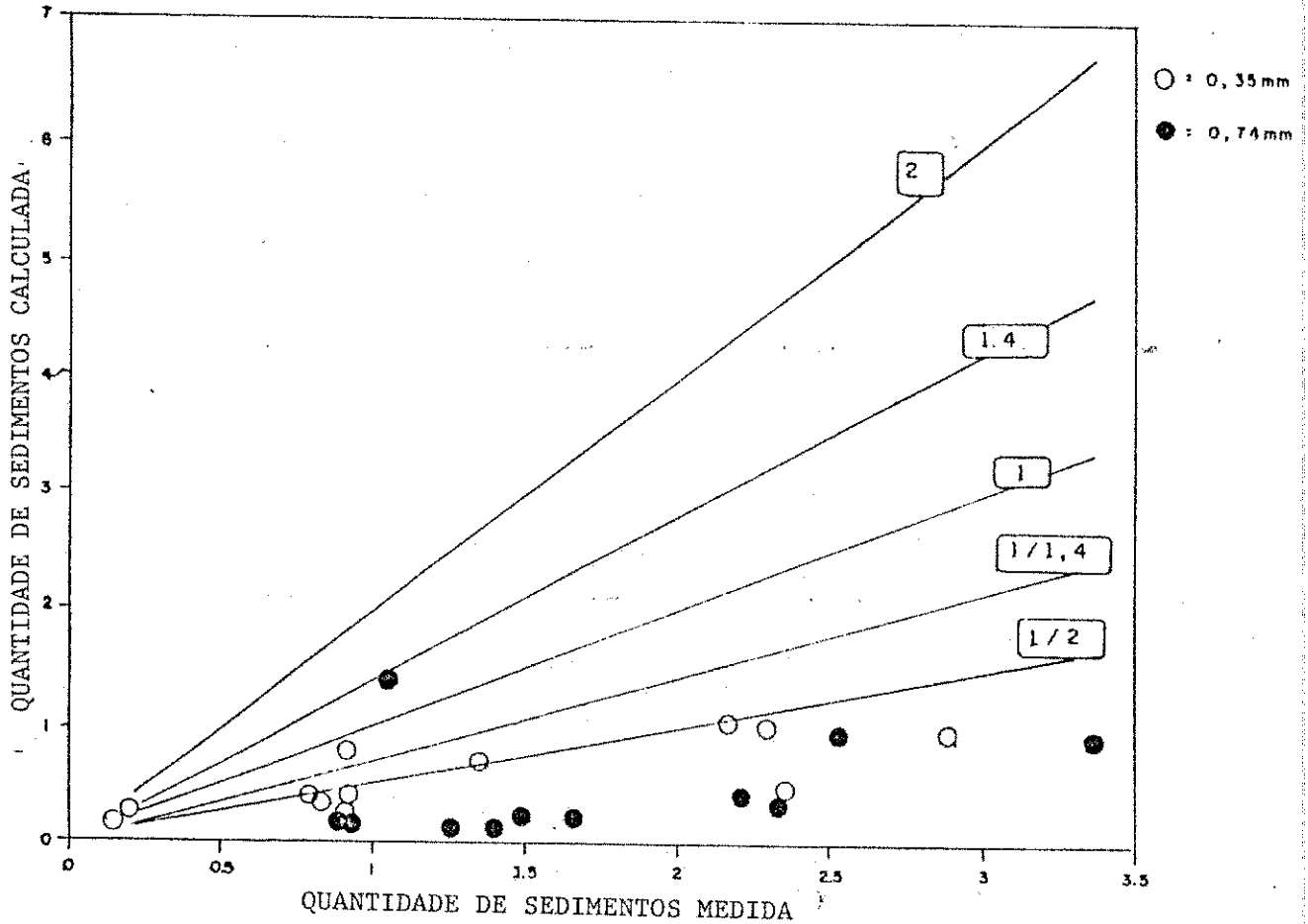


GRÁFICO DE DISPERSÃO 1 - refere-se à equação de E. Meyer-Peter e R. Muller. Retrata a correlação para dunas entre a quantidade de sedimentos medida e a calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

EQ DE E. HANSEN - DUNAS

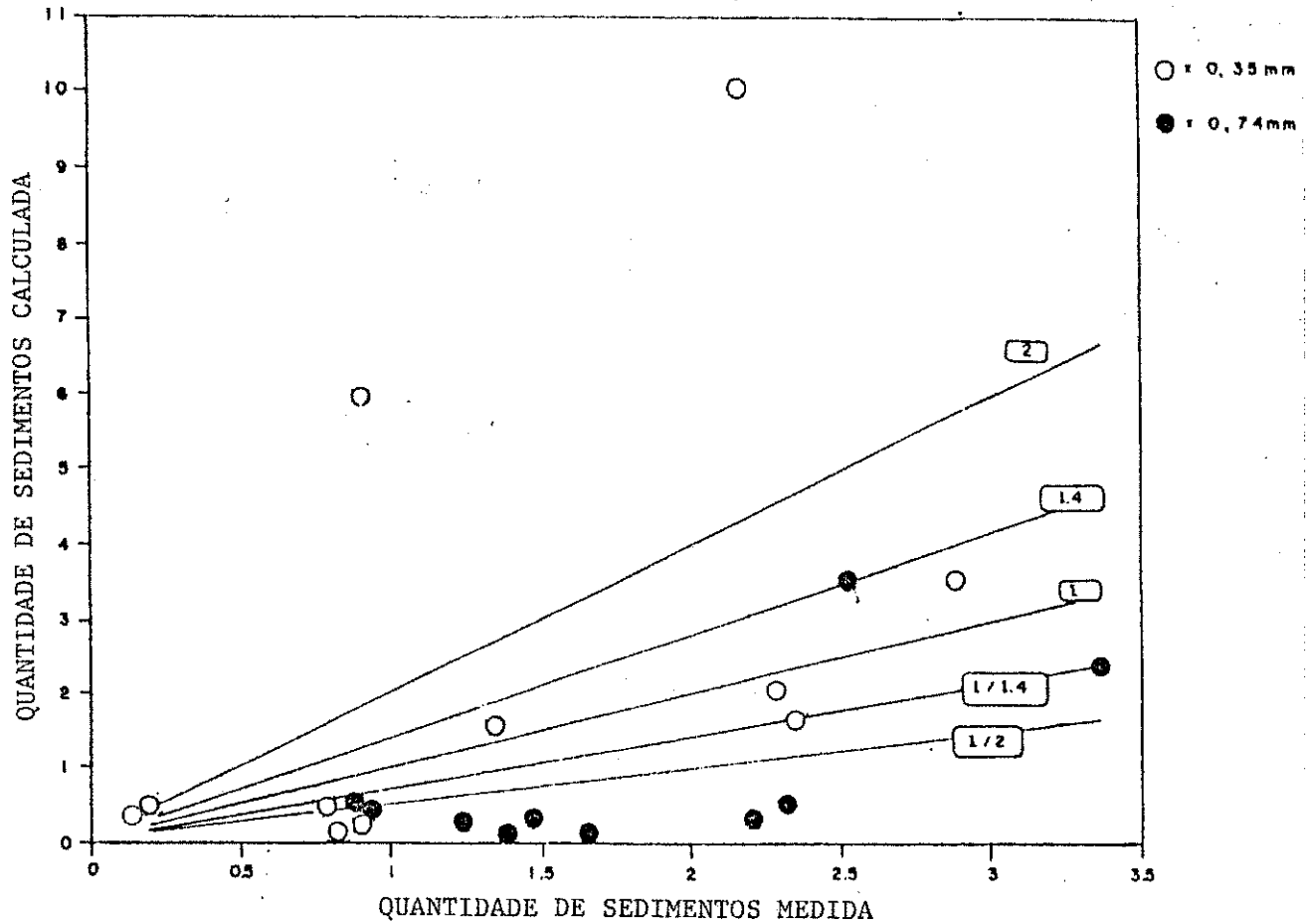


GRÁFICO DE DISPERSÃO 2 - refere-se à equação de F. Engelund e E. Hansen. Retrata a correlação para dunas entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

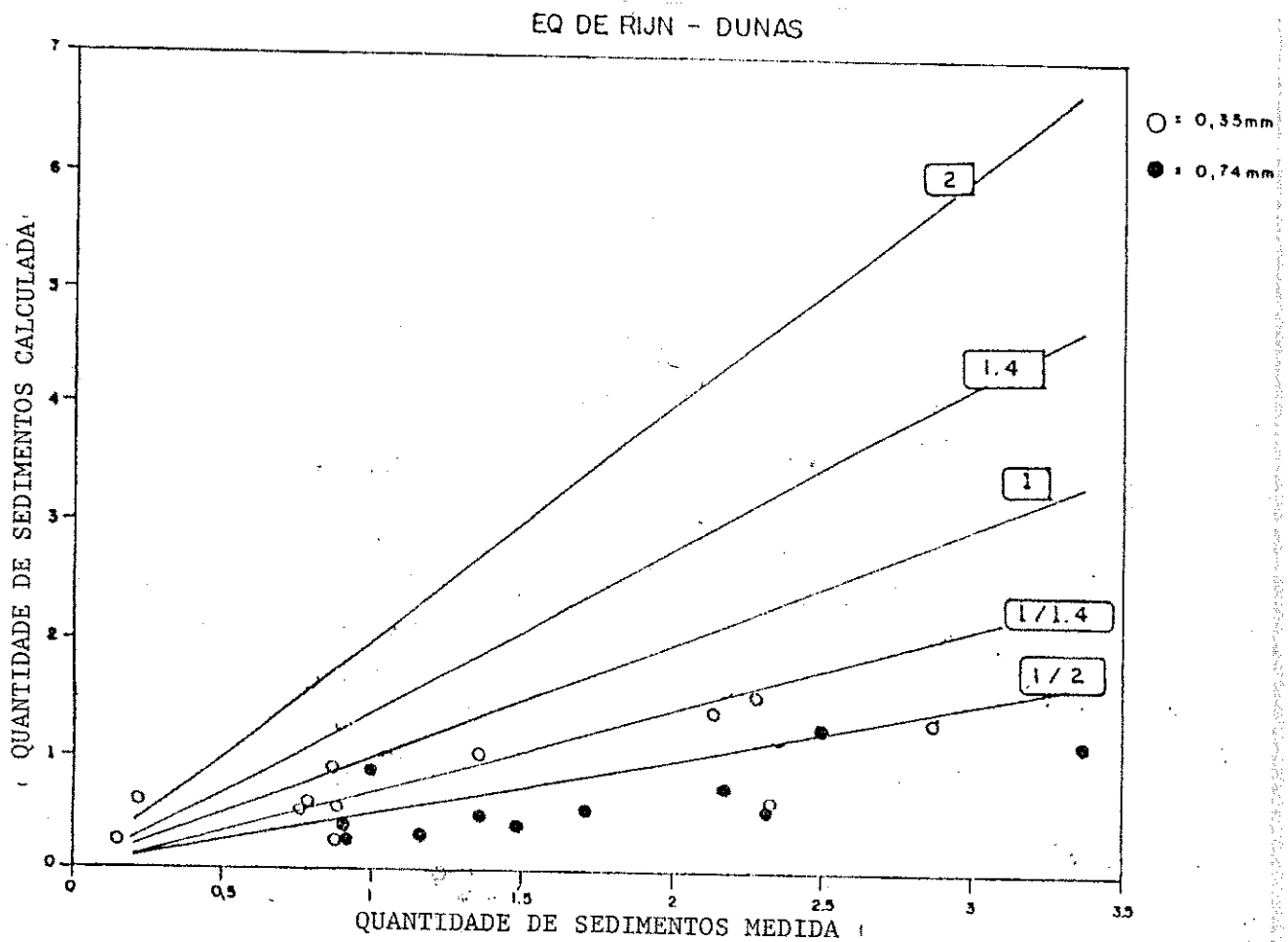


GRÁFICO DE DISPERSÃO 3 - refere-se à equação de Leo C. Van Rijn. Retrata a correlação para dunas entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

EQ DE YANG - DUNAS

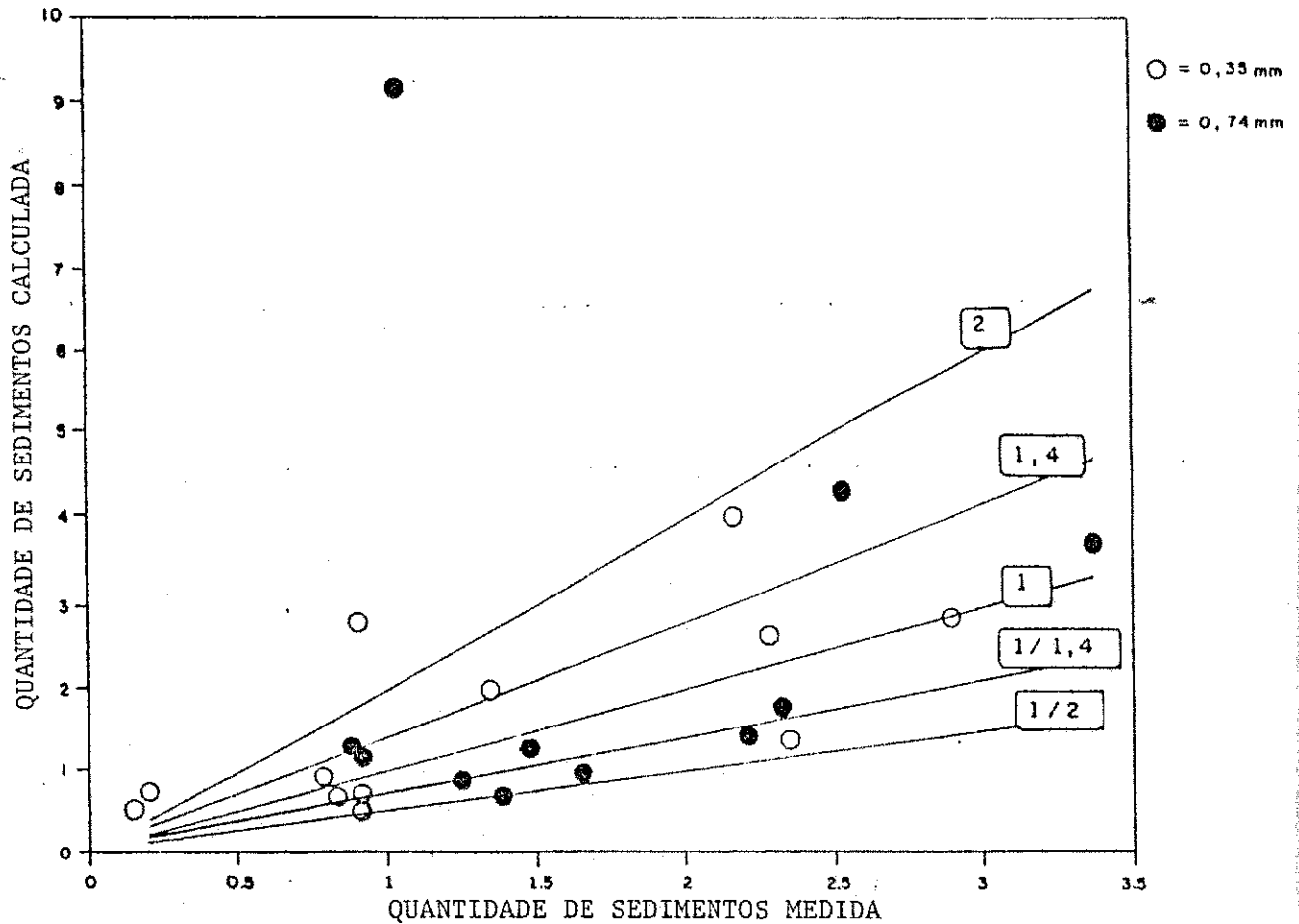


GRÁFICO DE DISPERSÃO 4 - refere-se à equação de C.T. Yang. Retrata a correlação para dunas entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.



EQ DE ZANKE - DUNAS

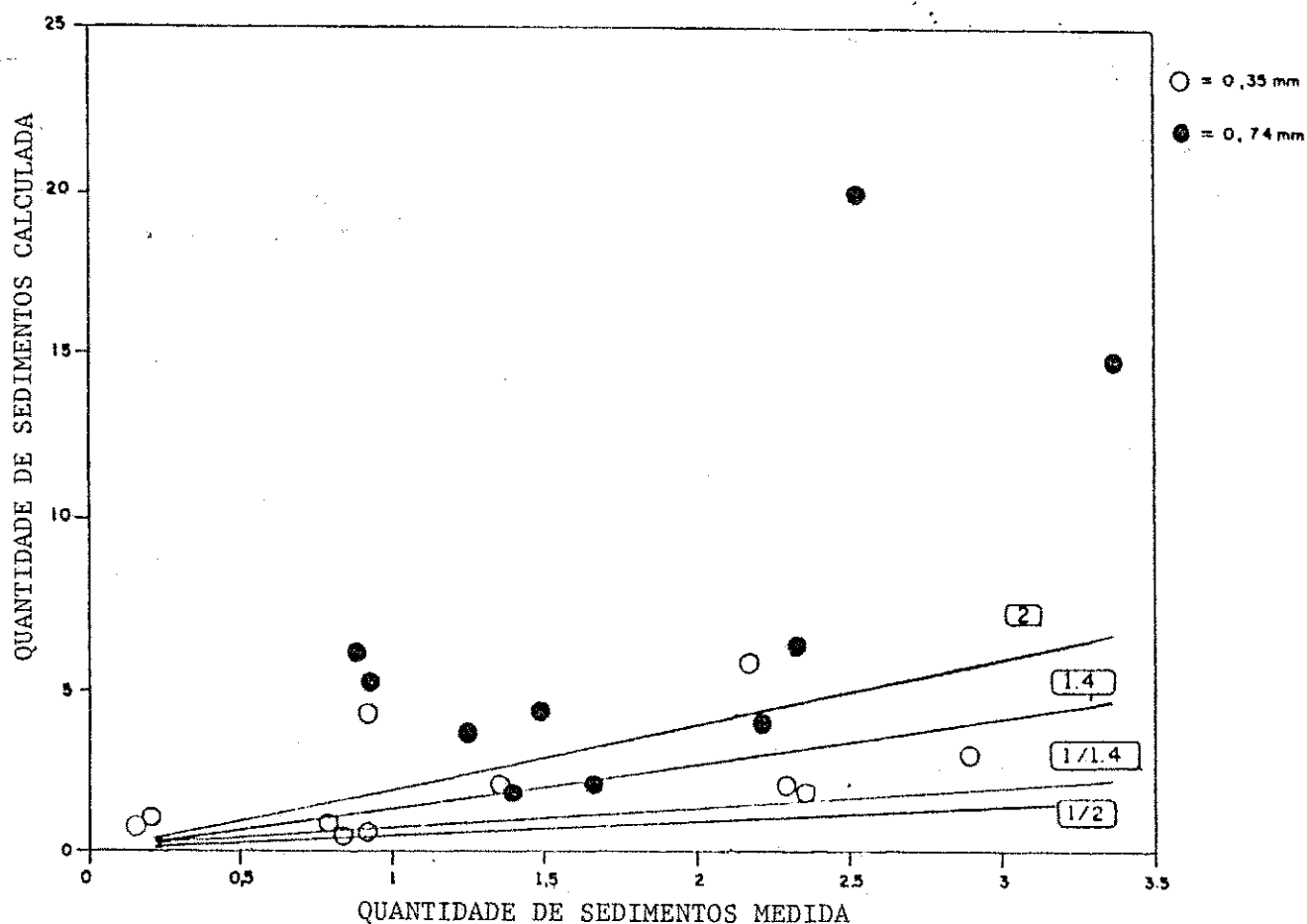


GRÁFICO DE DISPERSÃO 5 - refere-se à equação de U. Zanke. Retrata a correlação para dunas entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

EQ DE VOLLMERS - DUNAS

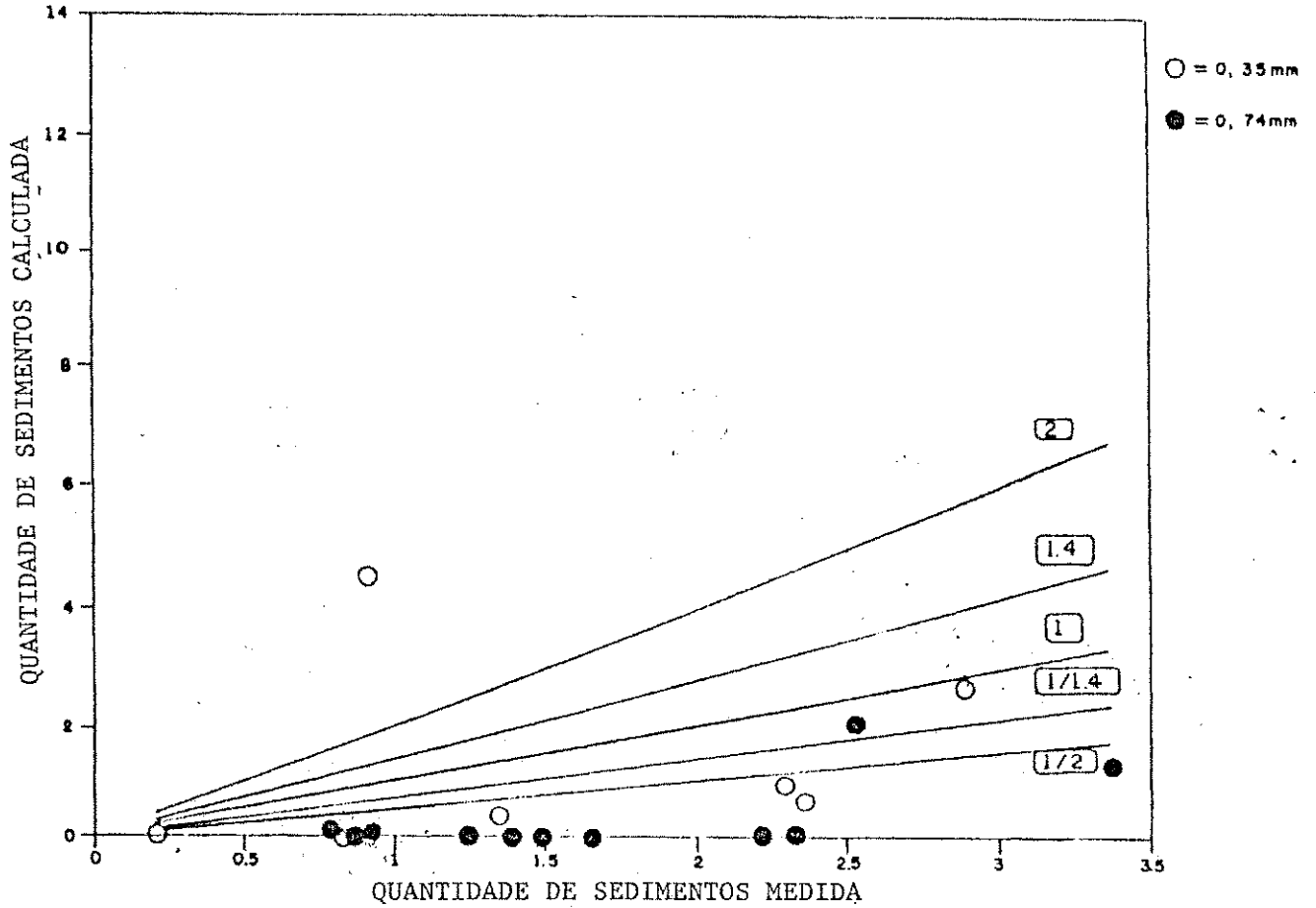


GRÁFICO DE DISPERSÃO 6 - refere-se à equação de L. Pernecker e J. Vollmers. Retrata a correlação para dunas entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

