

**Capítulo 95**  
**Transporte da carga total de sedimentos em rios de  
pequeno porte pelo Método de Yang, 1973**

**“Conhecimento é acumular dados; sabedoria é simplificá-los”.**  
citação usada pelo eng. agrônomo José Luiz Viana do Couto

## Introdução

Comenta-se como brincadeira, que o estudo de transporte de sedimentos é tão complexo, que nem o filho do físico *Albert Einstein* chamado *Hans Albert Einstein* conseguiu resolver (Existe um método feito pelo filho do Einstein denominado: Método de *Einstein*).

O conselho que Albert Einstein deu ao seu filho era de *que se dedicasse a física quântica que era um assunto menos complicado do que a sedimentologia dos rios*.

Recomendamos para o transporte de sedimentos o seguinte:

- **Equação revisada Universal de Perdas de Solo (RUSLE)** deve-se a erosão laminar, ravinas e boçorocas para pequenas áreas e não para áreas grandes conforme Ponce, 1989. **Vanoni, 2006 ressalta sua confiabilidade na equação universal de perdas do solo.**
- **Método Simples de Schueler, 1987** ( $A \leq 2,54 \text{ km}^2$ )
- Método de Yang para córregos e rios.

Guarulhos, 29 de outubro de 2013

Engenheiro Plínio Tomaz

| <b>Ordem</b> | <b>Capítulo 95- Transporte da carga total de sedimentos em rios de pequeno porte pelo Método de Yang, 1973</b> |
|--------------|--|
| 95.1         | Introdução   |
| 95.2         | O que é rio pequeno?   |
| 95.3         | Estimativa de transporte de sedimento  |
| 95.4         | Escolha do método de cálculo   |
| 95.5         | Método de Yang, 1973   |
| 95.6         | Vazão modeladora   |
| 95.7         | Método de <i>Brune</i>   |
| 95.8         | Cálculo do assoreamento de um reservatório   |
| 95.9         | Métodos para recuperação do volume assoreado   |
| 95.10        | Equações para transporte de sedimentos   |
| 95.11        | Bibliografia e livros recomendados   |

23 páginas

## Capítulo 95- Transporte da carga total de sedimentos em rios de pequeno porte pelo Método de Yang, 1973

### 95.1 Introdução

Existem tantos métodos para a previsão do transporte de sedimentos que normalmente o profissional fica confuso, pois primeiramente é difícil conhecer todos eles profundamente para a sua aplicação correta e depois é saber que muitos métodos foram feitos com poucas pesquisas de campo ou pesquisas somente em laboratório cujos resultados são duvidosos.

Para isto é que resolvemos mostrar somente um único método que é o de Yang, 1973 que é fácil de usar e se aplica a todos os casos.

O objetivo do cálculo do transporte de sedimentos é acharmos o tempo de vida útil de um reservatório com a deposição de sedimentos no fundo do mesmo.

Vamos apresentar o Método de Yang, 1973 para transporte da carga total de sedimentos (*total load*) em rios de pequeno porte para ser usado na verificação do tempo de vida útil de um reservatório resultante de um barramento.

**Observamos que não estamos usando o Método de Yang para dimensionamento do canal não-coesivo e sim somente para o transporte da carga total de sedimentos.** Para o dimensionamento de um canal podemos usar o método da tensão trativa ou velocidade máxima recomendado por French, 2007 e Akan, 2008.

Conforme USBR, Yang elaborou três métodos:

- **Yang, 1973** destinado a transporte de sedimentos de areia com critério de início de movimento.
- Yang, 1979 destinado a transporte de sedimentos de areia sem início de movimento.
- Yang, 1984 destinado a transporte de sedimentos de pedregulhos.

Iremos apresentar neste capítulo somente o método de Yang, 1973.

O método de Yang é um **Método de Estimativa Indireta de Descarga Total de sedimentos**, pois usaremos poucos dados de pesquisa, ou seja, somente o diâmetro médio da partícula de sedimentos  $D_{50}$ .

### 95.2 O que é rio pequeno?

Não existe uma definição precisa e aceita por todos, mas comumente define-se o seguinte:

- **Rio de grande porte:** quando a média anual da profundidade é maior que 4 m. Exemplo: Rio Amazonas, Rio Mississipi, Rio Paraíba do Sul, etc.
- **Rio de porte médio:** quando a média anual da profundidade varia de 2m a 4m.
- **Rio de pequeno porte:** quando a profundidade média anual é menor que 2m.

Trataremos aqui neste capítulo de transporte de sedimentos de rios de pequeno porte, usando como base a Dissertação de Mestrado de Juliana Scapin da Universidade de Santa Maria no Rio Grande do Sul; o livro *Sediment Transport- Theory and Practice* de Yang, 2003 e o Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios da ANEEL, 2000.

### 95.3 Estimativa de transporte de sedimento

A melhor maneira de sabermos corretamente o transporte de sedimentos é fazermos o que se chama de **Campanha sedimentológica** que dura de 1 a 2 anos, e onde são feitas medições em campo de vazões, ensaios granulométricos e de concentração de sólidos em suspensão e no fundo do rio.

Os custos geralmente são elevados para uma campanha sedimentológica motivo pelo qual faremos uma estimativa usando algumas amostras de análise granulométrica do fundo do rio.

