

DIEGO DOZZI TEZZA LOUREIRO

MÉTODOS ATUAIS E NOVAS TECNOLOGIAS PARA O MONITORAMENTO
DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM RIOS: NECESSIDADE DE DADOS
E INCERTEZAS ENVOLVIDAS.

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para a obtenção do Título
de Mestre em Ciências da Engenharia
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

São Carlos

2008

Dedico este trabalho a três pessoas especiais, as quais sem o carinho e apoio não seria possível a conclusão deste trabalho. À meu pai Antônio José (in memoriam), à minha mãe Odete e minha irmã Aline.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Frederico Fábio Mauad pela paciência, compreensão, confiança depositada no término desta pesquisa.

À minha querida mãe Odete Dozzi Tezza Loureiro, que sempre me estimula a crescer pessoalmente, científica, ética e profissional e esteve comigo desde o início da concepção deste trabalho, me apoiando mesmo nas madrugadas insones na frente do computador.

À minha irmã Aline Dozzi Tezza Loureiro, pelo apoio, carinho e incentivo durante a longa caminhada.

Aos meus antigos professores da Universidade Federal de Itajubá, que me ensinaram com prazer e dedicação parte do que sei e, o que é mais importante, me ensinaram a aprender sozinho.

Aos amigos de Mestrado que compartilharam comigo esses momentos de aprendizado, em especial à Liliane, amiga e companheira em todos os momentos e ao Francisco César Dalmo (“Cesinha”), que me apoiou e esteve presente no término desta pesquisa.

Ao amigo Felipe Jorge Teixeira, pela paciência em ouvir as constantes reclamações e pelo apoio durante esses anos de aprendizado.

A todos do professores, técnicos e funcionários do Núcleo de Hidrometria da EESC/USP.

Ao CNPq pela bolsa concedida para realização desta pesquisa.

Enfim, a todos aqueles que de uma maneira ou de outra contribuíram para que este percurso pudesse ser concluído.

“O destino final de todos os reservatórios é ser preenchido com sedimento. A pergunta é quanto tempo isso levará?”

(Linsley et al. 1992)

RESUMO

LOUREIRO, D. D. T. **Métodos atuais e novas tecnologias para o monitoramento do transporte de sedimentos em rios: necessidade de dados e incertezas envolvidas.** 2008. 91p.. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

O conhecimento dos processos que envolvem o transporte, deposição e suspensão de sedimentos em rios é de vital importância na conservação, desenvolvimento e utilização dos recursos hídricos e do meio ambiente. Entretanto, no Brasil, que possui como base energética a hidroeletricidade, não se tem dado a devida atenção no que se refere à sedimentação em virtude da dificuldade na aquisição desses dados e custos envolvidos. Sendo assim esta pesquisa teve como objetivo definir as necessidades relativas à precisão, facilidade, custo e frequência de aquisição dos dados referentes ao aporte de sedimentos em rios, identificando as tecnologias atuais e as tecnologias promissoras que estarão disponíveis em curto prazo para satisfazer essas necessidades.

Palavras-chave: Sedimentometria, concentração de sedimentos em suspensão, transporte de sedimentos.

ABSTRACT

LOUREIRO, D. D. T. Current methods and new technologies for monitoring the transport of sediment in rivers: the need for data and uncertainties involved. 2008. 91p.. Dissertation (Masters)

The knowledge of the processes involving the transport, deposition and suspension of sediment in rivers is of vital importance in the conservation, development and utilization of water resources and the environment. Meanwhile, in Brazil, which has based the hydropower energy, has not given proper consideration with regard to sedimentation due to the difficulty in acquiring such data and costs involved. So this research aimed to define the needs on the accuracy, ease, cost and frequency of data acquisition for the supply of sediment in rivers, identifying current technologies and promising technologies that will be available on short notice to meet those needs.

Keywords: Sedimentometry, concentration of sediments in suspension, transport of sediment

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo sedimentológico	17
Figura 2 – Variação das concentrações em uma seção transversal em função do tamanho das partículas em suspensão.....	26
Figura 3 – Variações temporais na concentração de sedimentos	29
Figura 4 – Corte longitudinal de um reservatório em operação sem variação do nível de água. Identificação dos principais tipos de depósito	30
Figura 5 – Relação entre o transporte de partículas em suspensão e o transporte de fundo com relação a velocidade do fluxo e a velocidade de queda das partículas.	33
Figura 6 – Variação da concentração de areia em função da profundidade e do tempo	37
Figura 7 – Amostrador BTMA.....	42
Figura 8 – Amostrador Helley Smith.....	43
Figura 9 – Amostrador Delft Nilo (DNS)	46
Figura 10 – Influência da velocidade de entrada nos perfis de sedimentos	49
Figura 11 – Erros de amostragem relativos ao coeficiente hidráulico	50
Figura 12 – Amostrador do tipo garrafa.....	51
Figura 13 – Tempo de enchimento da garrafa	52
Figura 14 – Amostrador armadilha pontual	55
Figura 15 - Amostrador armadilha de integração temporal	57
Figura 16 – Amostrador USP-61	60
Figura 17 – Tempo de enchimento da garrafa do amostrador	60
Figura 18 – Garrafa Delft.....	63

Figura 19 – Amostrador USD-49.....	66
Figura 20 – Princípio da transmissão.....	70
Figura 21 – Princípio do espalhamento.....	70
Figura 22 – Princípio da transmissão/espalhamento.....	71
Figura 23 – Sensor OBS.....	74
Figura 24 – Detalhe do sensor OBS.....	74
Figura 25 - LISST-100X.....	76
Figura 26 – ABS.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores que afetam a erosão e o transporte de sedimentos em uma superfície	19
Tabela 2 – Características dos instrumentos para a quantificação do transporte e concentração dos sedimentos.	35
Tabela 3 – Características das metodologias para amostragem de material de fundo	37
Tabela 4 - Características das metodologias para amostragem de material em suspensão.....	38
Tabela 5 – Período máximo de amostragem	41
Tabela 6 – Amostradores de sedimentos em suspensão.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	Acoustic Backscatter Sensors
ADCP	Acoustic Doppler Current Profile
ADV	Acoustic Doppler Velocitymeter
PHI	Programa Hidrológico Internacional
UNESCO	Organização das Nações Unidas
HOMS	Hydrological Operational Multipurpose System
OMM	Organização Meteorológica Mundial
CEMIG	Companhia de Eletricidade de Minas Gerais S. A.
DNOS	Departamento Nacional de Obras de Saneamento
ABRH	Associação Brasileira de Recursos Hídricos
USLE	Universal Soil Loss Equation
EUPS	Equação Universal da Perda de Solos
FISP	Federal Interagency Sediment Monitoring Instrument
DNS	Delft Nilo Sampler
HS	Helley Smith Sampler)
BTMA	Bed Load Transportmeter Arnhem
DB	Delft Bottle Sampler
OBS	Optical Backscatter Sensor
IREDD	Infra Red Emitting Diode
ASTM	Acoustic Sand Transport Meter
USTM	Ultrasonic Sand Transport Meter

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO DA PESQUISA	4
2.1. Objetivos gerais	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. BREVE HISTÓRIA DA SEDIMENTOMETRIA.....	6
3.1. Geral	6
3.2. Primeiros estudos sedimentométricos no Brasil	8
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
4.1. Visão geral do transporte de sedimentos.....	12
4.2. Características físicas dos sedimentos	14
4.3. Intemperismos e formação dos solos.....	15
4.4. Erosão, transporte e deposição	18
4.4.1. Mecânica do transporte	18
4.4.2. Erosão laminar e efeito da área de drenagem.....	22
4.4.3. Sedimentos grosseiros e transporte em rios.....	26
4.5. Características da hidrologia.....	27
4.5.1. Deposição em reservatórios	29
5. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO	31
5.1. Instrumentos de medida para o transporte de sedimentos	32

5.1.1. Aspectos Gerais.....	32
5.1.2. Características dos instrumentos.....	34
5.1.3. Tempo de amostragem:.....	34
5.1.4. Período mínimo do ciclo	35
5.1.5. Precisão global	35
5.1.6. Medições do transporte de sedimentos em rios	37
5.2. Descrição dos amostradores de fundo.....	38
5.2.1. Aspectos gerais	38
5.2.2. Arnhem (BTMA – “Bed load transportmeter Arnhem”).....	41
5.2.3. Helley Smith (HS)	43
5.2.4. Delft Nilo (DNS – “Delft Nilo Sampler”)	45
5.3. Descrição dos amostradores de sedimento em suspensão	48
5.3.1. Amostradores tipo armadilha e garrafa.....	48
5.3.2. Amostradores do tipo Garrafa.....	51
5.3.3. Amostrador tipo Armadilha	55
5.3.4. Amostrador armadilha de integração temporal	56
5.3.5. Amostrador de integração vertical USP-61	59
5.3.6. Amostrador de garrafa Delft (DB)	62
5.3.7. Amostrador de integração vertical USD-49.....	65
5.4. Métodos óticos e acústicos de amostragem	68
5.4.1. Princípios gerais	69
5.4.2. OBS –“Optical backscatter point sensor”	73

5.5. LISST - Optical Laser diffraction point sensors	76
5.6. Sensores pontuais acústicos (ASTM, UHCM, ADV)	78
5.6.1. Resultados e precisão da ASTM	79
5.6.2. ABS and ADCP -Acoustic backscatter profiling sensor	80
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1. INTRODUÇÃO

Na grande maioria dos Estados brasileiros constatam-se grandes perdas de solo por erosão, tornando-se este um dos principais problemas relacionados aos recursos naturais. A degradação das bacias hidrográficas devido às ações antrópicas: como o desmatamento, o uso inadequado do solo na agricultura e a crescente urbanização, associada aos fenômenos naturais de precipitação, resulta em grande quantidade de sedimentos que são transportados em um curto espaço de tempo. Além dos impactos da perda do solo, o seu transporte aos cursos dos rios, reservatórios e outras obras hidráulicas provoca o assoreamento e com conseqüente redução da capacidade de armazenamento dos mesmos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985 e PAIVA e PAIVA, 2003).

Um plano de medidas adequadas de conservação dos recursos naturais deve estar baseado em um real conhecimento do estado e do potencial de tais recursos. Assim, conhecer os rios é uma necessidade cada vez mais crescente, uma vez que são utilizados para os mais diversos fins: geração de energia, controle de cheias, navegação, irrigação, abastecimento de água, recreação, criação de peixes, controle de poluição, turismo e preservação do meio ambiente. (CARVALHO 1994).

Sabe-se que o uso das terras e dos recursos hídricos estão intimamente ligados. Assim, o conhecimento da interação entre a terra e a água é uma necessidade para o estudo de uma determinada bacia hidrográfica (CARVALHO 1994).

Neste contexto foram criadas organizações internacionais como a UNESCO, OMM, OEA, FAO para, entre outras tarefas, ditarem as normas de âmbito mundial, estudar cientificamente e colaborar com outras nações. Dentro deste aspecto foram criados programas especiais como o PHI (Programa Hidrológico Internacional) da

UNESCO (Organização das Nações Unidas) e o HOMS (Hydrological Operational Multipurpose System) da OMM (Organização Meteorológica Mundial) que muito têm contribuído para o conhecimento prático (CARVALHO 1994).

Diversas entidades públicas no país têm desenvolvido estudos dos recursos de terra e água para um aproveitamento e preservação adequados. Muitas áreas de estudo dentro do campo científico têm merecido o empenho necessário, tendo evoluído consideravelmente. No entanto, o estudo do sedimento tem sempre sido relegado a um segundo plano, fato este que pode ser constatado pela rede sedimentométrica instalada no Brasil, que em 1982 contava com apenas 178 postos número muito inferior as necessidades de um bom conhecimento da quantidade de transporte sólido nos cursos d'água. (CARVALHO 1994)

Dessa forma, há uma necessidade premente de promover a sedimentologia e estudar o sedimento, podendo este estudo ser feito em todas das fases: estudo da erosão, transporte sólido e o assoreamento. Divulgar trabalhos, treinar pessoal, ampliar a rede sedimentométrica, melhorar os laboratórios, procurar alternativas de estudos e resultados, informatizar, normalizar o processamento dos dados e criar um banco de dados, são providências urgentes a serem tomadas. (CARVALHO et al., 2000)

Diante deste cenário, a idéia do desenvolvimento desta pesquisa surgiu após o um estudo realizado recentemente por meio de um convênio entre a AES Tietê (projeto P&D / ANEEL), concessionária de geração de energia elétrica, e o Núcleo de Hidrometria do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, da Escola de Engenharia de São Carlos, o qual teve como produto final o levantamento batimétrico do reservatório da UHE de Barra Bonita, e atualização dos polinômios

Cota x Área x Volume, determinando assim o volume atual de água no reservatório e estabelecer seções para o controle futuro da sedimentação.

Com base neste estudo, que fornece informações das condições presentes relativas à deposição de sedimentos no fundo deste reservatório a partir da comparação batimétrica com a topografia original (TEIXEIRA, 2008), e visando uma complementação do mesmo, pretendia-se através de campanhas de medição em campo, analisar quantitativamente o aporte de sedimentos dos principais tributários afluentes ao reservatório para o estudo da operação e da vida útil do reservatório formado pela barragem da UHE Barra Bonita, utilizando para isto uma metodologia pouco aplicada atualmente, que consiste na utilização do ADP (Acoustic Doppler Profiler), para a determinação da concentração e transporte de sedimentos em rios.

No entanto, durante a etapa de coleta dos dados, e teste do equipamento na represa do Lobo em Itirapina, a metodologia mostrou-se inapropriada para vazões reduzidas, onde há grande influência do efeito de remanso que provoca uma rápida sedimentação das partículas finas.

Por outro lado, pode-se observar que para reservatórios de pequenas dimensões, característicos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), esta metodologia/equipamento não são apropriadas para quantificar o real aporte de sedimentos e assim, estudar o tempo de vida útil desses reservatórios.

Dessa forma, este trabalho visa coletar informações sobre as mais variadas metodologias praticadas no contexto mundial da sedimentometria, apontando as principais vantagens e desvantagens dos métodos e equipamentos utilizados atualmente.

2. OBJETIVO DA PESQUISA

2.1. Objetivos gerais

Diante da vasta quantidade de métodos aplicados ao contexto de medições de descarga sólida e das novas tecnologias em estudo, encontra-se a dificuldade na obtenção de dados referentes ao transporte de sedimentos em rios, fato esse evidenciado pela carente rede sedimentométrica instalada atualmente no Brasil.

Diversas entidades mundiais, dentre as quais se destaca a USGS (United States Geological Survey), vem constantemente realizando estudos e pesquisas visando o desenvolvimento de novas tecnologias e equipamentos capazes de promover uma melhoria na qualidade dos dados e uma maior facilidade na obtenção de parâmetros relativos ao transporte de sedimentos em rios.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é fazer uma pesquisa científica reunindo as metodologias aplicadas no contexto mundial do levantamento de dados referentes à quantificação do transporte de sedimentos em rios, a fim de que se estabeleçam informações suficientes e necessárias para trabalhos futuros no campo da sedimentometria e assim possa facilitar a aquisição dos dados e, conseqüentemente, melhorar os cálculos de previsão de vida útil dos reservatórios.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa foram definir as necessidades relativas à precisão, facilidade, custo e freqüência de aquisição dos dados referentes ao aporte de sedimentos em rios, identificando as tecnologias atuais e as tecnologias promissoras que estarão disponíveis em curto prazo para satisfazer essas necessidades.

Principais questões que serão respondidas durante o desenvolvimento desta pesquisa serão:

- Quais são as necessidades das agências, núcleos de pesquisas, projetistas, entre outros, quanto ao acesso aos dados relativos aos sedimentos em suspensão?
- Qual o nível de incerteza e erros envolvidos na determinação da concentração dos sedimentos em suspensão?
- Quais são os instrumentos atualmente em uso para coleta destes dados?
- Os dados obtidos são adequados em termo de quantidade e qualidade?
- Qual o objetivo, em longo prazo, da coleta de dados relativos aos sedimentos em suspensão?
- Quais são as novas tecnologias que serão úteis para a medição do transporte de sedimentos em suspensão nos próximos 3-5 anos?
- Quais são as vantagens e limitações destas novas tecnologias?
- De que forma as novas tecnologias podem resolver as limitações dos instrumentos utilizados atualmente (por exemplo, amostragem de material na zona morta, a automatização das coletas, diminuição no tempo de coleta dos dados, diminuição de custos e aumento da segurança dos técnicos de campo)?

3. BREVE HISTÓRIA DA SEDIMENTOMETRIA

3.1. Geral

As represas servem à humanidade por mais de 4500 anos. Com o tempo, as funções e os usos sofreram notáveis alterações havendo um avanço significativo na construção de represas para controlar o fluxo dos rios e para garantir o armazenamento da água. As mudanças tecnológicas foram paralelas à construção de represas cada vez maiores na intenção de se ganhar o controle de fontes de água cada vez maiores (STERNBERG, 2006)

Desde quando a humanidade deixou de caçar e começou a cultivar para seu próprio sustento, o abastecimento de água passou ser uma prioridade. Com o crescimento da população, particularmente em regiões mais quentes, a irrigação, que teve seu início aproximadamente entre os anos de 2000 e 3000a.c. na Mesopotâmia, passou a ser cada vez mais importante. As primeiras grandes civilizações nos vales dos rios Eufrates, Tigres e Nilo, desenvolveram as bases do gerenciamento dos recursos hídricos, o que fez com que houvesse um grande avanço no ramo das ciências que envolviam os fenômenos que relacionavam a natureza e o meio ambiente, em particular, os recursos hídricos (RAUDKIVI, 1993)

Contudo, a hidráulica e, em geral, os primeiros avanços na área do transporte de sedimentos, aparentemente se desenvolveram na China e paralelamente na Mesopotâmia e Egito, 4000 anos antes do início dessa era. Esses vestígios do desenvolvimento da hidráulica ainda podem ser encontrados na costa oeste da Anatólia, onde ainda existem grandes aquedutos, túneis e cisternas. (SIMONS e SENTÜRK, 1992).

A próxima fase do desenvolvimento se deu com o renascimento da Itália, onde o início desse período marcou o fim da transferência do conhecimento

tecnológico do Oriente para o Ocidente. Na verdade, a maior parte desse conhecimento se perdeu durante essa transferência em virtude das incessantes guerras. (SIMONS e SENTÜRK, 1992)

Por volta do ano de 1452, teve início um novo período, onde o desenvolvimento das ciências ocorreu mais rapidamente na Europa e depois na América. Leonardo da Vinci foi o primeiro homem a ensinar o conceito de modelagem hidráulica estudando e observando a movimentação dos sedimentos. (SIMONS e SENTÜRK, 1992)

No século XVII surgiram grandes contribuições a partir de engenheiros como Castelli, Toricelli, Hooke, Pascal entre outros, os quais contribuíram para a formação dos princípios básicos de hidráulica estudados até hoje. Nesse período, mereceu destaque Domenico Guglielmini (1655 – 1710), que pautado em observações de campo iniciou os estudos da engenharia de sedimentos, ficando assim conhecido como o pai da hidráulica fluvial. (SIMONS e SENTÜRK, 1992)

Em 1770, Frizi publicou um estudo discutindo uma considerável variedade de problemas relacionados com melhorias em rios e o transporte de sólidos pela água, sendo provavelmente a primeira pessoa a realizar estudos a respeito desse problema em laboratório. Frizi não acreditava que, ao serem transportadas para jusante, as partículas carregadas pelos rios poderiam se quebrar em partículas menores, contrário aos pensamentos de Guglielmini que acreditava nesse tipo de fracionamento das partículas por atrito ao serem transportadas pelos rios. Nesse período, século XVIII, grandes pesquisadores também contribuíram para o estudo desse fenômeno, assim como: Bernouilli (1700-1782), Lagrange (1786-1813), Laplace (1749-1827), Pitot (1695-1771) e Chézy (1718-1798). (SIMONS e SENTÜRK, 1992)

Nos séculos XIX e XX surgiram grandes pesquisadores, tais como, Jean-Claude Barre de Saint-Venant (1797-1886), R. Manning (1816-1897), Reynolds (1842-1912), W. Froude (1810-1879), etc. No entanto as principais contribuições para um maior entendimento dos problemas envolvendo sedimentos foram realizadas por pesquisadores como: J. Dupuit (1804-1866) e DuBoys (1847-1924). Dupuit foi a primeira pessoa a estudar seriamente o transporte dos sedimentos em suspensão, observando que a concentração de sedimentos perto do fundo do canal é maior que na superfície, evidenciando logo em seguida os efeitos da variação da velocidade de um ponto ao outro ao longo do canal. (SIMONS e SENTÜRK, 1992)

3.2. Primeiros estudos sedimentométricos no Brasil

Segundo (Carvalho, et al., 2000a), problemas relacionados à erosão e o assoreamento já causaram muitos prejuízos ao país e, no entanto não foram encontrados registros sobre medições de sedimento anteriores a 1950, sendo que, o primeiro trabalho registrado no país, envolvendo levantamentos sedimentométricos, foi efetuado no rio Camaquã- RS, tendo como finalidade fazer a previsão do assoreamento e cálculo da vida útil do reservatório da barragem de Paredão.

O segundo trabalho de sedimentometria no país teve a participação do Professor Carlos Eduardo de Almeida, da Escola Politécnica de São Paulo, onde foram realizadas medições para diversos estudos de projeto e construção de um porto em Iguape. (CARVALHO, et al., 2000a)

Como consequência do avanço nessa área, o mesmo autor cita ainda outras datas e realizações importantes para o campo da sedimentometria, tais como:

- 1960 e 1961 – Realização de medições sedimentométricas no rio São Francisco para a CVRD (Companhia Vale do Rio Doce);

- 1962 e 1963 – Realização de medições sedimentométricas em pequenas bacias hidrográficas no Estado do Rio de Janeiro, visando a verificação da contribuição de sedimentos para a Baía de Guanabara;
- 1963 a 1966 – Estudos de erosão nos pilares da ponte da EFNOB (Estrada de Ferro Noroeste do Brasil), em Porto Esperança, no rio Paraguai;
- 1967 a 1978 – Medições sedimentométricas nos cursos d'água da Bacia do São Francisco.

No entanto, as publicações envolvendo esse tema, até então foram raras, sendo o livro “Regularização de Rios”, de autoria de Octávio Dias Moreira, o primeiro sobre o tema, publicados pelo DNOS (Departamento Nacional de Obras de Saneamento). Em 1965, foi editado pela CEMIG (Companhia de Eletricidade de Minas Gerais S. A.), o “Manual de Hidrometria”, em três volumes, sendo o segundo referente à sedimentometria (CARVALHO, 1994).

Desde então, com a criação da ABRH (Associação Brasileira de Recursos Hídricos), em 1977, vários artigos envolvendo esse assunto passaram a ser constantemente publicados no Brasil, em idioma português, em revistas e anais de simpósios, possibilitando assim uma maior divulgação do assunto.

No Brasil, estudos envolvendo o transporte de sedimentos e sua relação com a vida útil de reservatórios ainda são incipientes, fato esse evidenciado pela carente rede sedimentométrica instalada em nosso país, a qual conta com pouquíssimas estações em operação, dificultando assim estudos nessa área tão importante para um país como o Brasil, que possui como matriz energética a hidroeletricidade.

Sabe-se hoje que o aumento da ocupação do solo, crescentes desmatamentos de grandes áreas e o conseqüente carreamento de partículas do

solo para os rios, lagos e reservatórios formam um cenário preocupante no que diz respeito à vida útil dos reservatórios no Brasil e no mundo.

Um estudo do Banco Mundial mostrou que a vida útil média dos reservatórios existentes em todos os países do mundo decresceu de 100 para 22 anos, tendo sido avaliado em 6 bilhões de dólares anuais o custo para promover a remoção dos volumes que vão sendo assoreados. Nesse estudo também ficou demonstrado que a perda média anual devido ao depósito de sedimentos era de 1%, sendo variável de um país para o outro, bem como de uma região para outra (MAHMOOD, 1987 apud PALMIERI et al, 2000).

