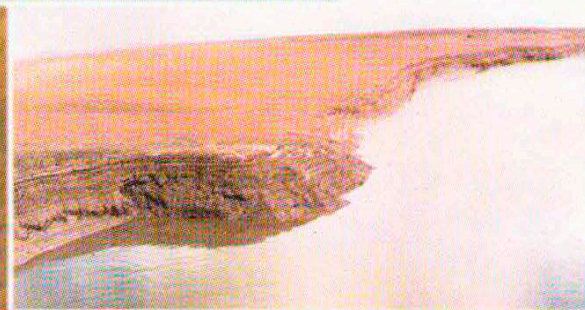


Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios





AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
- Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas -

GUIA DE AVALIAÇÃO DE ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS

*Newton de Oliveira Carvalho
Naziano Pantoja Filizola Júnior
Paulo Marcos Coutinho dos Santos
Jorge Enoch Furquim Werneck Lima*

Brasília, DF – 2000

Ficha catalográfica do documento original:

CARVALHO, N.O; FILIZOLA JÚNIOR, N.P; SANTOS, P.M.C;
LIMA, J.E.F.W. *Guia de avaliação de assoreamento de
reservatórios*. Brasília: ANEEL. 2000. 140p.

ERRATA

Algumas correções foram feitas na presente edição do GUIA DE AVALIAÇÃO DE ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIO, correspondendo a problemas de digitação cuja verificação poderia ser notada pelo leitor.

No entanto são assinaladas aqui as seguintes correções como de importância:

- Item 8.2 Caso de Pequenos Reservatórios: a Figura 8.2, curva de Churchill apresentada por Vanoni e Strand, é destinada ao sistema de unidades inglesas. Assim o texto acima da figura fica:
 - *Período de retenção* = volume do reservatório (ft³) dividido pela vazão média diária (ft³/s) durante o período de estudo;
 - *Velocidade média no reservatório* = vazão média diária (ft³/s) dividida pela área da seção transversal média (ft²). A área da seção transversal média pode ser determinada pela divisão do volume do reservatório (ft³) pelo seu comprimento (ft).
- Item 9.1 Calculado - Peso específico aparente dos depósitos: fórmulas de obtenção do peso específico aparente –

$$\gamma_T = \gamma_i + K \cdot \log T \quad \text{para camadas de depósitos específicos}$$

$$\gamma_T = \gamma_i + 0,4343 \cdot K \left[\frac{T}{T-1} (\ln T) - 1 \right] \quad \text{para valor médio das camadas}$$

Apresentação

Em um país como o Brasil, que possui mais de 90% de sua matriz de geração de energia elétrica composta por fontes hídricas e, ainda, com um grande potencial de crescimento, é fundamental o aprofundamento de estudos relacionados à preservação dos aproveitamentos hidrelétricos existentes e à análise da viabilidade de novos empreendimentos desta natureza.

O Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios vem ao encontro da necessidade de uma melhor orientação para estudos do impacto dos sedimentos carreados pelos cursos d'água aos reservatórios neles instalados. Neste sentido, esta obra tem o intuito de colaborar com o planejamento e os estudos referentes à viabilidade de construção e operação de reservatórios.

De forma a subsidiar os estudos de avaliação de assoreamento de reservatórios, foco principal deste material, este guia ainda fornece conceitos e informações sobre técnicas de medição do fluxo de sedimentos e formas de mitigação dos problemas por eles gerados.

Diante do exposto, é com grande satisfação que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) vem disponibilizar para o público o resultado deste trabalho de grande valor para o setor elétrico e aos diversos interessados na gestão de recursos naturais no país.

Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas
Superintendente de Estudos e Informações Hidrológicas
SIH/ANEEL

GUIA DE AVALIAÇÃO DE ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS

SUMÁRIO

1.	Introdução	5
2.	Ocorrências de reservatórios assoreados no país	7
3.	Deposição dos sedimentos no reservatório	9
4.	Importância do estudo de avaliação do assoreamento	11
	4.1 Fase de inventário dos aproveitamentos	12
	4.2 Fases de viabilidade e de projeto básico	12
	4.3 Fase de operação do aproveitamento	13
5.	Fatores que afetam a produção de sedimentos	14
6.	Avaliação do assoreamento do reservatório	15
	6.1 Dados do reservatório	15
7.	Determinação da produção de sedimentos	16
	7.1 Avaliação da erosão	17
	7.2 Planejamento da rede de postos sedimentométricos	17
	7.3 Instalação do posto e frequência de medição	18
	7.4 Métodos de medição	19
	7.4.1 Amostragem de sedimento	25
	7.4.2 Análises de laboratório	27
	7.4.3 Cálculo da descarga sólida	29
	7.5 Processamento dos dados	33
	7.5.1 Medições contínuas, horárias e diárias	33
	7.5.2 Medições eventuais	34
	7.5.3 Regionalização de dados	38
8.	Eficiência de retenção de sedimentos em um reservatório	41
	8.1 Caso de médios e grandes reservatórios	41
	8.2 Caso de pequenos reservatórios	41
9.	Peso específico aparente dos depósitos	45
	9.1 Calculado	45
	9.2 Medido	47

9.3 Estimado	47
10.Previsão do assoreamento de um reservatório	48
10.1 Métodos de avaliação do assoreamento	48
10.2 Avaliação do assoreamento total e do volume morto	49
10.3 Avaliação da vida útil de um aproveitamento	50
10.4 Distribuição dos sedimentos no reservatório	50
10.5 Aumento da erosão na bacia	50
11. Medição do assoreamento de um reservatório	54
11.1 Finalidades do levantamento	54
11.2 Frequência de levantamentos	55
11.3 Métodos de levantamento	56
11.3.1 Levantamento do contorno do reservatório	56
11.3.2 Levantamento topo-batimétrico	57
11.4 Especificações de levantamentos topo-batimétricos.....	62
11.5 Mapeamento do leito	64
11.6 Cálculo dos volumes de água	65
11.7 Cálculo do volume de sedimento depositado	69
11.8 Traçado das novas curvas cota x área x volume	70
11.9 Cone de dejeção de sedimentos	70
11.10 Varredura do leito e geofísica	71
12. Controle do assoreamento de um reservatório	73
12.1 Controle preventivo	73
12.2 Controle corretivo	74
12.2.1 Despejo de sedimentos dragados	75
13 Efeitos secundários devido aos sedimentos	77
13.1 Efeitos do remanso do reservatório	77
13.2 Mudanças na qualidade da água	78
13.3 Efeitos ecológicos	78
13.4 Erosão nas margens do reservatório	78
13.5 Erosão do depósito	
13.6 Efeitos a jusante da barragem	78
13.6.1 Degradação do canal	80
13.6.2 Descarga dominante	81
13.6.3 Características hidráulicas do canal	82
13.6.4 Método da degradação limitada pela armadura	82
13.6.5 Método da degradação limitada por declividade estável	86
13.7 Estudos de reservatório com auxílio de imagem de satélite	89
13.8 Controle de erosão no canal de jusante	90
Bibliografia (consultada e complementar)	91
Glossário de termos, símbolos e unidades	98

1. INTRODUÇÃO

A construção de uma barragem e a formação do seu reservatório normalmente modificam as condições naturais do curso d'água. Em relação ao aspecto sedimentológico, as barragens geram uma redução das velocidades da corrente provocando a deposição gradual dos sedimentos carregados pelo curso d'água, ocasionando o assoreamento, diminuindo gradativamente a capacidade de armazenamento do reservatório e podendo vir a inviabilizar a operação do aproveitamento, além de ocasionar problemas ambientais de diversas naturezas.

Os danos ambientais e econômicos devido à acumulação de sedimentos nos reservatórios podem ser grandes e de extrema dificuldade de remediar, particularmente em regiões áridas e semi-áridas (ICOLD, 1989). Indiferente ao tamanho do reservatório, este Guia procura tratar o problema de uma maneira simples e objetiva, mostrando as condições críticas que poderão ocorrer.

É certo que o reservatório pode sofrer um assoreamento indesejável, sendo isso um caso a estudar em cada aproveitamento. Os pequenos lagos estão sujeitos a um assoreamento rápido, o que pode acontecer até mesmo numa única enchente (Carvalho/Guilhon/Trindade, 2000). Já os grandes reservatórios demandam um maior tempo para ficarem assoreados. Aqui no Brasil pode-se citar os reservatórios de Itaipu, Itá, Sobradinho e Tucuruí cujo tempo de assoreamento total avaliado para cada reservatório pode ultrapassar 1000 anos. No entanto, em tempo muito menor, 20 a 30 anos, os depósitos na região do remanso, área do delta, já poderão estar prejudicando atividades como a de navegação. Além disso, depósitos finos nas margens podem criar condições de crescimento de plantas macrófitas que irão, certamente, se deslocar para perto da barragem e mergulhar pelos condutos, prejudicando a geração de energia.

Um afluente ao reservatório que esteja escoando próximo à barragem ou às instalações pode afetar a geração ou outras finalidades em um tempo menor que o previsto. Os casos de assoreamento têm se multiplicado com o aumento da erosão nas bacias hidrográficas, assim, é sempre prudente que seja efetuado o estudo sedimentológico em todos os aproveitamentos com formação de reservatório. Qualquer que seja o caso, a avaliação feita na fase de planejamento do aproveitamento deve ser verificada com um monitoramento sedimentométrico, o que inclui operação de postos de medida e o levantamento topo-batimétrico. Estes estudos deverão ser acompanhados paralelamente aos de meio-ambiente.

Os processos da sedimentação podem ser complexos. Os sedimentos transportados pelo sistema fluvial são primeiramente depositados devido à redução de velocidade da água no reservatório. À medida que os sedimentos se acumulam no lago, a capacidade de armazenamento de água do mesmo vai diminuindo. Enquanto uma contínua deposição ocorre, há uma distribuição de sedimentos nos reservatórios cuja forma é influenciada pela operação e também pela ocorrência de grandes enchentes responsáveis por carregamento de muito sedimento. Quando a vida útil do aproveitamento é afetada pelos depósitos, então são necessário mudanças na operação do reservatório ou outras

medidas que procurem remediar o problema (ICOLD, 1989). Outros efeitos podem ser citados como, por exemplo, aqueles a montante da área de remanso que ficam sujeitos a enchentes mais constantes e também aqueles a jusante da barragem cuja calha de rio sofre erosão devido à falta de sedimentos no escoamento e devido à atenuação das enchentes e regularização do curso d'água.

O presente Guia procura definir e estudar as características diretamente relacionadas ao planejamento e projeto de novas barragens bem como a operação daquelas existentes através do estudo da produção de sedimentos, do assoreamento do reservatório, do controle de sedimento e dos efeitos secundários. Problemas dessa natureza até o momento não têm sido adequadamente tratados no país devido à falta de tradição desses estudos. Imagina-se que a experiência adquirida com o tempo, trará boas contribuições e motivações para que o estudo seja tratado de forma disciplinar.

2. OCORRÊNCIAS DE RESERVATÓRIOS ASSOREADOS NO PAÍS

O estudo sedimentológico é particularmente importante para o Brasil em razão dos sistemas elétricos do país serem predominantemente hidráulicos. Atualmente, mais de 90% da energia elétrica por nós consumida provêm de fontes hidráulicas, cujo papel de destaque deverá se manter ao longo das próximas três ou quatro décadas. Apesar disso, verifica-se que estudos sedimentológicos não alcançam a profundidade adequada ou ficam incompletos. Estudos hidrológicos referentes ao regime dos rios, determinação da série de vazões e outros afins geralmente são efetuados de forma adequada, enquanto estudos sedimentológicos, na sua maioria, são realizados de forma incompleta. Atribui-se a isso o fato de que a maior parte da geração de energia no país é feita por grandes reservatórios cujos problemas de assoreamento são considerados de pequena importância a curto e médio prazo para a geração (Almeida e Carvalho, 1993).

Um estudo do Banco Mundial (Mahmood, 1987) mostrou que a vida útil média dos reservatórios existentes em todos os países no 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. Ficou demonstrado também que a perda média anual de volume dos reservatórios devido ao depósito de sedimentos era de 1%, sendo variável de país para outro, bem como de região para outra. A partir de estudo realizado pela Eletrobrás/IPH (1994) pode-se concluir que a perda anual de capacidade de armazenamento dos reservatórios do nosso país é de aproximadamente 0,5% ~~ou um pouco mais nestes anos~~ (Carvalho, 1994). Essa taxa pode corresponder a perdas de capacidade de armazenamento 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.). Por outro lado, constata-se que a erosão no país tem aumentado com o crescimento da população e do uso do solo.

O Brasil já possui muitos reservatórios total ou mesmo parcialmente assoreados. O assoreamento visível normalmente é a menor parte do depósito, podendo-se dizer que é a ponta do *iceberg*. Por falta de levantamentos sistemáticos e de sua divulgação, não se conhece a situação dos reservatórios do país. A Tabela 2.1 mostra uma lista de reservatórios parcial ou totalmente assoreados baseado em informações coletadas por Carvalho (1994 e 1998).

Tabela 2.1 – Alguns reservatórios no Brasil parcial ou totalmente assoreados (Carvalho, 1994 e 1998)

Aproveitamento	Curso d'água	Proprietário	Tipo
Bacia do Tocantins			
Itapecuruzinho	Itapecuruzinho	CEMAR	UHE, 1,0 MW
Bacias do Atlântico Norte			
Limoeiro	Capibaribe	DNOS	Controle de cheias

Bacia do São Francisco

Rio de Pedras	Velhas	CEMIG	UHE, 10 MW
Paraúna	Paraúna	CEMIG	UHE, 30 MW
Pandeiros	Pandeiros	CEMIG	UHE, 4,2 MW
Acabamundo	Acabamundo	DNOS	Controle de cheias
Arrudas	Arrudas	DNOS	Controle de cheias
Pampulha	Pampulha	SUDECAP	Controle de cheias

Bacias do Atlântico/Leste

Funil	Contas	CHESF	UHE, 30 MW
Pedras	Contas	CHESF	UHE, 23 MW
Candengo	Una, BA	CVI	UHE, -
Peti	Santa Bárbara	CEMIG	UHE, 9,4 MW
Brecha	Piranga	ASCAN	UHE, 25 MW
Piracicaba	Piracicaba	B.-MINEIRA	UHE, -
Sá Carvalho	Piracicaba	ACESITA	UHE, 50 MW
Dona Rita	Tanque	-	UHE, 2,41 MW
Madeira Lavrada	Santo Antônio	CEMIG	Armazenamento
Guanhães	Guanhães	CEMIG	Armazenamento
Tronqueiras	Tronqueiras	-	UHE, 7,87 MW
Bretas	Suaçuí Pequeno	-	-
Sinceridade	Manhuaçu	CFLCL	UHE, 1,416 MW
Mascarenhas	Doce	ESCELSA	UHE, 120 MW
Areal	Areal	CERJ	UHE, -
Paraitinga	Paraitinga	CESP	UHE, 85 MW
Ituerê	Pombas	CFLCL	UHE, 4,0 MW
Funil	Paraíba do Sul	FURNAS	UHE, 216 MW
Jaguari	Jaguari	CESP	UHE, 27,6 MW
Una	Una, SP	PM Taubaté	Abastec. D'água

Bacia do Paraná

Pirapora	Tietê	-	-
Caconde	Pardo	CESP	UHE, 80,4 MW
Euclides da Cunha	Pardo	CESP	UHE, 108,8 MW
Americana	Atibaia	CPFL	UHE, 34 MW
Jurumirim	Paranapanema	CESP	UHE, 22 MW
Piraju	Paranapanema	CPFL	UHE, 120 MW
Pres. Vargas	Tibaji	Klabin	UHE, 22,5 MW
Poxoréu	Poxoréu	CEMAT	UHE, -
São Gabriel	Coxim	ENERSUL	UHE, 7,5 MW
Rib. Das Pedras	Descoberto	CAESB	Abastec. D'água
São João	São João	ENERSUL	UHE, 3,2 MW

Bacia do Uruguai

Caveiras	Caveiras	CELESC	UHE, 4,3 MW
Silveira	Santa Cruz	CELESC	UHE, -
Celso Ramos	Chapecozinho	CELESC	UHE, 5,76 MW
Furnas Segredo	Jaguari	CEEE	UHE, -

Bacias do Atlântico/Sudeste

Santa Cruz	Tacanica	CCPRB	UHE, 1,4 MW
Piraí	Piraí	CELESC	UHE, 1,37 MW
Ernestina	Jacuí	CEEE	UHE, 1,0 MW
Passo Real	Jacuí	CEEE	UHE, 125 MW

3. DEPOSIÇÃO DOS SEDIMENTOS NO RESERVATÓRIO

O curso d'água, ao entrar no reservatório, tem as áreas de seções transversais aumentadas, enquanto as velocidades da corrente decrescem, criando condições de deposição de sedimento. As partículas mais pesadas, como pedregulhos e areias grossas, são as primeiras a se depositar enquanto o sedimento mais fino adentra ao reservatório. A barragem constitui um impedimento à passagem da maior parte das partículas para jusante, o que pode ocorrer com o escoamento pelo vertedouro e pelos condutos.

À medida que o assoreamento cresce, a capacidade de armazenamento do reservatório diminui, a influência do remanso aumenta para montante, as velocidades no lago aumentam e maior quantidade de sedimentos passa a escoar para jusante, diminuindo a eficiência de retenção das partículas.

Sedimentos que se depositam pela influência do reservatório se estendem para montante e para jusante, não se distribuindo uniformemente mesmo dentro do lago. A deposição de montante se denomina **depósito do remanso** (*backwater deposit*), em referência ao fenômeno hidráulico, sendo também remontante à medida que aumentam os depósitos nessa área. As deposições de dentro do reservatório são chamadas de **delta** (*delta*), **depósito de margem** (*overbank*) e **depósito do leito** (*bottom-set deposit*). O delta se forma com sedimentos grossos, enquanto os depósitos do interior, com sedimentos mais finos (Mahmood, 1987). As enchentes produzem outro tipo de deposição, ocorrendo ao longo do curso d'água e do reservatório, formado por sedimentos finos e grossos e que é denominado **depósito de várzea** ou **depósito de planície de inundação**.

Esses depósitos causam diferentes impactos ou conseqüências. Os depósitos de remanso criam problemas de enchentes a montante. Os depósitos do interior do lago causam a redução da capacidade de armazenamento, sendo que a variação do nível d'água condicionará a formação do delta. Enquanto a maior parte dos depósitos do delta reduzem gradualmente a capacidade útil do reservatório, os depósitos do leito reduzem o volume morto. Parte do delta também fica contida no volume morto. Os sedimentos que alcançam a barragem e passam pelo vertedouro e condutos, provocam abrasões nas estruturas, comportas, tubulações, turbinas e outras peças.

A jusante, a água limpa, sem sedimentos, bem como a modificação do regime de vazões, provocarão erosões de leito e margens do canal, ou mesmo, grandes escavações que podem evoluir para montante e prejudicar a estrutura da barragem.

A Figura 3.1 ilustra esquematicamente a formação dos depósitos devido à existência do reservatório, bem como indica os principais problemas decorrentes.

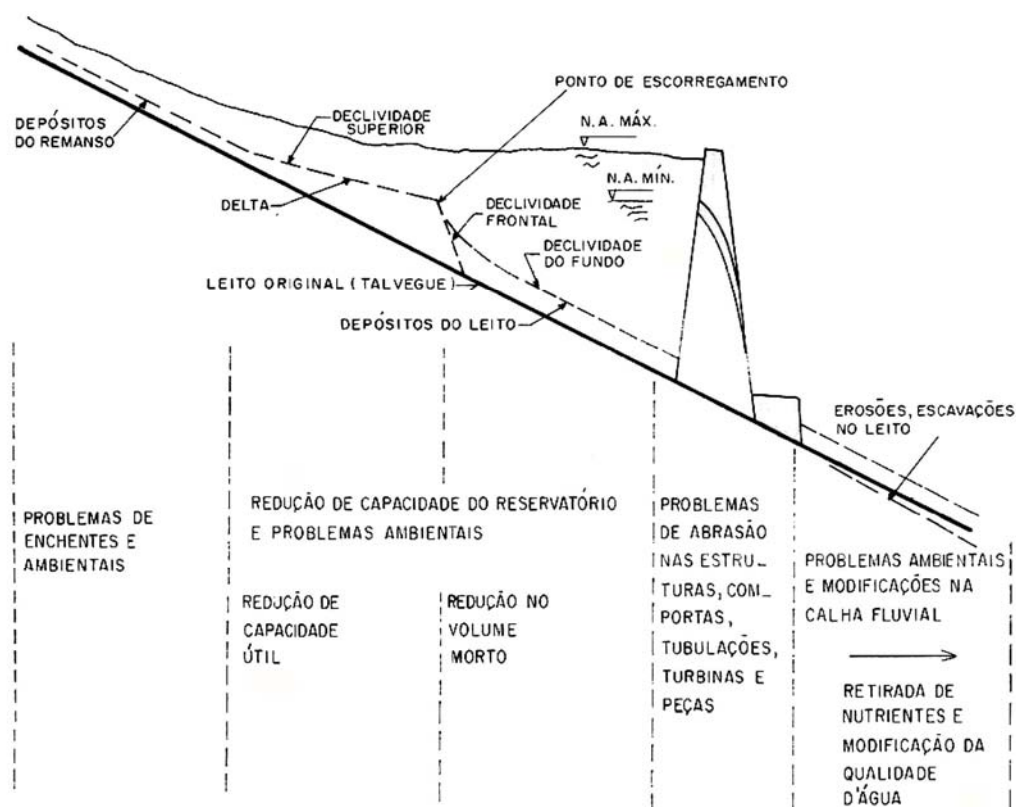


Figura 3.1 – Esquema de formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios com indicação dos principais problemas decorrentes (Carvalho, 1994)

Outros problemas derivados da deposição de sedimentos podem ser observados, todos necessitando de estudo e apresentando diferentes impactos ambientais (Carvalho, 1994).

Depósitos marginais de sedimentos finos ao longo do curso d'água e no reservatório facilitam o crescimento de plantas aquáticas, cuja remoção é efetuada pela elevação do nível d'água. Essa vegetação flutuante provocará problemas diversos, como seu apodrecimento, deposição no fundo do lago e transformação em minerais, indo se adicionar ao assoreamento. Parte da vegetação chegará às tomadas d'água, prejudicando a operação caso não sejam retiradas.

Os sedimentos que cobrem o fundo do lago produzirão modificações da fauna e flora do leito. A água limpa que escoar para jusante da barragem, já sem os nutrientes que o sedimento transporta, provocará modificações na fauna e flora, com reflexos ambientais em todo o curso d'água, especificamente na foz. A formação do estuário e delta no mar poderá sofrer grandes transformações ambientais (Carvalho, 1994).

4. IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DE AVALIAÇÃO DO ASSOREAMENTO

Estudos sedimentológicos devem ser realizados em todas as fases do aproveitamento, desde o planejamento (inventário, viabilidade e projeto básico) até a fase de operação. Durante o inventário, caso não existam postos de medida da carga sólida, é instalado e operado um posto ou vários postos, formando uma rede sedimentométrica, que será tanto maior quanto maior for a área de drenagem e a importância desse estudo.

Os estudos apresentam diversos tipos de abordagem nas diversas fases dos trabalhos de um aproveitamento, sendo tanto mais detalhado quanto maiores forem os problemas de erosão, de transporte de sedimentos e assoreamento que se apresentarem na bacia, no curso d'água ou regionalmente. Faz-se os estudos para conclusões das providências do controle de sedimento a serem adotadas

Qualquer que seja a fase dos estudos, as primeiras providências são (Carvalho, 1994):

- levantamento das condições de erosão da bacia (uso do solo, desmatamentos etc.);
- levantamento de postos sedimentométricos existentes ou desativados;
- estudos existentes sobre o tema para a bacia;
- coleta de dados hidrológicos e sedimentológicos necessários (série de vazões, descarga sólida, granulometria do sedimento em suspensão e do leito e outros).

Na falta de dados sedimentométricos e, também de hidrológicos, há necessidade de instalação e de operação de posto ou de rede hidrossedimentométrica em curto prazo.

Os estudos a serem efetuados referentes à previsão do assoreamento, são:

- processamento dos dados (obtenção de parâmetros, valores médios, peso específico aparente, eficiência de retenção de sedimentos no reservatório, aumento da taxa de erosão ou do transporte de sedimento, e outros);
- tempo de assoreamento total do reservatório;
- tempo de assoreamento até a altura da tomada d'água (vida útil);
- alturas de depósitos no pé da barragem para 50 e 100 anos ou outros tempos;
- distribuição de sedimentos no reservatório para 50 e 100 anos, ou outros tempos;
- traçado das curvas cota \times área \times volume, originais e curvas com o reservatório assoreado;
- porcentagens do assoreamento do reservatório para os períodos determinados;
- quantidade de sedimento depositado no volume reservado para controle de cheias;
- declividade da camada de topo;
- declividade da camada frontal;

- efeitos das grandes enchentes e o transporte de sedimentos (para pequenos reservatórios);
- caso o assoreamento seja um problema dentro do dobro do tempo da vida útil do aproveitamento (*2x50 anos*), considerando, inclusive, a taxa de aumento do transporte de sedimento com o tempo, determinar quais as medidas preventivas de controle do sedimento;
- estudos de previsão dos efeitos de erosão no canal de jusante da barragem;
- controle preventivo de sedimento nas fases de planejamento;
- controle preventivo e corretivo de sedimento na fase de operação;
- outros estudos podem ser contemplados como o dos efeitos secundários devido aos depósitos e à verificação do remanso considerando o assoreamento do reservatório.

4.1 Fase de inventário dos aproveitamentos

Na fase de inventário normalmente procura-se dados dos postos da rede principal do país. Essa rede tem sido de responsabilidade da ANEEL, sendo que os primeiros postos foram instalados em 1971 pelo antigo DNAEE. A rede foi aumentando, sendo que alguns dos postos foram sendo substituídos. Sendo assim, é sempre necessário investigação dessa descontinuidade através de informações no Inventário de Estações Fluviométricas da entidade. Dados sedimentométricos antigos apesar de não espelharem a situação atual podem indicar a taxa de aumento da erosão na bacia pela comparação com dados atuais (ver item *Aumento da erosão na bacia*).

Não existindo postos suficientes, ou nenhum, há necessidade de instalar um ou mais postos sedimentométricos e providenciar a operação adequada dos mesmos. Caso não hajam postos no curso d'água, os primeiros estudos podem ser feitos com dados sedimentométricos de postos de bacias vizinhas que tenham as mesmas características. Porém, é necessário que sejam instalados postos na área de interesse para garantir estudos das fases seguintes.

Os estudos sedimentológicos de avaliação do assoreamento efetuados a partir dos dados indicarão a necessidade de controle preventivo do sedimento a curto ou médio prazo.

4.2 Fases de viabilidade e de projeto básico

Os estudos sedimentológicos da fase de inventário certamente apontaram as necessidades para as fases seguintes. Caso não tenham sido realizados, o que foi dito antes vale para essa fase, isto é, haverá necessidade de investigação da existência de postos, instalação e operação de rede e coleta de dados. A instalação e operação do posto no local ou próximo da futura barragem é a solução mais adequada.

Os estudos dessas fases devem ser mais refinados, ampliando para verificação das características da bacia juntamente com os aspectos regionais quanto à erosão.

A avaliação do assoreamento nessas fases deve incluir o cálculo do tempo de assoreamento total do reservatório, o cálculo da altura de depósito de sedimento no pé da barragem, ou na posição da tomada d'água, para o tempo de vida econômica do aproveitamento e para 100 anos, a distribuição dos sedimentos no reservatório para esses períodos, bem como o cálculo da vida útil do aproveitamento sob o ponto de vista sedimentológico. Deverá ser obtida a taxa de aumento do transporte de sedimento no curso d'água ou de erosão na bacia e está deverá ser considerada na avaliação do assoreamento e principalmente na previsão da vida útil do aproveitamento.

4.3 Fase de operação do aproveitamento

Uma vez construída a barragem, não cessam os estudos sedimentológicos. Com maior razão, nesta fase, deve-se ter uma vigilância dos efeitos do sedimento com a formação do reservatório. Uma obra dessa natureza sempre traz o desenvolvimento regional e, com isso, uma ocupação territorial que inclui o maior uso de solo na agricultura pela maior disponibilidade de água, na construção de estradas e toda uma transformação cujas conseqüências podem não ter sido avaliadas adequadamente nos estudos de planejamento.

Providências para estudos sedimentológicos em nível de operação incluem o monitoramento da rede fluvi-sedimentométrica secundária instalada nas fases anteriores e levantamentos topo-batimétricos do reservatório, estudos e acompanhamentos de efeitos de erosão a jusante da barragem e de problemas de impactos ambientais ligados a sedimentos.

A rede sedimentométrica secundária deve monitorar pelo menos 80% da área de drenagem da barragem, sendo que o posto do local da barragem deve ser substituído por um a jusante e outro logo a montante da área de remanso.

O levantamento topo-hidrográfico sistemático do reservatório é uma necessidade para determinação da disponibilidade hídrica através das novas curvas cota x área x volume, verificação da nova forma do reservatório, do cone de dejeção de sedimentos bem como de diversas outras informações (ver item de medição do assoreamento do reservatório). É desejável que um pequeno reservatório seja levantado em cada dois anos, um médio a cada cinco anos e um grande a cada 10 anos. Caso a repetição de um levantamento indique pequena variação do assoreamento, então esse espaçamento pode ser maior, devendo procurar estar vigilante quanto as transformações que ocorrem na bacia pela ocupação de terras e conseqüente aumento da erosão .

Estudos comparativos a partir de fotos de satélite de épocas diferentes permitem a obtenção de diversas informações sobre as transformações sofridas na área de interesse do aproveitamento.

Tanto os dados obtidos da operação da rede sedimentométrica quanto os dados do levantamento permitirão o estudo de verificação da vida útil remanescente do aproveitamento. Para essas verificações serão repetidos os estudos indicados, antes referidos para a previsão.

5. FATORES QUE AFETAM A PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Os sedimentos que alcançam o reservatório são originários da área de drenagem contribuinte e são transportados, principalmente, através da rede principal de canais fluviais.

A produção de sedimento derivada da área de drenagem, ou correspondente a toda uma bacia hidrográfica, é dependente da erosão, do escoamento das águas de chuva com o carreamento dos sedimentos e das características de transporte de sedimento nos cursos d'água.

Os principais fatores que afetam a produção de sedimentos na área de drenagem são (ICOLD, 1989):

- Precipitação - quantidade, intensidade e frequência;
- Tipo de solo e formação geológica;
- Cobertura do solo (vegetação, rochas aparentes e outros);
- Uso do solo (práticas de cultivo, pastagens, exploração de florestas, atividades de construção e medidas de conservação);
- Topografia (geomorfologia);
- Natureza da rede de drenagem – densidade, declividade, forma, tamanho e conformação dos canais;
- Escoamento superficial;
- Características dos sedimentos (granulométricas, mineralógicas etc.);
- Hidráulica dos canais.

Outros fatores podem ser incluídos ou possíveis combinações entre os nove fatores acima indicados. Na avaliação da produção de sedimentos de uma área de drenagem contribuinte à posição da barragem é necessário que um especialista avalie os fatores que mais influenciam, o que certamente o levará às conclusões das medições necessárias para definir corretamente a quantidade de sedimentos, das técnicas disponíveis para previsão dessa produção de sedimento ou mesmo avaliar a quantidade de sedimentos em bacias aonde não foram feitas medições adequadas.

6. AVALIAÇÃO DO ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO

A avaliação do assoreamento do volume total do reservatório e da vida útil do aproveitamento são essenciais para estudos de formação do lago e também para a

operação do aproveitamento. O final da sua vida útil, do ponto de vista sedimentológico, é considerado quando os depósitos passam a interferir na operação regular da usina ou da finalidade para a qual foi formado o reservatório. Outras avaliações são feitas, como seja o tempo para que o sedimento alcance a soleira da tomada d'água (vida útil), a distribuição de sedimentos ao longo do reservatório correspondente a determinados tempos, o avanço do cone de dejeção e a formação do delta (declividade superior e declividade frontal).

Para cálculo preliminar de assoreamento utilizam-se as seguintes expressões:

$$S = \frac{D_{st} \times E_r}{\gamma_{ap}} = \frac{365 \times Q_{st} \times E_r}{\gamma_{ap}} \quad (6.1)$$

$$T = \frac{V_{res}}{S} \quad (6.2)$$

sendo:

S = volume de sedimento retido no reservatório (m³/ano);

D_{st} = deflúvio sólido total médio anual afluyente ao reservatório (t/ano);

E_r = eficiência de retenção do sedimento afluyente ao reservatório (decimal);

γ_{ap} = peso específico aparente médio dos depósitos (t/m³);

Q_{st} = descarga sólida total média afluyente ao reservatório (t/dia);

T = tempo de assoreamento de um determinado volume (anos);

V_{res} = volume do reservatório, total ou volume morto (m³).

Nos itens que se seguem, 7, 8 e 9, são indicados a forma de determinação desses parâmetros necessários à avaliação do assoreamento segundo as equações 6.1 e 6.2.

6.1 Dados do reservatório

Para essas previsões são necessários dados de projeto, sendo os principais os seguintes:

- Nível d'água máximo normal, em m;
- Nível d'água mínimo normal, em m;
- Altura da soleira da tomada d'água, em m;
- Volume no nível d'água máximo normal, em m³;
- Volume no nível d'água mínimo normal (volume morto), em m³;
- Volume no nível da soleira da tomada d'água, em m³;
- Série de vazões naturais;
- Vazão média de longo termo, em m²/s;
- Cota da soleira do vertedouro, em m;
- Cota da soleira da tomada d'água, em m;
- Comprimento do reservatório, em m ou km.

7. DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

A entidade responsável pela construção da usina hidrelétrica, ou de outro tipo de aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis com formação de reservatório, procura obter de outras entidades dados hidrológicos e sedimentológicos existentes no próprio curso d'água. Na falta destes, fica obrigada a instalar e operar postos com essas finalidades. Dados de levantamentos batimétricos de reservatórios poderiam também ser utilizados mas são raros. Outros estudos que podem ser obtidos são dados sobre a avaliação das taxas de erosão na bacia que são necessárias para a correta avaliação da previsão do assoreamento.

É necessário que sejam obtidos com regularidade dados de granulometria em suspensão e do leito para cálculo do peso específico aparente. Também é especialmente necessária a medida da carga de fundo em estudos sedimentológicos para pequenos e médios reservatórios, uma vez que o sedimento grosso (areia) nunca é descarregado pelos condutos e vertedouro, ficando depositado no reservatório. Exceção se faz de pequena quantidade de areia ser descarregada em ocasião de grande enchente.

Os estudos referentes à produção de sedimento são apresentados de forma mais completa no *Guia de Práticas Sedimentométricas*, sendo a seguir tratados de maneira mais resumida.

De forma geral, para implementação de um programa de medidas sedimentométricas, segundo o Programa Hidrológico Internacional, a UNESCO (1982) estabeleceu critérios que são apresentados na Tabela 7.1, de acordo com Yukian (1989).

Tabela 7.1 – Programa de aquisição de dados sedimentométricos de acordo com a UNESCO (1982) e Yukian (1989)

Finalidade do estudo	Item de medição		
	Levantamento batimétrico	Transporte de sedimento	Outros itens de importância
Deflúvio sólido anual		Concentração de sedimentos, descarga em suspensão, descarga total em postos hidrométricos	Nível d'água, descarga líquida e outros
1) Erosão e deposição em trecho de rio; 2) Depleção da capacidade de reservatório	Levantamentos periódicos por linhas transversais e longitudinais no trecho do rio ou do reservatório; levantamento completo do assoreamento do reservatório	Descarga sólida total afluente e efluente em postos hidrométricos	Granulometria de sedimentos e peso específico aparente dos depósitos
Processos fluviais em trechos de rio ou em trechos sujeitos a remanso de reservatório	Levantamentos periódicos em todo o trecho do rio ou em locais de interesse; fotografias aéreas, se possível	Descarga do leito e de material do leito em postos hidrométricos afluentes	Parâmetros hidráulicos e sedimentológicos importantes tais como declividade da linha d'água, composição do material do leito, velocidade,

			profundidade e largura, temperatura d'água, granulometria do sedimento em transporte, peso específico aparente, etc.
--	--	--	--

Valores de produção de sedimento altas, como 200 t/(km².ano), são muito prejudiciais, podendo afetar o reservatório com depósitos indesejáveis. Segundo critérios internacionais, pode-se considerar os valores da Tabela 7.2 como indicação para estudos.

Tabela 7.2 – Valores de produção de sedimento aceitáveis

Tolerância	Produção de sedimentos	
	(ton/(mi ² .ano))	(t/(km ² .ano))
Alta	> 500	175
Moderada	200 a 500	70 a 175
Baixa	< 100	35

7.1 Avaliação da erosão

A erosão do solo é um processo complexo que se manifesta de diversas formas na natureza, sendo também complexa a sua medida. Estudos de erosão laminar, em sulcos ou em estradas que são fenômenos mais comuns, não são medidos. Somente em agricultura, em algumas regiões do país, é que se tem esse estudo a partir da equação de perda de solo (*USLE*, *Universal soil loss equation*) que pode ser estendida para uma área qualquer com a equação modificada (*MUSLE*). Apesar desse recurso, os valores obtidos com essas equações são grandes, não podendo ser utilizados no estudo do transporte de sedimento. Para efeito de comparação, os resultados médios obtidos como aceitáveis em agricultura para taxas de 3 a 15t/(ha.ano), iguais a 300 a 1500t/(km².ano), são muito superiores aos valores indicados na Tabela 7.2 para taxas de transporte de sedimento. Isto é verdadeiro, uma vez que nem todo o sedimento erodido na bacia alcança o curso d'água, ficando parte do sedimento em depressões e áreas planas.

7.2 Planejamento da rede de postos sedimentométricos

A rede de postos sedimentométricos de uma bacia pode ser dimensionada segundo os critérios da OMM (WMO, 1994), sendo esta considerada como a rede principal de utilidade para estudos básicos. Atualmente, a ANEEL que é responsável por essa rede no Brasil, monitora pouco mais que 400 postos, quantidade inferior ao critério da OMM, devido à razões de custos operacionais. Países como o Canadá e Rússia, de mesmas dimensões continentais, também têm redes sedimentométricas de pequena quantidade de postos como o nosso. Então, normalmente deve ser considerada uma rede secundária para atender a estudos específicos, tendo maior frequência de

operação, como é o caso de implantação de postos para avaliação do assoreamento de reservatórios. Essa rede deve ser mantida na fase de operação do aproveitamento.

Para implementação de estudos de trechos de rios ou de reservatórios é conveniente que se conheça, ou seja medida/monitorada, a afluência de sedimentos em pelo menos 80% da bacia contribuinte, sendo necessário a obtenção da descarga sólida em suspensão e da sólida total. Para estudos de reservatórios já existentes, considerando um monitoramento de investigação, é necessário monitorar pelo menos 60% da bacia afluente ao lago e instalar um posto logo a jusante da barragem para conhecimento do sedimento efluente. Os tributários que desaguam diretamente no lago que apresentem uma contribuição de sedimento maior que 10% do total afluente devem também ser monitorados (Yuqian, 1989).

7.3 Instalação do posto e frequência de medição

Leituras de nível e medições da descarga líquida devem ser efetuadas na ocasião da medida da descarga sólida, sendo que o posto deve ser operado regularmente. Então o posto sedimentométrico pode ser selecionado entre os postos da rede fluviométrica aonde já existam dados históricos. Para a instalação de um novo posto a seleção do local deve seguir os mesmos critérios para o posto fluviométrico.

Em posto sedimentométrico onde se pretende medir a carga do leito seria conveniente instalar um posto complementar, com mesma referência e adequadamente distanciado, para que se possa ter a determinação da declividade da linha d'água em cada medição.

A frequência de medição do posto ou da rede sedimentométrica tem que ser planejada de forma integrada com a operação da rede fluviométrica, devendo dar especial atenção ao fenômeno de variação da carga sólida durante o período chuvoso e ocorrências de precipitações.

A carga em suspensão é normalmente a parte predominante da carga sólida total, em razão da qual, a frequência é estabelecida visando medir a descarga em suspensão. A frequência de medições pode ser horária, diária, semanal, mensal ou mesmo periódica. Aparelhos registradores podem fazer operação contínua em um ponto do curso d'água.

As medidas horárias podem ser feitas com equipamento automático de bombeamento com bandejas rotativas. As medições ou coletas diárias são feitas pelo observador do posto em, geralmente, uma, duas ou três verticais predeterminadas, sendo que, no período de estiagem, são feitas a cada 15 dias. Em curso d'água de grande porte, a coleta de sedimento pode ser semanal, entretanto, estudos recentes em rios desta natureza têm demonstrado que estas variações podem ser até diárias.

As medições com frequência mensal ou periódica devem ser atendidas por equipe de hidrometria. Estas medições devem ser efetuadas segundo critério de amostragem completa e não de somente uma a três verticais selecionadas. Tanto a

medição pontual por equipamento automático ou registrador como aquelas coletas horárias, diárias ou semanais devem ser acompanhadas com medições pelo hidrometrista para efeito de calibragem.

A medição feita pelo hidrometrista deve incluir tanto a coleta de sedimento em suspensão quanto a do leito. A medição da temperatura da água e a medida da declividade são também necessárias.

A maior parte da carga sólida do curso d'água ocorre durante o período de chuvas, correspondendo a cerca de 70 a 90% da carga total anual. Então, é desejável que a frequência de medições contemple esse período, ficando poucas medições para a estiagem.

As medições de sedimento são relativamente mais caras do que as demais medições de estudos de recursos hídricos devido à complexidade do fenômeno e também devido aos cálculos trabalhosos. Hoje em dia, com o uso do computador que facilita esses cálculos, é possível aumentar qualquer programa de medições para que se possa obter maior precisão e melhores resultados.

7.4 Métodos de medição

Os diversos métodos de medição da descarga em suspensão, do leito ou total são classificados em *diretos* (ou *in situ*) e *indiretos*. A Tabela 7.3 mostra esses métodos de forma simplificada.

Tabela 7.3 – Métodos de medição da carga sólida (Carvalho, 1994)

Descarga sólida	Medição	Descrição	Equipamentos ou metodologia de medida
Descarga sólida em suspensão	Direta	Usa equipamentos que medem diretamente no curso d'água a concentração ou outra grandeza, como a turbidez ou ultrassom	Medidor nuclear (portátil ou fixo), Ultrassônico ótico, Ultrassônico Doppler de dispersão, Turbidímetro (portátil ou fixo), ADCP (Doppler)
		Por acumulação do sedimento num medidor (proveta graduada)	Garrafa Delft (medição pontual e concentração alta)

Descarga sólida de arrasto	Indireta	Coleta de sedimento por amostragem da mistura água-sedimento, análise de concentração e de granulometria e cálculos posteriores da descarga sólida	Diversos tipos de equipamentos: – de bombeamento, equipamentos que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos, pontuais por integração e integradores na vertical (no Brasil usa-se principalmente a série norte-americana – U-59, DH-48, DH-59, D-49, P-61 e amostrador de saca)
		Uso de fotos de satélite e comparação com medidas simultâneas de campo para calibragem, em grandes rios	São estabelecidas equações que correlacionam as grandezas de observação das fotos com as concentrações medidas
	Direta	Amostradores ou medidores portáteis de três tipos principais (a amostra é coletada em diversos pontos da seção transversal, determinada o seu peso seco, a granulometria e calculada a descarga de arrasto); o medidor fica apoiado no leito de 2 minutos a 2 horas de tal forma a receber no receptor 30 a 50% de sua capacidade	1) Cesta ou caixa – medidores Muhlhofer, Ehrenberger, da Autoridade Suiça e outros 2) Bandeja ou tanque – medidores Losiebsky, Polyakov, SRIH e outros 3) Diferença de pressão – medidores Helley-Smith, Arnhem, Sphinx, do USCE, Károlyi, do PRI, Yangtze, Yangtze-78 VUV e outros
		Estruturas tipo fenda ou poço – as fendas do leito do rio são abertas por instantes e coletado o sedimento	Medidor Mulhofer (EUA)
	Indireta	Coleta de material do leito, análise granulométrica, medida da declividade, da temperatura, parâmetros hidráulicos e cálculo da descarga de arrasto e de material do leito por fórmulas (de Ackers e White, Colby, Einstein, Engelund e Hansen, Kalinske, Laursen, Meyer-Peter e Muller, Rottner, Schoklitsch, Toffaleti, Yang e outras)	Tipos de equipamento: 1) de penetração horizontal, tipos caçamba de dragagem e de concha 2) de penetração vertical, tipos de tubo vertical, caçamba de raspagem, caçamba de escavação e escavação de pedregulho 3) tipo piston-core que retém a amostra por vácuo parcial
		Deslocamento de dunas – por medida do volume da duna que se desloca com uso de ecobatímetro de alta resolução	1) levantamentos batimétricos seguidamente ao longo da seção transversal 2) levantamentos batimétricos seguidamente ao longo de seções longitudinais
		1) Traçadores radioativos 2) Traçadores de diluição, sendo ambos os métodos com a colocação do traçador no sedimento e seu acompanhamento com equipamento apropriado (o traçador deve ser escolhido de tal forma a não poluir o meio ambiente)	Métodos: 1) por colocação direta do traçador no sedimento do leito do rio 2) por coleta do sedimento, colocação do traçador no sedimento e seu retorno ao leito

		Propriedades litológicas – uso das características mineralógicas dos sedimentos	Coleta do sedimento do leito de afluentes e do curso principal, determinação das características mineralógicas dos sedimentos e comparação por uso de equações adequadas a partir das quantidades dos componentes existentes nas amostras
		Método acústico – utilizado para pedras que se chocam no medidor	(pouco eficiente)
		Método fotográfico, de amostragem – utilizado para pedras. Coloca-se uma escala que também é fotografada	1) Fotos de pedras submersas 2) Fotos de pedras de leitos secos
Descarga sólida total	Direta	Uso de estruturas tipo blocos, no leito, para provocar turbulência e todo o sedimento ficar em suspensão	Faz-se a amostragem do sedimento e calcula-se como descarga em suspensão
		Levantamento topo-batimétrico de reservatório, determinação do volume dos depósitos e da eficiência de retenção de sedimentos no lago	1) Para pequenos reservatórios permite o cálculo do sedimento do leito 2) Para grandes reservatórios permite o cálculo do sedimento total
	Indireta	Coleta de material em suspensão e do leito, análise de concentração, análise granulométrica, medida da temperatura, parâmetros hidráulicos e cálculo da descarga total – método modificado de Einstein e método simplificado de Colby	Diversos tipos de equipamentos – de bombeamento, equipamentos que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos, pontuais por integração e integradores na vertical (no Brasil utiliza-se principalmente a série norte-americana – U-59, DH-48, DH-59, D-49, P-61 e amostrador de saca)

Os diversos equipamentos de medida ou de amostragem em suspensão podem ser classificados em vários tipos, como:

- *Instantâneos* ou *integradores*, sendo que os *instantâneos* aprisionam a amostra rapidamente ou fazem a leitura, enquanto que os *integradores* admitem a amostra em alguns segundos por bocal ou bico, armazenando num recipiente;
- *Portáteis* ou *fixos*, sendo que os *portáteis* são operados manualmente, por haste ou guincho, ou mesmo preso a um barco, enquanto os *fixos* são instalados numa estrutura própria, numa ponte ou na margem;
- *De bocal* ou *com bico*, sendo o *de bocal* aqueles de bombeamento ou outro, enquanto aqueles que usam *bicos* são os portáteis providos de garrafas, recipiente plástico ou saca plástica;
- *Instantâneos pontuais*, *pontuais por integração* e *por integração na vertical*, sendo que os *instantâneos pontuais* são do tipo de cilindro com dispositivo que aprisiona a amostra com envio de mensageiro/peso que fecha válvulas. Os *pontuais por integração* coletam a amostra em alguns segundos em um ponto de uma vertical. Os *integradores na vertical*, ou *em profundidade*, coletam a amostra movendo o

equipamento ao longo da vertical em um movimento constante que pode ser em um só sentido ou numa viagem de ida e volta da superfície ao fundo.

- *Amostrador de tubo horizontal, de garrafa, de saca compressível, de bombeamento, de integração, fotoelétrico, nuclear, ultrassônico ótico, ultrassônico de dispersão, ultrassônico Doppler* – o amostrador horizontal é o tipo instantâneo pontual. O amostrador de garrafa é construído em forma hidrodinâmica com uma cavidade para que seja inserida uma garrafa de coleta, sendo que a amostragem é feita através de um bico que pode ter diâmetros variáveis (1/4”, 3/16” e 1/8”) enquanto o ar é expelido por um tubo. O amostrador de saca compressível é também construído em forma hidrodinâmica, tendo um recipiente de alumínio para conter a saca plástica, é colocada de forma comprimida para expulsar o ar, tem capacidade maior que a garrafa e utiliza também os bicos cambiáveis. O equipamento de bombeamento pode ser colocado em um barco ou instalado na margem, sendo que normalmente utiliza-se uma mangueira provida de um bocal ou bico apropriado para admitir a amostra; o bombeamento é feito de forma controlada em função da velocidade da corrente, existindo diversos tipos desse equipamento. O equipamento que trabalha por integração são os de garrafa ou de saca compressível. O fotoelétrico e o nuclear operam com emissão de luz e de raios, respectivamente, a partir de fonte de intensidade constante. O ultrassônico ótico e o de dispersão trabalham com fontes que emitem raios ultrassônicos que são captados por equipamentos apropriados. O ultrassônico Doppler utiliza o efeito Doppler para medir a intensidade de energia acústica refletida pelas partículas em suspensão na água fornecendo uma correlação entre a quantidade de decibéis (dB) recebidos pelo equipamento (exemplo, ADCP) e a distribuição dos sedimentos em suspensão ao longo da seção de medição.
- Os equipamentos também podem ser classificados pela orientação de seus bicos ou bocais como *na direção da corrente* ou *em 90° com a corrente*.

Nota – Os equipamentos de coleta de material em suspensão da série norte-americana têm denominações que indicam a procedência: US, de *United States*; o tipo de uso: D, de *depth*, para integração vertical ou em profundidade; e, P, *punctual*, para amostragem pontual; os equipamentos leves, de uso manual, são indicados por H, de *hand*; o número corresponde ao ano de projeto, 48, de 1948.

Os equipamentos mais utilizados no país para amostragem de sedimento em suspensão são os da série norte-americana, do tipo de garrafa, de saca compressível e medidor pontual com recipiente, para determinação da carga sólida por método indireto (Figuras 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6 e 7.7). Os equipamentos para coleta de sedimento do leito, também para medição indireta, são aqueles do tipo de penetração horizontal ou vertical (Figuras 7.8, 7.9, 7.10 e 7.11).

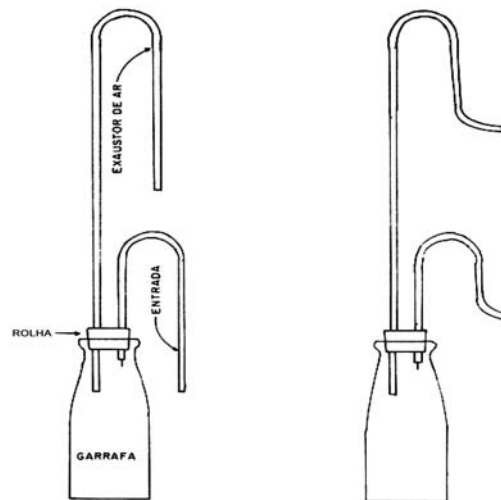


Figura 7.1 – Amostrador US-U-59 de estágio único, pontual por integração, para instalação fixa e coleta na superfície na ocasião de elevação do nível d'água

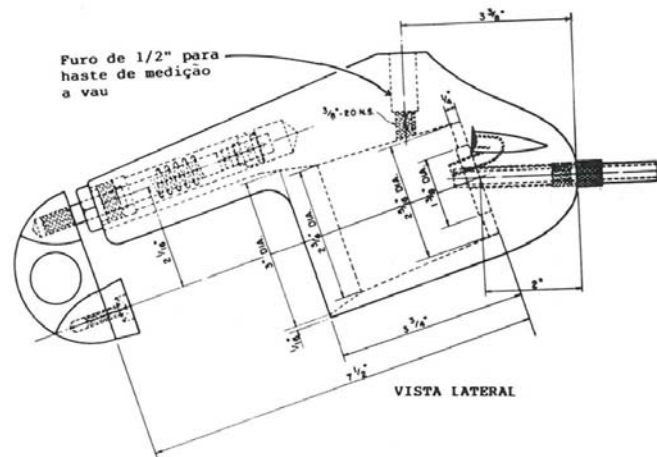


Figura 7.2 – Amostrador US-DH-48, do tipo integrador, para uso a vau ou de canoa até 2,0m de profundidade, tendo duas versões atuais: o DH-59 e o DH-76

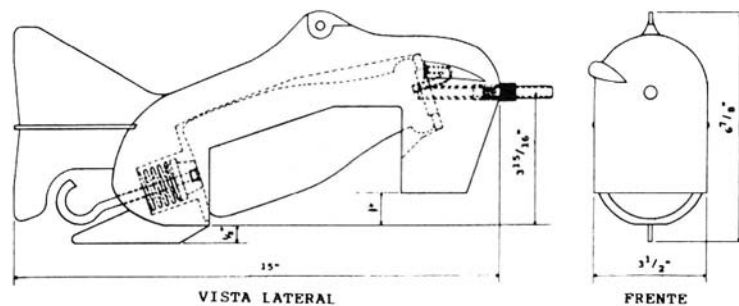


Figura 7.3 – Amostrador US-DH-59, do tipo integrador, para uso em guincho em profundidades até 4,50m e velocidade moderada

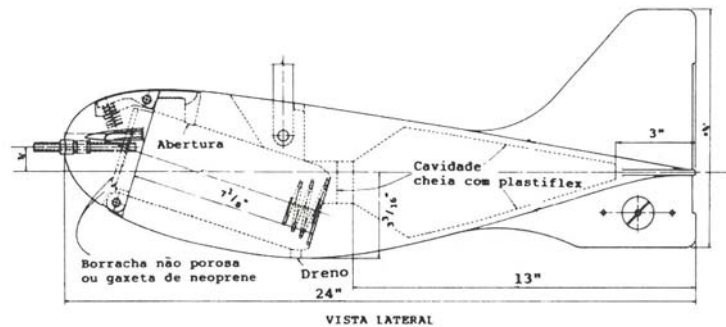


Figura 7.4 – Amostrador US-D-49, do tipo integrador, para uso a guincho em profundidades até 4,50m e velocidades altas, tendo duas versões atuais: o D-74 e o D-74AL

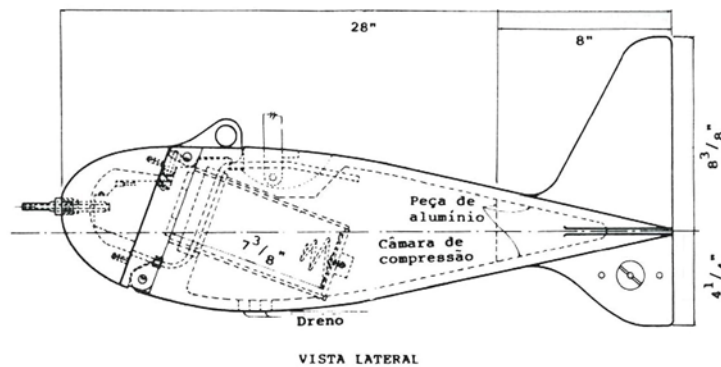


Figura 7.5 – Amostrador US-P-61, do tipo integrador pontual, podendo fazer coleta por integração vertical, por partes, em qualquer profundidade, tendo as seguintes versões: P-50, P-61A1, P-63 e P-72

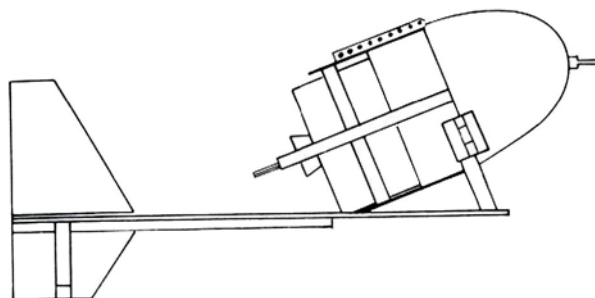


Figura 7.6 – Amostrador de saca compressível, do tipo integrador, para uso com guincho em qualquer profundidade

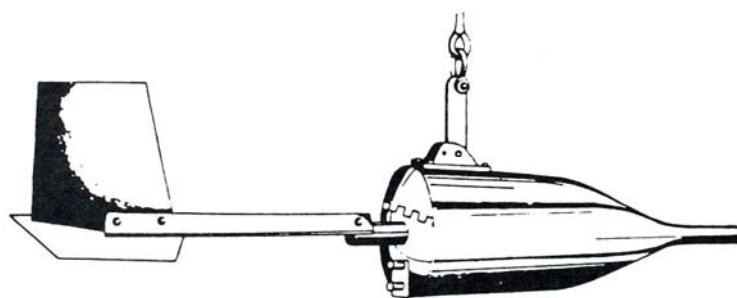


Figura 7.7 – Garrafa Delft, tipo integrador pontual, para medida direta da concentração utilizando também uma proveta graduada

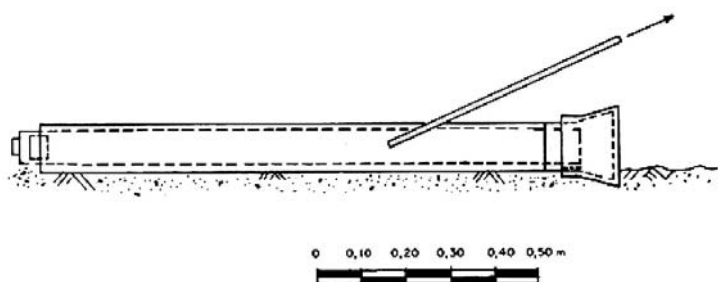


Figura 7.8 – Amostrador do U.S. Waterways Experimental Station de material do leito

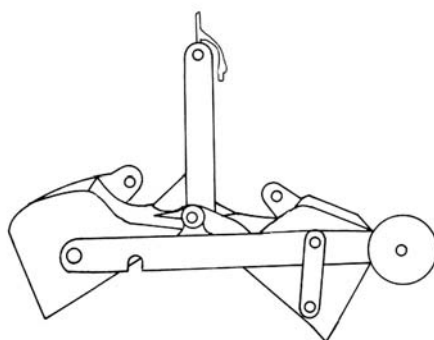


Figura 7.9 – Amostrador tipo Petersen de material do leito

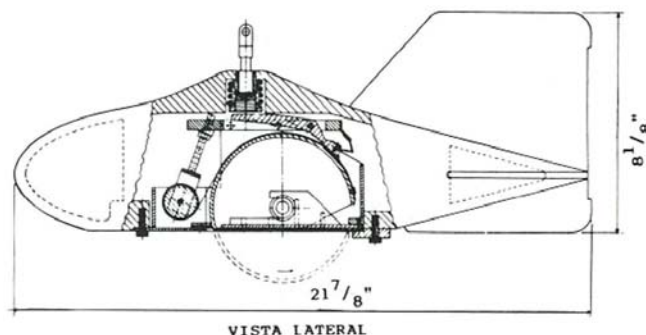


Figura 7.10 – Amostrador US-BMH-60 de material do leito para profundidades e velocidades moderadas; tem uma versão mais leve para uso manual, o RBMH-80

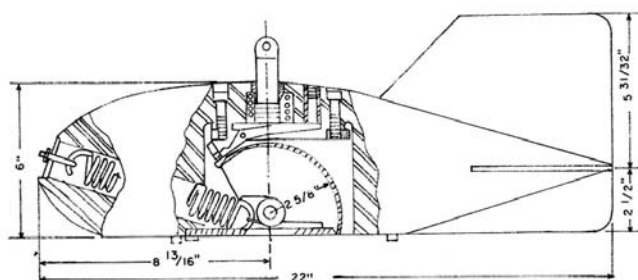


Figura 7.11 – Amostrador US-BM-54 de material do leito para maiores profundidades e velocidades

Nota – Os equipamentos da série norte-americana, identificados por US, de *United States*, para medição direta do leito são indicados como BL, de *bed load*, enquanto que a simples coleta para medição indireta, como BM, de *bed material*, podendo ser de operação manual quando for designado como H, de *hand*; o número corresponde ao ano de projeto.

7.4.1 Amostragem de sedimentos

Existem diversos tipos de amostragem de sedimento em suspensão, podendo ser pontuais ou por integração na vertical. Na Tabela 7.4 são apresentados os métodos de amostragem usuais.

Tabela 7.4 – Métodos de amostragem de sedimento

Amostragem	Posições	Concentração média
Pontual	Em posição predeterminada quando se utiliza um equipamento automático (bombeamento) ou registrador (turbidímetro, nuclear ou outro)	Concentração média na seção determinada por calibragem a partir de correlação com medições do hidrometrista
	Um ponto na superfície com amostrador ou diretamente com a garrafa semi-mergulhada, em cada vertical	Concentração média na vertical $C_{mv} = 1,2 C_{sup}$
	Um ponto na vertical a 0,5 ou 0,6 da profundidade	Concentração média na vertical $C_{mv} = C_{0,5}$ ou $= C_{0,6}$
	Dois pontos na vertical a 0,2 e 0,8 da profundidade	Concentração média na vertical $C_{mv} = \frac{3}{8} C_{0,8} + \frac{5}{8} C_{0,2}$

	Três pontos na vertical a 0,2, 0,5 e 0,8 da profundidade	<p>Concentração média na vertical</p> $C_{mv} = \frac{C_{0,2} + C_{0,5} + C_{0,8}}{3}$ <p>ou,</p> $C_{mv} = \frac{C_{0,2} + 2.C_{0,5} + C_{0,8}}{4}$
	Vários pontos na vertical, a 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 e 0,9 (se as concentrações tiverem valores muito diferentes, calcular a média ponderando com as profundidades entre pontos medidos)	<p>Concentração média na vertical</p> $C_{mv} = \frac{\sum C_i}{n}$
Integração na vertical	Utilizando velocidades de trânsito do amostrador diferentes em cada vertical	A concentração é a média na vertical. A descarga sólida em suspensão deve ser determinada por segmentos multiplicados pela descarga parcial, sendo a descarga em suspensão total igual ao somatório das parciais e a concentração média na seção igual à descarga em suspensão total, dividida pela descarga líquida total
	<p>Método de Igual Incremento de Largura, IIL, utilizando mesma velocidade de trânsito em todas as verticais e mesmo bico ao longo de toda a seção transversal</p> <p>Método de Igual Incremento de Descarga, IID, utilizando efetuar a amostra no centro de iguais incrementos de descarga ao longo de toda a seção transversal, podendo trocar o bico e usar velocidade de trânsito diferente em cada vertical, mas amostrar volumes iguais de mistura água-sedimento</p>	<p>Junta-se todas as sub-amostras das verticais (entre 10 a 20) e faz-se uma única análise que já fornece a concentração média, e, se necessário, uma única curva granulométrica média na seção</p> <p>Junta-se todas as sub-amostras das verticais (entre 5 e 15) e faz-se uma única análise que já fornece a concentração média, e, se necessário, uma única curva granulométrica média na seção</p>

Nestes métodos de amostragem a garrafa nunca deve ficar completamente cheia, podendo ser coletado, no máximo, 400ml sendo que de sua capacidade total de 500ml. Os amostradores que usam esse tipo de garrafa não podem amostrar em profundidades altas, sendo o DH-48 para profundidades até 2,0m, e o DH-59 e D-49 até 4,50m.

No processo de integração na vertical o amostrador é mergulhado e movimentado em velocidade constante da superfície para o fundo e volta à superfície. Cada movimento de descida ou subida é feito numa velocidade constante mas não necessariamente iguais. A velocidade de trânsito do amostrador não deve ultrapassar um certo valor v_t que deve ser calculado em função da constante do bico utilizado e da velocidade média na vertical (equações 7.1 e 7.2). Calcula-se o tempo mínimo de amostragem com o percurso a ser percorrido igual a duas vezes a profundidade (equação 7.3).

$$\text{Bico de } 1/8'': \quad v_{t,máx} = 0,2.v_m \quad (7.1)$$

$$\text{Bicos de } 3/16'' \text{ e } 1/4'': \quad v_{t,\max} = 0,4.v_m \quad (7.2)$$

$$\text{Tempo mínimo de amostragem:} \quad t_{\min} = \frac{2.p}{v_{t,\max}} \quad (7.3)$$

Os métodos de IIL e IID são considerados os melhores por permitirem a determinação da concentração média e da granulometria média com uma só análise (Tabela 7.4), além de facilitar os cálculos da descarga sólida. Deve-se coletar sub-amostras com um volume total que permita a realização das análises dentro do critério de restrição de cada processo disponível em laboratório.

É usual a coleta de material em suspensão, de 10 a 15% das medições efetuadas, com mistura água-sedimento, suficiente para permitir análise granulométrica desse material (ICOLD, 1989).

A amostragem de material do leito é feita em algumas posições intermediárias entre as mesmas verticais dos métodos de IIL e IID, utilizando de 5 a 10 sub-amostras. O peso total das sub-amostras deve ser de 2kg ou um pouco mais para permitir boa análise pelo laboratorista.

7.4.2 Análises de laboratório

Faz-se as análises de sedimento do material em suspensão em um laboratório do tipo dos de Química, enquanto que as análises de material do leito faz-se em laboratório do tipo dos de Mecânica dos Solos. Assim o laboratorista tem que conciliar os procedimentos utilizando os equipamentos próprios a cada método.

A análise de sedimento em suspensão, apesar de ser efetuada com equipamentos utilizados em Química, como balança analítica, *becher*, pipetas, cápsulas, provetas etc., não é uma análise química, e sim, sedimentométrica. Isto quer dizer que toda a amostra que chegar ao laboratório tem que ser analisada, não devendo ser repartida ou reduzida para uma sub-amostra por suposta homogeneização. As partículas contidas numa mistura água-sedimento têm diversas densidades e diversos tamanhos, desde colóides, argilas, siltes e até areias, das mais diversas formas, e mineralogia (quartzo, ferro, cálcio, etc.) sendo impossível a sua homogeneização. Todo o sedimento que chegar tem que ser analisado.

As diversas análises usuais e os métodos ou equipamentos podem ser observados na Tabela 7.5. Para melhor entendimento dos métodos convém consultar Guy (1969).

Tabela 7.5 – Métodos e equipamentos de análise sedimentométrica

Amostras de sedimento em Suspensão	Análise de concentração total	Método de filtração
		Método de evaporação
		Método do tubo de retirada pelo fundo
	Análise granulométrica	Método do tubo de retirada pelo fundo
Pipetagem		
Densímetro		
Amostras de sedimento do Leito	Análise granulométrica	Peneiramento
		Densímetro
		Pipetagem
		Tubo de acumulação visual
		Método do tubo de retirada pelo fundo

Cada um desses métodos tem suas restrições próprias, exigindo quantidades adequadas de sedimento contido na amostra. O método de filtração é utilizado para amostras de baixa concentração, menores que 200mg/l, e pequeno volume, para não colmatar muito o filtro. O método de evaporação é utilizado em amostras com maiores concentrações e mais volumes. Os dois métodos exigem que se reduza o volume da amostra por processo de decantação ou em banho-maria de forma a manter todas as partículas no processo. Segundo a OMM (WMO, 1981) os volumes necessários a uma correta análise com precisão adequada, são aqueles apresentados na Tabela 7.6.