EQ DE BAGNOLD - DUNAS

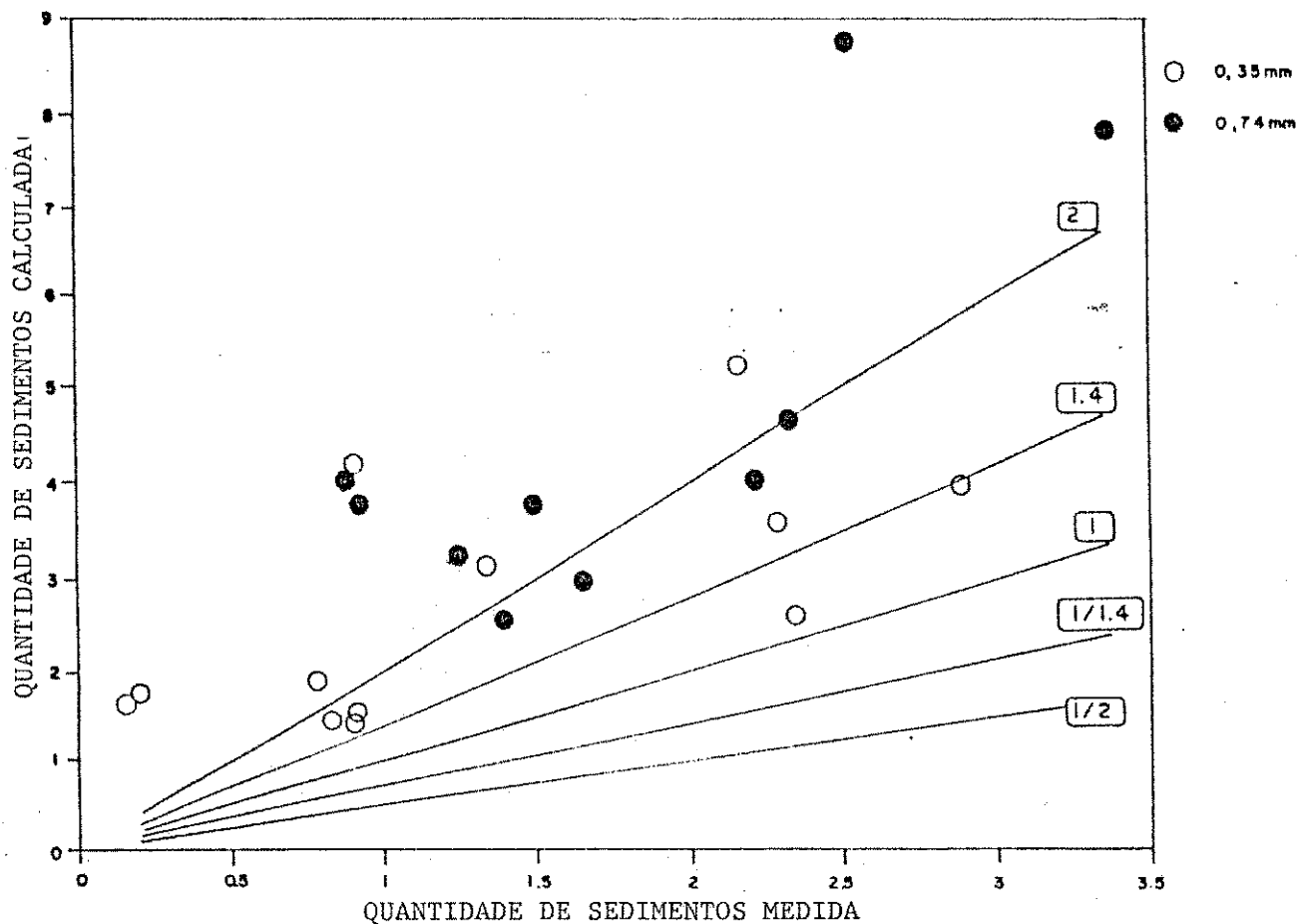


GRÁFICO DE DISPERSÃO 7 - refere-se à equação de Bagnold. Retrata a correlação para dunas entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

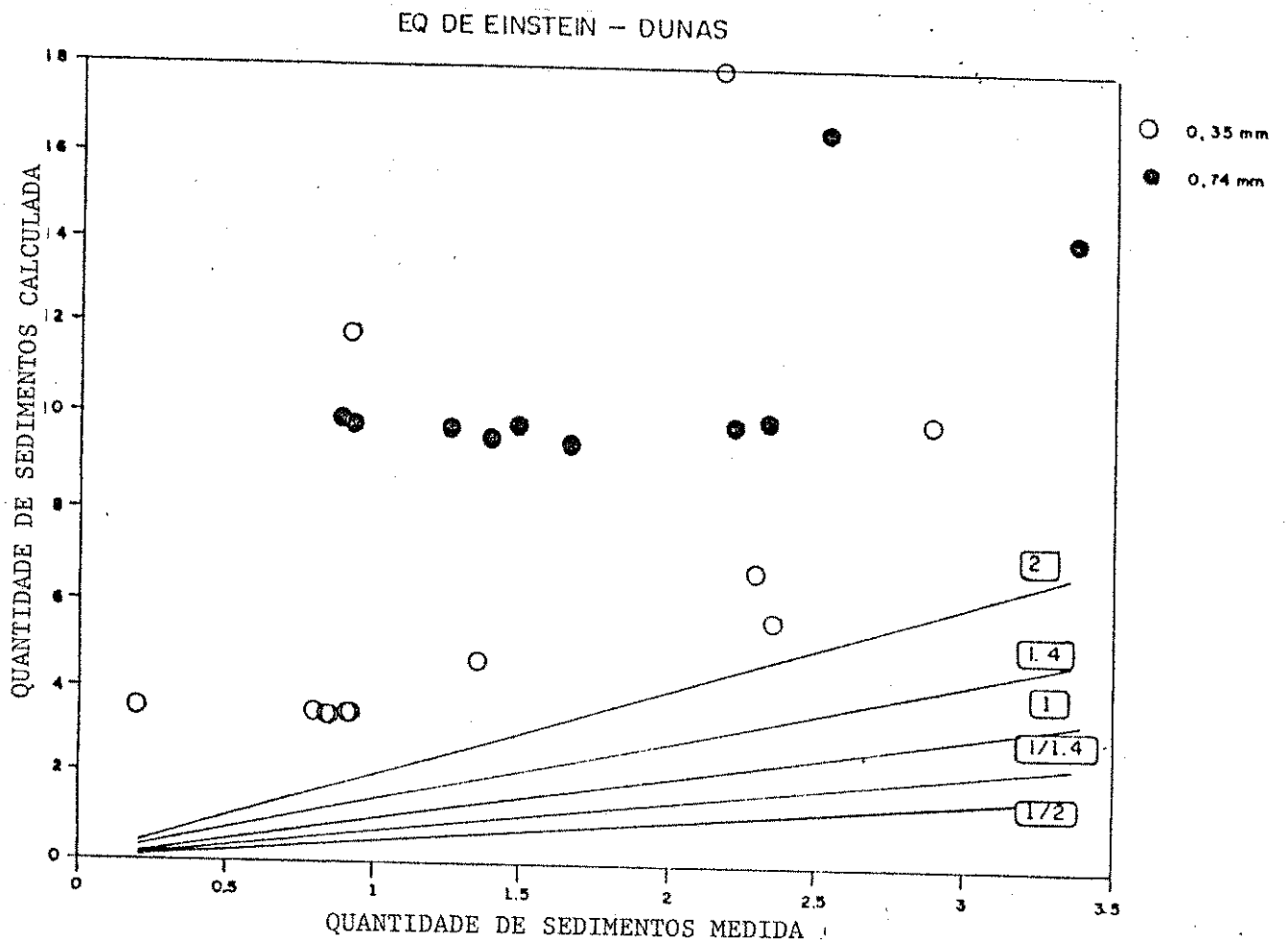


GRÁFICO DE DISPERSÃO B - refere-se à equação de Einstein. Retrata a correlação para dunas entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

EQ DE LAURSEN - DUNAS

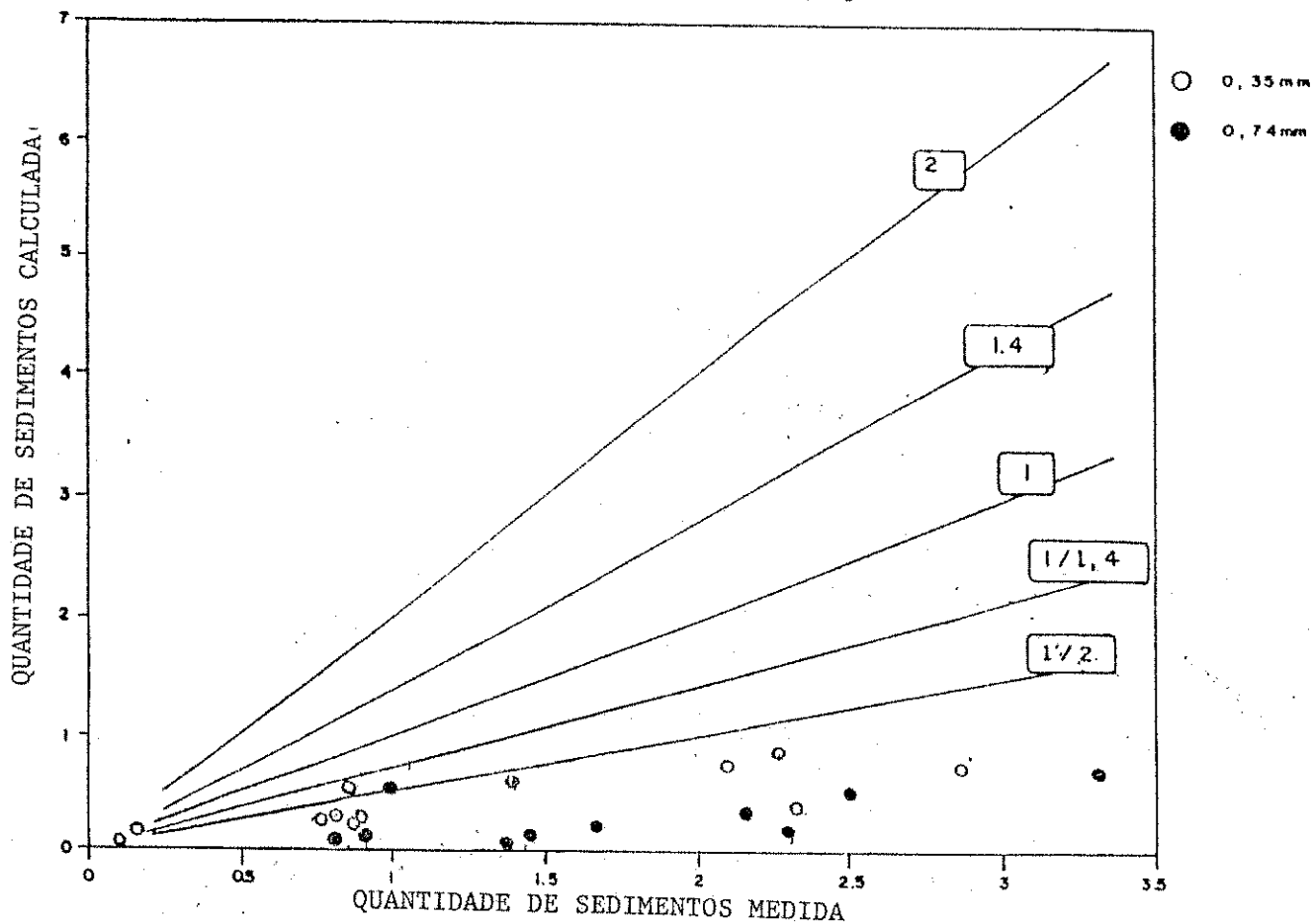


GRÁFICO DE DISPERSÃO 9 - refere-se à equação de Laursen. Retrata a correlação para dunas entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

EQ.DE M.PETER/MULLER – LEITO PLANO

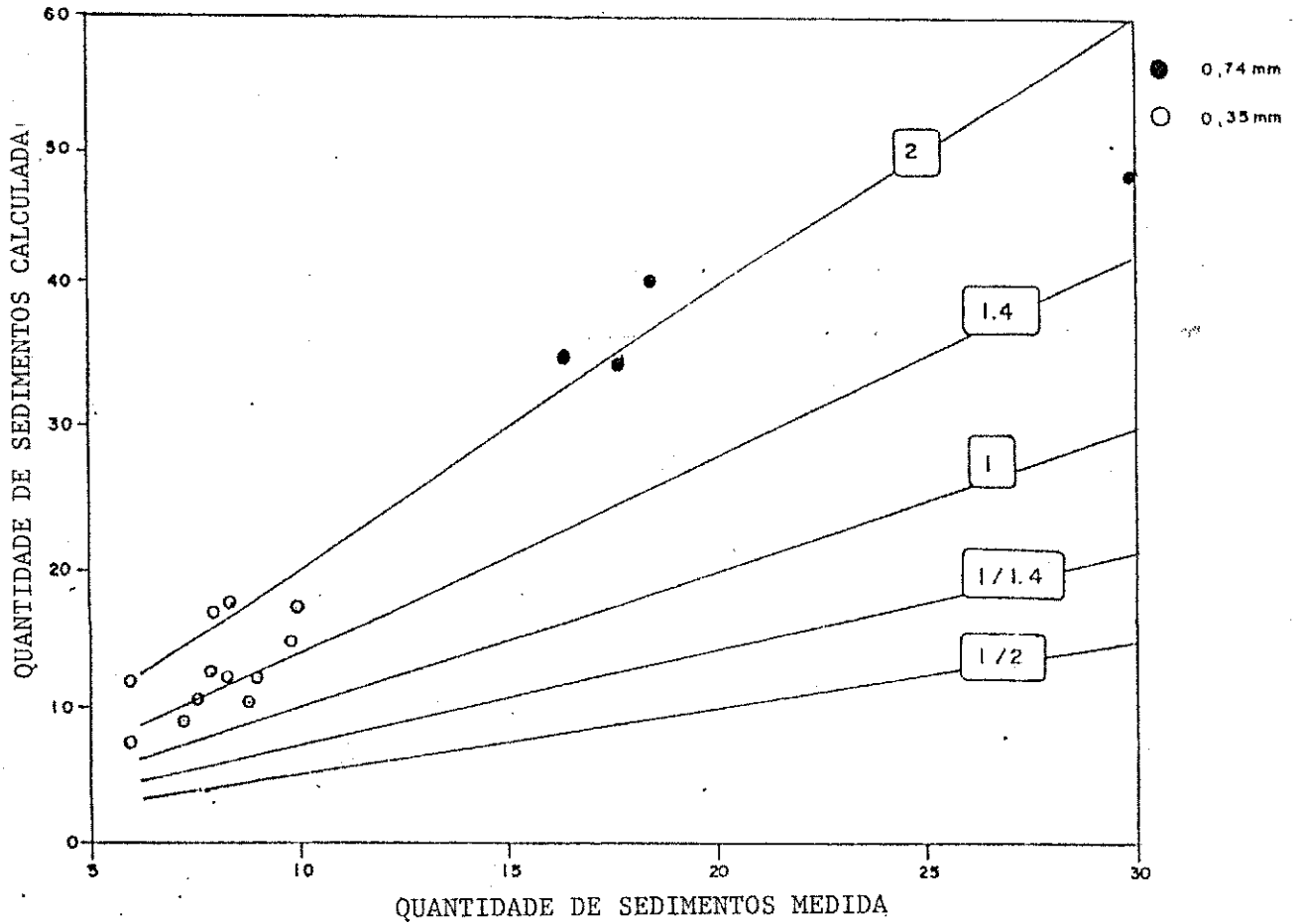


GRÁFICO DE DISPERSÃO 10 - refere-se à equação de E. Meyer-Peter e R. Muller. Retrata a correlação para leito plano entre a quantidade de sedimentos medida e a quantidade de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

EQ DE E. HANSEN - LEITO PLANO

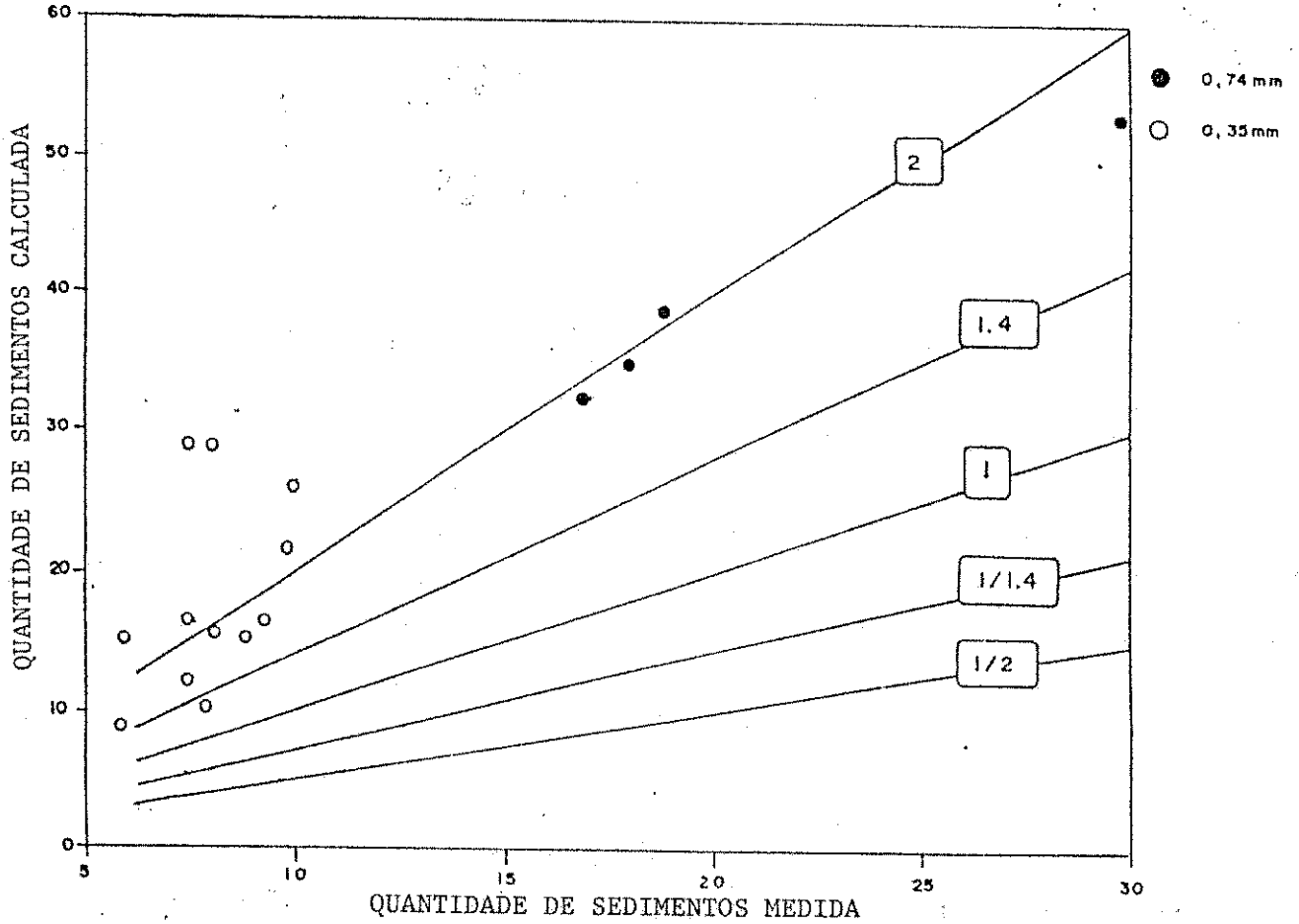


GRÁFICO DE DISPERSÃO 11 - refere-se à equação de F. Engelund e E. Hansen. Retrata a correlação para leito plano entre a quantidade de sedimentos medida e a calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

EQ. DE RIJN - LEITO PLANO

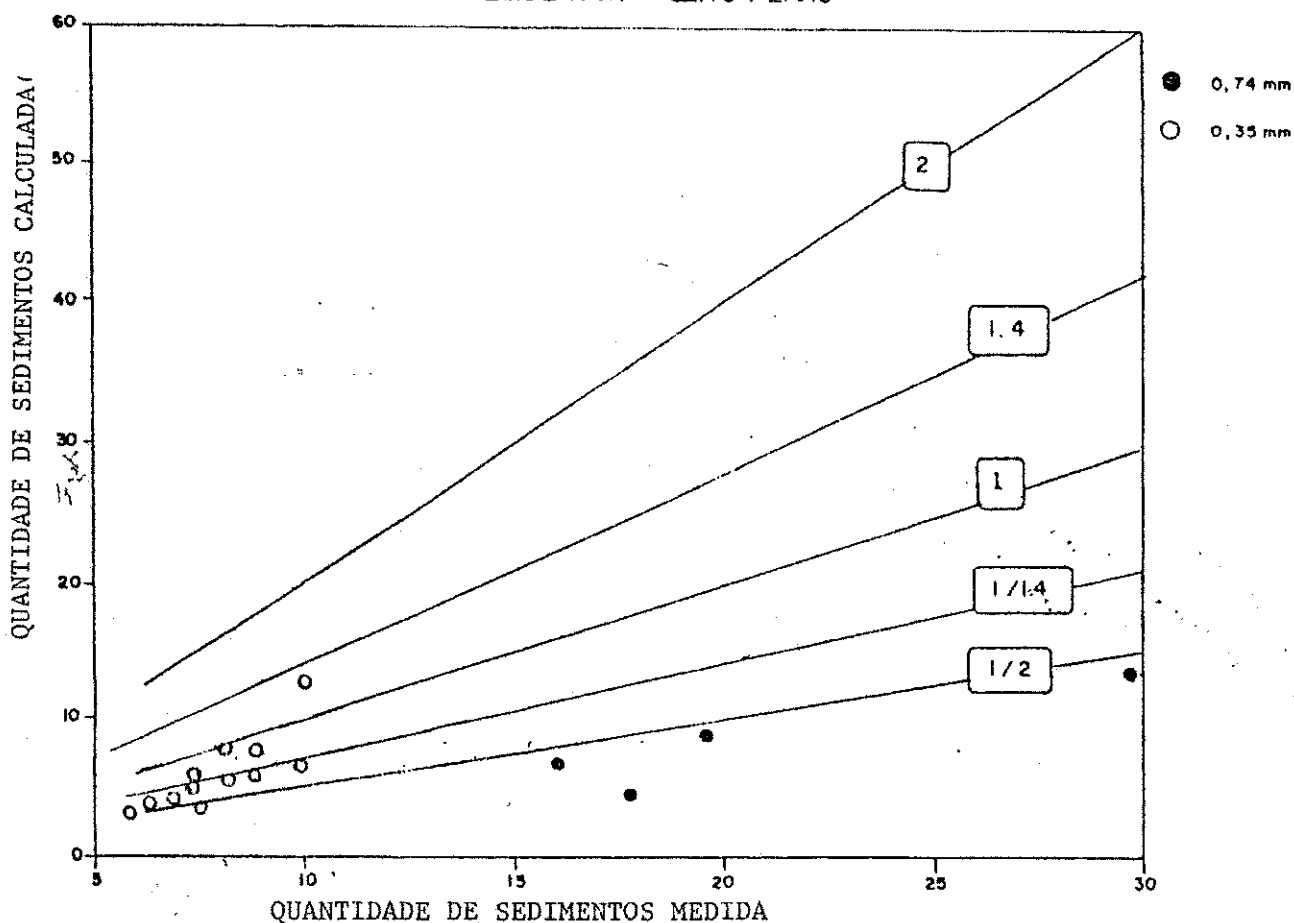


GRÁFICO DE DISPERSÃO 12 - refere-se à equação de Leo G. Van Rijn. Retrata a correlação para leito plano entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.



