

Hidráulica em pontes

(não é problema da estrutural) Ponte Calculada

1



Ponte do Diabo.
Construída em 1281 a 1328 na Toscana, Garfagnana.
Empírica



Ponte do Diabo



Ponte empírica

Ponte del Diavolo (Devil's Bridge) or della Maddalena, Borgo a Mozzano, Lucca



Ponte do Diabo.

- Prof dr. Pedro Bento Gravina
- “Você será um grande engenheiro quando calcular o que você já sabe”.
- Durante aula de Pontes na EPUSP, 1966 mostrando pontes empíricas e calculadas.

- 
- 
- Pontes
 - Pontes provisórias
 - Pontes definitivas

Pontes provisórias (Wisdot, 2021)

- Pontes provisórias Wisdot, 2021
- 1) Determinar o vao da ponte usando $T_r = 5$ anos
- 2) Verificar remanso para $T_r = 2$ anos
- 3) O máximo da altura do remanso deve ser 0,15m
- 4) Altura da ponte 0,90m a 1,20m
- 5) Verificar problemas de erosão

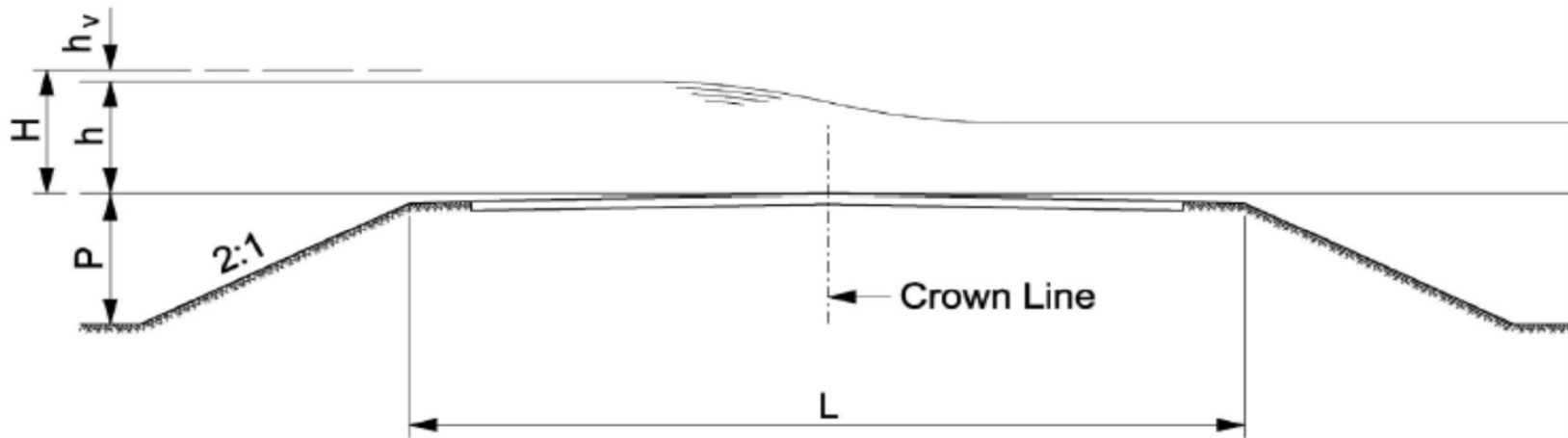
Escoamento sobre a ponte e sobre a estrada

- Sobre uma ponte e sobre a estrada usamos a fórmula do vertedor de soleira espessa.
- $Q = K_1 \cdot C_f \cdot B \cdot H^{3/2}$
- Sendo:
- Q = vazão que passa no vertedor (ft³/s)
- B = largura do vertedor (ft)
- K_1 = fator de submergência
- H = altura da água sobre a ponte ou sobre a estrada (ft) também chamadoi altura do overtopping $H = h + h_v$
- C_f = coeficiente de descarga calculado com figura adiante

- Fator de submergência K_1
- O fator de submergência em uma estrada é definido pela relação h_t/H .
- Em superfície livre o valor de C_f multiplicado pelo fator de submergência K_1 é dado pela Figura 8.3-3.

Esquema de *overtopping* conforme Wisdot, 2021

Observar L , h e H



Coeficiente de descarga C em função de H/L , Wisdot, 2021 Figura 8.3-1 para $H/L > 0,15$

