

Capítulo 112- Assoreamento de reservatórios

Ordem	Capítulo 112- Assoreamento de reservatórios
112.1	Introdução
112.2	Estudos dos sedimentos que chegam até o reservatorio
112.3	Deposição em reservatório
112.4	Método de Brune
112.5	Métodos para verificação do assoreamento em reservatórios
112.6	<i>Runoff</i>
112.7	Peso específico dos sedimentos
112.8	Cálculo do assoreamento de um reservatório
112.9	Métodos para recuperação do volume assoreado
112.10	Bibliografia e livros consultados

13 páginas

Capítulo 112- Assoreamento de reservatórios

112.1 Introdução

Soliman , 2013 citando Shen e Julien, 1993 expõe os seguintes efeitos devido a acumulação de sedimentos em um reservatório.

1. Reduzir o volume útil de armazenamento de água no reservatório
2. Alterar a qualidade da água perto da barragem
3. Aumentar o nível de inundação a montante da barragem devido ao assoreamento.
4. Influencia a estabilidade do curso de água a jusante da barragem.
5. Afetar a ecologia do curso de água na região da barragem.
6. Provocar outros efeitos ambientais ao alterar a qualidade da água.

O estudo de assoreamento de reservatórios é muito importante e tem um fim prático, que é saber em quanto tempo o reservatório ficará cheio de sedimentos.

A deposição de sedimentos em um reservatório se dá na entrada do mesmo, quando as velocidades diminuem conforme Figura (112.1).

Os materiais de enchimentos são: areia, silte e argila.

Quando se dimensiona um reservatório temos que prever o assoreamento, pois, o mesmo sempre acontecerá. Poderá ser de uns 30 anos ou acima de 300 anos, mas sempre existirá.

Existem dois métodos para ver o assoreamento em um reservatório, um é o **método de Brune** e outro o de **Churchil**.

Vanoni, 2006 mostrou que o método de Churchill é o melhor, entretanto, o **método de Brune é mais fácil** de ser aplicado e devido a isto o usaremos.

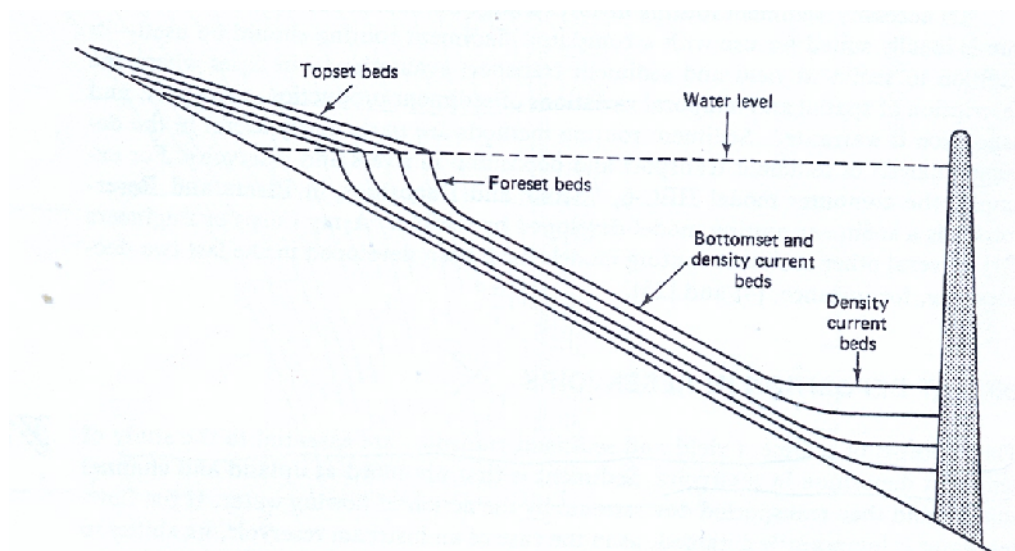


Figura 112.1- Esquema de assoreamento em um reservatório.

Fonte: Ponce, 1989

112.2 Estudos dos sedimentos que chegam até o reservatório

Faltam muitos estudos para os sedimentos, mas os que chegam ao reservatório dependem da área a montante se é menor que $2,56\text{km}^2$ ou maior que $2,56\text{km}^2$.

Se a área a montante é menor que $2,56\text{km}^2$ (1 milha quadrada), então podemos usar a **Equação universal da perda de solos** ou o **Método Simples de Schueler**, pois neste caso a erosão é laminar com formação de ravinas e possíveis boçorocas.