EQ. DE YANG - LEITO PLANO

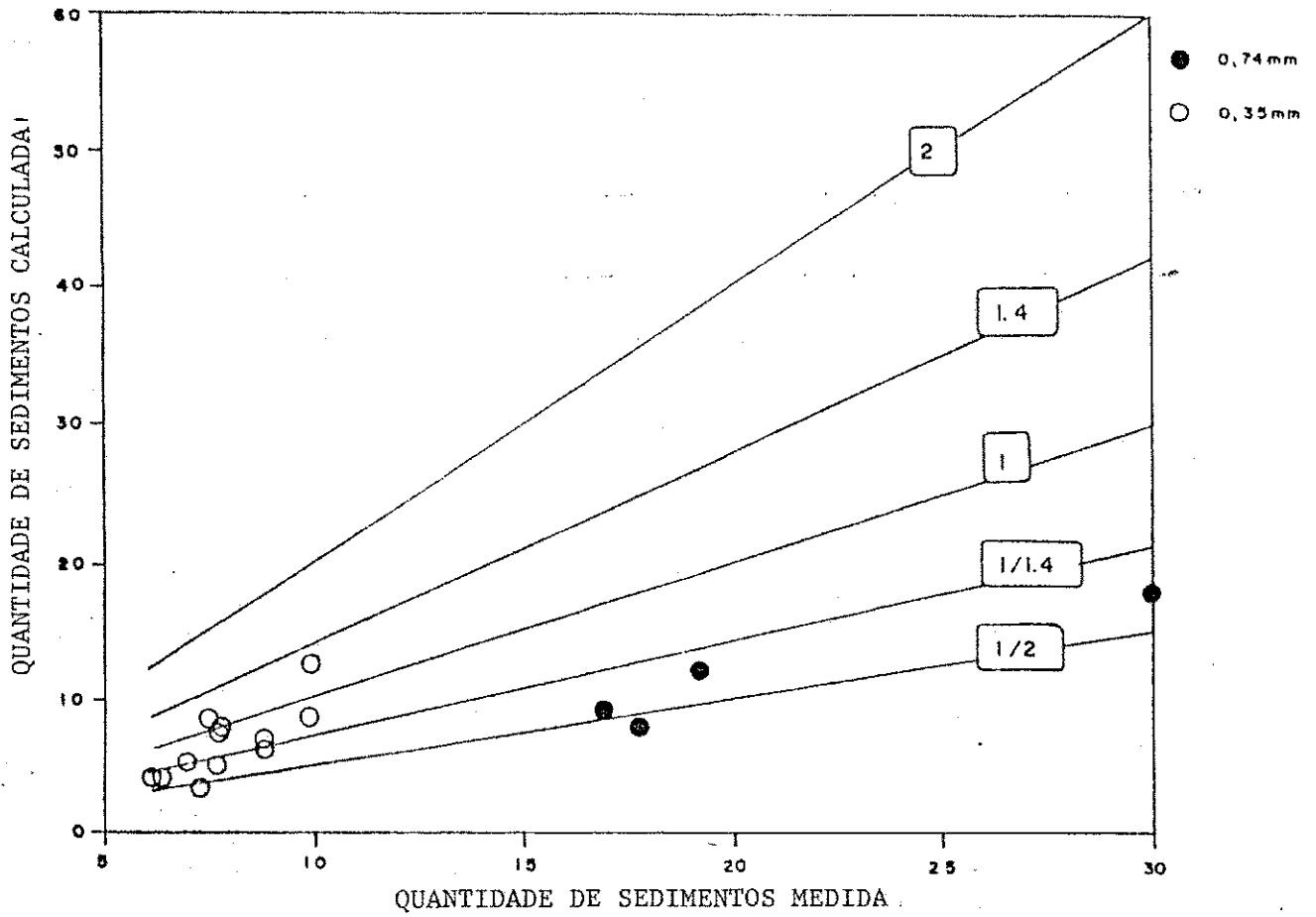


GRÁFICO DE DISPERSÃO 13 - refere-se à equação de C. T. Yang. Retrata a correlação para leito plano entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

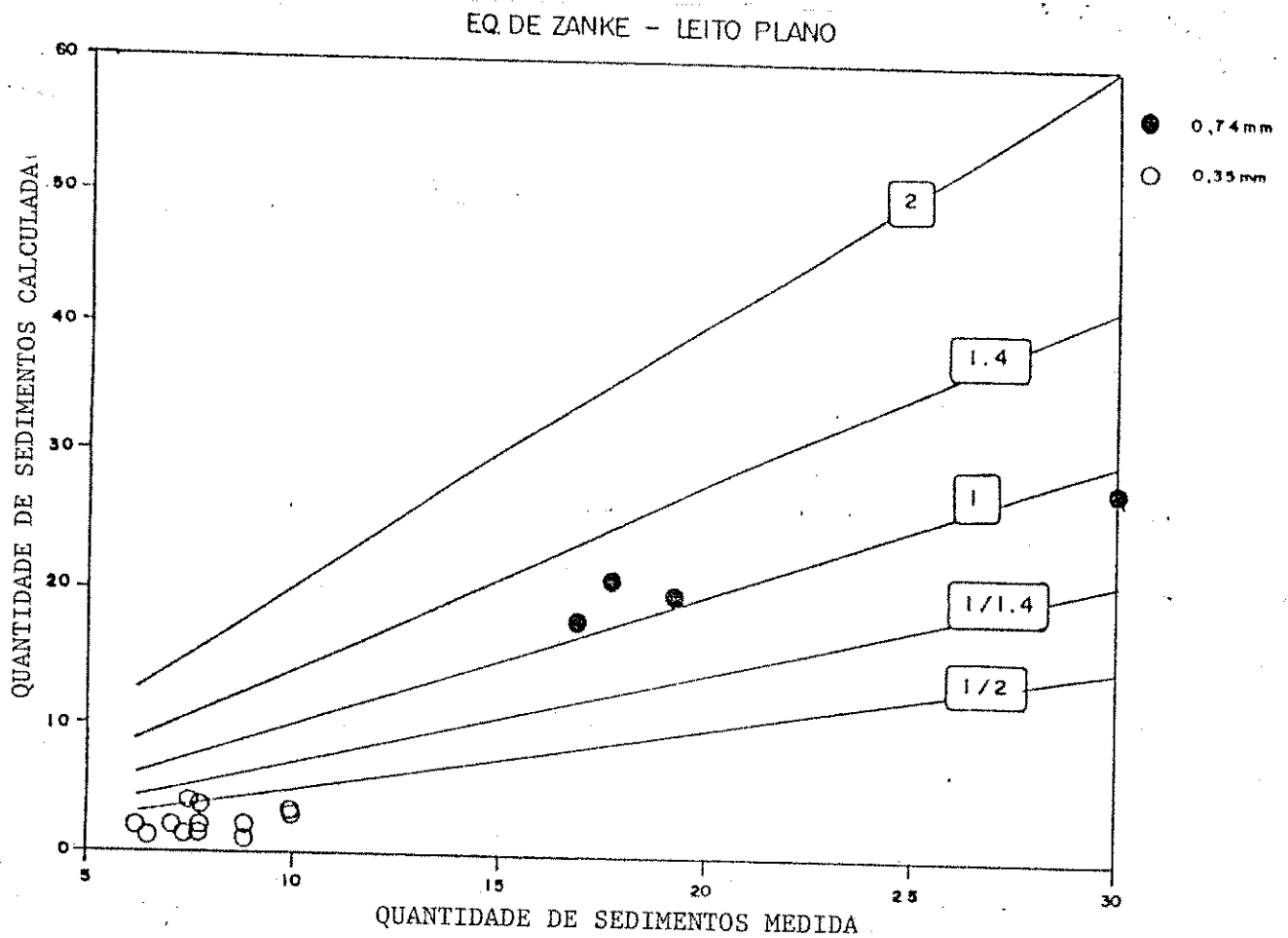


GRÁFICO DE DISPERSÃO 14 - refere-se à equação de U. Zanke. Retrata a correlação para leito plano entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

EQ. DE VOLLMERS - LEITO PLANO

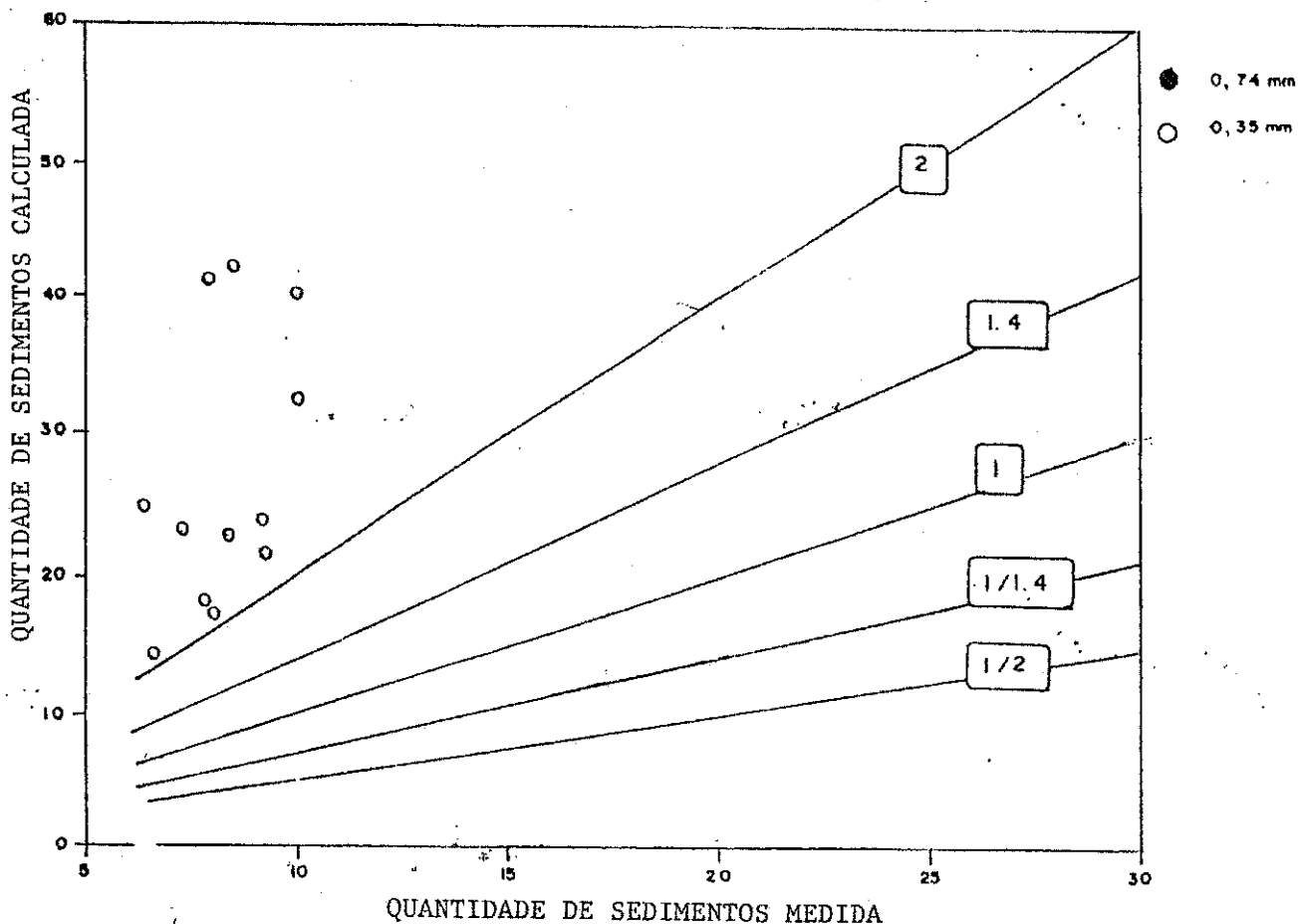


GRÁFICO DE DISPERSÃO 15 - refere-se à equação de L. Pernecker e J. Vollmers. Retrata a correlação para leito plano entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

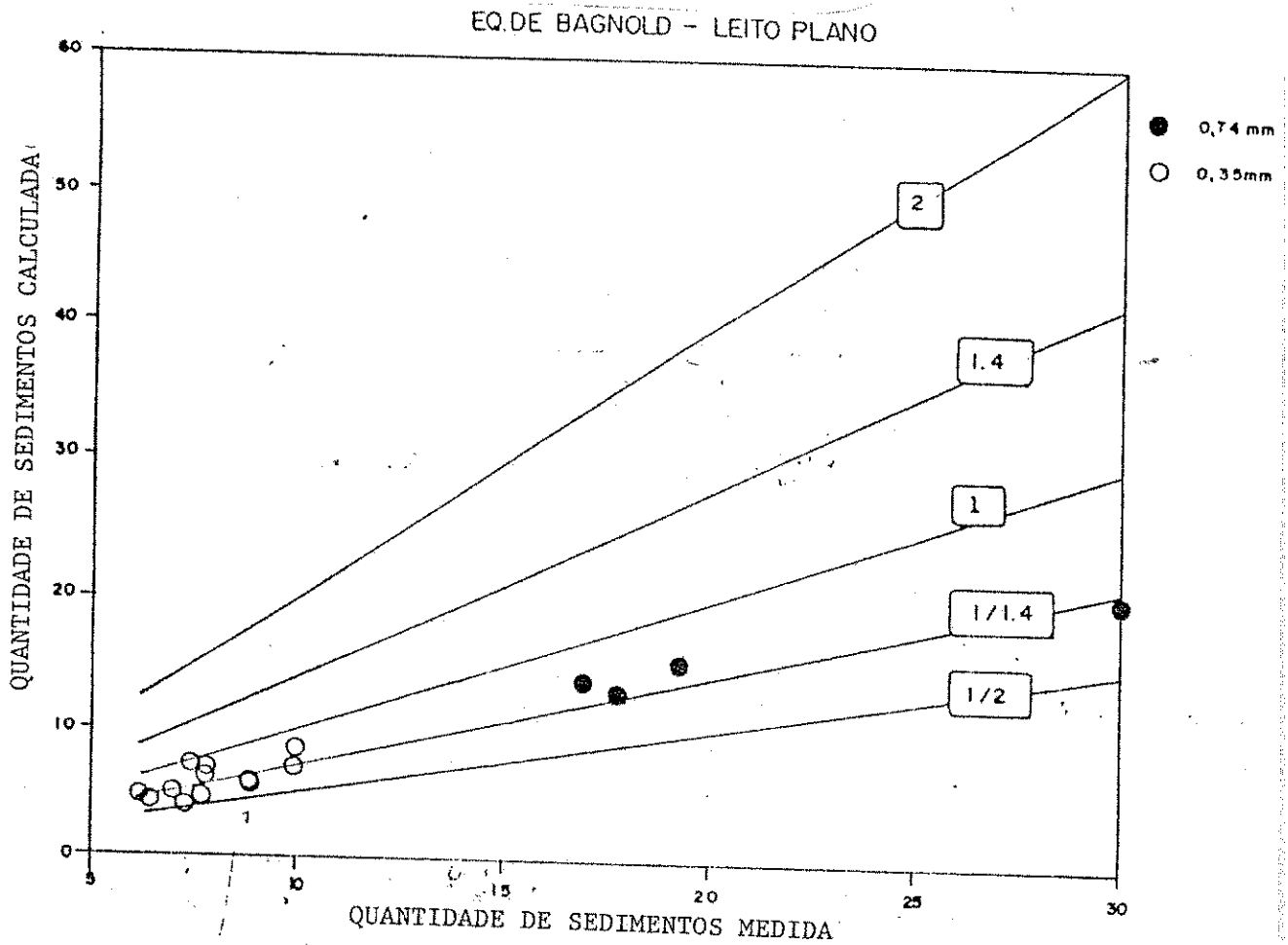


GRÁFICO DE DISPERSÃO 16 - refere-se à equação de Bagnold. Retrata a correlação para leito plano entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

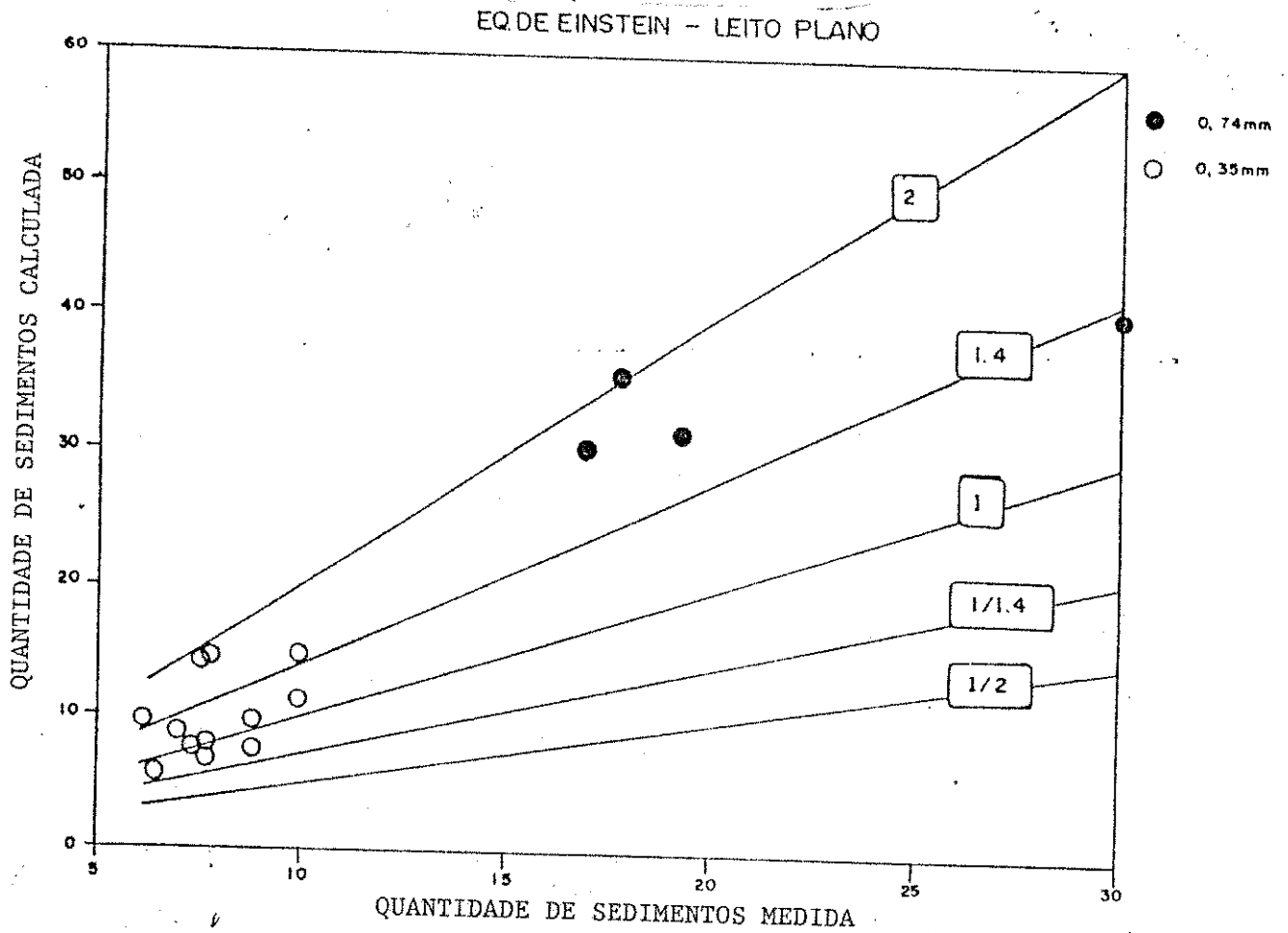


GRÁFICO DE DISPERSÃO 17 - refere-se à equação de Einstein. Retrata a correlação para leito plano entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

EQ. DE LAURSEN - LEITO PLANO

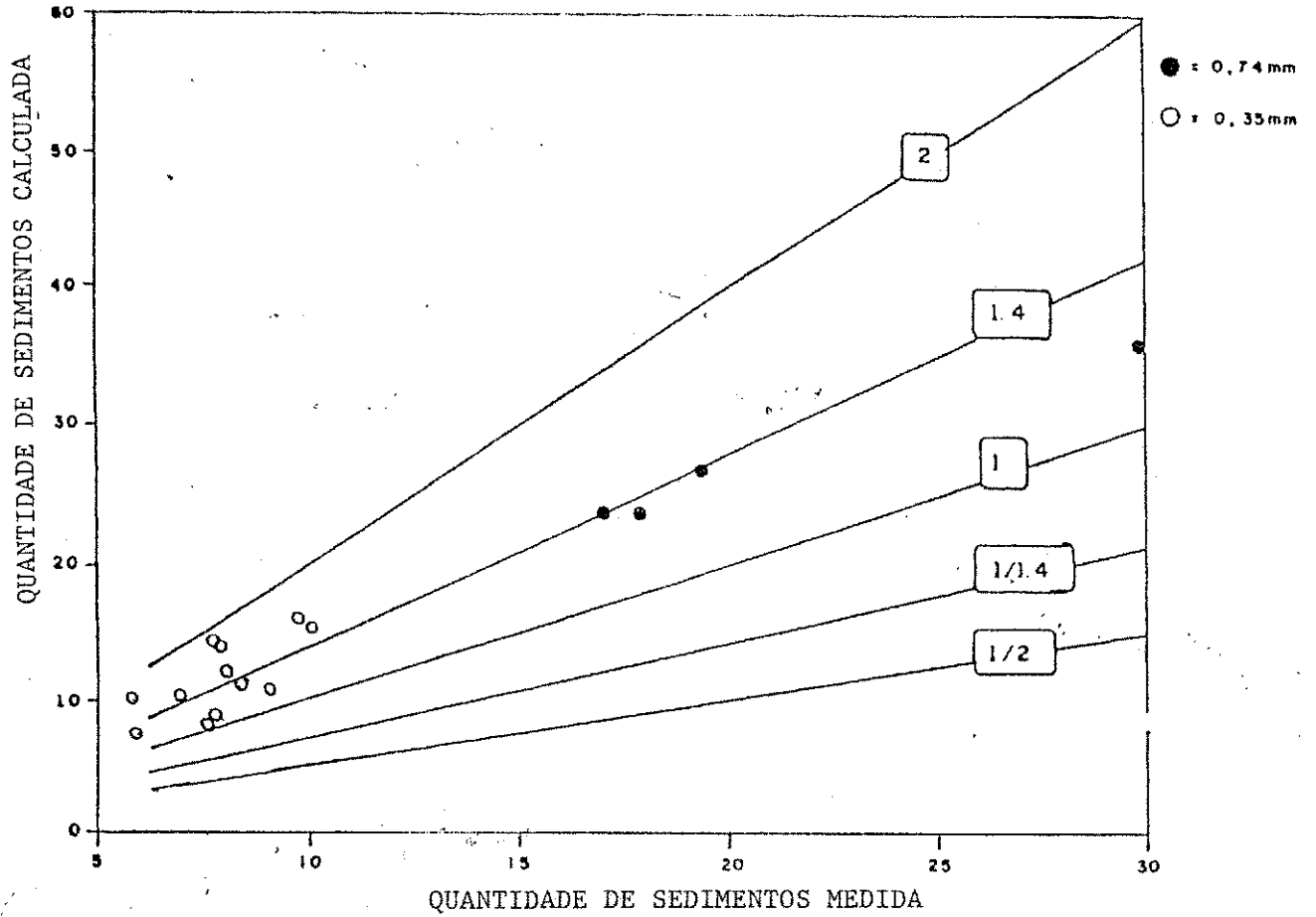


GRÁFICO DE DISPERSÃO 18 - refere-se à equação de Laursen. Retrata a correlação para leito plano entre a quantidade de sedimentos medida e a de sedimentos calculada, bem como o enquadramento por faixas de dispersão, em unidades de  $10^{-2}$  Kg/s.