Vamos relacionar alguns dos equipamentos usados numa campanha sedimentológica baseado em Scapin, 2005:

- **Dados fluviométricos:** podem ser obtidos com limnógrafo eletrônico de pressão com datalogger que faz registros do nível de água com intervalos de 5min quando o nível de água sofre variação de 5milímetros.
- **Medição de vazão:** uso do molinete fluviométrico universal onde se calcula a seção média variando a altura do molinete em 0,50m
- **Sólidos em suspensão:** para isto é usado um amostrador de sedimentos em suspensão denominado USDH-48 (MAS-1). As amostras são feitas em diversos pontos de uma seção com distancia vertical de 0,50m. O material coletado é colocado em uma garrafa com capacidade de 500mL
- **Sedimento do fundo:** para o sedimento do fundo de um rio pode ser usado um amostrador modelo Helley Smith sendo o material armazenado em um saco. Para uma determinada seção são tiradas amostras em  $\frac{1}{4}$  da largura da seção,  $\frac{1}{2}$  da seção e  $\frac{3}{4}$  da seção.

### 95.4 Escolha do método de cálculo

Existem cerca de 10 métodos para estimativa de transporte de sedimentos sendo que alguns necessitam de diversas informações como análise granulométrica do fundo e do material em suspensão.

O que usaremos é um método que usa o mínimo de dados chamado de método de estimativa indireto como o Yang, 1973.

Existem métodos como o de Toffaleti, 1968 que funcionam muito bem em rios de grande porte e outros que funcionam em rios de médio porte como Engelung e o método que funciona em rios de pequeno porte como o **Método de Yang, 1973**.

A Associação dos Engenheiros Civis dos Estados Unidos em 1982 fez uma comparação de 8 equações para sedimento de transporte, baseado em 40 testes de campos para a carga total de sedimentos

**Tabela 95.1- Rank dos Métodos de Transportes de sedimentos conforme pesquisas da ASCE, 1982**

| Rank | Método de transporte de sedimentos              |
|------|---|
| 1    | Yang, 1973- Foi o método que obteve melhor Rank |
| 2    | Laursen, 1958                                   |
| 3    | Ackers e White, 1973                            |
| 4    | Engelund e Hansen, 1967                         |
| 5    | Bagnold, 1956                                   |
| 6    | Meyer-Peter e Mullher, 1948 e Einsten, 1950     |
| 7    | Meyer-Peter e Mullher, 1948                     |
| 8    | Yalin, 1963                                     |

Fonte: Yang, 2003

Yang, 2003 apresenta a Tabela (95.2) onde para um problema real para transporte de sedimentos foi achado 1900 ppm de peso.

**Tabela 95.2- Previsão de transporte de sedimentos por 7 métodos e comparação com o transporte medido de 1900ppm conforme Yang, 2003**

| Método            | Concentração de sedimento em peso (ppm) |
|-------------------|---|
| <b>Yang, 1973</b> | <b>1910 (Melhor)</b>                    |
| Ackers e White    | 2400                                    |
| Engelund e Hansen | 3120                                    |
| Shen e Hung       | 2400                                    |
| Colby             | 1623                                    |
| Bagnold           | 500                                     |
| Laursen           | 800                                     |

No resultado foi dado como o melhor o método de Yang, 1973 que adotaremos.

O programa HEC-6 do *US Army Corps of Engineers* usa o método de Yang, 1973 como a equação escolhida para os cálculos.

### 95.5 Método de Yang, 1973

O método de Yang, 1973 será feito para solos não-coesivos e em rios de pequeno porte, usando Scarpin, 2005 e descrito por Paiva, 2001.

Conforme Capítulo 12 sobre *Stable Channel Design functions* temos o seguinte:

- Diâmetros de sedimentos na faixa de 0,062mm a 7,0mm e
- Concentração variando de 10ppm a 585.000ppm,
- Largura dos canais entre 0,13m a 524m e
- Profundidade entre 0,01m a 14,82m,
- Temperatura na faixa de 34,3 °C,
- Declividades entre 0,000043m/m a 0,029m/m e
- Velocidades entre 0,23m/s a 1,94m/s

### Dados de entrada:

- Diâmetro médio do sedimento (m)
- U= velocidade média do escoamento (m/s)
- Q= vazão (m<sup>3</sup>/s) calculada para Tr=1,5anos ou outro critério.
- B= largura da superfície do canal (m)
- $\nu$  = viscosidade cinemática da água (m<sup>2</sup>/s)
- d= profundidade da lâmina de água (m)
- Rh= raio hidráulico (m)
- S= declividade da linha de água (m/m)

#### a) Cálculo da velocidade de atrito (U\*) relativa aos grãos

$$U^* = (9,81 \cdot Rh \cdot S)^{0,5}$$

Sendo:

U\*= velocidade de atrito (m/s)

Rh= raio hidráulico da seção (m)

S= declividade da linha de água e que podemos fazer coincidir com a declividade do rio (m/m).

#### b) Velocidade de queda da partícula de sedimento em suspensão (m/s)

Existem duas equações sendo uma devida a Stokes quando as partículas forem menores que 0,1mm e outra devida a Rubey, 1933, quando as partículas forem maiores ou iguais que 0,1mm.