A partir de um estudo realizado pela Eletrobrás/IPH em 1994, pode-se concluir que a perda anual de capacidade de armazenamento dos reservatórios de nosso país é de aproximadamente 0,5%, correspondendo a uma taxa de $2.000 \times 10^6 \text{ m}^3$ por ano, o que corresponde a um volume maior do que muitos dos médios reservatórios existentes (Estreito, Jaguari, Moxotó, Salto Osório, Porto Colômbia, etc.) (CARVALHO, 1994)

Vários trabalhos vêm sendo realizados em nosso país na intenção de se prever respostas relativas a vida útil dos reservatórios e quantificar os seus graus de assoreamento.

Um estudo feito por Coelho (1993) apud Cabral (2006)¹ mostrou que o reservatório de Salto Grande, em Americana-SP apresentou um volume morto de 65% do seu volume total e uma perda média de 0,22% ao ano, volume esse correspondente a 235.000 m³.

¹ Coelho, M. P. Análise do processo de assoreamento do reservatório de Americana – SP. Dissertação de Mestrado em Geociências e Meio Ambiente. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Universidade Estadual Paulista. Campus de Rio Claro. 69p. 1993. apud de CABRAL, J. B. P. Análise da sedimentação e aplicação de métodos de previsão para a tomada de medidas mitigadoras quanto ao processo de assoreamento no reservatório de Cachoeira Dourada GO/MG. 2006. 253p Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

Paiva (1993) realizou um estudo no reservatório da barragem de Taquaruçu-MG, entre 1935 e 1992, onde constatou, a partir de comparação de mapas originais e levantamento batimétrico, um acúmulo de 1.530.000 m³ de sedimentos, correspondendo a uma taxa de 45 m³/km²/ano. O reservatório perdeu, nesse período, 70% da sua capacidade útil (80% da capacidade total), restando 230.000 m³, com uma expectativa de vida útil entre 8 e 10 anos, e prazo previsto para o assoreamento total de 25 anos.

Bufon (1999) apud Cabral (2006)² estudou por meio de levantamentos batimétricos, o tempo de vida útil da represa Velha em Pirassununga – SP, onde foram comparadas medidas efetuadas em 1998 com as obtidas na construção da represa em 1940, obtendo-se uma perda na profundidade máxima de 5 m e um tempo de vida útil estimado em 230 anos.

Conforme citado anteriormente, os estudos referentes ao grau de assoreamento dos reservatórios de nosso país ainda são incipientes, uma vez a realização de levantamentos de dados de campo geralmente são caras e na maioria das vezes trabalhosa.

² Bufon, A. G. M. Variação temporal da taxa de sedimentação na represa Velha (CEPTA/IBAMA/SP) e sua influencia sobre as características limnológicas do sistema. Um estudo de impacto ambiental. Pirassununga. Monografia de graduação apresentada à faculdade de Engenharia de Agrimensura de Pirassununga. 85p. 1999. Apud de CABRAL, J. B. P. Análise da sedimentação e aplicação de métodos de previsão para a tomada de medidas mitigadoras quanto ao processo de assoreamento no reservatório de Cachoeira Dourada GO/MG. 2006. 253p Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Visão geral do transporte de sedimentos

O entendimento do processo que envolve o transporte de sedimentos parte do princípio da identificação, descrição e quantificação dos principais processos que envolvem a movimentação dos sedimentos. Estes processos são: a erosão, a movimentação das partículas na lâmina líquida e a deposição. No entanto, existem outros processos que podem interferir no transporte de sedimentos sendo de fundamental importância o conhecimento dos mesmos.

Segundo Edwards e Glysson (1998), a necessidade de dados relativos à sedimentologia é de grande interesse prático e algumas das categorias gerais envolvendo a sedimentologia envolvem:

- A avaliação da produção de sedimentos relacionados com as diferentes condições naturais ambientais tais como os solos, clima, runoff, topografia, recobrimento do solo e o tamanho da área de drenagem;
- A avaliação da produção de sedimentos relacionada aos tipos diferentes tipos de uso do solo;
- A distribuição do tempo da concentração do sedimento e da taxa do transporte de sedimentos em rios;
- A avaliação da erosão e deposição em canais, córregos e rios;
- Avaliação da quantidade e do tamanho do sedimento transportados pelos corpos d'água;
- As características de depósitos dos sedimentos relacionados ao transporte e tamanho as partículas; e

- As relações entre as características químicas do sedimento, a qualidade de água e a biota.

Dessa forma, pode-se notar que o estudo hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica, além de ser importante ferramenta de apoio para estudos ambientais é fundamental para a análise de viabilidade de diversas atividades econômicas.

Associado a esse contexto, a construção de uma barragem e a formação de seu reservatório, implicam em modificações nas condições naturais do curso d'água, gerando uma redução na velocidade da corrente e, conseqüentemente, na capacidade de transporte de sedimentos pelo rio, favorecendo sua deposição nos reservatórios que, aos poucos, vão perdendo sua capacidade de armazenar água. Portanto, seja o reservatório para fins de geração de energia, de irrigação, de abastecimento ou de outros usos, o conhecimento da vida útil desse empreendimento dependerá diretamente do fluxo de sedimentos no curso d'água (LIMA et al., 2003).

Segundo Carvalho (1994) a deposição e fluxo desses sedimentos podem vir a impedir a operação do aproveitamento quando o sedimento depositado alcança a cota da tomada d'água. Essa retenção de sedimentos no reservatório é de certa forma benéfica, pois promove a limpeza da água para seus diversos usos, embora a sedimentação contínua possa resultar em assoreamento indesejável.

Danos ambientais e econômicos são cada vez maiores devido à erosão das terras, transporte de sedimentos nos cursos d'água e assoreamento de rios e reservatórios. A diminuição da vida útil de aproveitamentos de recursos hídricos tem ocorrido devido ao aumento da erosão e conseqüente deposição desse material no

fundo dos reservatórios, tornando cada vez mais necessário a realização de estudos sedimentológicos. (CARVALHO et al, 2005)

4.2. Características físicas dos sedimentos

Para a maioria de sistemas, o conhecimento da distribuição de tamanhos das partículas e a densidade são fundamentais à compreensão de processos locais do transporte do sedimento. A distribuição do tamanho de partícula (ou o tamanho do grão) é a propriedade mais utilizada na engenharia e nos estudos ambientais para a descrição do processo sedimentológico. Os tamanhos de partícula do sedimento são classificados das argilas muito finas, com um diâmetro de 0,24 μm , aos pedregulhos maiores de 0,25 m de diâmetro. No meio destes extremos estão os tamanhos de partícula que se encontram presentes nos depósitos de sistemas aquáticos, tais como siltes e areias. Os sedimentos naturais mais freqüentemente encontrados consistem em uma mistura de tamanhos de grãos de sedimentos. Estes sedimentos são freqüentemente descritos baseados nas proporções relativas de cada tipo na amostra. Como exemplo, uma mistura de um pouco de areia com argila pode ser chamada uma argila arenosa, e uma quantidade menor de silte com areia pode ser chamada uma areia siltosa (BLAKE et al., 2004).

Tendo em vista a distribuição no tamanho das partículas, os sedimentos podem ser também classificados como coesivos e não coesivos.

Segundo Van Rijin (1993) e Roberts et al. (1998), os sedimentos coesivos são aqueles nos quais as forças que prendem as partículas umas as outras são significantes, criando assim uma atração ou coesão entre as partículas. Tais sedimentos possuem normalmente partículas de diâmetros menores que 200 μm de diâmetro. Nesta faixa encontram-se partículas menores como argila e silte (<62 μm), e areias finas (62-200 μm). Os sedimentos não coesivos são aqueles nos quais as

forças que prendem as partículas umas as outras não são significantes, não criando assim, uma atração ou coesão entre as partículas, sendo definidos por possuírem partículas de diâmetros maiores que 200 μm .

Nesse contexto é importante ressaltar que os poluentes e contaminantes, quando presentes na amostra, estão na maioria das vezes relacionados com os sedimentos coesivos.

Diversos estudos entre eles Roberts et al (1998) , envolvendo sedimentos não coesivos demonstram que existe uma elevada correlação entre o diâmetro da partícula e a taxa de transporte de sedimentos sobre condições de vazões controladas, onde a taxa de transporte decresce com o aumento do tamanho das partículas.

Outra propriedade básica importante que envolve os depósitos de sedimentos está relacionada com a densidade das partículas. A densidade das partículas, e conseqüente densidade do depósito de sedimentos, descrevem o grau de compactação ou consolidação dos sedimentos, sendo definido como sendo a massa total de sedimento e água em um determinado volume de amostra de material de fundo. A densidade aproximada de minerais como argila e quartzo, que perfazem a maior parte das partículas da natureza, é de aproximadamente 2,65 g/cm³. No caso dos sedimentos coesivos, a densidade do volume aumenta com a profundidade do leito devido ao fato dos sedimentos mais profundos possuírem um maior grau de consolidação com menos espaço entre as partículas. (JEPSEN et al., 1997)

4.3. Intemperismos e formação dos solos

Segundo Thornbury (1954), os quatro fatores que podem afetar o tipo e a taxa de intemperismo são: estrutura da rocha, clima, topografia e vegetação. A estrutura da rocha é caracterizada por suas características físicas e químicas.

Selley (1992) menciona que intemperismo é o nome dado ao processo de transformação das rochas da superfície terrestre em partículas menores, sendo dividido basicamente em três processos: biológico, físico e químico, onde o intemperismo químico promove a oxidação e a dissolução seletiva dos minerais constituintes da rocha; o intemperismo físico promove a desagregação mecânica das rochas; e o intemperismo biológico está relacionado com os efeitos físicos e químicos dos processos orgânicos ocorridos na rocha.

Como consequência, e talvez como uma parte dos processos climáticos, as características de formação dos solos podem variar dependendo do clima, dos microrganismos, da topografia, da rocha mãe e do tempo. A erodibilidade de tais solos, isto é, sua resistência a tornar-se o sedimento fluvial quando exposto, depende não somente no tamanho físico das partículas, mas também da natureza dos materiais inorgânicos e orgânicos que agregam as partículas umas as outras. (GUY, 1970)

Selley (1992) ressalta também que os processos de intemperismos necessitam de tempo para que seus efeitos sejam notados nas superfícies das rochas, não devendo a erosão ser descrita como sendo um processo que sempre ocorre depois do intemperismo no ciclo sedimentológico.

Os produtos advindos do processo de intemperismo podem ser agrupados em duas categorias: solutos e resíduos. Os solutos são a fração solúvel das rochas que são transportadas pela água. Os resíduos são a parte insolúvel proveniente da ação do intemperismo as rochas, nas quais o tamanho das partículas pode variar de grandes fragmentos e rocha a argilas coloidais.

É importante citar que esses materiais movem-se continuamente ou são transportados e depositados pelo fluxo. Esta movimentação depende das forças de

resistência do fluido em movimento associados ao peso ou à força de resistência das partículas. Uma vez que as partículas do sedimento são erodidas, então a resistência ao transporte passa a estar relacionada diretamente à velocidade da queda ou ao “diâmetro de queda” da partícula. A relação entre o tamanho físico da velocidade de queda inclui também o formato da partícula e sua gravidade específica (GUY, 1970)

Segundo Selley (1992), o ciclo sedimentológico consiste em etapas de intemperismos, erosão, transporte, deposição, litificação, sublevação da crosta terrestre e intemperismos novamente (Figura 1). É importante ressaltar que somente na parte superior desta figura encontra-se a essência do ciclo sedimentológico, sendo que na parte inferior ocorre a movimentação de massas, mas não de material na forma de sedimento.

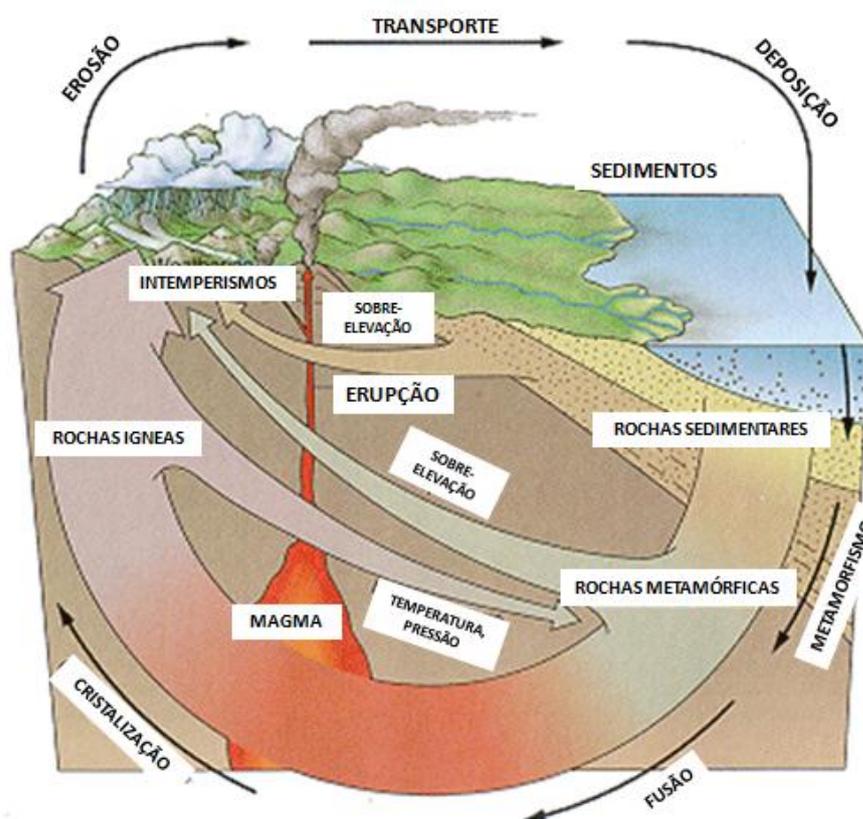


Figura 1 - Ciclo sedimentológico
Fonte: Modificado de Selley (1992).

4.4. Erosão, transporte e deposição

4.4.1. Mecânica do transporte

A erosão causada pela água é classificada como erosão laminar ou erosão de canais, sem que haja uma divisão distinta entre as duas interfaces. A erosão laminar ocorre em três etapas: a primeira é a desagregação, que ocorre quando as partículas de solo são desagregadas pelo impacto das gotas de chuva na superfície do solo descoberto. A segunda é o transporte das partículas desagregadas, principalmente pela água que não se infiltra no solo e escorre superficialmente (enxurrada) e a terceira é a deposição das partículas desagregadas nas partes mais baixas da paisagem (vales e leitos dos rios), sendo que essas partículas passam a ser chamadas de sedimentos (EDWARDS e GLYSSON, 1998).

Dentre as várias forças ativas e passivas do meio ambiente que podem influenciar no processo de erosão e transporte do sedimento, a chuva é considerada a mais dinâmica e mais importante de todas. No início de uma chuva em uma superfície com tendência a ser erodida, o impacto das gotas contra o solo causam uma suspensão das partículas de sedimento secas e molhadas, sendo que a quantidade de partículas molhadas que se soltam do solo aumenta com o aumento da profundidade da cratera formada pelo impacto das gotas, fazendo com que as partículas em suspensão aérea se movimentem para jusante da rampa devido à ação da força de gravidade ou da força dos ventos (GUY, 1970).

Edwards e Glysson (1998) ressaltam ainda que o movimento das partículas de sedimento e a energia dissipada pelas gotas de chuva compactam a superfície do solo diminuindo a taxa de infiltração, aumentando o escoamento superficial e causando um aumento da erosão.

A quantidade de sedimentos em peso e tamanho específico depende da taxa erosão dos solos na bacia da drenagem e de seu transporte na calha do rio. Embora o vento, as geleiras, e mesmo as águas subterrâneas possam erodir o solo, o agente erosivo mais significativo do processo erosivo é escoamento superficial (GUY, 1970).

A Tabela 1 mostra os fatores que afetam a erosão e o transporte de sedimentos em uma superfície

Tabela 1 - Fatores que afetam a erosão e o transporte de sedimentos em uma superfície

FATORES PRICIPAIS	ELEMENTOS	INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS NA EROÇÃO DO SOLO
Agentes e características causadas pelas forças ativas		
Clima	Chuva / Escoamento Superficial (Intensidade e duração)	<u>Erosão pelo impacto das gotas de chuva:</u> Promove a quebra dos agregados, movimentação e dispersão do solo, causando com isso uma compactação do solo e um conseqüente aumento do escoamento superficial. <u>Erosão pelo escoamento:</u> Força física provocada pela diferença de pressão e impacto da água em movimento. A intensidade e a duração afetam a taxa de escoamento superficial depois que a taxa máxima de infiltração é alcançada.
	Temperatura	<u>Alternância entre congelamento e degelo:</u> Causam a expansão do solo, aumenta o conteúdo da mistura e diminui a coesão. Sendo assim o deslocamento, a dispersão e o transporte são facilitados.
	Vento	<u>Diferença de pressão e impacto:</u> Deslocamento promovido pela diferença de pressão e/ou impacto do vento com a superfície
Gravidade		Perda de massa.

FATORES PRICIPAIS	ELEMENTOS	INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS NA EROSÃO DO SOLO
Agentes e características causadas pelas forças ativas		
Características do Solo	Propriedades da massa do solo	<p><u>Granulometria:</u> Afeta a força requerida para promover o deslocamento e transporte;</p> <p><u>Estratificação:</u> Um substrato com baixa porosidade e permeabilidade controla a taxa de infiltração através das camadas;</p> <p><u>Porosidade:</u> Determina a capacidade de armazenamento do solo afetando assim a infiltração e o escoamento superficial;</p> <p><u>Permeabilidade:</u> Determina a taxa de percolação afetando assim na infiltração e no escoamento superficial;</p> <p><u>Umidade:</u> a umidade reduz a coesão estendendo o tempo de erosão a partir do aumento do período de precipitação;</p> <p><u>Suscetibilidade ao congelamento:</u> Determina a intensidade de formação de gelo, afetando a porosidade, o conteúdo da mistura e promove uma redução da resistência do solo;</p>
	Propriedades dos constituintes do solo	<p><u>Tamanho dos grãos, formato e peso específico:</u> Determina a força necessária para promover o deslocamento e transporte das partículas.</p>
Topografia	Declividade	<p><u>Orientação:</u> Determina a efetividade das forças climáticas;</p> <p>Comprimento de rampa: Afeta a quantidade ou profundidade do escoamento. Profundidade e velocidade afetam a turbulência afetando assim a erosão e o transporte dos sedimentos.</p>
Recobrimento do solo		<p><u>Cobertura vegetal:</u> Toda cobertura vegetal, viva ou morta, protege a superfície do solo na medida em que intercepta as gotas de chuva retardando assim a erosão a partir da diminuição da velocidade do escoamento, aumenta a porosidade do solo, e no caso das vegetações vivas, aumenta a capacidade do solo de reter a umidade a partir do processo de transpiração;</p> <p><u>Cobertura não vegetal:</u> Superfícies abertas resultam em uma menor proteção e conseqüentemente um maior aumento da erosão pelo impacto das gotas de chuva, reduzindo a infiltração, aumentando o escoamento superficial e maximizando a erosão. Superfícies pavimentadas garantem uma máxima proteção do solo, com zero de erosão e um alto escoamento superficial.</p>

Thornbury (1954) diz que a erosão pode resultar da remoção de fragmentos frágeis do solo pelo agente erosivo, do desgaste de superfícies pelo impacto dos materiais no trânsito, e do desgaste por contato das partículas no trânsito no escoamento. Compreende-se que, sem transporte, a erosão de uma camada específica de solo não pode ocorrer até que a camada acima esteja removida.

Os agentes erosivos ativos estão geralmente balanceados com um conjunto de forças de resistência. Tais forças de resistência podem incluir as forças gravitacionais e forças de interligações entre as partículas e os agentes aglutinadores orgânicos e inorgânicos. Os fragmentos puros da rocha, areias, e mesmo os materiais siltosos sofrem pouca, ou nenhuma interferência dos agentes aglutinadores, dependendo portanto somente das forças internas de ligação para resistirem ao processo erosivo (GUY, 1970).

Baver (1948) apud Guy (1970)³ lembra que as frações de silte e areia podem ser consideradas como o esqueleto do solo na ausência de atividade física ou química marcada e que a argila e o húmus são a parte ativa do solo devido as suas composições químicas e sua grande superfície específica.

A força de tração requerida para mover uma partícula sujeita apenas ao bloqueio da força gravitacional pode ser calculada no ponto de vista hidráulico. As forças de aglutinação, por outro lado, possuem características diversas e são regidas pelas relações químicas com a associação entre um número muito grande de partículas muito pequenas, geralmente menores de 0,002 mm (GUY, 1970).

Um solo agregado consiste em um arranjo de partículas primárias em partículas secundárias. A floculação ocorre a partir da colisão das partículas primárias em suspensão na água com baixo potencial hidrocínético. Baver (1948)

³ Baver, L. D. Soil Physics. 2nd Ed. New York: John Wiley e Sons, 1948. 398p. apud de Guy, H. P. Fluvial Sediment Concepts. In Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Applications of Hydraulics. Book 3. Arlington, 1978. 51p.

apud Guy (1970) indica também que a formação de agregados estáveis nos solos requer que as partículas primárias estejam fortemente presas entre si para que assim não haja uma rápida dispersão das partículas.

Segundo Cook (1936) a erodibilidade está relacionada às características físicas do solo que afetam sua resistência à erosão, mas a erosão potencial do solo inclui a erosividade potencial e o recobrimento de vegetação que protege o solo. A capacidade da chuva em causar erosão é chamada erosividade. Se a chuva cai mansa, em gotas pequenas, durante várias horas, a maior parte da água se infiltra, havendo pouca enxurrada. Também ocorre pouca desagregação do solo, pelo fato de as gotas pequenas terem menor energia cinética. Diz-se então que é uma chuva de baixa erosividade. Porém, se a mesma quantidade de chuva cair em poucos minutos, em gotas maiores (uma tempestade, por exemplo), a desagregação do solo será maior, e a maior parte da água tende a escorrer na forma de enxurrada. Diz-se, nesse caso, que é uma chuva erosiva, ou de alta erosividade

O potencial erosivo inclui a energia do impacto dos pingos de chuva, as capacidades da infiltração e de armazenamento do solo, a declividade e o comprimento da rampa. Conseqüentemente um solo não erosivo pode não resultar em menos erosão do que um solo erosivo na mesma inclinação, por exemplo, no caso de um solo argiloso não erosivo que pode produzir mais erosão que um solo arenoso no mesmo terreno. Uma maior erodibilidade de um solo arenoso pode ser neutralizada por sua grande capacidade de infiltração.

4.4.2. Erosão laminar e efeito da área de drenagem

O geomorfismo das bacias de drenagem é a unidade básica que deve ser considerada no que diz respeito à produção de sedimentos fluviais. A drenagem do excesso de chuvas da bacia ocorre por gravidade na forma de escoamento

superficial, formando uma rede de canais de drenagem que promovem o aumento da vazão e conseqüente aumento da erosão laminar (PIEST, 1965 apud GUY, 1970)⁴.

Levando em conta a bacia hidrográfica como um todo, Horton (1945) foi um dos primeiros a reconhecer a relação de comprimento e o número de ordem dos rios. A ordem de um rio é uma medida de posição de um determinado riacho em relação a seu tributário de montante. Um rio de primeira ordem não tem tributário, um rio segunda ordem só tem rios de primeira ordem como tributários, um de terceira ordem tem apenas rios de primeira e segunda ordem como tributários, e assim por diante. O mesmo autor também introduziu o conceito de "taxa de bifurcação" para expressar a relação entre o número canais de uma dada ordem (n) e o numero de canais de ordem imediatamente superior($n+1$). Esta proporção é de aproximadamente 3,5 para muitas bacias nos EUA, especialmente quando se considera apenas as redes fluxo que são apresentadas em mapas em uma escala de 1: 24.000.

E erosão laminar é caracterizada como o transporte das partículas superficiais do solo a partir do escoamento da água na superfície dos solos, sendo esta erosão caracterizada e quantificada pela Equação Universal da Perda de Solos (EUPS – “Equação Universal de Perda de Solos” ou USLE – “Universal Soil Loss Equation”).