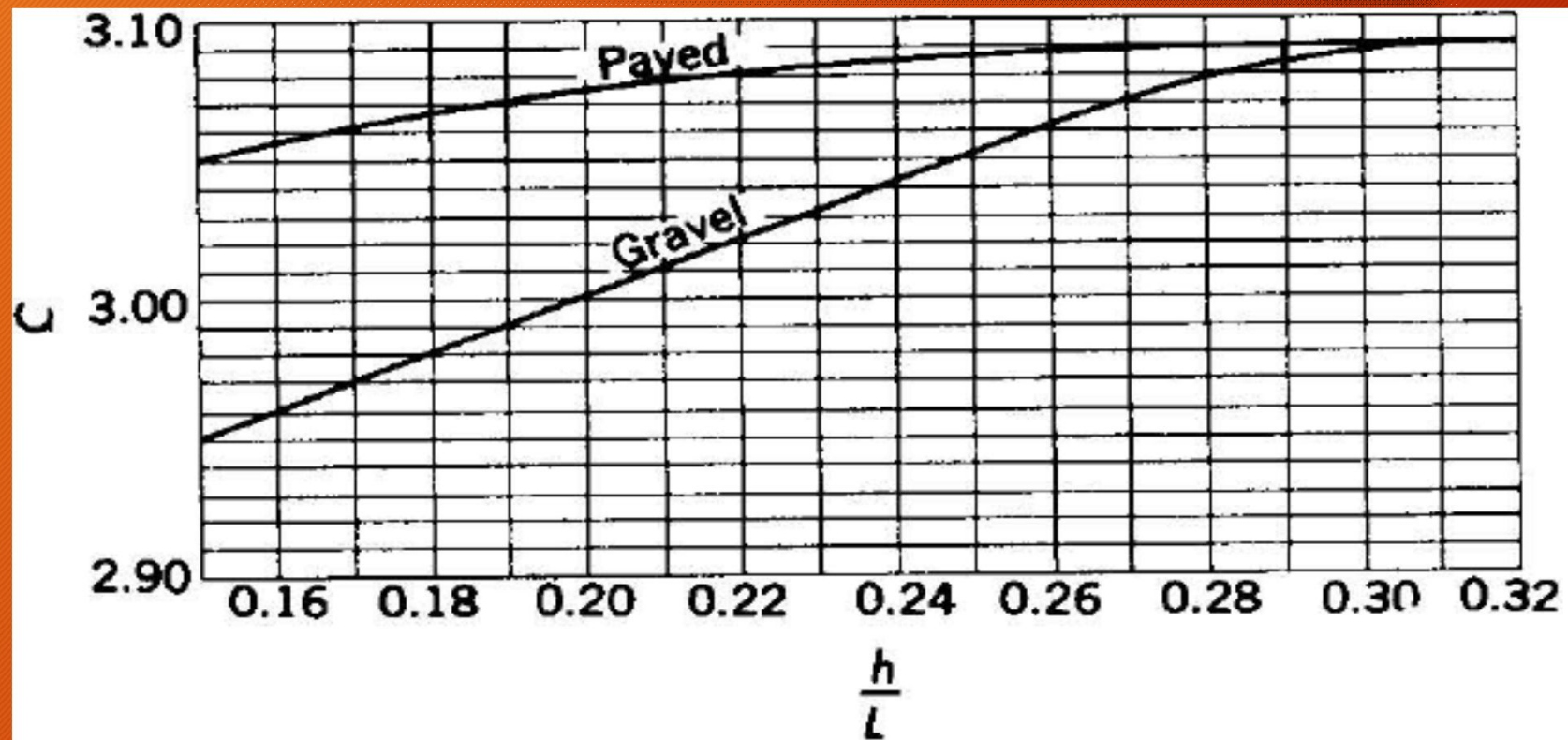


Figure 8.3-1

Discharge Coefficients, C_f , for Highway Embankments for H/L Ratios > 0.15

Figura 8.3-2 para $H/L < 0,15$

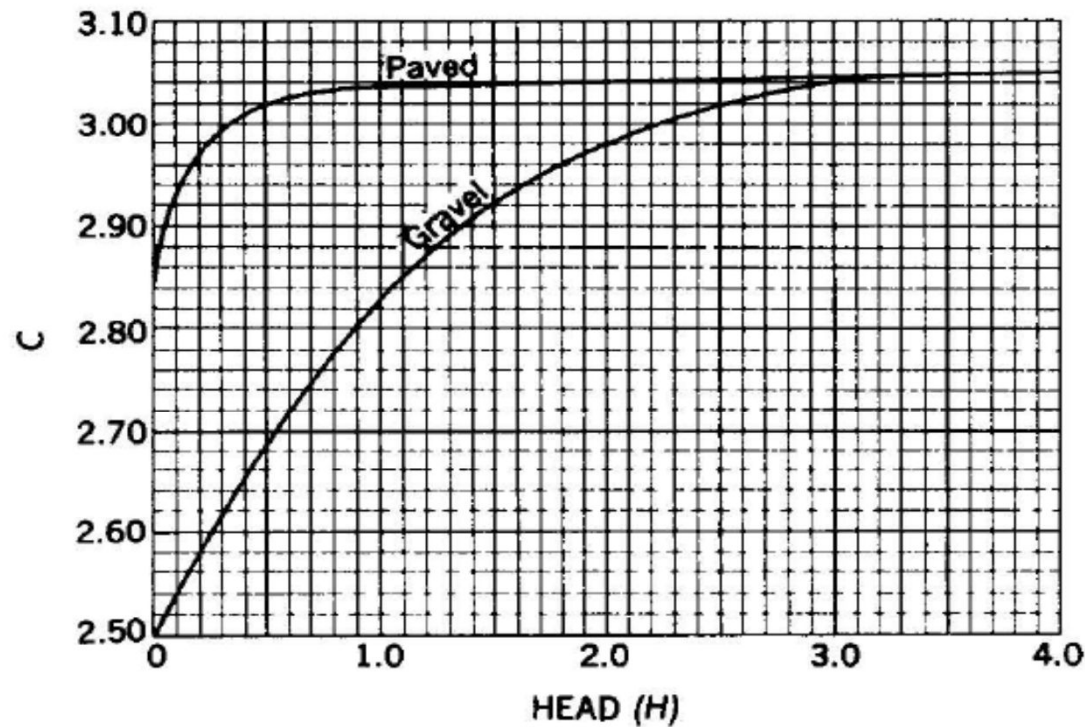


Figure 8.3-2

Discharge Coefficients, C_r , for Highway Embankments for H/L Ratios < 0.15

Figura 8.3-3 Fator K_t para submergência

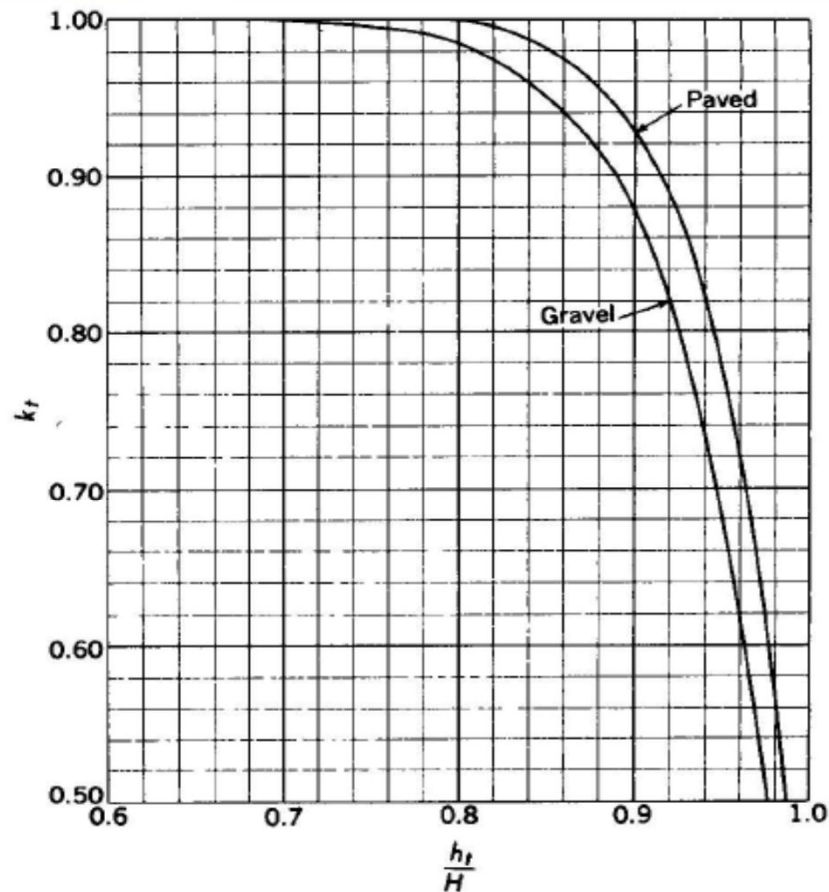


Figure 8.3-3

Definition of Adjustment Factor, k_t , for Submerged Highway Embankments

Transporte de sedimentos em cursos de água FHWA, abril 2012

- ASCE, 2008 cita 16 equações de transporte de sedimentos no fundo do leito (load bed).
- FHWA. 2012 cita a equação de Meyer-Peter e Muller, 1948.
- $Q_s = a (\tau_{zero} - \tau_{critico})^{3/2}$
- O transporte de sedimentos é um assunto complexo e de difícil interpretação.
- Uso o método RUSLE: *Revised Universal Soil Loss Equation*