Quando a área for maior que $2,56\text{km}^2$ teremos que a erosão laminar irá para os cursos de água, onde também teremos a erosão nos barrancos dos rios. Muitos estudos foram feitos sobre as equações e já contei 20 deles, sendo que até o filho de Albert Einstein fez uma delas e não conseguiu resolver o problema geral. Daí se pode ver a complexidade do transporte de sedimentos: nem o próprio filho do Einstein conseguiu resolver todos os problemas de sedimentos! Einstein aconselhou seu filho a estudar a física quântica que era mais fácil que a sedimentologia!

Para o transporte de sedimentos em canal adotamos como melhor **método de Yang, 1973** para o qual fizemos estudo especial.

112.3 Deposição em reservatório

Existem vários métodos para deposição em reservatórios, mas o mais fácil de ser utilizado é sem dúvida o **Método de Brune** que fornece uma relação adimensional C/I, mas para isto devemos ter o volume do reservatório “C” em metros cúbicos e o runoff “I” também em metros cúbicos.

112.4 Método de Brune

Brune, 1953 relacionou a relação adimensional C/I como base do seu método que está na Figura (112.2).

Entendemos que C é o volume do reservatório e que I é o volume anual é causada pelo *runoff* na bacia. Esta facilidade de se obter os dados é a grande vantagem, a nosso ver, do método de Brune.

Teoricamente um reservatório pode ter eficiência zero ou 100% de retenção de sólidos. A eficiência de retenção de 100% no reservatório é impossível de acontecer como salienta Brune, 1953. Existem casos em que a eficiência de retenção foi de 100% em lagos nos quais não saiu nenhuma gota de água do vertedor e houve perdas por evaporação e por infiltração no solo.

Os reservatórios com relação C/I = 1 significam que são reservatórios sazonais e aqueles cuja relação C/I > 1 são aqueles que armazenam a água que são os mais comuns.

Brune, 1953 comenta também sobre descargas de fundo para a saída de sedimentos como um controle que podem funcionar ou não dependendo das condições locais como época de baixas vazões.

Brune, 1953 comenta sobre os reservatórios destinados a retenção de sedimentos que pode ter eficiência de 90% e que em outros conforme a relação C/I pode ter eficiência de remoção de somente 2%. Brune, 1953 quando comenta sobre o método de Churchill

salienta que apesar do método ser bom, há grande dificuldade para se definir o período de retenção e outros dados como a velocidade média no reservatório.

Ponce, 1989 estabelece a seguinte ordem para aplicação da curva de Brune:

Primeiro: achar a capacidade (C) do reservatório em m^3 ;

Segundo: determinar o volume médio anual de runoff (I) em m^3 que chega ao reservatório em m^3 ;

Terceiro: usando a Figura (112.2) determinar a porcentagem de eficiência como função da relação C/I para as características de três sedimentos. Estimar a textura do sedimento, estudando as fontes de sedimentos e a fração de transporte. A curva superior da Figura (112.2) é aplicada a areia grossa ou sedimentos floculados; a linha média é destinada a sedimentos com larga variação de diâmetros de partículas e a linha inferior é para siltes finos e argilas.