Segundo Ward e Elliot (1995) a USLE começou a ser implantada no final da década de 1950 pelo Serviço de Conservação dos Solos dos Estados Unidos. É um modelo empírico, baseado em grandes bases de dados de campos, que estimam a

⁴ Piest, R. F. The role of de large storm as a sediment contributor in Proc. Of Federal Inter-Agency Sedimentation Conf., Jackson Miss. U. S. Dept. Agriculture, Arg. Research Service. Misc. Pub. 970, 1963. p. 98-108. apud de Guy, H. P. Fluvial Sediment Concepts. In Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Applications of Hydraulics. Book 3. Arlington, 1978. 51p.

erosão distribuída e concentrada com base em valores a quatro grandes fatores intervenientes no processo erosivo:

- Erosividade climática;
- Erodibilidade dos solos;
- Topografia; e
- Uso e manejo da terra.

Em 1954, com base na análise dos dados de escoamento superficial e perdas de solo obtidos em mais de 10.000 ensaios experimentais, em condições de chuvas naturais e simuladas, pesquisadores da Universidade de Purdue (EUA) desenvolveu a equação empírica conhecida na literatura como Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS ou USLE - Universal Soil Loss Equation). A USLE é a equação de estimativa de erosão mais conhecida e utilizada até os dias de hoje. Wischmeier e Smith (1978) fizeram com que a equação evoluísse para um modelo computacional que expressa a perda anual de solo por unidade de área como o produto de seis fatores conforme a Equação 1:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Onde:

- **A** = Perda de solo média ou erosão específica (t/ha.ano);
- **R** = Fator de erosividade da precipitação (MJ.mm/ha.h.ano ou t./hA.ano);
- **K** = Fator de erodibilidade do solo (t.h/MJ.mm ou adimensional);
- **LS** = Fator fisiográfico, que resulta da combinação dos fatores de comprimento de rampa (L) e declive (S) (adimensional);

- **C** = Fator relativo à cobertura vegetal (adimensional);
- **P** = Fator de prática agrícola ou de medidas de controle de erosão (adimensional).

Os fatores declividade e perda de solo estão interligados entre si. Quanto maior for a declividade maior será a velocidade com que a água irá escorrer, conseqüentemente, maior será o volume carregado devido a força erosiva.

O comprimento da rampa (L) tem forte ligação com o aumento ou não da erosão. Na medida em que aumenta o comprimento da rampa, maior será o volume de água, aumentando também a velocidade de escoamento. Em alguns casos o comprimento da rampa diminui o efeito erosivo, considerando-se que a capacidade de infiltração e a permeabilidade do solo reduz o efeito. Os dois primeiros fatores da equação (R e K) representam respectivamente, a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo. Entende-se por erosividade a capacidade da chuva em causar erosão num solo sem proteção. Já a erodibilidade expressa a quantidade de solo erodido por unidade do índice de erosão da chuva para um solo específico, que é mantido numa condição padrão (sem cobertura embora submetido a práticas culturais normais em um declive de 9% e comprimento de rampa de 73 pés, ou 22,25 m). Os fatores C e P influenciam a interceptação das chuvas, a resistência ao escoamento superficial, a infiltração da água no solo, o armazenamento superficial, o comprimento e o direcionamento do escoamento superficial. Em geral, o valor associado a estes dois fatores é menor ou igual a 1, uma vez que a falta de cobertura do solo e a não utilização de práticas conservacionistas refletem, na maioria das vezes, uma condição de uso do solo que causa as maiores perdas possíveis, sendo que qualquer outra forma de utilização pode acarretar em menores perdas. Entretanto o fator C pode atingir valores maiores de até 1,5 em solos muito

desagregados e que produzam muito escoamento superficial. (WISCHMEIER e SMITH, 1978)

O mesmo autor ainda cita que os valores associados aos fatores L e S podem também ser maiores que a unidade, desde que o terreno tenha declividade e/ou comprimento de rampas maiores que a condição padrão.

4.4.3. Sedimentos grosseiros e transporte em rios

A taxa de sedimentação, ou diâmetro padrão de sedimentação de uma partícula é medida por sua resistência ao transporte. Em um estado de dispersão, partículas finas dos sedimentos são facilmente carregadas em suspensão pelas forças naturais de fluxo tendendo a se mover para fora da área de drenagem de onde foram originadas. Por outro lado, as partículas maiores são transportadas em suspensão por distâncias muito curtas, ou são arrastadas no leito dos rios. (GUY, 1970).

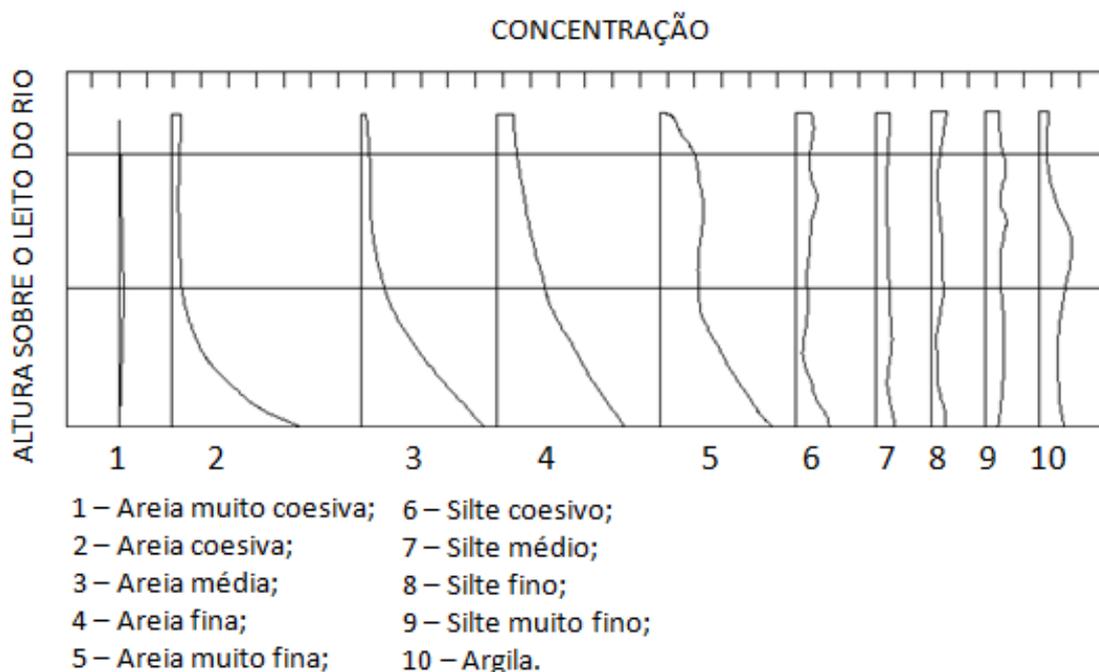


Figura 2 – Variação das concentrações em uma seção transversal em função do tamanho das partículas em suspensão

Fonte: Modificado de GUY (1970)

4.5. Características da hidrologia

O escoamento superficial é definido como a parcela do total de chuva que chega a um córrego ou rio em período de tempo relativamente curto. O tempo para esse volume de água atingir uma taxa máxima depende das características da bacia de drenagem, a qual a mais importante provavelmente é a área. Em bacias pequenas são necessários apenas alguns minutos para que o escoamento superficial atinja sua taxa máxima, mas podem ser necessários vários dias para áreas de drenagem maiores (COLBY, 1963)

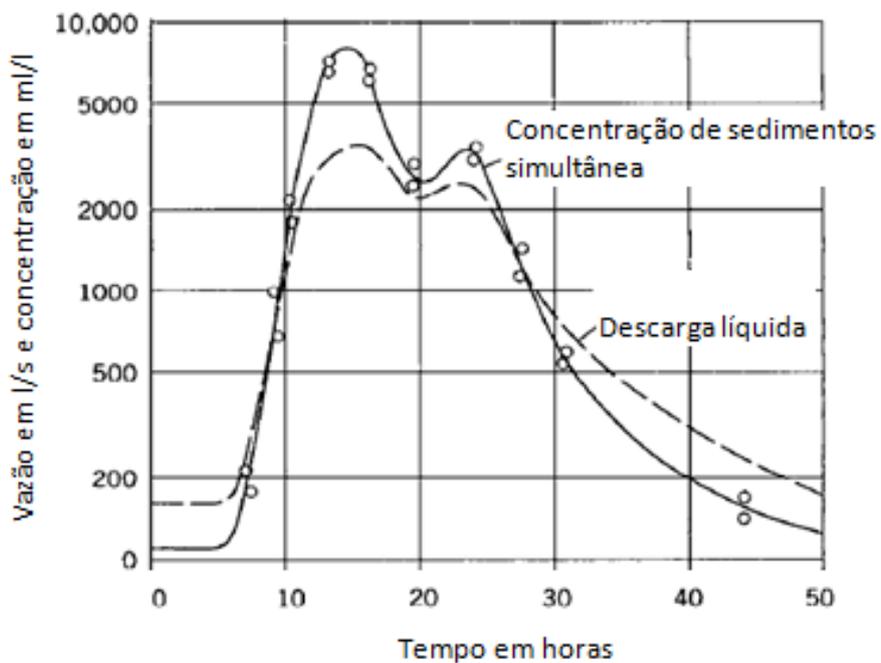
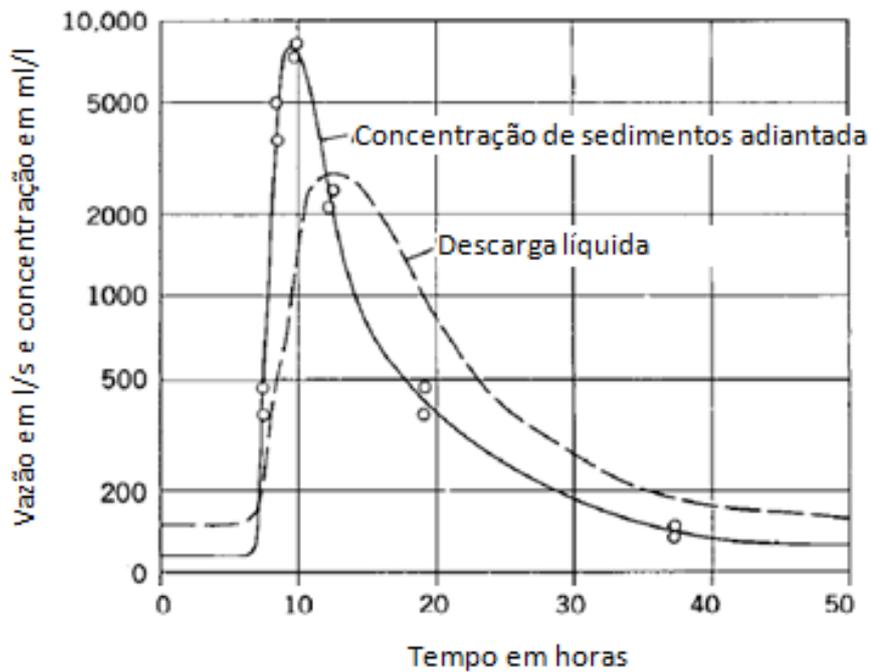
A relação entre a concentração de sedimentos e a hidrografia tem sido caracterizada por Colby (1963) da seguinte maneira:

[...] Se a distância a ser percorrida a partir do ponto de erosão é curto ou se canais possuem pouca vazão antes do evento chuvoso o pico da concentração dos materiais finos em suspensão normalmente coincide com o pico do fluxo ou ocorre um pouco antes. Este fato pode ser explicado partindo do princípio de que as partículas soltas do solo são carregadas durante os primeiros instantes do escoamento superficial. No entanto, o fluxo de um afluente de um tributário ou de uma parte de uma área de drenagem pode ser nitidamente inferior ou superior em concentração do que o resto do fluxo, bem como e o tempo de chegada de tal concentração pode determinar o pico de concentração de materiais finos no fluxo. O pico da concentração material fino pode ocorrer muito após o pico do fluxo superficial (Heidel, 1956 apud Guy 1970)⁵, se a o material fino for originário de Fontes muito distantes do trecho dos rios, acarretando em vazões com baixas concentrações de sedimento.

Este fato pode ser ilustrado por gráficos que mostram os picos de concentração adiantados, simultâneos e atrasados (Figura 3). Deve-se ressaltar que o gráfico que exemplifica o adiantamento do pico de concentrações é o tipo mais comum, e que em uma bacia de drenagem específica irá ocorrer situações semelhantes durante os processos chuvosos, especialmente para as bacias que

⁵ Heidel, S. S. The progressive lag of sediment concentration with flood waves: Am. Geophys. Union Trans. v. 37, n. 1, p. 56, 1956. apud de Guy, H. P. Fluvial Sediment Concepts. In Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Applications of Hydraulics. Book 3. Arlington, 1978. 51p.

recebem um excesso precipitação relativamente uniformes. As bacias de drenagem de tamanho diminuto não são esperadas que se produzam um atraso na concentração do gráfico.



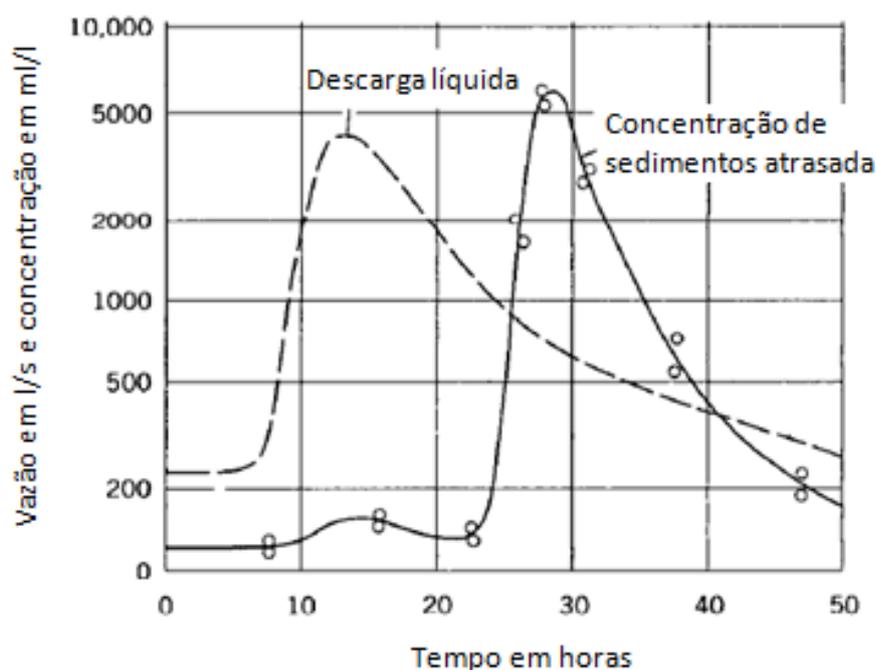


Figura 3 – Variações temporais na concentração de sedimentos

FONTE: Modificado de Colby (1963)

A magnitude da concentração de sedimentos e seu respectivo gráfico típico para uma determinada localização dependem de alguns fatores como: da estação do ano, mudança dos padrões de utilização do solo, condições iniciais de umidade, da natureza e intensidade da precipitação e formato da bacia.

Piest (1965) concluiu que as grandes tempestades (com um período de retorno de um ano ou mais) contribuem com cerca de 30 por cento do total de produção de sedimentos de suas respectivas bacias.

4.5.1. Deposição em reservatórios

Embora o fluxo e depósito de sedimentos em rios sejam de grande importância, uma maior atenção tem sido dada a deposição em lagos e reservatórios. Brown (1948) estimou que a perda de armazenamento nos reservatórios utilizados para a alimentação, abastecimento de água, irrigação, no controle das cheias, navegação, recreação, e outros fins custam cerca de 50

milhões de dólares por ano para os Estados Unidos. Esta estimativa é feita com base no valor de dólares em 1948 e em Inquéritos de 600 a 10.000 dos reservatórios existentes, até o momento do estudo.

A deposição de sedimentos em reservatórios é um processo complexo que depende de vários fatores, e as interações desses fatores fazem com que os processos de deposição em cada reservatório sejam únicos. A distribuição dos sedimentos, adicionados ao depositado, poderá encurtar a vida útil ou inviabilizar o reservatório. Os fatores comumente associados com a distribuição de sedimentos em um reservatório são: operação, forma do reservatório, volume do reservatório em relação a carga de aporte, densidade das correntes e as propriedades do sedimento.

Na Figura 4 ilustra a forma como os sedimentos são depositados em um reservatório (Lane, 1953 apud Guy, 1970⁶).

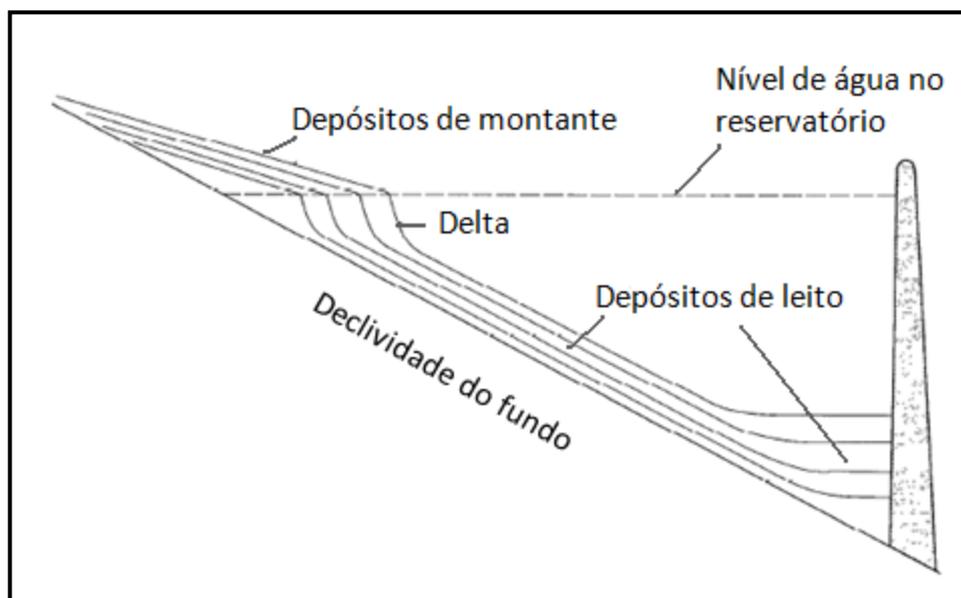


Figura 4 – Corte longitudinal de um reservatório em operação sem variação do nível de água. Identificação dos principais tipos de depósito

Fonte: Modificado de Lane apud Guy, 1970

⁶ LANE, E. W. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering: **Proceedings of Am. Soc. Civil Engineers**, v. 81, n. 475. 1955 apud de Guy, H. P. Fluvial Sediment Concepts. In Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Applications of Hydraulics. Book 3. Arlington, 1978. 51p.

5. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

A determinação precisa das concentrações de sedimentos em suspensão é fundamental para avaliação de seus impactos sobre a bacia hidrográfica. Sabe-se que na grande maioria dos rios os sedimentos em suspensão na coluna d'água constituem a maior parte dos sedimentos transportados e a determinação das concentrações de sedimentos em suspensão a partir das técnicas atualmente conhecidas envolve um custo operacional elevado, gerando assim um déficit na quantidade de amostras coletadas e conseqüentemente uma previsão incorreta da carga de sedimentos transportadas nos rios. (FISP, 2003 e CARVALHO, 1994)

Atualmente o surgimento de novas pesquisas e novas tecnologias vem de encontro às necessidades dos usuários quanto à coleta dos dados, incertezas envolvidas, determinação das distribuições e concentrações das partículas e outras características dos sedimentos suspensos. Atualmente os amostradores isocinéticos podem ser utilizados para fornecer uma medida exata da concentração média dos sedimentos em suspensão. No entanto tal metodologia envolve um alto custo de operação, são demoradas e podem ser perigosas se executadas durante os períodos chuvosos.

A necessidade quanto a informação relativa à concentração dos sedimentos em suspensão podem ser associadas a diversos estudos. Em alguns casos, tais como estudos biológicos, podem requerer uma série de dados contínuos. Enquanto em outros casos, são necessários apenas a coleta de dados durante os picos de vazões; e em alguns projetos podem exigir a coleta e análise de amostras físicas de sedimentos para estudos de contaminantes.

Neste contexto observa-se também a necessidade contínua de pesquisas envolvendo os processos de transporte de sedimentos em suspensão, os quais

requerem uma investigação detalhada das variações de concentrações e vazões no tempo.

As incertezas nos cálculos relativos ao fluxo de sedimentos em suspensão dependem em grande parte da baixa variedade temporal e espacial (zona morta de amostragem) dos dados relativos ao transporte de sedimentos em suspensão. Os cálculos para a determinação de tais incertezas estão fora do escopo desta pesquisa.

Gray et al (2002), comentam que níveis de incertezas na faixa de 10 a 20% são aceitáveis para a maioria dos estudos que envolvem a amostragem de material em suspensão, podendo ser reduzidos/compensados pelo aumento da frequência de coleta de amostras e uma melhor cobertura espacial dos sedimentos em suspensão.

Atualmente os amostradores mecânicos de profundidade são os mais utilizados para a coleta de dados referentes aos sedimentos em suspensão, sendo que a maioria destes são projetados e testados pela FISP – “Federal Interagency Sediment Monitoring Instrument”

As tecnologias atualmente disponíveis ou emergentes em curto prazo com o potencial para melhorar a coleta de dados referentes aos sedimentos em suspensão incluem os que operam com os seguintes princípios: acústico (mono-frequência, e multi-frequência), difração laser, equipamentos ópticos, análise de imagens digitais, pressão diferencial.

5.1. Instrumentos de medida para o transporte de sedimentos

5.1.1. Aspectos Gerais

Neste capítulo diversos instrumentos para medir a taxa de transporte dos sedimentos encontrados atualmente na literatura serão descritos. Normalmente o

transporte a sedimentos é representado como o somatório descarga de leito e descarga em suspensão na água. O gráfico ilustrado (Figura 5) pode ser utilizado para obter uma estimativa aproximada entre a taxa de transporte em suspensão e a carga total, em função das condições hidráulicas expressa pela taxa de decaimento da partícula e a velocidade de cisalhamento da descarga de fundo (VAN RIJN, 1984).

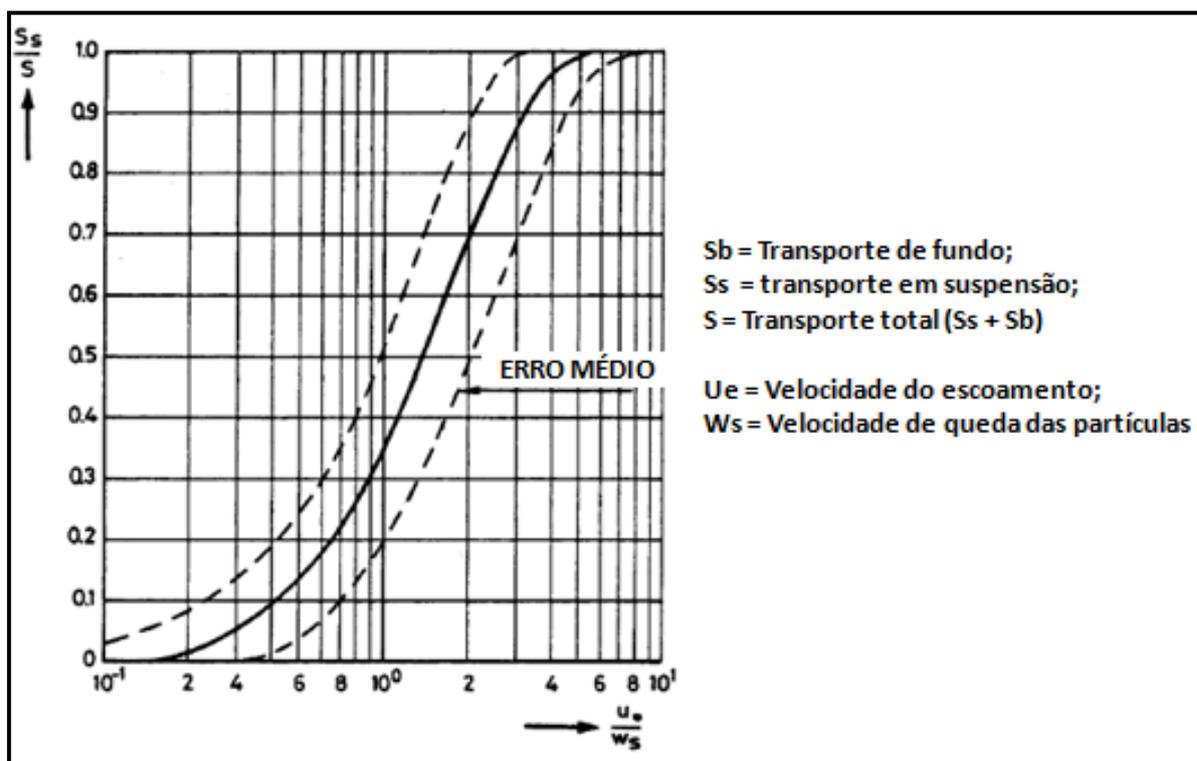


Figura 5 – Relação entre o transporte de partículas em suspensão e o transporte de fundo com relação a velocidade do fluxo e a velocidade de queda das partículas.