- Wsdot, 2021
- As pontes devem ter segurança para o tráfego público feito com as boas práticas da engenharia e que não cause danos as propriedades

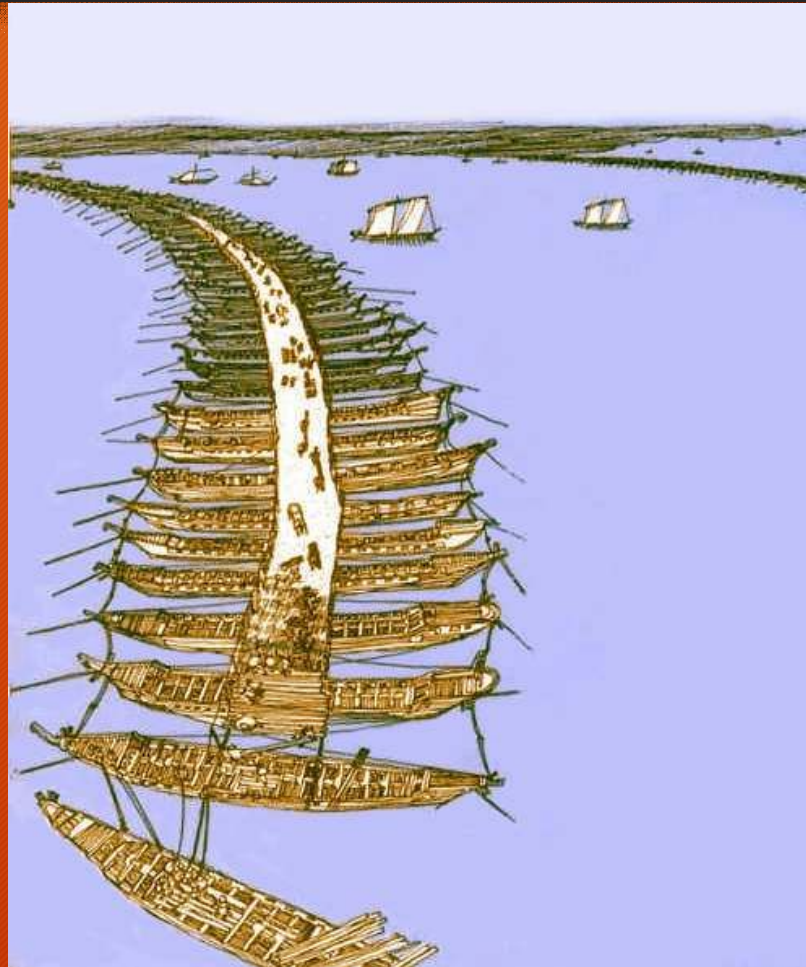
História das pontes (Hamill, 1999)

15

- Primeira ponte:
- 810 a 700 aC
- Rio Eufrates Babilônia
- 120m de comprimento e 10m de largura
- Pilares construído em forma de barcos para resistir ao escoamento
- Remoção toda a noite de parte da ponte para ladrões não passarem de um lado para outro.
- Romanos foram os melhores construtores de pontes
- Franceses: *Ecole des Ponts et Chaussées* (1720)

Persas, Xerxes 480 aC 1400m
para invadir a Grécia (Mar Negro e Mar Egeu)
engenheiros Persas: cabeças cortadas
Engenheiros egípcios foram os construtores