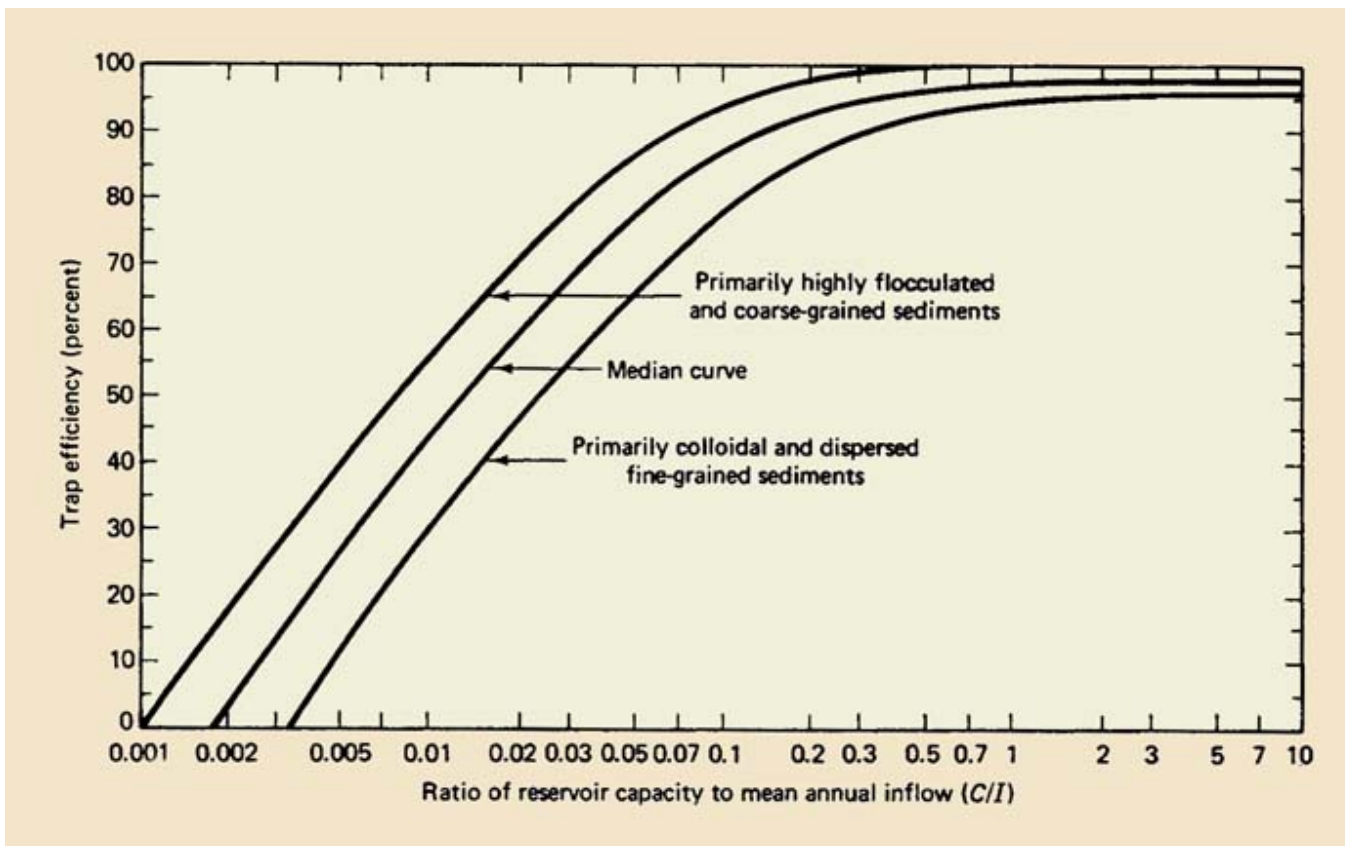


Figura 112.2- Curva de Brune elaboradas em 1953

Subramanya, 2008 calculou analiticamente as curvas de Brune na seguinte equação:

$$= K \cdot \ln (C/I) + M$$

Sendo:

=eficiência de detenção em porcentagem

C/I= relação Capacidade do Reservatório em m^3 / runoff anual (m^3)

K e M : coeficientes que dependem da relação C/I conforme Tabela (112.2)
ln= logaritmo neperiano

Tabela 112-2- Valores de K e M dependente de C/I

C/I	K	M
0,002 a 0,03	25,025	158,61
0,03 a 0,10	14,193	119,30
0,10 a 0,70	6,064	101,48

Fonte: Subramanya, 2008

Exemplo 112.1

Usando o método de Brune, calcular o tempo de enchimento de um reservatório em uma bacia com os seguintes dados:

Área da bacia= $4,92\text{km}^2 = 492\text{ ha}$

Precipitação média anual = 1660mm

Runoff médio anual suposto de 40% da precipitação= 664mm

Runoff anual=I= $(664\text{mm}/1000) \times 492\text{ha} \times 10000\text{m}^2 = 3.266.880\text{m}^3/\text{ano}$

C= volume do reservatório = 122.428m^3

I = runoff anual= $3.266.880\text{m}^3/\text{ano}$

C/I = $122.428 / 3.266.880\text{m}^3/\text{ano} = 0,037$

Entrando na curva média da Figura (16.1) achamos **75%= 0,75**.