Fonte: Modificado de Van Rijn, 1984

Para medir a descarga de fundo dois métodos de medição estão disponíveis. Existem equipamentos de amostragem mecânicos do tipo armadilha, que recolhem as partículas sedimentos transportados perto do leito e a outra possibilidade é o levantamento do perfil do leito com o passar do tempo. Para medir a descarga de sedimentos em suspensão, uma vasta gama de instrumentos está disponível a partir de simples amostradores mecânicos até equipamentos acústicos e ópticos mais

sofisticados. A maior parte dos amostradores são utilizados como amostradores por integração pontual que significa que a medição dos parâmetros relevantes é feita em um ponto específico acima do leito durante um determinado tempo. Alguns instrumentos são utilizados como amostradores de integração de profundidade, o que significa amostragem é feita continuamente ao longo da profundidade elevando o instrumento a uma taxa constante trânsito.

Todos os instrumentos serão descritos levando em conta seu princípio de medição, modos de operação, imprecisão e especificações técnicas.

5.1.2. Características dos instrumentos

Nesta seção serão apresentadas as características mais importantes dos amostradores de integração pontual, e suas principais características.

5.1.3. Tempo de amostragem:

A duração da amostragem é o período de tempo durante o qual é recolhida uma amostra. Para as garrafas de amostradores do tipo armadilha, o período de amostragem é igual ao período de encher o recipiente (garrafa ou armadilha). O período de amostragem da Garrafa Delft é limitado pela dimensão do sedimento a ser capturado, devendo ser menor em comparação com o tamanho da câmara de sedimentação do instrumento. O período de amostragem da bomba de filtração é restringido pelas características do filtro. Uma membrana com 50 μm pode ser facilmente preenchida quando a amostragem é feita em ambiente com altas concentrações de silte. O período de coleta de amostradores a ópticos e acústicos é ilimitado, devendo ser utilizados equipamentos adicionais que permitam uma leitura digital em tempo real, visando diminuir o tempo médio de coleta a partir da análise dos dados coletados (CAREY, 1985).

5.1.4. Período mínimo do ciclo

O período mínimo do ciclo é o período de tempo entre duas medições sucessivas em pontos adjacentes em uma linha vertical. No caso de uma amostragem livre se utiliza o período mínimo de cerca de 5 minutos tal como apresentados na Tabela 2. O período do ciclo pode ser utilizado para avaliar o tempo necessário para cobrir um perfil completo de medições de concentração. (CAREY, 1985)

Tabela 2 – Características dos instrumentos para a quantificação do transporte e concentração dos sedimentos.

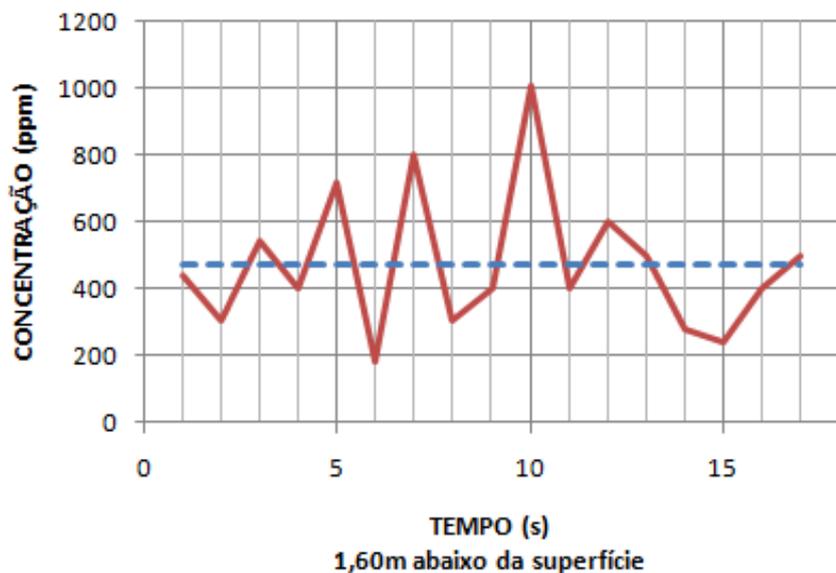
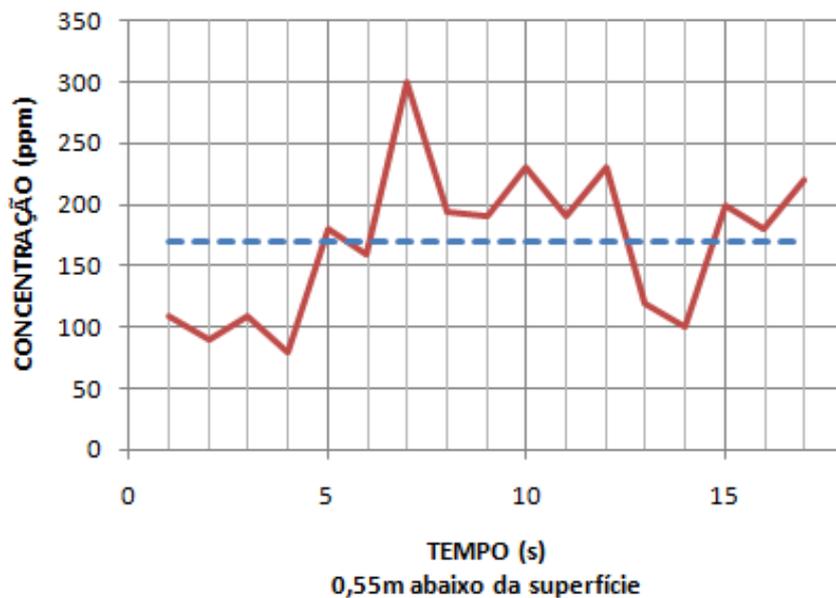
AMOSTRADORES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO	Descarga em suspensão		Parâmetro medido	Faixa de medição (mg/l)	Tempo de resposta (s)	Tempo de amostragem (min)	Período mínimo do ciclo (min)	Precisão global	
	silte (<50µm)	areia (<50µm)						Silte	Areia
EQUIPAMENTOS MECÂNICOS									
Garrafa	sim	sim	concentração	>1		1	5	100%	100%
Armadilha	sim	sim	concentração	>1	instantâneo	instantâneo	5	100%	100%
USP-61	sim	sim	concentração e transporte	>1		1	5	100%	100%
Delft	não	sim	concentração	>10		5-30	10	-	50%
Bomba de filtragem	não	sim	concentração	>10		5-15	10	-	20%
Bomba de sedimentação	não	sim	concentração	>50		5-15	15	-	20%
Bomba de garrafa	sim	sim	concentração	>1		1-5	5	20	20%
EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS									
OBS	sim	sim	concentração		<1	livre	5	50%	-
LISST	sim	sim	concentração e tamanho das partículas		<1	livre	5	30%	30%
OBS	sim	não	concentração			livre	5	50%	-
Ótico pontual ASTM	não	sim	concentração e transporte		<1	livre	5	-	50%
Perfilador acústico ABS	não	sim	concentração		<1	livre	5	-	50%

FONTE: Modificado de Carey, 1985.

5.1.5. Precisão global

A precisão global é uma estimativa do erro total de uma medição (sistemática e aleatória) relacionada com os erros de medição e os erros relacionados com processos físicos. Os erros físicos são introduzidos pelas flutuações estocásticas dos parâmetros físicos a serem medidos. A Figura 6 apresenta algumas informações sobre as variações nas concentrações de sedimentos observadas por Eyster e

Mahmood (1976) em alguns canais de irrigação. Eles utilizaram uma garrafa de amostragem levando a um tempo de amostragem de aproximadamente 5 segundos. Com base nestes resultados, cada amostragem pode ter um erro de 100%. Esse erro pode ser reduzido através de uma amostragem em um período maior ou pela coleta de mais amostras. A precisão global dos amostradores com livre período de amostragem, é baseada em um tempo relativamente longo (ou seja, 5 minutos). A precisão dos equipamentos ópticos e acústicos é largamente dependente do número e da precisão das amostras de calibração.



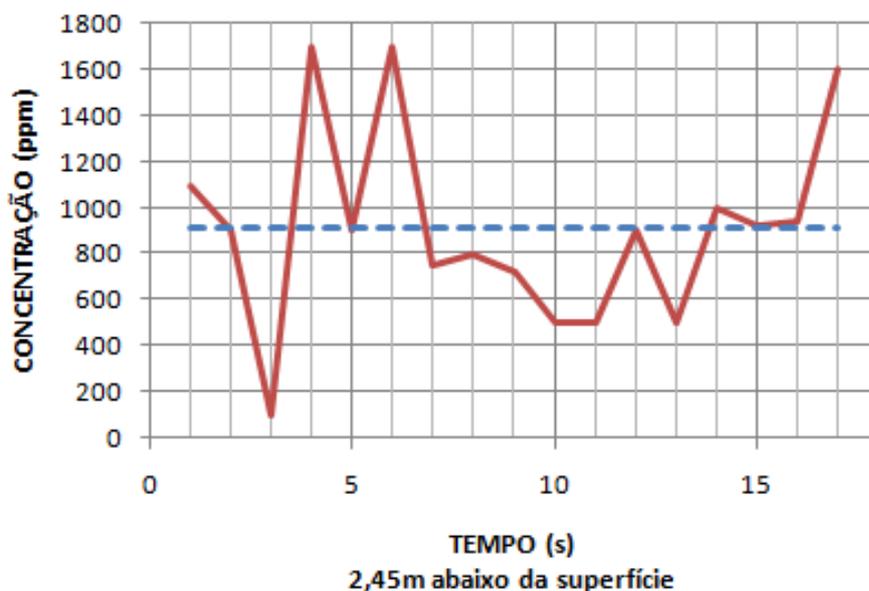


Figura 6 – Variação da concentração de areia em função da profundidade e do tempo

Fonte: Modificado de Eyster e Mahmood (1976)

5.1.6. Medições do transporte de sedimentos em rios

Eyster e Mahmood (1976) apresentam os instrumentos disponíveis (e precisões envolvidas) para a medição do transporte de sedimento de fundo, medição da concentrações existentes em suspensão, dimensões das partículas e velocidades de queda (Tabela 3 e Tabela 4).

Tabela 3 – Características das metodologias para amostragem de material de fundo

TRANSPORTE DE FUNDO			
TIPO DE SEDIMENTO	METODOLOGIA	FORMA DE AMOSTRAGEM	PRECISÃO
SILTE	Levantamento batimétrico	Em tempo real	fator 2
AREIA/PEDRA	Levantamento batimétrico	Em tempo real	50% - Necessário muitas medições
	BTMA	Em tempo real	Fator 2- Necessário muitas medições
	Helley-Smith	Em tempo real	Fator 2- Necessário muitas medições
	Delt Nile	Em tempo real	Fator 2- Necessário muitas medições

Fonte: Modificado de Eyster and Mahmood (1976)

Tabela 4 - Características das metodologias para amostragem de material em suspensão

TIPO DE SEDIMENTO	METODOLOGIA	FORMA DE AMOSTRAGEM	PRECISÃO
SILTE	Bomba de amostragem	Em tempo real	20%
	USP-61	Em tempo real (Manual)	20 - 30%
	Garrafas e Armadilhas	Em tempo real (Manual)	20 - 30%
	LISST	Em tempo real	20 - 30%
	OBS	Em tempo real	30 - 50%
AREIA	Bomba de amostragem	Em tempo real	20%
	USP-61	Em tempo real	20%
	Garrafas e Armadilhas	Em tempo real	20 - 30%
	Equipamentos Acústicos (ASTM, ABS)	Em tempo real	20 - 30%
	Laser (LISST)	Em tempo real	20 - 30%
	Delft	Em tempo real	50%

Fonte: Modificado de Eyster and Mahmood (1976)

5.2. Descrição dos amostradores de fundo

5.2.1. Aspectos gerais

O princípio básico da mecânica dos amostradores de fundo do tipo armadilha é interceptação das partículas do sedimento que se encontra em transporte perto do leito dos rios, ao longo de um pequeno acréscimo da largura do canal. A maior parte das partículas do leito é transportada como descarga de fundo, mas o amostrador irá coletar, inerentemente, uma pequena parte da carga em suspensão (relacionados com a dimensão vertical da entrada da boca do equipamento).

A qualidade do transporte de fundo medido por um amostrador mecânico depende da sua eficiência de retenção (erros instrumentais), de sua localização quanto à forma geométrica do leito (variabilidade espacial) e da turbulência próxima do amostrador (variabilidade temporal). A eficiência do mesmo depende do coeficiente hidráulico, da percentagem da largura do bico amostrador em contato com o leito durante a coleta de amostras e as perturbações geradas pela amostragem, no início e no final de cada coleta (DELFT HYDRAULICS, 1992).

O coeficiente hidráulico, definido como a razão entre a velocidade de entrada no bico e a velocidade do meio, depende da geometria de construção do dispositivo de amostragem, da posição do bico em relação ao fundo, do volume coletado e do tamanho da malha do saco de coleta (BESCHTA, 1981). As experiências laboratoriais têm mostrado que o amostrador (saco ou cesta) pode ser preenchido para cerca de 40% da sua capacidade, sem que ocorra redução da eficiência hidráulica e sem perda de partículas de sedimentos durante a elevação do instrumento. Assim, os problemas relativos à medição do transporte de fundo estão relacionados com o projeto do equipamento e com os processos físicos envolvidos. (EMMETT, 1980; DELFT HYDRAULICS, 1991)

Segundo Carey (1985) os problemas típicos dos amostradores de fundo do tipo saca são:

- Efeito inicial: partículas de areia do leito podem ser agitadas, ressuspensas e coletadas quando o amostrador é colocado no leito (sobreamostragem);
- Efeito abertura: uma defasagem entre o leito e a boca do amostrador pode estar presentes ou serem geradas em uma fase posterior, sob a

boca do amostrador devido à migração ondulações ou processos de erosão (subamostragem);

- Efeito de bloqueio: O entupimento do saco de amostragem por areia, silte, argila partículas e material orgânico pode reduzir o coeficiente hidráulica e, portanto, a eficiência de amostragem (subamostragem);
- Efeito de arraste: durante o processo de descida do equipamento pode deslocar-se para jusante devido à velocidade do fluxo. Sendo assim no momento da coleta, quando é levantado novamente pode atuar como amostrador do tipo garra com o arraste do mesmo sobre o fundo (sobreamostragem).

Os problemas típicos relacionados com a variabilidade dos processos físicos relativos ao transporte de sedimento de fundo segundo Carey (1985) são:

- O número de medições em cada local;
- A duração de amostragem de cada medição;
- O número de medições na seção de medição;
- O volume da bolsa de nylon (máximo de amostragem período);
- O bloqueio de material de nylon por sedimentos partículas;
- A presença ou a geração de uma lacuna no âmbito do amostrador boca.

O tamanho do saco de amostragem impõe um período máximo que depende do transporte e, conseqüentemente, da taxa e da velocidade do fluxo na seção de medição Tomando uma percentagem máxima enchimento de 50%, o máximo de areia que pode ser coletada em um amostrador de cerca de 2 litros é 2 quilos. A formula de Meyer-Peter-Muller para descargas de fundo tem sido utilizada para o calcular o tempo máximo de amostragem para material de fundo de 500 μm de

diâmetro e velocidades no intervalo de 0,75 a 2 m/s Os resultados são apresentados na Tabela 5

Tabela 5 – Período máximo de amostragem

VELOCIDADE MÉDIA NO ESCOAMENTO (m/s)	TEMPO MÁXIMO DE AMOSTRAGEM (s)
0,75	450
1,00	120
1,25	50
1,50	30
1,75	15
2,00	10

Fonte: Modificado de Carey (1985)

5.2.2. Arnhem (BTMA – “Bed load transportmeter Arnhem”)

Segundo De Vries (1973) o princípio de funcionamento deste equipamento é baseado na coleta de partículas de sedimentos por meio de um amostrador do tipo cesta. O cesto é composto de uma malha de arame fina montado em uma moldura, conforme ilustrado na Figura 7. O formato hidrodinâmico do corpo do equipamento provoca uma redução na pressão atrás do amostrador, fazendo com que a água e os sedimentos entrem pela boca do cesto na mesma velocidade do fluxo no local, desde que o conteúdo dos sedimentos já coletados seja relativamente pequeno. O amostrador pode coletar partículas entre 0,3 e 50 mm, dependendo da abertura da malha do cesto.

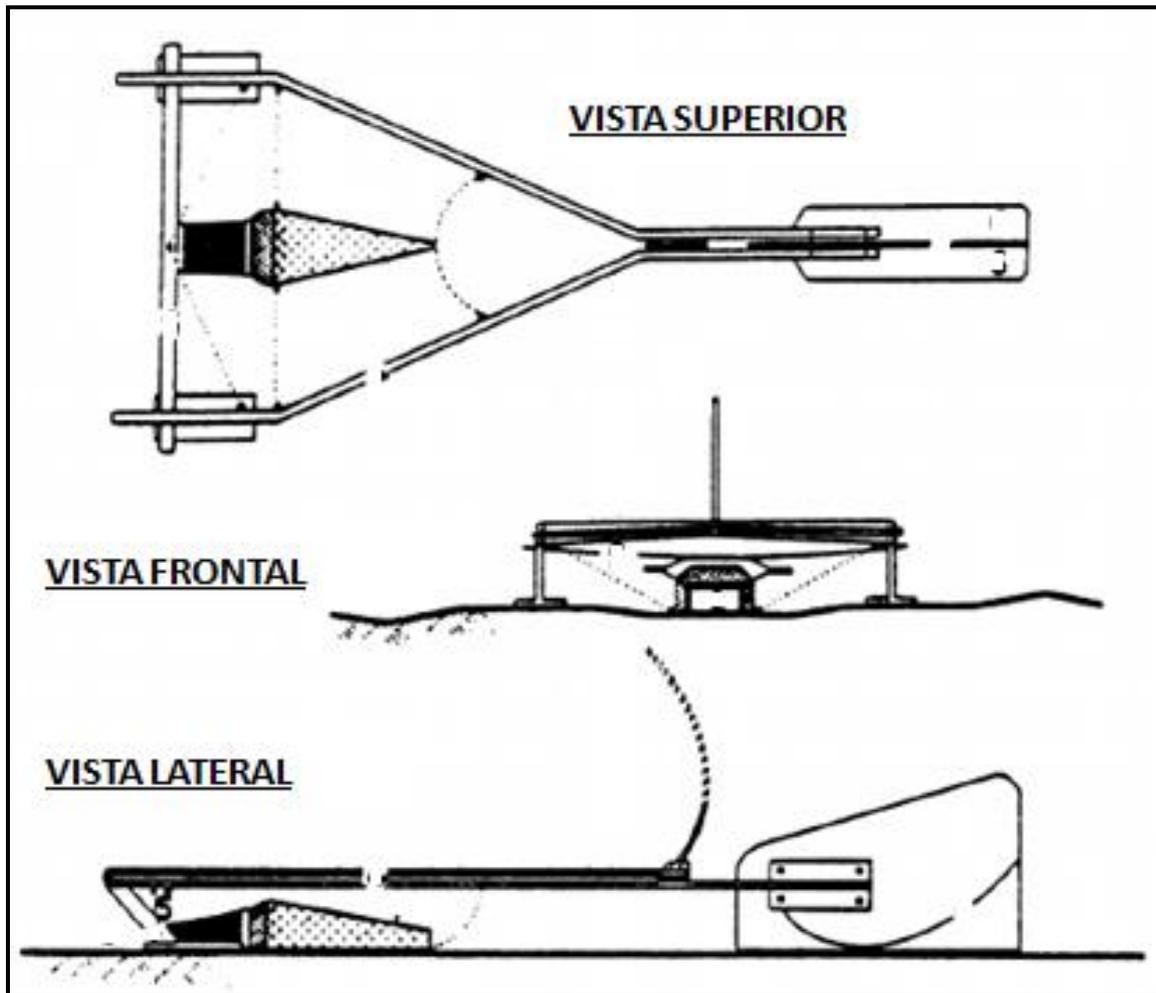


Figura 7 – Amostrador BTMA

Fonte Delft Hydraulics, 1958

A precisão da medida do transporte de fundo depende diretamente da precisão do fator de calibração, do número de medições e do processo de amostragem (pessoal especializado). Assumindo uma amostragem ideal, pelo menos 20 amostras devem ser coletadas em cada local para se obter uma taxa de transporte de fundo com um desvio padrão (erro) de cerca de 20% (De Vries, 1973). Na prática, o erro de amostragem será consideravelmente maior devido, sobretudo ao procedimento de amostragem.

5.2.3. Helley Smith (HS)

O amostrador de fundo Helley Smith é uma versão modificada do amostrador BTMA (Helley e Smith, 1971) e consiste de um bico de entrada de 0,076 x 0,076 m, de saco de amostragem estrutura de poliéster (Figura 8).

Várias versões diferentes desse dispositivo de amostragem têm sido utilizadas para diversas condições de campo. Entradas de proporções maiores são geralmente utilizados para a amostragem dos sedimentos de maiores dimensões e quanto mais profundos os rios a serem amostrados e maior a velocidade do fluxo, mais pesado deve ser o equipamento. Uma importante vantagem do amostrador Helley Smith é a facilidade de operação e extensa quantidade de medições que foram realizadas para sua calibração (cerca de 10.000 amostras).