A concentração é normalmente determinada como a razão entre o peso do sedimento seco em relação ao volume da mistura água-sedimento, em mg/l, ou a razão entre o peso do sedimento seco em relação ao peso da mistura água-sedimento, em ppm (= mg/kg = mg/1.000.000mg). Os valores de ppm podem ser usados como mg/l até 16.000ppm sem correção de densidade. Os dados podem ser apresentados com três algarismos significativos até 999 (0,321ppm, 3,21ppm, 32,1ppm, 321ppm).

Tabela 7.6 – Volumes de amostras necessários para análise de concentração de sedimentos em suspensão (WMO, 1981)

Concentração esperada de sedimento em suspensão (g/m ³ , mg/l, ppm)	Volume da amostra (litros)
> 100	1
50 a 100	2
20 a 30	5
< 20	10

As análises granulométricas para material de suspensão são realizadas com pequena quantidade de sedimento, utilizando o princípio de velocidade de queda de

partículas na água. Cada método, idealizados a partir da lei de Stokes, tem suas restrições para atendimento a uma precisão na tomada das porcentagens de sedimentos de determinada granulometria contida no meio líquido. A Tabela 7.7 apresenta as restrições mais importantes a serem atendidas.

Tabela 7.7 – Amplitude de vários métodos de análise granulométrica para material fino e que utilizam a velocidade de queda na água (SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1943)

Método	Limite aproximado do diâmetro da partícula	Limite aproximado na concentração
	(mm)	(ppm)
Tubo de retirada pelo fundo	0,001 a 1,0	300 a 10.000
Decantação	0,001 a 0,0625	1.250 a 19.000
Pipetagem	0,001 a 0,0625	3.000 a 10.000
Hidrômetro (densímetro)	0,001 a 0,0625	60.000 a 116.000
Siltômetro (TAV, tubo de acumulação visual)	0,0625 a 2,0	125 a 25.000

A análise de sedimento do leito é feita principalmente por peneiramento, utilizando a série Tyler de peneiras. Se for pequena quantidade de material arenoso, pode-se utilizar o método do TAV. Caso a sobra da última peneira, o material mais fino, seja de 5% do material, ou maior, é necessário complementar a análise com a definição do ramo inferior da curva. Neste caso utiliza-se um dos métodos da Tabela 7.7. Os procedimentos de análise podem ser obtidos das *Normas e Recomendações Hidrológicas – Anexo III, Sedimentometria* (DNAEE, 1970).

7.4.3 Cálculo da descarga sólida

Uma vez estando todos os dados de campo e de laboratório disponíveis os cálculos de descarga sólida podem ser efetuados. Os dados necessários são obtidos da medição de descarga líquida e amostragem de sedimentos, da concentração de sedimentos, da distribuição granulométrica e outros. Para cálculo da descarga do leito por meio de fórmulas, alguns outros valores têm de ser obtidos, como a temperatura da água, a declividade da linha energética, e outros como tensão de cisalhamento, viscosidade cinemática, velocidade de queda de partículas, sendo estes últimos geralmente incluídos nos programas de cálculos disponíveis.

Espera-se um erro máximo de 10% nas determinações de descarga sólida, mesmo incluindo a obtenção da descarga do leito que é muito imprecisa. A descarga em suspensão é normalmente a parte predominante da descarga total, representando na maior parte das medições mais que 90%. No entanto, a descarga do leito pode apresentar valores de 10 a 150% em relação a descarga em suspensão, segundo ICOLD (1989). Por outro lado a análise de consistência de dados sedimentométricos é muito difícil devido aos muitos processos por que passam a sua determinação e, principalmente, à complexidade do fenômeno. Assim é que se torna muito importante

que todos os erros procurem ser eliminados durante a medição e no trabalho do laboratório. Isto impõe que a medida da descarga sólida seja feita da forma mais correta possível no campo, sendo realizada por um bom hidrometrista, com equipamento adequado, tecnologia adequada, e que a análise seja feita por um químico/técnico experiente. Isto permitirá a repetição dos cálculos, se for necessário. Caso os serviços do campo e do laboratório apresentem erros, fica impossível uma correção do valor da descarga sólida.

Cálculo da descarga sólida em suspensão – Em medida direta e indireta da descarga em suspensão é obtido o valor da concentração. O cálculo é feito pela multiplicação da descarga líquida pela concentração. Normalmente o valor da Q_{ss} é apresentado em *t/dia*, sendo necessário um fator de transformação de unidades. Quando se tem a concentração média obtida através de amostragens pelos métodos de IIL e IID, tem-se:

$$Q_{ss} = 0,0864.Q.c_s \quad (7.4)$$

sendo,

Q_{ss} = descarga sólida em suspensão, em *t/dia*

Q = descarga líquida, em m^3/s

c_s = concentração, em *mg/l*

Sendo c_s um alto valor, apresentado em kg/m^3 , a equação é:

$$Q_{ss} = 86,4.Q.c_s \quad (7.5)$$

Sendo as amostras das diversas verticais analisadas independentemente utiliza-se a seguinte equação com a devida constante de transformação de unidade:

$$Q_{ss} = \sum q_{ss} = \sum q.\Delta l.c_{sv} \quad (7.6)$$

sendo

q_{ss} = descarga em suspensão por unidade de largura correspondente ao segmento considerado

q = descarga líquida parcial por unidade de largura correspondente ao segmento considerado

Δl = distância referida a q_{ss} e q

c_{sv} = concentração de sedimentos na vertical.

A concentração média na vertical é igual a:

$$c_s = \frac{\sum q_{ss}}{\sum q} = \frac{Q_{ss}}{Q} \quad (7.7)$$

Cálculo da descarga sólida do leito e do material do leito – Na medição direta o sedimento seco é determinado, calculando-se a descarga do leito como:

$$Q_b = \frac{86,4}{E_r} \left(\frac{q_{b1}}{2} l_1 + \frac{q_{b1} + q_{b2}}{2} l_2 + \dots + \frac{q_{bn-1} + q_{bn}}{2} l_{n-1} + \frac{q_{bn}}{2} l_n \right) \quad (7.8)$$

sendo

Q_b = descarga sólida do leito, em *t/dia*

q_b = descarga sólida do leito num ponto, em *kg/(s.m)*

l = distância entre pontos medidos, em *m*

E_r = eficiência de amostragem do equipamento.

Neste tipo de medição tem-se que considerar na fórmula a eficiência de retenção do equipamento, valor esse determinado em laboratório.

Na medição indireta o cálculo da descarga sólida do leito é feito por *fórmulas*. Stevens & Yang (1989) estudaram as diversas fórmulas disponíveis, tendo selecionado 13 como as mais recomendáveis (Tabela 7.8), tendo, ainda, preparado programas de computador que estão disponíveis na publicação acima indicada.

Tabela 7.8 – Resumo das principais fórmulas para cálculo da descarga do leito e do material do leito apresentadas por Stevens & Yang (1989)

Autor da fórmula	Ano	Descarga de arrasto (B) ou de material do leito (BM)	Tipo de fórmula (1)	Tipo de sedimento (2)	Granulometria (3)
Ackers & White (*)	1973	BM	D	S	S, G
Colby	1964	BM	D	S	S
Einstein (carga do leito)	1950	B	P	M	S, G
Einstein (material do leito)	1950	BM	P	M	S
Engelund & Hansen (*)	1967	BM	D	S	S
Kalinske	1947	B	D	M	S
Laursen	1958	BM	D	M	S
Meyer-Peter & Muller (*)	1948	B	D	S	S, G
Rottner	1959	B	D	S	S
Schoklitsch (*)	1934	B	D	M	S, G
Toffaletti	1968	BM	D	M	S
Yang (areia) (*)	1973	BM	D	O	S
Yang (pedregulho) (*)	1984	BM	D	O	G

(1) Determinística (D) ou Probabilística (P)
 (2) Fração granulométrica de areia (S), composição ou mistura (M) ou opcional (O)
 (3) Areia (S) ou pedregulho (G)
 (*) Consideradas de maior confiança por Stevens & Yang

Cálculo da descarga sólida total – A descarga sólida total aproximada pode ser obtida como a soma da descarga em suspensão com a do material do leito, apesar deste procedimento ser questionado devido à imprecisão apresentada pela zona não amostrada.

A descarga sólida total pode ser obtida pelos processos de cálculo do *método modificado de Einstein* e pelo *método simplificado de Colby*. O primeiro método foi colocado no sistema métrico por Otto Pfafstetter, sendo os ábacos dependentes de unidades, adaptados por Carvalho (1994). Stevens (1979) preparou um programa computacional para a utilização deste método. O segundo método foi colocado também no sistema métrico por Carvalho (1981).

Tendo-se algumas medições pelo método modificado de Einstein, que é trabalhoso, pode-se utilizar esses valores para correções do método simplificado de Colby ou para obtenção de correlações para correções da descarga total (Yuqian, 1989).

Arbitrando o valor da descarga do leito – Considerando que sejam disponíveis somente dados de sedimentos em suspensão, o calculista procura arbitrar o valor da descarga não medida para ter a descarga total necessária à avaliação do assoreamento. Aqui no país é comum arbitrar esse valor como sendo 10%, enquanto há países cujos serviços arbitram até 30% da descarga em suspensão. ICOLD (1989) apresenta uma sugestão para escolha do método de obtenção da descarga do leito em função do material do leito e das porcentagens de areia existente na amostra em suspensão (Tabela 7.9). Essa tabela mostra a complexidade de somente arbitrar a %.

Tabela 7.9 – Guia para correção da descarga do leito e para orientação do método de obtenção dessa descarga (ICOLD, 1989)

Condição	Concentração de sedimento em suspensão (mg/l)	Material do leito	Granulometria do material do leito	% de carga do leito em relação à carga em suspensão
1 (1)	< 1000	Areia	20 a 50% de areia	25 a 150
2 (1)	1000 a 7500	Areia	20 a 50% de areia	10 a 35
3	> 7500	Areia	20 a 50% de areia	5
4 (2)	Qualquer concentração	Argila compactada, pedregulho, pedras roladas ou pedras	Qualquer quantidade até 25% de areia	5 a 15
5	Qualquer concentração	Argila e silte	Nenhuma areia	< 2

(1) Especial amostragem para cálculos pelo método modificado de Einstein são necessárias para essa condição
 (2) Um programa de medições diretas com um amostrador tipo Helley-Smith, ou outro medidor, ou mesmo o uso das fórmulas para material grosso

7.5 Processamento dos dados

O processamento dos dados visa a obtenção da descarga média e do deflúvio sólido médio anual ou de um período, bem como a obtenção de parâmetros representativos do fenômeno.

A primeira providência é um exame adequado na documentação de campo e do laboratório e, em seguida, a tabulação das medições efetuadas. A tabela deve conter os

seguintes itens: número da medição, data, valores da cota média, largura da seção, área, profundidade média, velocidade média, descarga líquida, concentração de sólidos dissolvidos, concentração de sedimentos, descarga sólida em suspensão, descarga sólida de arrasto ou de material do leito, descarga sólida total e método de obtenção. As curvas granulométricas devem sempre estar disponíveis para uso posterior, podendo-se fazer também uma tabulação das porcentagens de alguns diâmetros e os valores característicos de material do leito usuais (D_{10} , D_{35} , D_{50} , D_{65} e D_{90}).

7.5.1 Medições contínuas, horárias e diárias

Medições contínuas, horárias e diárias também devem ser tabuladas e calculada a descarga sólida. O trabalho preliminar consiste na calibragem dos valores de concentração medidos a partir da correlação com os dados do hidrometrista. Se algum valor não estiver disponível por não ter sido medido, então prepara-se um gráfico, como um hidrograma de vazões, e respectiva plotagem da concentração ou descarga em suspensão, para obtenção dos valores que faltam. Esses valores também podem ser obtidos a partir da equação da curva-chave de sedimentos preparada com os valores medidos.

Após a tabulação diária é possível obter a tabulação mensal e a anual contendo os sumários das descargas líquidas e sólidas médias. Um sumário mensal deve ser feito contendo os totais mensais, médias, valores máximos e mínimos. Em seguida faz-se um sumário anual que conste o transporte total anual (deflúvio sólido D_s), transporte médio anual (descarga sólida média anual Q_s), contribuição de sedimentos (produção de sedimentos P_s) e outros valores. Um exemplo de boletim semestral de cálculos efetuados pela CEMIG é apresentado na Tabela 7.10. A média dos valores médios anuais será utilizada nos cálculos de avaliação do assoreamento.

Tabela 7.10 – Boletim semestral de descarga em suspensão – Rio São Francisco em Porto das Andorinhas

Bacia do Rio São Francisco Posto nº 4010001 Área de Drenagem - 13300 km² Lat 19°18' Long 45°17'
Ano Hidrológico - 1981/82

DIA	OUTUBRO		NOVEMBRO		DEZEMBRO		JANEIRO		FEVEREIRO		MARÇO		DIA
	Descarga Líquida m ³ /s	Descarga Sólida t/dia	Descarga Líquida m ³ /s	Descarga Sólida t/dia	Descarga Líquida m ³ /s	Descarga Sólida t/dia	Descarga Líquida m ³ /s	Descarga Sólida t/dia	Descarga Líquida m ³ /s	Descarga Sólida t/dia	Descarga Líquida m ³ /s	Descarga Sólida t/dia	
01	60,5	159	214,0	7867	328,0	14087	709,0	24000	1070,0	12100	442,0	13025	01
02	66,0	5744	209,0	7900	407,0	16166	672,0	20568	1040,0	12376	445,0	12331	02
03	83,2	594	179,0	6153	453,0	14653	670,0	17172	1020,0	14183	456,0	11157	03
04	78,0	270	160,0	4274	578,0	16680	677,0	15878	1010,0	10129	486,0	18010	04
05	79,3	280	166,0	3841	545,0	19589	690,0	64228	995,0	9024	482,0	14240	05
06	84,5	826	202,0	4564	540,0	19581	721,0	60801	978,0	11803	495,0	13107	06
07	101,0	465	273,0	10864	542,0	15806	735,0	26035	963,0	10235	514,0	18551	07
08	108,0	484	284,0	11677	528,0	12672	757,0	24315	949,0	15686	574,0	41663	08
09	94,9	408	245,0	11377	507,0	10414	777,0	20515	937,0	13262	566,0	18819	09
10	101,0	465	227,0	8345	576,0	10545	791,0	17248	923,0	6113	607,0	19130	10
11	128,0	763	324,0	20073	564,0	9047	807,0	16385	905,0	15619	637,0	17602	11
12	163,0	1267	280,0	7285	632,0	9569	842,0	16761	891,0	14945	675,0	46383	12
13	177,0	9818	358,0	9037	662,0	12278	868,0	16447	876,0	12904	732,0	41484	13
14	192,0	1785	505,0	34526	687,0	15413	862,0	15780	856,0	12327	805,0	40400	14
15	286,0	4113	540,0	36956	704,0	12944	862,0	20889	830,0	12704	810,0	29837	15
16	383,0	7582	590,0	33269	715,0	28036	859,0	19474	799,0	12295	827,0	24432	16
17	403,0	8436	566,0	31314	732,0	29451	853,0	23702	757,0	12205	859,0	20481	17
18	412,0	8835	521,0	21231	754,0	31336	847,0	20261	712,0	12576	876,0	18687	18
19	412,0	8835	509,0	21712	774,0	31102	850,0	18200	665,0	12387	897,0	18568	19
20	373,0	7174	500,0	18232	788,0	34369	888,0	20270	617,0	13211	897,0	16349	20
21	316,0	5068	530,0	18496	799,0	35381	946,0	22408	571,0	15076	897,0	13949	21
22	309,0	4836	574,0	35079	807,0	36128	940,0	18337	528,0	15317	926,0	15156	22
23	316,0	5068	564,0	23645	813,0	36692	952,0	15271	489,0	13587	978,0	8794	23
24	267,0	3561	547,0	23732	813,0	36692	978,0	19312	462,0	12305	1010,0	10993	24
25	202,0	1985	500,0	19344	810,0	36409	1010,0	14462	445,0	12092	1060,0	12703	25
26	157,0	1171	533,0	33321	810,0	36409	1090,0	29030	431,0	10946	1020,0	9154	26
27	132,0	2774	442,0	15127	819,0	37262	1130,0	21049	429,0	8982	978,0	9065	27
28	125,0	726	405,0	8959	816,0	36977	1170,0	14710	441,0	11526	946,0	7244	28
29	152,0	1094	381,0	8995	785,0	34095	1170,0	10081	0,0	0	926,0	8076	29
30	174,0	1452	348,0	8784	743,0	30386	1140,0	7396	0,0	0	908,0	12701	30
31	192,0	1785	0,0	0	715,0	28036	1100,0	7305	0,0	0	894,0	10865	31
TOT	6122,4	97822	11676,0	505980	20746,0	750475	27363,0	658287	21595,0	345914	23625,0	572955	TOT
MED	197,5	3156	389,2	16866	669,2	24209	882,7	21235	771,3	12354	762,1	18482	MED
MAX	412,0	9818	590,0	36956	819,0	37262	1170,0	64228	1070,0	15686	1060,0	46383	MAX
MIN	60,5	159	160,0	3841	328,0	9047	670,0	7305	429	6113	442,0	7244	MIN

Transporte Total Anual	3746731t	SUMÁRIO ANUAL	13412
Máximo Transporte Diário	64228t	Deflúvio Total Anual	10**6 m ³
Mínimo Transporte Diário	87t	Transporte Médio Anual	10285/dia
Máxima Concentração Anual	1077mg/l	Escoamento Específico	32 l/s/km ²
Mínima Concentração Anual		Contribuição de Sedimento	282t/km ² .ano

7.5.2 Medições eventuais

O processamento de dados de medições eventuais é feito através da preparação da curva-chave de transporte de sedimentos utilizando a concentração ou descarga sólida em função da descarga líquida. Uma prática comum é trabalhar com o papel bilogarítmico como o exemplo da Figura 7.12. As curvas podem ser obtidas pelo processo visual ou pelo método dos mínimos quadrados como é utilizado no Excel. Deve-se tomar muito cuidado quando da utilização do computador, especialmente quando há uma concentração de dados que influencia a direção da curva. Costuma-se assimilar uma ou mais linhas retas e obter as respectivas equações exponenciais do tipo abaixo. Para obtenção de mais que uma linha ordena-se a descarga sólida ou a descarga líquida por valores crescentes.

$$Q_s = a.Q^n \quad (7.9)$$

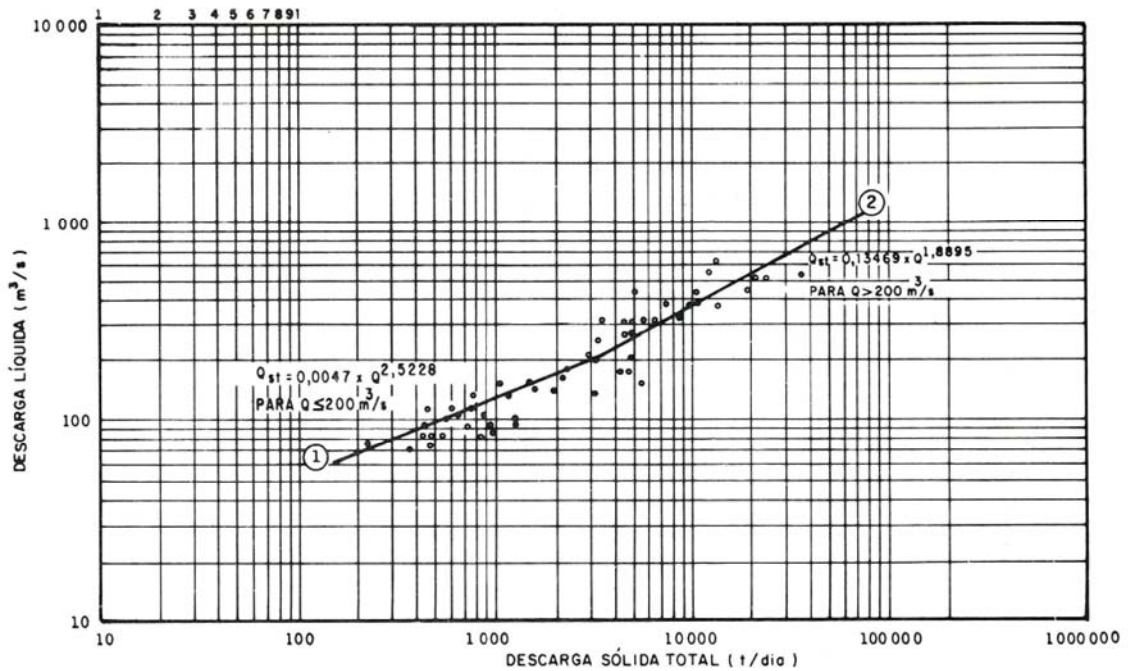


Figura 7.12 – Curva-chave de sedimentos do rio Manso em Porto de Cima - medições do período 1977/1981 (Carvalho, 1994)

Através das equações da curva-chave correspondentes a um determinado período, pode-se obter as respectivas descargas sólidas, os valores médios e parâmetros necessários. Quando é disponível uma série de vazões de vários anos utiliza-se esta para obtenção da série de descarga sólida, o que é feito aceitando-se a equação como verdadeira para o período (ver exemplos nas Tabelas 7.11 e 7.12).

Tabela 7.11 – Rio Manso em Porto de Cima
Série de vazões naturais (m³/s).

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MED
31	191	256	259	195	129	92,8	65,7	61,5	47,3	161	162	184	150
32	232	217	333	149	111	104	72,3	93,3	58,5	109	121	228	152
33	369	355	190	250	114	83,4	70,5	61,6	66,2	71,7	96,8	166	158
34	200	308	333	215	108	81	67,5	54,2	90,5	77,2	102	238	156
35	360	439	371	440	180	114	94,2	83,5	73,6	90,1	134	190	214
36	215	198	245	123	91,1	70,7	60,9	53,2	50,9	55,4	117	183	122
37	200	195	239	313	118	91,5	67,9	55,3	53,2	82,1	114	170	142
38	258	218	255	172	91,3	74,2	60	51,1	75,8	72,8	76,7	169	131
39	146	342	149	129	87,7	68,9	58,3	49	45,6	82,7	157	255	131
40	366	375	397	225	149	93,8	80	69,6	65,8	82,1	108	128	178
41	265	287	212	178	88,7	72,9	59,9	56,2	50	78,6	116	121	132
42	144	356	545	262	122	95,1	82,9	68,3	74,3	86,3	105	120	172
43	393	262	527	264	95,1	90,3	79,5	66,5	64,3	115	249	233	203
44	157	256	213	168	91,5	75,7	59,7	49,2	44,4	77,5	206	176	131
45	320	568	429	416	155	113	95,1	79,8	72,2	89,5	144	220	225
46	241	449	359	205	143	96,3	83,5	68,7	59,6	73	126	173	173
47	211	290	272	279	134	88,8	70,9	84,9	63,9	179	154	225	171
48	203	288	294	168	94,4	77,3	82,8	53,8	80,2	161	198	290	166
49	360	479	296	156	119	99,2	89	81,4	77,3	102	119	242	185
50	282	266	505	330	132	106	93	83,9	78,1	107	149	193	194
51	365	227	293	217	117	100	84,9	77,6	74,9	88,6	120	197	164
52	231	283	428	267	123	101	89,5	80,8	80,2	82,2	102	186	171
53	218	320	342	219	123	95,6	85,7	77,8	91,7	95,8	101	201	164
54	183	353	380	241	159	108	92,4	83,3	84,1	88,4	156	129	171
55	371	244	320	351	136	109	93	84,3	77,7	92,8	99,6	164	179
56	234	241	227	258	186	124	98,8	86,8	88	100	225	287	180
57	308	410	379	294	138	113	100	87,8	99,6	122	183	215	204
58	234	338	215	264	154	88,5	99,2	63,3	72,2	158	187	287	180
59	380	305	502	229	155	119	103	93	87,1	99,9	151	128	196
60	396	581	343	354	175	120	105	93,2	85,4	105	175	201	228
61	345	411	346	168	146	106	93,7	84,3	81,8	98,1	110	126	176
62	306	292	207	161	104	94,2	81,1	76,7	80	83,3	91,6	261	153
63	251	381	218	145	103	85	77,1	68,7	64,8	66,9	114	96,2	139
64	146	179	165	106	87,9	59,7	52,8	47,4	43,8	104	154	158	109
65	226	312	396	229	124	91,1	78	65,9	60,8	94,9	96,8	141	160
66	115	387	178	110	88,9	70	59,8	53,8	53,7	83,7	94	97,4	116
67	124	237	224	196	115	74,6	60,8	52,8	49,5	61,9	96,1	119	118
68	129	449	296	116	91,7	72,6	62,3	60,1	67,7	90,4	78,1	212	144
69	267	198	184	118	95	67,6	58	51,2	49,5	76,7	107	129	117
70	171	380	382	141	106	77,7	66,4	56,7	57	79,3	81,6	109	142
71	125	169	186	108	85,8	68,8	58,7	53,3	56	91,8	131	152	107
72	171	378	161	138	86,9	74,2	67,2	60,2	57,3	76,9	110	255	136
73	277	217	140	139	113	73,1	64,4	59,1	60,5	84,5	193	164	132
74	297	254	714	353	151	106	85,4	76,2	75,4	106	96,7	180	208
75	240	302	210	293	156	110	92,8	70,9	71,3	79,5	228	239	174
76	172	380	312	196	160	117	84,2	74,2	81	111	144	218	171
77	414	408	225	231	151	106	81,6	73,7	77,6	92,1	126	248	186
78	386	222	333	169	123	99,3	80,8	71,9	78	109	119	451	187
79	569	455	428	284	168	110	93,5	80,6	86	86,7	91,4	209	222
80	453	647	492	209	136	99,7	85,9	72,4	79,3	79	103	265	227
81	451	279	411	219	141	116	98,1	87,6	85,1	111	165	214	198
82	397	436	395	292	142	112	96	91,4	111	98,4	116	143	202
83	330	381	248	193	116	106	86,7	79,6	77,9	101	234	417	198
84	249	268	253	233	172	107	88,7	89,4	96,6	108	136	342	179
85	498	267	365	252	146	102	89,9	82,2	87,1	114	100	116	185
86	348	338	267	134	129	84,6	76,4	77,8	82	91	98,2	315	170
87	273	230	269	256	130	91,3	76,3	69,8	68,3	84,9	127	289	164
88	404	351	363	252	130	99	83,4	75,3	74,1	83,5	108	162	182
89	199	266	220	148	111	103	100	98	97	101	112	144	142
90	242	359	336	185	113	99	93	90	92	95	110	151	164
91	352	610	578	299	210	186	170	159	166	216	114	137	266
92	284	297	301	274	218	187	177	172	178	194	213	280	231
MED	278	330	317	221	129	97,1	83,3	74,8	75,5	99,0	133	201	170
MÁX	569	647	714	440	218	187	177	172	178	216	249	451	
MÍN	115	169	140	106	85,8	59,7	52,8	47,4	43,8	55,4	76,7	96,2	

7.5.3 Regionalização de dados

Caso existam dados de pelo menos dois postos no curso d'água, obtém-se os valores médios de cada posto, traça-se uma linha em função da área de drenagem e obtém-se o valor do deflúvio utilizando a área de drenagem do posto (ver Figura 7.13 de exemplo do Rio São Francisco e Rio das Velhas, segundo Carvalho, 1994).

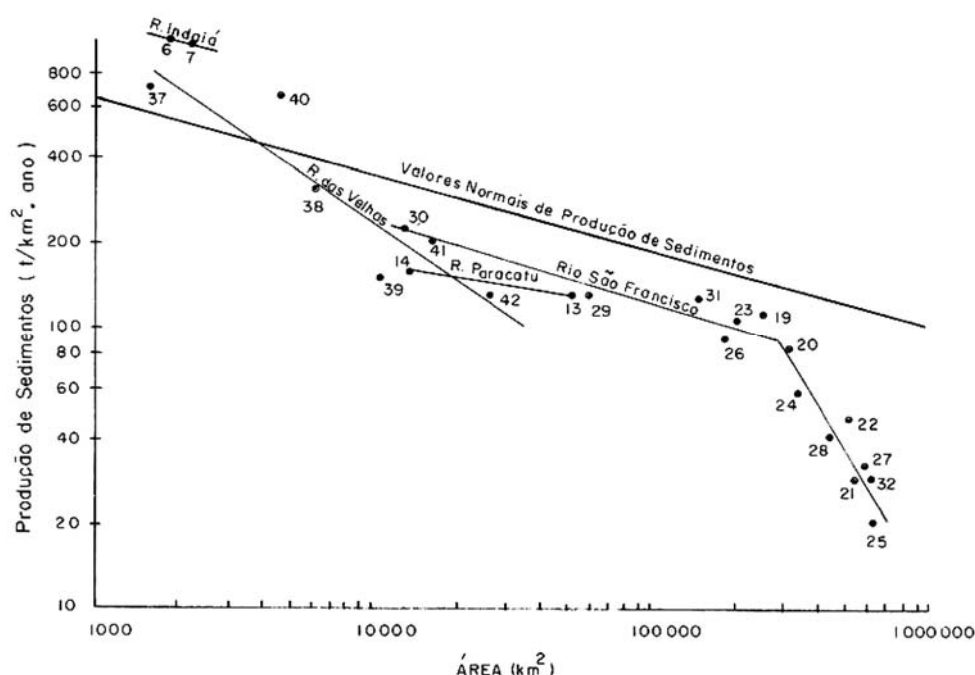


Figura 7.13 – Bacia do São Francisco – Linhas de produção de sedimentos (Carvalho, 1994)

A regionalização para dados da mesma bacia também pode ser feita por meio da análise das características do local em relação às características da bacia (ver Figura 7.14 onde foi procurado valor da descarga sólida em UHE Mascarenhas no Rio Doce). A regionalização de dados sedimentométricos é perigosa, devendo ser feita com muito cuidado, não sendo recomendada.

Trabalhos científicos do tipo de curvas mundiais também não devem ser utilizados em estudos, servindo apenas como curiosidade.

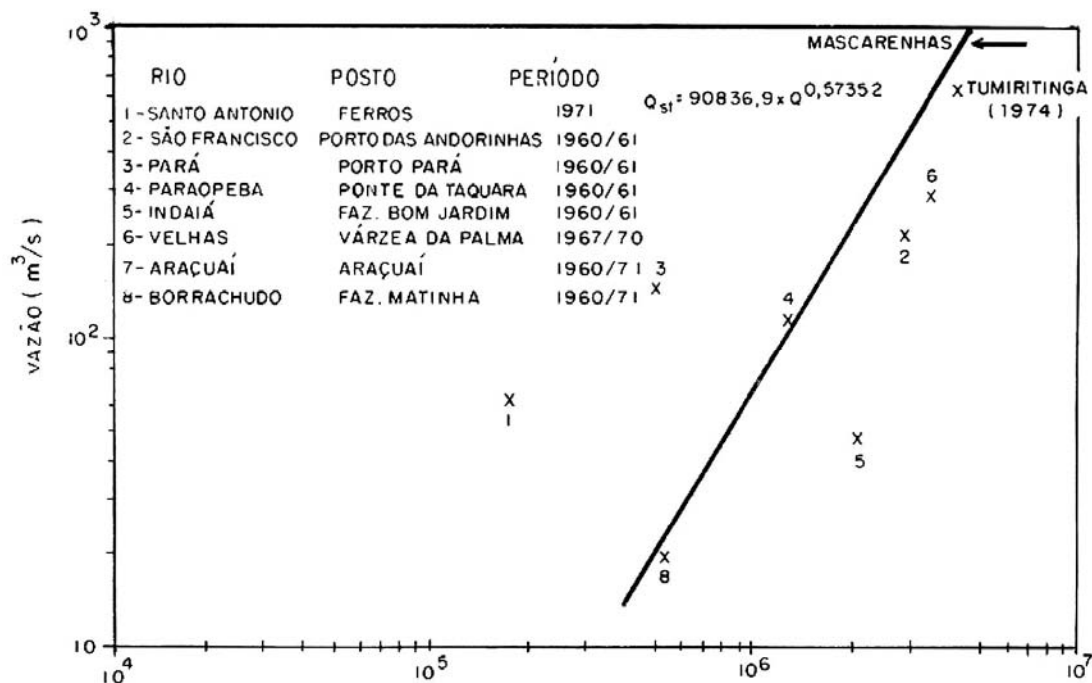


Figura 7.14 – Exemplo de regionalização de dados sedimentométricos – Relação entre vazões e descargas sólidas em bacias vizinhas às do Rio Doce – Medições de 1960 a 1971 (Carvalho, 1994)

Na regionalização com dados de outras bacias procura-se verificar quais as curvas possíveis de serem obtidas e utilizar aquela cujas características são compatíveis com a posição do posto. No exemplo da Figura 7.15 foi utilizada a curva superior para obtenção de produção de sedimento em local de construção de barragem no rio Doradas. Notar que existe na curva valor de P_s correspondente ao posto nesse curso d'água (ponto 6).