## CAPÍTULO 7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 7.1 Análise dos Resultados

Para se avaliar os resultados fornecidos pelas equações de transporte, o caminho adotado foi o do estabelecimento de faixas de dispersão verificando-se qual a percentagem dos ensaios realizados que se enquadrava em cada uma destas faixas. Foram então escolhidas sete faixas: a faixa 1 enquadra os resultados compreendidos entre 1,2 vezes e  $1/1,2$  vezes o valor da quantidade de transporte medida; a faixa 2 enquadra os valores que não pertencem à faixa 1 e estão compreendidos entre 1,4 vezes e  $1/1,4$  vezes a quantidade de transporte medida; a faixa 3 enquadra os valores que não pertencem às faixas anteriores e estão compreendidos entre 1,6 vezes e  $1/1,6$  vezes a quantidade medida; a faixa 4 enquadra os valores que não pertencem às faixas anteriores e estão compreendidos entre 1,8 vezes e  $1/1,8$  vezes a quantidade medida; a faixa 5 enquadra os valores que não pertencem às faixas anteriores e estão compreendidos entre 2 vezes e  $1/2$  vezes a quantidade medida; a faixa 6 enquadra os que não pertencem às faixas anteriores e estão compreendidos entre 3 vezes e  $1/3$  vezes a quantidade medida; a faixa 7 enquadra todos os resultados que não pertencem às faixas anteriores. Estes dados estão nas Tabelas 7.1 a 7.4 .

A Tabela 7.1 reúne todos os ensaios sem distinção das formas do leite. A Tabela 7.2 considera especificamente a forma

do leito riples. A tabela 7.3 refere-se à forma do leito dunas e a Tabela 7.4 refere-se a leito plano. Os dados constantes destas tabelas foram obtidos verificando se o número de ensaios que estavam enquadrados em cada faixa, analisando as tabelas 6.1 a 6.4, dividindo os mesmos pelo número total de ensaios realizados.

Para se comparar os resultados, foi preciso se estabelecer um critério. Como as equações de transporte fornecem resultados muitas vezes bastante dispersos, optou-se em seleccionar para comparação, os resultados acumulados nas faixas de dispersão entre -50% e +100%, ou seja, os resultados acumulados até a faixa 5. A equação que apresentasse a maior percentagem de resultados nesta faixa mais ampla, seria considerada a mais adequada para o cálculo do transporte de sedimentos. Apesar da adoção deste critério foi feita uma avaliação incremental utilizando os Gráficos das Páginas 121 a 123, para se ter uma idéia nítida do enquadramento dos resultados por cada metodologia.

Assim, foram geradas as Tabelas 7.5, 7.6 e 7.7 que mostram a classificação das equações de transporte segundo o conceito estipulado e comentado no parágrafo anterior. A Tabela 7.5 apresenta a classificação das equações sem fazer distinções quanto à forma do leito. Para este caso, verifica-se que as equação de YANG apresentou mais de 70% dos resultados na faixa correspondente a uma dispersão de -50% a 100% em relação ao valor medido em laboratório. A Tabela 7.6 é específica para dunas. Neste caso a equação de YANG apresentou os melhores resultados, com mais de 80% dos ensaios na faixa de variação especificada. A Tabela 7.7 é específica para leito plano. Para esta forma do



leito as equações mais indicadas foram as de BAGNOLD e LAURSEN, com 100% dos resultados compreendidos na faixa de dispersão estabelecida, muito embora, as equações de EINSTEIN e YANG tenham também apresentado excelentes resultados, com mais de 80% dos ensaios na faixa de dispersão, ou seja, entre 0,5 e 2 vezes os valores medidos nos experimentos.

Para o caso de Ripples, observou-se uma completa inadequação das fórmulas de estimativa seleccionadas, pois normalmente exageravam na avaliação do transporte de sedimentos. Numa primeira análise pensou-se que essa performance poderia ter sido causada por erros na amostragem e na determinação da quantidade de sedimentos medida em laboratório, pois, nesses casos, a quantidade tão pequena de material coletado poderia realmente ter fonte de erros. No entanto, todo o procedimento adotado foi revisto, não tendo sido detectada qualquer deficiência específica. Mesmo assim, apesar dos valores tão dispersos como estão apresentados, as equações de RIJN e de YANG parecem demonstrar mais coerência em face das observações.

O uso nas equações do transporte de sedimentos do raio hidráulico do leito e, em seguida, do raio hidráulico da superfície do leito, visava verificar a sensibilidade das equações a estes parâmetros, já que alguns pesquisadores [Gunha (1966), Srinivasan e Rego (1981)], julgam que os métodos para considerar as rugosidades devido às formas do leito, inclusive o desenvolvido por EINSTEIN [Simons e Senturk (1977)], gerando o raio hidráulico da superfície do leito, têm certas inconsistências.

| FAIXAS    | MULLER | HANSEN | RIJN   | YANG   | ZANKE  | VOLLMERS | BAGNOLD | EINSTEIN | LAURSEN |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|---------|----------|---------|
| 1         | 4,34   | 4,34   | 6,51   | 19,53  | 15,19  | 0,00     | 8,68    | 15,19    | 4,34    |
| acumulado | 4,34   | 4,34   | 6,51   | 19,53  | 15,19  | 0,00     | 8,68    | 15,19    | 4,34    |
| 2         | 15,19  | 6,51   | 13,02  | 19,53  | 6,51   | 0,00     | 15,19   | 4,34     | 4,34    |
| acumulado | 19,53  | 10,85  | 19,53  | 39,06  | 21,70  | 0,00     | 23,87   | 19,53    | 8,68    |
| 3         | 6,51   | 8,68   | 15,19  | 13,02  | 6,51   | 0,00     | 13,02   | 4,34     | 13,02   |
| acumulado | 26,04  | 19,53  | 34,72  | 52,08  | 28,21  | 0,00     | 36,89   | 23,87    | 21,70   |
| 4         | 6,51   | 10,85  | 8,68   | 15,19  | 4,34   | 0,00     | 10,85   | 2,17     | 4,34    |
| acumulado | 32,55  | 30,38  | 43,40  | 67,27  | 32,55  | 0,00     | 47,74   | 26,04    | 26,04   |
| 5         | 6,51   | 6,51   | 2,17   | 4,34   | 2,17   | 0,00     | 8,68    | 6,51     | 4,34    |
| acumulado | 39,06  | 36,89  | 45,57  | 71,61  | 34,72  | 0,00     | 56,42   | 32,55    | 30,38   |
| 6         | 21,70  | 15,19  | 26,04  | 4,34   | 15,19  | 13,02    | 13,02   | 6,51     | 17,36   |
| acumulado | 60,76  | 52,08  | 71,61  | 75,95  | 49,91  | 13,02    | 69,44   | 39,06    | 47,74   |
| 7         | 39,24  | 47,92  | 28,39  | 24,05  | 50,09  | 86,98    | 30,56   | 60,94    | 52,26   |
| acumulado | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00   | 100,00  | 100,00   | 100,00  |

**Tabela 7.1** Enquadramento dos ensaios, em percentagem do número total de ensaios, por faixas de dispersão. Os ensaios, para a elaboração desta tabela, não foram separados por formas do leito.

| FAIXAS    | MULLER | HANSEN | RIJN   | YANG   | ZANKE  | VOLLMERS | BAGNOLD | EINSTEIN | LAURSEN |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|---------|----------|---------|
| 1         | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 0,00    |
| acumulado | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 0,00    |
| 2         | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 0,00    |
| acumulado | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 0,00    |
| 3         | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 0,00    |
| acumulado | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 0,00    |
| 4         | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 0,00    |
| acumulado | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 0,00    |
| 5         | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 0,00    |
| acumulado | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 0,00    |
| 6         | 28,60  | 0,00   | 14,30  | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 14,30   |
| acumulado | 28,60  | 0,00   | 14,30  | 0,00   | 0,00   | 0,00     | 0,00    | 0,00     | 14,30   |
| 7         | 71,40  | 100,00 | 85,70  | 100,00 | 100,00 | 100,00   | 100,00  | 100,00   | 85,70   |
| acumulado | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00   | 100,00  | 100,00   | 100,00  |

Obs: a faixa de dispersão tem como referência a quantidade de sedimento medida.

**Tabela 7.2** Enquadramento dos ensaios que apresentaram a forma do leito ríplis, em percentagem do número de ensaios com ríplis, por faixas de dispersão.

| FAIXAS    | MULLER | HANSEN | RIJN   | YANG   | ZANKE  | VOLLKERS | BAGNOLD | EINSTEIN | LAURSEN |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|---------|----------|---------|
| 1         | 8,70   | 8,70   | 8,70   | 21,75  | 13,05  | 0,00     | 4,35    | 0,00     | 0,00    |
| acumulado | 8,70   | 8,70   | 8,70   | 21,75  | 13,05  | 0,00     | 4,35    | 0,00     | 0,00    |
| 2         | 8,70   | 8,70   | 13,05  | 21,75  | 13,05  | 0,00     | 4,35    | 0,00     | 0,00    |
| acumulado | 17,40  | 17,40  | 21,75  | 43,50  | 26,10  | 0,00     | 8,70    | 0,00     | 0,00    |
| 3         | 0,00   | 8,70   | 8,70   | 13,05  | 13,05  | 0,00     | 8,70    | 0,00     | 0,00    |
| acumulado | 17,40  | 26,10  | 30,45  | 56,55  | 39,15  | 0,00     | 17,40   | 0,00     | 0,00    |
| 4         | 4,35   | 8,70   | 13,05  | 13,05  | 8,70   | 0,00     | 13,05   | 0,00     | 0,00    |
| acumulado | 21,75  | 34,80  | 43,50  | 69,60  | 47,85  | 0,00     | 30,45   | 0,00     | 0,00    |
| 5         | 4,35   | 0,00   | 0,00   | 13,05  | 0,00   | 0,00     | 13,05   | 0,00     | 0,00    |
| acumulado | 26,10  | 34,80  | 43,50  | 82,65  | 47,85  | 0,00     | 43,50   | 0,00     | 0,00    |
| 6         | 26,10  | 8,70   | 30,45  | 0,00   | 17,40  | 0,00     | 26,10   | 8,70     | 34,80   |
| acumulado | 52,20  | 43,50  | 73,95  | 82,65  | 65,25  | 0,00     | 69,60   | 8,70     | 34,80   |
| 7         | 47,85  | 56,55  | 26,05  | 17,35  | 34,75  | 100,00   | 38,40   | 91,30    | 65,20   |
| acumulado | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00   | 100,00  | 100,00   | 100,00  |

Obs: a faixa de dispersão tem como referencia a quantidade de sedimento medida.

**Tabela 7.3** Enquadramento dos ensaios que apresentaram a forma do leito dunas, em percentagem do número de ensaios com dunas, por faixas de dispersão.

| FAIXAS    | MULLER | HANSEN | RIJN   | YANG   | ZANKE  | VOLLMERS | BAGNOLD | EINSTEIN | LAURSEN |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|---------|----------|---------|
| 1         | 0,00   | 0,00   | 6,25   | 25,00  | 25,00  | 0,00     | 18,75   | 43,75    | 12,50   |
| acumulado | 0,00   | 0,00   | 6,25   | 25,00  | 25,00  | 0,00     | 18,75   | 43,75    | 12,50   |
| 2         | 31,25  | 6,25   | 18,75  | 25,00  | 0,00   | 0,00     | 37,50   | 12,50    | 25,00   |
| acumulado | 31,25  | 6,25   | 25,00  | 50,00  | 25,00  | 0,00     | 56,25   | 56,25    | 37,50   |
| 3         | 18,75  | 12,50  | 31,25  | 18,75  | 0,00   | 0,00     | 25,00   | 12,50    | 37,50   |
| acumulado | 50,00  | 18,75  | 56,25  | 68,75  | 25,00  | 0,00     | 81,25   | 68,75    | 75,00   |
| 4         | 12,50  | 18,75  | 6,25   | 18,75  | 0,00   | 0,00     | 12,50   | 6,25     | 12,50   |
| acumulado | 62,50  | 37,50  | 62,50  | 87,50  | 25,00  | 0,00     | 93,75   | 75,00    | 87,50   |
| 5         | 12,50  | 18,75  | 6,25   | 0,00   | 6,25   | 0,00     | 6,25    | 18,75    | 12,50   |
| acumulado | 75,00  | 56,25  | 68,75  | 87,50  | 31,25  | 0,00     | 100,00  | 93,75    | 100,00  |
| 6         | 25,00  | 31,25  | 25,00  | 12,50  | 18,75  | 37,50    | 0,00    | 6,25     | 0,00    |
| acumulado | 100,00 | 87,50  | 93,75  | 100,00 | 50,00  | 37,50    | 100,00  | 100,00   | 100,00  |
| 7         | 0,00   | 12,50  | 6,25   | 0,00   | 50,00  | 62,50    | 0,00    | 0,00     | 0,00    |
| acumulado | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00   | 100,00  | 100,00   | 100,00  |

Obs: a faixa de dispersão tem como referência a quantidade de sedimento medida.

**Tabela 7.4** Enquadramento dos ensaios que apresentaram a forma do leito plano, em percentagem do número de ensaios com leito plano, por faixas de dispersão.

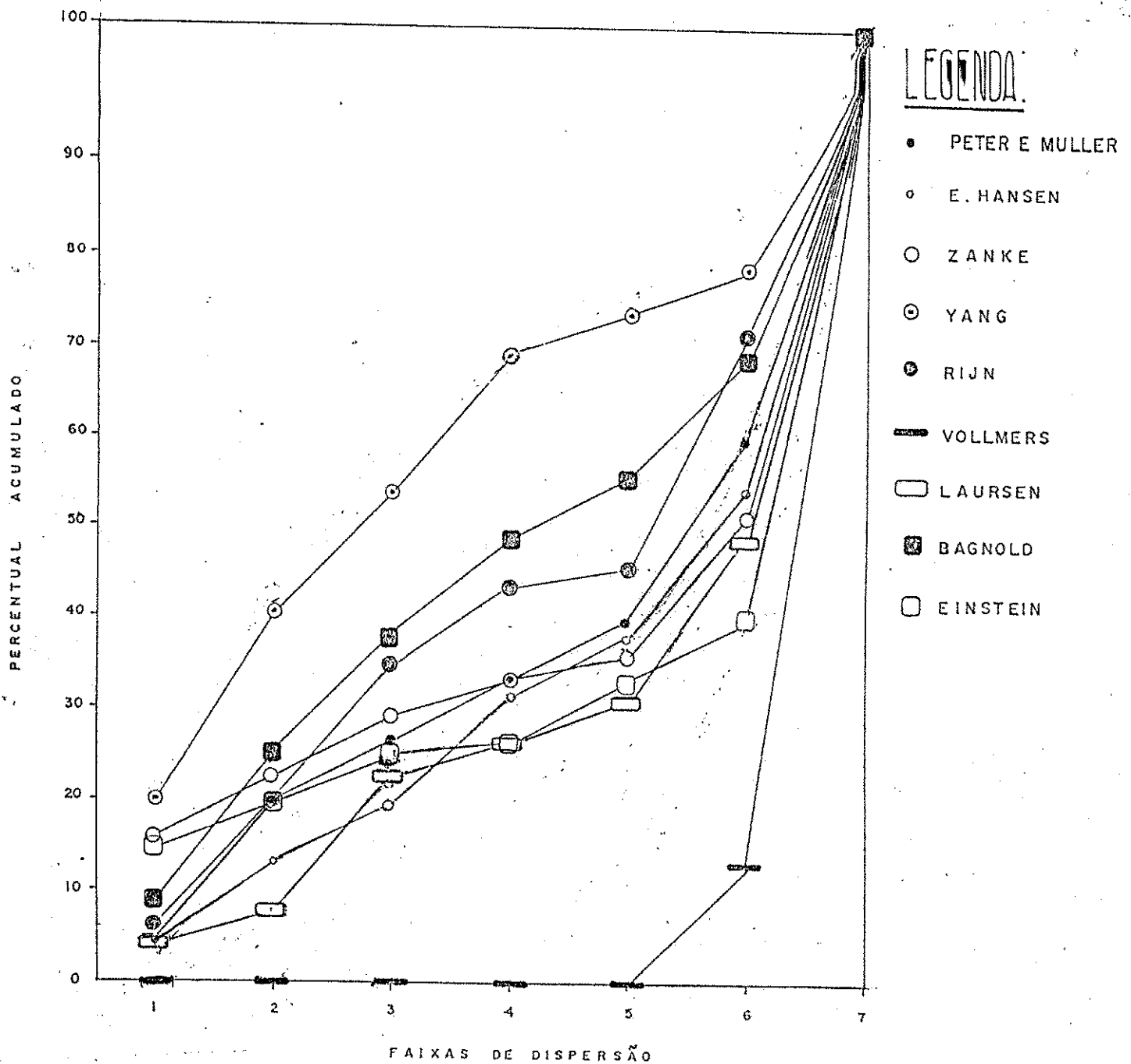


GRÁFICO GERAL 1 - retrata o percentual acumulado dos ensaios nas diversas faixas de dispersão. Trata-se da representação gráfica da tabela 7.1, que mostra os resultados sem a separação por formas do leite.

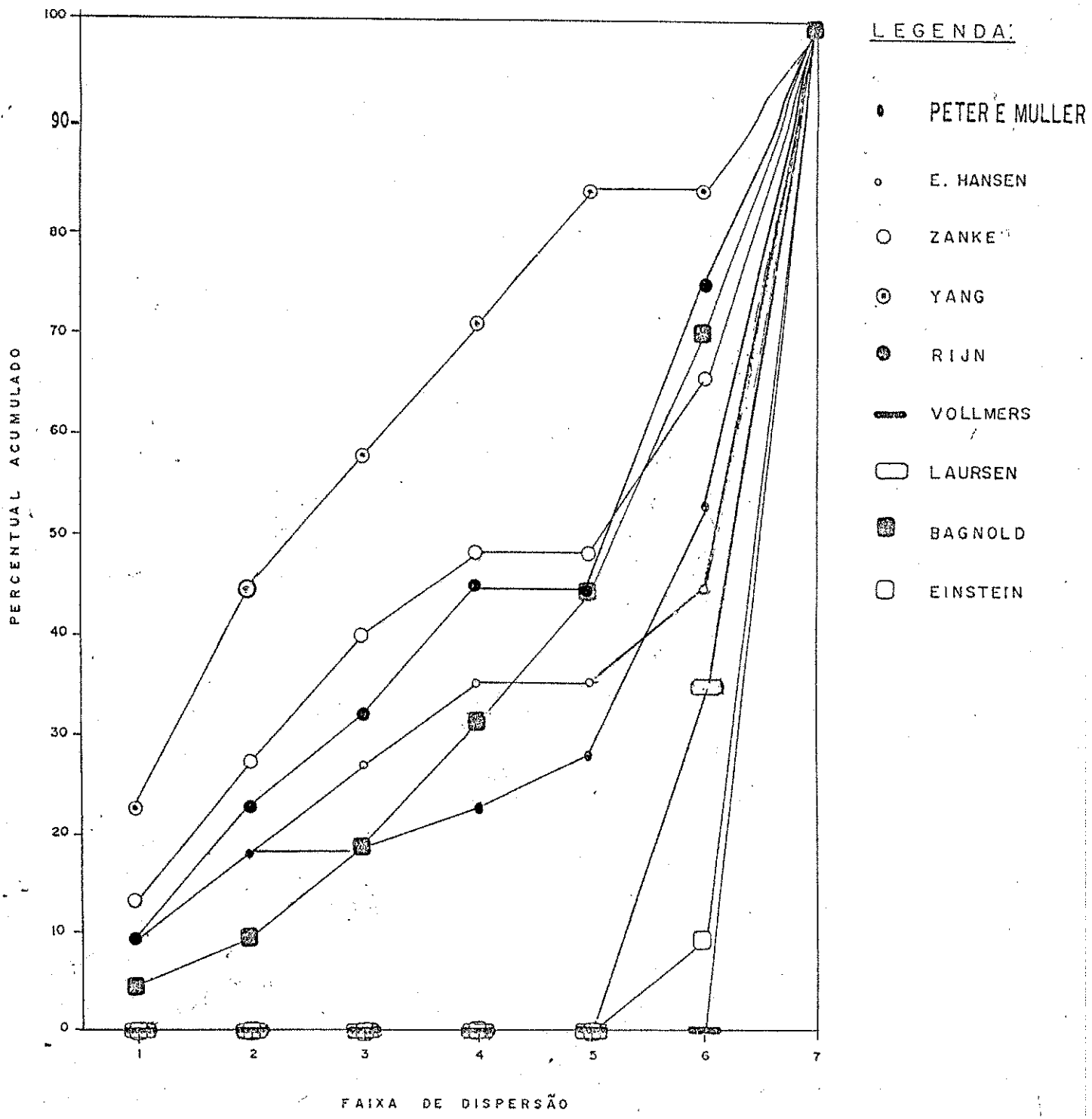


GRÁFICO GERAL 2 - retrata o percentual acumulado dos ensaios nas diversas faixas de dispersão. Trata-se da representação gráfica da tabela 7.3, que mostra os resultados para dunas.