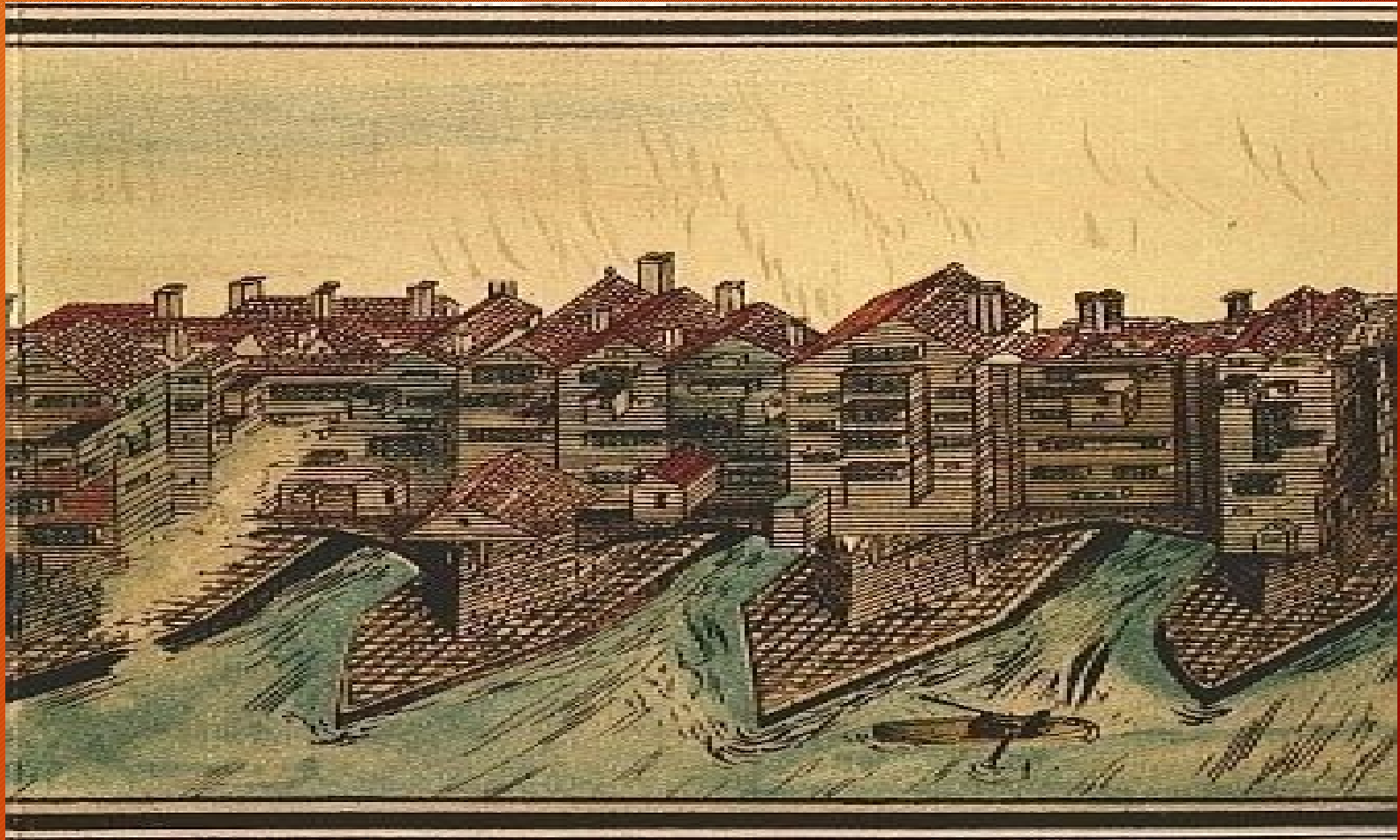
16



Ponte de Londres (1176 a 1209)

casas e lojas na ponte. Italia/Florença Ponte Vecchia

17



CONOCIENDO ESPAÑA

Puente romano de Alcántara

El Puente de Alcántara es un puente romano en arco construido entre los años 104 y 106, que cruza el río Tajo en la localidad cacereña de Alcántara. Es el más alto construido por el Imperio Romano

PULSAR

Um pouco de história

- 1) Guarulhos: ponte de madeira para passagem de um veículo. Entre Guarulhos e o bairro da Penha na capital paulista. Reformado pelo Euclides da Cunha

Ponte de madeira entre Guarulhos e bairro da Penha construída em 1886 e desmontada na década de 1950



Ponte Pênsil em São Vicente São Paulo

- 2) Ponte Pênsil em São Vicente feito por Saturnino de Brito para passagem de emissário de esgotos.

Ponte Pênsil São Vicente, 114m inaugurada em 1914.



Um pouco de história

- 3) Ponte do Júlio Cesar fez a ponte no rio Reno em 10 dias passou 40 000 soldados. Desfilou para os germanos, voltou e desmontou a ponte 18 dias depois do início da construção.
- Rio Reno
- Local: perto de Koblenz na Alemanha
- Largura=9m
- Comprimento: 140m a 400m
- Profundidade do rio Reno: até 9m
- Construtor: Marco Vitruvio. Autor do livro: “Da Arquitetura”.

Esquema da ponte de madeira que com até 9m de profundidade



Falhas em pontes nos Estados Unidos 2000-2007: 23% hidráulica

Figure 4.1 Numbers of Failed Bridges Distributed by Years (2000-2007)

Failure Cause	Number Of Bridges	Percentage (%)
Collision	17	10.6
Impact	22	13.7
Hydraulic-Flood	15	9.3
Hydraulic-Scour	22	13.7
Over Load	7	4.3
Steel-Deterioration	2	1.2
Wind	54	33.5
Fire	2	1.2
Construction	4	2.5
Mech/Elect	14	8.7
Concrete-Deterioration	2	1.2
Total	161	100.0

Localização de uma ponte

- É preciso muito estudo para localizar a posição de uma ponte.
- Temos que evitar ângulos no curso de água e problemas de erosão, inundação e estabilidade do canal.
- A decisão será geralmente multidisciplinar com participação de vários especialistas.

Classificação de bacias

India: Jagadeesh e Jayaram, 2009.

- Temos 3 tipos de bacias:
- Bacias pequenas: até 100Km²
- Bacias Médias: de 100 km² a 5000 Km²
- Bacias Grandes: maiores que 5000 Km²

Métodos Hidrológicos para dimensionamento da vazão de pico conforme a área da bacia

- Podemos usar:
- Método Racional até 2 Km²
- Método I-PAI-WU de 2km² até 200 Km²
- Método do professor Kokei Uehara: de 200 Km² a 600 Km²
- Método do sCS 250 Km² com divisões de 250 Km² cada
- Quando temos medições: Método de Gumbel (bom para o Brasil) para rios.

Período de retorno recomendado

- Período de retorno adotado
- Para dimensionamento da vão da ponte e remanso:
- $T_r = 100$ anos

Análise de incerteza de primeira ordem

Os métodos hidrológicos possuem incerteza de 0,30 e a incerteza na formula de Manning para um canal é 0,30.

A incerteza total será: 0,42.

Entao deveríamos multiplicar a vazão de projeto Q obtida para dimensionar a ponte pelo coeficiente de segurança 1,42.

Hamill, 1999 cita Richardson, 1993 na página 292. que recomenda coeficiente de segurança de 1,5 a 2,0 para $Tr=100$ anos.

Notar $Q_{500} = 1,34Q_{100}$ para o São Paulo
No UK e Mato Grosso do Sul: $Q_{500} = 1,7Q_{100}$.

Período de retorno e vida útil da ponte

- Hamill, 1999 chama a atenção para a importância do período de retorno citando a equação.
- $J = 1 - [1 - (1/T)]^n$
- Sendo:
- J= probabilidade em fração de que a estrutura encontre uma enchente maior do que a prevista de período de retorno T
- T= período de retorno (anos)
- n= vida útil da ponte (anos)
-

Período de retorno e vida útil da ponte

- Exemplo 90.1
- Dada uma ponte dimensionada para $T_r=100$ anos e vida útil de 120 anos, calcular a probabilidade de uma enchente maior que a prevista no período de vida da ponte.
- $J = 1 - [1 - (1/T)]^n$
- $J = 1 - [1 - (1/100)]^{120}$
- **$J = 0,70$**
- Significando que para uma ponte que vai durar 120anos há probabilidade de 70% de haver uma enchente maior.
-

Normas de pontes: só estrutural

- Existe a norma da ABNT NBR 7187 /2003 e NBR 16694 /2020 que trata de Projeto de Pontes de concreto armado e de concreto protendido, mas somente da parte estrutural;
- O DNIT possui a norma DNIT 118/2000-Es que trata de pontes e viadutos armaduras de concreto armado