#### Velocidade de queda para partículas <0,1mm devido a Stokes

$$W = (1/18) \cdot [(s-1) \cdot g \cdot D^2] / \nu$$

Sendo:

W= velocidade de queda da partícula (m/s)

g= 9,81m/s<sup>2</sup>= aceleração da gravidade

D= diâmetro médio da partícula (m)

S= 2,65

$\nu$ = viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s)= 0,0000102m<sup>2</sup>/s

#### Velocidade de queda para partículas maiores ou iguais a 0,1mm devido a Rubey, 1933.

$$W = \{ [(2/3) \cdot g (\gamma_s/\gamma - 1) \cdot D^3 + 36 \cdot \nu^2]^{0,5} - 6 \cdot \nu \} / D$$

Sendo:

W= velocidade de queda da partícula (m/s)

g= 9,81m/s<sup>2</sup>= aceleração da gravidade

D= diâmetro da partícula (m)

$\nu$  = viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s) = 0,0000102m<sup>2</sup>/s  
 $\gamma_s$  = peso específico da água igual a 1,00

Yang, 2003 apresenta a equação para a **viscosidade cinemática** em função da temperatura média da água.

$$\nu = 1,792 \times 10^{-6} / (1,0 + 0,0337 T + 0,000221 T^2)$$

Sendo:

T = temperatura da água (°C)

$\nu$  = viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s)

Para **partículas maiores que 2mm**, Yang, 2003 mostra uma equação para velocidade de queda a temperatura de 16 °C.

$$W = 3,32 d^{0,5}$$

Sendo:

W = velocidade de queda da partícula (m/s)

d = diâmetro da partícula (m)

**c) Cálculo da velocidade crítica  $U_c$  que depende do fator  $U^* \cdot D / \nu$**

**Quando:  $1,2 < U^* \cdot D / \nu < 70$**

$$\text{Então: } U_c/W = 2,5 / [\log (U^* \cdot D / \nu) - 0,06] + 0,66$$
$$U_c = W \cdot \{2,5 / [\log (U^* \cdot D / \nu) - 0,06] + 0,66\}$$

**Quando:  $U^* \cdot D / \nu \geq 70$**

$$\text{Então: } U_c / W = 2,05$$
$$U_c = W \times 2,05$$



**d) cálculo da concentração total em ppm**

O cálculo da concentração total do material do leito no escoamento para grãos de diâmetro até 2 mm é dado pela equação:

$$\log CT = 5,435 - 0,286 \cdot \log (W \cdot D/v) - 0,457 \cdot \log (U^*/W) + [(1,799 - 0,409 \cdot \log (W \cdot D/v) - 0,314 \cdot \log (U^*/W)) \cdot \log (U \cdot S/W - U_c \cdot S/W)]$$

Segundo Yang, 2003 a equação acima resultou de 463 dados obtidos em laboratório com  $R^2 = 0,971$ . A equação acima pode ser usada para concentração menor ou maior que 100mg/L.

Sendo:

CT= concentração total (ppm) ou (mg/L) ou ( $g/m^3$ )

U=V= velocidade no córrego (m/s)

S= declividade do córrego (m/m)

U<sub>c</sub>= velocidade critica (m/s) que depende do diâmetro da partícula

Yang, 1973 introduziu mais tarde outra equação para quando a concentração de sedimentos for maior que 100 ppm. Foi mostrado por Yang que os resultados são iguais a equação anterior.

**Preferimos usar a equação abaixo:**

$$\log CT = 5,165 - 0,153 \cdot \log (W \cdot D/v) - 0,207 \cdot \log (U^*/W) + [(1,780 - 0,360 \cdot \log (W \cdot D/v) - 0,480 \cdot \log (U^*/W)) \cdot \log (U \cdot S/W)]$$

Para grãos de **diâmetro maior ou igual a 2mm** a concentração total de material do leito no escoamento é dado pela equação:

$$\log CT = 6,681 - 0,633 \cdot \log (W \cdot D/v) - 4,816 \cdot \log (U^*/W) + [(2,784 - 0,305 \cdot \log (W \cdot D/v) - 0,282 \cdot \log (U^*/W)) \cdot \log (U \cdot S/W - U_c \cdot S/W)]$$

**e) Descarga sólida (ton/dia)**

**A descarga sólida total em ton/dia é dada pela equação:**

$$Q_t = 0,0864 \cdot Q \cdot CT$$

Sendo:

Q<sub>t</sub>= descarga total (ton/dia)

Q= vazão ( $m^3/s$ )

CT= concentração em ppm (mg/L)

### 95.6 Vazão modeladora

Uma das grandes dificuldades é adotar a vazão modeladora, isto é, qual a o período de retorno que devemos usar para obtermos a vazão ideal e que sirva como vazão modeladora.

**A vazão modeladora é aquela representativa do transporte sólido anual conforme Carlos Lloret Ramos.**

Carlos Lloret Ramos et al nas Campanhas hidrosedimentométricas na Região Metropolitana de São Paulo chegou a valores para o rio Aricanduva de  $1,43\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$  e  $0,56\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$  para o rio Cabuçu de Cima, o que coincidiu com as citações de Garde e Ranga Rajum, 1985 que para a vazão modeladora o período de retorno deverá estar entre 1,5 anos a 2,0anos.

**Dica: adotaremos neste trabalho como vazão modeladora aquela obtida com período de retorno de  $T_r=1,5$  anos.**

Lloret cita ainda a vazão de seção plena ou vazão dominante que seria uma vazão fictícia que se ocorresse ao longo do ano transportaria a mesma quantidade de sedimentos do hidrograma anual.