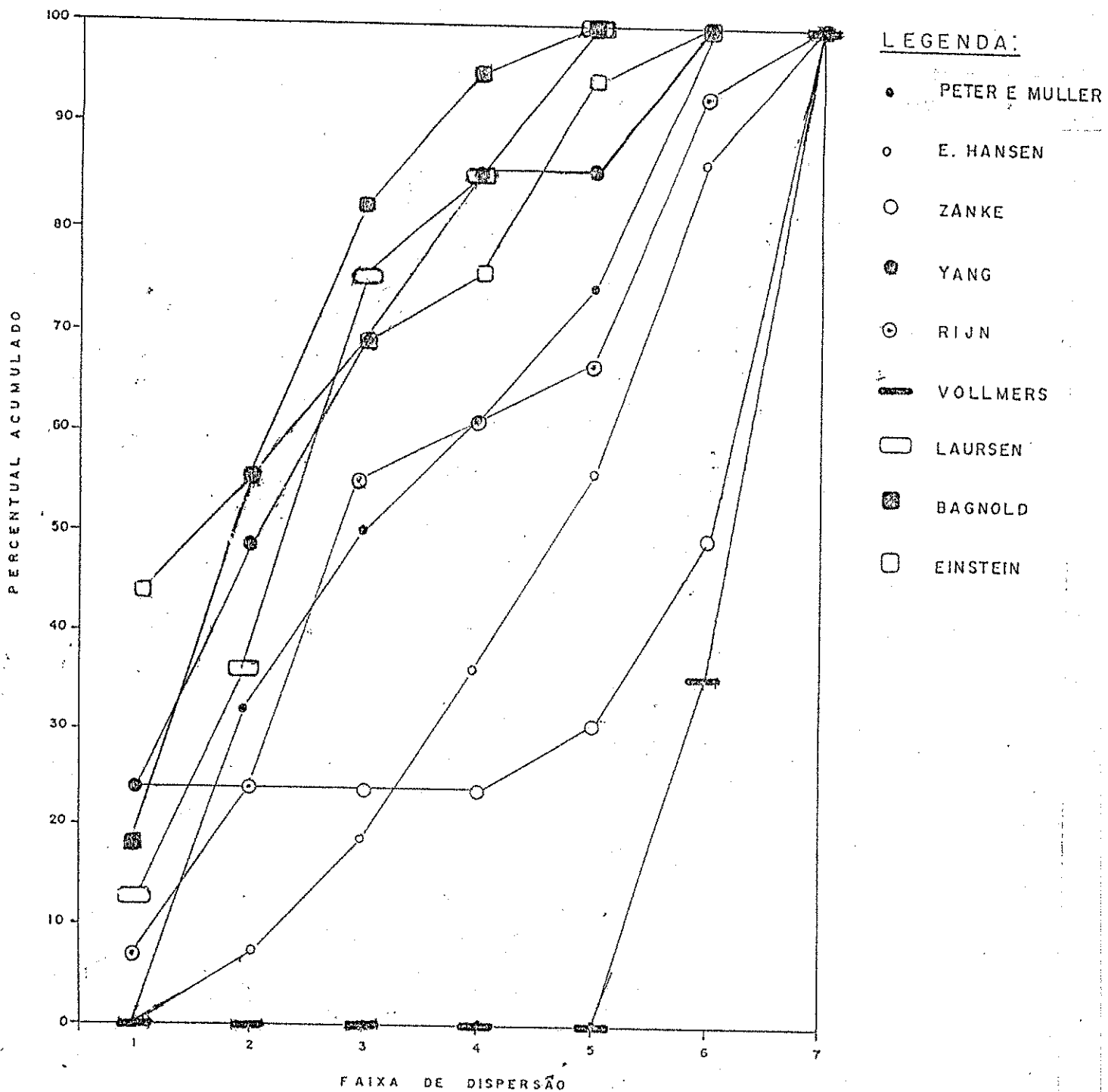


GRÁFICO GERAL 3 - retrata o percentual acumulado dos ensaios nas diversas faixas de dispersão. Trata-se da representação gráfica da tabela 7.4, que mostra os resultados para leito plano.



| METODOLOGIAS | % DOS ENSAIOS ENTRE 0,5 e 2 VEZES<br>A QUANTIDADE DE SEDIMENTOS MEDIDA |
|--------------|--|
| YANG         | 71,61  |
| BAGNOLD      | 56,42  |
| RIJN         | 45,57  |
| MULLER       | 39,06 *  |
| HANSEN       | 36,89 *  |
| ZANKE        | 34,72  |
| EINSTEIN     | 32,55  |
| LAURSEN      | 30,38 *  |
| VOLLMERS     | 0,00   |

Tabela 7.5 Classificação das metodologias sem a consideração das formas do leito, tendo como referência a faixa de dispersão estabelecida como padrão (-50% a +100%). As metodologias de Laursen, Meyer-Peter e Muller e a de Engelund e Hansen estão destacadas porque utilizaram o raio hidráulico da superfície do leito para o caso de dunas e ripples, e o raio do leito, para leito plano.

| METODOLOGIAS | % DOS ENSAIOS ENTRE 0,5 e 2 VEZES<br>A QUANTIDADE DE SEDIMENTOS MEDIDA |
|--------------|--|
| YANG         | 82,65  |
| ZANKE        | 47,25  |
| BAGNOLD      | 43,50  |
| RIJN         | 43,50  |
| HANSEN       | 34,80  |
| MULLER       | 26,10  |
| LAURSEN      | 0,00   |
| EINSTEIN     | 0,00   |
| VOLLMERS     | 0,00   |

Tabela 7.6 Classificação das metodologias para o caso de dunas e tendo como referência a faixa de dispersão estabelecida como padrão (-50% a +100%). O raio hidráulico utilizado foi o conceitual de cada metodologia.

| METODOLOGIAS | % DOS ENSAIOS ENTRE 0,5 e 2 VEZES<br>A QUANTIDADE DE SEDIMENTOS MEDIDA |
|--------------|--|
| BAGNOLD      | 100,00   |
| LAURSEN      | 100,00 *   |
| EINSTEIN     | 93,75  |
| YANG         | 87,50  |
| MULLER       | 75,00 *  |
| RIJN         | 68,75  |
| HANSEN       | 56,25 *  |
| ZANKE        | 31,25  |
| VOLLMERS     | 0,00   |

Tabela 7.7 Classificação para o caso de leito plano e tendo como referência a faixa de dispersão padrão (-50% a+100%). As metodologias assinaladas com \* foram utilizadas com o raio hidráulico do leito para leito plano e com o raio da superfície do leito para dunas e ripples.

A maioria das equações apresentou resultados bastante diversos ao se utilizar o raio hidráulico do leito ou da superfície do leito, demonstrando que os resultados são muito dependentes do valor do raio hidráulico. Esta condição pode comprometer, caso haja alguma inconsistência nos métodos de determinação do valor apropriado do raio hidráulico, as avaliações da quantidade de sedimentos transportada. A equação que apresentou menor sensibilidade ao valor do raio hidráulico, foi a equação de YANG, justamente a que forneceu melhor resultado utilizando os dados desta pesquisa. Isto pode ser observado comparando os resultados obtidos e constantes das Tabelas 6.6, 6.7 e 6.8 do Capítulo 6. A diferença entre os

resultados obtidos com os dois tipos de raio hidráulico, foi relativamente pequena, o que demonstra que qualquer efeito oriundo da inconsistência do parâmetro raio hidráulico não compromete a aplicação da metodologia.

Este tipo de verificação não foi feita para a equação de Einstein, que foi quem desenvolveu o método para considerar os dois tipos de raio hidráulico utilizados, ficando evidente o efeito de cada um deles na sua metodologia. Nas equações de Meyer-Peter e Muller e na de Engelund e Hansen, fica evidente o efeito do valor do raio hidráulico ao se aplicar a relação entre os parâmetros  $K_r$  e  $K_r'$  na de Muller,  $\theta$  e  $\theta'$  na de Hansen. Na realidade estes parâmetros ao considerarem uma perda de energia devido à rugosidade do leito, estão corrigindo o valor do raio hidráulico do leito. Na de LAURSEN, esta verificação foi feita substituindo a tensão de cisalhamento da superfície do leito pela tensão total do leito. A aplicação das correções de rugosidade nas metodologias citadas, não deve ser feita quando a forma do leito é plana, pois os melhores resultados para este caso surgiram com a aplicação do raio hidráulico do leito sem qualquer tipo de correção. Isto significa que as metodologias são bastante sensíveis ao valor do raio hidráulico.

Na equação de RIJN, a verificação foi feita substituindo a velocidade de cisalhamento na superfície do leito pela velocidade de cisalhamento total. Tal procedimento não permitiu qualquer conclusão a respeito da metodologia. Nas demais equações foi feita a substituição do raio hidráulico do leito pelo da superfície do leito.

## 7.2 Avaliação das Equações de Transporte.

7.2.1. Fórmula de E.MEYER-PETER e R.MULLER [Vanoni (1975). Simons e Senturk (1977), Raudkivi (1976)]

Esta metodologia pressupõe uma interação entre o movimento sólido e o líquido de um fluxo carregado de sedimentos, e que uma parte da energia disponível é consumida pelo transporte sólido e o restante é consumida pela superação da resistência ao movimento do líquido. Então, como o gradiente de energia representa a energia total dispendida pelo fluxo, eles definiram um parâmetro para representar a parte da energia total necessária para superar toda a resistência do sedimento ao movimento. Esta energia representa o ponto crítico para o início do movimento sólido. Com esta energia os autores definiram empiricamente um parâmetro de rugosidade  $Kr'$ , que, para ser calculado, utiliza o raio hidráulico do leito. No entanto, quando o leito de sedimentos é considerado rugoso, uma derivação, a equação de Manning Strickler, para definir  $Kr'$  pode ser utilizada.

Observou-se, através dos resultados apresentados, que a metodologia tende a subestimar a quantidade de sedimentos transportada pelo fluxo quando da forma do leito é dunas e a superestimar quando ocorre o leito plano. Considerando os resultados independentemente das formas do leito, verificou-se que apenas 39,06% deles estavam numa faixa de dispersão de -50% a 100% do valor medido. Os resultados, considerando as formas do leito, foram enquadrados da seguinte maneira: 26,10% para o caso

de dunas , 75% para leito plano e 0,0% para ripples.

A metodologia apresentou bons resultados para o leito plano . Neste caso não foi empregada a relação entre os parâmetros de rugosidade, ou seja, tal relação foi considerada como 1, significando o emprego da metodologia com o raio hidráulico do leito sem qualquer correção. Para o caso de dunas e ripples, a eliminação da correção citada conduz a valores absurdos na maioria dos casos.

Segundo Simons e Senturk (1977) o método pode conduzir a grandes discrepâncias entre os valores medidos e aqueles calculados, quando a declividade é superior a 0,001, como foi o caso dos ensaios realizados para este trabalho.

7.2.2.Fórmula de F. ENGELUND e E. HANSEN [Vanoni (1975), Raudkivi (1976)]

Nesta metodologia, baseada em conceitos de energia, define-se um parâmetro de mobilidade das partículas com base na velocidade de cisalhamento do leito. É utilizado também, um procedimento para determinar uma correção para a profundidade média e com o valor da profundidade corrigida define-se uma nova velocidade de cisalhamento correspondente à superfície do leito. Esta velocidade de cisalhamento permite calcular uma velocidade média do fluxo, que é utilizada na equação de transporte para o cálculo da carga total de sedimentos.

Engelund e Hansen não recomendam [Vanoni (1975)] a aplicação do método para leitos com ripples e para os casos em que o diâmetro médio de sedimento é menor que 0,15mm e, quando o

desvio padrão do tamanho das partículas de sedimento seja maior que 2. Além disto, é direcionada sua aplicação para leitos cobertos com dunas e para os casos em que o Número de Reynolds da partícula ( $U_* \cdot D / \nu$ ) é maior que 12.

Os resultados fornecidos pela equação não foram animadores. Fazendo uma análise independente das formas do leito somente 36,89% dos resultados ficaram na faixa de dispersão de -50% a +100%, embora com uma distribuição razoavelmente uniforme em torno do valor medido. Os resultados, apesar da melhoria, continuaram pouco expressivos quando da consideração das formas do leito: 34,80% para dunas, 56,25% para leito plano e 0,0% para ripples.

Os autores indicam que é possível grandes discrepâncias no caso de sedimentos extremamente não uniformes e com um grande percentual de sólidos finos, sendo a confiabilidade do método estabelecida em função do tamanho do sedimento. No entanto, neste estudo, apesar da uniformidade do sedimento, os resultados não foram satisfatórios. Todavia a relação deve ser utilizada com a aplicação dos parâmetros de mobilidade das partículas para o caso de dunas e ripples, e sem a aplicação de tais parâmetros quando ocorrer leito plano.

### 7.2.3. Fórmula de L.G.VAN RIJN [RIJN (1984)]

O método baseia-se em conceitos a respeito de tensão de cisalhamento; procura definir um parâmetro relativo ao diâmetro das partículas de sedimento e a partir dele chegar a velocidade de cisalhamento crítica. Esta é relacionada com a

velocidade de cisalhamento referente aos grãos de sedimento calculada com o raio hidráulico do leito, para o cálculo do transporte sólido. Através de uma relação entre as velocidades de cisalhamento citadas, gera-se um parâmetro de transporte, que permite a definição de uma relação para o cálculo da carga do leito e da própria concentração de referência " $C_a$ ", necessária ao cálculo da carga em suspensão.

O método também considera os efeitos da turbulência do fluxo, através do relacionamento entre a velocidade de queda das partículas e a velocidade de cisalhamento calculada com o raio hidráulico do leito.

Da análise dos resultados verifica-se que, sem considerar as formas do leito, 45,57% dos ensaios enquadraram-se na faixa de dispersão de -50% a +100%. Os resultados também são razoáveis quando consideram as formas do leito: 43,50% para o caso de dunas, 68,75% no caso de leito plano e 0,0% para o caso de ripples, apesar de subestimar a quantidade de sedimentos transportada. Apesar desta performance, verificou-se que para o sedimento mais fino a equação enquadrou todos resultados na faixa preestabelecida.

Os fatores empíricos utilizados para a determinação da carga do leito e da própria concentração de referência, incluem o valor da máxima concentração de sedimentos no complexo água-sedimento. RIJN assumiu esta máxima concentração como 0,65. A relação entre a velocidade de queda e a velocidade de cisalhamento do leito sendo  $\geq 0,01$  e  $\leq 1$  delimita o campo de aplicação utilizado para o desenvolvimento da metodologia.

A metodologia sugere ter sido direcionada para fluxos com razoável carga em suspensão, e apresentou resultados apenas satisfatórios nesta pesquisa.

#### 7.2.4.Fórmula de YANG [Annandale (1986), Yang (1973)]

A metodologia de Yang utiliza o conceito de potencial de fluxo, que é definido como o produto da velocidade média do fluxo pela declividade da linha de energia. YANG procurou demonstrar que a distribuição da concentração de sedimentos em uma vertical entre o fundo e a superfície do canal é diretamente relacionada à taxa de distribuição vertical de energia produzida devido à turbulência, por isto ressalta a importância da velocidade de queda das partículas. A relação entre a velocidade média crítica, que define o movimento incipiente das partículas, e a velocidade de queda, foi definida como 2,05 para leitos considerados hidraulicamente rugosos, como é o caso dos ripples e das dunas.

A relação de YANG foi elaborada empiricamente e fornece diretamente a carga total no fluxo através do cálculo da concentração de sedimentos.

No cálculo da velocidade de cisalhamento foram utilizados o raio hidráulico do leito e o raio hidráulico da superfície do fundo. Verificou-se, pelos resultados obtidos, uma aproximação entre os valores totais de transporte calculados, dificultando uma conclusão conceitual. Pode-se até supor que a influência da rugosidade proveniente da formação do leito não tem um papel significativo na metodologia.

Os resultados quando foram analisados sem a



consideração das formas do leito indicaram que 71,61% d'êles situaram-se na faixa de dispersão de -50% a +100% com uma distribuição bastante equilibrada em torno do valor da quantidade de sedimentos medida no laboratório. Considerando as formas do leito, os resultados também foram muito bons com exceção de ripples: 82,65% para dunas e 87,50% para leito plano. Para ripples nenhum valor calculado ficou dentro desta faixa.

Os resultados obtidos com os dados deste trabalho foram bons com a metodologia de YANG, talvez devido ao perfeito enquadramento dos parâmetros deste estudo dentro dos limites utilizados nos ensaios que serviram de base para o desenvolvimento da equação de Yang, tais como: diâmetro representativo do sedimento maior que 0,137mm e menor que 1,71mm; profundidade média maior que 0,01m e menor que 15,2m; gradiente de energia maior que 0,0043 e menor que 2,79%; velocidade média entre 0,229m/s e 1,966m/s; temperatura entre 0 C e 34,3C e concentração de sedimento entre 10mg/l e 585000mg/l.

#### 7.2.5. Fórmula de U.ZANKE [DVWK, Bulletin 17 (1990)]

No método, utiliza-se uma velocidade de cisalhamento baseada na influência da viscosidade e outra baseada no diâmetro representativo do sedimento. Estas duas velocidades de cisalhamento dão origem a uma velocidade de cisalhamento crítica. Define-se também uma outra velocidade de cisalhamento crítica referente às partículas em suspensão, além da velocidade de cisalhamento das partículas do leito. A partir da relação entre as velocidades de cisalhamento citadas, chega-se a uma

expressão para a carga do leito e a outra para a carga em suspensão.

A aplicação desta metodologia foi testada com o raio hidráulico do leito e da superfície do leito, e os resultados foram bastante diferentes indicando uma grande sensibilidade do método a este parâmetro.

Os resultados obtidos pela utilização desta equação não foram satisfatórios. Agrupando todos os dados sem distinguir as formas do leito apenas 34,72% dos resultados estavam compreendidos numa faixa de dispersão entre 0,5 e 2. Considerando as formas do leito os resultados também não foram animadores: 47,25% para dunas, 31,25% para leito plano e 0,0% para ripples.

Os resultados mostraram que esta teoria fornece excelentes respostas quando o fluxo transporta grandes quantidades de sedimento e o diâmetro representativo do sedimento é grosso ou médio (0,75mm), o que leva a crer que a aplicação desta fórmula seja mais adequada para este tipo de condição. Entretanto, uma verificação com mais dados será necessária para uma melhor conclusão.

#### 7.2.6. Fórmula de J. PERNECKER e VOLLMER [DVWK, Bulletin 17 (1990)]

Neste método determina-se diretamente a carga total de sedimentos com uma grande influência da velocidade de cisalhamento. Na equação proposta, este parâmetro aparece elevado à terceira potência enfatizando sua grande importância.

Neste método determina-se um número de transporte de sedimentos e a partir dele, um número de Froude relativo ao leito, para , em seguida, definir estocasticamente uma formulação específica.

Foi verificado o emprego do raio hidráulico do leito e o raio hidráulico da superfície do leito na equação, que apresentou grande sensibilidade ao referido parâmetro. A diferença entre os resultados obtidos com cada um dos raios hidráulicos foi bastante expressiva.

Os resultados fornecidos pela equação foram desanimadores , pois todos os valores calculados ficaram defasados do valor medido em laboratório por mais de 100%.

7.2.7.Fórmula de BAGNOLD [Graff (1977), Simons e Senturk (1977), Vanoni (1975)]

Neste método utiliza-se considerações teóricas sobre a energia gasta no transporte de sedimentos e o seu relacionamento com a quantidade de sedimentos transportada. Empiricamente se define fatores de eficiência para o transporte da carga do leito e da carga em suspensão, em função do diâmetro representativo dos sedimentos, que são incorporados na equação de transporte.

Para BAGNOLD [Graff (1977)] a potência útil do fluxo supera a energia gasta no transporte de sedimentos e a sua metodologia é mais indicada para fluxos com altas taxas de transporte, como acontece nos casos de leito plano. A não variação da forma do leito, segundo BAGNOLD, constitui-se num

fator importante para a correta aplicação da equação, pois a descarga de sedimentos pode ser expressa como uma única função do potencial de fluxo

Foram utilizados o raio hidráulico do leito e o da superfície do leito no cálculo da velocidade de cisalhamento. As diferenças entre os valores resultantes foram grandes, mostrando a sensibilidade da equação a este parâmetro.

A análise dos resultados mostra que sem a consideração das formas do leito eles não são satisfatórios, pois apenas 56,42% dos casos ficaram numa faixa de dispersão entre 0,5 e 2, ou seja, na faixa de -50% a +100%. A distribuição da dispersão em torno dos valores medidos foi bem equilibrada. Considerando cada forma do leito em separado, os resultados tornaram-se mais significativos: 43,50% para o caso de dunas, 100% para o caso de leito plano e 0,0% para o caso de ripples.

Da análise realizada observou-se que o método apresentou excelentes resultados para casos de leito plano, concordando com as recomendações do autor, e com as conclusões de Srinivasan e Curi [Curi (1986)].

#### 7.2.8. Fórmula de EINSTEIN [Vanoni (1975) et al.]

Este método evita o critério do início do movimento do sedimento associado a um valor crítico e define dois parâmetros: o parâmetro de intensidade de cisalhamento e a taxa de carga do leito transportada. O parâmetro de transporte da carga do leito é expresso como uma função do parâmetro de cisalhamento e a função é obtida com dados de campo e de

laboratório.

Para a determinação da carga em suspensão, leva-se em consideração a variação da concentração de sedimentos na seção vertical do canal. Utiliza-se a distribuição de velocidade de Keulegan [Vanoni (1975)], e considera-se a rugosidade das formas do leito criando um método para a determinação do raio hidráulico da superfície do fundo: através do relacionamento entre a profundidade média do fluxo e o parâmetro chamado de rugosidade aparente da superfície do fundo. Introduce-se um parâmetro de transporte  $P_E$  e expressa-se os efeitos da turbulência através da relação entre a velocidade de queda e a velocidade de cisalhamento devido à superfície do leito. O interrelacionamento entre os parâmetros é definido numericamente por duas integrais que permitem determinar a carga em suspensão e, conseqüentemente, a carga total.