Usando Subramanya, 2008 para o cálculo analítico das curvas de Brune:

$$\begin{aligned} &= K \cdot \ln(C/I) + M \\ &= 14,193 \cdot \ln(0,037) + 119,30 = 72,5\% \end{aligned}$$

Supondo que a descarga total de sedimentos é de 3 ton/dia e para 365 dias teremos:

Dst= 365 dias x 3 ton/dia= 1095ton/ano

$$S = \text{Dst} \times \text{ER} / \text{ap}$$

$$S = 1095 \times 0,75 / 1,552 = 529\text{m}^3/\text{ano}$$

Tempo de duração do barramento= $122.428\text{m}^3 / 529\text{m}^3/\text{ano} = 231\text{ anos}$

112.5 Métodos para verificação do assoreamento em reservatórios

Conforme Coiado, 2001 existe dois métodos básicos.

No primeiro método determina-se o tempo ocupado pelos sedimentos em porcentagem do volume total.

No segundo método fixa-se a porcentagem de volume total reservado para sedimentos e determina-se o tempo.

De modo geral o primeiro método vai de período de até 50anos ou 200 anos enquanto que o segundo método é para tempos maiores.

112.6 *Runoff*

Uma maneira que podemos estimar o *runoff* que chega a um reservatório é se usar o Método abcd de Thomas, 1981.

Outra maneira é usar o Método de Meyboon ou usar uma fórmula empírica como a descrita abaixo.

Fórmulas empíricas para a recarga média anual

Possuímos a recarga de vários locais, sendo a mais comum a das chuvas, que é a recarga natural, mas existe a recarga de canal (infiltração), de irrigação e de reservatórios de infiltração.

Subramanya, 2008 apresentou a fórmula de Khosla com estudos de bacias na Índia e nos Estados Unidos chegando a uma equação empírica entre a precipitação e o *runoff*.

Desconhecemos fórmulas empíricas feitas no Brasil.

$$R_m = P_m - L_m$$

Sendo:

R_m = runoff mensal (mm) com a condição $R_m \geq 0$

P = precipitação mensal (mm)

L_m = perdas mensais (mm)

$L_m = 0,48 \times T_m \times 10$ para $T_m > 4,5^\circ\text{C}$

T_m = temperatura média mensal ($^\circ\text{C}$)

Quando a temperatura for $4,5^\circ\text{C}$ deverá ser tomado os dados de L_m na Tabela abaixo.

T (C)	4,5	-1	-6,5
Lm (mm)	21,7	17,8	15,2

Exemplo 112.2

Dados as precipitações e temperatura médias mensais de Guarulhos calcular o *runoff* anual segundo a fórmula de Khosla e o coeficiente anual de *runoff*.

	janeiro	fev	Mar	Abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	total	
P(mm)	254,1	251,7	200,9	58,3	70,3	39	30,8	24,9	75,1	137,4	130,5	214,7	1487,7	Coeficiente
Temp (°C)	23,7	22,8	23,2	21,3	18,6	17,5	16,7	18,8	19	20,8	21,5	22,9		0,36
L_m (mm)	113,76	109,44	111,36	102,24	89,28	84	80,16	90,24	91,2	99,84	103,2	109,92		
R (mm)	140,34	142,26	89,54	0	0	0	0	0	0	37,56	27,3	104,78	541,78	

Fazendo os cálculos achamos o *runoff* anual de Guarulhos em 541,78mm e a relação entre o *runoff* e a precipitação é 0,36.

112.7 Peso específico dos sedimentos

Vamos usar o método usado pelo *Bureau of Reclamation*, 1987 citado por Yang, 1986.

O *Bureau of Reclamation* classifica a operação dos reservatórios em quatro itens conforme Tabela (112.3).

Tabela 112.3- Operação de reservatórios conforme US Bureau of Reclamation, 1987

Operação	Operação do reservatório
1	Sedimentos submersos ou quase sempre submersos
2	Normalmente submersos com moderadas variações de nível
3	Reservatório normalmente vazio
4	Sedimentos no fundo do rio

Uma vez escolhido a operação do reservatório na Tabela (112.3) escolhemos o peso específico inicial da argila, silte e areia e calculamos uma densidade média da seguinte maneira:

$$W_o = W_c \cdot p_c + W_m \cdot p_m + W_s \cdot p_s$$

Sendo:

W_o = peso específico médio (kg/m^3)

p_c , p_m , p_s = porcentagem de argila (*clay*), silte e areia (*sand*) respectivamente dos sedimentos de entrada no reservatório.