Yang, 2003 mostra que o pico do hidrograma de enchente não é o pico do hidrograma de transporte de sólidos, sendo este último bem menor.

#### Exemplo 95.1

Dimensionar pelo método de Yang, 1973 o transporte de sólidos de um curso de água em uma bacia com os seguintes dados:

Área da bacia=  $4,92 \text{ km}^2$

L= comprimento do talvegue (km)= 3,44km

Diferença de nível do ponto mais alto ao ponto considerado= 161m

Declividade média do talvegue= 0,02m/m

Temperatura da água = 20 graus centígrados

Tempo de concentração calculado pelo método de Kirpich= 46,57min

Método de I-PAI-WU

**Tabela 95.3- Cálculos**

|                  | <b>Pesquisas de Julian Scapin</b> |
|------------------|-----------------------------------|
|                  | Arroio Cancela                    |
| <b>Local:</b>    | Santa Maria Rio Grande do Sul     |
| <b>Tr (anos)</b> | <b>1,50</b>                       |
| K                | 870,38                            |
| A                | <b>0,24</b>                       |
| B                | 15,2                              |
| C                | 0,73                              |
| <b>tc (min)</b>  | 46,57                             |
| I (mm/h)         | 47,28                             |
| Qb (m3/s)        | 0,00                              |
| Talvegue(km)     | 3,44                              |
| Decl (m/m)       | 0,020000                          |
| Decl (m/km)      | 20,0000                           |
| Kirpich tc (min) | 46,57                             |
| tc (horas)       | 0,78                              |
| <b>A (km2)</b>   | <b>4,92</b>                       |
| F                | 1,37                              |
| C1               | 0,60                              |
| C2               | 0,38                              |
| C                | 0,53                              |
| Abaco K          | 0,97                              |
| Q (m3/s0)        | <b>27,7</b>                       |
| Qp (m3/s)        | <b>27,68</b>                      |
| VT(m3)=          | 85198                             |
| f=C.C!/C2        | 0,842                             |
| V1=              | 35881,6                           |
| tb (s)           | 6156,15                           |
| tb (h)           | 1,7                               |
| t1= 2xV1/Qp=     | 2592,69                           |
| t1 (horas)=      | 0,72                              |

Observar que a vazão de pico é de 27,68 m<sup>3</sup>/s e que o volume gerado pelo hidrograma de I-PAI-WU é de 85.198 m<sup>3</sup> que consideraremos como o volume diário.

O volume total que iremos considerar está baseado na relação em que a probabilidade “P” é o inverso da frequência “T”.

$$P = 1 / T$$

Para t= 1,5 anos

$$P = 1/1,5 = 0,6667$$

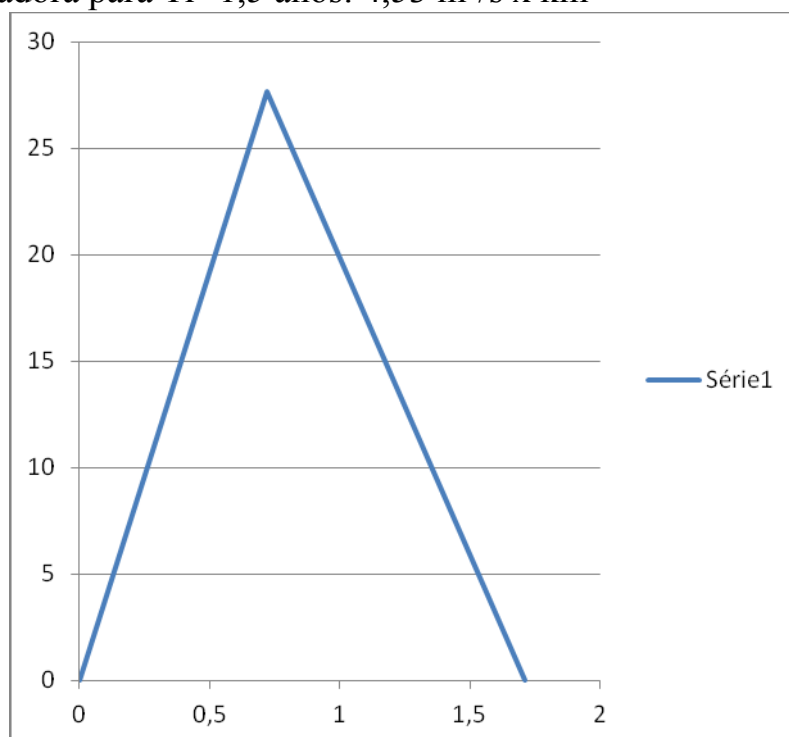
Significa que o rio tem probabilidade de 66,67% de ocorrer durante um ano.

Como o ano tem 365 dias então teremos a enchente com a chuva de  $T_r=1,5$  anos em  $0,6667 \times 365$  dias=243,3 dias por ano.