A utilização do raio hidráulico do leito e da superfície do leito, simultaneamente, está inserida na hipótese básica da metodologia de Einstein, então, para esta teoria, não seria interessante verificar sua sensibilidade a um outro parâmetro de raio hidráulico; assim, para esta metodologia, nas tabelas dos resultados (Tab 6.7, 6.7 e 6.8) aparece apenas um valor.

Considerando os resultados sem a distinção das formas do leito, 32,55% deles ficaram numa faixa de dispersão entre 0,5 e 2. Considerando as formas do leito os resultados foram mais significativos: 0,0% para dunas, 93,75% para leito plano e 0,0% para ripples.

Apesar da bibliografia [Vanoni (1975)] citar o

método como aquele que apresenta grandes variações percentuais em relação ao valor medido, pode-se notar que os resultados tenderam a se aproximar do mesmo quando o fluxo passa a transportar grande quantidade de sedimentos, como no caso de leito plano. Como a teoria de EINSTEIN é baseada na probabilidade de erosão da partícula de sedimento e em outras premissas conceituais relativamente complexas, não se conseguiu identificar algo que pudesse justificar tal comportamento. De qualquer forma todos os resultados avaliados superestimaram a quantidade de sedimentos transportada. A metodologia parece ser mais adequada para leitos hidraulicamente rugosos e com altas taxas de transporte, e onde a carga do leito seja uma significativa parte da carga total.

7.2.9. Fórmula de LAURSEN [Simons e Senturk (1977), Vanoni (1975)]

Nesta metodologia procura-se não fazer distinção entre a carga do leito e a carga em suspensão, gerando diretamente a carga total de sedimentos. A equação relaciona a diferença entre a tensão de cisalhamento média e a tensão de cisalhamento crítica com a relação entre a velocidade de queda das partículas e a velocidade de cisalhamento no leito, que em última análise é uma forma de expressar a turbulência e, conseqüentemente a carga em suspensão.

Apesar do conceito do raio hidráulico a ser utilizado na equação estar bastante claro, foi verificada a sensibilidade da equação utilizando o raio hidráulico do leito, ou seja, substituiu-se a tensão de cisalhamento da superfície do

ou seja , substituiu-se a tensão de cisalhamento da superfície do leito pela tensão de cisalhamento no leito. Com este procedimento obteve-se excelentes resultados para leito plano; de forma geral os resultados melhoraram.

Analisando os resultados sem distinção das formas do leito verificou-se que apenas 30,38% deles estavam numa faixa de dispersão entre 0,5 e 2. Considerando as formas do leito os resultados foram excelentes apenas para leito plano: 0,00% para o caso de dunas, 100,0% para leito plano e 0,0% para ripples.

## CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### B.1. Conclusões.

Qual a fórmula de transporte de sedimentos que deveria ser utilizada para estimar a quantidade de sedimento em um determinado rio? - Esta questão, que frequentemente incomoda engenheiros hidráulicos engajados em projetos de controle de sedimentos, e mais o fato de que o leito móvel de um rio assume formas diferentes em função da velocidade e profundidade de fluxo, além do que tais formas não contribuem para o transporte de sedimento, foram o ponto de partida deste trabalho que tem como objeto verificar qual a equação de transporte que melhor avalia a quantidade de sedimentos transportada em presença de cada uma das formas do leito conhecidas como dunas, ripples e leito plano. Além disto devido à possível inconsistência nos métodos de determinação do raio hidráulico do leito e da superfície do leito, procurou-se verificar a sensibilidade de cada equação a este parâmetro.

Assim sendo, em face dos resultados alcançados, pode-se afirmar que: não foi possível eleger uma relação de transporte como a mais adequada para fluxos com taxas de transporte muito baixas com a formação ripples, pois o trabalho não permite ser conclusivo em face do reduzido número de ensaios realizados e da própria dispersão dos resultados obtidos; a equação mais adequada para fluxos com a forma do leito "dunas" foi a de YANG, com mais de 80% dos resultados enquadrados na



faixa padrão, -50% a +100% do valor medido em laboratório; as equações mais adequadas para utilização quando a forma do leito é "leito plano" foram as de BAGNOLD, LAURSEN e EINSTEIN, com mais de 90% dos resultados enquadrados na faixa de dispersão padrão.

Apesar deste trabalho tentar correlacionar uma equação de transporte, com uma determinada forma do leito, verificou-se que a equação de YANG, independentemente da forma do leito, forneceu resultado bastante adequado a uma utilização geral.

Quanto à sensibilidade das equações ao parâmetro raio hidráulico, verificou-se que a equação de YANG foi a menos sensível à variação desse parâmetro. De forma que qualquer inconsistência nos métodos de determinação do raio hidráulico, não classifica o resultado obtido pela equação como uma avaliação absurda. Foi observado que as equações de Meyer-Peter e Muller, a de Engelund e Hansen e a de Laursen, quando se tratar de leito plano, devem utilizar o raio hidráulico do leito, sem qualquer tipo de correção, ou seja, as fórmulas com a consideração da rugosidade e da mobilidade das partículas devem ser aplicadas somente para dunas e ripples.

Verificou-se que algumas das equações têm tendência a fornecer melhores resultados quando o sedimento transportado é classificado como médio ou granular. No entanto, este trabalho não permite uma afirmativa taxativa.

A equação de RIJN demonstrou ser mais adequada para o caso de sedimentos mais finos e taxa de transporte alta. Todos os resultados para este caso aproximaram-se mais da

quantidade de sedimentos medida.

A bibliografia disponível cita muitos trabalhos com uma conclusão semelhante: o estudo de White, Milll e Grabe [Annandale (1984)] citou a metodologia de Yang como a mais precisa equação de transporte; o estudo de Nakato T. (1990), realizado no rio Sacramento, verificou uma maior dispersão dos resultados quando o fluxo transportava pequena quantidade de sedimento, ao mesmo tempo em que apresentou a equação de Yang, quando se refere à carga total, como aquela que forneceu valores mais próximos das quantidades de sedimento observadas nas estações de medição, principalmente nas faixas de descarga mais altas; alguns trabalhos citam outras equações como mais adequadas, no entanto, a maioria dos trabalhos mais recentes enquadram a metodologia de Yang como uma das mais precisas.

Ficou claro que, quando se trata de leito plano, há uma sensível melhora dos resultados na maioria das equações. Isto indica que a consideração da rugosidade devido à forma do leito é realmente fonte de inconsistência e que a tentativa de expressá-la matematicamente, mesmo que empiricamente, ainda não atingiu um caráter genérico.

## 8.2 Recomendações

Há necessidade de um estudo mais detalhado, com um número maior de ensaios, dos fluxos com baixa taxa de transporte com a forma do leito ripples.

Por outro lado devem ser feitas campanhas de medição em rios, para se enquadrar as mais diversas situações

regionais, verificar o comportamento das várias equações e generalizar sua aplicação.

Recomenda-se ainda um estudo mais cuidadoso das fórmulas de transporte de sedimento em função da granulometria do material do leito: um estudo que abranja vários tamanhos de material, isoladamente ou misturados, para limitar ainda mais a faixa de aplicação de cada equação.

A utilização das equações, mesmo nos casos recomendados por este trabalho, deve ser feita por engenheiro experimentado, capaz de analisar adequadamente a relação entre os parâmetros hidráulicos obtidos.

# ANEXO 1

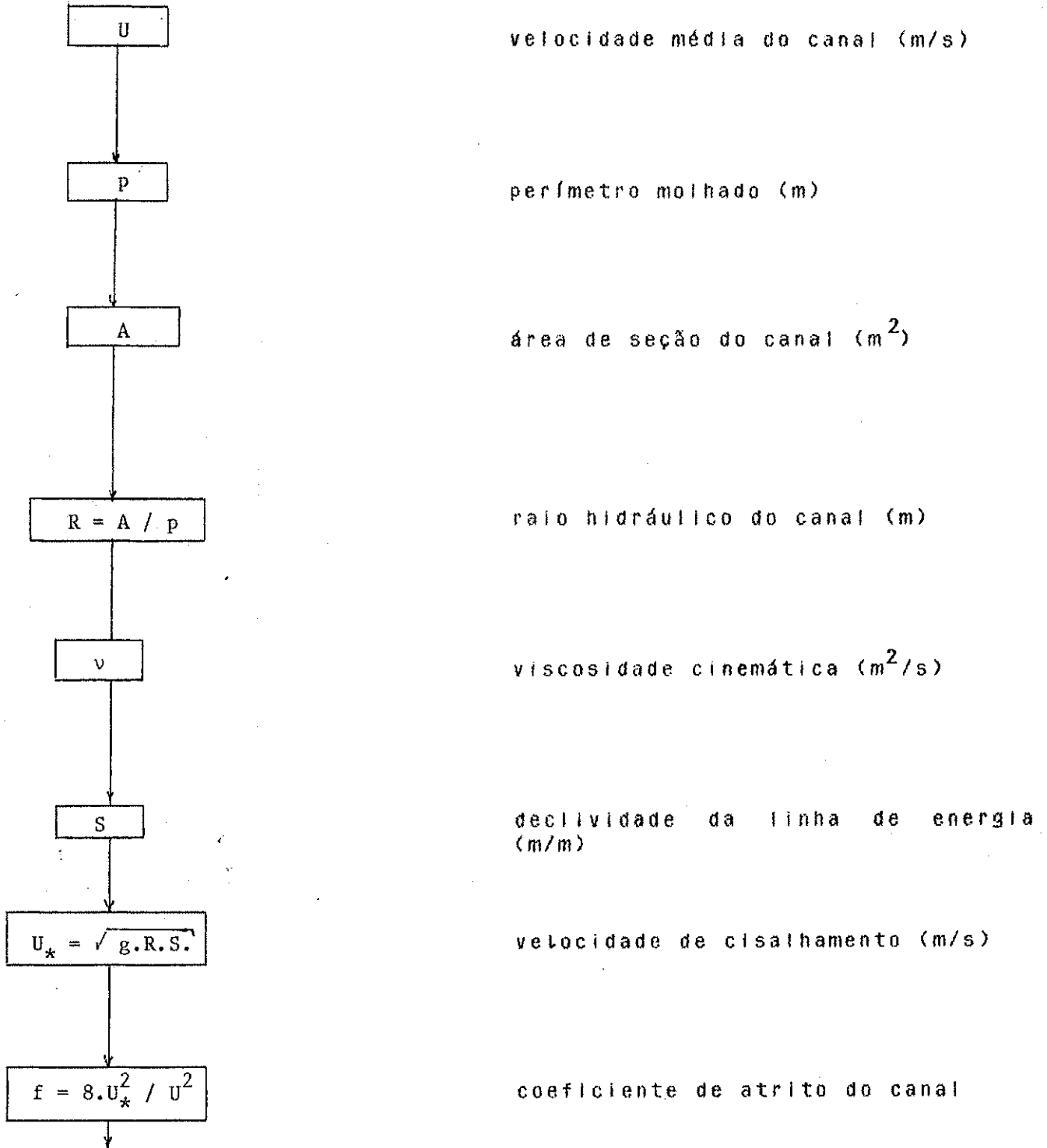
## MÉTODO DE VANONI-BROOKS

Procedimento para a Correção do Efeito das Paredes Laterais do Canal.

Geralmente o leito de areia de canais de laboratório é mais rugoso que as paredes, que normalmente são de vidro. Em canais naturais o leito pode ser mais ou menos rugoso que as laterais. O método de Vanoni e Brooks é um procedimento de cálculo que permite a determinação de uma força cisalhante exercida sobre o leito como se o canal fosse largo, sem a influência das paredes laterais. Assim procedendo, os dados de laboratório podem ser aplicados e verificados no campo. Para o desenvolvimento do método foram feitas as seguintes hipóteses:

- 1) A seção transversal pode ser dividida em duas seções, uma produzindo cisalhamento no leito e a outra nas paredes.
- 2) A velocidade em cada seção é igual à velocidade no canal.
- 3) O raio hidráulico  $R$ , a velocidade de cisalhamento  $U_*$ , o coeficiente de atrito  $f$  e o Número de Reynolds  $Re$ , podem ser calculados para cada seção, como se cada uma fosse de um canal.
- 4) As rugosidades das superfícies são homogêneas, embora diferentes.

## Procedimento de Cálculo



$$R_e = 4. R. U/v$$

Número de Reynolds do canal

$$R_{e_w} / f_w = R_e / f$$

a relação entre o Número de Reynolds e o coeficiente de atrito são iguais para as paredes, para o leito e para o canal como um todo

$$f_w$$

coeficiente de atrito da parede, obtido a partir do gráfico da fig.2.6.

$$d, b$$

profundidade e largura do canal respectivamente (m)

$$f_b = f + 2.d.(f - f_w) / b$$

coeficiente de atrito relativo ao leito

$$R_{b_i} = f_b \cdot U^2 / (8.g.S)$$

raio hidráulico relativo ao leito (m)

$$U_{*b} = \sqrt{g \cdot R_{b_i} \cdot S}$$

velocidade de cisalhamento relativa ao leito (m/s)

$$\tau_b = \rho \cdot U_{*b}^2$$

tensão de cisalhamento relativa ao leito (N/m<sup>2</sup>)

Foi assumido que a relação de Darcy-Weisback pode ser aplicada para cada parte da seção crítica bem como para a seção como um todo, ou seja:

$$\frac{U^2}{S} = \frac{8.g.A}{f.p} = \frac{8.g.A_b}{f_b.p_b} = \frac{8.g.A_w}{f_w.p_w}$$

(área do leito e das paredes)

$$A = A_b + A_w$$

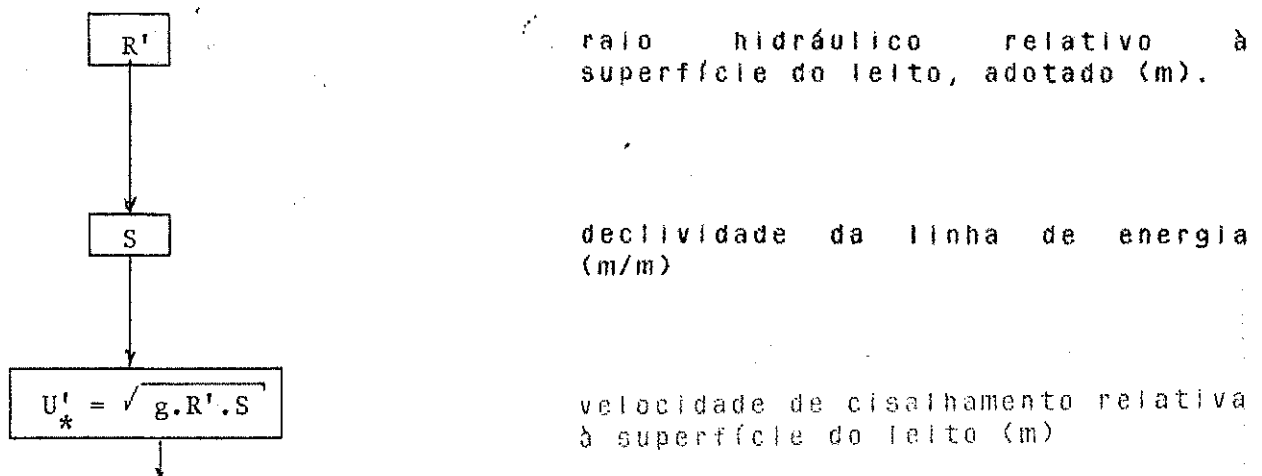


## MÉTODO DE EINSTEIN E BARBAROSSA (1952)

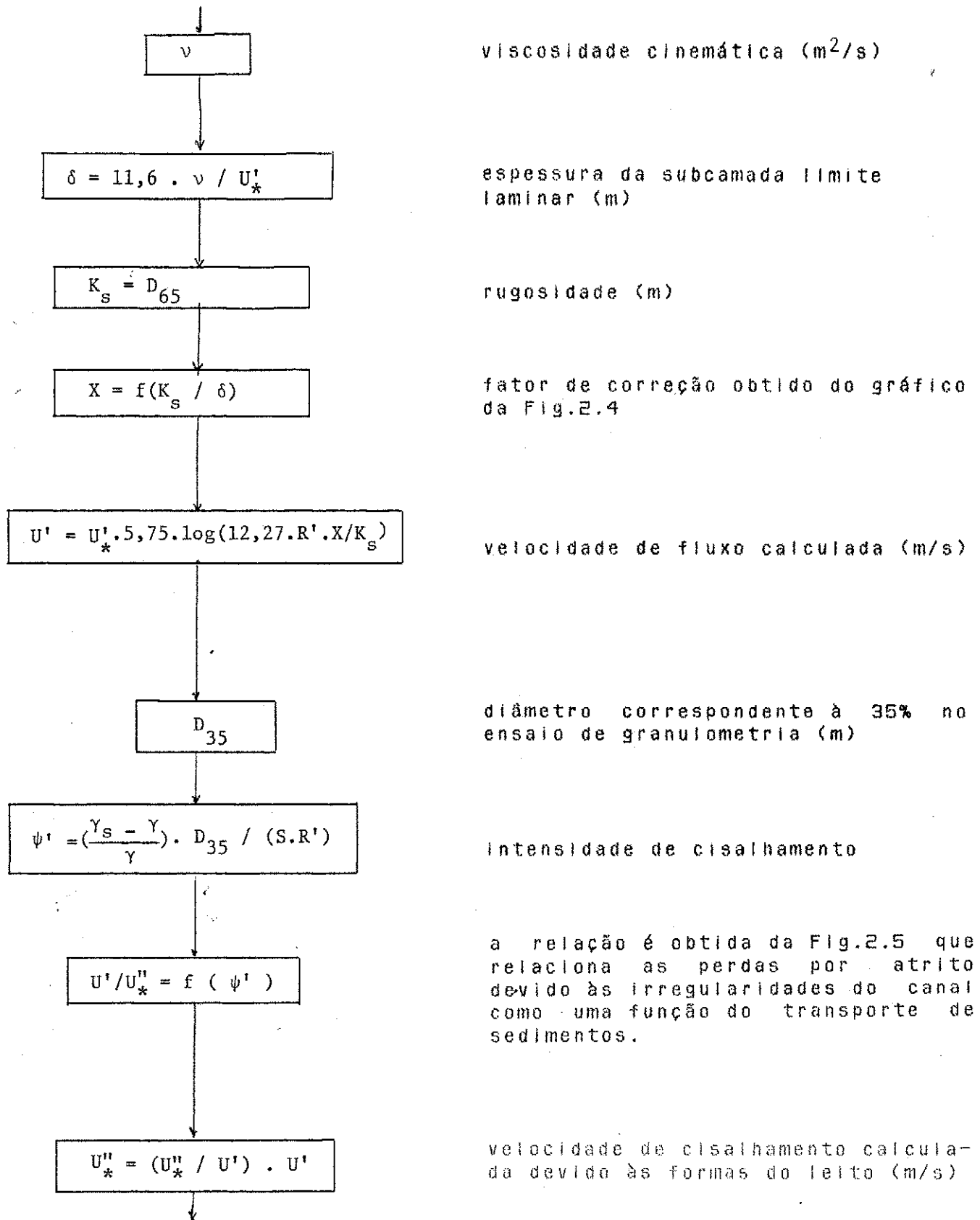
Procedimento para a Consideração da Influência das Formas do Leito.

Geralmente há necessidade de se eliminar a resistência ao fluxo provocada pelas formas do leito. Um método para se determinar esta resistência foi desenvolvido por Einstein e Barbarossa, através da velocidade de cisalhamento ( $U_*''$ ) necessária para gerar as figuras do leito. Observando o comportamento de vários rios, os autores do método definiram um parâmetro de transporte e o correlacionaram com a relação  $U/U_*''$ , como mostra a Fig.2.5. Adotando este gráfico como adequado para todos os casos pode-se, a partir da velocidade de cisalhamento referente às formas do leito e por tentativa, chegar ao raio hidráulico da superfície do leito.