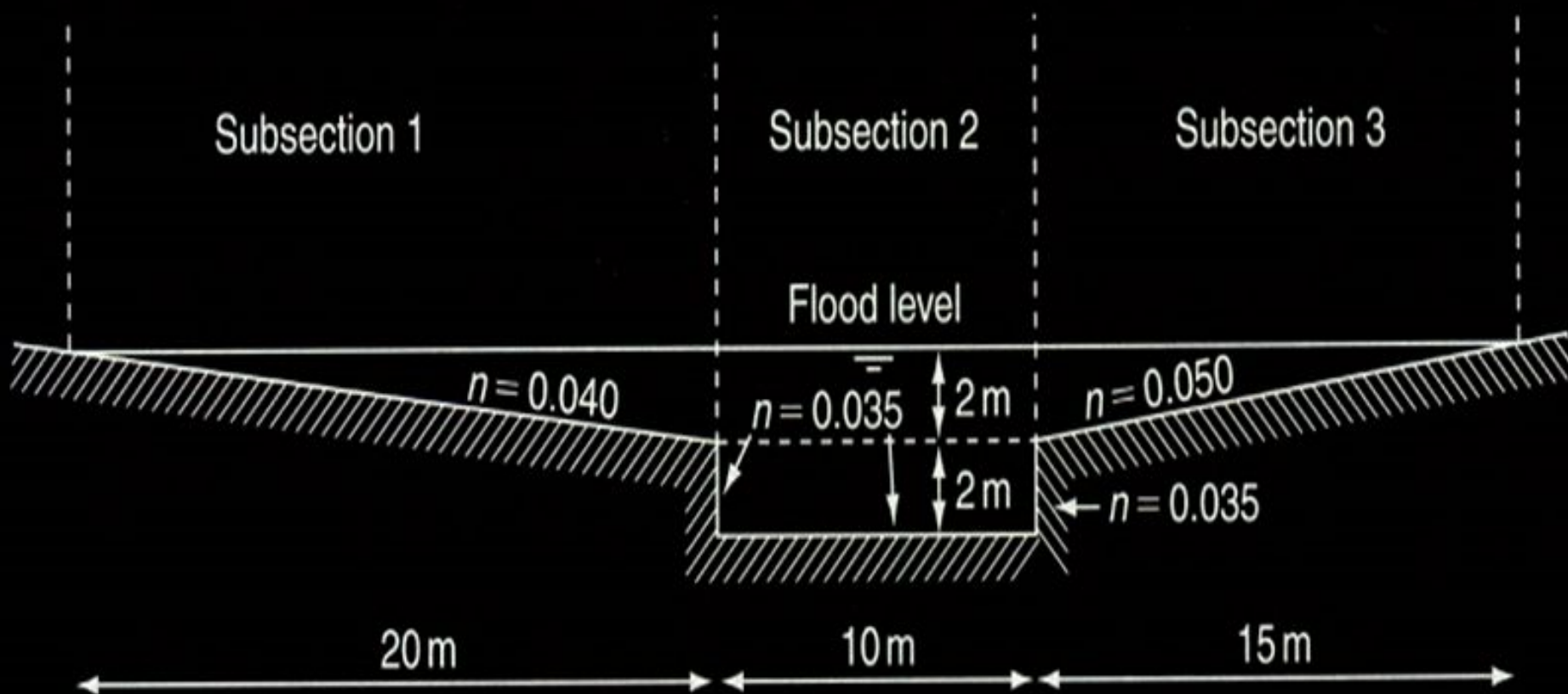
- ▶ Método dos canais divididos com interfaces verticais
 - ▶ Usado: USA, Inglaterra, Índia, Brasil, programa HEC-RAS
 - ▶ (vários valores de n)
- ▶ Nome que adoto : Fator K

Canais compostos (Hamill, 1999)

Fator K

$S=0,001\text{m/m}$ declividade do canal

35



Canais compostos

Fator K

Nota: observar o perímetro molhado

36

- $K = K_1 + K_2 + K_3 = 500 + 2302 + 298 = 3100$
- $K_i = Q_i / S_i^{0,5} = (1/n_i) A_i \cdot R_i^{2/3}$
- $Q = K \cdot S^{0,5} = 3100 \times 0,001^{0,5} = 98,03 \text{ m}^3/\text{s}$
- $V = Q/A = 98,03/75 = 1,31 \text{ m/s}$

Subsection	n_i ($\text{s/m}^{1/3}$)	A_i (m^2)	P_i (m)	R_i (m)	$K_i = (1/n_i) A_i R_i^{2/3}$ (m^3/s)
1	0.040	20.00	20.10	1.00	500
2	0.035	40.00	14.00	2.86	2302
3	0.050	15.00	15.13	0.99	298
Total		75.00			3100

Teoria do Regime

37

- Kennedy em 1895 e Lacey em 1919
- Método empírico usado em canais de irrigação na Índia e Paquistão.

Fórmula de LACEY

38

▶ As equações são:

▶ $f = (2520 \cdot d)^{0,5}$

▶ $P = 4,836 Q^{0,5}$

▶ $V = 0,6459 (f \cdot R)^{0,5}$

▶ $S_o = 0,000315 f^{(5/3)} / Q^{(1/6)}$

▶ Sendo:

▶ f = fator silte de Lacey do sedimento de diâmetro d

▶ d = diâmetro do sedimento (m)

▶ P = perímetro molhado (m)

▶ Q = vazão (m³/s)

▶ V = velocidade média (m/s)

▶ S_o = declividade da base do canal (m/m)

Equilíbrio de Lane, 1955 em canais aluvionais. Qualitativo

- $Q_s \cdot D50 \approx Q \cdot S_o$
- Sendo:
- Q = vazão do rio
- S_o = declividade de talvegue
- Q_s = vazão sólida
- $D50$ = diâmetro em mm de 50% do material do fundo do rio.
- Fórmula aproximada !!!

- 
- Transporte de sedimentos

- O transporte de sedimentos é complexo e cheio de incertezas.
- Para que serve ? Ver os sedimentos que chegam a turbinas para produção de energia hidroletrica e em barramentos.