Então o volume anual será:

$$243,3 \text{ dias} \times 85.198 \text{ m}^3/\text{dia} = \mathbf{20.731.508 \text{ m}^3/\text{ano}}$$

Vazão modeladora para  $T_r=1,5$  anos:  $4,53 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{km}^2$



**Figura 95.1- Hidrograma conforme I-PAI-WU com  $T_r= 1,5$  anos**

**Tabela 95.4-Cálculos da fórmula de Manning**

| Yn   | n     | S       | B    | z   | Area molh | P     | R    | V    | Q     |
|------|-------|---------|------|-----|-----------|-------|------|------|-------|
| 1,84 | 0,035 | 0,00316 | 5,35 | 1,5 | 14,92     | 11,98 | 1,25 | 1,86 | 27,74 |

Seção trapezoidal do canal

B= 5,35m

n=0,035

Área molhada=  $14,92 \text{ m}^2$

Perímetro molhado= 11,98mm

Raio hidráulico R= 1,25

Altura da lâmina de água = 1,84m

$$V = 1,86 \text{ m/s}$$

$$\text{Vazão para } Tr=1,5 \text{ anos obtida com Método de I-PAI-WU} = 27,68 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Talude } z = 1,5$$

$$\text{Declividade local (m/m)} = 0,00316 \text{ m/m}$$

$$D_{50} = 0,5 \text{ mm} = 0,0005 \text{ m}$$

$$\nu = 0,00000102 \text{ m}^2/\text{s} = \text{viscosidade cinemática a } 20 \text{ graus centígrados}$$

Yang, 1973

$$U^* = (9,81 \cdot Rh \cdot S)^{0,5}$$

$$U^* = (9,81 \times 1,25 \times 0,00316)^{0,5}$$

$$U^* = 0,20 \text{ m/s}$$

Para partículas maiores ou iguais a 0,1 mm

$$W = \{ [(2/3) \cdot g (\gamma_s/\gamma - 1) \cdot D^3 + 36 \cdot \nu^2]^{0,5} - 6 \cdot \nu \} / D$$

$$W = \{ [(2/3) \times 9,81 (2,65 - 1) \cdot 0,0005^3 + 36 \times 0,00000102^2]^{0,5} - 6 \times 0,00000102 \} / 0,0005$$

$$W = 0,062 \text{ m/s}$$

Cálculo da relação:

$$U^* \cdot D / \nu = 0,20 \times 0,0005 / 0,00000102 = 96,6 > 70$$

Quando:  $U^* \cdot D / \nu \geq 70$

$$\text{Então: } U_c / W = 2,05$$

$$U_c = W \times 2,05 = 0,062 \times 2,05 = 0,13 \text{ m/s}$$

O cálculo da concentração total do material do leito no escoamento para grãos de diâmetro até 2mm é dado pela equação:

$$\log CT = 5,165 - 0,153 \cdot \log (W \cdot D / \nu) - 0,207 \cdot \log (U^* / W) + [(1,780 - 0,360 \cdot \log (W \cdot D / \nu) - 0,480 \cdot \log (U^* / W)) \cdot \log (U \cdot S / W)]$$

Fazendo as substituições:

$$\log CT = 3,76$$

$$CT = 5735 \text{ ppm} = 5735 \text{ mg/L} = 5735 \text{ g/m}^3$$

**Tabela 95.5- Cálculos do Método de Yang, 1973**

|   |            |             |
|---|------------|-------------|
| Yang, 1973                                      |            |             |
| Largura do rio (m)=                             | 5,35       |             |
| Temperatura (graus centigrados)                 | 20,0       |             |
| Viscosidade cinemática (m <sup>2</sup> /s)=     | 0,00000102 |             |
| Lamina da agua (m)=                             | 1,84       |             |
| Q=  | 27,74      | TR=1,5 anos |
| Rh (m)=   | 1,25       |             |
| V(m/s)=   | 1,86       |             |
| S(m/m)=   | 0,00316    |             |
| U* (m/s)=                                       | 0,20       |             |
| D50 (mm)=                                       | 0,500      |             |
| Dm (mm)=  | 0,500      |             |
| Dm(m)   | 0,0005     |             |
| W (m/s)= velocidade de queda das particulas     | 0,062      |             |
| U*.D/nu   | 96,6       |             |
| W.D/nu=   | 30,6       |             |
| Uc (m/s)=                                       | 0,13       |             |
| U*/W=   | 3,16       |             |
| log CT=   | 3,76       |             |
| CT (m/gL ou ppm=                                | 5735       |             |
| Volume diario (m3)                              | 85198      | Tr=1,5 anos |
| Numero dias=                                    | 243,3      | 0,67        |
| volume anual (m3)                               | 20.731.568 |             |
| Toneladas /ano                                  | 118.895    |             |
| Peso especifico aparente (ton/m <sup>3</sup> )= | 1,575      |             |
| volume anual (m3)                               | 187.259    |             |
| Area (km <sup>2</sup> )=                        | 4,92       |             |
| Volume (m <sup>3</sup> /há x ano)=              | 381        |             |

O volume anual de água que chega ao reservatório com Tr=1,5 anos é de 20.731.568 m<sup>3</sup>.

Considerando peso específico aparente de areia a 1,575 ton/m<sup>3</sup> teremos um volume anual de sedimentos de 187.259 m<sup>3</sup>, ou seja, 381m<sup>3</sup>/ha x ano.