W_c , W_m , W_s = peso específico inicial da argila, silte e areia respectivamente que podem ser obtidos na Tabela (112.4).

Tabela 112.4- Peso específico da argila, silte e areia conforme a operação do reservatório conforme Yang, 1986.

Operação	Peso específico da Argila em (kg/m^3)	Peso específico do Silte em (kg/m^3)	Peso específico da Areia em (kg/m^3)
1	416	1120	1550
2	561	1140	1550
3	641	1150	1550
4	961	1170	1550

Ainda conforme Yang, 1986, Miller, 1953 elaborou a seguinte equação:

$$W_T = W_o + 0,4343 \cdot K \cdot [T/(T-1) \cdot \ln(T) - 1]$$

Sendo:

W_T = peso específico médio após T anos de operação

W_o = peso específico médio (kg/m^3)

K = constante baseado no tipo de operação do reservatório conforme Tabela (112.5)

Tabela 112.5- Valores de K para areia, silte e argila conforme operação do reservatório
Fonte: Yang, 1986.

Operação	K para areia	K para silte	K para argila
1	0	91	256
2	0	29	135
3	0	0	0

Devemos lembrar que os sedimentos que chegam a um reservatório é quase sempre uma mistura de areia, silte e argila em proporções que podem ser achadas em campo ou determinadas por caso semelhante.

Conforme Yang, 1986 cita estudos do *U.S. Bureau of Reclamation*, 1987 que achou uma média de depósito de sedimentos em reservatórios:

Argila: 23%
Silte: 40%
Areia: 37%

Exemplo 112.3

Considerando que a distribuição dos sedimentos na entrada de um reservatório sempre submerso tem 23% de argila, 40% de silte e 37% de areia, determinar a densidade média dos sedimentos após 100anos de operação.

Trata-se de reservatório com **Operação Tipo 1**

$$W_o = W_c.p_c + W_m.p_m + W_s.p_s$$

$$W_o = 416 \times 0,23 + 1550 \times 0,37 + 112 \times 0,40 = 1117,18 \text{ kg/m}^3$$

Vamos achar um valor K médio:

$$K = 0,37 \times 0 + 0,40 \times 91 + 0,23 \times 256 = 95,28$$

$$W_T = W_o + 0,4343.K.[T/(T-1) \cdot \text{LN}(T) - 1]$$

$$W_T = 1117,18 + 0,4343 \times 95,28 \times [100/(100-1) \cdot \text{LN}(100) - 1] = 1268 \text{ kg/m}^3$$

112.8 Cálculo do assoreamento de um reservatório

Newton de Oliveira Carvalho elaborou um texto denominado “Cálculo do assoreamento e da vida útil de um reservatório na fase de estudos de inventário”.

No estudo é sugerido que a descarga sólida total média anual seja feita da seguinte maneira:

$$\text{Dst} = Q_t \times 365$$

Sendo:

Dst= descarga sólida total anual (m^3 / ano)

Qt= descarga sólida diária (ton/dia)

365dias por ano

É sugerido por Carvalho o estimativa para 100anos de vida de um reservatório usando o método de Brune para se obter a relação ER.

$$S = Dst \times ER / ap$$

Sendo:

S= volume de sedimentos armazenado no reservatório (m³/ano)

ER= relação obtido no método de Brune

ap= peso específico aparente (ton/m³)

Para areia adota-se 1,554 ton/m³

Para silte: 1,12 a 1,17 ton/m³

Para argila: 0,82 ton/m³

$$T = Vres. / S$$

Sendo:

T=tempo de vida útil do reservatório (anos)

Vres= volume do reservatório (m³)

S= volume de sedimentos armazenado no reservatório (m³/ano)

Exemplo 112.4

Cálculo do tempo de enchimento de um reservatório usando o método de Brune aplicação do método de Yang,1973 para transporte de sólidos não coesivos.