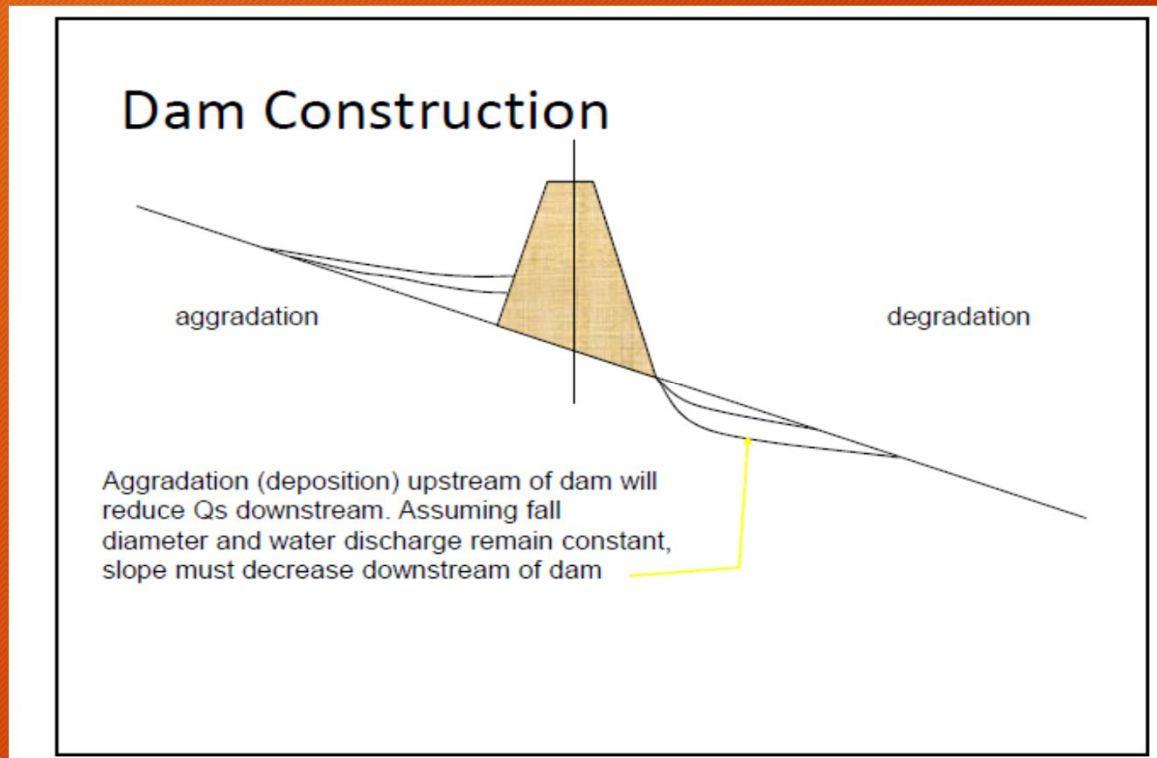
Equilíbrio de Lane, 1955 em canais aluvionais

- A equação de equilíbrio de Lane, sugere que o rio ficara em equilíbrio com as 4 variáveis.
- Se uma variável varia muito significativamente, haverá variação em outra variável para manter o equilíbrio.
- **Não podemos saber exatamente, qual variável será afetada, o que é um problema.**
- Variando significativamente uma variável, podemos ter deposição (aggradation) de sedimentos ou arrastamento (degradation) de sedimentos.

Equilíbrio de Lane, 1955 em canais aluvionais

- Hamill, 1999 páginas 269 sugere que como uma ponte dura 100 anos, devemos verificar o que vai acontecer no rio durante os 100 anos. Verificar para prever problemas futuros na fundação da ponte.
- Difícil saber onde haverá arrastamento de sedimentos ou deposição no rio.

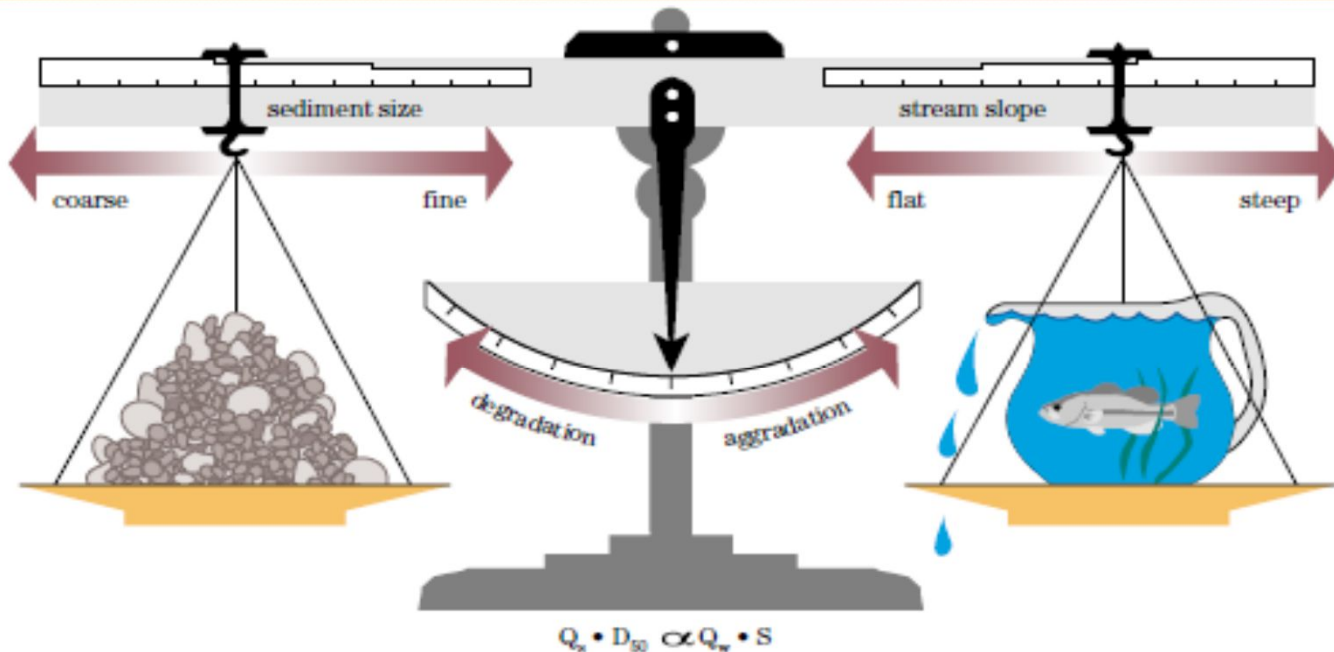
Caso clássico: $Q_s \cdot D50 \approx Q \cdot S_o$
Aumenta S_o e aumenta Q_s (degradation)
Hoover Dam: buraco 7,1m L=111 Km



Hoover Dam: rio Colorado

- A barragem de Hoover Dam acumulou todas as partículas de solo do rio Colorado e a vazão que saiu Q tinha praticamente nada de sólidos.
- $Q_s \cdot D50 \approx Q \cdot S_o$
- Como $D50$ continuou o mesmo e diminui Q , então aumentou a declividade S_o e para manter o equilíbrio, aumentou Q_s . Dai a erosão por remoção do sólidos na base do rio Colorado com 7,1m de profundidade e 111 Km de comprimento !
- Nota: nem sempre é fácil tirar conclusões assim

Equilíbrio de Lane, 1955 em canais aluvionais $Q_s \cdot D_{50} \approx Q_w \cdot S$



From Rosgen (1996), from Lane, Proceedings, 1955.
Published with the permission of American Society of Civil Engineers.