### Exemplo 95.2

**Nota: este exemplo foi feito baseado no livro do Yang página 180.**

**Refere-se a dados medidos pelo U.S. Geological Survey do rio Niobrara em Nebraska.**

Dimensionar pelo método de Yang, 1973 o transporte de sólidos de um curso de água em uma bacia com os seguintes dados:

Declividade média do talvegue= 0,000169m/m

Temperatura da água = 14,4 graus centígrados

**Tabela 95.6-Cálculos da fórmula de Manning**

| Yn    | n     | S       | B    | z   | Area molh | P     | R    | V    | Q     |
|-------|-------|---------|------|-----|-----------|-------|------|------|-------|
| 0,519 | 0,023 | 0,00169 | 21,3 | 1,5 | 11,46     | 23,17 | 0,49 | 1,12 | 12,81 |

Seção trapezoidal do canal

B= 21,3m

n=0,023 (adotado por nós)

Área molhada= 14,92 m<sup>2</sup>

Raio hidráulico R= 0,49m

Altura da lâmina de água = 0,519m

V= 1,12 m/s

Vazão obtida pela seção= 12,81 m<sup>3</sup>/s

Talude z= 1,5

Declividade local (m/m)= 0,00169m/m

D<sub>50</sub>= 0,283mm =0,000283 m

v = 0,00000117m<sup>2</sup>/s= viscosidade cinemática a 14,4 graus centígrados e calculado.

$$v = 1,792 \times 10^{-6} / (1,0 + 0,0337 T + 0,000221 T^2)$$

$$v = 1,792 \times 10^{-6} / (1,0 + 0,0337 \times 14,4 + 0,000221 \times 14,4^2)$$

$$v = 0,00000117m^2/s$$

Yang, 1973

$$U^* = (9,81 \cdot R_h \cdot S)^{0,5}$$

$$U^* = (9,81 \times 0,49 \times 0,00169)^{0,5}$$

$$U^* = 0,09 \text{ m/s}$$

Para partículas  $\geq 0,1 \text{ mm}$

$$W = \{ [(2/3) \cdot g (\gamma_s/\gamma - 1) \cdot D^3 + 36 \cdot v^2]^{0,5} - 6 \cdot v \} / D$$

$$W = \{ [(2/3) \times 9,81 (2,65 - 1) \cdot 0,000283^3 + 36 \times 0,00000117^2]^{0,5} - 6 \times 0,00000117 \} / 0,000283$$

$$W = 0,036 \text{ m/s}$$

Cálculo da relação:

$$U^* \cdot D / v = 0,09 \times 0,000283 / 0,00000117 = 21,9 < 70$$

Quando:  $U^* \cdot D / v \geq 70$

$$U_c = W \cdot \{ 2,5 / [\log (U^* \cdot D / v) - 0,06] + 0,66 \}$$

$$U_c = 0,09 \text{ m/s}$$

O cálculo da concentração total do material do leito no escoamento para grãos de diâmetro até 2mm é dado pela equação:

$$\log CT = 5,165 - 0,153 \cdot \log (W \cdot D / v) - 0,207 \cdot \log (U^* / W) + [(1,780 - 0,360 \cdot \log (W \cdot D / v) - 0,480 \cdot \log (U^* / W)) \cdot \log (U \cdot S / W)]$$

Fazendo as substituições:

$$\log CT = 3,31$$

$$CT = 2025 \text{ ppm} = 2025 \text{ mg/L} = 2025 \text{ g/m}^3$$

**Nota: o valor de CT = 1900 ppm foi medido na concentração do material da base do rio. Verificar que o método de Yang deu 2025 ppm que é somente 7% a mais do que o valor real.**



**Tabela 95.7- Cálculos do Método de Yang, 1973**

| <b>Exemplo</b>                                     |                   |
|--|-------------------|
| <b>Yang, 1973</b>                                  |                   |
| <b>Largura do rio (m)=</b>                         | <b>21,30</b>      |
| <b>Temperatura (graus centigrados)</b>             | <b>14,4</b>       |
| <b>Viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s)=</b>   | <b>0,00000117</b> |
| <b>Lamina da agua (m)=</b>                         | <b>0,52</b>       |
| <b>Q=</b>  | <b>12,81</b>      |
| <b>Rh (m)=</b>                                     | <b>0,49</b>       |
| <b>V(m/s)=</b>                                     | <b>1,12</b>       |
| <b>S(m/m)=</b>                                     | <b>0,00169</b>    |
| <b>U* (m/s)=</b>                                   | <b>0,09</b>       |
| <b>D50 (mm)=</b>                                   | <b>0,283</b>      |
| <b>Dm (mm)=</b>                                    | <b>0,283</b>      |
| <b>Dm(m)</b>                                       | <b>0,000283</b>   |
| <b>W (m/s)= velocidade de queda das particulas</b> | <b>0,036</b>      |
| <b>U*.D/nu</b>                                     | <b>21,9</b>       |
| <b>W.D/nu=</b>                                     | <b>8,6</b>        |
| <b>Uc (m/s)=</b>                                   | <b>0,09</b>       |
| <b>U*/W=</b>                                       | <b>2,53</b>       |
| <b>log CT=</b>                                     | <b>3,31</b>       |
| <b>CT (m/gL ou ppm=</b>                            | <b>2025</b>       |

### 95.7 Método de *Brune*

*Brune*, 1953 relacionou a relação adimensional C/I como base do seu método que está na Figura (95.1) e (95.2).

Entendemos que C é o volume do reservatório e que I é o volume anual é causada pelo *runoff* de toda a precipitação total 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 saliente *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  $C/I \leq 1$  significam que são reservatórios sazonais e aqueles cuja relação  $C/I > 1$  é 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.