Área da bacia= 4,92km²= 492 ha

Precipitação média anual = 1.660mm

Area impermeável em fração= 0,19

Runoff médio anual suposto 0,4 x 1660= 664mm

Nota: temos que tomar o runoff médio anual de 664mm

Vazão média diária=(664mm/1000) x 492ha x 10000m²=
3.266.880m³/ano

C= 122.428m³ (volume do reservatório)

I = runoff anual= 1.396.591m³/ano

C/I = 122.428/ 1.396.591m³/ano = 0,037

Entrando na curva média de Brune da Figura (112.2) achamos **75%= 0,75**. Supondo que a descarga total de sedimentos é de 3 ton/dia e para 365 dias teremos:

Dst= 365 dias x 3 ton/dia= 1095ton/ano

$$S = Dst \times ER / ap$$

$$S = 1095 \times 0,75 / 1,554 = 528m^3/ano$$

Tempo de duração do barramento= 122.428m³ / 528m³/ano= 232 anos

112.9 Métodos para recuperação do volume assoreado

Há 4 métodos básicos para desassoreamento de um reservatório:

- Descarga de fundo
- Sifonagem
- Dragagem
- Métodos de conservação do solo

O **sifonamento** só funciona bem para a remoção de sedimento de um reservatório conforme Yang, 2003 quando o mesmo é pequeno.

A **descarga** funciona muito bem quando o reservatório é estreito, A *dragagem* é uma remoção mecânica é um método muito caro e deve ser usado quando forem dispensados os outros métodos. Um problema que ocorre é onde depositar o material dragado.

Yang, 2003 cita como exemplo de prolongar a vida útil de um reservatório, minimizar a entrada de sedimentos e maximizar a saída de sedimentos do reservatório.

Medidas de preservação do solo podem ser tomadas para reduzir a erosão.

O método de conservação do solo consiste em metodologia recomendado pela Unesco, 1985 conforme Yang, 2003 em que se incluem as medidas estruturais e medidas não estruturais.

Para as medidas estruturais de conservação do solo para evitar erosão, a alternativa é armazenar os sedimentos antes de chegarem ao reservatório através de reservatório de detenção e sedimentos.

Nas medidas não estruturais o método consiste em terraceamento, rotação de vegetação de modo a evitar a erosão.

112.10 Bibliografia e livros consultados

- ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica). *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Brasília, DF, 2000, 107 páginas
- BRUNE, GUNNAR M. *Trap efficiency of reservoirs*. junho de 1953. American Geophysical Union, páginas 407 a 418.
- CARVALHO, NEWTON DE OLIVEIRA et al. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Brasília, DF, 2000, 107 páginas ANEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica)
- CARVALHO, NEWTON DE OLIVEIRA. *Cálculo do assoreamento e da vida útil de um reservatório na fase de estudos de inventário*.
- COIADO, EVALDO MIRANDA. *Assoreamento de reservatórios*. in Hidrologia aplica à gestão de pequenas bacias hidrográficas. ABRH, 2001, 624 páginas.
- HAAN, C. T. et al. *Design Hydrology and sedimentology for small catchments*. Academic press, 1994, 588páginas.
- HADLEY, R. F e WALLING, D. E. *Erosion and sediment yield: some methods of measurement and modeling*. University Press, Cambridge, 1984 21páginas.
- LINSLEY, RAY K et al. *Hydrology for engineers*. 3a ed. McGraw-Hill, 1982, 508 páginas.
- MCCUEN, RICHARD H. *Hydrologic analysis and design*. 2a ed. 1998, 814 páginas. *measurement and modeling*. University Press, Cambridge, 1984 21páginas.
- PONCE, VICTOR MIGUEL. *Engineering Hydrology- principles and practices*. Prentice-Hall, 1989, ISBN 0-13-325466-1,639 páginas.
- RAMOS, CARLOS LLORET et al. *Campanhas hidrosedimentométricas na Região Metropolitana de São Paulo*.
- SCAPIN, JULIANA. *Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria, RS*. Dissertação de Mestrado, ano 2005,114páginas.
- SOLIMAN, MOSTAFA M. *Engenharia hidrológica das regiões áridas e semi-áridas*. Editora LTC, 358 páginas, 2013, Rio de Janeiro.
- SUBRAMANYA, K. *Engineering Hydrolog*. 3a ed. Tata McGraw- Hill, New Delhi, Índia, 2008, 434 páginas, ISBN (13) 978-0-07-015146-8
- USACE. *Stable channel desing functions*. Chapter 12. www.usbr.gov
- USBR (UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION). *Non cohesive sediment transport*. Chapter 3. www.usbr.gov .
- VANONI, VITO A. *Sedimentation Engineering*. ASCE- American Society of Civil Engineers, USA, ISBN 0-7844-0823-8, ano 2006, 418 páginas.
- YANG, CHIH TED, *Sediment transport. Theory and practice*. Krieger Publishing, Florida, 2003 ISBN 1057524-226-5, 396 página