## Procedimento de cálculo







$$R'' = U_*'^2 / (g \cdot S)$$

raio hidráulico calculado para as formas do leito (considerando as formas do leito) (m)

$$R'_b = R_b - R''$$

raio hidráulico correspondente à eliminação dos efeitos da forma do leito cuja resistência não contribui para o transporte de sedimentos.  $R_b$  é o raio hidráulico calculado referente ao leito, por Vanoni-Brooks.

$$R'_b = R'_b$$

$$U'_{*b} = \sqrt{g \cdot R'_b \cdot S'}$$

Novo  $R'$

$$\tau'_b = \rho \cdot U'_{*b}{}^2$$

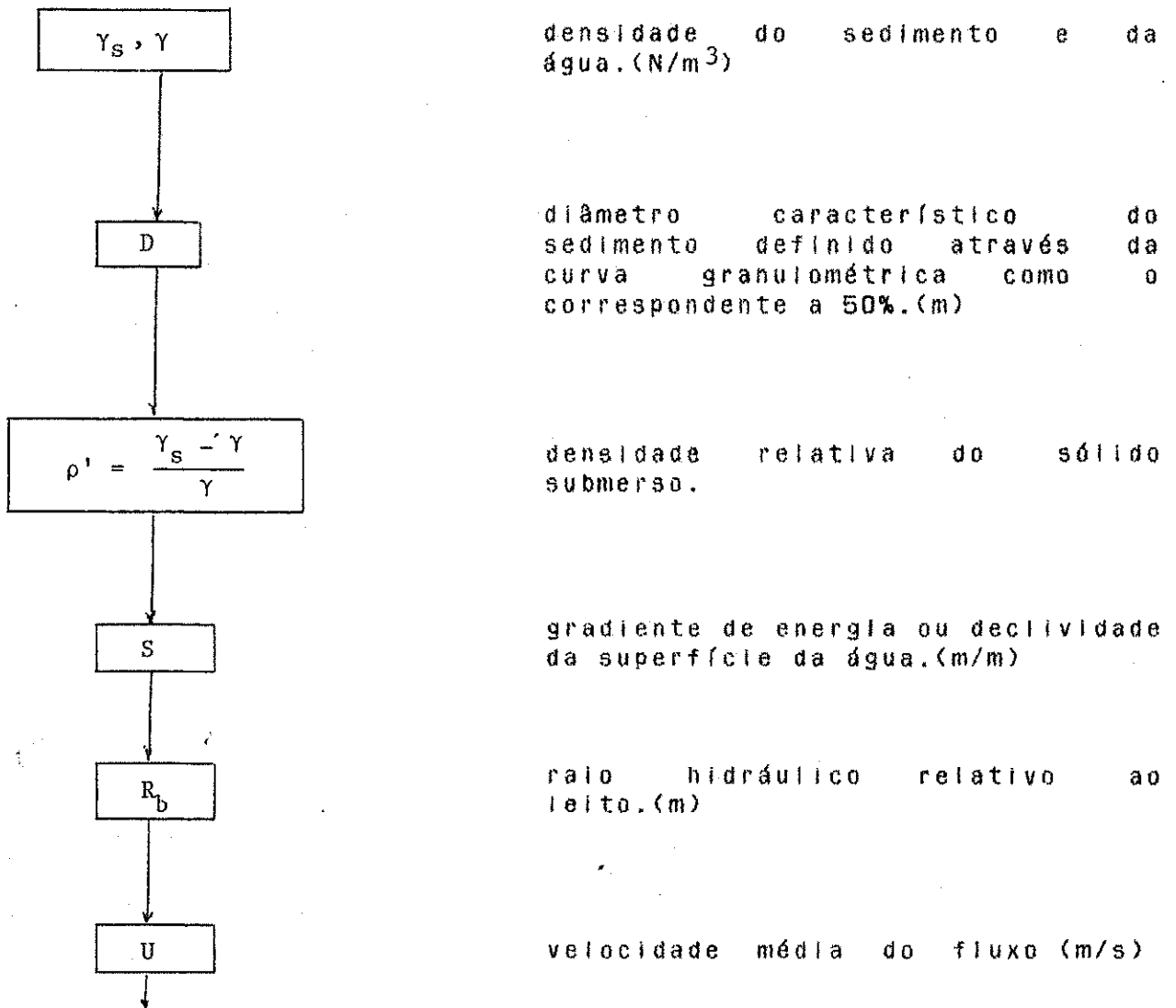
INÍCIO

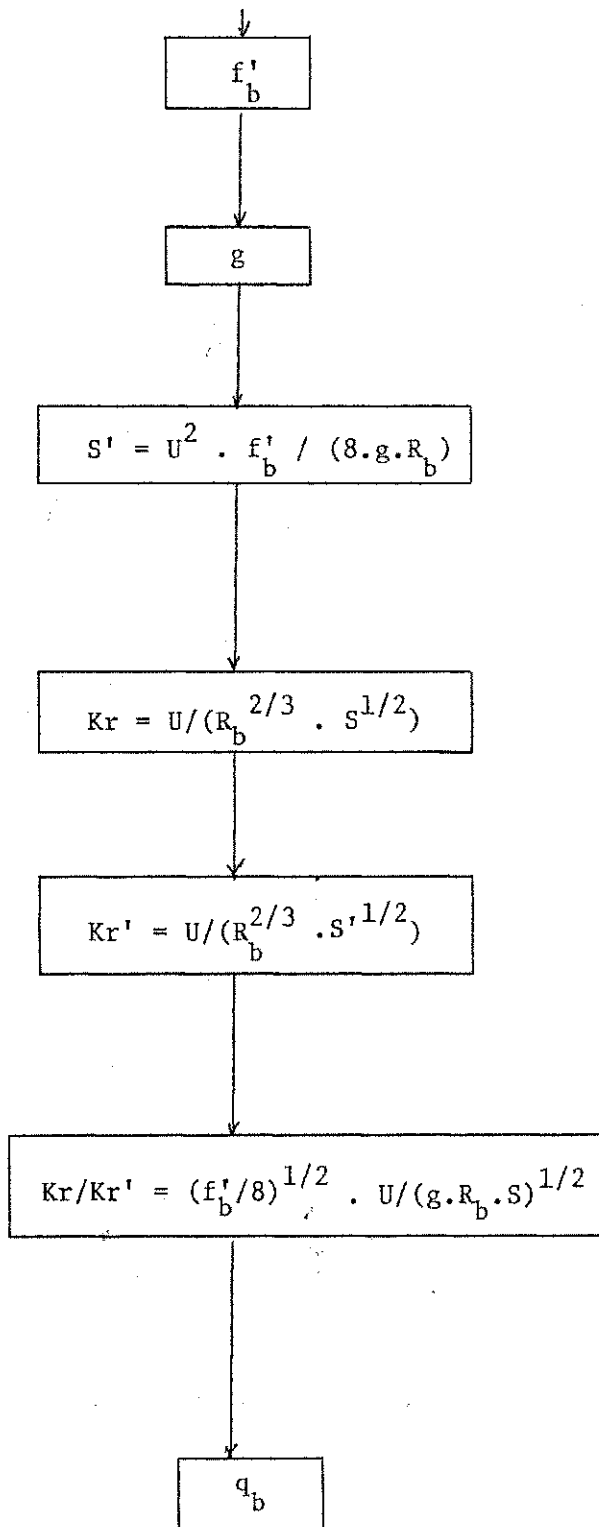
FIM

ANEXO 3

Equação de E.MEYER-PETER e R.MULLER (1948)

$$(K_r/K_r')^{1,5} \cdot \gamma \cdot R_b \cdot S = 0,047 (\gamma_s - \gamma) \cdot D + 0,25 \cdot \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)^{2/3} \cdot q_b^{2/3}$$





fator de fricção do leito de Darcy-Weisbach, para rugosidade do grão de areia.

aceleração da gravidade.

é a parte da energia total necessária para superar a resistência do leito: ponto crítico para o início do movimento sólido.

coeficiente de rugosidade relativo à energia total dispendida.

coeficiente de rugosidade que representa a energia gasta para vencer a resistência dos grãos.

relação entre os parâmetros.

vazão de sedimentos calculada usando a fórmula geral apresentada (Kg/s/m).

## ANEXO 4

Equação de F. ENGELUND e E. HANSEN (1967)

$$q_T = \frac{U^2}{20 \cdot g \cdot d \cdot S} \cdot \sqrt{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right) \cdot g \cdot D^3} \cdot \left[ \frac{\rho \cdot g \cdot d \cdot S}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D} \right]^{5/2}$$

$\rho, \rho', D$

massa específica do fluido (Kg/m), densidade relativa do sedimento submerso e o diâmetro representativo do sedimento (m)

$g, d, S$

aceleração da gravidade, profundidade do fluxo e declividade da linha de energia (m/s<sup>2</sup>, m e m/m)

$\gamma_s, \gamma, R_b$

peso específico do sedimento e da água (N/m<sup>3</sup>), e o ralo hidráulico do fundo (m).

$\theta = R_b \cdot S / (\rho' \cdot D)$

parâmetro de mobilidade das partículas de sedimento

$\theta > 0,15$

N

$$\theta' = 0,06 + 0,4 \cdot \theta^2$$

S

$$\theta' = 0,4 \cdot \theta^2$$

$$R'_b = R_b \cdot \theta' / \theta$$

$$U_{*b}' = \sqrt{g \cdot R_b' \cdot S}$$

$$K = 2,5 \cdot D$$

$$U = U_{*b}' \cdot (6,0 + 2,5 \cdot \ln(d'/K_s))$$

$$q_T$$

velocidade de cisalhamento no leito relativo à rugosidade dos grãos (m/s)

rugosidade da areia (em m)

velocidade média do fluxo (m/s)

descarga de sedimento total em (kg/s), de acordo com a fórmula apresentada.

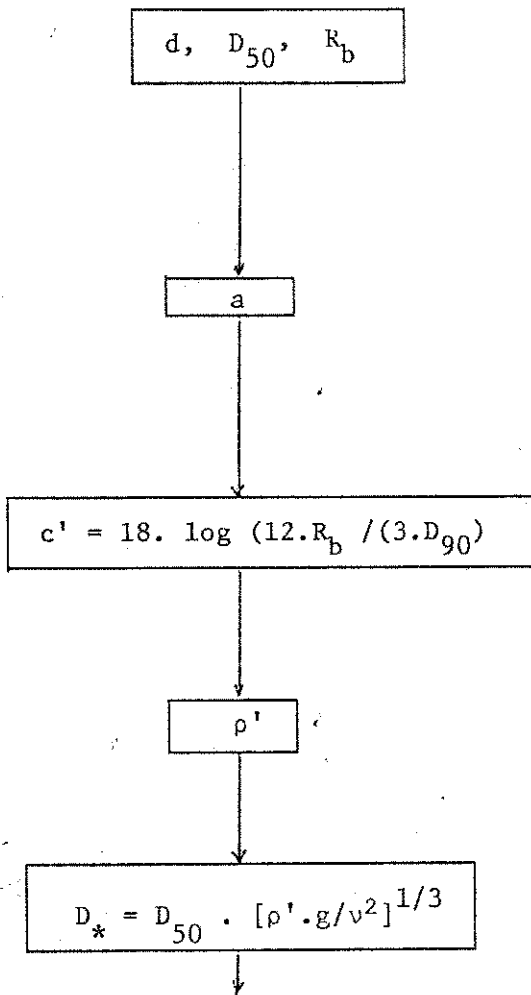
ANEXO 5

Equação de LEO C.VAN RIJN (1982)

$$q_b = 0,053 \cdot (T_1^{2,1} / D_*^{0,3}) \cdot \sqrt{\rho' \cdot g} \cdot D_{50}^{1,5}$$

$$q_s = F.U.d.Ca$$

$$q_T = q_b + q_s$$



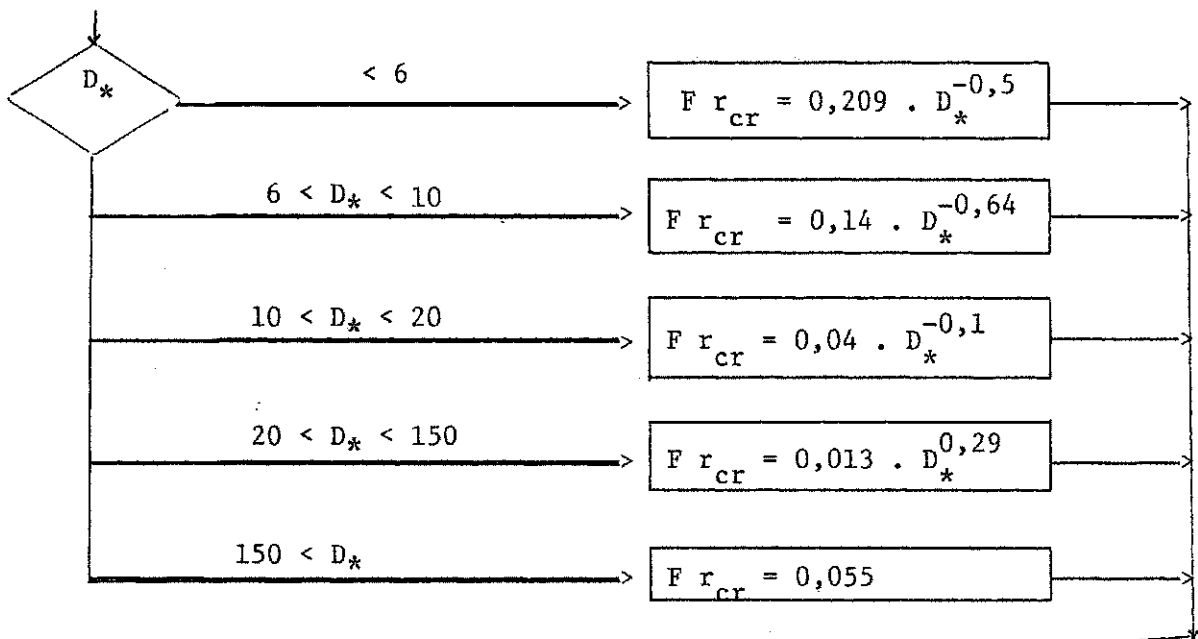
profundidade de fluxo, diâmetro correspondente a 50% do material do leito e o raio hidráulico da superfície do leito. (m)

nível de referência: igual à metade da altura da forma do leito ( $\Delta$ ) ou a altura da rugosidade equivalente de Nikuradsen ( $K_s$ ) se a dimensão da forma do leito não for conhecida.

coeficiente de Chézy relativo aos grãos do sedimento.

densidade relativa dos sedimentos submersos.  $(\gamma_s - \gamma) / \gamma$

parâmetro relativo ao diâmetro da partícula.



$$U_{*cr} = \sqrt{F r_{cr} \cdot g \cdot \rho' \cdot D_{50}}$$

velocidade de cisalhamento crítica (m/s).

$$U$$

velocidade média do fluxo (m/s).

$$U'_* = (g^{0,5} / c') \cdot U$$

velocidade de cisalhamento relativa aos grãos de sedimento (m/s).

$$T_1 = (U_*'^2 - U_{*cr}^2) / U_{*cr}^2$$

parâmetro de transporte.

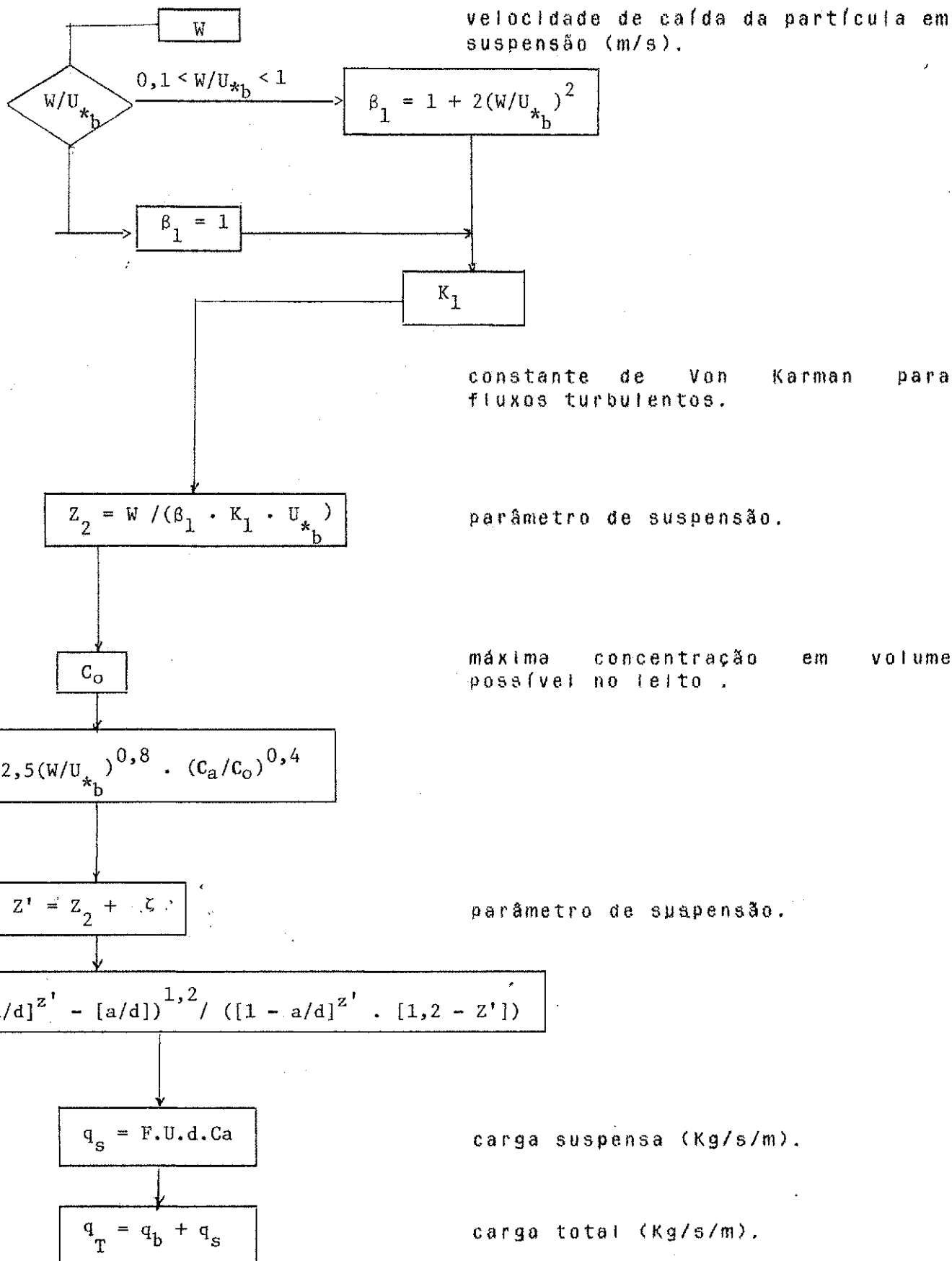
$$q_b = 0,053 (T_1^{2,1} / D_*^{0,3}) \sqrt{\rho' \cdot g \cdot D_{50}^{1,5}}$$

carga do leito (Kg/s/m)

$$C_a = 0,015 (D_{50} / a) T_1^{1,5} / D_*^{0,3}$$

concentração de referência em volume sólido por unidade de volume do fluido.

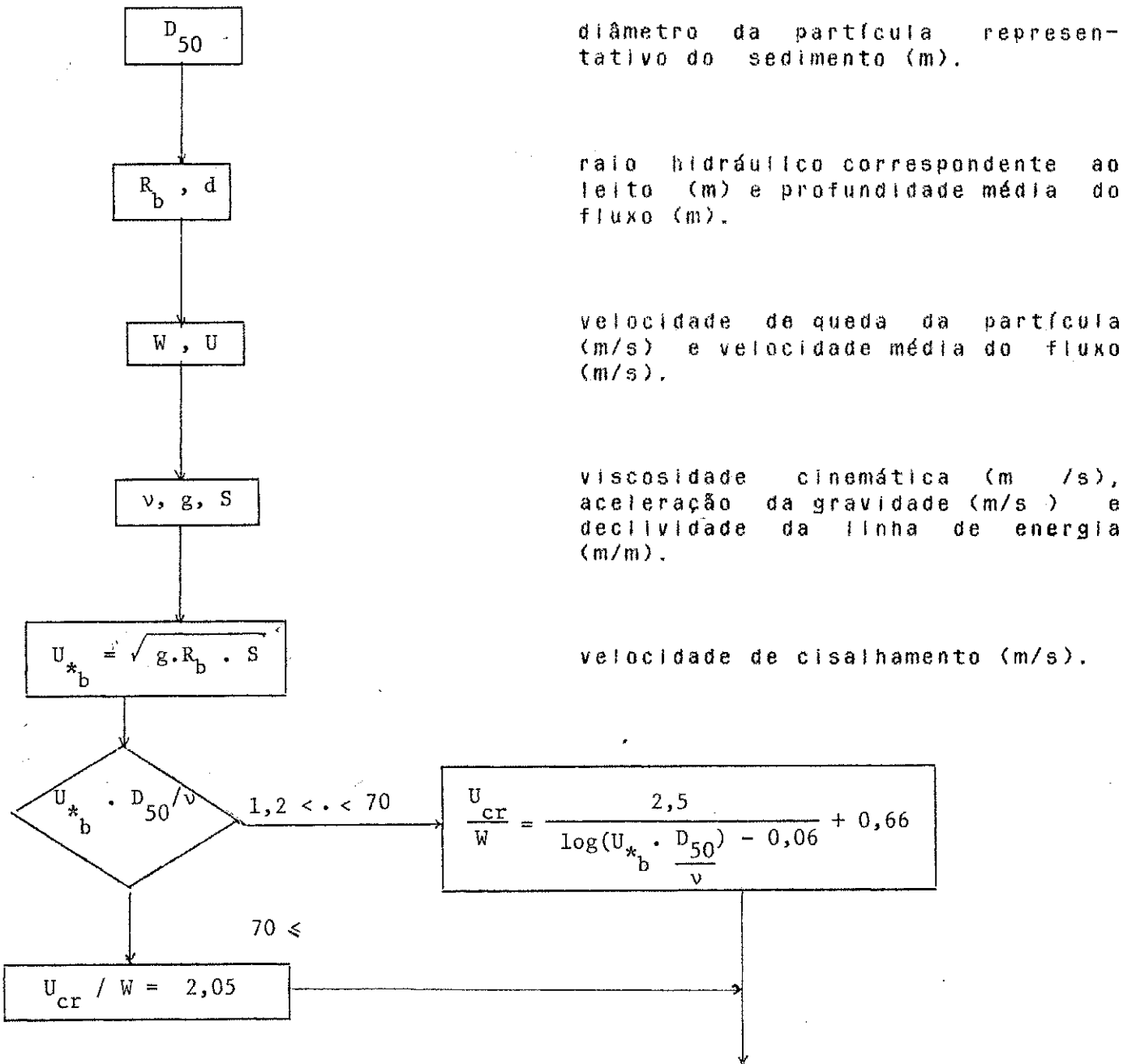




ANEXO 6

Equação de YANG (1973)

$$q = C \cdot 0,001 \cdot d \cdot U$$



$$U_{cr} = (U_{*b} / W) \cdot W$$

velocidade média crítica para o movimento incipiente da partícula.

$$\log C = 5,435 - 0,286 \log(W \cdot D_{50} / \nu) - 0,457 (U_{*b} / W) + \\ + [1,799 - 0,409 \log(W \cdot D_{50} / \nu) - 0,314 \log(U_{*b} / W)] \cdot \log[U \cdot S / W - U_{cr} \cdot S / W]$$

C

concentração ou massa de sedimentos por unidade de volume da água (mg/l).

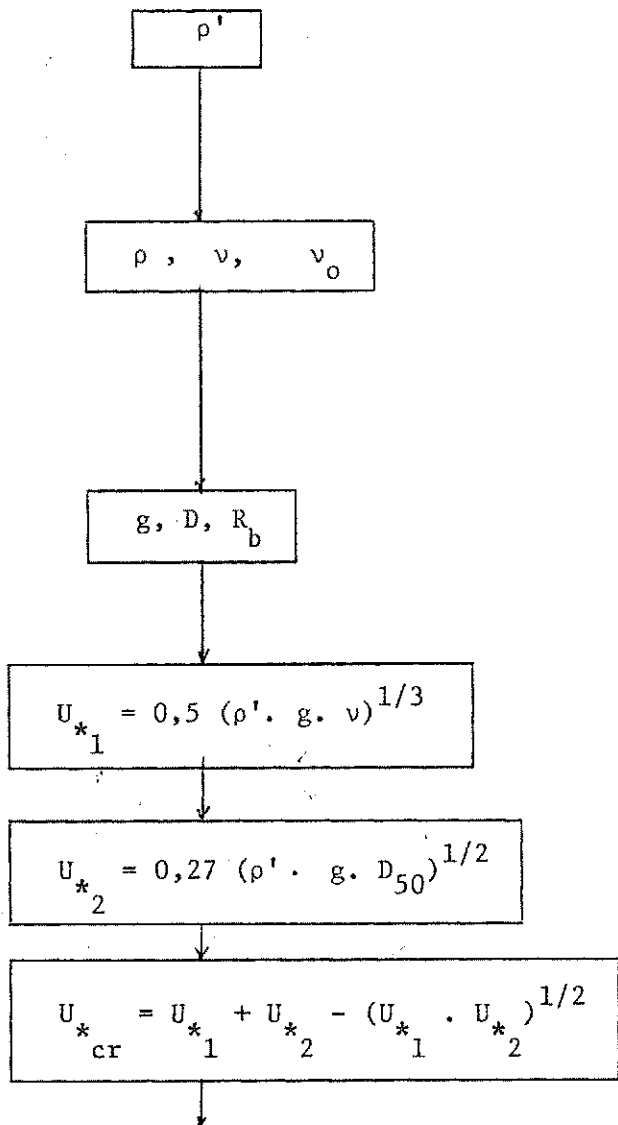
$$q = C \cdot 0,001 \cdot d \cdot U$$

taxa de sedimentos transportados (kg/m/s).