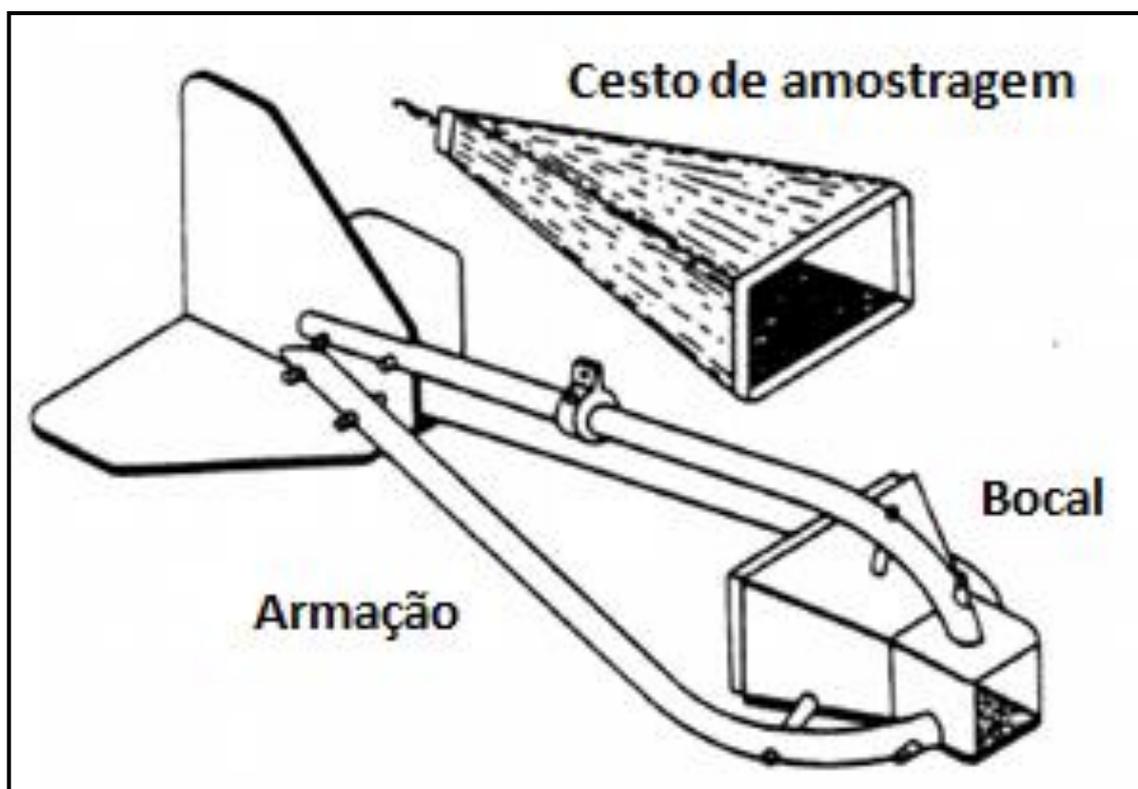


Figura 8 – Amostrador Helley Smith

Fonte: Helley e Smith, 1971

5.2.3.1. Resultados e precisão

O transporte de fundo em kg/s.m pode ser determinado pela seguinte

Equação 2:

$$Sb = \frac{\alpha \cdot \rho_s \cdot (1-p)}{(b \cdot T)} \quad \text{ou} \quad Sb = \frac{G_s}{(b \cdot T)} \quad (2)$$

Onde:

- Sb = taxa de transporte de sedimentos (kg/s.m)
- Fator de calibração: (= 0,5 para partículas de 0,25 a 0,5 mm)
 (= 1,0 para partículas de 0,5 a 16 mm)
 (= 1,5 para partículas de 16 a 32 mm)
- p = fator de porosidade (= 0.4);
- ρ_s = densidade das partículas de sedimento (= 2650 kg/m³);
- V_s = Volume imerso do sedimento coletado (m³);
- G_s = Massa seca do sedimento coletado (kg);
- b = Largura da abertura da entrada (= 0.0762 m p/ HS);
- T = Tempo de amostragem (s);

Emmet (1980) concluiu que o HS tem uma eficiência de 100% (fator de calibração, $\alpha = 1$ para partículas de dimensões na faixa de 0,5 mm a 16 mm. Para partículas entre 0,25 e 0,5 mm, a eficiência encontrada a cerca de 175%. (resultando em um fator de calibração $\alpha = 0,5$) que se presume que este aumento é causado pela coleta de partículas de sedimento em suspensão. Para partículas na faixa de 16 a 32 milímetros a eficiência encontrada é de aproximadamente 70% (resultando em

uma um fator de calibração $\alpha = 1,5$), que se presume que é causada pela dificuldade de partículas de tamanhos maiores deslocarem-se no fundo dos rios.

Resumindo:

- $\alpha = 0.5$, para partículas na faixa de 0,25 a 0,5 mm;
- $\alpha = 1.0$, para partículas na faixa de 0,5 a 16 mm;
- $\alpha = 1.5$, para partículas na faixa de 16 a 32 mm.

Dentre as vantagens apresentadas por Helley and Smith (1971) destaca-se a simplicidade e facilidade de manuseio do equipamento. Dentre as desvantagens, citar-se o tempo de amostragem (elevado) e a confiabilidade nos fatores de calibração.

Mais informações sobre a calibração de amostradores de fundo é dada por Hubbell et al.(1985).

5.2.4. Delft Nilo (DNS – “Delft Nilo Sampler”)

O Amostrador DNS é composto por um amostrador de fundo e um amostrador de material em suspensão anexado a um suporte pesando cerca de 60 kg (Figura 9) O amostrador de sedimentos em suspensão anexo ao equipamento consiste de 7 bicos (diâmetro interno = 3 mm) que estão ligados a mangueiras plásticas e são operados por bombas. O amostrador de descarga de fundo consiste em um bocal ligado a um saco de nylon com uma malha de 150 ou 250 μm , dependendo do tamanho do material do leito. A parte inferior tem um amostrador bico com inclinação de 1 a 10 graus. O amostrador de fundo está ligado a um braço móvel, que pode deslocar no sentido vertical (para cima e para baixo) ao longo de uma distância de cerca de 15 cm no que diz respeito à estrutura de suporte. Durante a etapa da descida do instrumento, o amostrador de fundo encontra-se em sua posição mais

alta. Quando o corpo do instrumento é colocado sobre o leito, o bocal do amostrador entra em contato com o fundo do rio após a diminuição da tensão do cabo. Quando o instrumento é suspenso, ocorre primeiramente o levantamento do bico que se levanta por 15 cm e logo após o restante do equipamento é levantado. A construção desse movimento foi concebida para reduzir ao máximo o “efeito de abertura” e o “efeito de arraste” citado anteriormente. O nome deste equipamento deve ao fato de ter sido desenvolvido para medições de descarga de fundo no rio Nilo (VAN RIJN e GAWEESH,1992).

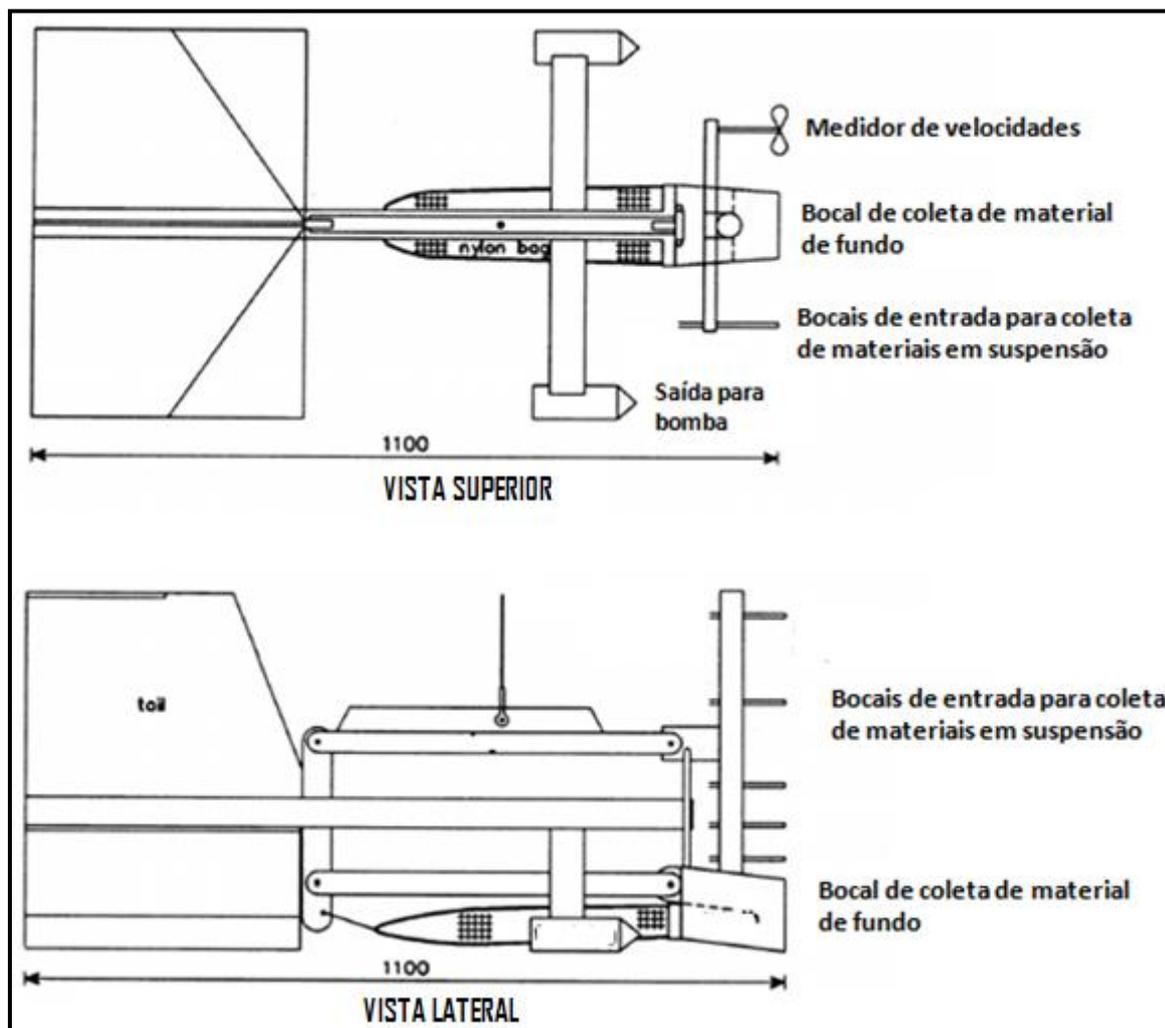


Figura 9 – Amostrador Delft Nilo (DNS)

Fonte: Modificado de Van Rijn e Gaweesh (1992)

5.2.4.1. Resultados e precisão

Segundo Van Rijn e Gaweesh (1992), o transporte de fundo em kg/s.m pode ser determinado pela Equação 3:

$$Sb = \frac{\alpha \cdot (Gs - G_0)}{(b \cdot T)} \quad (3)$$

Onde:

- Sb = taxa de transporte de sedimentos (kg/s.m)
- α = fator de calibração (= 1 a 1.5);
- G_s = Massa seca do sedimento coletado (kg);
- G_0 = Massa seca do sedimento coletado relativa ao “efeito de abertura” e ao “efeito inicial”, determinado pela descida do equipamento e imediata subida do mesmo após tocar o fundo (“amostragem zero”);
- b = Largura da abertura da entrada (= 0.096 m);
- T = Tempo de amostragem(s).

Os valores de G_0 devem ser determinados a partir de 10 “medições zero”. No local de coleta das amostras. Experimentos práticos em campo mostraram que esse valor é aproximadamente 0,03 kg. O fator da eficiência de amostragem (fator α) foi determinado por meio de testes em laboratório para diferentes velocidades de fluxo e tamanho de sedimentos, estando na faixa de 1 a 1,5.

Dentre as vantagens apresentadas por Van Rijn e Gaweesh (1992) destaca-se a facilidade e a confiabilidade do equipamento. Dentre as desvantagens pode-se citar o elevado tempo de amostragem.

5.3. Descrição dos amostradores de sedimento em suspensão

Os amostradores de sedimento em suspensão que serão descritos nos itens a seguir, podem ser classificados de acordo com seus princípios de medição conforme a Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 – Amostradores de sedimentos em suspensão

AMOSTRADORES DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO	PONTUAIS	AMOSTRADORES DE PROFUNDIDADE
Métodos diretos	Amostrador de garrafa Delft Amostradores acústicos	
Metodos indiretos	Armadilhas Garrafas USP-61 Bombas Óticos	USD-49 Amostrador de Saca

Fonte: Kleinhans e Ten Brinke (2001)

Segundo Kleinhans e Ten Brinke (2001) os amostradores do tipo armadilha e garrafa só podem ser utilizados em condições de fluxo constante, sendo que os demais podem ser utilizados em escoamentos de fluxo uniforme e oscilatório

5.3.1. Amostradores tipo armadilha e garrafa

5.3.1.1. Aspectos gerais

O princípio básico de todos os amostradores do tipo armadilha e do tipo garrafa é a coleta de amostras de água e sedimento para determinação da concentração, transporte e tamanho das partículas a partir de análises físicas em laboratório (DELFT HYDRAULICS, 1980)

A amostragem de um volume de água e sedimentos utilizando estes equipamentos deve ser feita de forma que a velocidade de entrada da amostra no equipamento seja igual à velocidade do fluxo local (amostragem isocinética), ou seja, com o coeficiente hidráulico, definido como a razão entre a velocidade engolimento e velocidade do fluxo local, igual à unidade ($HC = 1$). A diferença entre essas duas velocidades pode resultar em erros na amostragem de forma que amostragens em uma velocidade mais baixa do que a do ambiente, dão origem a concentrações maiores que as presentes no fluxo local, em função da formação de linhas de fluxo divergentes, o que pode não ser seguido pelas partículas dos sedimentos, uma vez que a densidade das partículas é maior que a densidade da água. Inversamente, amostragem em uma velocidade mais elevada do que a do ambiente fluxa resultaria em um menor concentração de sedimentos conforme, ilustrado na Figura 10 a seguir. (DELFT HYDRAULICS, 1980)

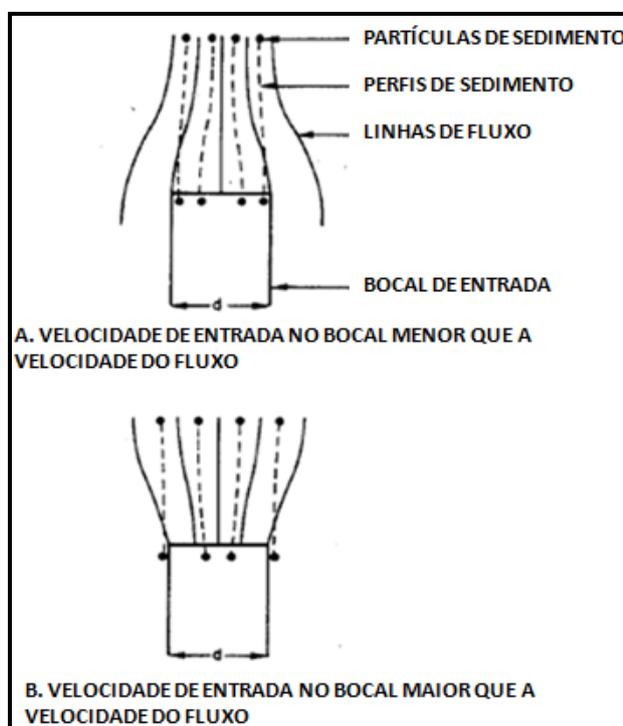


Figura 10 – Influência da velocidade de entrada nos perfis de sedimentos

Fonte: Modificado de Delft Hydraulics, (1980)

A magnitude do erro devido à incorreta ingestão de velocidades de suspensões em várias concentrações tem sido determinada experimentalmente por Nelson e Benedict (1950), cujos resultados são ilustrados na Figura 11, que mostra um efeito decrescente com a diminuição do tamanho das partículas. É também notado que os coeficientes hidráulicos menores do que 1 resultam em erro relativamente maior. Os autores não encontraram nenhuma alteração significativa do erro de amostragem em relação a velocidade de fluxo (intervalo de 0,9 a 1,5 m / s), ao tamanho do bocal (intervalo de 4 a 7 mm), ao ângulo entre a direção do fluxo e o eixo do bico (intervalo de 0° a 20°) em um coeficiente hidráulico na faixa de 0,5 a 2 em todos os testes.

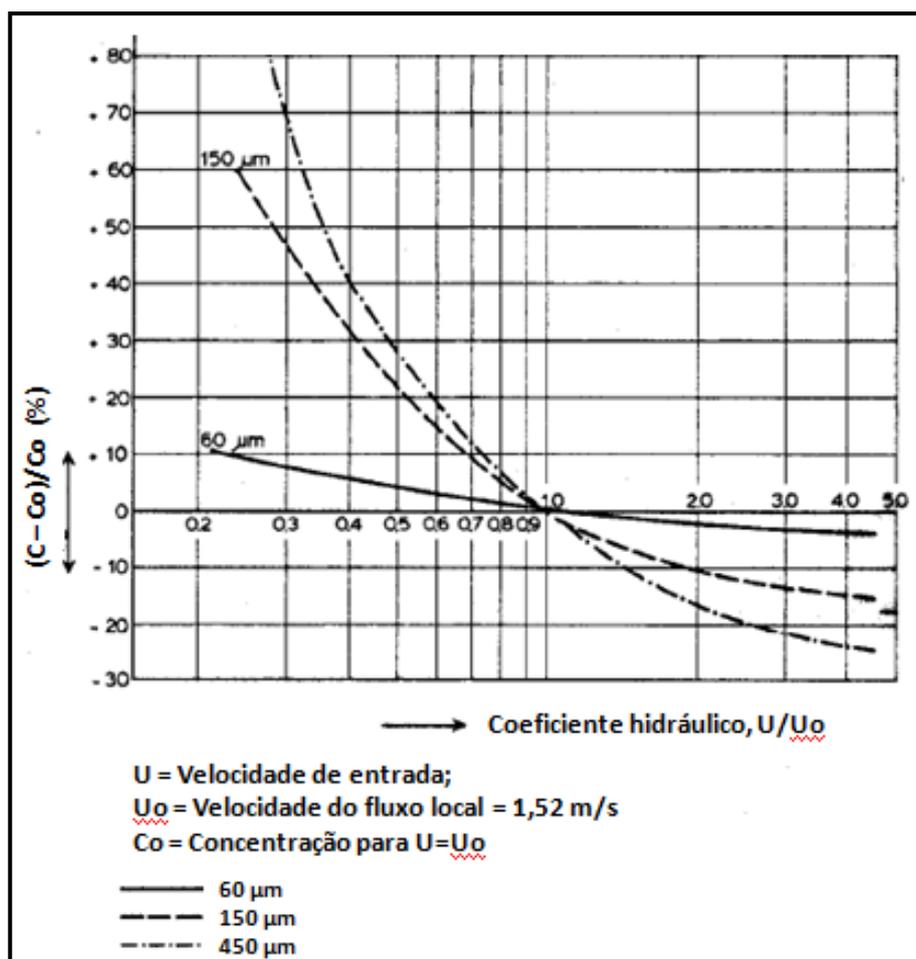


Figura 11 – Erros de amostragem relativos ao coeficiente hidráulico

Fonte: Modificado de Nelson e Benedict (1950)

5.3.2. Amostradores do tipo Garrafa

O método é baseado no preenchimento de uma garrafa a partir da imersão da mesma no fluxo a ser estudado para assim determinar a concentração de silte e/ou areia em um ponto específico do fluxo. Normalmente, a garrafa é colocada verticalmente em um recipiente (Figura 12) e abaixada até o local de medição desejado no qual a garrafa é aberta (mecânica ou eletricamente). O tempo exato de preenchimento pode variar de 20 a 400 segundos, dependendo do posicionamento do frasco, velocidade de fluxo e da altura de coleta das amostras (HAYLES, 1978).

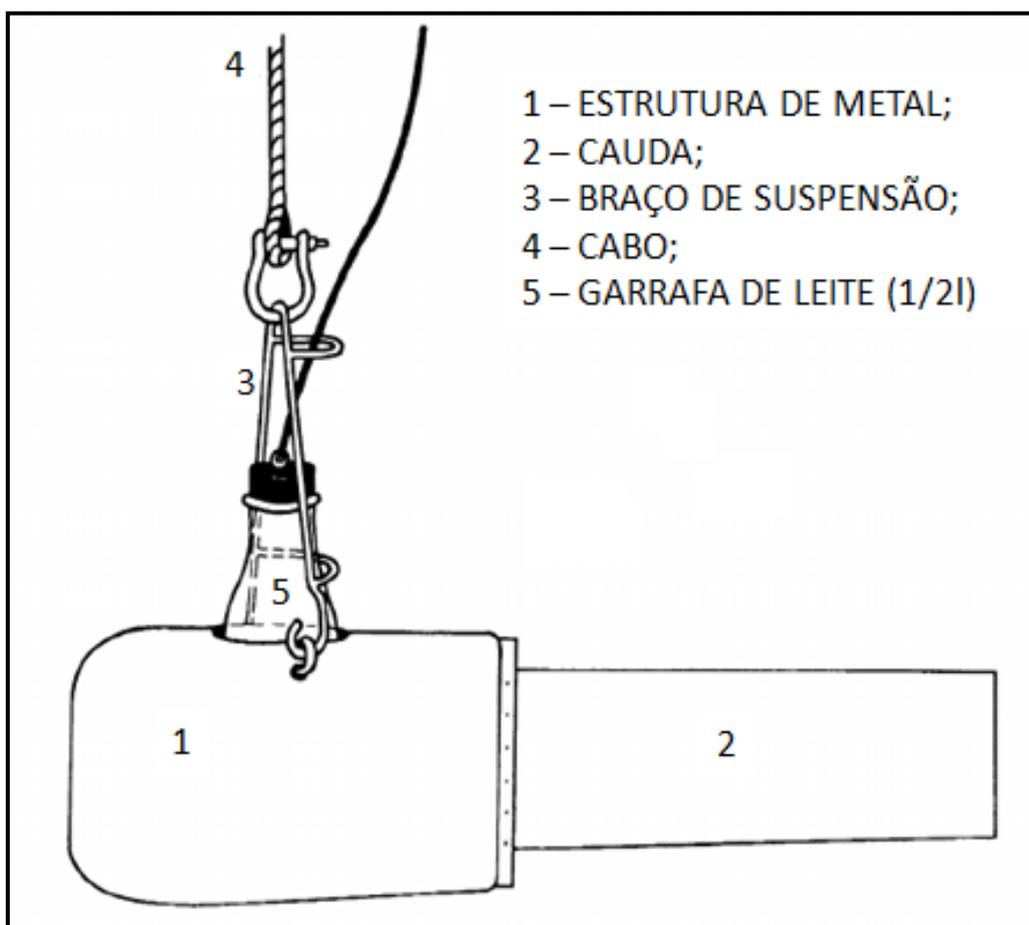


Figura 12 – Amostrador do tipo garrafa

Fonte: Modificado de Hayles (1978)

Uma medição rápida no perfil de uma seção pode ser conseguida com utilização de um rack com 5 frascos (ou mais), que serão abertos em profundidades prefixadas. A Figura 13 mostra o tempo necessário para coleta de uma amostra para uma determinada velocidade de fluxo e altura de coleta de amostras.

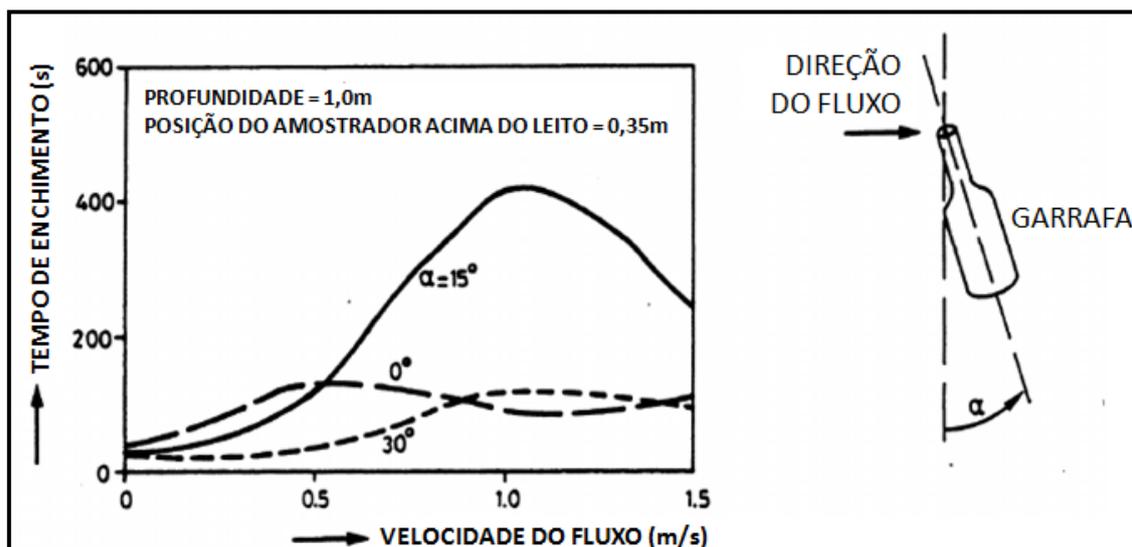


Figura 13 – Tempo de enchimento da garrafa

Fonte: Modificado de Hayles (1978)

5.3.2.1. Funcionamento prático

- Abaixar o equipamento até a posição desejada de amostragem;
- Remover a tampa da garrafa;
- Aguardar o enchimento do frasco (3 ~ 5 minutos);
- Elevar o equipamento lentamente e substituir a garrafa;
- Registrar os dados em uma planilha de medição.