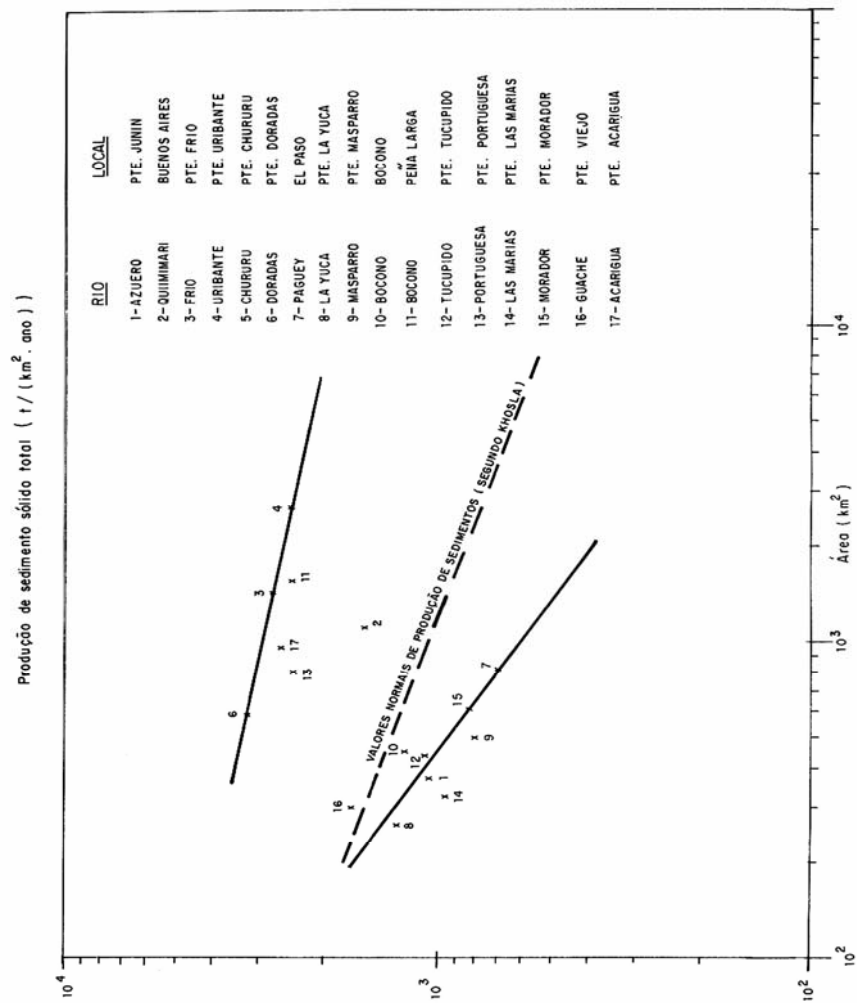


Figura 7.15 – Regionalização com dados de várias bacias (Carvalho, 1994)

8. EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTO EM UM RESERVATÓRIO

O valor da eficiência de retenção de sedimentos num reservatório pode ser obtido a partir de medições sistemáticas das descargas sólidas afluente e a jusante da barragem. No caso de estudos anteriores à construção da barragem utilizam-se curvas obtidas a partir de levantamentos de reservatórios existentes. Para médios e grandes reservatórios utiliza-se a curva de Brune e para pequenos adota-se a curva de Churchill.

8.1 Caso de médios e grandes reservatórios

A curva de Brune apresenta no eixo das ordenadas o valor da *eficiência de retenção de sedimentos* no reservatório, em porcentagem ou em fração, e no eixo das abscissas a *capacidade de afluência*, correspondendo ao volume do reservatório dividido pelo deflúvio médio anual afluente. Utiliza-se o volume do reservatório correspondente ao nível d'água máximo normal. A curva de Brune pode ser obtida em Carvalho (1994), Morris/Fan (1997), Strand (1974) ou Vanoni (1977).

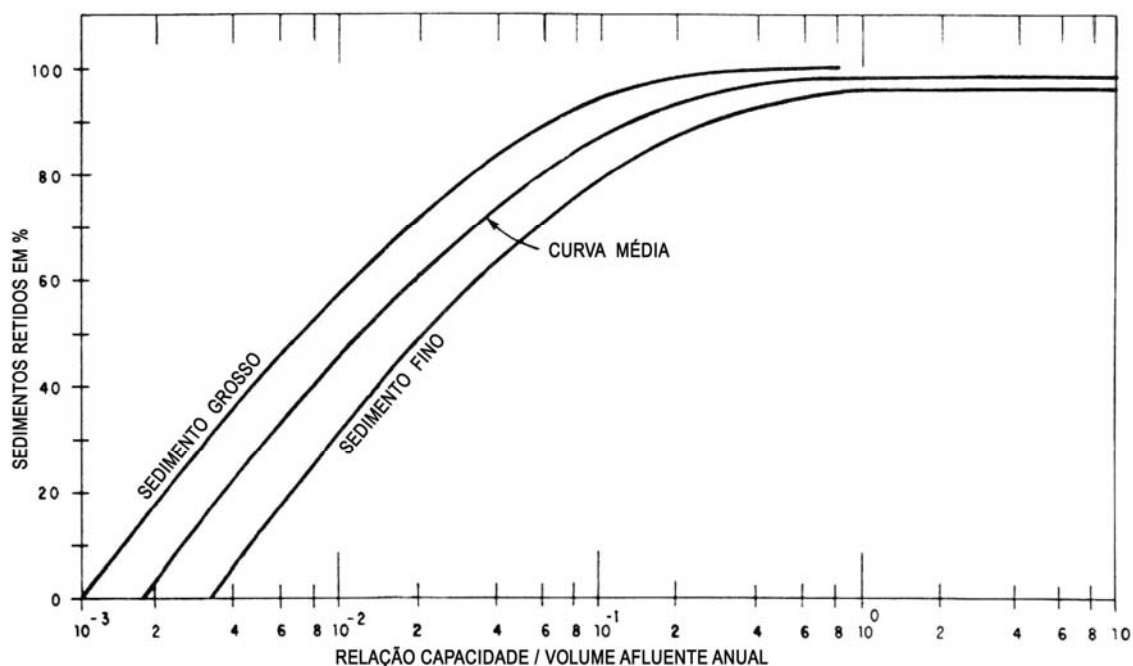


Figura 8.1 – Curvas de eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios, segundo Brune (Vanoni, 1977 e outros)

8.2 Caso de pequenos reservatórios

A curva de Churchill é apresentada em três versões, necessitando cuidados no seu uso. Em qualquer uma delas, o eixo das ordenadas representa a porcentagem do sedimento afluente que passa para jusante da barragem. Assim, a eficiência de retenção é obtida por diferença e deve ser expressa em fração para efeito de cálculo.

A curva de Churchill apresentada por Morris/Fan (1997), Strand (1974) ou Vanoni (1977) é ilustrada na Figura 8.2. Nela, o eixo das abscissas corresponde ao valor do *Índice de Sedimentação do Reservatório IS* que é igual ao *Período de retenção* dividido pela *Velocidade média no reservatório*. Esses parâmetros são calculados da seguinte forma:

- *Período de retenção* = volume do reservatório (ft³) dividido pela vazão média diária durante o período de estudo (ft³/s);
- *Velocidade média no reservatório* = vazão média diária (ft³/s) dividido pela área da seção transversal média (ft²). A área da seção transversal média pode ser determinada pela divisão do volume do reservatório pelo seu comprimento (ft).

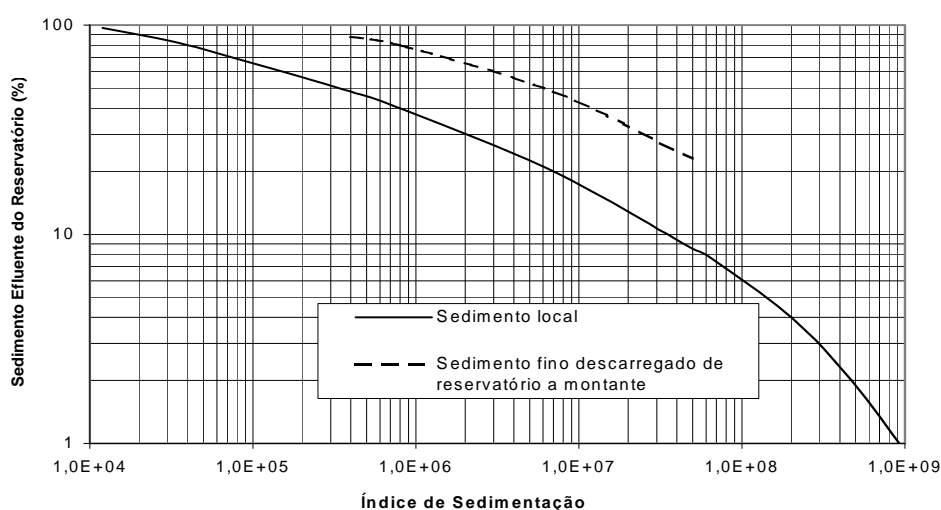


Figura 8.2 – Curva de eficiência de retenção de sedimentos segundo Churchill, versão apresentada em Vanoni, 1977

O volume do reservatório corresponde à capacidade no nível médio de operação. Os pequenos reservatórios geralmente operam a fio d'água, sendo o volume desse nível o que ser utilizado. Deduzindo-se das informações acima, chega-se à seguinte expressão para o *Índice de Sedimentação* utilizada na versão da curva de Churchill apresentada na Figura 8.2:

$$IS = \frac{\text{Período de retenção}}{\text{Velocidade média}} = \frac{V_{res}^2}{Q^2 \cdot L} \quad (8.1)$$

sendo:

IS = Índice de sedimentação do reservatório;

V_{res} = Volume do reservatório no nível médio de operação (ft³);

Q = Vazão afluyente média diária durante o período de estudo (ft³/s);

L = Comprimento do reservatório (ft).

Uma outra versão da curva de Churchill para uso no sistema métrico, apresentada por ICOLD [1989], tem no eixo das ordenadas, na parte superior do desenho, o índice de sedimentação de Churchill multiplicado pela aceleração da gravidade g , sendo:

$$IS.g = \frac{V_{res}^2}{Q^2.L} \cdot g \quad (8.2)$$

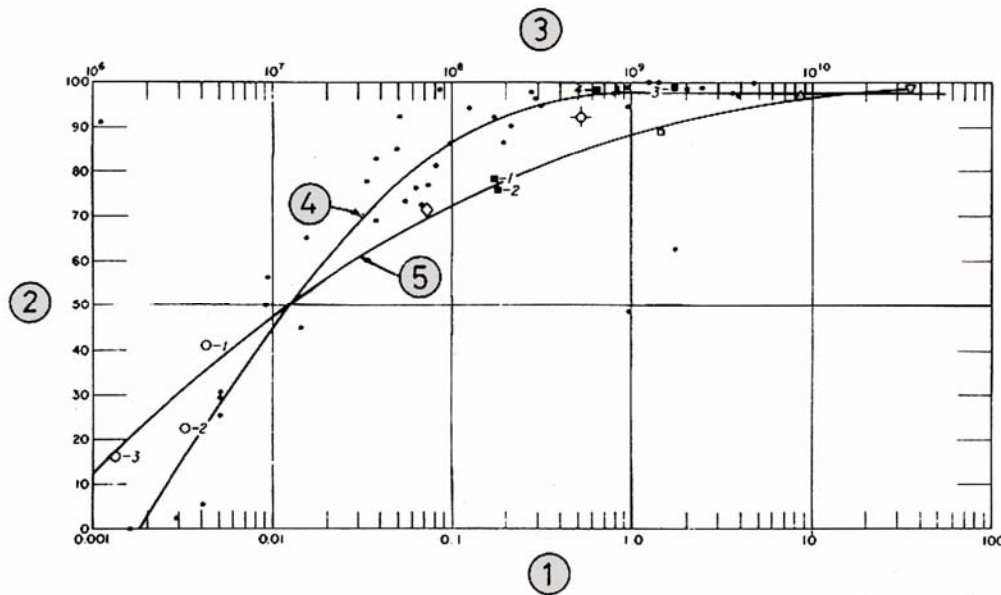


Figura 8.3 - Curva de eficiência de retenção de sedimentos segundo Churchill, versão apresentada em ICOLD (1989), onde: 1: Relação Capacidade do Reservatório / Vazão afluente média anual; 2: Sedimento retido, em %; 3: $SIxg$ - Índice de sedimentação x g (constante de aceleração da gravidade); 4: Curva de Brune média e; 5: Curva de Churchill

Uma terceira versão da curva de Churchill, modificada por Roberts, é apresentada por Annandale (1987). Neste gráfico (Figura 8.4), o eixo das ordenadas é expresso conforme anterior 8.2, ficando a diferença segundo a apresentação da curva.

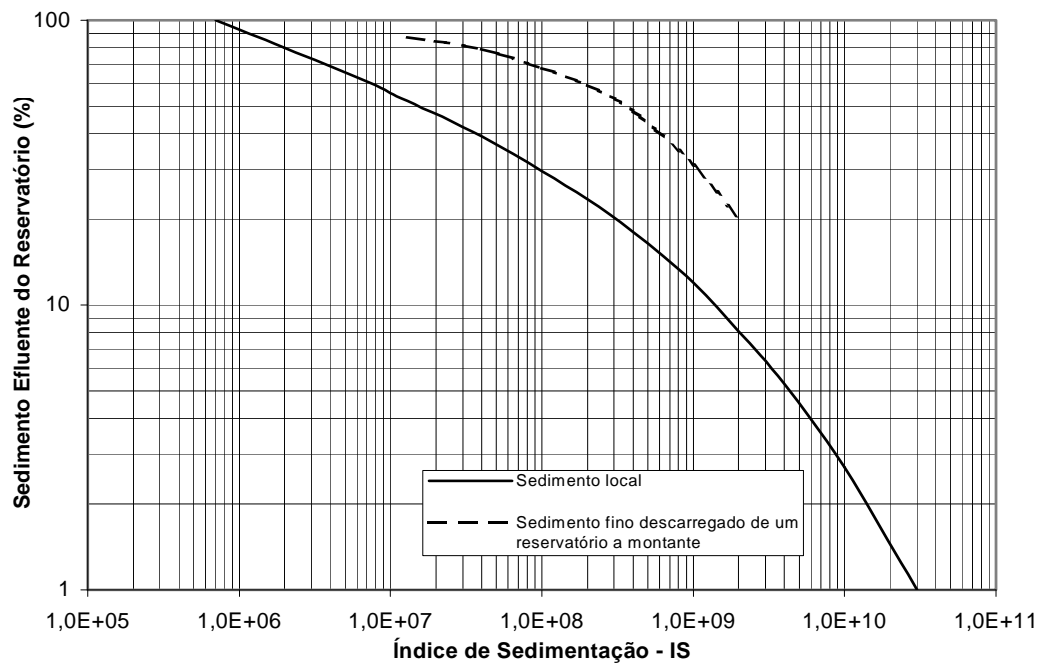


Figura 8.4 - Retenção de sedimentos no reservatório de acordo com Churchill (Annandale, 1987)

9. PESO ESPECÍFICO APARENTE DOS DEPÓSITOS

O deflúvio sólido é geralmente calculado em termos de peso por tempo, como t/ano, devendo ser transformado em volume equivalente, como m³/ano, através do conhecimento do peso específico aparente. Lara e Pemberton chegaram à conclusão através de pesquisas com amostragem em reservatórios existentes, que o peso específico aparente dos depósitos de sedimento pode ser calculado segundo o tipo de operação desse reservatório, do grau de compactação dos sedimentos e da granulometria, fatores esses, que mais influenciam na consolidação dos depósitos. Outros fatores de menor influência podem ser citados, como densidade de correntes de sedimento no reservatório, declividade do talvegue do curso d'água afluente e o efeito da vegetação na área das cabeceiras do reservatório.

9.1 Calculado

O cálculo do peso específico aparente inicial e depois de compactado, após um determinado período, é efetuado pelas equações a seguir, cujos fatores das parcelas serão obtidos segundo o tipo de operação do reservatório (Tabela 9.1).

$$\gamma_i = W_c \cdot P_c + W_m \cdot P_m + W_s \cdot P_s$$

$$\gamma_T = \gamma_i + K \cdot \log T \quad \text{para camadas específicas}$$

ou

$$\gamma_T = \gamma_i + 0,4343 \cdot K \left[\frac{T}{T-1} (\ln T) - 1 \right] \quad \text{para todas as camadas}$$

$$K = K_c \cdot P_c + K_m \cdot P_m + K_s \cdot P_s$$

sendo:

γ_i = peso específico aparente inicial (t/m³);

W_c , W_m , W_s = coeficientes de compactação de argila, silte e areia, respectivamente, obtidos segundo o tipo de operação do reservatório (Tabelas 9.1 e 9.2);

P_c , P_m , P_s = frações de quantidades de argila, silte e areia contidas no sedimento afluente;

γ_T = peso específico aparente médio em T anos (t/m³);

T = tempo de compactação do sedimento depositado (anos);

K = constante que depende da granulometria do sedimento e obtida com base no tipo de operação do reservatório (Tabela 9.2);

\ln = logaritmo neperiano.

Os valores dos coeficientes γ_i , γ_T e K apresentados por Strand foram transformados para uso no sistema métrico (Carvalho, 1994).

Tabela 9.1 - Tipo de operação de reservatório (adaptado de Strand, 1974)

Tipo	Operação do reservatório
1	Sedimento sempre ou quase sempre submerso
2	Depleção do reservatório de pequena a média
3	Reservatório de significativas variações de nível
4	Reservatório normalmente vazio

Tabela 9.2 - Constantes W e K para cálculo do peso específico aparente em função do tipo de operação do reservatório para uso no sistema métrico (adaptado de Strand, 1974)

Tipo	Argila		Silte		Areia
	W_c	K_c	W_m	K_m	W_s
1	0,416	0,2563	1,121	0,0913	1,554
2	0,561	0,1346	1,137	0,0288	1,554
3	0,641	0,0000	1,153	0,0000	1,554
4	0,961	0,0000	1,169	0,0000	1,554

Obs: As constantes K para areias são nulas para todos os tipos de operação.

Para utilização das equações e respectivas tabelas é necessária a obtenção das porcentagens médias de argila, silte e areia contidas nos sedimentos em suspensão e do leito, bem como as porcentagens da descarga sólida em suspensão média e descarga sólida média do leito. Em seguida, deve-se fazer a composição necessária para o conhecimento das porcentagens de argila, silte e areia (material grosso) referentes à descarga sólida total.

Seja, por exemplo, que o cálculo da descarga sólida média tenha indicado como 85% para descarga em suspensão e 15% para descarga do leito, a granulometria média entre as diversas análises das amostras do sedimento em suspensão durante o período de observação resultado em 45% de argila, 50% de silte e 5% de areia e do leito, 3% de argila, 8% de silte e 89% de areia. Então, os cálculos para obtenção de P_c , P_m e P_s podem ser feitos como indicado na Tabela 9.3.

Tabela 9.3 - Exemplo de cálculos das porcentagens médias de argila, silte e areia para uso nas fórmulas de Lara e Pemberton para obtenção do peso específico aparente em reservatórios

	Argila %	Silte %	Areia %	Q_{ss} %	Q_{sa} %	P_c %	P_m %	P_s %
Sedimento em suspensão	45	50	5	85	-	$0,45 \times 85 = 38,25$	$0,50 \times 85 = 42,50$	$0,05 \times 85 = 4,25$
Sedimento do leito	3	8	89	-	15	$0,03 \times 15 = 0,45$	$0,08 \times 15 = 1,20$	$0,89 \times 15 = 13,35$
Total						38,7	43,7	17,6

Uma vez calculadas as porcentagens totais de P_c , P_m e P_s deve-se verificar a eficiência de retenção de sedimentos no reservatório e subtrair do sedimento fino a porcentagem que sai pelos condutos para que seja calculado o peso específico aparente.

9.2 Medido

Para medição do peso específico aparente existem dois processos, ditos direto e indireto. No processo indireto, ou *in situ*, utiliza-se um medidor nuclear, tipo radioativo de densidade. No processo indireto utiliza-se coletar uma amostra indeformada com um equipamento tipo gravidade ou piston-core, medir o volume da amostra, levar a mesma à estufa e determinar o peso seco. Essas medidas devem ser efetuadas em várias posições do reservatório para verificação da variação do peso específico e obtenção do valor médio.

9.3 Estimado

De acordo com as equações pode-se avaliar a variação do peso específico aparente inicial da seguinte forma:

- se o sedimento for somente argila, então γ_i variará de 0,42 a 0,96;
- se o sedimento for somente silte, então γ_i variará de 1,12 a 1,17;
- se o sedimento for somente areia, então γ_i será igual a 1,55;
- tendo-se uma composição de iguais porções de argila, silte e areia, tem-se uma variação de 1,02 a 1,22.

Nos pequenos reservatórios o material predominante que fica depositado é a areia, então arbitra-se o peso específico aparente inicial entre 1,4 a 1,5 t/m³; nos reservatórios de porte médio pode-se ter uma composição com peso específico que varia de 1,2 a 1,4 t/m³, enquanto para grandes reservatórios, aonde somente pequena quantidade de finos passa pelos condutos e vertedouro, esse valor pode variar de 1,1 a 1,3 t/m³. É claro que o conhecimento da bacia e da qualidade dos sedimentos existentes pode permitir ao técnico fazer melhores avaliações.

Para uma avaliação mais precisa do peso aparente pode-se utilizar os valores apresentados por Zhide (1998), Tabelas 9.4 e 9.5.

Tabela 9.4 – Peso específico médio aparente inicial de depósitos em reservatórios, em t/m³ (Zhide, 1998)

Tipo de operação de reservatório	Argila (< 0,004mm)	Silte (0,004-0,062mm)	Areia (0,062-2,0mm)
Sedimento sempre ou quase sempre submerso	0,416	1,120	1,550
Depleção do reservatório de pequena a média	0,561	1,140	1,550
Reservatório de significativas variações de nível	0,641	1,150	1,550
Reservatório normalmente vazio	0,961	1,170	1,550

Tabela 9.5 – Peso específico médio aparente de longo prazo de depósitos em reservatórios, em t/m³ (Zhide, 1998)

Sedimento	Granulometria (mm)	Peso específico aparente (t/m³)
Argila	< 0,005	0,8 a 1,2
Silte	0,005 a 0,05	1,0 a 1,3
Areia média e fina	0,01 a 0,5	1,3 a 1,5
Areia grossa e pedregulho fino	0,5 a 1,0	1,4 a 1,8
Pedregulho médio	> 1,0	1,7 a 2,1

10. PREVISÃO DO ASSOREAMENTO DE UM RESERVATÓRIO

10.1 Métodos de avaliação do assoreamento

Os métodos de previsão da avaliação do assoreamento de um reservatório são função dos objetivos a serem atendidos. Na fase de inventário o principal objetivo é estimar o tempo de assoreamento total e a vida útil do aproveitamento. Em caso de haver indicação de sérios problemas no tempo da vida útil, então esses estudos podem ser um pouco mais aprofundados para que sejam melhoradas as estimativas econômicas dos arranjos. Nas fases de viabilidade e projeto básico os estudos são mais laboriosos, procurando-se garantir a verificação dos efeitos do assoreamento e as soluções gerais de controle de sedimento (controle preventivo). Na fase de operação procura-se acompanhar o assoreamento através de levantamentos sistemáticos, monitoramento sedimentométrico, vigilância sobre as transformações na bacia e outros estudos, sempre visando a possibilidade de controle preventivo e, quando não for possível, o controle corretivo mais adequado.

Uma avaliação de somente volumes e tempos de assoreamento é feita pelas equações 6.1 e 6.2. No entanto isto não é suficiente para caracterizar o assoreamento, sendo necessário estudos mais adequados que levem em conta a previsão como indicada no item 4 e também levando em consideração a fase dos estudos do aproveitamento. O sedimento afluyente que entra no reservatório pode se depositar ou sair através da barragem. Os depósitos formados podem ser permanentes ou, em algumas situações, esses depósitos podem se mover pelo reservatório. Na ocasião de enchentes pode ocorrer que algum sedimento possa ser removido e passar pela barragem.

Comumente o sedimento fino, com granulometria inferior a 0,062mm, pode se mover em suspensão pelo reservatório formando correntes de densidade. Em grandes reservatórios parte desse sedimento fino pode se depositar mais próximo da barragem enquanto parte pode sair para jusante. O sedimento grosso, com granulometria maior que 0,062mm, normalmente se deposita no reservatório para formar o delta. À medida que os depósitos se formam, os sedimentos grossos adentram o reservatório depositando-se a montante e aumentando o remanso. O processo é complexo, sendo o seu estudo feito adequadamente pelas fórmulas da hidráulica de sedimentos. O estudo pode ser feito pelas equações de Saint Venant para escoamento líquido ou por algumas das fórmulas de transporte de sedimentos com modificações (Bruk, 1985). Atualmente, existem vários métodos para previsão do assoreamento e distribuição dos depósitos, sendo o mais conhecido o HEC-6 que possibilita vários tipos de estudos, estando disponível em programa de computador para uso livre.

Métodos mais simples, semi-empíricos, baseados em levantamentos sistemáticos de reservatórios, são, por exemplo, o *método empírico de redução de área*, de Borland & Miller, e o *método da área incremental*, ambos divulgados em vários livros (Strand, 1974; Vanoni, 1977; Annandale, 1987 e Morris/Fan, 1997).

10.2 Avaliação do assoreamento total, do volume morto e da vida útil

Essa avaliação pode ser feita pelas equações 6.1 e 6.2. Utilizando como exemplo os aproveitamentos de Itaipu (Rio Paraná) e Itiquira (Rio Itiquira), estão apresentados na Tabela 10.1 os dados e resultados de cálculo.

$$S = \frac{D_{st} \times E_r}{\gamma_{ap}} = \frac{365 \times Q_{st} \times E_r}{\gamma_{ap}} \quad \text{e} \quad T = \frac{V_{res}}{S}$$

sendo:

S = volume de sedimento retido no reservatório (m³/ano);

D_{st} = deflúvio sólido total médio anual afluyente ao reservatório (t/ano);

E_r = eficiência de retenção do sedimento afluyente ao reservatório (% e fração);

γ_{ap} = peso específico aparente médio dos depósitos (t/m³);

Q_{st} = descarga sólida total média afluyente ao reservatório (t/dia);

T = tempo de assoreamento de um determinado volume (anos);

V_{res} = volume do reservatório, total ou volume morto (m³).

Tabela 10.1 - Avaliação do assoreamento dos reservatórios das UHE's de Itaipu e Itiquira (ver Carvalho, 1994 e Carvalho e outros, 2000)

Dados	Reservatório de Itaipu (ITAIPU BINACIONAL)	Reservatório de Itiquira (ITICON S.A.)
Nível d'água máximo normal	220,00 m	412,00 m
Nível d'água mínimo normal	197,00 m	411,50 m
Nível d'água na soleira da tom. d'água	176,00 m	
Volume no NA máx. normal	29 x 10 ⁹ m ³	4,8 x 10 ⁶ m ³
Volume no NA mín. normal	10 x 10 ⁹ m ³	4,2 x 10 ⁶ m ³
Volume morto (na soleira tom. d'água)	4,7 x 10 ⁹ m ³	3,9 x 10 ⁶ m ³
Vazão média de longo termo Q_{mlt}	9.729 m ³ /s	72,9 m ³ /s
Comprimento do reservatório	170 km	5.600 m
Equações de transporte de sedimentos	$Q_{st} = 1,704 \times 10^{-31} \cdot Q^{8,9034}$ para $Q < 10000 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q_{st} = 6,121 \times 10^{-6} \cdot Q^{2,5146}$ para $Q > 10000 \text{ m}^3/\text{s}$ (período 1988/1989)	$Q_{st} = 46,888 \times Q^{0,9472}$ (período 1979/1982)
Descarga sólida total média anual Q_{st} (obtida da equação e da série de vazões)	71.063 t/dia (período de 1931/1992)	2.715 t/dia (período de 1931/1997)
Deflúvio sólido total médio anual D_{st} ($= 365 \times Q_{st}$)	30.788.845 t/ano	990.775 t/ano
Obtenção da eficiência de retenção E_r	Curva de Brune: Capac. afluência = 0,098	Seg. Roberts (Annandale, 1987), curva de Churchill

	$E_r = 86\%$	$IS.g = \frac{9,8x(4,8x10^6)^2}{(72,9)^2 x 5600} = 7,6x10$ $E_r = 45\%$ (adotado 50%)
Peso específico aparente γ_{ap}	Seg. Lara e Pemberton 1,13 t/m ³	Seg. Lara e Pemberton 1,5 t m ³
Volume de sedimento médio anual (calculado a partir da equação de transporte de sedimento e da série de vazões)	23,37 x 10 ⁶ m ³ /ano	330.325 m ³ /ano
Tempo de assoreamento do volume total, no NA máx. normal	1240 anos	14 anos
Tempo de assoreamento do volume no NA mín. normal	430 anos	12,7 anos
Tempo de assoreamento de um volume igual volume na soleira da tom. d'água (vida útil do reservatório)	200 anos	12 anos
Tempo de assoreamento do volume total considerando aumento do transporte de sedimento desde o ano das medições de descarga sólida (1982)	-----	15 meses

10.3 Avaliação da vida útil de um aproveitamento

A vida útil do aproveitamento sob o ponto de vista sedimentológico, é considerado quando os sedimentos alcançam a soleira da tomada d'água e passam a perturbar ou impedir a operação.

Para cálculo mais preciso do que aquele apresentado na Tabela 10.1, deve-se levar em conta a distribuição do sedimento no reservatório e o aumento da taxa de erosão ou transporte de sedimento. Pode-se calcular a altura de depósito de sedimento no pé da barragem ou da posição da tomada d'água para diversos tempos e traçar um gráfico de avaliação para obter o tempo que esses depósitos alcançarão a soleira. Os métodos para esse cálculo foram indicados no item 10.1.

10.4 Distribuição dos sedimentos no reservatório

Conforme demonstrado no Capítulo 3 (ver Figura 3.1), os depósitos de sedimento num reservatório se formam irregularmente, havendo formação de um delta na área de remanso que vai adentrando o lago com o tempo e com a maior carga sólida. Os sedimentos finos vão se depositando no interior e mais próximo da barragem.

A avaliação dessa distribuição pode ser feita por vários métodos, conforme comentado no item 10.1.

10.5 Aumento da erosão na bacia

O aumento do transporte de sedimento num curso d'água é consequência do aumento da erosão na bacia. Tendo-se dados de descarga sólida média anual de vários anos e as respectivas vazões médias, pode-se calcular a taxa de aumento no transporte de sedimento através de curva de massa. A seguir é apresentado um exemplo para ilustração, retirado do trabalho de Carvalho/Guilhon/Trindade (2000) que trata do estudo de avaliação do assoreamento do reservatório de Itiquira, no Rio Itiquira, MT.

Os anos próximos de 1980 apresentaram grandes transformações na região devido à expansão da área agrícola, o que provocou o recrudescimento da erosão das terras. Foi nessa época que houve formações de grandes voçorocas em São Gabriel do Oeste, situada na bacia vizinha do rio Taquari. Isso, inclusive, induziu organizações internacionais a colaborarem na reconstituição dos terrenos e na orientação para o manejo adequado dos solos.

Para a verificação da evolução da erosão através da análise do transporte de sedimentos no curso d'água, foram utilizados os dados de descarga líquida e descarga sólida total do posto do Rio Itiquira a Montante da Estrada BR-163. Foram preparadas duas curvas-chave de sedimentos, sendo a primeira para os anos de 1979/1980 (Figura 10.1) e a segunda para os anos de 1981/1982 (Figura 10.2). É desejável que se tenha suficientes dados para permitir curvas-chave com precisão desejável, de preferência para cada ano.

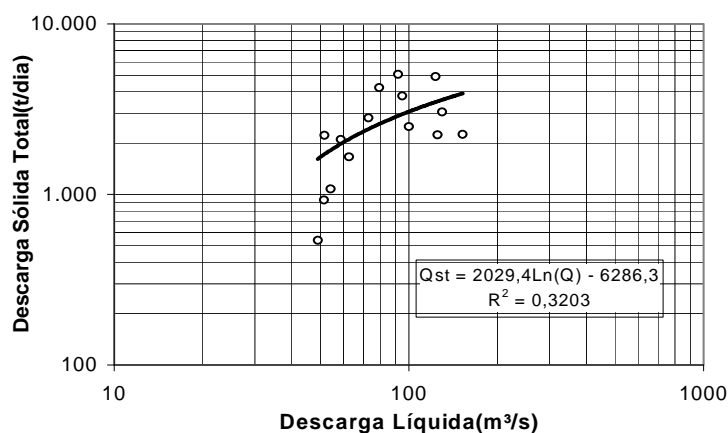


Figura 10.1 - Curva-chave de sedimentos totais em Itiquira, período 1979/1980 (Carvalho/Guilhon/Trindade, 2000)

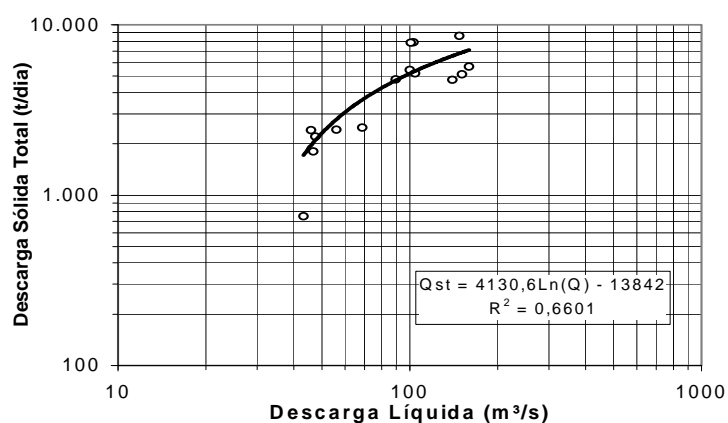


Figura 10.2 - Curva-chave de sedimentos totais em Itiquira, período 1981/1982 (Carvalho/Guilhon/Trindade, 2000)

Utilizando as equações correspondentes e os dados da série de vazões mensais, foram obtidos os valores médios anuais e descargas sólidas anuais para os respectivos anos, tendo sido acumulados conforme mostrado na Tabela 10.2.