O mesmo autor 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<sup>3</sup>;

**Segundo:** determinar o volume médio anual de *runoff* (I) que chega no reservatório em m<sup>3</sup>;

**Terceiro:** usando a Figura (95.1) 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 (95.2) 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.

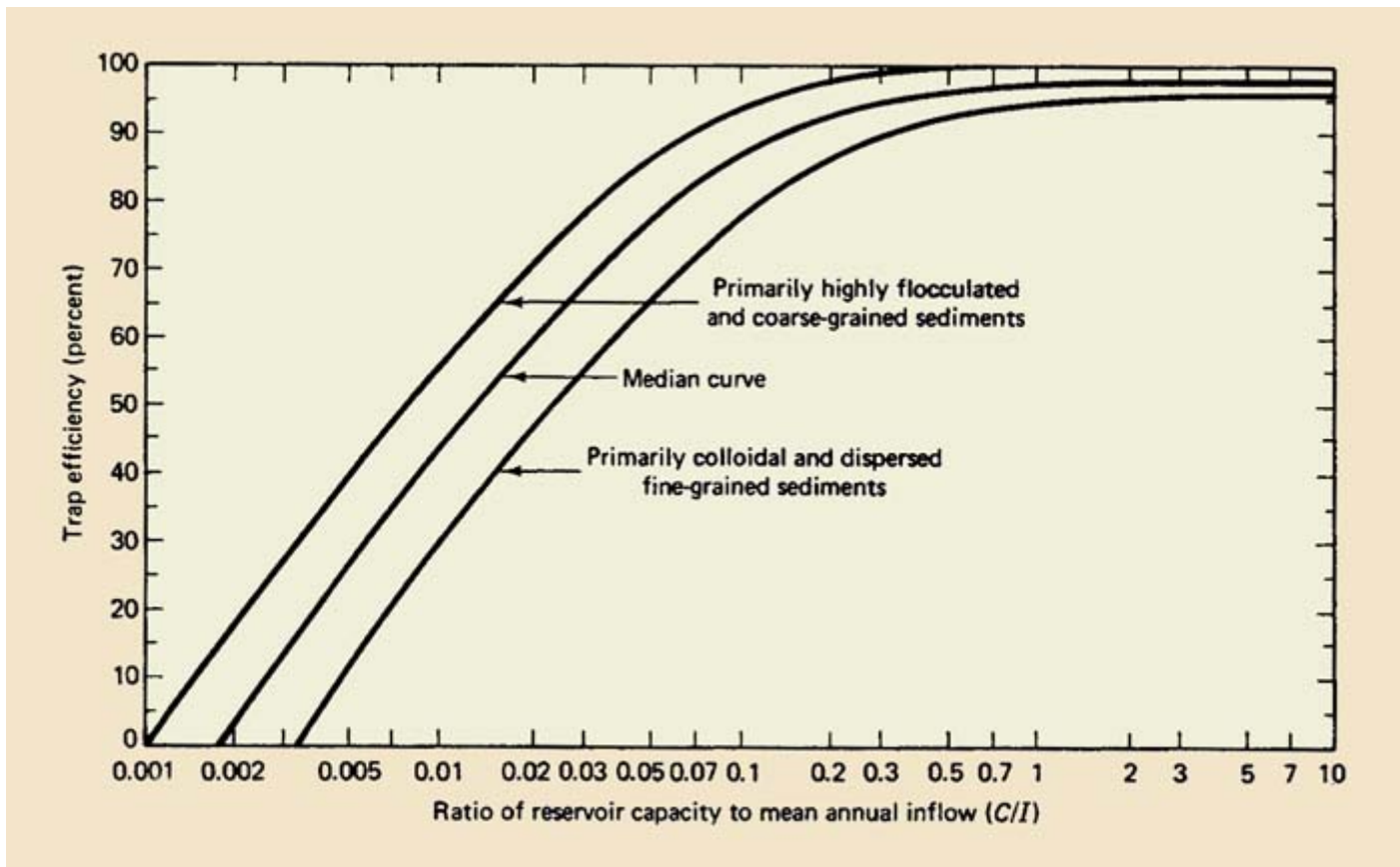


Figura 95.2- Curva de Brune elaboradas em 1953 sendo que na abscissa temos a razão entre o volume do reservatório e o volume médio anual de runoff