5.3.2.2. Análise laboratorial

Os frascos devem ser armazenados longe da luz direta do sol devendo a análise deve ser concluída antes do crescimento de microorganismos. O

procedimento padrão para a determinação da concentração dos sedimentos é descrito a seguir (Hayle, 1978):

- Medir volume de água amostra;
- Deixar amostra decantar por 24 horas;
- Lavar amostra em uma peneira de 50 µm peneira suspenso em uma garrafa de vidro ao abrigo luz, escovando a amostra para separar a areia (usar de água destilada para remover sal);
- Lavar a amostra de areia em um filtro não higroscópico de nylon (0,5µm);
- Filtrar a amostra de silte com auxílio de filtro não higroscópico de nylon (0,5µm);
- Utilizar água destilada para remover o sal;
- Secar as amostras de areia e silte; e
- Armazenar a amostra de areia para análise granulométrica.

No caso de uma grande quantidade de amostras, as análises de laboratório podem ser reduzidas consideravelmente com a utilização do método da ultracentrifugação para separação das partículas de silte.

5.3.2.3. Resultados e precisão

Segundo Hayes (1978) as concentrações de silte e areia são determinadas pela Equação 4:

$$C = \frac{Gs}{V} \quad (4)$$

Onde:

- C = concentração (mg/l)
- Gs = massa seca de sedimento (mg);
- V = volume de água amostra (l).

As medições em laboratório executadas por Delft Hydraulics (1980) demonstraram que a eficiência de retenção de sedimentos de uma garrafa de partículas de areia ($> 50 \mu\text{m}$) é fortemente dependente da orientação da abertura principal e da direção do fluxo, sendo que o melhor ângulo para coleta das amostras, é de cerca de 35° . Para $\alpha < 35^\circ$ a concentração medida é muito pequena, enquanto que para $\alpha > 35^\circ$ medir a concentração é muito grande.

5.3.2.4. Vantagens

Dentre as vantagens citadas por Hayes (1978) destacam-se:

- Simplicidade e confiabilidade na amostragem de partículas de areia e silte; e
- Facilidade na manipulação do aparelho podendo ser utilizado sob condições meteorológicas difíceis.

5.3.2.5. Desvantagens

As dentre desvantagens citadas pelo mesmo autor destacam-se:

- A necessidade de coleta de muitas amostras para garantir uma boa precisão nos dados;
- Tempo elevado para coleta; e

- Impossibilidade de coletar partículas de tamanhos maiores, o que impossibilita a análise granulométrica

5.3.3. Amostrador tipo Armadilha

5.3.3.1. Amostrador armadilha pontual

O amostrador armadilha pontual consiste de um cilindro horizontal equipado com válvulas que possam subitamente fechar a entrada (através de um sistema Mensageiro) armazenando a amostra dentro da armadilha instantaneamente em uma determinada posição como mostrada na Figura 14. Enquanto o amostrador é abaixado na seção até o ponto de medição desejado, o fluxo de água passa continuamente pelo equipamento (GARTNER, 1980)

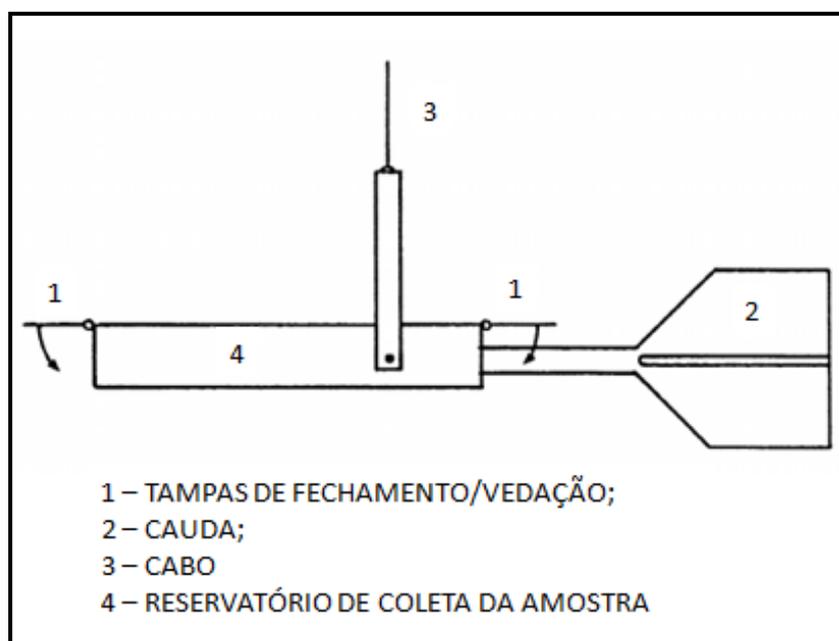


Figura 14 – Amostrador armadilha pontual

FONTE: Modificado de Gardner (1980)

5.3.3.1.1. Resultados e precisão

As concentrações de silte e areia são determinadas pela seguinte Equação 5

$$C = \frac{Gs}{V} \quad (5)$$

Onde:

- C = concentração (mg/l);
- Gs = massa seca de sedimento (mg);
- V = volume de água amostra (l).

5.3.3.1.2. Vantagens e desvantagens

As vantagens e desvantagens apontadas por Gardner (1980) referentes a este tipo de equipamento são as mesmas apresentadas por Hayes (1978) para os amostradores do tipo garrafa, uma vez que o princípio de aplicação das duas metodologias são similares.

5.3.4. Amostrador armadilha de integração temporal

Amostrador armadilha de integração temporal utilizado em lagos e oceanos consistem em uma caixa em formato de cilindro ou funil, fechadas em um dos lados e colocado verticalmente na coluna de água, como mostra a Figura 15. Estas armadilhas são utilizadas para determinar a taxa de deposição em uma determinada altitude e a concentração de sedimentos a certa profundidade.

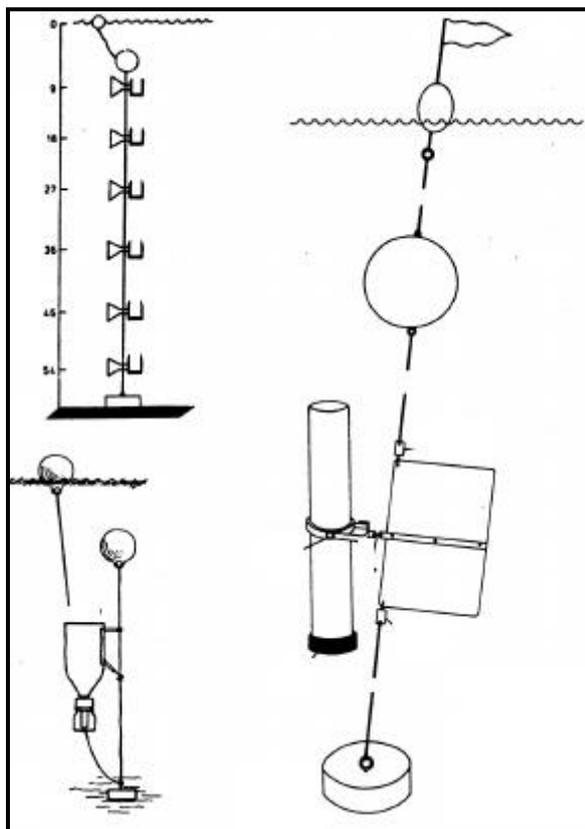


Figura 15 - Amostrador armadilha de integração temporal

Fonte: Modificado de Kraus (1987)

Em água parada a eficiência de coleta da amostra é igual a um. Em água corrente a eficiência de captura depende de muitos fatores, como da turbulência gerada dentro armadilha, geometria da armadilha, a concentração e velocidade de queda partículas, entre outros. A eficiência de amostragem para suspensões de lodos com velocidades entre 0,05 e 0,1 m/s encontra-se na faixa de 0,08 e 1,2 (BLOESCH e BURNS, 1980; GARDNER, 1980).

A concentração das frações de dimensão i na profundidade z é dada pela Equação 6:

$$c_i(z) = \frac{M_i}{(k_e \cdot F \cdot U_t \cdot \Delta T)} \quad (6)$$

Onde:

- M_i = massa do sedimento de fração i na armadilha;
- F = área das aberturas do bocal de entrada;
- ΔT = período de amostragem;
- U_t = Tempo médio da velocidade média na altura (z); e
- K_e = coeficiente captura.

Os valores do coeficiente k_e foram obtidos a partir de calibrações em laboratório e em campo onde as concentrações foram medidas por meio de um amostrador do tipo bomba perto da entrada das bocas das armadilhas. Também foram realizadas medições de velocidade perto da armadilha (0,5 a 0,8 m / s). A partir desses experimento Bloesh e Burns (1980) concluíram que:

- $k_e = 0,26$ condições de campo; e
- $k_e = 0,21$ para o laboratório.

É importante ressaltar que os valores do coeficiente k_e só são validos para condições de estabilidade no regime do fluxo, sendo que para demais condições, onde ocorre o crescimento ou decaimento do fluxo, os valores de k_e tendem a ser diferentes. Verificou-se que 70% da massa do sedimento foi aprisionado durante a fase de crescimento e de decaimento das ondas (zona interna do amostrador) (KRAUS, 1987).

Kraus (1987) cita que as vantagens desse instrumento referem-se a possibilidade de se obter uma medição absoluta taxa da transporte em um curto período de tempo (10min), a possibilidade de aferir a distribuição vertical;

possibilidade de instalação simultânea em vários locais e a simplicidade/ baixo custo de construção. Dentre as desvantagens cita-se que o aparelho quando inserido no meio pode provocar distúrbios e turbulências, necessidade de análise posterior das amostras em laboratório, número de pessoas envolvidas na instalação e a restrição de instalação em águas profundas.

5.3.5. Amostrador de integração vertical USP-61

O amostrador consiste de um corpo hidrodinâmico de bronze fundido pesando 50kg, que inclui uma pequena garrafa (= 500 ml), como mostra a Figura 16. A entrada do fluxo no bocal de entrada pode ser aberta ou fechada com auxílio de uma válvula elétrica visando definir em quais posições deverão ser feitas as amostragens. Para eliminar possíveis erros na coleta da amostra em virtude da diferença de pressão no fluido e no interior da garrafa, após a abertura da válvula, o ar no frasco pode escapar através de um tubo de exaustão apontando para jusante ao lado da cabeça do amostrador. Em função disto o coeficiente hidráulico para esse tipo de amostragem é de aproximadamente igual a um e o tempo de preenchimento varia de 10 a 30 segundos, como ilustra o gráfico da Figura 17. Para evitar a recirculação do fluxo, a garrafa só deve ser preenchida até 75% de sua capacidade máxima. (DIJKMAN, 1982)

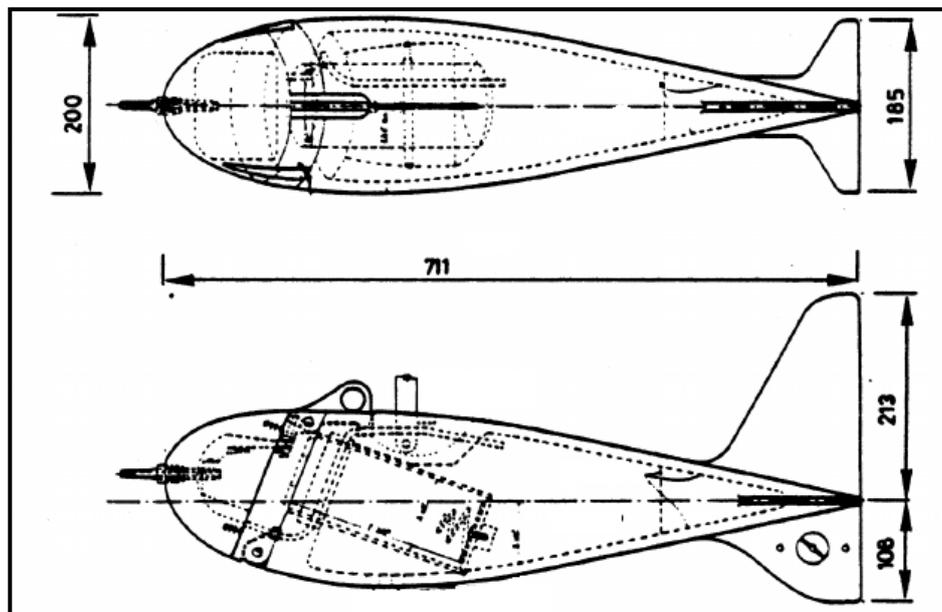


Figura 16 – Amostrador USP-61

FONTE: Rickly Hydrological Company (www.rickly.com)

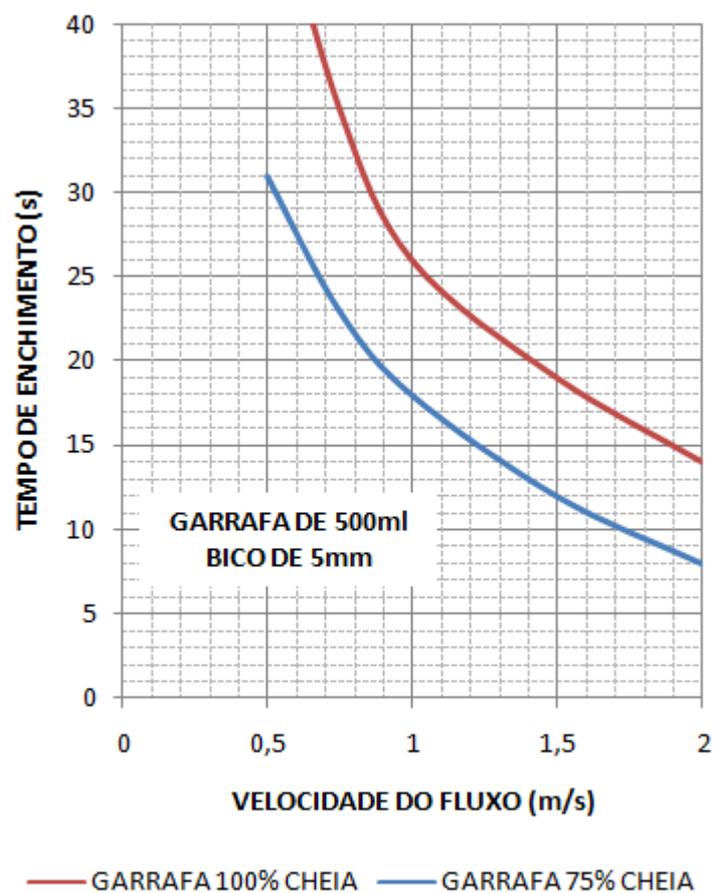


Figura 17 – Tempo de enchimento da garrafa do amostrador

FONTE: Modificado de Dijkman, (1982)

5.3.5.1. Funcionamento prático

- Abaixar o equipamento até a profundidade máxima de amostragem;
- Abrir a válvula de entrada;
- Aguardar o preenchimento de 75% do volume da garrafa;
- Fechar a válvula por meio do acionamento elétrico;
- Suspender o instrumento lentamente; e
- Anotar os dados em uma planilha de dados.

5.3.5.2. Resultados e precisão

Segundo Dijkman, (1978) as concentrações de silte e areia são determinadas pela seguinte Equação 7:

$$C = \frac{Gs}{V} \quad (7)$$

Onde:

- G_s = massa seca de sedimento (mg),
- V = volume de água amostra (l).

A taxa de transporte de silte e areia (em kg/s/m^2) são determinadas pela Equação 8

$$S = \frac{Gs}{(F \cdot T)} \quad (8)$$

Onde:

- F = área do bocal (m^2); e
- T = período de Amostragem (s).

A eficiência de coleta das amostras está diretamente relacionada com o coeficiente hidráulico do equipamento, sendo que estudos realizados em laboratório demonstraram que este coeficiente varia de 0,8 a 1,3 dependendo da temperatura da água, profundidade do local de amostragem e posicionamento do bico (desvio máximo em relação a direção do fluxo de 20°), sendo esperado um erro máximo de 10% em condições estáveis de amostragem, podendo variar dependendo da flutuação das concentrações encontradas no meio no qual está inserido. Para minimizar esses erros e garantir uma confiabilidade na aquisição dos dados, deve ser realizadas cerca de 10 medições para cada ponto. (DIJKMAN, 1978).

5.3.5.3. Vantagens e Desvantagens

As vantagens referentes à utilização deste equipamento e apontadas por Dijkman (1978) são: simplicidade e confiabilidade do equipamento para coleta de partículas de areia e silte, facilidade de manipulação e determinação direta do transporte dos sedimentos. As desvantagens são: a necessidade de coleta de muitas amostras, retenção de apenas a parte fina dos sedimentos em suspensão, o que impossibilita a análise granulométrica, impossibilidade de coletar amostras de fundo e a fragilidade dos bocais de entrada.

5.3.6. Amostrador de garrafa Delft (DB)

Princípio de operação do amostrador de garrafa Delft (Figura 18) baseia-se na passagem contínua do fluxo pelo interior do amostrador, ou seja, a água entra pelo

bocal passa por dentro do amostrador saindo por um orifício na parte traseira. Como resultado da forte redução do fluxo e da velocidade devido à geometria do frasco, a areia e partículas superiores a 100 µm ficam retidas no interior da garrafa. (DIJKMAN, 1981).

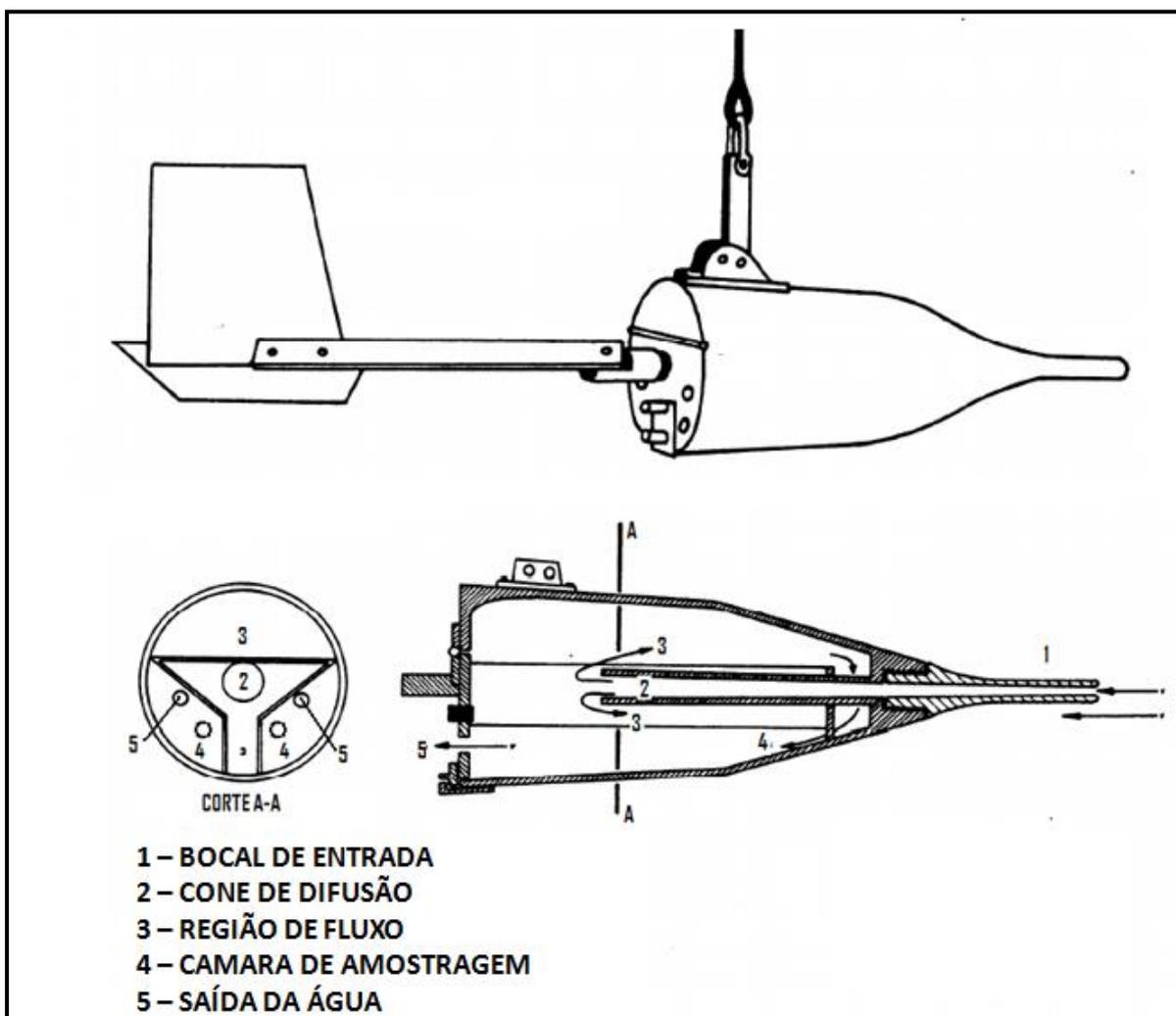


Figura 18 – Garrafa Delft

FONTE: Modificado de Dijkman (1981)

5.3.6.1. Resultados e precisão

Segundo Dijkman, (1981), a média do transporte de sedimentos em um determinado local (em kg/m².s) é determinada pela Equação 9

$$S = \frac{\alpha \cdot (1-p) \cdot \rho_s \cdot V}{F \cdot T} \text{ ou } \frac{G_s}{F \cdot T} \quad (9)$$

Onde:

- α : = um fator de calibração;
- p = fator de porosidade;
- ρ_s = densidade do sedimento (2650 kg/m^3);
- G_s = massa seca de sedimento (mg);
- V_s = volume da amostra sedimentos, incluindo os espaços vazios (m^3);
- F = área do bocal (m^2); e
- T = período de amostragem (s).

Segundo Dijkman, (1981) os erros de amostragem estão associados com as variações no coeficiente hidráulico durante a coleta, ineficiência do equipamento em amostrar partículas de tamanhos diminutos (partículas mais finas do que $100 \mu\text{m}$), possível amostragens adicionais durante a elevação e/ou abaixamento do instrumento e perdas durante a remoção da areia no interior do DB.

Geralmente, só os dois primeiros erros são corrigidos através de um fator calibragem levantados a partir de inúmeras medições realizadas em laboratório. O fator α varia de 0,7 a 2,5 dependendo do tipo de bico, tamanho da partícula e velocidade de fluxo local. Para condições de velocidade de escoamento menores que 1 m/s utiliza-se um bocal com $15,5 \text{ mm}$ de diâmetro; para velocidades maiores que 1 m/s utiliza-se bocais com 22 mm de diâmetro.

O erro de amostragem devido à coleta de partículas de sedimentos durante a descida e subida do instrumento pode ser reduzida através da realização de um grande número de medições e utilização de um tempo de amostragem relativamente alto (15 minutos). Caso contrário se torna necessário a utilização de um fator de calibração adicional. (DIJKMAN, 1981).

5.3.6.2. Vantagens

Dentre as vantagens descritas por Dijkman e Milisic (1982) destacam-se:

- Confiabilidade e simplicidade na amostragem de partículas maiores que $100\mu\text{m}$;
- Rapidez na amostragem;
- Capaz de coletar de uma grande faixa de tamanho de areias permitindo uma análise granulométrica;
- Determinação direta do transporte de sedimentos; e
- Não necessita de eletricidade.

5.3.6.3. Desvantagens

As desvantagens citadas pelos mesmos autores são:

- Não coleta partículas menores que $100\mu\text{m}$;
- Necessário a aplicação de fatores de calibração, o que pode gerar erros nas medições se as condições em campo não forem semelhantes as que foram utilizadas para calibração do coeficiente;
- Não coleta material de fundo; e
- Não deve ser utilizado em condições de maré.