Tabela 10.2 - Valores de vazões e carga sólida acumuladas - Itiquira, de 1979 a 1982

Anos	Vazões	Vazões acumuladas	Descargas sólidas	Desc. sól. acumuladas
	(m³/s)	(m³/s)	(t/dia)	(t/dia)
1979	112,1	112,1	3.036	3.036
1980	109,1	221,2	3.040	6.075
1981	88,3	309,5	4.473	10.548
1982	88,3	397,8	4.374	14.923

Os dados de vazões e descargas sólidas acumuladas foram, então, utilizados para o traçado da curva de massa (Figura 10.3). A partir da observação dessa curva pode-se concluir que o transporte de sedimento no curso d'água aumentou no período de 1979 a 1982, evidenciando o incremento de erosão na bacia devido ações antrópicas.

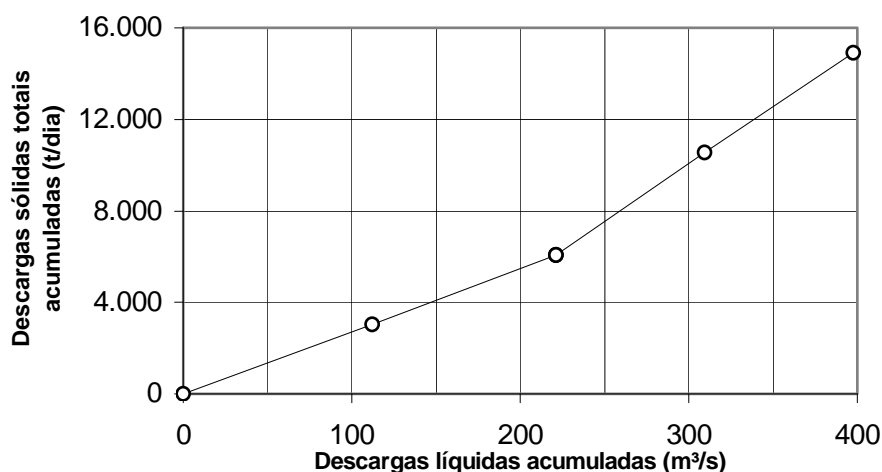


Figura 10.3 - Curva de massa de sedimentos para o Itiquira - período 1979/1982 (Carvalho/Guilhon/Trindade, 2000)

A taxa de variação do transporte de sedimento pode ser calculada a partir das razões entre as descargas sólidas e vazões correspondentes como (ver Tabela 10.2):

$$r_1 = \frac{3.036 + 3.040}{112,1 + 109,1} = 27,5 \quad \text{e} \quad r_2 = \frac{4.473 + 4.374}{88,3 + 88,3}$$

A taxa de aumento de transporte de sedimento no período é calculada como:

$$E_c = \frac{r_2 - r_1}{r_1} = 0,82$$

Isso significa que houve um aumento do transporte de sedimento 82% entre 1979 e 1982, valor muito alto para o pequeno período em estudo, o que pode comprometer o reservatório com um assoreamento rápido.

O cálculo da taxa anual, considerando a pequena amostragem de 4 anos, é feito com a seguinte equação:

$$(1 + R_i)^4 = 1,82$$

o que resulta para o aumento anual de transporte de sedimento R_i o valor de 16,15%.

Para a porcentagem assoreada em 10 anos ou em um tempo t calcula-se como:

$$(1 + 0,1615)^{10} - 1 = 3,47 = 347\% \quad \text{e} \quad (1 + R_i)^t - 1 = P$$

11. MEDIÇÃO DO ASSOREAMENTO DE UM RESERVATÓRIO

Todos os reservatórios fatalmente ficarão assoreados em maior ou menor tempo. A questão primordial é verificar se não haverá problemas que venham impedir a operação do aproveitamento dentro do tempo de vida útil econômica. Por outro lado procura-se minimizar os efeitos secundários derivados do sedimento.

Em razão disso faz-se a previsão do assoreamento na fase de planejamento e procura-se acompanhar a formação dos depósitos e os efeitos do assoreamento na fase de operação independente do porte do reservatório.

É certo que estudos dessa natureza sempre trazem experiências e novos conhecimentos no campo da Sedimentologia. Assim, o monitoramento sedimentométrico de postos nos cursos d'água, a verificação dos problemas de erosão nas margens do lago e também no canal a jusante da barragem, bem como o levantamento topo-batimétrico dos reservatórios, trazem subsídios tanto para os empreendedores como para a Ciência.

11.1 Finalidades do levantamento

O levantamento inclui a parte terrestre e a parte submersa interessadas aos estudos. O que se faz é a comparação entre dois levantamentos efetuados em épocas diferentes, mesmo que seja com o uso do mapa de interpretação aerofotogramétrica da fase de planejamento. As referências topográficas têm de ser as mesmas. Os levantamentos devem apresentar mesmo grau de precisão para garantia de resultados comparáveis.

A determinação da nova capacidade e do grau de assoreamento são as principais finalidades do levantamento topo-batimétrico. Pode-se citar resumidamente os seguintes produtos do levantamento:

- determinação do volume de água ou capacidade do reservatório nas condições atuais (da época do levantamento), sendo a capacidade remanescente;
- determinação da nova área do espelho d'água;
- desenho das novas curvas cota x área e cota x volume;
- determinação da nova geometria do leito do reservatório;
- desenho da curva de dejeção de sedimentos;
- verificação das características físicas dos sedimentos acumulados;
- quantificação do sedimento assoreado no período, por comparação com levantamentos anteriores ou do mapa da época de formação do reservatório;
- determinação da capacidade de retenção de sedimentos pelo reservatório;
- determinação da descarga sólida média afluente;
- verificação da porcentagem de sedimento depositado no reservatório, no volume morto e o volume perdido na área do volume útil.

11.2 Frequência de levantamentos

A frequência de levantamentos nos reservatórios depende de vários fatores, sendo os principais a sua capacidade total e a quantidade possível de depósito de sedimento devido à carga sólida do rio. Os pequenos reservatórios e aqueles cuja carga sólida afluyente é grande devem ser levantados com maior frequência. Por outro lado, reservatórios cuja carga sólida afluyente fica reduzida terão a frequência de levantamento diminuída. É o caso, por exemplo, em que a área de drenagem foi reduzida pela construção de uma barragem a montante (Vanoni, 1977), ou ainda, quando a bacia contribuinte reduziu o valor do deflúvio sólido devido a sua proteção.

O custo financeiro é um fator de grande influência na frequência de levantamentos de reservatórios. A disponibilidade de recursos para esses trabalhos é geralmente escassa, principalmente porque o depósito de sedimento fica submerso, fora do alcance da sensibilidade dos dirigentes. Considerando que o custo do levantamento seja justificado em função de uma atualização de verificação da capacidade do reservatório e do volume de assoreamento, pode-se considerar o critério indicado na Tabela 11.1. Fica evidente que em reservatórios com grande taxa de depósito de sedimentos são realizados levantamentos mais frequentes.

Tabela 11.1 - Frequência desejável para levantamentos topo-batimétricos de reservatórios

Porte do reservatório	Classificação em volume (m ³)	Frequência de levantamento
Pequeno	< 10 x 10 ⁶	Cada 2 anos
Médio	entre 10 a 100	Cada 5 anos
Grande	> 100	Cada 10 anos

Nota: A classificação aí apresentada não é rígida, podendo ter diferentes conceitos em outros países

Alguns dos seguintes motivos ou providências podem ajudar a reduzir a frequência ou auxiliar na decisão sobre a necessidade de um levantamento (Vanoni, 1977):

- dados de medições sedimentométricas na área contribuinte, mostrando grande deflúvio sólido;
- observações da área normalmente submersa em ocasiões de deplecionamento do reservatório;
- uma verificação na precisão da curva de capacidade do reservatório, quando do cálculo dos volumes afluentes e efluentes durante estudos de operação;
- medições de reconhecimento em algumas seções batimétricas do reservatório;
- quando problemas especiais associados com a deposição de sedimento no reservatório são revelados (por exemplo, uma grande enchente pode provocar a sedimentação de um pequeno reservatório, devendo ser verificada; a erosão e queda de grandes taludes com grande contribuição de depósito).

É comum estudos do acompanhamento do assoreamento do reservatório através do levantamento periódico de algumas seções. Esta prática não oferece boa precisão no acompanhamento do assoreamento e da vida útil. No entanto, se o levantamento dessas seções for feito entre levantamentos completos, o resultado poderá ser utilizado na decisão de ampliar o prazo no levantamento seguinte.

Após o enchimento de um reservatório a providência de efetuar o levantamento topo-batimétrico completo, fornece curvas cota x área e cota x volume com maior precisão do que aquelas levantadas por interpretação aerofotogramétrica que normalmente não considera o leito do rio.

Outros trabalhos acompanham esses estudos como, por exemplo, a amostragem de sedimentos em suspensão e do leito para caracterização do material. A amostragem de sedimento do leito deve incluir a determinação do peso específico aparente a partir de amostras indeformadas ou medições diretas. Esta medida é necessária devido à compactação dos depósitos pelo peso da água ou atividades geológicas (ICOLD, 1989).

11.3 Métodos de levantamento

Os procedimentos gerais para levantamentos de reservatórios têm mudado com o avanço científico e com o surgimento de novas tecnologias e equipamentos. Basicamente, o procedimento geral é construir mapa batimétrico do fundo do lago, que pode ser comparado com um mapa previamente preparado (Bruk, 1985). Os dois métodos mais comuns empregados no levantamento de reservatórios são:

- 1) método de levantamento de contornos do reservatório;
- 2) método de levantamento de linhas topo-batimétricas.

A seleção do método depende da disponibilidade e condições do mapeamento prévio, dos objetivos de estudo, do tamanho do reservatório e do grau de precisão desejado.

11.3.1 Levantamento do contorno do reservatório

Esse tipo de levantamento é restrito a pequenos reservatórios ou àqueles que podem ser esvaziados a um nível muito baixo. O custo desse tipo de trabalho é geralmente grande mas tem alta precisão.

O método do levantamento do contorno usa essencialmente os procedimentos de mapeamento topográfico por aerofotogrametria, obtendo-se fotos do reservatório nos mais diversos níveis. O método é especialmente adequado para levantamentos aéreos quando os vôos podem ser programados para diferentes níveis de deplecionamento do reservatório em um intervalo de tempo relativamente curto.

11.3.2 Levantamento topo-batimétrico

O levantamento topo-batimétrico do reservatório pelo método do levantamento de seções transversais é o mais largamente usado para médios e grandes reservatórios (Bruk, 1985). Os procedimentos básicos são os seguintes:

- obtenção de mapas de boa escala do reservatório;
- reconhecimento preliminar;
- procura de marcos de levantamento altimétrico e de coordenadas;
- planejamento das seções a levantar;
- escolha dos métodos de trabalho e dos equipamentos (incluindo barcos apropriados, meios de comunicação durante os trabalhos, equipe bem treinada etc.);
- determinação do nível de redução do levantamento, normalmente o nível máximo normal;
- instalação de réguas liminimétricas ao longo do reservatório para acompanhamento dos níveis;
- instalação de novos marcos de referência;
- medida de profundidades e locação simultânea desses pontos (altitudes ou cotas);
- interpretação, cálculos, mapeamento, desenhos de seções transversais e outros;
- preparação de relatório constando mapas, desenhos e conclusões.

Tendo-se os marcos de referência identificados em altitudes e coordenadas, o passo seguinte é a implantação de novos marcos nas seções transversais e sua identificação. O método moderno com uso do DGPS dispensa a instalação de marcos em todas as seções, ficando somente alguns, o que deve ser planejado em função do porte do reservatório. As diversas tecnologias disponíveis é que irão condicionar todo o restante do trabalho, tanto no serviço de apoio terrestre, equipamentos de uso, quantidade de pessoal, tempo de levantamento, quanto no serviço de escritório, como mapeamento, cálculos necessários e no resultado conclusivo. As metodologias modernas permitem um levantamento de melhor precisão, podendo ser efetuado em menor tempo.

Métodos tradicionais e modernos – O método a ser utilizado depende da largura da seção a levantar, da profundidade, do porte do reservatório, dos recursos disponíveis e de outros fatores. Vai desde métodos simples, com uso de trena e régua, até métodos sofisticados, com uso do DGPS. A Tabela 11.2 apresenta um resumo dos métodos.

Tabela 11.2 – Métodos utilizados em levantamentos topo-batimétricos de rios e reservatórios

Método		Utilização	Observação
Medida da distância	Medida da profundidade		
Trena	Régua, escala graduada	Rios ou braços de lagos estreitos e rasos	Medição a vau ou até 2m
Cabo de aço	Sonda ou lastro	Rios ou braços de lagos rasos ou profundos, larguras até 300m	Medição a vau ou canoa
Sextante	Sonda ou ecobatímetro de leitura direta	Rios ou braços de lagos rasos ou profundos, larguras até 2km	Instalar linha básica na margem de tal forma a que sejam lidos ângulos maiores que 30°
Teodolitos (2 ou 3)	Ecobatímetro digital ou analógico	Rios ou braços de lagos rasos ou profundos, larguras até 2km	Instalar linha topográfica básica na margem de tal forma a que sejam lidos ângulos maiores que 30°
Distanciômetro ou Estação total	Ecobatímetro digital ou analógico	Seções transversais até 10km de largura	Pode ser gravado em meio magnético para uso em plotter
Sistema eletrônico de posicionamento Trisponder ou Motorola	Ecobatímetro digital ou analógico	Seções transversais até 50km	Gravado em meio magnético para uso em plotter
DGPS	Ecobatímetro digital	Seções transversais e distâncias até 50km	Gravado em meio magnético para uso em plotter
Equipamento multi-feixe (<i>towfish</i>) e posicionamento	Geofísica (<i>side scan sonar</i>)	Varredura vertical e lateral	Permite o levantamento vertical e lateral do leito e também das camadas depositadas

Em trabalhos de medida da profundidade com a sonda, posicionamento com sextante ou cabo de aço, o barco deve ficar parado. Em trabalhos com ecobatímetro digital ou analógico o barco se move em velocidade lenta, entre 2 a 5 nós.

Em trabalhos de posicionamento com o sextante ou teodolito é necessária a implantação de uma linha topográfica na margem com referências niveladas e contra-niveladas. Para levantamentos com o distanciômetro pode-se amarrar os marcos com um GPS de boa resolução. A amarração da posição dos marcos no sistema eletrônico é feito com o próprio equipamento, sendo que as estações têm que ser “visíveis” entre si, sem obstáculos que impeçam a transmissão e recepção. Ver Figuras 11.1, 11.2, 11.3, 11.4 e 11.5.

Em qualquer tipo de levantamento, caso o nível do reservatório esteja abaixo do nível de referência (chamado nível de redução) será necessário complementar o levantamento de cada seção e margem por topografia terrestre.

O DGPS é o método atual mais utilizado e que oferece melhor precisão na amarração dos pontos. Os registros ficam todos em meio magnético para uso em plotter. Utiliza-se um GPS fixo na margem e o DGPS no barco, sendo este conectado com o de terra que, por sua vez, fica conectado com três ou mais satélites. O erro no posicionamento de 50km é de no máximo 3m (Figura 11.6).

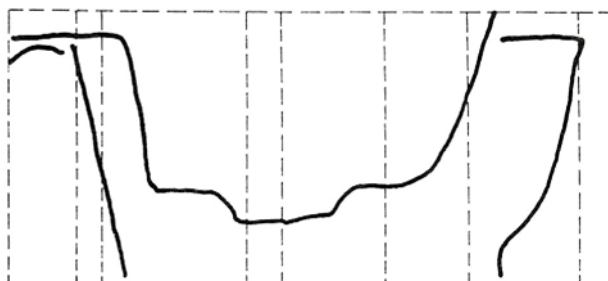


Figura 11.1 – Ecograma simplificado de levantamento de seção transversal

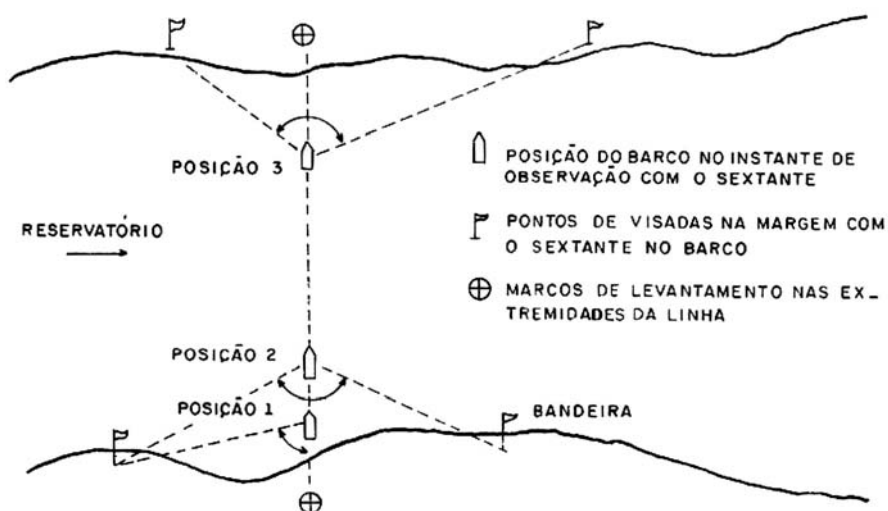


Figura 11.2 – Locação dos pontos de profundidade medidos ao longo de uma seção transversal com sextante

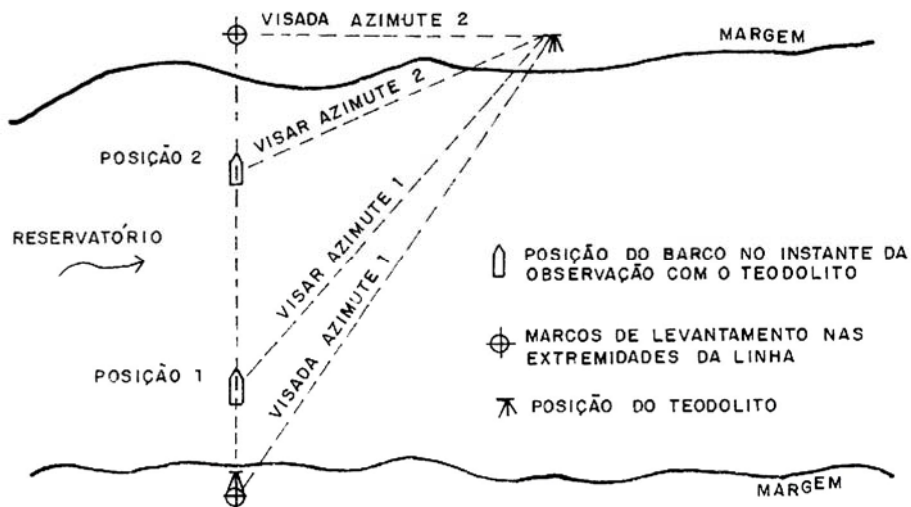


Figura 11.3 – Localização de pontos de profundidade medidos ao longo de uma seção transversal com o uso de teodolitos

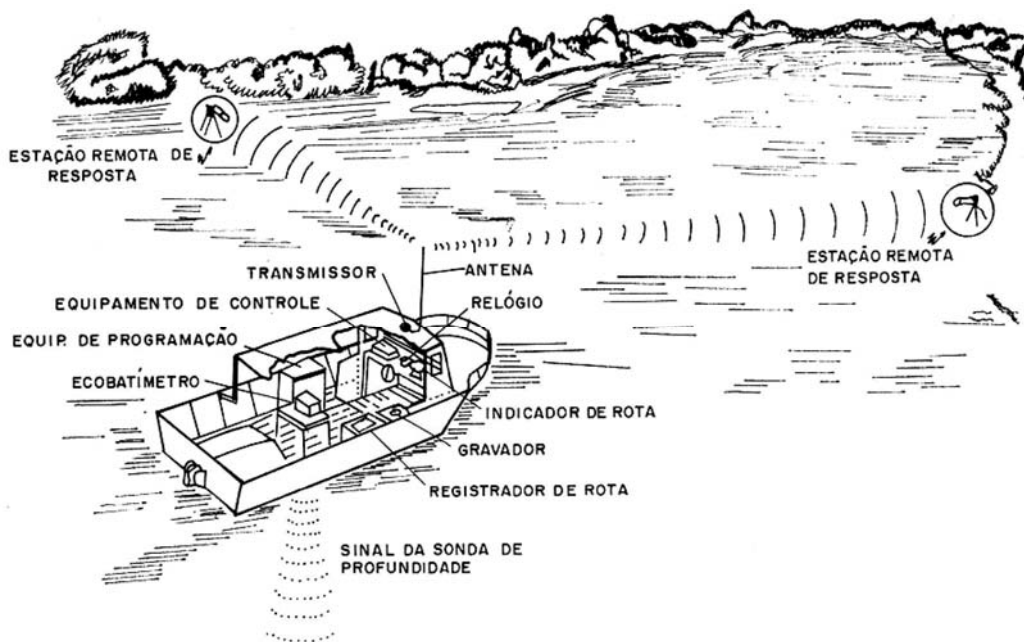


Figura 11.4 – Esquema da operação de levantamento pelo sistema eletrônico (Bruk, 1985)

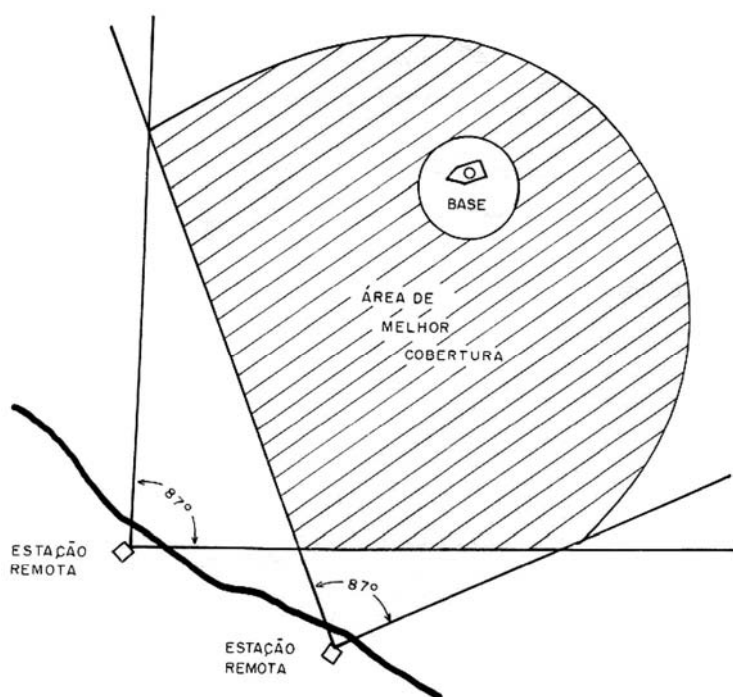


Figura 11.5 – Posicionamento de estações fixas e móvel no sistema eletrônico de levantamento

Escolha das seções a levantar – Procura-se adensar as seções de forma a obter-se a precisão adequada para o traçado das isóbatas no mapa de escala escolhida. Normalmente, para pequenos reservatórios, desenha-se numa folha que contenha todo o lago, que pode ser do tamanho aproximado dos mapas apresentados pelo IBGE ou de, no máximo, 1,0x1,0m. Para grandes reservatórios os mapas serão apresentados em mais de uma folha, tendo o desenho da articulação. A escala tem que ser adequada à qualidade e precisão desejada, assim, segundo orientação da DHN (Marinha), as seções nos desenhos devem estar distanciadas de 1,0cm, sendo na Tabela 11.3 apresentada uma orientação.

Tabela 11.3 – Distanciamento das seções transversais

Escala do mapa	Distância entre seções (m)	Tipo de reservatório	Observação
1 : 2.000	20	Pequeno	Permite o desenho de seções a cada 1,0cm no mapa
1 : 5.000	50	Médio	
1 : 10.000	100	Médio a grande	
1 : 20.000	200	Grande	
1 : 25 000	250	Grande	

Caso o leito não apresente grandes variações, pode-se adotar distanciamento maior, como de 2,0 ou de 3,0cm entre seções transversais no desenho (divide-se por 100 a escala do mapa para obter aquele distanciamento). Nas Figuras 11.6 e 11.7 são apresentados esquemas de levantamentos em pequenos e grandes reservatórios (Vanoni, 1977).

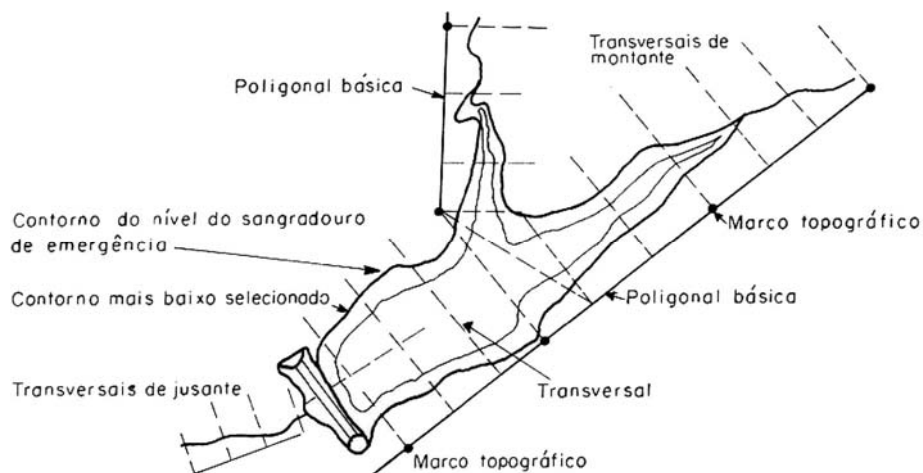


Figura 11.6 – Esquema de seções transversais a serem levantadas em caso de pequeno reservatório (Vanoni, 1977)

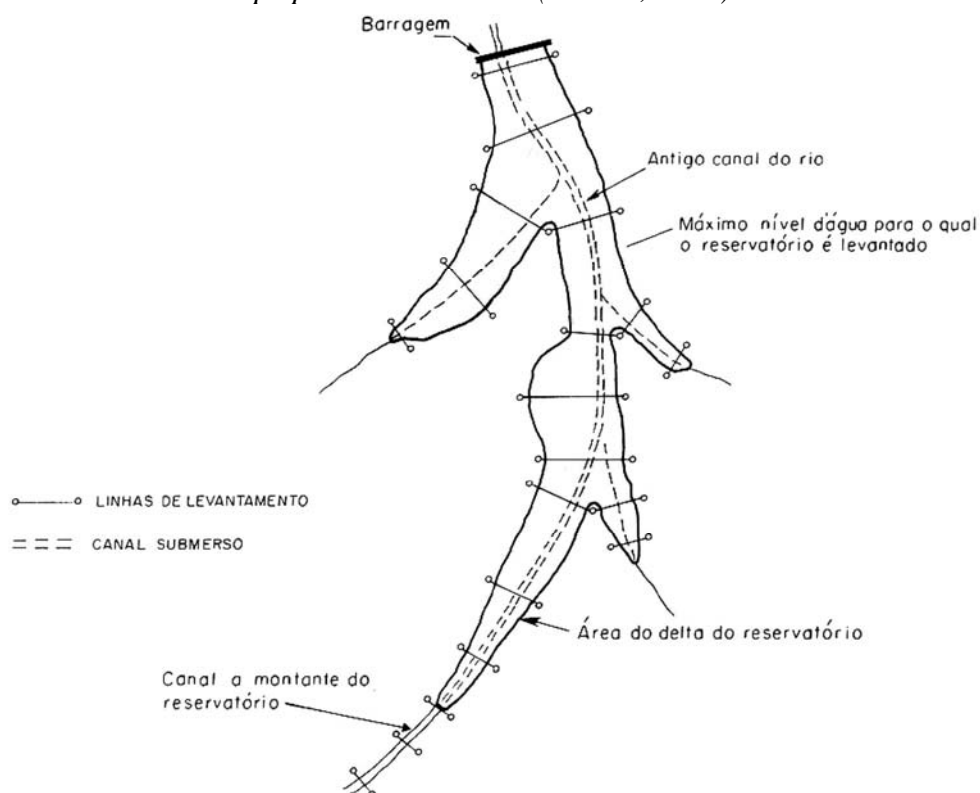


Figura 11.7 – Esquema de linhas de levantamentos em grandes reservatórios (Vanoni, 1977)

11.4 Especificações de levantamentos

A especificação é uma necessidade para serviços dessa natureza, tendo a intenção de orientar os trabalhos. A seguir é apresentada uma sugestão de trecho de especificação onde as seções ficam mais distanciadas, levantando-se uma linha longitudinal para auxiliar no traçado mais preciso das linhas isobáticas.

Deverão ser levantadas seções topo-batimétricas transversais e uma seção longitudinal, sendo o levantamento referenciado ao nível d'água máximo normal do reservatório. As seções transversais se distribuirão desde o trecho a montante da área de remanso do reservatório até bem próximo da barragem e também no canal do rio a jusante. A seção longitudinal deverá ser feita ao longo do antigo leito até próximo da barragem.

Serão fornecidos croquis de localização das referidas seções transversais e da seção longitudinal.

Para a realização desses serviços deverão ser observados os seguintes itens:

- As seções serão selecionadas de tal forma a apresentar no mapa escolhido uma distância de 2,0cm. Na área do remanso até a posição do que se considera a formação do delta inicial, as seções foram selecionadas de forma a ter distância no mapa de 1,0cm.
- Os serviços serão compostos da definição das seções transversais, da implantação e amarração de referências de nível, materializadas por marcos geodésicos necessários ao levantamento, da instalação e operação de réguas limnimétricas, do estabelecimento de seções transversais permanentes para acompanhamento futuro, da locação dos pontos e sua batimetria, coleta e análise de sedimento do leito.
- A jusante da barragem, as seções a serem levantadas serão definidas após exame das condições de erosão de margens. Em todas essas seções transversais deverão ser instaladas referências de nível para uso em futuros levantamentos.
- As seções indicadas nos afluentes diretos ao reservatório deverão ser feitas até o limite do remanso.
- *Referências de nível* – Os marcos geodésicos para realização do levantamento e garantia da boa qualidade dos trabalhos de campo, referenciados ao nível máximo normal do reservatório, deverão, sempre que necessário, ser implantados com coordenadas plani-altimétricas conhecidas. Os marcos básicos para a amarração serão localizados próximos à barragem e ao reservatório, no alinhamento das seções transversais. A densificação da rede de apoio deverá ser feita através de pontos, materializados em marcos de concreto, identificados de acordo com as normas vigentes do IBGE, devendo a amarração dos pontos estar dentro dos parâmetros

compatíveis com um trabalho considerado de primeira ordem. Para os cálculos geodésicos deverá ser utilizado o “Sistema Geodésico de Referência - SAD/69”.

- Para todas as referências de nível (RRNN) instaladas deverão ser apresentados croquis de localização com todos os dados necessários a sua perfeita caracterização. Além disso, deverão estar adequadamente referenciados nos mapas do levantamento.
- *Instalação de réguas* - Considerando as grandes distâncias a serem levantadas e a necessidade de que o trabalho seja referenciado ao nível máximo normal do reservatório, as réguas a serem instaladas deverão ser posicionadas de forma adequada, com referência de nível materializada nas suas proximidades e amarradas entre si, principalmente altimetricamente. Durante o levantamento, as réguas deverão ser lidas em pequeno intervalo de tempo, podendo ser a cada hora. A quantidade de postos limnimétricos dependerá do distanciamento das posições das estações de referência a serem utilizadas no levantamento.
- Para todos esses postos deverão ser apresentadas fichas descritivas de instalação.
- *Posicionamento* - O posicionamento de cada profundidade medida deverá ser feito por meio de sistema de satélite, recomendando-se o DGPS (*Differential Global Positioning System*). O sistema registra continuamente a posição da embarcação utilizada, através de uma estação receptora a bordo (*Mobile receiver*) e uma estação rastreadora de referência (*Reference station*), locada em ponto de coordenada conhecida em terra. Este conjunto opera comunicando-se entre si (*data link*), possibilitando que a estação baseada em terra envie os dados de correção de posicionamento à estação móvel, obtendo-se, assim, uma melhor precisão nas coordenadas obtidas a bordo. O sistema deverá operar pelo posicionamento contínuo das profundidades medidas, com precisão de 2 a 5,0m e alcance de 50 a 80km.

Ao sistema deverá estar acoplado um micro-computador, apresentando um programa pré-estabelecido da área e das linhas a serem levantadas, contendo o espaçamento entre linhas, a direção dos perfis e o intervalo entre os pontos sondados, conforme a definição da malha, permitindo também o reposicionamento da embarcação em qualquer perfil ou posição desejada, o que deverá ser mostrado adequadamente no visor do computador.

- *Batimetria* - Para o levantamento batimétrico deverá ser utilizado um ecobatímetro digital de boa qualidade, com transdutor de 208 kHz, ou próximo, capaz de fornecer registros permanentes e detalhados da topografia do leito através de alta resolução para definição da interface água-sedimento, de tal forma a operar em águas de grandes profundidades. O ecobatímetro deverá ser calibrado diariamente, no início dos trabalhos e no final, pelo processo de placa suspensa, para efeito de correção da velocidade do som e definição precisa das profundidades.

O ecobatímetro deverá ser acoplado à estação de bordo (*mobile receiver*) e ao computador, através de um programa que permita registrar automática e simultaneamente as profundidades e seu posicionamento em meio magnético (disquete), para processamento posterior.

Caso o nível d'água esteja abaixo do nível de referência, as margens deverão ser levantadas com equipamento topográfico ou com GPS, até o nível desejado.

- *Coleta e análise de sedimento do leito* - Objetivando gerar subsídios para a estimativa adequada do coeficiente de Manning nos estudos de remanso, deverá ser feita uma coleta de sedimento do leito do reservatório, a cada 4 seções transversais e também próximo à barragem. Estas amostras deverão ser encaminhadas ao laboratório para a realização de análise granulométrica.”

11.5 Mapeamento do leito

O mapa escolhido deve ter escala adequada ao tamanho do reservatório, devendo estarem plotados os marcos, altitudes, posições das réguas e demais dados, como seja a linha topográfica de nivelamento e outros.