ANEXO 7

Equação de U. ZANKE (1982)

$$q_T = \frac{1}{P} 6,36 \cdot D_*^4 \cdot v [10^{-4} (U_*^2 - U_{*cr}^2) / W^2 + 10^{-5} \cdot d \frac{(U_*^2 - U_{*cr}^2) (U_*^2 - U_{*o}^2)}{W^4 \cdot 0,01} \cdot (\frac{v}{v_o - v})^{1/4}]$$



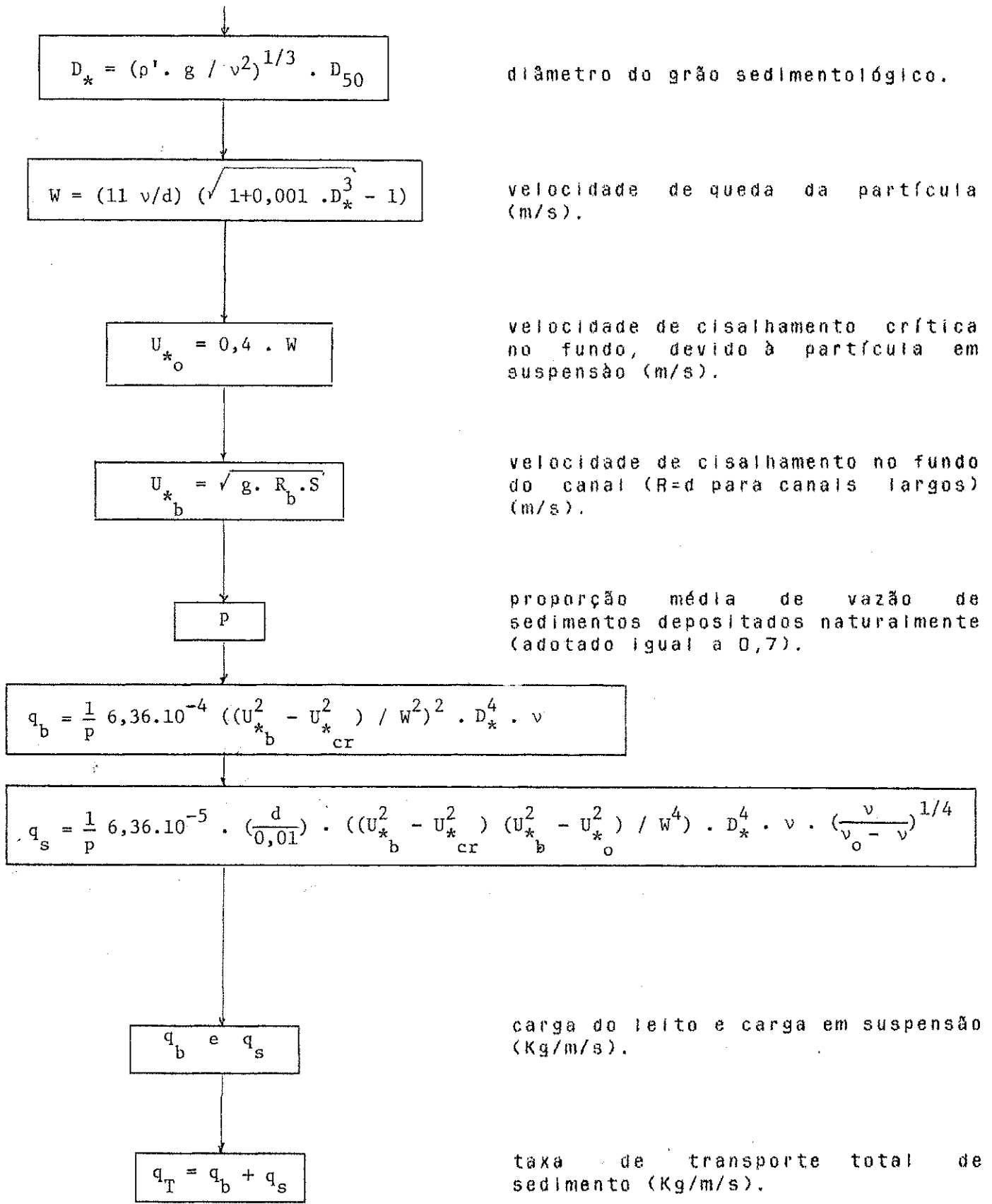
densidade relativa dos sólidos.

massa específica do fluido (kg/m), viscosidade cinemática da água (m/s) e viscosidade da água (m /s) para T=0°C.

aceleração da gravidade (m/s ) e diâmetro representativo do sedimento (m) e o raio hidráulico do leito (m).

velocidade de cisalhamento (m/s).

velocidade de cisalhamento (m/s).



ANEXO 8

Equação de L. PERNECKER e J.VOLLMERS (1985)

$$q_T = G_* \cdot \rho \cdot U_{*b}^3$$

$$\rho$$

massa específica da água.

$$g, R_b, S$$

aceleração da gravidade, raio hidráulico e declividade da linha de energia.

$$U_{*b} = \sqrt{g \cdot R_b \cdot S}$$

velocidade de cisalhamento no fundo do canal (m/s).

$$F_{r*} = \frac{U_{*b}^2}{\rho' \cdot g \cdot D_{50}}$$

Número de Froude do sedimento.

$$G_* = 25 \cdot F_{r*}^{-1}$$

número de transporte de sedimentos.

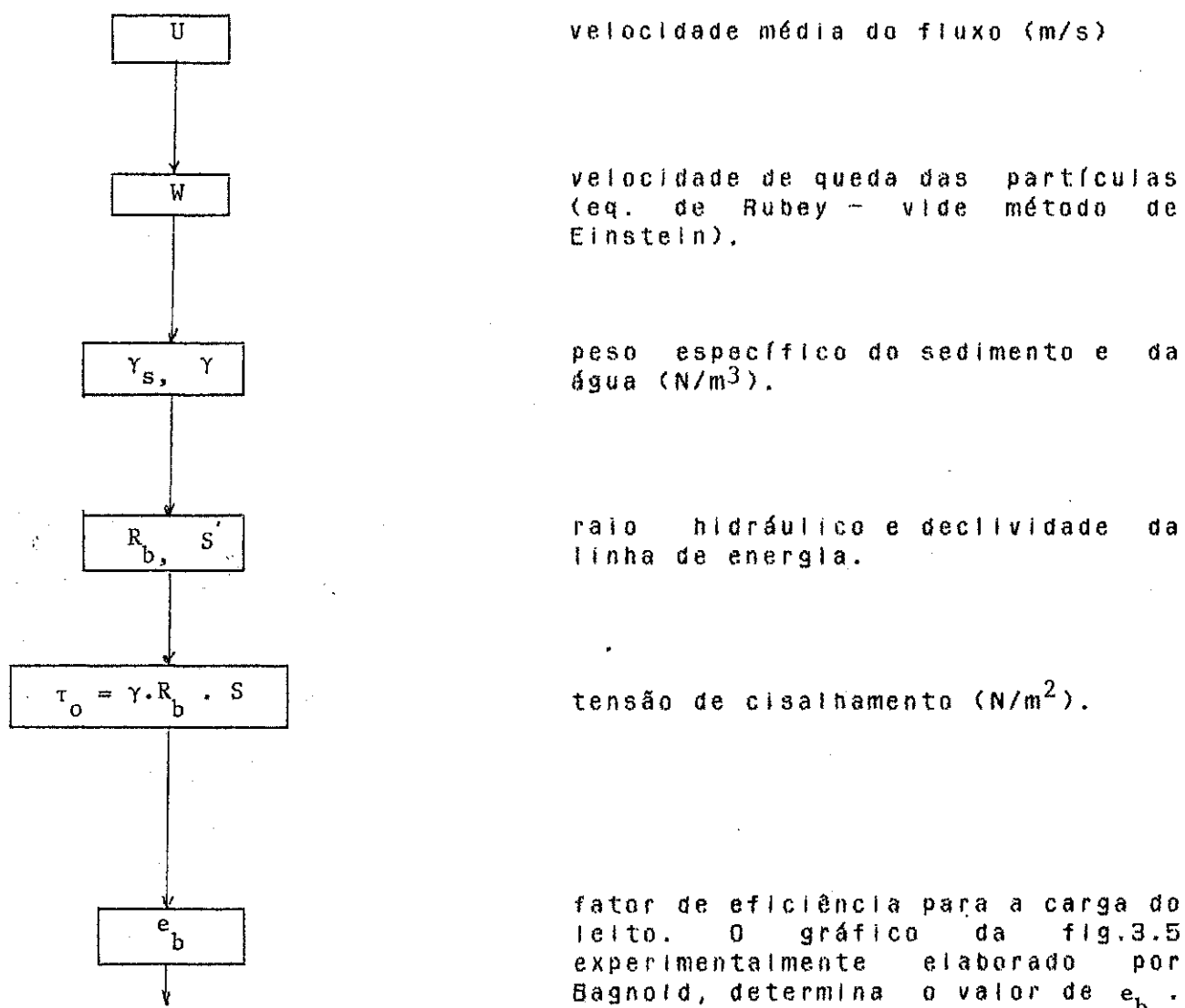
$$q_T$$

taxa total de sedimentos transportados em peso submerso por largura e tempo (Kg/m/s).

ANEXO 9

Equação de BAGNOLO (1986)

$$q_T = q_b + q_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \cdot \tau_o \cdot U \left( \frac{e_b}{\tan \alpha} + 0,01 \frac{U}{W} \right)$$





coeficiente de atrito sólido. O gráfico da fig.3.6, elaborado experimentalmente por Bagnold, dá o valor de  $\alpha$ , em função de  $D_{50}$  (diâmetro do grão) e de

$$\frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D_{50}}$$

descarga total de sedimentos em peso seco por unidade de tempo e largura.



ANEXO 10

Equação de EINSTEIN (1950)

$$q_T = q_b (1 + P_E \cdot I_1 + I_2)$$

$\rho_s, \rho, D$

massa específica do sedimento, massa específica da água e o diâmetro representativo do material do leito.

$S, R'_b$

gradiente de energia ou declividade da superfície da água e o raio hidráulico relativo aos grãos de sedimento.

$$\psi = (\rho_s - \rho) \frac{D}{\rho \cdot R'_b \cdot S}$$

parâmetro de intensidade de cisalhamento.

$\Phi$

parâmetro referente à taxa da carga do leito transportada, obtida da relação da fig.3.3 entre  $\Phi$  e  $\psi$ .

$\gamma_s, \gamma'_s, g$

peso específico do sedimento ( $N/m^3$ ), peso específico do sedimento submerso ( $N/m^3$ ) e aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$$q_b = \frac{\phi \gamma_s}{\sqrt{\frac{\gamma}{g \cdot \gamma'_s \cdot D^3}}}$$

taxa de transporte da carga do leito em peso por unidade tempo e largura (Kg/m/s)

$$U'_{*b} = \sqrt{g \cdot R'_b \cdot S}$$

velocidade de cisalhamento (m/s).

$\nu$

viscosidade do fluido obtida de tabela em função da temperatura do fluido (m<sup>2</sup>/s).

$$\delta = 11,6 \cdot \frac{\nu}{U'_{*b}}$$

espessura da subcamada limite laminar (m).

$D_{65}$

tamanho do sedimento do leito correspondente em peso a 65% mais fino, representando a rugosidade do leito (m).

X

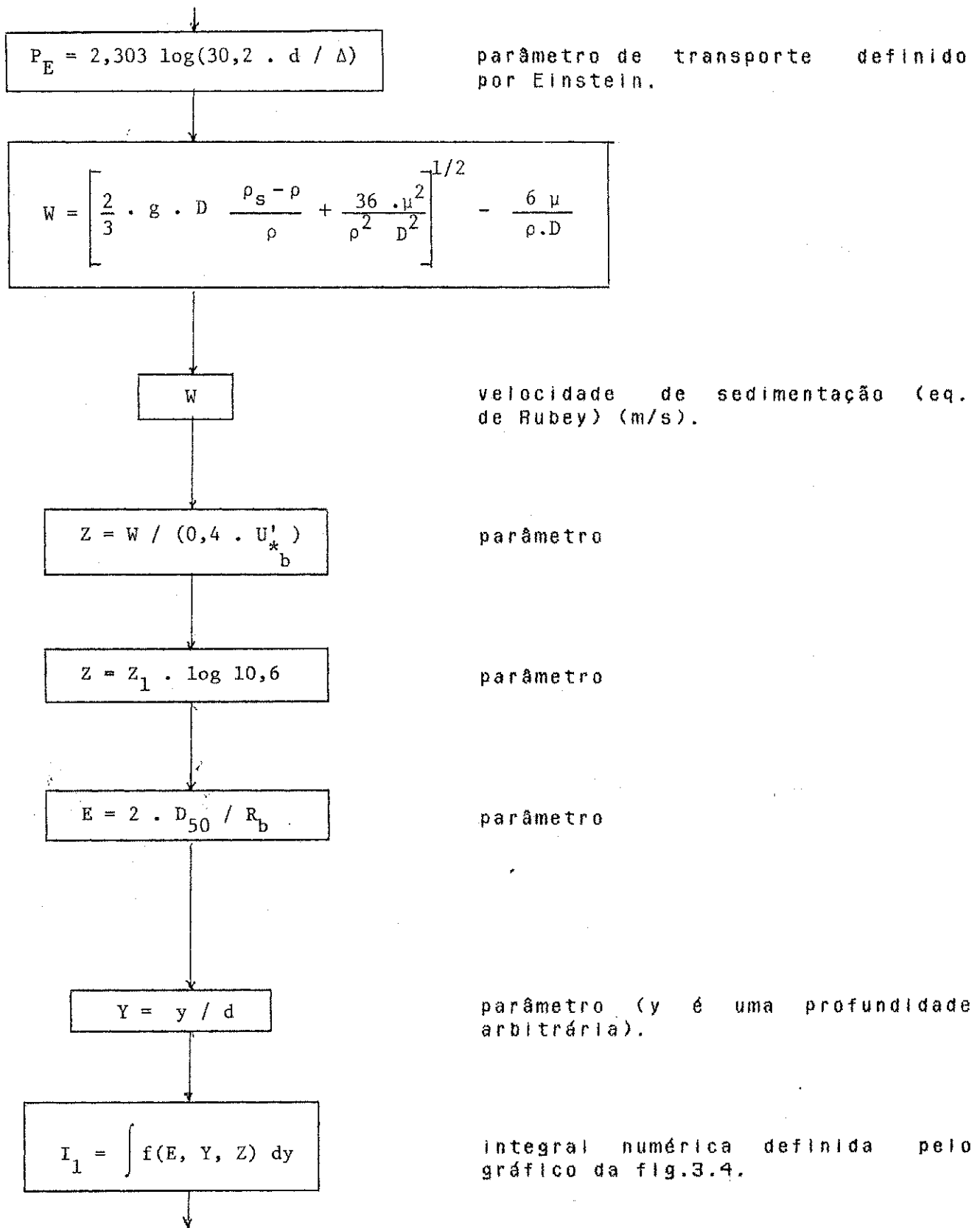
fator de correção adimensional em função de  $\Delta$  tirado do gráfico da fig.2.4, que representa a equação de distribuição de Keulegan.

$$\Delta = D_{65} / X$$

rugosidade aparente da superfície do leito.

d

profundidade do fluxo (m).



$$I_2 = \int f(E, Y, Z) dy$$

$$q_T$$

Integral numérica definida pelo gráfico da fig.3.5.

descarga total de sedimentos (Kg/m/s).

ANEXO 11

Equação de LAURSEN (1958)

$$C = 0,01 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{7/6} \cdot \left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1\right) \cdot f\left(\frac{U_{*b}}{W}\right)$$

D, d,  $\gamma$ ,  $\rho$

diâmetro do grão representativo do leito (m), profundidade do fluxo (m), peso específico (N/m) e massa específica (Kg/m<sup>3</sup>).

U, D<sub>50</sub>

velocidade média do fluxo (m/s) e o diâmetro correspondente a 50% do material do leito (m).

$$\tau'_0 = \left(\frac{\rho \cdot U^2}{58}\right) \left(\frac{D_{50}}{R_b}\right)^{1/3}$$

tensão de cisalhamento média no leito devido a resistência dos grãos (N/m).

S

declividade da superfície da água.

$$U_{*b} = \sqrt{g \cdot R_b \cdot S}$$

velocidade de cisalhamento (m/s).

W

velocidade de queda da partícula de tamanho médio ( equação de Rubey - vide método de Einstein).

$$f \left( \frac{U_*^* b}{W} \right)$$

função que expressa a turbulência da mistura ( fig 3.6).

$$\tau_c = 0,039 \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot D_{50}$$

tensão de cisalhamento crítica (N/m<sup>2</sup>).

$$C$$

concentração média total de sedimentos em peso por unidade de volume (fórmula inicial).

$$Q$$

vazão líquida em volume, por unidade de tempo e largura.

$$q_T = Q \cdot C$$

descarga total de sedimentos, em peso seco por unidade de tempo e largura.

## BIBLIOGRAFIA

### PRINCIPAL

1. ANNANDALE, G.W.(1987). " Reservoir Sedimentation." Developments in Water Resources - Vol 29. Elsevier, Amsterdam, 215p.

2. GHIEW, Y.M (1991). " Bed Features in Nonuniform Sediments." Journal of Hydraulic Engineering, Vol 117, nr 1, JAN, pp 116-120.

3. CUNHA, L.D.(1978). " Comportamento da Onda no Leito e sua Aplicação à Medição da Descarga de Sedimentos por Arrasto." Tese de Mestrado da UFPB, Campina Grande-PB.

4. CUNHA, L.V.(1969). " Evolução e Posição Atual dos Conceitos sobre Transporte Sólido em escoamentos com Superfície Livre." Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

5. CURI, R.C.(1986). " Avaliação das Equações de Transporte de Sedimentos em Canais Aluviais." Tese de Mestrado da UFPB, Campina Grande-PB.

6. Bulletin 17 - DVWK (1990). " Sediment Transportation in Open Channels - Calculation Procedures for the Engineering Practice". Universität Der Bundeswehr München. Institut Für Wasserwesen.

7. GRAFF, W.H.(1971). " Hydraulics of Sediment Transport." Mc Graw Hill Book Company, New York, 513p.

8. NAKATO, T.(1990). "Tests of Selected Sediment-Transport Formulas." Journal of Hydraulic Engineering, Vol 116, nr 3, MAR, pp 362-377.

9. RAUDKIVI, A.J.(1976). " Loose Boundary Hydraulics." 2nd Ed. Pergamon Press International, Library.

10. RIJN, L.C.V.(1984). " Sediment Transport: Part I - Bed Load Transport". Journal of Hydraulic Engineering, Vol 110, nr 10, OUT, pp 1431-1436.

11. RIJN, L.C.V.(1984). "Sediment Transport: Part II - Suspended Load Transport". Journal of Hydraulic Engineering, Vol 110, nr 11, NOV, pp 1613-1641.

12. RIJN, L.C.V.(1984). " Sediment Transport: Part III - Bed Forms and Alluvial Roughness." Journal of Hydraulic Engineering, Vol 110, nr 12, DEC, pp 1733-1754 .

13. SRINIVASAN, V.S.(1969). " The Mechanics of Flet Bed Flow and Ocurrence of Bed Forms in Alluvial Channels". Ph.D Thesis. Waterloo, University of Waterloo.

14. SRINIVASAN, V.S. e HILL, M.H.(1985). " A Roughness-Instability Function for Analysis of Flow in Alluvial Channels." Anais do VI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vol 1, pp 243-257.

15. SRINIVASAN, V.S. e HILL, M.H.(1986). " A Previsão das Formas do Leito e Análise da Resistência em Canais Aluviais." Anais do XII Congresso Latino Americano de Hidráulica, São Paulo-SP.

16. SRINIVASAN, V.S. e SAWAI, K.(1991). " Um Sistema de Recirculação Computadorizado para Pesquisa em Transporte de Sedimentos." Anais do IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vol 3, pp 417-426.

17. SIMONS, D.B. e SENTURK, F.(1977). " Sediment Transport Technology." Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 807p.

18. VANONI, V.A.(1977). " Sedimentation Engineering." ASCE - Manual and Reports on Engineering Practices nr 54, 745p.

19. YANG, C.T.(1973). " Incipient Motion and Sediment Transport." Journal of Hydraulic Engineering, Vol 99, Nr HY 10, MAI, pp 1679-1701.

20. YANG, C.T. e WAN, S.(1991). " Comparisons of Selected Bed Materials Load Formulas." Journal of Hydraulic Engineering, Vol 117, nr 8, AUG, pp 973-989.

#### COMPLEMENTAR

21. GOMES, B. e HUBBELL, D. W. e STEVENS, H.H.Jr (1990). " At-a-Point Bed Load Sampling in the Presence of Dunes." Water Resources Research, Vol 26, nr 11, NOV, pp 2717-2731.

22. CLARKE, R.T.(1990). " Statistical Characteristics of Some Estimators of Sediments and Nutrient Loadings." Water Resources Research, Vol 26, nr 9, SET, pp 2229-2233.

23. CAREY, W.P. e JOBSON, H.E.(1989). " Interaction of Fine Sediment with Alluvial Streambeds." Water Resources Research, Vol 25, nr 1, JAN, pp 135-140.



24. WILCOCK, P.R. e SOUTHARD, J.B.(1989). " Bed Load Transport of Mixed Size Sediment: Fractional Transport Rates, Bed Forms, and Development of a Coarse Bed Surface Layer." Water Resources Research, Vol 25, nr 7, JUL, pp 1629-1641.

25. WILLIAMS, D.T. e JULIEV, P.V.(1989). "Applicability Index for Sand Transport Equations." Journal of Hydraulic Engineering, Vol 115, nr 11, NOV, pp 1578-1581.

26. LYN, D.A.(1991). " Resistance in Flat-Bed Sediment-Laden Flows." Journal of Hydraulic Engineering, Vol 117, nr 1, JAN, pp 94-114.

27. CELIK, I. e RODI, W.(1991). " Suspended Sediment-Transport Capacity for Open Channel Flow." Journal of Hydraulic Engineering, Vol 117, nr 2, FEV, pp 191-224.

28. WHITING, P.J. e DIETRICH, W.E.(1990). "Boundary Shear Stress and Roughness over Mobile Alluvial Beds." Journal of Hydraulic Engineering, Vol 116, nr 12, DEC, pp 1495-1511.