5.3.7. Amostrador de integração vertical USD-49

O USD-49 é considerado um amostrador de integração vertical, uma vez que seu princípio de funcionamento consiste em abaixar o equipamento a uma velocidade constante até o leito rio e imediatamente trazê-lo a tona, possibilitando assim uma amostragem média da concentração dos sedimentos na vertical. Esse

procedimento deve ser repetido em várias verticais em uma seção, garantindo assim uma homogeneização dos resultados. (FISP, 2003)

A taxa de trânsito depende da velocidade média na vertical, da profundidade no local e do diâmetro do bocal, como mostra a Figura 19. O USD49 é adequado para profundidades inferiores a 5m e em regiões que a velocidade não seja superior a 2m/s.

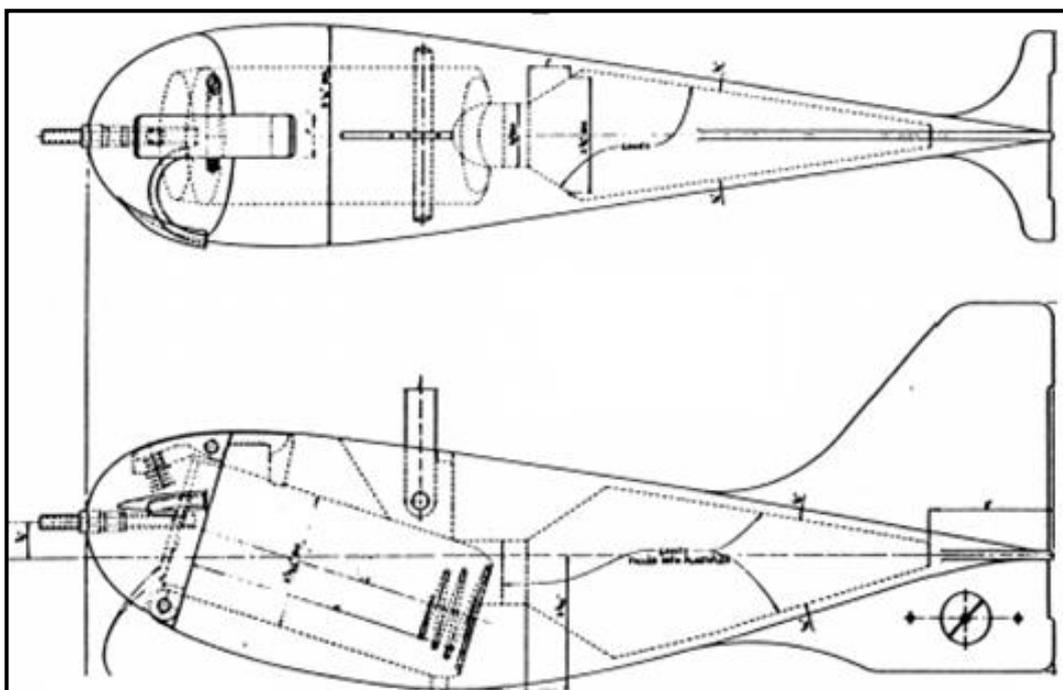


Figura 19 – Amostrador USD-49
Fonte: Modificado de FISP, (2003)

5.3.7.1. Resultados e precisão

A concentração média na vertical de medição é determinada pela seguinte Equação 10

$$C_{médio} = \frac{Gs}{V} \quad (10)$$

Onde:

- G_s = massa seca de sedimento (mg); e
- V = volume de água contida na amostra (l).

O transporte de sedimentos em kg/m/s pode ser determinado de acordo com a Equação 11

$$S = \frac{h \cdot G_s}{F \cdot T} \quad (11)$$

Onde:

- G_s = massa seca de sedimento (mg);
- h = profundidade da zona amostrada (m);
- F = área do bocal (m^2); e
- T = período de amostragem (s).

5.3.7.2. Vantagens

- Simplicidade e confiabilidade do equipamento para coleta de partículas de areia e silte;
- Fácil manipulação; e
- Determinação direta de transporte.

5.3.7.3. Desvantagens

- Dificuldade de coleta de amostras em profundidades inferiores a 5 m;
- Coleta de apenas sedimentos finos;
- Retenção da parte fina apenas dos sedimentos em suspensão, o que impossibilita a análise granulométrica;

- Não coleta material de fundo; e
- Fragilidade dos bocais de entrada.

5.4. Métodos óticos e acústicos de amostragem

Os Sensores acústicos que são regularmente utilizados para medir a velocidade da água também vêm sendo utilizados para estimar a concentração de sedimentos em suspensão na água a partir da análise do retorno do sinal emitido, como um subproduto da velocidade. Estudos iniciais utilizando a técnica acústica forneceram resultados qualitativos, por exemplo, Schott e Johns (1987), Flagg e Smith (1989), e Heywood et al (1991). As experiências laboratoriais concebidas para calibrar a os aparelhos com as concentrações de sedimento foram realizadas por Thorne et al (1991) e Lohrmann e Huhta (1994). Hanes et al (1988) utilizando uma Fonte de emissão acústica de 3 MHz para estimar a concentração de sedimentos em suspensão próximo a Ilha Prince Edward, Canadá Thevenot et al (1992) desenvolveram parâmetros de calibração como parte de um estudo para monitorar os materiais dragados próximo à Praia de Tylers, Virginia utilizando ADCPs. Hamilton et al (1998) compararam os métodos óticos e acústicos, em um estudo descrevendo as medições de sedimentos coesivos utilizando um monitor acústico de sedimentos em suspensão os e Thevenot e Kraus (1993) compararam as metodologias óticas e acústicas utilizando um 2400 kHz BB-ADCP no estuário Chesapeake nos Estados Unidos.

Recentemente, David Byrne e Patino (2001), Land e Jones (2001) e Gartner e Cheng (2001) descreveram as técnicas para previsão de séries temporais de concentração de sólidos em suspensão (CSS) utilizando ADCPs convencionais.

Um panorama teórico e algumas limitações técnicas gerais serão descritas nesta pesquisa, porém na presente discussão foram tratados apenas os aspectos

referentes ao uso dos sensores acústicos para estimar a CSS. A utilização de sensores acústicos multi-freqüência para estimar o tamanho e distribuição dos sólidos em suspensão, está fora do âmbito desta pesquisa.

5.4.1. Princípios gerais

Gartner e Cheng, (2001) citam que os métodos óticos e acústicos de medição permitem uma amostragem contínua das concentrações em uma determinada seção, o que é uma vantagem importante em comparação com os métodos de amostragem mecânica apresentados anteriormente. Apesar de serem baseados em fenômenos físicos diferentes, os equipamentos de amostragem são muito semelhantes quando observados de forma macroscópica devido aos princípios de medição utilizados que podem ser classificados em:

- Transmissão;
- Difusão; e
- Transmissão/Difusão.

5.4.1.1. Transmissão

Nas metodologias e equipamentos de medição que se baseiam no princípio da transmissão, a Fonte e o detector são colocados em direção oposta um ao outro, a uma distância L (Figura 20). As partículas de sedimentos presentes no volume de medição reduzem a intensidade do sinal resultando em uma conseqüente redução no sinal detectado. No princípio da difusão a Fonte e o detector são posicionados em um ângulo (φ) entre si (Figura 21). O detector recebe uma parte da radiação desviada pelas partículas de sedimentos presentes no volume de medição. Uma desvantagem deste método é a não-linearidade da relação entre o sinal emitido e o recebido para grandes concentrações. Uma combinação desses dois métodos da

origem às metodologias/equipamentos que se baseiam na associação da transmissão e espalhamento, como mostra a Figura 22. A vantagem deste método é a linearidade absoluta entre o sinal de saída e a concentração dos sedimentos (GARTNER e CHENG, 2001)

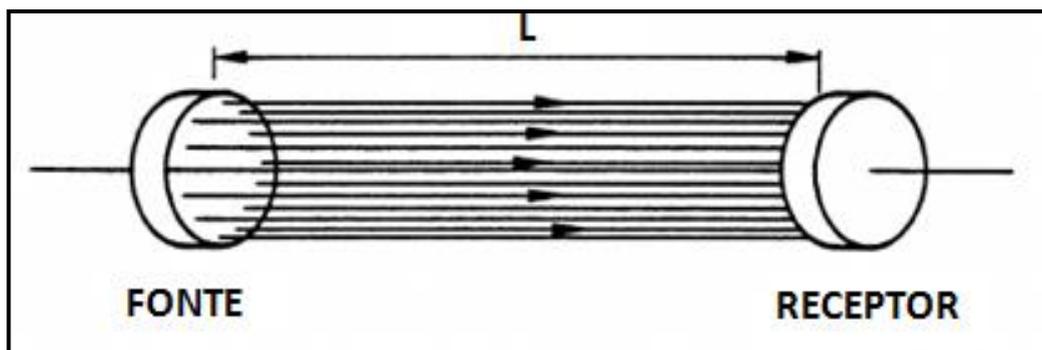


Figura 20 – Princípio da transmissão

Fonte: modificado de Gartner e Cheng, (2001)

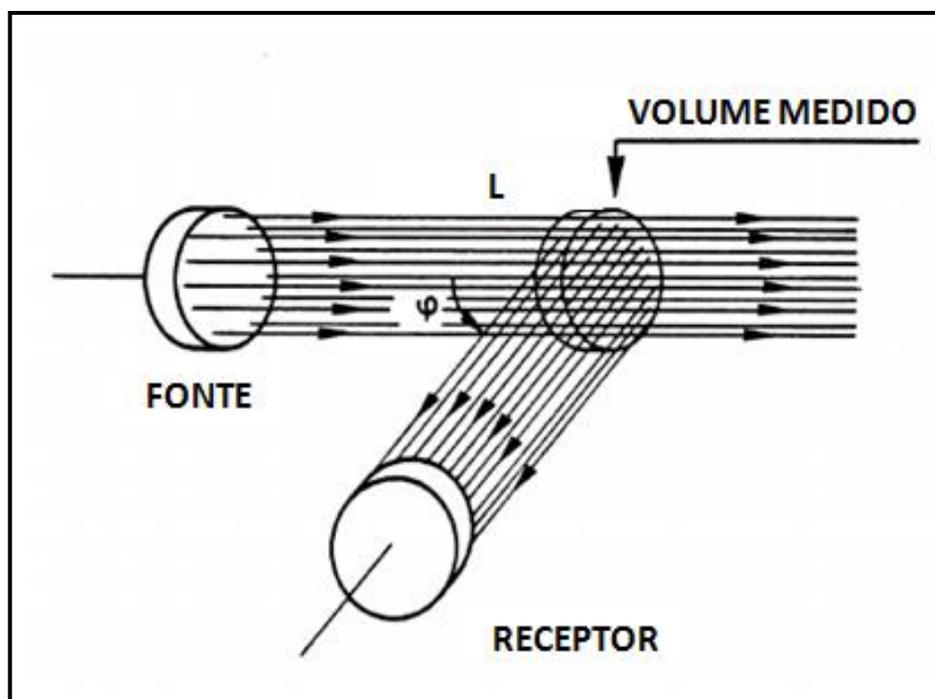


Figura 21 – Princípio do espalhamento

Fonte: modificado de Gartner e Cheng, (2001)

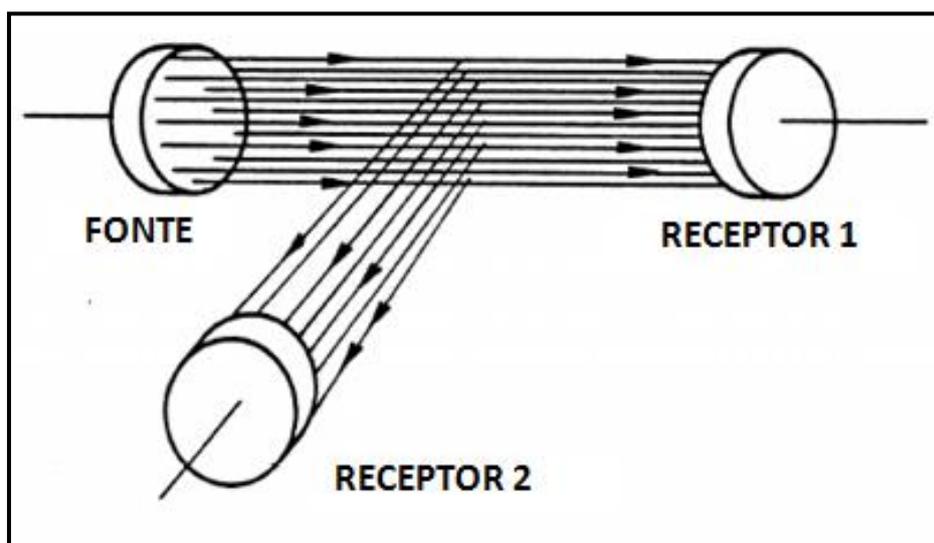


Figura 22 – Princípio da transmissão/espalhamento

Fonte: modificado de Gartner e Cheng, (2001)

5.4.1.2. Calibração

Para todos os equipamentos óticos e acústicos se torna necessário a calibração do método no local de medição para determinação das constantes específicas de cada região. Tais calibrações devem tentar abranger uma vasta gama de velocidades e concentrações minimizando assim possíveis erros nas curvas de ajuste. É importante ressaltar que calibrações periódicas devem ser feitas uma vez que estas constantes podem sofrer alterações com o passar do tempo devido a possíveis variações de temperatura, salinidade e poluição. (THORNE, 1991)

Na prática, os métodos óticos e acústicos de amostragem só podem ser utilizados em combinação com um método mecânico de amostragem para coleta de amostras de sedimento/água para calibração. O erro nas medições de campo pode ser bastante grande por causa de problemas de calibração, especialmente para os amostradores óticos. O principal problema referente a esses erros é a falta de

sincronismo entre a coleta de amostras pelos sensores óticos e mecânicos que pode ser corrigidas quando calibrados em laboratório com amostras de concentrações conhecidas. (KIRBY et al, 1981)

5.4.1.3. Faixa de medição

Para uma amostragem precisa, a resolução do equipamento (comprimento de onda) e dimensão das partículas deve ser da mesma ordem de grandeza. Por isso, os métodos óticos são mais adequados para partículas de silte ($> 50 \mu\text{m}$), uma vez que tais equipamentos possuem um menor comprimento de onda. As experiências em laboratório utilizando amostradores óticos têm demonstrado que a adição de partículas de areia com uma concentração igual ao de concentração silte aumenta o sinal de saída em aproximadamente 10%, o que provoca uma superestimativa na medição (DER KINDEREN, 1982).

Kirby et al. (1981) ressaltaram que a concentração superior limite para os amostradores óticos é de cerca de 25 g/l. Os mesmos autores citaram também que os métodos acústicos são mais adequados para concentrações envolvendo partículas na faixa granulométrica da areia, sendo que o limite máximo de concentração é de aproximadamente 10 g/l.

5.4.1.4. Vantagens

Uma importante vantagem dos amostradores óticos e acústicos citados pelos autores é a medição contínua da concentração dos sedimentos em suspensão. Em combinação com um gravador de dados (datalogger), longos períodos de medição podem ser amostrados continuamente e automaticamente. Quando há pouca variação de concentração de silte na seção de medição, medições em um único ponto podem ser consideradas como representativas de toda a seção transversal.

Nesse caso, o sensor pode ser fixado a uma ponte ou alguma estrutura na margem do rio. A medição local deve ser de fácil acesso para a limpeza periódica do sensor e retirada dos dados. O consumo de energia e manutenção do gravador pode ser minimizado através da utilização de um sistema que ative os equipamentos apenas por curtos períodos de tempo (5 min) em intervalos predefinidos (1 hora), como relatados por Brabben (1981). Outra vantagem do sinal contínuo é a possibilidade de determinar a concentração em uma determinada seção movimentando os sensores do fundo do rio até a superfície (KIRBY et al 1981)..

5.4.2. OBS –“Optical backscatter point sensor”

O OBS é um sensor óptico baseado no princípio da retrodifusão desenvolvido para medir as concentrações de sólidos suspensos e turbidez, a partir da detecção da dispersão da luz infravermelha pelas partículas em suspensão na água, sendo composto de um diodo emissor infravermelhos de alta intensidade (IRED), um detector (quatro fotodiodos) e um transdutor linear de temperatura (DOWNING et al., 1981). A Figura 23 a seguir ilustra uma medição utilizando o sensor OBS. e a Figura 24 mostra o detalhe do sensor.

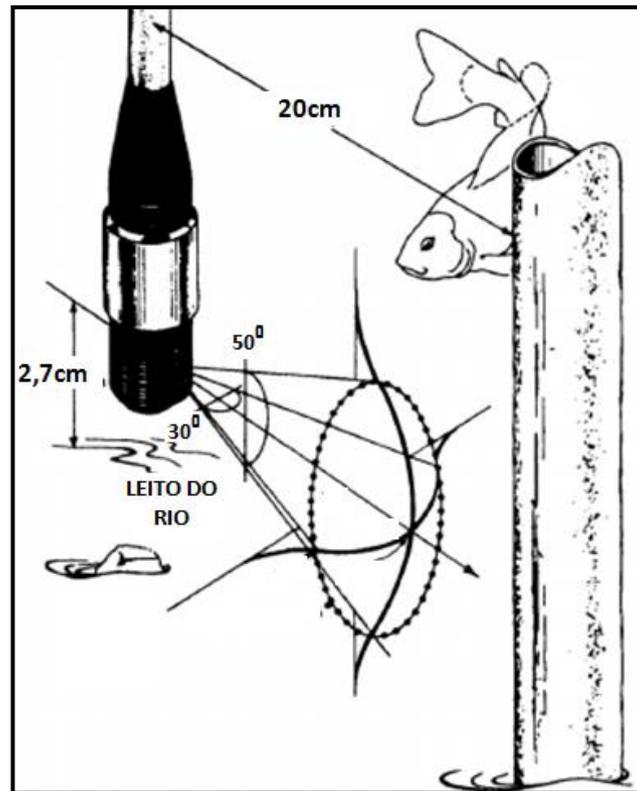


Figura 23 – Sensor OBS

Fonte: modificado de Downing et al., 1981

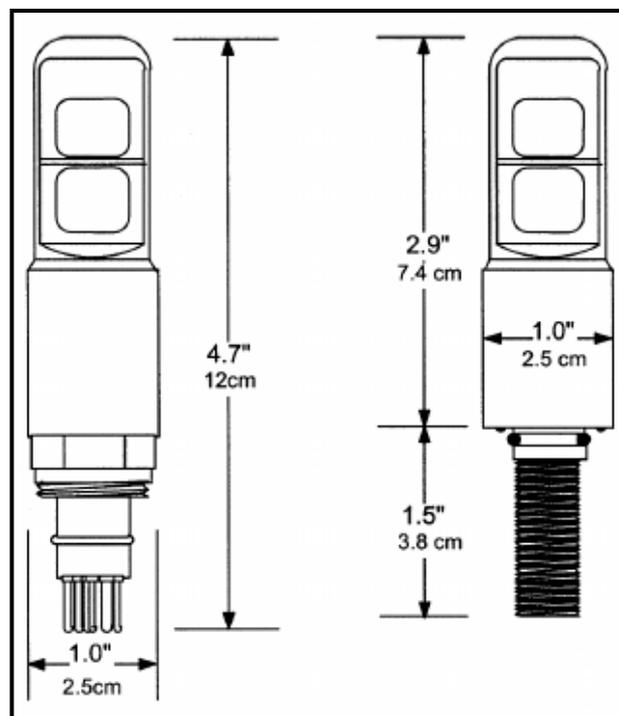


Figura 24 – Detalhe do sensor OBS

Fonte: modificado de Downing et al., 1981

Battisto et al. (1999) citam que a resposta dos sensores OBS depende diretamente do tamanho, composição e forma das partículas em suspensão, sendo que a resposta do equipamento para concentrações de argila de 2 mm é 50 vezes maior do que para a areia de 100 mm de mesma concentração. Dessa forma, cada sensor tem de ser calibrado com amostras de campo para evitar resultados de CSS que podem não coincidir com a realidade local.

Os mesmos autores citam ainda que o OBS mede a radiação infravermelha espalhadas por partículas na água em ângulos variando entre 140° a 165° e que a radiação infravermelha é fortemente atenuada em águas claras (mais de 98% depois de viajar apenas 0,2 m). No entrando a luz solar não interfere em medições feitas em águas rasas.

5.4.2.1. Vantagens e Desvantagens

Segundo Conor e De Visser (1992) as vantagens deste tipo de equipamento referem-se à capacidade de amostrar de pequenos volumes, fornecerem uma resposta linear das concentrações, não sofrer interferência com bolhas de ar e luz ambiente, pode ser aplicado a uma grande faixa de tamanho e concentrações, confiabilidade das medições e baixo custo.

Dentre as desvantagens os mesmos autores citam a necessidade de calibrações constantes devido à correlação do tamanho das partículas com a resposta do aparelho e a imprecisão quando imerso em concentrações de areia menores que 1 g/l

5.5. LISST - Optical Laser diffraction point sensors

Os equipamentos LISST são equipamentos baseados na análise da difusão de um feixe de laser em uma determinada amostra, sendo capazes de medir o tamanho das partículas e concentrações de sedimentos em suspensão, sendo fabricados atualmente pela empresa norte americana Sequoia Inc,(www.sequoiasci.com).

Encontram-se disponíveis atualmente diversos modelos desses equipamentos, dentre eles os submergíveis (LISST-100X, LISST-FLOC, LISST-Deep, LISST-Portable, LISST-ST, LISST-25X e LISST-SL) e os não submergíveis (LISST-Infinite, LISST-Streamside, LISST-EO, LISST-WING) que serão descritos sucintamente a seguir. Detalhes mais específicos de cada equipamento podem ser encontrados no site do fabricante (SEQUOIA, 2008).

Submergíveis:

- **LISST-100X** (Figura 25): é o equipamento multi-parâmetro de difração laser mais utilizado atualmente em campo para análise da dimensão das partículas, distribuição e concentração, sendo também capaz de armazenar os dados referentes à pressão e temperatura do volume amostrado. O referido equipamento é capaz de analisar 32 variações de classes de sedimentos.



Figura 25 - LISST-100X
FONTE Sequoia, (2008)

- **LISST-FLOC** foi desenvolvido para medições de partículas floculentas marinhas;
- **LISST-Portable**: é uma versão compacta que pode ser levada a campo para medições em locais como rios e lagos.
- **LISST-Deep**: desenvolvido para operar em grandes profundidades como em mares e lagos;
- **O LISST-ST**: é uma versão mais completa do LISST-100x, contando com um tubo de queda para análise do tempo de caimento das partículas em suspensão nas amostras. O tubo de queda pode ser removido e o mesmo ser utilizando como LISST-100x com uma pequena queda na qualidade dos dados amostrados;
- **LISST-25X**: desenvolvido para amostrar sedimentos em suspensão em duas faixas predeterminadas (2,5 – 63 e 63-500 microns);
- **LISST-SL**: é uma versão isocinética do LISST-100X, desenvolvido para o monitoramento dos sedimentos em rios proporcionando uma medição em tempo real referente as concentrações de sedimentos e distribuição de partículas nas verticais e em toda a seção de medição.

Não submergíveis:

- **LISST-Infinite**: desenvolvido para monitorar a entrada de sedimentos em afluentes de hidrelétricas a partir do bombeamento de amostras de água em tempo real.
- **LISST-StreamSide**: desenvolvido para monitorar o escoamento superficial em rodovias;
- **LISST-EO**: Desenvolvido para otimizar emulsificadores em indústrias de papel.

5.6. Sensores pontuais acústicos (ASTM, UHCM, ADV)

A Delft Hydraulics (1994) tem desenvolvido equipamentos de medição de transporte de areia acústicos ou ultra-sônicos (ASTM ou USTM) para a medição da velocidade e concentração de areia em um determinado ponto, sendo baseados na transmissão e difusão das ondas sonoras pelas partículas de areia no volume medido. A partir da análise da mudança na amplitude e frequência dos sinais dispersos pela amostra pode se obter de forma simultânea e contínua a concentração, velocidade e conseqüentemente o transporte de partículas de areia em um determinado volume.

A frequência transmissão de 4,5 Mhz, foi escolhida para minimizar o tamanho da partícula e fazer com que o equipamento não colete informações referentes a partículas menores que o silte (50 μm). Ressalta-se também que as influências de variações de salinidade e temperatura são também desprezíveis.