Uma vez de posse das cadernetas de campo (trabalho com métodos tradicionais) ou dos registros em meio magnético (trabalhos com técnicas modernas) e demais informações, o próximo passo é plotar as seções no mapa com escala escolhida e anotar as profundidades (Figura 11.8). Essas profundidades medidas têm de ser corrigidas a partir das leituras das réguas

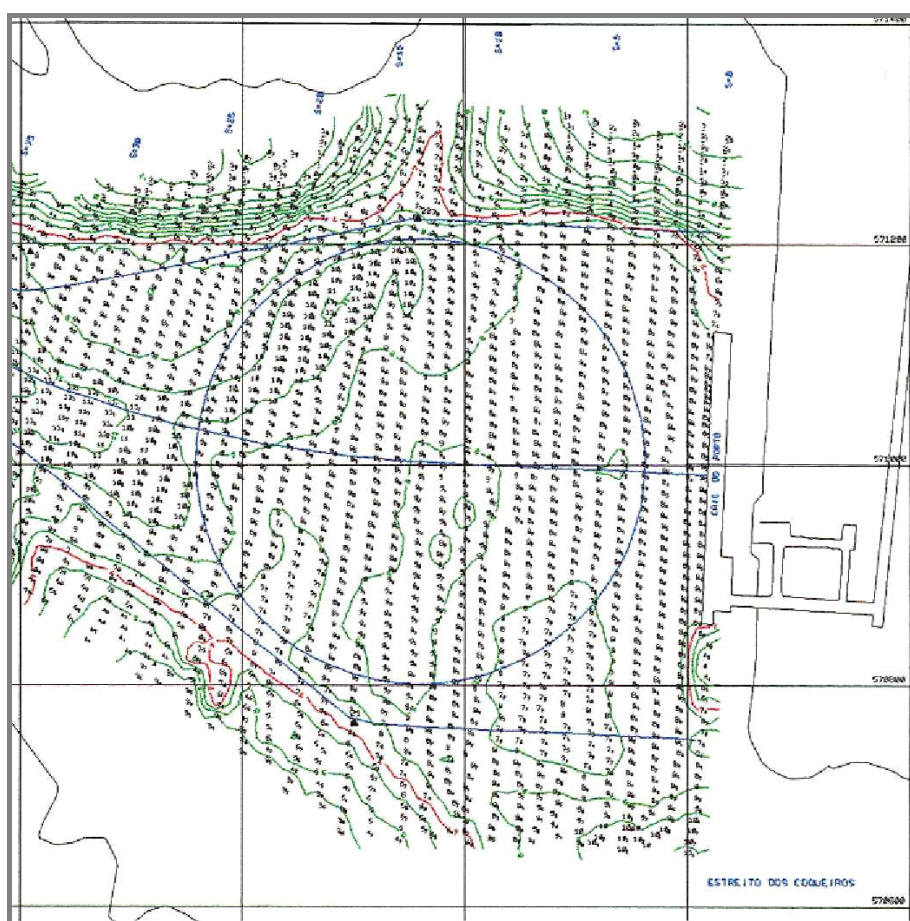


Figura 11.8 – Levantamento de curso d'água com uso do DGPS (Microars, 1996)

Tendo-se todas as profundidades anotadas nos respectivos pontos plotados, então poderão ser traçadas as curvas de nível do leito do reservatório, ou isóbatas, pela interpolação de profundidades a cada 1,0, 2,0 ou 5,0m conforme a escala escolhida permitir.

11.6 Cálculo dos volumes de água

O levantamento permite a determinação da capacidade do reservatório que, comparada com levantamento anterior, fornece o volume de sedimento depositado. Essa capacidade é calculada por dois métodos, com volumes parciais, utilizando as curvas traçadas ou seções transversais.

Métodos da planimetria das curvas batimétricas - nesse método, usa-se planimetrar as curvas batimétricas inteiras traçadas no mapa, e, em seguida, efetuar um cálculo para conhecer o volume de água entre duas isóbatas. São utilizados quatro processos: relação cota *versus* áreas batimétricas, das áreas médias, a regra de Simpson e dos prismas modificados (Vanoni, 1977 e Semmelmann, 1981). Outras fórmulas podem ser vistas em Vanoni, 1977, e Morris/Fan, 1997.

a) o processo de **cota *versus* área** usa a fórmula:

$$V = E \times A \quad (11.1)$$

cujos valores estão ilustrados na Figura 11.9 A linha cheia representa a plotagem dos valores das áreas isobatimétricas. A área hachurada *A*, entre duas linhas, multiplicada pela distância entre elas é igual ao volume *V* entre duas curvas batimétricas. O volume total do reservatório corresponde à área do gráfico compreendida entre a curva e o eixo das cotas.

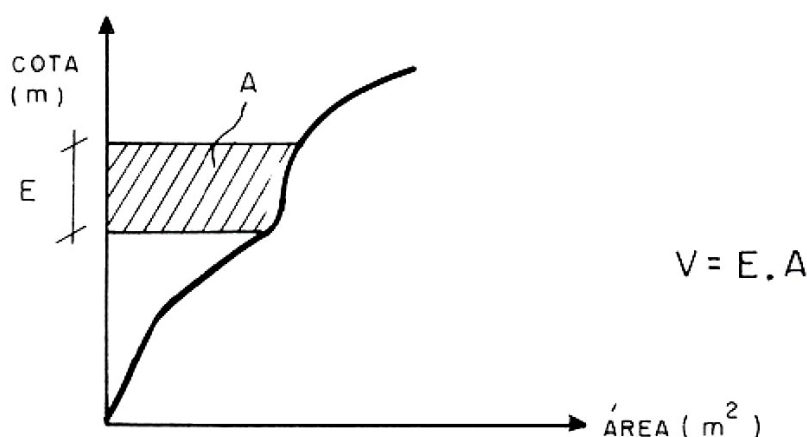


Figura 11.9 – Relação cota x área no método da planimetria das curvas batimétricas

b) o processo das **áreas médias** calcula o volume d'água pela média entre as áreas de duas curvas batimétricas sucessivas multiplicado pela distância entre elas:

$$V = \frac{A + B}{2} \times E \quad (11.2)$$

sendo *A* e *B* áreas de duas curvas batimétricas sucessivas e *E* a distância entre elas (Figura 11.10).

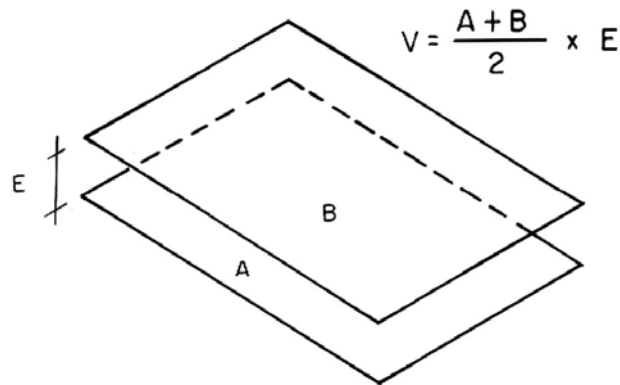


Figura 11.10 – Processo das áreas médias das curvas batimétricas

c) o processo que usa a **regra de Simpson** tem a seguinte equação:

$$V = \frac{1}{3} E [A_0 + A_n + 4(A_1 + A_3 + \dots + A_{n-1}) + 2(A_2 + A_4 + \dots + A_{n-2})] \quad (11.3)$$

A condição para a aplicação da regra de Simpson é a divisão da profundidade em um número par de curvas batimétricas.

d) o processo dos **prismas modificados**, ilustrado na Figura 11.11, usa a seguinte equação:

$$V = \frac{E}{3} (A + \sqrt{A \cdot B} + B) \quad (11.4)$$

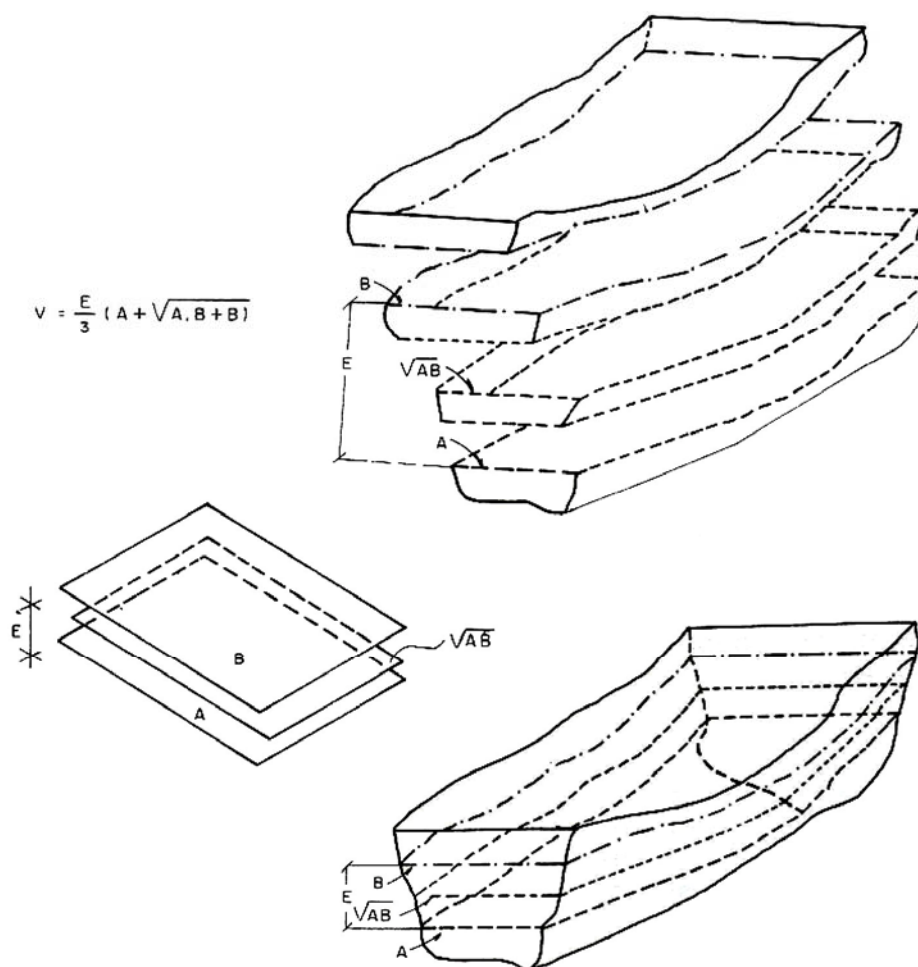


Figura 11.11 – Processo dos prismas modificados para cálculo da capacidade de um reservatório (Vanoni, 1977)

Método de planimetria das seções transversais – Tendo-se o mapa, desenham-se seções transversais que sejam paralelas entre si para obtenção das respectivas áreas. O cálculo dos volumes d'água é feito por diversos processos, sendo a seguir apresentados três: de plotagem das áreas das seções transversais *versus* distância da barragem, das médias das áreas das seções transversais equidistantes e a regra de Simpson.

- a) o processo de plotagem das **áreas das seções transversais *versus* distâncias da barragem** usa a seguinte equação:

$$V = AxD \quad (11.5)$$

sendo A a área hachurada entre duas seções transversais e D a distância entre elas. O volume total do reservatório corresponde às áreas do gráfico compreendidas entre a curva e o eixo das distâncias (Figura 11.12).

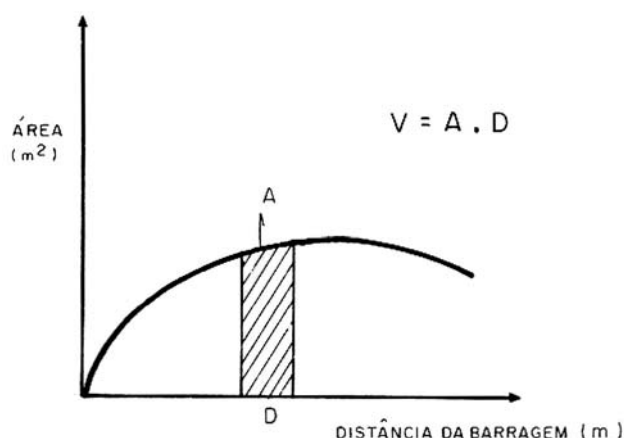


Figura 11.12 – Áreas das seções transversais x distância da barragem

- b) o processo das **médias das áreas das seções transversais equidistantes** parte diretamente dos dados determinados e calcula o volume do reservatório pela seguinte equação:

$$V = (A_1 + 2xA_2 + 2xA_3 + \dots + 2xA_{n-1} + A_n) \times \frac{D}{2} \quad (11.6)$$

- c) para a aplicação da **regra de Simpson** deve-se dividir o comprimento total do reservatório em um número par de seções transversais equidistantes entre si e paralelas à barragem. Utiliza-se a seguinte equação:

$$V = \frac{D}{3} [A_0 + A_n + 4(A_1 + A_3 + \dots + A_{n-1}) + 2(A_2 + A_4 + \dots + A_{n-2})] \quad (11.7)$$

sendo V o volume do reservatório, D distância entre seções e A a área das seções transversais.

11.7 Cálculo do volume de sedimento depositado

Os métodos apresentados no item 11.6 referem-se ao cálculo do volume remanescente do reservatório.

Faz-se o mesmo tipo de cálculo, com uso das mesmas equações utilizadas, utilizando o levantamento primitivo ou anterior, para a realização de comparações e também do cálculo do volume de sedimento pela diferença entre os dois volumes de água do reservatório.

Tendo-se o volume morto, deve-se também calcular o volume depositado. Por diferença, com o volume total tem-se o volume de sedimento depositado no volume útil.

Calcula-se também esses valores em porcentagens para a verificação da redução do volume total do reservatório, da redução do volume útil e também para saber qual a eficiência de retenção de sedimentos.

11.8 Traçado das novas curvas cota x área x volume

Dentre os diversos resultados derivados do levantamento, destacam-se o conhecimento do volume depositado e a nova capacidade do reservatório.

Tendo-se as áreas das curvas batimétricas e os volumes correspondentes somados até cada isóbata considerada, pode-se traçar as curvas cota x área e cota x volume. Para comparação traçam-se também as curvas originais.

11.9 Cone de dejeção de sedimentos

Importante também no levantamento é a verificação da nova geometria do lago. Para isso, traçam-se seções transversais comparativas (Figura 11.13), escolhidas de posições ao longo do reservatório e que retratem mudanças nessa geometria em relação à condição primitiva e à nova. Tendo-se vários levantamentos deve-se traçar as diversas seções na mesma posição para efeito comparativo. Investiga-se a formação de coroas, mudanças na área do delta e a altura de sedimento depositado no pé da barragem.

Desenha-se também a linha longitudinal do atual talvegue para comparação com a linha antiga, procurando-se obter o cone de dejeção de sedimento e o seu avanço, caracterizando o delta (Figura 11.14).

Para visualizar a nova morfologia do leito, tendo-se o levantamento em meio magnético, é conveniente fazer um programa de tal forma que possibilite a apresentação de um desenho que mostre a variação da conformação.

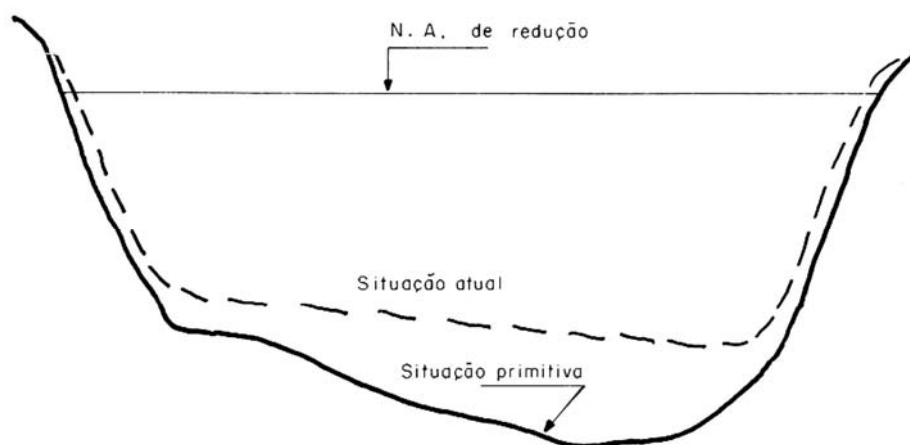


Figura 11.13 – Seções transversais comparativas de levantamentos de reservatório (Carvalho, 1994)

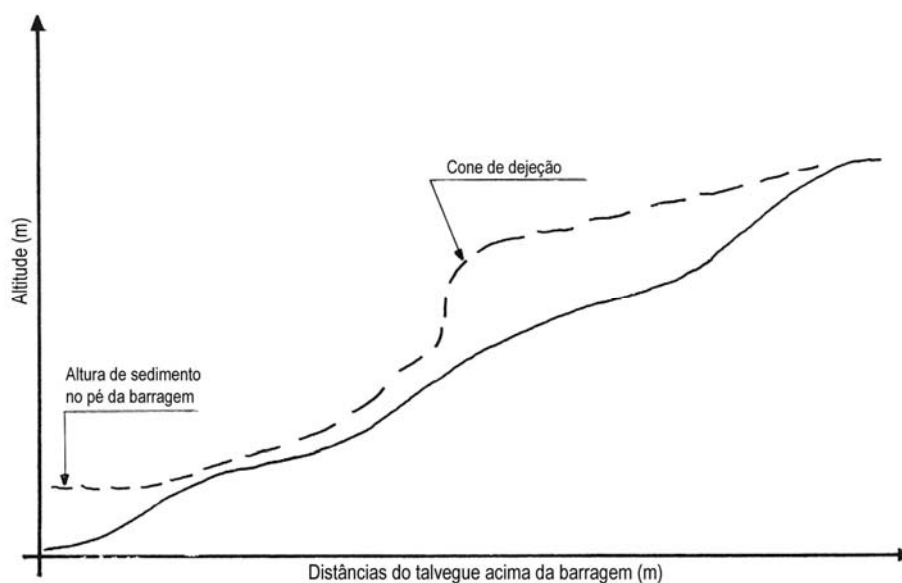


Figura 11.14 – Perfis longitudinais de levantamento de reservatório, podendo-se verificar o cone de dejeção (Carvalho, 1994)

11.10 Varredura do leito e geofísica

Este trabalho é feito com equipamento especial. Um ecobatímetro funcionando com ultrassom de alta frequência permite emissões que atravessam as camadas depositadas, retornando ao equipamento e registrando as mudanças de espessura (Figura 11.15).

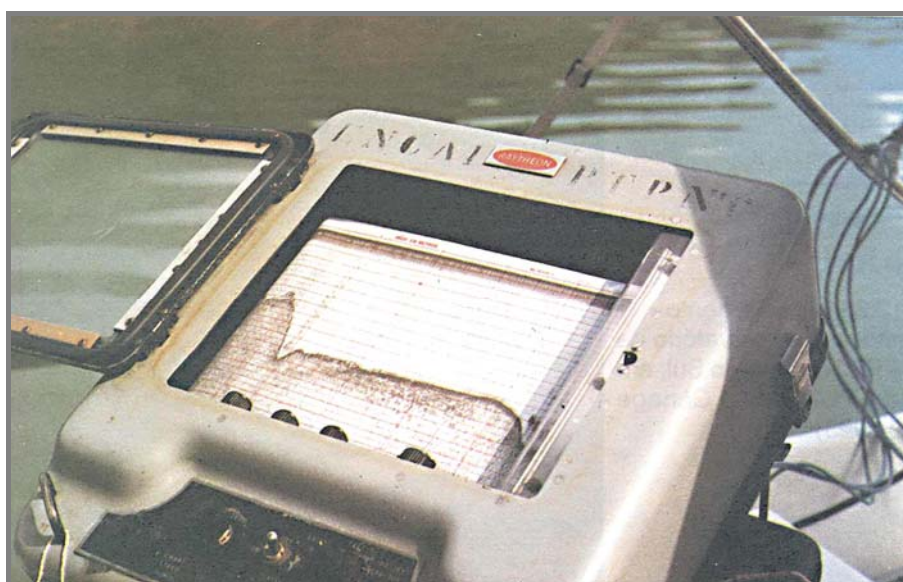


Figura 11.15 – Registrador de sísmica, apresentando linha de fundo e camadas inferiores do leito do reservatório

– UHE Funil/FURNAS, em 02.02.1993 (Conage)

Um outro equipamento de grande utilidade é o de varredura lateral por técnica de sonografia, que mostra a conformação do leito. O equipamento fica submerso, sendo um sinal sonoro emitido em intervalos regulares de tempo por dois transdutores localizados em veículo aquático rebocado, denominado *towfish*, que transporta um *side scan sonar*. Os feixes de emissão são dirigidos para ambos os lados da superfície do fundo. Cada transdutor atua independentemente, sendo também responsável pela captação do sinal refletido. Os sinais provenientes da superfície do fundo são gravados à medida que chegam ao registrador, em papel eletrossensível, compondo, dessa forma, uma imagem do fundo da área investigada, denominada *sonograma* (Geomap, 1991).

12. CONTROLE DO ASSOREAMENTO DE UM RESERVATÓRIO

Os estudos de previsão e todo o processo de medições sedimentométricas visam a verificação de um possível assoreamento do reservatório e as necessidades de controle do sedimento com intenções de mitigar os efeitos. O controle de sedimentos apresenta várias implicações nos mais diferentes campos da Engenharia como forma de proteger as obras e o patrimônio nelas envolvido. Muitas das medidas são de complexa realização uma vez que o sedimento é derivado da erosão em toda a área de drenagem no local da barragem, sendo de difícil acesso pela entidade responsável pelo aproveitamento. Na maioria das vezes, somente um plano de governo pode estabelecer e executar um programa de controle de erosão em toda a bacia hidrográfica.

Muitos dos programas de controle de sedimento pelos proprietários dos aproveitamentos ficam restritos à sua área de atuação, onde os mesmos buscam proteger as margens dos rios e reservatórios para diminuir a entrada dos sedimentos no sistema. Programas de prevenção de sedimentação do reservatório são os de maior importância, sendo as medidas corretivas efetuadas apenas em casos onde não há outra alternativa.

12.1 Controle preventivo

Segundo o CIGB (ICOLD, 1989) a mais óbvia medida preventiva no controle de sedimentos é na maioria das vezes desprezada pelos projetistas e diz respeito às regiões das cabeceiras dos rios, a alta bacia, que têm grande contribuição de escoamento mas pequena proporção de carga sólida. Preservar as florestas nessas regiões é de suma importância para que não se tornem responsáveis por grande produção de sedimentos.

Resumidamente, as medidas preventivas podem ser enumeradas como mostrado na Tabela 12.1, indo pela escolha adequada do local da obra e do reservatório, do controle da erosão na bacia, da retenção do sedimento antes de entrar no sistema fluvial e a retirada automática dos sedimentos. São usadas em todas as fases - de inventário, viabilidade, projeto e operação.

Tabela 12.1 - Medidas preventivas do controle de sedimentos e do assoreamento do reservatório

Medidas preventivas		
Seleção do local do aproveitamento	Se mais de um local for disponível para a barragem e formação do reservatório, selecionar aquele que tiver menor aporte de sedimentos	A escolha do local vai depender dos custos financeiros que incluam a proteção da área mais desprotegida
No projeto do reservatório	Prever volume morto adequado	Aumento da altura da barragem
	Prever volume reservado para sedimento	Aumento da altura da barragem
	Prever descarregador de sedimento com comportas (para correntes de densidade e para sedimento do leito)	Usinas afastadas da barragem necessitam de desarenador após a tomada d'água
Controle de erosão na bacia (traz benefícios diversos, sendo o mais eficiente mas de difícil aplicação pelo barrageiro; necessário pedir apoio de outras entidades para o gerenciamento de bacia)	Conservação e manejo do solo na agricultura (Bertoni e Lombardi Neto, 1990)	Práticas vegetativas: - Florestamento e reflorestamento - Pastagens - Plantas de cobertura - Culturas em faixas - Cordões de vegetação
		Práticas edáficas: - Controle do fogo - Adubação verde - Adubação química - Adubação orgânica
		Práticas mecânicas: - Distribuição racional dos caminhos - Plantio em contorno - Terraceamento - Sulcos e camalhões - Canais escoadouros
	Controle de sedimento em estradas, em cidades, em obras diversas, controle de erosão urbana e rural:	- Contenção ou proteção de taludes - Obras de drenagem - Controle de erosão em ravinas e voçorocas
Controle de erosão nos cursos d'água e margens de reservatórios	Controle de erosão nas calhas e desbarrancamentos	- Proteção com vegetação ciliar - Proteção estrutural (enrocamento, espigões etc.)
Controle da afluência de sedimento já na calha	Barragens a montante (pode ser submersa, se for conveniente)	Retirar periodicamente o sedimento retido
	Rede de vegetação	
	Canais de derivação em <i>by-pass</i>	- Canal - Conduto
	Desvio de enchentes para área de inundação	Bacias de decantação
Controle de deposição de sedimentos	Descarregador com comporta (operação planejada)	- Correntes de densidade - Sedimento de fundo
	Depleção do reservatório	Uma grande depleção do reservatório provoca o escorregamento dos depósitos para o volume morto
	Operação planejada do reservatório	Existem programas de computador para essa operação visando acomodação do sedimento

12.2 Controle corretivo

O controle corretivo do assoreamento é feito na fase de operação do aproveitamento. Normalmente os depósitos *surpreendem* o operador, uma vez que são submersos, crescendo lentamente. Não havendo monitoramento ocorre a *surpresa*. Procura-se recuperar o volume perdido com medidas mitigadoras, caras e repetitivas. Na Tabela 12.2 é apresentado um resumo das medidas de controle corretivo.

Tabela 12.2 - Medidas corretivas do controle de sedimento e do assoreamento do reservatório

Medidas corretivas		
Remoção do sedimento do reservatório	Dragagem (local de deposição é importante)	Eventual Quase permanente
	Obras de derivação <i>by-pass</i>	Canal Conduto
	Sinfonagem	Por cima da barragem ou às vezes retirando sedimento de mais distante através do descarregador de fundo
	Descarregador de fundo	Às vezes sendo necessário construir já com barragem pronta
Alteamento da barragem	Dimensionar adequadamente	Quando possível porque aumentará o nível e o espelho d'água

12.2.1 Despejo de sedimentos dragados

A retirada de depósito de sedimento de um reservatório por dragagem é cara. Às vezes fica mais barato elevar a altura da barragem ou outra solução. Então, os custos devem ser verificados em função da conveniência de efetuar a dragagem. Esta solução geralmente é aplicada em pequenos reservatórios para aliviar problemas causados por depósitos em certas posições, por exemplo, no pé da tomada d'água.

Um dos maiores problemas que envolve a dragagem é a posição de despejo do material. Dificilmente o material dragado pode ser utilizado economicamente devido a custos diversos e outros fatores como a poluição do sedimento ou problemas de transporte do material para as fontes de aproveitamento. Poderia se supor que o sedimento grosso depositado na área do delta pudesse ser utilizado em construção e que o material fino mais próximo da barragem, contendo nutrientes, pudesse ser colocado em áreas agrícolas. Acontece que em pequenos reservatórios essa seleção natural de material não é tão boa e os depósitos podem conter muitas impurezas, como lixo e outros.

Cada um dos aspectos referentes à dragagem – largura, profundidade, sedimento consolidado, presença de materiais tais como pedras, pedregulhos, troncos de árvore e

limitação rigorosa de despejo – para todos os casos, há experiência suficiente e com soluções adequadas para cada tipo de problema (ICOLD, 1989).

Existem diversos tipos de equipamentos para retiradas desses depósitos, sendo, basicamente, o sistema pneumático (*air-lift*), o sistema mecânico (*drag-line* ou *clam-shell*) e as dragas de sucção e recalque que utilizam bombas centrífugas para executar o transporte hidráulico do material (Engevix, 1980). Então, deve-se procurar o equipamento adequado para cada caso, permitindo maior economia.

O despejo do material dragado é um tema que envolve questões econômicas e de meio ambiente. A simples colocação na margem do reservatório, na área mais próxima do local de dragagem, ou jogar para o canal de jusante da barragem, pode se tornar uma solução inadequada. No primeiro caso a maior parte do sedimento pode retornar em curto prazo, nas primeiras chuvas, para o reservatório. No segundo caso, vai criar problemas diversos a jusante, incluindo o assoreamento do canal.

Muitos países têm leis que regulam a qualidade d'água, proibindo o despejo de sedimento dragado no próprio curso d'água. Países, como a China e Formosa aonde já são escassos os locais para barragens, têm-se melhorado as terras agrícolas por meio da colocação de material selecionado proveniente de dragagens efetuadas, ao mesmo tempo em que é recuperada a capacidade de armazenamento de água dos reservatórios. O material pode servir também para formação de diques marginais aos rios onde há necessidade de proteção contra enchentes (ICOLD, 1989)

13. EFEITOS SECUNDÁRIOS DEVIDO O SEDIMENTO

Além dos efeitos físicos derivados do assoreamento do reservatório nas funções das finalidades do aproveitamento, há diversos outros impactos secundários que devem ser considerados e que podem se estender além dos limites do reservatório e também da própria atuação da empresa responsável. Estes impactos secundários devem sempre ser previstos, avaliados e conciliados tanto no planejamento, projeto e construção quanto na fase de operação dos reservatórios (ICOLD,1989).

13.1 Efeitos do remanso do reservatório

A agradação do leito na entrada do reservatório com a formação do delta, provoca deformações no canal do rio que, aos poucos, vai se estrangulando. Os depósitos avançam para jusante e também um pouco para montante, o gradiente do canal se reduz, sendo que o lençol d'água subterrâneo permanece em alto nível, o que dificulta a drenagem. Com o estreitamento do canal, à medida que o delta aumenta, os efeitos do remanso do reservatório também aumentam, tornando as cheias mais freqüentes a montante (ICOLD, 1989).

Os efeitos podem ser analisados com o estudo da formação e aumento do delta, sendo complexo o seu estudo devido à operação do reservatório, quantidade da afluência de sedimento e outros fatores. O uso do modelo HEC-6 para cálculo do remanso, considerando a afluência de sedimento, pode mostrar os novos perfis da linha d'água para enchentes de diversos tempos de recorrência.

A formação do delta está representada na Figura 13.1 sendo mostrada a camada de topo, o ponto de escorregamento, a camada frontal e os depósitos do leito.

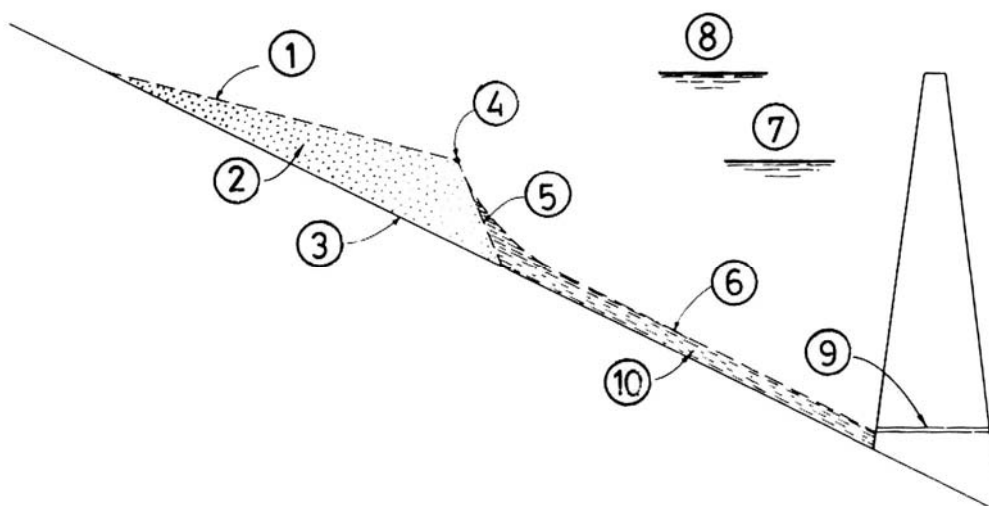


Figura 13.1 – Formação típica do delta: (1) declividade da camada de topo,

(2) *sedimento grosso*, (3) *declividade original do talvegue*, (4) *ponto de escorregamento/pivot*, (5) *declividade da camada frontal*, (6) *declividade dos depósitos do leito*, (7) *nível d'água normal/médio de operação*, (8) *nível d'água máximo*, (9) *tomada d'água*, (10) *sedimentos finos* (ICOLD, 1989)

Para avaliações preliminares considera-se que o início de formação do delta fica na interseção da linha do leito com o nível máximo do reservatório e o ponto de escorregamento (*pivot*) fica na interseção com o nível médio de operação. Nesse caso utiliza-se para declividade da camada de topo, o valor 1,5 daquela do leito, e para a declividade da camada frontal, um valor igual 6,5 vezes aquela da declividade da camada de topo. Tendo-se este volume, pode-se calcular o tempo de formação dessa condição. Quando o ponto de escorregamento alcança a barragem a declividade de topo desaparece (ICOLD, 1989, e Strand/Pemberton, 1982).

13.2 Mudanças na qualidade d'água

Os impactos de sedimento no reservatório e a qualidade d'água para jusante ainda não estão completamente explicados ou estudados. *Eutrofização* é o termo aplicado para descrever os efeitos e transformações em águas confinadas pelo aumento do nível de nutrientes, redução do oxigênio dissolvido e aumento da produtividade biológica.

As enxurradas derivadas das precipitações carregam muito sedimento para os cursos d'água, e, com esses sedimentos estão nutrientes, agrotóxicos e tudo o mais que pode ser conduzido por essas águas. Uma vez estando no reservatório essas substâncias sofrem transformações diversas e que podem, inclusive, afetar a qualidade d'água a jusante. Proliferação de algas e outros efeitos são conseqüências dessas transformações.