47



Ponte x Bueiros

- Ponte
- Ponte é uma estrutura de concreto, aço ou outro material para a travessia de rios e canais. Viaduto é uma estrutura para travessia de estradas somente.
- Não existe uma definição oficial de ponte, mas se considera uma ponte quando o vão de abertura é maior ou igual a 6,0m e quando menor é bueiro.
-
- Bueiros
- Os bueiros são estruturas para travessias de estradas de rodagem ou de ferro para a passagem de água e muitas vezes para passagem de animais ou pessoas. Muitas vezes os bueiros substituem as pontes e na prática existem mais bueiros do que pontes.
- O dimensionamento de bueiros é tratado separadamente sendo o modelo do FHWA o mais usado no mundo.

- Erosão em pontes

90.22 Erosão total

- A erosão total será a soma da erosão provocada por:
 - Erosão provocada pela contração horizontal
 - Erosão provocada pela contração vertical
 - Erosão provocada pelos pilares
 - Erosão nos encontros (base da ponte).

Nomes usados: leito móvel e leito fixo

- *Live-bed scour*: erosão quando há movimento SIGNIFICATIVO de partículas no leito. Chamado também de leito móvel.
- *Clear-water scour*: erosão quando não há movimento SIGNIFICATIVO de partículas no leito. Chamado também de leito fixo.

Deposição e Remoção de sólidos no rio.

- *Aggradation* é a deposição de sólidos erodidos no curso de água.
- *Degradation* é a remoção de sólidos no curso da água.

Erosão em rios de leito móvel e leito fixo

- Erosão em rios de leito móvel e leito fixo
- Para o estudo de erosão em rios os mesmos podem ter leito móvel ou leito fixo.
Os rios de leito fixo ou resistente conforme Brighetti e Brandão, 2001 são aqueles em que a tensão de arraste é sempre inferior à tensão de arraste crítica do material do leito. Isto significa que o material do leito é resistente às forças de arraste provocadas pelo fluxo e, portanto, o leito tende a ser manter fixo.

Erosão

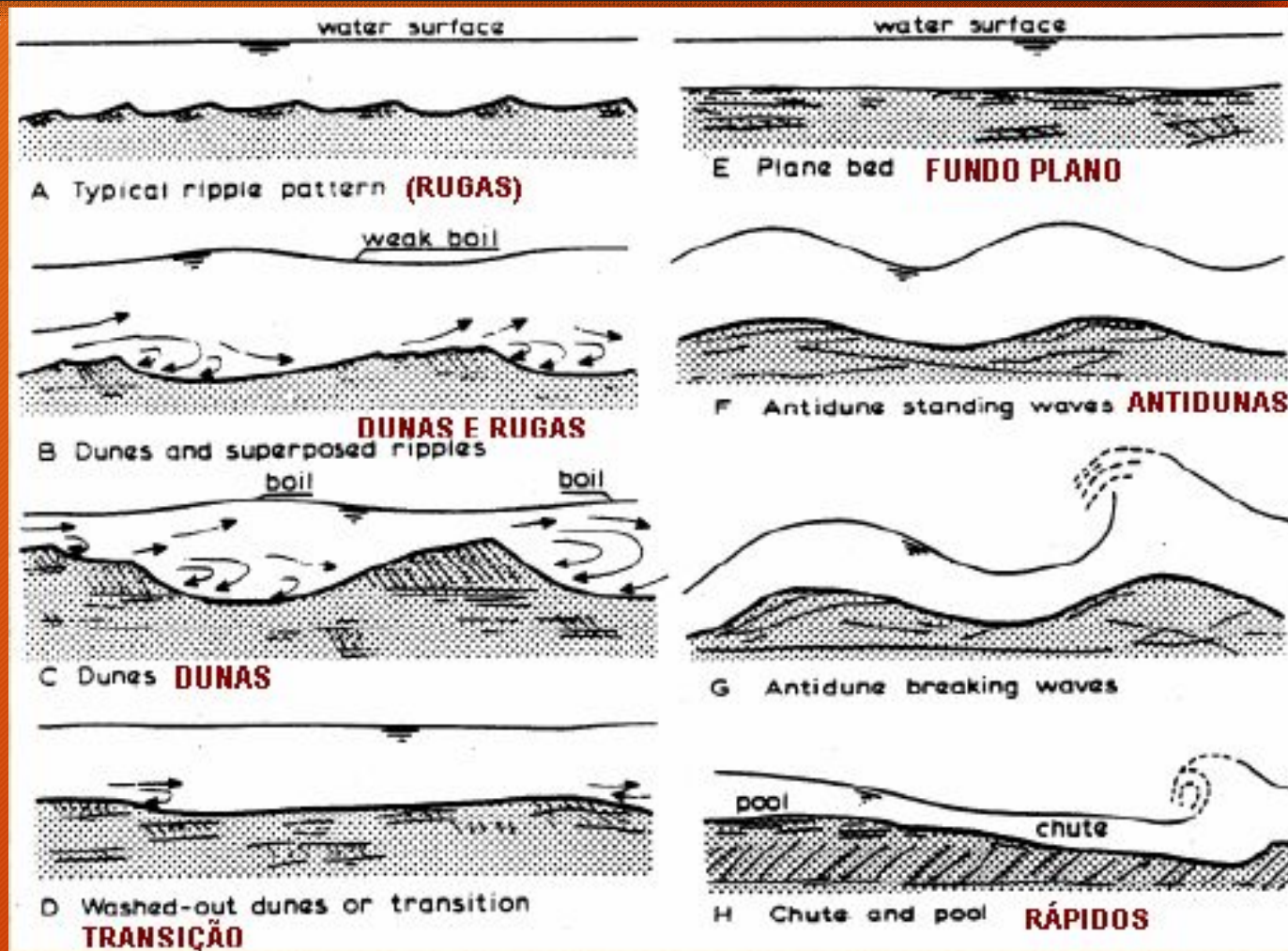
- Nos canais de leito móvel ocorre ao contrário dos canais de leito fixo, onde teremos tensão de arraste superior à tensão crítica do material do leito.
- O transporte de sólidos nos canais ou rios de leito móvel conforme Quintela, 1981 são:
- Transporte sólido por arrastamento: o material transportado rola e escorrega pelo leito.
- Transporte sólido por saltação: o material se desloca por pequenos saltos e por rolamento e escorregamento sobre o leito
- Transporte sólido em suspensão: o material desloca-se predominantemente no seio do escoamento.
-