Rijkswaterstaat (2005) apud Schaafsma (1985) fez uma tentativa de usar o retorno de sinal disperso pelo "Acoustic Doppler Velocitymeter" (ADV-Ocean / SONTEK Instruments) em um laboratório simulando as condições de campo, onde os resultados mostraram que existe uma correlação positiva entre a concentração de sedimentos e a sinal disperso pelas partículas e analisado pelo equipamento. Em testes de campo no Estuário Schelt na Noruega, que consistiram em medições de concentrações utilizando o ADV e outro equipamento acústico de medição pontual (ASTM) constatou-se, a partir das análises das concentrações obtidas pelos dois aparelhos, que o ADV não foi capaz de medir concentrações maiores que 500mg/l em virtude de efeitos relativos a saturação de material em suspensão na água. Para concentrações intervalo menor entre 0,1 e 0,5 g/l mostrarem uma pequena não linearidade no comportamento, sendo que as velocidades apresentadas pelos dois

equipamentos apresentaram uma boa correlação. A conclusão geral é que o ADV é potencialmente utilizável medições de concentração e transporte de areia, mas ineficaz na coleta de dados com altas concentrações de sedimento (concentração máxima de cerca de 0,5 g/l), ou tem regiões próximas ao leito dos rios onde as concentrações são maiores

Fugate e Friedrichs (2002) obtiveram sucesso ao utilizar o sinal referente ao retorno da dispersão do ADV (Sontek ADV) para determinar a concentrações na faixa de 20 a 100 mg/l em um sítio na Baía Chesapeake (E.U.A.), provando que o ADV provou ser um instrumento versátil para caracterizar a dinâmica dos sedimentos em suspensão, sendo no entanto incapaz de identificar a diferenças granulométricas no sedimento em suspensão.

5.6.1. Resultados e precisão da ASTM

Segundo Schaafsma e Der Kindren (1986) a imprecisão da medida da velocidade é de cerca de 2% (da escala), o que resulta em uma imprecisão da curva de calibração. A relação entre o sinal de saída (I) e da concentração areia (c) é obtida pela seguinte equação 12

$$I = k \cdot c \quad (12)$$

onde:

- k = constante de calibração em função das propriedades dos transdutores e características das partículas de areia (tamanho; formato).

5.6.1.1. Vantagens e Desvantagens

Desde as vantagens citadas por Schaafsma e Der Kindren destacam-se a rapidez nas medições de velocidade, concentração e transporte, faixa de operação do aparelho (10 a 10.000 mg/l), insensível quanto a variações de temperatura, salinidade e poluição, podendo ser operados facilmente em campo. Dentre as desvantagens encontra-se a necessidade de calibração do equipamento, a fragilidade eletrônica, peso, tamanho e incapacidade de medir partículas de silte

5.6.2. ABS and ADCP -Acoustic backscatter profiling sensor

A utilização de sensores acústicos de análise da difusão do sinal pelas partículas (ADS e ADCP- Figura 26) é uma técnica de medição não invasiva para o acompanhamento do transporte das partículas de sedimentos em suspensão na coluna de água e identificação das alterações nas características no leito dos reservatórios, rios, mares e lagos. Os referidos equipamentos, de maneira geral, possuem um pacote de sensores acústicos, aquisição de dados, armazenamento e controle eletrônico, e um software para extração e tratamento dos dados (Thorne et al 2001)

O princípio básico da abordagem acústica da retro-difusão é a seguinte. Um pulso curto (10 μ s) de energia acústica é emitido por um transdutor de sonar (1 a 5 MHz) e se propaga ao longo da coluna d'água colidindo com os materiais em suspensão, fazendo com que uma parte sinal refletido pelas partículas retorne ao transdutor que passa a atuar como receptor. Com o conhecimento da velocidade de propagação do som na água, da força do sinal retornado pelas partículas em suspensão e das características de propagação do som, pode-se obter uma relação entre a intensidade dos sinais recebidos e as características do material em

suspensão. A magnitude do sinal refletido pode ser relacionada com a concentração dos sedimentos, tamanho das partículas e com o tempo decorrido entre a transmissão e recepção. A intensidade acústica de retorno do sinal refletido em um modelo uniforme de campo é uma função inversa da distância a partir da fonte, sendo necessária uma calibração em suspensões uniformes para se aferir a correlação de atenuação devido à água e as partículas (THORNE e HANES ,2002).

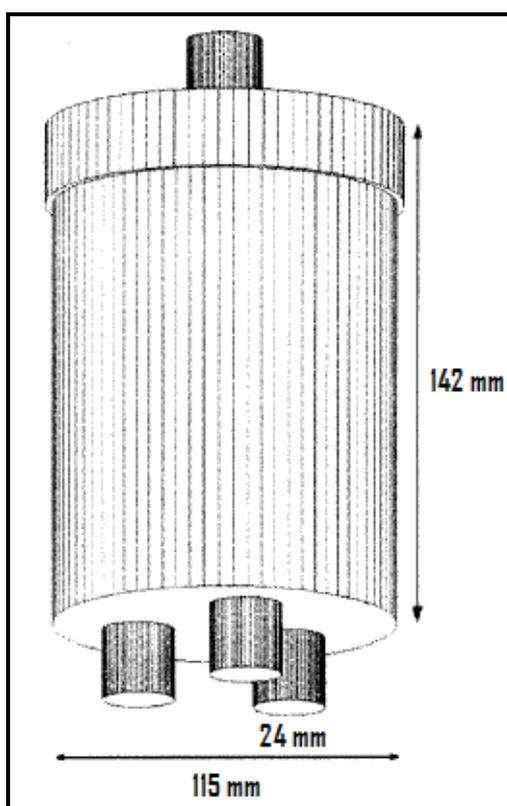


Figura 26 – ABS

FONTE: Modificado de Thorne e Hanes (2002)

Libicki et al. (1989) identificaram duas dificuldades de se estimar a carga suspensa a partir da análise da retro-dispersão dos sinais. Em primeiro lugar, em campo não foi possível medir a atenuação do som causado pelas partículas em suspensão, acarretando em erros em concentrações elevadas de sedimentos. Em

segundo lugar, o aparelho não foi capaz de distinguir as mudanças no tamanho das partículas e distribuição da concentração dos sedimentos. Eles consideram que para analisar a distribuição no tamanho das partículas em uma determinada concentração de sedimentos, seria necessário equipamentos multi-freqüência com limites de superiores as utilizadas anteriormente.

5.6.2.1. Vantagens

Dentre as vantagens citadas por Thorne e Hanes (2002) destacam-se:

- O fato desta metodologia ser não intrusiva e ser capaz de analisar as camadas mais próximas do leito dos rios onde se encontra a maior parte do transporte de areia em suspensão;
- A precisão na determinação dos ciclos de concentrações nos fluxos;
- Capacidade de determinar o tamanho das partículas a partir da utilização de equipamentos multi-freqüências; e
- O fato de poderem ser utilizados em meio ambientes costeiros.

5.6.2.2. Desvantagens

Dentre as desvantagens são citadas:

- A necessidade de calibrações em campo, o que pode ser problemático em meio ambientes costeiros,
- Não adequados para usos em concentrações maiores que 10 g/l; e
- São sensíveis a presença de bolhas de ar nos escoamentos;
- Custo do equipamento.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Não importa o quão precisa se torne a previsão teórica dos processos de sedimentação, é inevitável que as atividades humanas continuem a provocar mudanças nas variáveis que afetam a erosão, transporte e deposição dos sedimentos, havendo assim um aumento na necessidade de medições diretas e indiretas do transporte de sedimentos em rios e de suas características para fornecer dados para a previsão do tipo e magnitude dos problemas.

Nota-se que atualmente o significado direto e indireto dos problemas econômicos associados aos sedimentos fluviais geralmente é ignorado devido ao fato de que a maioria dos processos fluviais está relacionada, ou faz parte, de um fenômeno natural que ocorre muitas vezes de forma despercebida, sendo então desconsiderados durante o processo de avaliação, exceto quando conseqüências graves podem ser facilmente observadas e onde ações corretivas são necessárias. Se o impacto total da erosão nos rios, o movimento dos sedimentos em suspensão nos canais e sua conseqüente deposição nos corpos de água pudesse ser avaliado, o assunto seria notado pela sociedade.

No entanto a quantificação de dados necessários para estimar e minimizar estes problemas envolve medições em campo, que na maioria das vezes são demoradas e envolve um alto custo de aquisição das amostras.

Diante da grande quantidade de equipamentos e metodologias disponíveis atualmente no contexto mundial para coleta de dados referentes ao transporte de sedimentos em rios, os instrumentos mecânicos simples, tais como os do tipo garrafa, armadilha e bombas de amostragem ainda são os mais atraentes devido à sua robustez e facilidade de manuseio, particularmente quando utilizados em locais isolados. A precisão dos parâmetros envolvidos pelos processos de medição pode

aumentar com o número de amostras coletadas, sendo que o custo para a análise de todas as amostras pode ser crítico no que diz respeito ao orçamento disponível para realização de tais estudos.

Por outro lado os equipamentos ópticos e acústicos são atraentes quando se faz necessária a coleta de grandes quantidades de amostras. Contudo, é necessária a calibração prévia de tais equipamentos, uma vez que a qualidade dos dados depende diretamente da precisão/confiabilidade das curvas de calibração, onde para tal devem ser levantadas várias amostras de calibração utilizando um dos métodos mecânicos citados acima.

Diante desta dificuldade, a difração laser (LISST) apresenta um grande avanço tecnológico no contexto de medição do transporte da carga em suspensão in-situ, uma vez que estes instrumentos podem medir o tamanho da partícula e a distribuição da concentração de sedimentos simultaneamente. Uma solução ainda mais atraente é o LISST-ST, que além de possuir um formato hidrodinâmico que melhora sua precisão de amostragem, é também equipado com um sensor de pressão, um medidor de velocidades e um dispositivo para coleta de amostras acima do leito. Dados relativos à velocidade do fluxo são utilizados neste equipamento para controlar a bomba de amostragem (amostragem isocinética). Dados de velocidade e concentração são utilizados para computar fluxos de até 32 classes de tamanho de partículas em medições pontuais, verticais, ou em todo o fluxo da secção transversal, sendo que todos os dados são transmitidos via cabo para o local de medição (medição on-line).

Diante do exposto, conclui-se que a medição dos sedimentos em suspensão é fundamental para os estudos que envolvem o transporte e deposição de sedimentos. Sendo assim, foram apresentadas nesta pesquisa várias técnicas e

equipamentos que têm sido utilizados com diferentes graus de sucesso, incluindo os seus princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens, que poderá servir como material de apoio para profissionais e pesquisadores que tenham a necessidade de escolher uma metodologia ou equipamento para medir sedimentos em suspensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, Y.C. and Pottsmith, H.C. **Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport**. Marine Geology, Vol. 168, p. 89114, 2000.
- Agrawal, Y.C. and Pottsmith, H.C. **Laser Diffraction Method: two new sediment sensors**. Sequoia Inc., USA. Disponível em: <www.sequoiasci.com> Acesso em: 02 nov. 2002.
- Battisto, G.M., Friedrichs, C.T., Miller, H.C. and Resio, D.T. Response of OBS to mixed grain size suspensions during Sandy Duck'97. Coastal Sediment Conference 99, ASCE, New York. pp. 297312, 1999
- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F.. **Conservação do Solo**. 1^a ed. Piracicaba: Livroceres, 1985, 392p.
- Beschta, R.L., 1981. **Increased Bag Size improves HelleySmith Bed Load Sampler for Use in Streams with High Sand and Organic Matter Transport**. Symposium Erosion and Sediment Transport Measurement, Florence, Italy
- Blacke, A. C.; Chadwick, D. B.; White ,P. J.; Jones, C. A. (2004) – **“Interim Guide for assessing sediment transport at navy facilities”** – SPAWAR Systems Center – San Diego CA.
- Bloesch, J.; Burns, N.M . **A Critical Review of Sedimentation Trap Technique. Schweiz**. Z. Hydrol. 42, No. 1, p. 1555, 1980.
- Brown, C. B., 1948, Perspective on sedimentation-purpose of conference in Proc. of Federal Inter-Agency Sedimental ion Conf., Denver, Colo., 1947 : U.S. Bur. Reclamation, p. 307.
- Byrne, J. B. and Eduardo Patino, 2001. Feasibility of using acoustic and optical backscatter instruments for estimating total suspended solids concentrations in estuarine environments, Proceedings: 7th Fed. Interagency Sed. Conf., Reno, NV, p III-135-III-138.
- Cabral, J. B. P. **Análise da sedimentação e aplicação de métodos de previsão para a tomada de medidas mitigadoras quanto ao processo de assoreamento no reservatório de Cachoeira Dourada GO/MG**. 2006. 253p Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- Carey, P. Variability in Measured Bedload Transport Rates. **Water Resources Bulletin**, Vol. 21, n. 1,1985.
- Carvalho, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372p.
- Carvalho, N.O; Fisiola Junior, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios**. Brasília: Dupligráfica, 2000. 132p
- Carvalho, N.O; Fisiola Junior, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. Brasília: Dupligráfica, 2000. 154p.

Colby, B. R. Fluvial sediments-a summary of source, transportation deposition, and measurement of sediment discharge. **U.S. Geol. Survey Bull.** V 1181-A, 47 p, 1963.

Connor, C.S. and De Visser, A.M. A laboratory investigation of particle size effects of an optical backscatterance sensor. **Marine Geology**. v. 108, p. 151-159, 1992.

Cook, H. L. The nature and controlling variables of the water erosion process. **Soil Sci. Soc. America Proc.**, v. 1, p. 487 – 494, 1936.

Corrêa Filho, C. R.; Albertin, L. L.; Mauad, F. F. Determinação dos polinômios Cota X Área X Volume utilizando a sonda Acoustic Doppler Profile (ADP) no reservatório de Barra Bonita – SP. **Revista Minerva**, São Carlos, Vol. 2, No 1. p.79-90. 2005.

Crickmore, M.J. and Aked, R.F., 1975. Pump Sampler for Measuring Sand Transport in Tidal Waters Conference on Instrumentating Oceanography, I.E.R.E., Conference Proceeding No. 2, Bangor, England

Delft Hydraulics, 1958. Calibration of BTMA (in Dutch) Report M6Q11, The Netherlands

Delft Hydraulics, 1980. Investigation Vlissingen Bottle (in Dutch). M1710. Delft, The Netherlands

Delft Hydraulics, 1991. Delft Nile Sampler, Bed Load Transport Measurements in the River Waal. Report Q1300 part 1, Delft, The Netherlands

Delft Hydraulics, 1992. Bed Load Transport Measurements in the Waal River near Woudrichem and Druten. Report Q1300 part 2 and 3, Delft, The Netherlands

Der Kinderen, W.J.G.J., 1982. Silt Concentration Meters (in Dutch). Delft Hydraulics Laboratory, Report M1799 I, Delft, The Netherlands

De Vries, M., 1973. On Measuring Discharge and Sediment Transport in River Flow. Delft Hydraulics Laboratory, Publication No. 106, The Netherlands

Dijkman, J., 1978. Some Characteristics of the USP61 and Delft Bottle. Delft University of Technology, Dep. of Civ. Eng., Int. Report No. 578, The Netherlands

Dijkman, J., 1981. Investigation of Characteristic Parameters of Delft Bottle. Delft Hydraulics Laboratory, Report S362, The Netherlands

Dijkman, J. and Milisic, V., 1982. Investigations on Suspended Sediment Samplers. Delft Hydraulics Laboratory and Jaroslav Cerni Institute, Report S410, The Netherlands

Downing, Andrew, Thorne, P. D., Vincent, C. E. Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer, **J. Acoustical Society of America**, v 97 (3), pp. 1614-1620, 1995

Edwards, T. K.; Glysson, G. D. (1998). Field Methods for Measurement of Fluvial sediment” In: Applications of hydraulics. USGS. Techniques of Water Resources

Investigations of the United States Geological Survey . TWRI 3 – C2. Arlington. VA. 89p.

Emmett, W.W., 1980. A Field Calibration of the Sediment Trapping Characteristics of the HelleySmith Bed Load Sampler. Geological Survey Professional Paper 1139, Washington, USA

Eyster, C.L. and Mahmood, K., 1976. Variation of Suspended Sediment in Sand Bed Channels River Sedimentation, Vol. II, Fort Collins, USA

Flagg, C. N., Smith, S. L. On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance, **Deep-Sea Res.**, v. 36, n. 3, pp. 455-474, 1989.

FISP, 1993. Federal Interagency Sedimentation Project” Determination of Fluvial Sediment Discharge Report no. 14, St. Anthony Falls Hydr. Lab., Minneapolis, USA

Fisp, 2003. Proceedings of the Federal Interagency Sediment Monitoring Instrument and Analysis Research Workshop, September 9-11, 2003, Flagstaff, Arizona)

Gardner, W. D. Sediment Trap Dynamics and Calibration. **Journal of Marine Research.** Vol. 38, n. 1, p. 1639, 1980.

Gartner, J. W. and Cheng, R. T., 2001. The promises and pitfalls of estimating total suspended solids based on backscatter intensity from acoustic Doppler current profilers, Proceeding: 7th Fed. Interagency Sed. Conf., Reno, NV, p III-119-III-126.

Gartner, J. W. e Gray, J. R. (2003) – “Summary of Suspended-Sediment Technologies Considered at the Interagency Workshop on Turbidity And Other Sediment Surrogates”, Extended Abstracts of U.S. Geological Survey Circular 1276, Proceedings of the Federal Interagency Sediment Monitoring and Instrument Analysis Workshop, September 9-11, 10p

Gray, J. R., Gooding, D.J., Melis, T. S., Topping, D. J.; Rasmussen, P. P. (2003), “U.S. Geological Survey suspended-sediment surrogate research, Part II: Optic technologies”, Proceedings of the Virginia Water Research Conference, Virginia Tech October 8-10,, Blacksburg, 7 p.

Guy, H. P. (1970). Fluvial Sediment Concepts”. In: Applications of hydraulics. USGS. Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey . TWRI 3 - C1. Arlington. VA. 55p.

Hamilton, L. J., Shi, Z., Zhang, S. Y. Acoustic backscatter measurements of estuarine suspended cohesive sediment concentration profiles. **J. Coastal Res.** V. 14(4), pp. 1213-1224, 1998.

Hayes, F.Ch., 1978. Guidance for Hydrographic and Hydrometric Surveys. Delft Hydraulics Laboratory, Publication No. 200, The Netherlands

Helley, E.J. and Smith, W., 1971. Development and Calibration of a PressureDifference Bed Load Sampler. U.S. Geological Survey Open File Report, Washington, USA

Heywood, K. J., Scrope-Howe, S, Barton, E. D. Estimation of zooplankton abundance from shipborne ADCP backscatter, **Deep-Sea Research**. v. 38. n. 6, pp. 677-691, 1991.

Horton, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol. Sot. America Bull.** v. 56, p. 275-370, 1945.

Hubbell, D. W., Stevens, H. H., Skinner, J. V. and Beverage, J. P. New Approach to Calibrating Bed Load Samplers. **Journal of Hydraulic Engineering**. v.111, n. 4, 1985.

Kirby, R. and Parker, W.R. The Behaviour of Cohesive Sediment in the inner Bristol Channel and Severn Estuary. Institute Oceanographic Sciences, Report No. 117, Taunton, 1981.

Kleinhans, M.G. and Ten Brinke, W.B.M. Accuracy of crosschannel sampled sediment transport in large sandgravelbed rivers. **Journal of Hydraulic Engineering**. Vol.127, n.4, p. 258-269, 2001.

Kraus, N. C. Application of Portable Traps for Obtaining Point Measurements of Sediment Transport Rates in the Surf Zones. **Journal of Coastal Research**. Vol. 3, n. 2, 1987.

Land, J. M.; Jones, P. D., 2001. Acoustic measurement of sediment flux in rivers and near-shore waters, Proceeding: 7th Fed. Interagency Sed. Conf., Reno, NV, p III-127-III-134.

Libicki, C., Bedford, K.W., and Lynch, J.F. The interpretation and evaluation of a 3-Mhz acoustic backscatter device for measuring benthic boundary layer sediment dynamics. **Journal of the Acoustical Society of America**, 85 (4), p. 1501-1511, 1989.

Lima, J. E. F. W.; Santos, P. M. C.; Carvalho, N. O.; Silva, E. M. (2003) – “Fluxo De Sedimentos Em Suspensão Na Bacia Araguaia-Tocantins”, XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba – PR.

Lohrman, A.; Huhta, C.. Plume measurement system (Plumes) calibration experiment, dredging Research program. Washington: Technical Report DRP-94-3, US Army Corps of Engineers, 1994,152 p.

Nelson, M. E.; Benedict, P. C. Measurement and Analysis of Suspended Sediment Loads in Streams. **A.S.C.E.-Proceedings**, v. 76,1950.

Paiva, J. B. D.; Paiva, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 628p.

Paiva, J, M, O. **Sedimentação de reservatórios de barragens**. 1993. 1009f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

PALMIERI, A.; SHAH, F. DINAR, A. Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. **Journal of Environmental Management**. Volume 61, p.149-163, 2000.

Raudkivi, A. J. **Sedimentation** – Exclusion and removal of sediment from diverted water. Netherlands: IAHR & A. A. Balkema, 1993. 161p.

Schaafsma, A.S.; Der Kinderen, W., 1985. Ultrasonic Instruments for the Continuous Measurement of Suspended Sand Transport. IAHRsymposium Measuring Techniques, Delft, The Netherlands.

Selley, R. C. Applied Sedimentology. Academic Press. 1992. 523p.

SEQUOIA. **Sequoia – research and products for environmental Science**. Disponível em:<<http://www.sequoiasci.com/>>. Acesso em: 25 fev. 2008

Schott, F. e, Johns, W.. Half-year-long measurements with a buoy-mounted acoustic Doppler current profiler in the Somali Current. **J. Geophys. Res.** v. 92, n. C5, pp. 5169-5176. 1987.

Schott, F.; Johns, W.E. Meandering and transport variations on the Florida current. *Journal of Phys. Oceanogr.* v.17, n.8, p.1128-1147, 1987

Simons, D.B.; Senturk, F. Sediment transport technology: Water and sediment dynamics. Denver, Colorado, **Water Resources Publications**. 897p. 1992.

Sternberg, R. Damming the river: a changing perspective on altering nature. **Journal of Renewable & Sustainable Energy Reviews**. V 10, Issue3, p.165-197, 2006.

TEIXEIRA, F.J. Avaliação do Assoreamento do reservatório de Barra Bonita, Rio Tietê/SP, utilizando comparação de mapas batimétricos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 99p, 2008.

Thorne, P.D.; Hanes, D.M. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. **Continental Shelf Research**. v. 22, p. 603-632, 2002.

Thevenot, M. M.; Kraus, N. C. Comparison of acoustical and optical measurements of suspended material in the Chesapeake Estuary. **Gordon and Breach Science Publishers**. v. 1, pp. 65-79, 1993.

Thevenot, M. M., Prickett, T. L., Kraus, N. C. **Tylers Beach, Virginia, dredged material plume monitoring project 27 September to 4 October 1991**. Washington: Dredging Research Program Technical Report DRP-92-7, US Army Corps of Engineers, 1992 204 p..

Thorne, P. D., Vincent, C. E., Harcastle, P. J., Rehman, S., Pearson, N., Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. **Elsevier Science Publishers**. v. 98, pp. 7-16, 1991.

Van Rijn, L.C. Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, No. 11, 1984.

Van Rijn, L. C. (2005); MANUAL SEDIMENT TRANSPORT MEASUREMENTS, 500p

Van Rijn, L.C.; Gaweesh, M. A New Total Load Sampler. **Journal of Hydraulic Engineering**, Vol.118, N. 12, 1992.

Vries, M. de, 1973. On Measuring Discharge and Sediment Transport in River Flow. Delft Hydraulics Laboratory, Publication No. 106, The Netherlands

Ward, A. D.; Elliot, W. J. **Environmental Hidrology**. New York: Lewis Publishers, 1995. 462p.

Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. **Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning**. Washington: USDA, 1978. 58p.