13.3 Efeitos ecológicos

Os efeitos ecológicos são sentidos tanto na fauna quanto na flora. Os depósitos em reservatórios modificam a qualidade do leito, afetando a vida do peixe pela mudança do seu *habitat* natural. As espécies vão desaparecendo e só resistem aquelas mais fortes.

Também o sedimento em suspensão presente na água reduz a penetração da luz solar dificultando transformações necessárias à vida aí existente. Por outro lado a completa retirada do sedimento com nutriente pelo depósito no leito provoca também transformações. De qualquer forma a Natureza sofre, perdendo algumas espécies que não resistem às transformações.

Em relação à flora pode-se citar a formação de macrófitas nas margens dos reservatórios pela deposição de sedimentos finos com nutrientes. A vegetação prolifera

rapidamente sendo que é arrancada pela elevação do nível d'água e em seguida é carregada em direção a barragem e das tomadas d'água.

Algumas espécies vegetais, após a elevação do nível fluviométrico, podem se deslocar rapidamente para o fundo do lago aumentando a quantidade de biomassa terrestre inundada, sendo que mais tarde, se decompõe através de processos aeróbicos e anaeróbicos dando início ao processo de emissões de gases para a atmosfera, principalmente o CH₄ (Metano) que pode contribuir com a acentuação do aquecimento térmico da baixa atmosfera terrestre – Efeito Estufa (UNEP, 1997).

A formação natural de praias nos rios permite a recreação de população ribeirinha. Os efeitos do reservatório são sentidos nesses bancos de areia tanto no alagamento dessas áreas pelo lago, fazendo-as desaparecer, quanto nos efeitos a jusante. Uma vez formado o reservatório e sendo o sedimento aí depositado deixa de haver alimentação de areia para jusante, o que ocasiona o desaparecimento dos bancos de areias nesse trecho. Só existirão praias bem a jusante quando a erosão da bacia incremental de jusante e o conseqüente transporte de sedimento no curso d'água permitir o aparecimento de novos bancos de areia, as conhecidas barras.

Estes efeitos da falta de alimentação de areia para jusante são sentidos até à foz dos rios cujas transformações podem se apresentar a longo prazo. Este fenômeno pode ser a causa de mudanças que vêm ocorrendo na foz do Paraíba do Sul e na foz do São Francisco.

13.4 Erosão nas margens do reservatório

As margens do reservatório devem sempre ser protegidas com vegetação ciliar ou utilizadas seguindo práticas conservacionistas. Mesmo assim podem ocorrer erosões nas suas margens, seja por embate de ondas ou pelo alto grau de encharcamento em períodos chuvosos, provocando a queda de taludes. Quando isto ocorre perto da barragem, exige-se imediata proteção.

Esses sedimentos vão se incorporar ao assoreamento ao mesmo tempo que a evolução da erosão pode trazer conseqüências diversas.

13.5 Erosão do depósito

O sedimento depositado pode sofrer acomodação, escorregando para o interior do leito do reservatório. Quando ocorre de se acomodar no volume morto, considera-se benéfico. Existem modelos computacionais de operação de reservatório, usando um deplecionamento mais rápido, que facilita essa acomodação, aumentando parte do volume ocupado pelo sedimento.

No entanto, quando o assoreamento já está mais próximo da barragem, o escorregamento desse depósito pode oferecer risco para a estrutura ou atingir a tomada d'água subitamente.

13.6 Efeitos a jusante da barragem

A retenção de sedimento no reservatório provoca um escoamento de água limpa para jusante da barragem. Por outro lado a regularização das vazões a jusante provoca maiores ações nos leitos e margens desse canal.

Estes dois efeitos somados, além de outros, podem produzir aprofundamento do leito e erosão das margens do canal de jusante da barragem. Em pequenos aproveitamentos estes efeitos são menores, podendo ocorrer no canal mais próximo, enquanto nos aproveitamentos com grandes reservatórios esses efeitos são maiores e podem ser sentidos mesmo a centenas de quilômetros a jusante do barramento.

A degradação no canal de jusante pode ter diversas conseqüências desagradáveis ao meio ambiente. Estruturas no canal tais como pontes ou tubulações que cruzam o rio pelo leito, estarão sujeitas a rebaixamentos que poderiam danificar sua integridade estrutural. Se as margens do canal estão no ponto de ataque da corrente, valiosas propriedades agrícolas, industriais ou residenciais podem ser danificadas, a não ser que sejam tomadas medidas de proteção. A comunidade biológica no canal de jusante pode ser muito afetada pelo aumento de material mais grosso do leito do canal e por uma mudança do crescimento da vegetação ao longo das margens (ICOLD, 1989).

Existem várias metodologias para previsão dos efeitos que ocorrem a jusante dos reservatórios (Bruk, 1985), um deles é o modelo HEC-6, sendo que existem outros que também realizam cálculos através da aplicação das fórmulas da hidráulica de sedimentos. Métodos mais simples foram sugeridos em Strand (1974) e ICOLD (1989) que procuram fazer abordagem do estudo através da formação de armadura do leito, pelo transporte do sedimento mais fino, ou pelo cálculo da declividade estável. Os itens a seguir correspondem a uma pesquisa bibliográfica utilizando as transformações no leito sendo baseada, principalmente, nos dois trabalhos citados.

13.6.1 Degradação do canal

O escoamento natural do rio transportando sedimento está normalmente em um estado de quase-equilíbrio, sem tendências a longo prazo para agradação ou degradação. Esse regime de equilíbrio pode ser expresso pela equação 13.1 (ver Figura 13.2)

$$Q_s D = kQS \quad (13.1)$$

onde:

Q_s = descarga sólida do leito

D = diâmetro da partícula

Q = descarga líquida

S = declividade do canal

k = constante de proporcionalidade

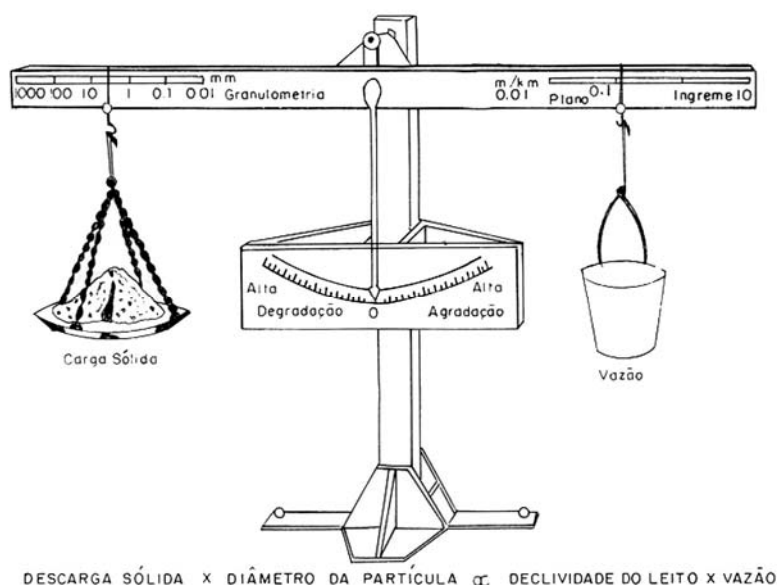


Figura 13.2 – Relação entre os fatores que contribuem para estabelecer um equilíbrio estável num canal de rio, segundo Lane (WMO, 1981).

Se qualquer uma das quatro variáveis for alterada, uma ou mais das outras devem sofrer mudança para restituir o canal ao estado de equilíbrio. A redução da declividade a jusante da barragem pode, então, ser prevista caso haja mudança. Se há sedimento grosso suficiente, então as partículas finas podem ser transportadas, permanecendo o material grosso. Estes processos que resultam na remoção de partículas de sedimento do leito e margens é conhecido como **degradação** (Strand, 1974).

O processo de degradação se move progressivamente para jusante até que alcance um ponto aonde o sedimento que está sendo transportado resulte em canal estável ou em equilíbrio. Qualquer quantidade de sedimento grosso que passar através da barragem terá um efeito de compensação na degradação do canal.

Há duas maneiras distintas para estimar a altura ou quantidade da degradação que poderá ocorrer a jusante de uma barragem ou estrutura similar, cada uma dependente do tipo de material que forma o leito do canal do rio.

Em casos em que o material de maior granulometria ou partículas grosseiras, que não podem ser transportadas por descargas normais do rio, existir em quantidade suficiente no leito, uma camada protetora se desenvolverá à medida que o material mais fino é deslocado e transportado para jusante. Uma degradação vertical se processará em um valor progressivamente mais lento até que uma **armadura** permaneça em suficiente altura para inibir maior degradação. No entanto, se o leito é composto de material transportável e o material se estende a profundidades maiores que aquelas para as quais o canal pode chegar a se degradar, então o canal mudará a declividade até que alcance uma **declividade estável**, que será calculada juntamente com o volume da degradação esperada (Strand, 1974).

Para estas estimativas são necessárias as determinações da descarga dominante e das características do canal.

13.6.2 Descarga dominante

A descarga dominante é definida como a descarga que, se ocorresse um escoamento constante, esse teria o mesmo efeito sobre toda a forma do canal, como seria a descarga natural inconstante. A descarga dominante usada em estudos de estabilização de canal é normalmente considerada como a descarga de transbordamento ou aquela descarga de pico, tendo um intervalo de recorrência de aproximadamente dois anos num rio sem controle (Strand, 1974).

Com a regularização da descarga por uma barragem a montante, o problema se torna mais complexo no canal de jusante porque dados precisos em futuras descargas pela barragem não serão mais disponíveis. Se o escoamento do reservatório é quase uniforme e as descargas de enchente são de ocorrência relativamente raras, a descarga média diária pode ser usada como a descarga dominante. No entanto, se o escoamento está sujeito a uma considerável variação devido à enchentes, a descarga de pico que é igualada ou excedida na média de uma vez cada dois anos seria considerada a descarga dominante (Strand, 1974).

13.6.3 Características hidráulicas do canal

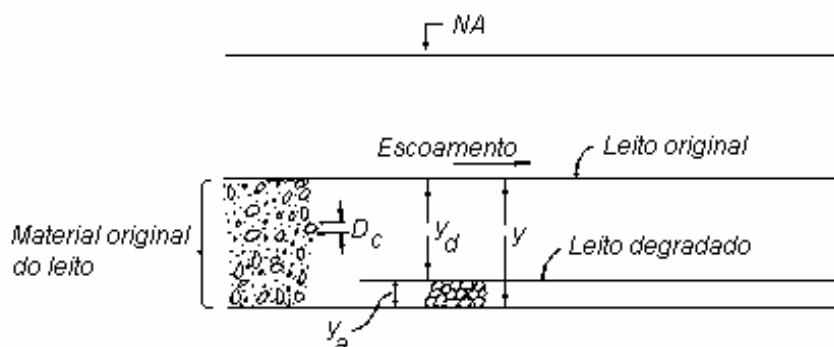
O próximo passo no cálculo da degradação no canal de jusante de uma barragem é a determinação das características hidráulicas aproximadas do canal para a descarga dominante. Estes dados podem normalmente ser obtidos do estudo da vazão afluente ao remanso do reservatório. As características de todas as seções transversais do remanso, quando escoando a descarga dominante, são divididas proporcionalmente para alcançar uma seção transversal que será representativa da degradação do canal. A declividade da superfície d'água pode ser considerada igual ao gradiente hidráulico (Strand, 1974).

13.6.4 Método da degradação limitada pela armadura

O primeiro procedimento que deve ser testado para cálculo da degradação a jusante de uma barragem é o método da verificação de formação da armadura. Este método é especialmente aplicável se grandes pedras ou material grosso existem no leito do canal, que não possam ser transportados pela descarga normal do rio, tendo em suficiente quantidade para formar uma camada de armadura (ICOLD, 1989).

Durante o processo de formação da armadura, o material mais fino transportável é removido, sendo que uma degradação se processa em uma taxa progressivamente menor, até que uma armadura de suficiente altura se forma para inibir maior degradação. Uma camada de armadura pode normalmente ser prevista se há aproximadamente 10% ou mais de material do leito de diâmetro da armadura, ou maior.

Os cálculos de armadura supõem que uma camada de sedimento grosso se formará, conforme mostrado na Figura 13.3.



- y = altura do leito original ao fundo da camada de armadura
 y_a = altura de degradação ou espessura da camada de armadura
 D_c = diâmetro do material de formação da armadura
 y_d = altura do leito original ao topo da camada de armadura ou altura de degradação

Figura 13.3 - Esquema de definição da armadura (ICOLD, 1989)

Da figura pode-se deduzir que:

$$y_a = y - y_d \quad (13.2)$$

Por definição:

$$y_a = (\Delta p)y \quad (13.3)$$

onde,

Δp = percentagem de material de diâmetro maior que aqueles da espessura da armadura.

Combinando as duas equações acima, tem-se que a altura de degradação é igual a:

$$y_d = y_a \left(\frac{1}{\Delta p} - 1 \right) \quad (13.4)$$

A espessura da armadura y_a variará com o diâmetro da partícula mas é geralmente adotado como uma espessura igual a 3 vezes o diâmetro D_c da partícula da armadura, ou 15cm (0,5ft), ou pouco menor.

O diâmetro médio das partículas de sedimento necessário para formação da armadura pode ser calculado por diversos métodos, sendo cada um considerado a verificação do outro. Cada método indicará um diâmetro diferente de armadura exigindo experiência no julgamento da seleção mais apropriada. Os dados básicos para estes cálculos necessitam de:

- amostras de material do leito através do trecho em estudo e em diferentes alturas por toda a zona de possível degradação;
- seleção da descarga dominante, normalmente adotada como o pico da descarga de dois anos de recorrência;
- características hidráulicas médias do canal correspondentes à descarga dominante selecionada, obtida do cálculo do escoamento uniforme do remanso através do trecho selecionado do rio.

Serão a seguir apresentados quatro métodos para cálculo do diâmetro D_c .

Uso da velocidade capaz do leito - Diversas investigações de laboratório têm mostrado que o diâmetro de uma partícula arrancada de um leito é proporcional à velocidade da corrente perto do leito. A velocidade na qual a partícula inicia o movimento é considerada como a **velocidade capaz do leito**, V_b , tendo sido verificado como sendo aproximadamente igual a 0,7 vezes a velocidade média do canal V_m :

$$V_b = 0,7 V_m \tag{13.5}$$

A Figura 13.4 representa a velocidade capaz do leito V_b em relação ao diâmetro de uma partícula de sedimento móvel, e tem sido usada para determinar a espessura da armadura.

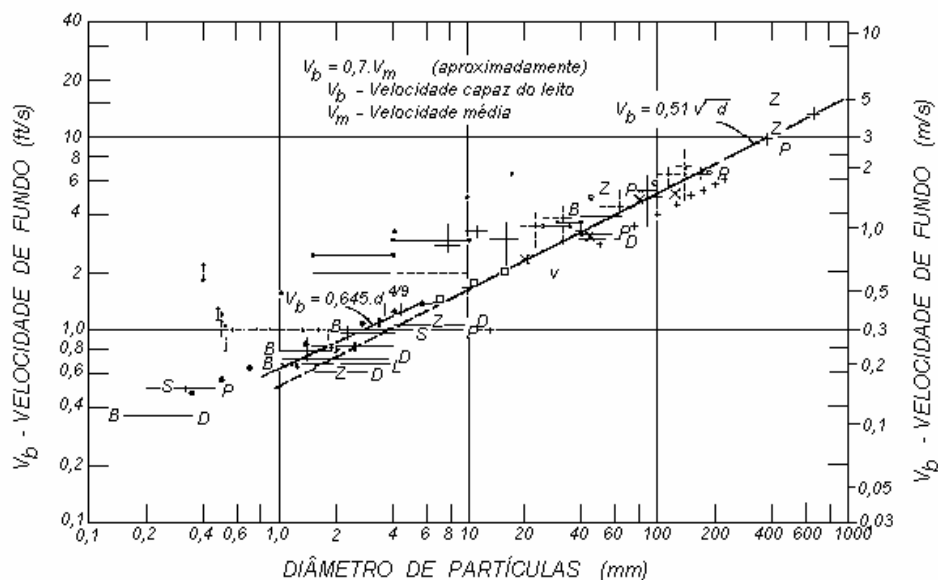


Figura 13.4 - Velocidade capaz do leito em relação ao diâmetro médio de sedimento transportável (Strand, 1974)

Uso da força trativa - A força trativa ou de cisalhamento é a tensão atuando na área molhada do leito do canal e pode ser expressa como:

$$\tau = \rho S \tag{13.6}$$

onde,

- τ = força trativa (kg/m² ou lb/ft²)
- γ = peso específico da água (kg/m³ ou 62,4 lb/ft³)
- p = profundidade média (m ou ft)
- S = gradiente hidráulico

Quando a força trativa for calculada para a descarga dominante, as curvas de força trativa mostradas na Figura 13.5 podem ser usadas para determinar o diâmetro médio da espessura da armadura do material do leito.

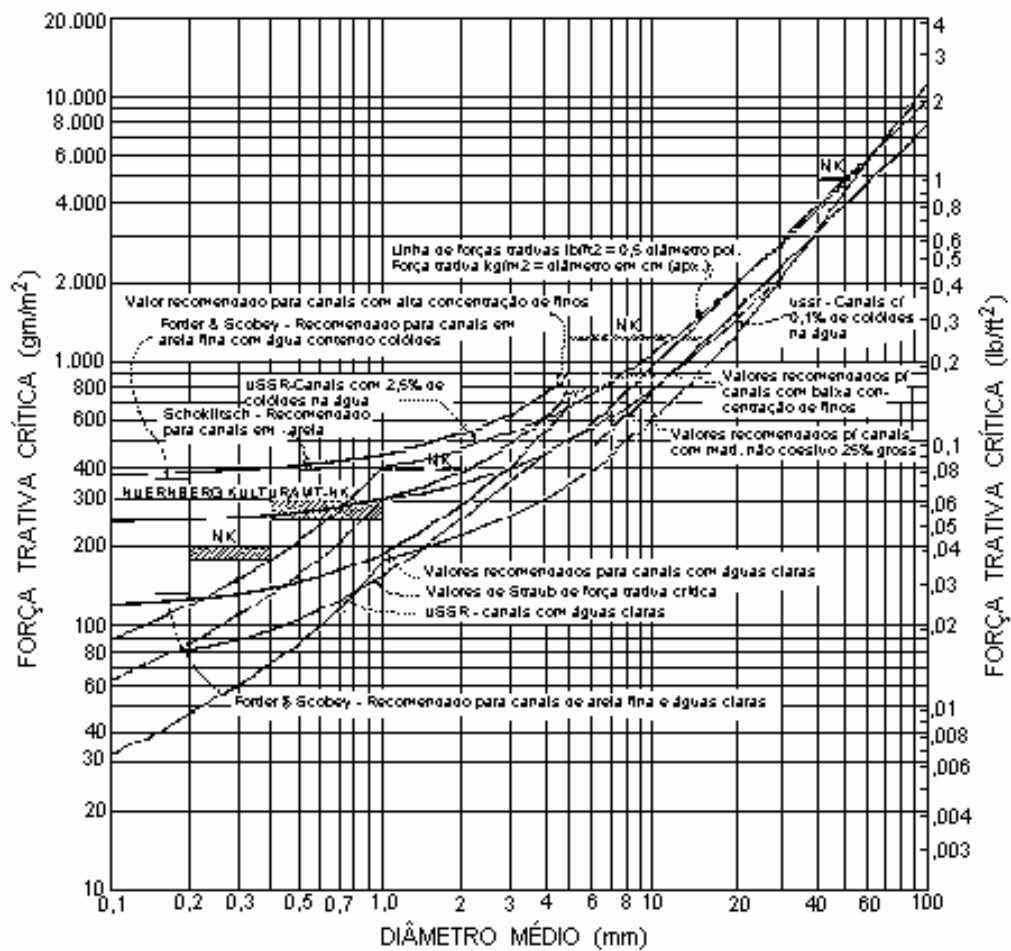


Figura 13.5 - Força trativa em relação ao diâmetro de sedimento transportável (Strand, 1974)

Uso da equação de Meyer-Peter & Muller - A equação de Meyer-Peter & Muller para descarga sólida nula é expressa por:

$$S = \frac{0,19 \frac{Q}{Q_B} \left(\frac{n_s}{D_{90}^{1/6}} \right)^{3/2} D}{p} \quad (13.7)$$

onde,

Q = descarga líquida total (ft³/s)

Q_B = parte da descarga líquida que influencia no leito (ft³/s)

n_s = coeficiente de rugosidade de Manning para a seção total

D_{90} = diâmetro da partícula para a qual 90% do sedimento do leito é menor (mm)

p = profundidade média do canal (ft)

D = diâmetro médio mínimo transportável presente no material do leito (mm)

A partir desta equação pode-se calcular D e, em seguida, a espessura da armadura. Tem-se, então, da equação de Meyer-Peter & Muller, considerando $Q/Q_b = 1$:

$$D = D_c = \frac{5,26Sp}{\left(\frac{n_s}{D_{90}^{1/6}} \right)^{3/2}} \quad (13.8)$$

Uso da equação de Schoklitsch - A equação de Schoklitsch para descarga sólida nula tem a seguinte expressão:

$$S = \left(\frac{0,00021DB}{Q} \right)^{3/4} \quad (13.9)$$

sendo B a largura do canal (ft).

Evidenciando o valor de D desta equação, tem-se:

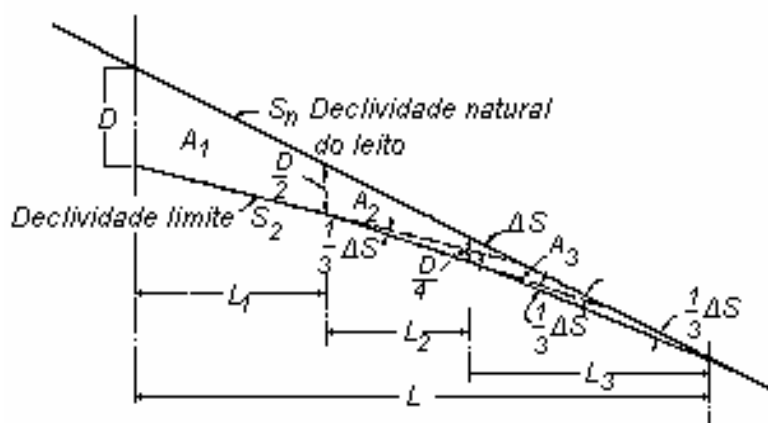
$$D = D_c = \frac{4762S^{4/3} Q}{B} \quad (13.10)$$

13.6.5 Método da degradação limitada por declividade estável

O método de calcular a declividade estável para definir a degradação a jusante de uma barragem é usado quando não há suficiente material grosso para a formação de uma camada de armadura. O método é usado quando a principal finalidade é calcular a altura de erosão do leito imediatamente a jusante da barragem para projeto dessa obra, podendo resultar na indicação de proteção a jusante contra escavação no leito. É também usado no planejamento antecipado de níveis com uma quantidade pequena de

dados de campo e quando os custos de estudos mais detalhados são proibitivos (ICOLD, 1989).

O método do canal estável está ilustrado no esquema da Figura 13.6. A **declividade estável é definida como a declividade do rio na qual o material do leito não mais poderá ser transportado.**



$S_b =$ declividade natural do leito
 $S_L =$ declividade limite ou estável

Figura 13.6 - Esquema típico de canal degradado pelo método da declividade tripla (ICOLD, 1989)

Como mostrado na Figura 13.6, o processo é também definido como o **método da declividade tripla** porque esta é a variação esperada na declividade total entre a declividade estável e a declividade existente mais distante de jusante. Os cálculos do canal estável podem ser efetuados pela aplicação de diversos métodos, tais como:

- equação de carga do leito de Meyer-Peter & Muller, expressão 13.7, para início de transporte;
- equação de carga do leito de Schoklitsch, expressão 13.9, para condições de transporte nulo de sedimento;
- gráfico de Shield para nenhum movimento ou nenhum deslocamento de partículas;
- relações de Lane para força trativa crítica, assumindo ser um escoamento de águas limpas em canais.

A descarga a ser usada em qualquer dos métodos acima é a descarga dominante, sendo também necessária a determinação das características hidráulicas.

Em adição à limitação ou declividade estável do canal degradado, é também necessário determinar o volume de material que pode ser removido do canal. Se não há

controle à jusante do canal que possa limitar a degradação, algumas vezes é suposto que o rio terá uma carga de sedimento grosso ($> 0,0625$ mm) igual àquela porção da carga histórica de mesma faixa granulométrica. Isto necessariamente admite pouca depleção em quantidade de descarga e menor regularização pelo reservatório à montante. Se a descarga é escoada ou regularizada, a carga de sedimento a ocorrer será menor que a carga histórica e o ajuste apropriado nessa carga terá de ser feita (ICOLD, 1989).

Tendo determinada a declividade estável e o volume de material que pode ser esperado para ser removido, a altura de degradação perto da barragem e o perfil do canal degradado podem ser estimados se as seguintes hipóteses puderem ser razoavelmente bem satisfeitas:

- o trecho degradado é suficientemente uniforme para permitir o uso de seção transversal média e de declividade média em toda sua extensão;
- o material do leito e das margens em todo o trecho do canal é suficientemente semelhante para que uma composição média possa ser usada e que não haja obstáculos não erodíveis no leito ou margens para evitar que o curso atinja a seção estável média na declividade estável;
- a degradação será tal que a componente vertical predominará e o movimento horizontal será limitado à pequena camada da margem resultante da degradação vertical.

Experiências têm mostrado que um perfil de curso d'água degradado pode ser representado por um esquema típico igual a três vezes a declividade, como mostrado na Figura 13.6 (ICOLD, 1989).

O volume de material a ser removido pelo método da declividade estável pode ser determinado de diversas maneiras. Esse volume pode ser visualizado da figura como:

$$V = A_T \times B \quad (13.11)$$

onde,

V = volume de material a ser degradado (m^3)

A_T = área longitudinal de degradação (m^2)

B = largura do canal degradado (m)

Se não há controle a jusante ou nenhum limite de comprimento L para a degradação, as duas maneiras de calcular o volume são (ICOLD, 1989):

- assumir que o rio removerá uma carga de sedimento grosso ($> 0,062$ mm) igual à quantidade da carga histórica de sedimento $> 0,062$ mm;
- calcular a defluência do trecho degradado por curva-chave de sedimento e uso do método de permanência de vazões ou outro método.

No segundo caso, a curva-chave de sedimento pode ser definida usando uma ou mais das fórmulas de carga sólida do leito e a curva de permanência das defluências do reservatório.

Evidenciando A_T na equação anterior (13.11):

$$A_T = \frac{V}{B} \quad (\text{sistema métrico}) \quad (13.12)$$

Uma vez calculado o valor de A_T , a altura de degradação pode ser determinada pela seguinte equação:

$$D = \left(\frac{64 \times A_T \times \Delta S}{39} \right)^{1/2} \quad (13.14)$$

onde:

$\Delta S =$ a diferença entre a declividade existente e a declividade estável

O comprimento do trecho degradado pode ser calculado por:

$$L = \frac{13 \times D}{8 \times \Delta S} \quad (13.15)$$

Se for previsto que uma degradação lateral do rio, por erosão das margens, for um fator significativo, um estudo complementar será necessário para determinar a largura do canal degradado. A amplitude da degradação vertical não será obrigatoriamente tão grande porque parte do material virá das margens. O movimento lateral deverá ser sempre avaliado quando as margens forem compostas do mesmo material que o leito e não houver vegetação suficiente para manter esse material.

Se um controle permanente existir em algum ponto do trecho em degradação, a equação 13.14 pode ser usada para solução direta da altura de degradação (ICOLD, 1989).

13.8 Estudos de reservatório com auxílio de imagens de satélites

Imagens de satélite são utilizadas isoladamente ou comparadas com imagens feitas anteriormente. As imagens Landsat TM são especialmente adequadas para a realização de trabalhos visando análises referentes ao assoreamento de reservatórios, no desenvolvimento de vegetação aquática e em processos erosivos nas margens do reservatório e no canal de jusante. Estes produtos são úteis na identificação destas feições pela interpretação das imagens. Podem também ser úteis no direcionamento dos trabalhos de campo. Essas imagens são obtidas pelo satélite periodicamente, permitindo a comparação e análise visando a dinâmica dos processos geomorfológicos e fluviais, e consequentemente suas tendências.

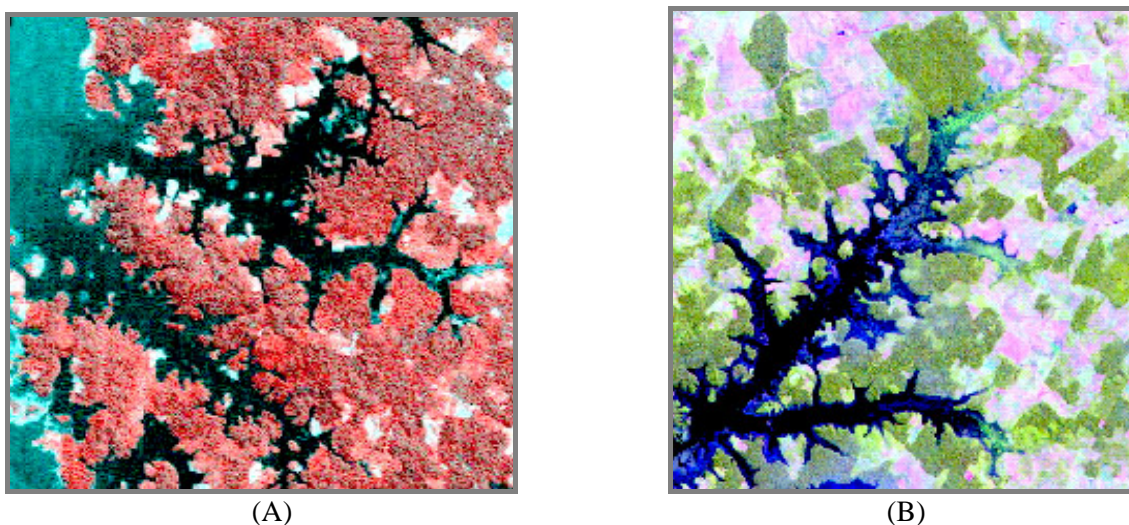


Figura 13.7 – (A) Imagem Landsat recobrendo parte do reservatório de Tucuruí – As tonalidades da água representadas pelas colorações mais azuladas correspondem às áreas com maior percentual de sólidos em suspensão do que as tonalidades mais escuras. (B) – Imagem Landsat TM ilustrativa dos processos de desenvolvimento de vegetação aquática num braço do reservatório de Tucuruí com uso agropecuário intenso ao seu redor (foto de trabalho realizado pela Eletronorte).

A interpretação de imagens Landsat TM são processadas digitalmente e analisadas em conjunto com dados de curvas de nível obtidos de material cartográfico existente e mapas temáticos publicados pelo projeto Radam.

13.7 Controle de erosão no canal de jusante

A erosão no canal de jusante pode evoluir para montante da posição e prejudicar a barragem, embora esta seja sempre planejada levando em consideração esta possibilidade. No entanto obras a jusante, como pontes, diques marginais e tomadas d'água podem ser afetadas pela erosão no canal do rio. A Tabela 13.1 mostra as medidas preventivas e corretivas a serem adotadas.

Tabela 13.1 - Controle de erosão no canal de jusante de barragem - Medidas preventivas e corretivas

Medidas preventivas (Estudos na fase de projeto)	Encouraçamento	Verificar por modelos se o sedimento grosso do leito é suficiente para proteger
	Mudança de declividade	Verificar por modelos se a declividade não mudará além de certo limite
Medidas corretivas	Enrocamento	
	Obras estruturais	

BIBLIOGRAFIA (consultada e complementar)

Nota: A bibliografia abaixo indicada não foi toda necessariamente referenciada no Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios

- ABRH, Associação Brasileira de Recursos Hídricos (1991). *Carta de Ouro Preto*. I Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Comissão de Engenharia de Sedimentos. Ouro Preto, MG
- ABRH, Associação Brasileira de Recursos Hídricos (1996). *Produção de sedimentos*. II Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Comissão de Engenharia de Sedimentos. Rio de Janeiro, RJ.
- ABRH, Associação Brasileira de Recursos Hídricos (1998). *Assoreamento de reservatório e erosão a jusante*. III Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Comissão de Engenharia de Sedimentos. Rio de Janeiro, RJ.
- AGRICULTURE, COMMERCE, DEFENSE, INTERIOR DEPARTMENTS, Independent Agencies Working Group: Work Group 3 on Sediment (1978). *National handbook of recommended methods for water-data acquisition sediment*. Washington, DC.
- ALMEIDA, Sérgio Barbosa, e CARVALHO, Newton de Oliveira (1993). *Efeitos do assoreamento de reservatórios na geração de energia elétrica: análise da UHE Mascarenhas, ES*. X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul. Gramado, RS.
- AMARAL, Nautir David (1981). *Noções de conservação do solo*. 2ª Edição. Nobel. São Paulo, SP.
- ANNANDALE, G. W. (1987). *Reservoir sedimentation*. Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam.
- BARROS, Wanderbilt Duarte de (1956). *A erosão no Brasil*. Ministério de Viação e Obras Públicas. Rio de Janeiro, RJ.
- BENSON, M.A., DALRYMPLE, Tate (1968). *General field and office procedure for indirect discharge measurements*. US Geological Survey – Book 3: Chapter A1. Washington, DC.
- BERTONI, José, e LOMBARDI NETO, Francisco (1990). *Conservação do solo*. Ícone. São Paulo, SP.
- BOGARDI, János (1974). *Sediment transport in alluvial streams*. Akadémiai Kiadó. Budapest, Hungary.
- BRUK, Stevan (1985). *Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs*. UNESCO, IHP - II Project A.2.6.1. Paris.
- BURKHAM, D.E. (1985). *An approach for appraising the accuracy of suspended-sediment data*. US Geological Survey Professional Paper 1333. Washington, DC.
- CARVALHO, Newton de Oliveira (1981). *Cálculo da descarga sólida total pelo método de Colby*. IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Fortaleza, CE.
- CARVALHO, Newton de Oliveira (1982). *Sedimentologia*. Apostila do Curso de Segurança de Barragens. ELETROBRÁS. Itaipava, RJ.