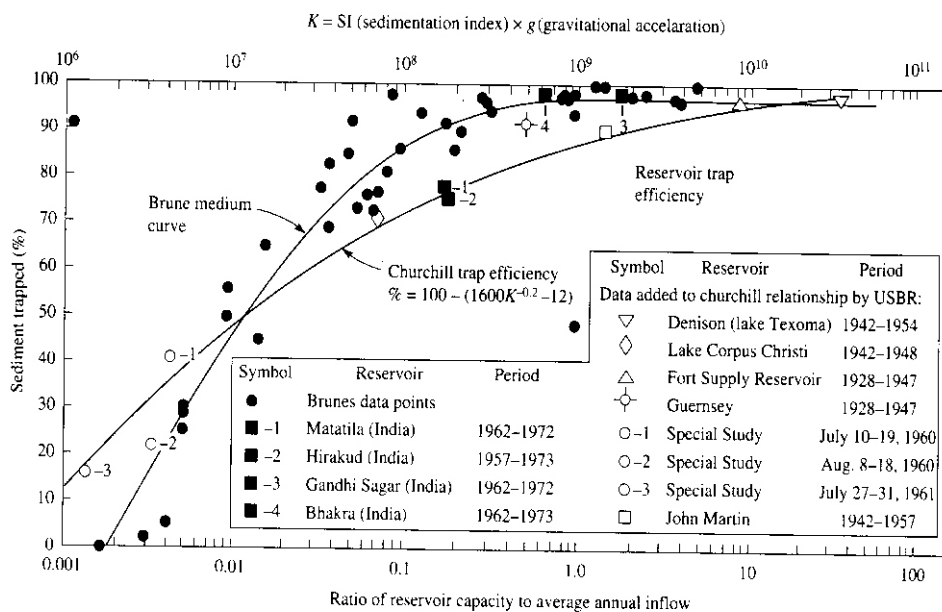


Figura 95.3- Curva de Brune, 1953 e Churchill, 1948 apresentadas por Yang, 2003

### 95.8 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:

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

Sendo:

Dst= descarga sólida total anual ( $\text{m}^3$  / ano)

Qt= descarga sólida diária (ton/dia)

365 dias por ano

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

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

Sendo:

S= volume de sedimentos armazenado no reservatório ( $\text{m}^3$ /ano)

ER= relação obtido no método de *Brune*

$\gamma_{\text{ap}}$ = peso específico aparente ( $\text{ton}/\text{m}^3$ )

Para areia adota-se  $1,554 \text{ ton}/\text{m}^3$

Para silte:  $1,12$  a  $1,17 \text{ ton}/\text{m}^3$

Para argila:  $0,82 \text{ ton}/\text{m}^3$

$$T = \text{Vres.} / S$$

Sendo:

T=tempo de vida útil do reservatório (anos)

Vres= volume do reservatório ( $\text{m}^3$ )

S= volume de sedimentos armazenado no reservatorio ( $\text{m}^3$ /ano)

#### Exemplo 95.3

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

Precipitação média anual =  $1.660 \text{ mm}$

Área impermeável em fração=  $0,19$

Runoff médio anual suposto  $0,4 \times 1660 = 664 \text{ mm}$

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

Vazão média diária=  $(664 \text{ mm}/1000) \times 492 \text{ ha} \times 10000 \text{ m}^2 = 3.266.880 \text{ m}^3/\text{ano}$

C=  $122.428 \text{ m}^3$  (volume do reservatório)

I = runoff anual=  $1.396.591 \text{ m}^3/\text{ano}$

C/I =  $122.428 / 1.396.591 \text{ m}^3/\text{ano} = 0,037$

Entrando na curva média de Brune da Figura (95.1) achamos  $75\% = 0,75$ .

Supondo que a descarga total de sedimentos é de 92.311 ton/ ano calculada pelo Método de Yang, 1973 usando  $T_r=1,5$  anos como vazão modeladora teremos:

$$\text{Dst} = 92.311 \text{ ton/ano}$$

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

$$S = 92.311 \times 0,75 / 1,554 = 4.455 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$\text{Tempo de duração do barramento} = 122.428 \text{ m}^3 / 4.455 \text{ m}^3/\text{ano} = 27,5 \text{ anos}$$

### 95.9 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.

### 95.10 Equações para transporte de sedimentos

Vanoni, 2006 apresentou em seu livro catorze fórmulas até o ano de 1969 para transporte de sedimentos do fundo do canal em condições uniforme e não incluindo a carga de lavagem. Vanoni, 2006 salienta que apresentou somente **algumas** das muitas fórmulas existentes.

DuBoys (Bronw, 1950), 1879

Meyer-Peter ( Meyer-Peter and Muller, 1948)

Muller, 1948

Schoklitsh (Shulits, 1935),

Shields (1936)

Meyer-Peter and Muller (1948)

Einstein-Brown (Brown, 1950)

Einstein Bed Load Function (Einstein, 1950)

Laursen, 1958

Blench Regime Formula (Brench, 1966)

Colby (1964)

Engelund-Hansen (Engelund, 1966. Engelund and Hansen, 1967)

Inglis-Lacey (Inglis, 1968)

Toffaletti (1969)

**95.11 Bibliografia e livros recomendados**

- AKAN, A. OSMAN. *Open channel hydraulics*. 1a ed. 2006, reprinted in 2008. Elsevier, 364 páginas. ISBN 978-0-7506-6857-6.
- ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica). *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Brasília, DF, 2000, 107 páginas
- CARVALHO, NEWTON DE OLIVEIRA et al. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Brasília, DF, 2000, 107 páginas ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica)
- CARVALHO, NEWTON DE OLIVEIRA. *Cálculo do assoreamento e da vida útil de um reservatório na fase de estudos de inventario*.
- FRENCH, RICHARD H. *Open channel hydraulics*. Editora WRP, 638 páginas, 2007, ISBN 978-1-887201-44-5.
- 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.
- JULIEN, PIERRE Y. *Erosion and sedimentation*. 2a edição. Cambridge, 2010 ISBN 978-0-521-83038-6, 371 páginas.
- 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.
- 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.
- USACE. *Stable channel design functions*. Chapter 12. [www.usbr.gov](http://www.usbr.gov)
- USBR (UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION). *Non cohesive sediment transport*. Chapter 3. [www.usbr.gov](http://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 reprint da edição de 1996 ISBN 1057524-226-5, 396 páginas.,