- CARVALHO, Newton de Oliveira (1984). *Cálculo da descarga sólida total pelo método modificado de Einstein – adaptação ao sistema métrico*. Não publicado. Rio de Janeiro.
- CARVALHO, Newton de Oliveira (1986). *Aplicação do método modificado de Einstein para cálculo da descarga sólida total no sistema métrico – cálculo de Z' segundo Lara*. Não publicado. Rio de Janeiro.
- CARVALHO, Newton de Oliveira, e LOU, Wellington Coimbra (1990). *Evaluation of the useful life of a reservoir on the river Manso. Mato Grosso State, Brazil: a case study*. IAHS Publication No.197. The Hydrological Basis for Water Resources Management – proceedings. Beijing, China.
- CARVALHO, Newton de Oliveira (1991). *Cálculo do assoreamento e da vida útil de um reservatório na fase de estudos de inventário*. IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, RJ.
- CARVALHO, Newton de Oliveira, e CATHARINO, Márcio Gomes, e PRODANOFF, Jorge Henrique Alves (1991). *Curvas de transporte de sedimentos*. IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, RJ.
- CARVALHO, Newton de Oliveira, e CATHARINO, Márcio Gomes, e PRODANOFF, Jorge Henrique Alves (1991). *Avaliação do assoreamento do reservatório da UHE Itaipu, PR, relatório preliminar*. ELETROBRÁS. Não publicado. Rio de Janeiro, RJ.
- CARVALHO, Newton de Oliveira (1994). *Erosão crescente na bacia do rio Doradas (Estado de Tachira, Venezuela)*. FURNAS/ELETROBRÁS/CADAFE. Rio de Janeiro, RJ
- CARVALHO, Newton de Oliveira (1994). *Hidrossedimentologia Prática*. CPRM, ELETROBRÁS. Rio de Janeiro, RJ.
- CARVALHO, N.O. (1998). *Assoreamento e proteção de reservatórios*. V Simpósio Nacional de Controle de Erosão. ABGE. Presidente Prudente, SP.
- CARVALHO, Newton de O., GUILHON, Luiz G. e TRINDADE, Pedro A. (2000). *O assoreamento de um pequeno reservatório - Itiquira, um estudo de caso*. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 5, n. 1. Jan/Mar 2000, 68-79. Porto Alegre, RS.
- CARVALHO, N.O., GUILHON, L.G. e TRINDADE, P.A. (2000). *O assoreamento de pequeno reservatório devido efeito de enchente extraordinária – Itiquira, um estudo de caso*. I Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste. ABRH, UnB, ANEEL e outros. Brasília, DF.
- CEEE, Companhia de Energia Elétrica do Estado (1958). *Estudo sobre o transporte sólido – Rio Camaquã*. Seção de Hidrologia. Porto Alegre, RS.
- CEMIG (1965). *Manual de Hidrometria - Sedimentometria*. Divisão de Hidrologia. Belo Horizonte.
- CHILDERS Jr, Dallas (1969). *Hydrology training manual. Number 3 - Collection of basic sediment data*. Ministry of Agriculture. Royal Government of Afghanistan. Kabul.

- COLBY, B.R., e HEMBREE, C.H. (1955). *Computations of total sediment discharge: Niobrara river near Cody, Nebraska*. US Geological Survey. Water-Supply Paper 1357. Washington, DC.
- COLBY, B.R., e HUBBELL, D.W. (1961). *Simplified methods for computing total sediment discharge with the modified Einstein procedure*. USGS Water-Supply Paper 1593. Washington, DC.
- COLBY, Bruce R. (1963). *Fluvial sediments - a summary of source, transportation, deposition, and measurement of sediment discharge*. USGS, Bulletin 1181-A. Washington, DC.
- COLBY, B.R. (1964). *Discharge of sands and mean-velocity relationships in sand-bed streams*. US Geological Survey, Professional Paper 462-A. Washington, DC.
- CORPS OF ENGINEERS (1961). *Reservoir sedimentation investigation program*. Manual EM 1110-2-4000. USA.
- CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (1976). *Recomendações para os trabalhos de sedimentometria*. Belo Horizonte.
- CUNHA, L. Veiga da (1968). *Avaliação do caudal sólido em escoamentos unidirecionais*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.
- DEJIA, Zhou & DAORONI, Liu, & HAOCHUAN, Gao (1981). *The development of a sand bed load sampler for the Yangtze River*. Proceedings of the Florence Symposium, IAHS Publ. No. 133. Florence, Italy.
- DNAEE, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (1970). *Normas e Recomendações Hidrológicas*. Ministério das Minas e Energia. Brasil.
- DNAEE, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (1977). *Manual para serviços de hidrometria*. Ministério das Minas e Energia. Brasil.
- DNAEE/CESP/ELETROBRÁS (1985). *Técnica de acompanhamento do deslocamento das dunas*. Curso sobre estudo do transporte sólido nos cursos d'água e assoreamento de reservatório de uso múltiplo. Ilha Solteira, SP.
- DNAEE, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (1996). *Inventário das estações fluviométricas*. Brasília.
- EDWARDS, Thomas K. & GLYSSON, G. Douglas (1988). *Field methods for measurement of fluvial sediment*. Open-file report 86-531. USGS. Reston, Virginia.
- EINSTEIN, Hans Albert. 1950. *The Bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. US Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Technical Bulletin no. 1026. Washington, DC.
- ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras (1991). *Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais rios brasileiros*. Relatório do IPH/UFRGS. Rio de Janeiro, RJ.
- ENGEVIX S.A. (1980). *UHE Mascarenhas – Assoreamento da tomada d'água – Análise do problema e indicação de soluções imediatas*. Relatório para Escelsa. Rio de Janeiro, RJ.
- FREIRE, Octávio, e VIZEU, Luiz Antônio S. (1985). *Curso sobre estudo de transporte sólido nos cursos d'água e assoreamento de reservatório de uso múltiplo*. DNAEE/CESP/ELETROBRÁS. Ilha Solteira, SP.
- GEOMAP, Estudos Ambientais (1991). *Catálogo*. Rio de Janeiro, RJ.

- GLYSSON, G. Douglas (1987). *Sediment-transport curves*. US Geological Survey, Open-file Report 87-218. Reston, VA.
- GUY, Harold P. & NORMAN, Vernon W. (1970). *Field methods for measurement of fluvial sediment. Book 3. Chapter C2*. USGS. Washington, DC.
- GUY, Harold P. (1969). *Laboratory theory and methods for sediment analysis. Book 5. Chapter C1*. USGS. Washington, DC.
- GUY, Harold P. and NORMAN, Vernon W. (1970). *Field methods for measurement of fluvial sediment. Book 3, Applications of Hydraulics*. USGS. Washington, DC.
- HADLEY, R.F., e LAL, R., e ONSTAD, C.A., e WALLING D.E., e YAIR, A. (1985). *Recent developments in erosion and sediment yield studies*. UNESCO. Paris.
- HUBBELL, D. W. (1964). *Apparatus and techniques for measuring bedload*. US Geological Survey, WSP 1748. Washington, DC.
- IAHS/AISH, International Association of Hydrological Sciences (1981). *Erosion and sediment transport measurements*. Proceedings of the Florence Symposium 22-26 June 1981. Florence, Italy
- ICOLD, International Commission on Large Dams (1989). *Sedimentation control of reservoirs/Maîtrise de l'alluvionnement des retenues*. Committee on Sedimentation of Reservoirs. Paris.
- IPEN, GEA (1987). *Determinação da vazão sólida por arrasto de fundo no rio Paraná (Guaíra, PR) com utilização de traçador radioativo*. Não publicado. São Paulo, SP
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1980). *Levantamento e prognóstico a respeito de assoreamento das barragens de Passo Real e Ernestina (RS) e Capivari (PR): avaliação do assoreamento*. Relatório para a ELETROBRÁS. São Paulo, SP
- ISO (1985). *Sand fluxmeter, standard version*. ISO/TC 113/SC-N198. Wallingford, UK.
- ISO (1977). *Liquid flow measurement in open channels. Bed material sampling*. ISO 4364. Wallingford, UK.
- JULIEN, Pierre Y. (1995). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- LARA, J.M. (1966). *Computation of Z's for use in the modified Einstein procedure*. USBR. Denver, CO
- LEINZ, Viktor, e LEONARDOS, Othon Henry (1977). *Glossário Geológico*. 2ª Edição. Companhia Editora Nacional. São Paulo, SP.
- LELIAVSKY, Serge (1964). *Introducción a la hidráulica fluvial*. Ediciones Omega S.A. Barcelona.
- MAHMOOD, Khalid, e PONCE, V. Miguel (1975). *Computer program for sediment transport*. Colorado State University. Fort Collins, CO.
- MAHMOOD, K. (1987). *Reservoir sedimentation – impact, extent and mitigation*. World Bank Tech. Paper No. 71. Washington, DC.
- MILLER, Carl R. (1951). *Analysis of flow-duration, sediment-rating curve method of computing sediment yield*. US Bureau of Reclamation. Denver, CO.

- MINARD, Paulo Sérgio P., e SALIM, Lécio Hannar (1985). *Medição in situ de concentração e densidade de sedimentos por métodos nucleares*. Seminário de Aplicação de Traçadores Radioativos em Hidráulica e Sedimentologia. Nuclebrás. Belo Horizonte, MG.
- MORRIS, Gregory L. & FAN, Jiahua (1997). *Reservoir sedimentation handbook*. McGraw-Hill. New York.
- NORDIN, Carl F. (1981). *Instructions for use of the 3-liter and 8-liter collapsible bag sampler*. Lakewood, CO, USGS.
- OEA/PLANVASF (1986). *Diagnóstico sedimentológico da bacia do São Francisco*. Relatório Técnico RTP-86/23, não publicado, por Newton de Oliveira Carvalho. Brasília, DF.
- OTTONI NETTO, Theophilo B.O., e LOMBARDI, Paulo C., e OTTONI, Arthur B. (1989). *Caracterização do grau de assoreamento e da curva de eficiência de retenção do reservatório Soledade*. Aço-Minas. Ouro Preto, MG.
- PAIVA, João Batista de (1988). *Avaliação de modelos matemáticos de cálculo de transporte de sedimentos em rios*. Escola de Engenharia de São Carlos. Tese de Doutorado. São Carlos, SP.
- LAGO, Nilson, e PAIVA, João Batista Dias de (1995). *TSR 1.0 – Software para cálculo do transporte de sedimentos em rios – Manual do usuário*. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.
- PERKINS, Don C., e CULBERTSON, J.R. (1970). *Hydrographic and sedimentation survey of Kajakai reservoir. Afghanistan*. USGS. Washington, DC.
- PONTES, Amauri Beltrão (1977). *Controle de erosão na região noroeste do estado do Paraná. Brasil*. DNOS. Curitiba, PR
- PORTERFIELD, George (1972). *Computation of fluvial sediment discharge*. Techniques of water resources investigation of the USGS. Washington, DC.
- PNUD, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (1977). *Estudos Hidrológicos*. Governo dos Países Centro-América. Pub. N° 140. Manágua.
- RINGEN, Bruce H. (1978). *Representative sampling of water-sediment mixtures*. USA.
- RIQUIER, J. (1982). *Evaluation globale de la dégradation des soils*. Nature et Ressources v. 18 n. 2. Unesco. Paris.
- ROCHA, João S. (1980). *Assoreamento de pequenas albufeiras associadas a centrais elétricas de muito pequena potência*. LNEC. Lisboa.
- ROCHA, João S., e FERREIRA, J.P. Carcomo Lobo (1980). *A erosão hídrica na bacia do rio Guadiana e o assoreamento da albufeira de Alqueva*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Memória n° 541). Lisboa.
- SCHAAFSMA, A.S. e DER KINDEREN, W.J.G.J. (1985). *Ultrasonic instruments for the continuous measurement of suspended sand transport*. Hydraulics Laboratory. Delft.
- SCS (1971). *Sedimentation National Engineering Handbook*. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- SEMMELMANN, Franz Rainer (1981). *Sedimentometria*. Curso Convênio ELETROBRÁS/UFRGS/IPH. Porto Alegre, RS.

- SEPLAN/CNPq (1982). *Ação programada em ciências e tecnologia: recursos naturais hídricos*. III PBDCT. Brasília, DF.
- SEREBRENICK, Roberto, e CARVALHO, Newton de Oliveira (1966). *Definições, finalidade, estabelecimento e aplicações da técnica do hidrograma unitário para uma bacia hidrográfica. Descarga sólida: estudo e exemplificação em rios brasileiros*. DNAEE. Rio de Janeiro.
- SEREBRENICK, Roberto, e CARVALHO, Newton de Oliveira (1970). *Guia prático para estabelecimento de uma curva-chave. Vida útil dos reservatórios*. DNAEE. Rio de Janeiro.
- SHEN, Hsieh Wen (1972). *Sedimentation*. Symposium to Honor Professor H. A. Einstein. Colorado State University. Fort Collins, CO.
- SHEPPARD, John R. (1960). *Investigation of Meyer-Peter and Muller formulas*. USBR. Denver, CO.
- SIMONS, Daryl B & SENTURK, Fuat (1977). *Sediment transport technology*. Colorado State University. Fort Collins, CO.
- SLOFF, C. J. (1997). *Sedimentation in reservoir. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*. Faculty of Civil Engineering. Delft.
- STEVENS Jr., Herbert H. & HUBBELL, David H. (1986). *Computer programs for computing particle-size statistics of fluvial sediments*. Water Resources Investigations Report 86-4141. USGS.
- STEVENS Jr, Herbert H., and YANG, Chih Ted (1989). *Summary and use of selected fluvial sediment-discharge formulas*. USGS, Water Resources Investigations Report 89-4026. Denver, CO.
- STEVENS Jr, Herbert H. (1985). *Computer program for the computation of total sediment discharge by the modified Einstein procedure*. USGS, Water Resources Investigations Report 85-4047. Lakewood, CO.
- STRAND, Robert I. (1974). *Sedimentation – Appendix H on Design of Small Dams*. US Bureau of Reclamation. Washington, DC.
- STRAND, R.I. e PEMBERTON, E.L. (1982). *Reservoir sedimentation*. Technical Guideline for US Bureau of Reclamation. Denver, CO.
- SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION (1940). *Field practice and equipment used in sampling suspended sediment*. Interdepartmental Committee, Report no.1. Federal Inter-Agency Sedimentation Project. Iowa, University of Iowa.
- SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION (1943). *A study of new methods for size analysis of suspended sediment samples, Report N° 7*. Inter-Agency Committee on Water Resources - University of Iowa. Iowa City.
- SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION (1957). *Some fundamentals*. Report No. 6 - Inter-Agency Committee on Water Resources - Minneapolis, Minnesota.
- SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION (1963). *The design of improved types of suspended sediment samplers*. Report No. 6 - Inter-Agency Committee on Water Resources - Minneapolis, Minnesota.
- SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION (1963). *Determination of fluvial sediment discharge, Report No. 14* - Inter-Agency Committee on Water Resources - Minneapolis, Minnesota.

- SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION (1963). *Measurement of the sediment discharge of streams, Report 8* - Inter-Agency Committee on Water Resources - Iowa City, Iowa.
- SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION (1986). *Instruments and reports for fluvial sediment investigations. Catalog*. Federal Inter-Agency Sedimentation Project. Minneapolis, Minnesota.
- SZALONA, J.J. (1982). *Development of a bag type suspended sediment sampler*. Inter-Agency Advisory Committee on Water Data. Report Y. Minneapolis, Minnesota.
- UNESCO (1982). *Sedimentation problems in river basins*. Paris.
- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (1984). *Metodología para la evaluación de la erosión hídrica*. Departamento de Hidráulica e Hidrologia de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid.
- USBR, Bureau of Reclamation (1967). *The 1965 sedimentation survey of Angostura reservoir, South Dakota*. Denver, CO.
- USBR, Bureau of Reclamation (1955). *Step method for computing total sediment load by the modified Einstein procedure*. Sedimentation Section, Hydrology Branch.
- USGS, Geological Survey (1966). *Water resources data for Utah*. Part 2, Water quality records. Salt Lake City, Utah.
- UNEP, 1997 – *Climate Change – Information Kit, United Nations Environment Programme's Information Unit for Conventions*, January, 1997.
- VANONI, Vito A. (1977). *Sedimentation Engineering*. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, NY.
- WILSON Júnior, Geraldo (1973). *Transporte e dispersão de sedimentos*. UFOP, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG.
- WILSON Júnior, Geraldo (1973). *O estudo do transporte, da dispersão dos sedimentos e da acumulação de poluentes nos escoamentos à superfície livre*. UFOP, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG.
- WMO, World Meteorological Organisation. *Guide to Hydrological Practices*. WMO-No. 168. Editions of 1981 and 1994. Geneva.
- WMO, World Meteorological Organisation (1980). *Technical regulations*. WMO N° 555. Geneva, Switzerland
- YANG, Chih Ted (1996). *Sediment transport - Theory and practice*. The McGraw-Hill Companies, Inc. New York.
- YUQIAN, Long (1989). *Manual on operational methods for the measurement of sediment transport*. WMO, World Meteorological Organisation. Geneva, Switzerland.
- ZHIDE, Zhou (1998). *Assoreamento de reservatório e erosão a jusante*. Apostila de curso no III ENES/ABRH. Belo Horizonte.

GLOSSÁRIO DE TERMOS, SÍMBOLOS E UNIDADES

As definições a seguir são dadas para ajudar no entendimento dos termos utilizados no presente Guia, tendo sido obtidas principalmente do Guia do Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 1989) e de publicações do USGS.

- AGRADAÇÃO – Processo geológico pelo qual leitos de rios, áreas planas sujeitas a enchentes e leitos de outros corpos de água são elevados devido a deposição de material erodido e transportado de outras áreas. É o oposto de *degradação*.
- ALUVIAL – Pertinente a depósitos de alúvios por um curso d'água ou escoamento de água.
- AMOSTRA COMPOSTA - uma amostra formada pela combinação de todas as amostras individuais, ou sub-amostras, que pertencem a uma amostragem ou medição de descarga sólida em suspensão efetuada pelo processo de igual incremento de largura ou igual incremento de descarga.
- AMOSTRA POR INTEGRAÇÃO NA VERTICAL - mistura água-sedimento que é acumulada continuamente num amostrador que se move verticalmente quase em uma velocidade de trânsito constante, entre a superfície e um ponto a poucos centímetros acima do leito, entrando a mistura numa velocidade quase igual à velocidade instantânea da corrente em cada ponto na vertical. Devido a que o bico do amostrador fica um pouco acima do fundo do mesmo, há uma zona não amostrada de poucos centímetros de profundidade logo acima do leito do rio (ver *zona não amostrada*).
- AMOSTRADOR DE DESCARGA SÓLIDA DE FUNDO - um equipamento para medição direta da descarga sólida de fundo, de uma parte ou de toda a largura do curso d'água.
- AMOSTRADOR DE MATERIAL DO LEITO - um equipamento para coletar uma amostra do sedimento do qual o leito é composto.
- AMOSTRADOR DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO DO TIPO INTEGRADOR - um amostrador capaz de coletar uma mistura água-sedimento isocinematicamente enquanto seu bico é movimentado através do fluxo.
- ÁREA DE DRENAGEM – a área na qual há uma drenagem natural em um determinado ponto do curso d'água.
- AREIA - partículas de sedimento com granulometria entre 0,062 e 2,0mm pela classificação da AGU. De acordo com a ABNT, são partículas com a granulometria compreendida entre 0,05 a 4,8mm.
- ARGILA - partículas de sedimento menores que 0,004mm pela classificação da AGU. De acordo com a ABNT, argila são partículas com granulometria inferior a 0,005mm.
- ARMADURA – A formação de uma camada resistente de partículas relativamente maiores devido a remoção de partículas finas por erosão.
- ASSOREAMENTO – depósito de sedimento em um leito de rio ou reservatório que esteja prejudicando o uso do recurso hídrico.
- CANAL – termo genérico para qualquer leito natural ou artificial para escoamento de água tendo superfície livre.

- CARGA DE MATERIAL FINO ou CARGA DE LAVAGEM (Fine material load, wash load) - aquela parte da carga total de sedimento que é composta de granulometria não presente em quantidades apreciáveis no sedimento do leito, consistindo de material mais fino que o do leito. Normalmente a carga de material fino é composta de partículas menores que 0,062mm, sendo porém função da carga que o rio transporta.
- CARGA DE SEDIMENTO ou CARGA SÓLIDA (Sediment load) - o sedimento que está sendo transportado por um curso d'água (*carga* se refere ao material em si e não a quantidade que está sendo transportada).
- CARGA DO LEITO (Bed load) - sedimento que se move por saltos, rolando ou deslizando, sobre ou próximo ao leito do curso d'água.
- CARGA SÓLIDA TOTAL ou CARGA TOTAL (Total load) - o sedimento total sendo transportado num curso d'água.
- CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO - a quantidade de sedimento em relação à quantidade transportada de água ou da mistura água-sedimento. Peso seco dos sólidos contidos na mistura água-sedimento em relação ao volume da mistura (mg/l) ou em relação ao peso da mistura (ppm).
- CORRENTE DE DENSIDADE – uma corrente com turbidez alta e com relativa densidade que geralmente se move ao longo do leito de um corpo d'água parado.
- DEGRADAÇÃO – processo geológico pelo qual leitos de rios, áreas planas sujeitas a enchentes e leitos de outros corpos de água são rebaixados devido a remoção de material. É o oposto de *agradção*.
- DELTA - depósito de sedimento formado onde há água em movimento (como na foz de um rio).
- DENSIDADE – a massa de uma substância por unidade de volume, ρ em kg/l ou t/m³.
- DENSIDADE DA MISTURA ÁGUA-SEDIMENTO - massa por unidade de volume, incluindo água e sedimento.
- DEPOSIÇÃO – o processo mecânico ou químico através do qual o sedimento se acumula em um local de águas paradas.
- DEPÓSITO DO LEITO – material fino, geralmente siltes e argilas, depositado no leito de um reservatório e que pode ser mais tarde coberto pelas camadas superiores e frontais.
- DEPÓSITO DAS CAMADAS FRONTAIS DO LEITO – uma camada de depósitos de sedimentos no topo da superfície de um delta.
- DEPÓSITO DAS CAMADAS SUPERIORES DO LEITO – camadas inclinadas de material arenoso depositado ao longo de um declive superior. Essa camada progressivamente cobre um depósito de leito e por sua vez é coberto por uma camada frontal.
- DESCARGA LÍQUIDA ou VAZÃO - a quantidade de água que passa numa seção transversal de um curso d'água em um determinado tempo.
- DESCARGA SÓLIDA ou DESCARGA DE SEDIMENTO - a quantidade de sedimento que é transportada passando em uma seção transversal de um curso d'água numa unidade de tempo. A descarga sólida pode estar limitada, ou se referir, a certa granulometria de sedimento ou ser considerada numa parte específica da

- seção transversal, devido a carga em suspensão, do leito ou de um segmento da seção.
- DESCARGA SÓLIDA DO LEITO (comumente dita como descarga sólida de arrasto) - a quantidade de carga do leito passando em uma seção transversal na unidade de tempo.
 - DESCARGA SÓLIDA DE MATERIAL DO LEITO – a quantidade de sedimento passando numa seção transversal correspondente a partículas do material do leito que estejam se movimentando tanto no leito quanto em suspensão.
 - DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO - a quantidade de sedimento em suspensão passando numa seção transversal de um curso d'água numa unidade de tempo.
 - DESCARGA SÓLIDA NÃO MEDIDA - a quantidade de sedimento em suspensão que o amostrador não teve condições de amostrar.
 - DESCARGA SÓLIDA TOTAL - a descarga sólida total de um curso d'água. Inclui a descarga em suspensão medida, a descarga em suspensão não medida e a descarga do leito.
 - DIÂMETRO ou TAMANHO DA PARTÍCULA - dimensão linear usada para caracterizar o tamanho de uma partícula. O diâmetro pode ser determinado por qualquer uma das diferentes técnicas, incluindo sedimentação, peneiramento, medidas micrométricas ou medidas diretas.
 - DIÂMETRO MÉDIO – o tamanho de sedimento tal que metade do material é composto de partículas maiores que esse diâmetro médio e a outra metade é composta de partículas menores.
 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – a distribuição por frequência da quantidade relativa de partículas em uma amostra que estejam dentro de uma faixa granulométrica ou a distribuição por frequência acumulada de uma certa quantidade de partículas mais grossas ou mais finas que um determinado tamanho. Essas quantidades são expressas como percentagens por massa.
 - EROSÃO – o desgaste da superfície da terra pelo destaque e movimento do solo e fragmentos de rocha devido a ação do movimento de água e outros agentes geológicos.
 - ESCAVAÇÃO (Scour) – o alargamento de uma seção pela remoção de material devido a ação de um fluido em movimento.
 - ESTAÇÃO ou POSTO FLUVIOMÉTRICO – uma seção transversal de canal de rio aonde uma ou mais variáveis são medidas contínua ou periodicamente.
 - INTEGRAÇÃO VERTICAL ou EM PROFUNDIDADE - método de amostragem para obtenção de uma amostra representativa da descarga água-sedimento de toda a vertical, exceto de uma pequena zona não amostrada próxima do leito.
 - LEITO ou FUNDO - leito ou fundo de um curso d'água, reservatório ou lago.
 - MATERIAL FINO – partículas de granulometria mais fina que as partículas presentes em apreciáveis quantidades de material do leito; normalmente são os siltes e argilas (partículas mais finas que 0,062mm, segundo a AGU).
 - MATERIAL DO LEITO (Bed material) - material componente do leito do rio, em geral formado de rochas fragmentadas.
 - PEDRA – partículas de sedimento entre 256 e 64mm pela classificação da AGU.

- PEDREGULHO - partículas de sedimento entre 64 e 2mm pela classificação da AGU. De acordo com a ABNT, argila são partículas com granulometria entre 76 e 4,8mm.
- PESO ESPECÍFICO DO SEDIMENTO - peso seco por unidade de volume do sedimento ou peso seco do sedimento em relação ao volume.
- PRODUÇÃO DE SEDIMENTO ou CONTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTO ou RENDIMENTO SÓLIDO ou DESCARGA SÓLIDA ESPECÍFICA (Sediment yield) - a quantidade total de sedimento afluyente de uma bacia hidrográfica ou de uma área de drenagem em um ponto de referência e em um período específico de tempo. É igual à descarga sólida em relação à área de drenagem.
- RESERVATÓRIO – um lago artificial, bacia ou tanque no qual uma grande quantidade de água pode ser armazenada.
- RIO ALUVIAL ou CURSO D'ÁGUA ALUVIAL – um curso d'água no qual o canal o leito é composto de apreciáveis quantidades de sedimentos transportados pelo escoamento e no qual geralmente há mudanças de forma do leito devido mudanças no escoamento.
- SEDIMENTAÇÃO – um termo amplo que abrange os cinco processos fundamentais responsáveis pela formação de rochas sedimentares: a) intemperismo, b) destaque, c) transporte, d) deposição (sedimentação) e, e) diagênese; sedimentação é também definida como a deposição gravitacional de partículas em suspensão mais pesadas que a água.
- SEDIMENTO – a) partículas derivadas de materiais rochosos ou biológicos que são transportados por um fluido; b) material sólido em suspensão ou depositado no leito.
- SEDIMENTO EM SUSPENSÃO ou CARGA EM SUSPENSÃO (Suspended load) - sedimento que é suportado por componentes ascendentes de correntes turbulentas e que permanece em suspensão por apreciável duração de tempo.
- SEDIMENTO FLUVIAL - todo o material sólido transportado pela água do rio, que tenha uma densidade média aproximada à das rochas fragmentadas: 2,65.
- SEDIMENTOS COESIVOS – sedimentos nos quais a resistência inicial ao movimento ou erosão é afetada grandemente por cadeia de coesão entre partículas.
- SEDIMENTOS NÃO COESIVOS – sedimentos consistindo de partículas isoladas.
- SILTE - partículas de sedimento com granulometria entre argila e areia (0,004 a 0,062mm pela AGU ou 0,005 a 0,05mm segundo a ABNT).
- TALVEGUE – a posição do trecho do rio em que as profundidades são maiores.
- VELOCIDADE DE QUEDA – a taxa de queda ou de assentamento de uma partícula no meio líquido.
- VELOCIDADE DE TRÂNSITO ou DE PERCURSO - velocidade em que o amostrador de sedimento em suspensão é mergulhado numa amostragem por integração na vertical.
- VERTICAL DE AMOSTRAGEM ou simplesmente VERTICAL - uma linha aproximadamente vertical, desde a superfície d'água ao leito, onde são tomadas amostras para definir a concentração ou a granulometria do sedimento.
- ZONA AMOSTRADA – a parte da seção transversal que é representada por amostras de sedimento.

- **ZONA NÃO AMOSTRADA** - distância do bico do amostrador ao fundo do rio numa vertical de amostragem, e que não é amostrada; parte da seção transversal que não é coberta pela amostragem do sedimento.

Símbolos e unidades recomendadas para estudo de transporte de sedimentos em cursos d'água (WMO, 1980)

Elemento	Símbolo	Unidade	Observação
Aceleração devido a gravidade	g	$M s^{-2}$	ISO
Área (seção transversal)	A	m^2	ISO
Área (área de drenagem)	A	km^2	ISO (ha também em uso)
Coefficiente de Chézy [$v(R_h S)^{1/2}$]	C	$m^{1/2} s^{-1}$	ISO
Conveyance (coeficiente)	K	$M^3 s^{-1}$	ISO
Densidade	ρ	$Kg m^{-3}$	ISO
Profundidade, diâmetro	D	m	ISO
Espessura		cm	
Descarga			
(escoamento de rio)	Q	$m^3 s^{-1}$	ISO
(por unidade de área $Q A^{-1}$, ou parcial)	q	$m^3 s^{-1} km^{-2}$ $l s^{-1} km^{-2}$	ISO
Viscosidade cinemática	ν	$M^2 s^{-1}$	ISO
Comprimento	L	cm	ISO
		m	
		km	
Coefficiente de Manning $= R_h^{2/3} S^{1/2} \nu^{-1}$	n	$s m^{-1/3}$	ISO
Massa	M	kg	ISO
		g	
Concentração de sedimento	C_s	$mg l^{-1}$ $kg m^{-3}$	Ou ppm Também em uso $g m^{-3}$
Descarga de sedimento (ou sólida)	Q_s	$t d^{-1}$	
Tensão de cisalhamento	τ	Pa	ISO
Declividade (hidráulica, bacia)	S	Número sem Dimensão	ISO
Temperatura	θ	$^{\circ}C$	ISO
	t		
Sólidos totais dissolvidos	M_d	$mg l^{-1}$	(para solução diluída) ppm também em uso
Velocidade (água)	v	$M s^{-1}$	ISO
Volume	V	m^3	ISO
Perímetro molhado	P_w	m	
Largura (seção transversal, Bacia)	B	m km	ISO

Classificação do sedimento de acordo com a granulometria pela AGU, American Geophysical Union (Classificação de Wentworth)

Classe Granulométrica	Milímetro	Micron	Pés	Tyler Standard	US Standard
	(mm)	(μ)	(in)	(diâmetro da peneira)	(diâmetro da peneira)
<i>Matacão</i> muito grande	4096 – 2048		160 - 80		
<i>Matacão</i> grande	2048 – 1024		80 - 40		
<i>Matacão</i> médio	1024 - 512		40 - 20		
<i>Matacão</i> pequeno	512 - 256		20 - 10		
<i>Pedra</i> grande	256 – 128		10 - 5		
<i>Pedra</i> pequena	128 - 64		5 - 2.5		
<i>Pedregulho</i> muito grosso	64 – 32		2.5 - 1.3		
<i>Pedregulho</i> grosso	32 – 16		1.3 - 0.6		
<i>Pedregulho</i> médio	16 - 8		0.6 - 0.3	2 - ½	
<i>Pedregulho</i> fino	8 – 4		0.3 – 0.16	5	5
<i>Pedregulho</i> muito fino	4 – 2		0.16 - 0.08	9	10
<i>Areia</i> muito grossa	2.000 - 1.000	2000 - 1000		16	18
<i>Areia</i> grossa	1.000 - 0.500	1000 - 500		32	35
<i>Areia</i> média	0.500 - 0.250	500 - 250		60	60
<i>Areia</i> fina	0.250 - 0.125	250 - 125		115	120
<i>Areia</i> muito fina	0.125 - 0.062	125 - 62		250	230
<i>Silte</i> grosso	0.062 - 0.031	62 - 31			
<i>Silte</i> médio	0.031 - 0.016	31 - 16			
<i>Silte</i> fino	0.016 - 0.008	16 - 8			
<i>Silte</i> muito fino	0.008 - 0.004	8 - 4			
<i>Argila</i> grossa	0.004 - 0.0020	4 - 2			
<i>Argila</i> média	0.0020 - 0.0010	2 - 1			
<i>Argila</i> fina	0.0010 - 0.0005	1 - 0.5			
<i>Argila</i> muito fina	0.0005 - 0.00024	0.5 - 0.24			
<i>Colóide</i>	< 0.00024	< 0.24			

Notas: 1) Em alguns países é adotada a seguinte classificação, inclusive no Brasil, pela ABNT (Classificação de Atterberg) -

Pedregulho: 76 - 4.8 mm

Areia: 4.8 - 0.05 mm

Silte: 0.05 - 0.005 mm

Argila: < 0.005 mm

2) Utiliza-se a classificação da AGU nesses trabalhos devido ao uso das fórmulas e programas desenvolvidos no sistema de unidades inglesas.