Erosão

- Conforme Quintela, 1981 o escoamento de águas naturais de fundo móvel, o transporte pode ser:
- **Transporte sólido do material do leito:** transporte de material de granulometria equivalente à do leito
- **Transporte sólido do material de lavagem (wash load):** transporte de material cuja granulometria é inferior a do leito

Rios com leito Móvel

Fonte: USACE



Configuração do leito, Hamill, 1999- $D_{50}=0,7\text{mm}$

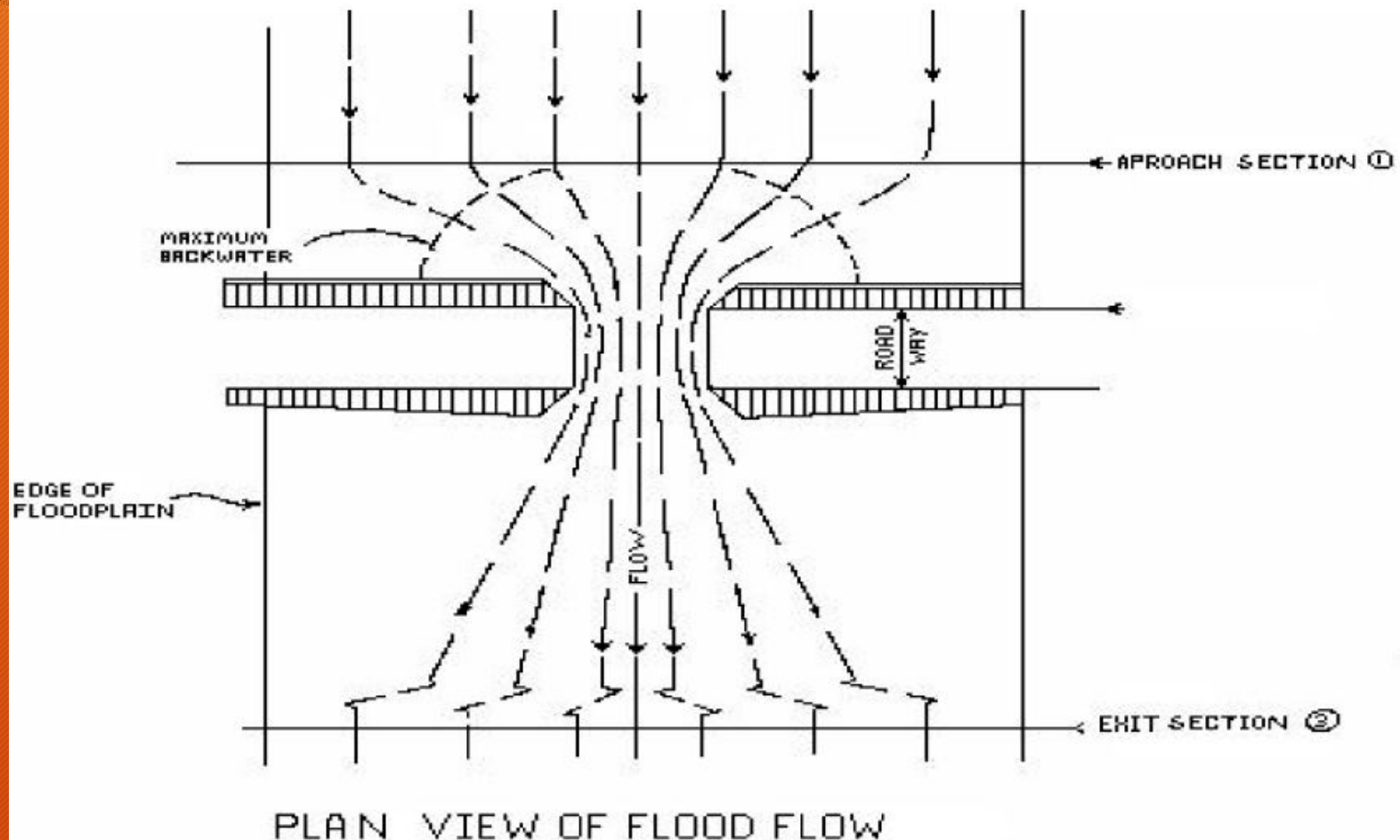
- Hamill, 1999 informa que canais com areia sofrem influência da erosão e usa para isto o diâmetro médio da partícula em que passa 50% da massa dos sedimentos conhecido como D_{50} .
- Para $D_{50} > 0,7\text{mm}$ não há formação de *ripple* (rugos) conforme Figura (90.7 a).
- Para $D_{50} < 0,7\text{mm}$ podemos ter várias configurações de *ripple*, *dunas*, fundo planos e antidunas conforme Figura (90.7).
- Tipicamente os *ripples* (dunas) se devem a velocidade de escoamento de $0,3\text{m/s}$ a $0,6\text{m/s}$ e podem ser substituídos por dunas com velocidades de $0,6\text{m/s}$ a $0,9\text{m/s}$. Com o aumento da velocidade chegando a $0,90\text{m/s}$ a $1,50\text{m/s}$ teremos a formação de fundo plano conforme Figura (90.7).

Freeboard: altura vertical livre da água até fundo da ponte.

- *Freeboard*
- O *freeboard* mínimo a ser adotado para $Tr=100$ anos $\geq 0,60$ m.
- Conforme a importância do córrego ou do rio se pode adotar folgas para $Tr=100$ anos que varia de 0,60m a 1,80m e não devemos esquecer a passagem de pequenos barcos ou outros materiais flutuantes.
- DNIT adota *freeboard* mínimo de 1,00m para passagem de detritos sob a ponte.
-

Contração do rio

Fonte: Tennessee, 2004



Remanso máximo = 0,30m

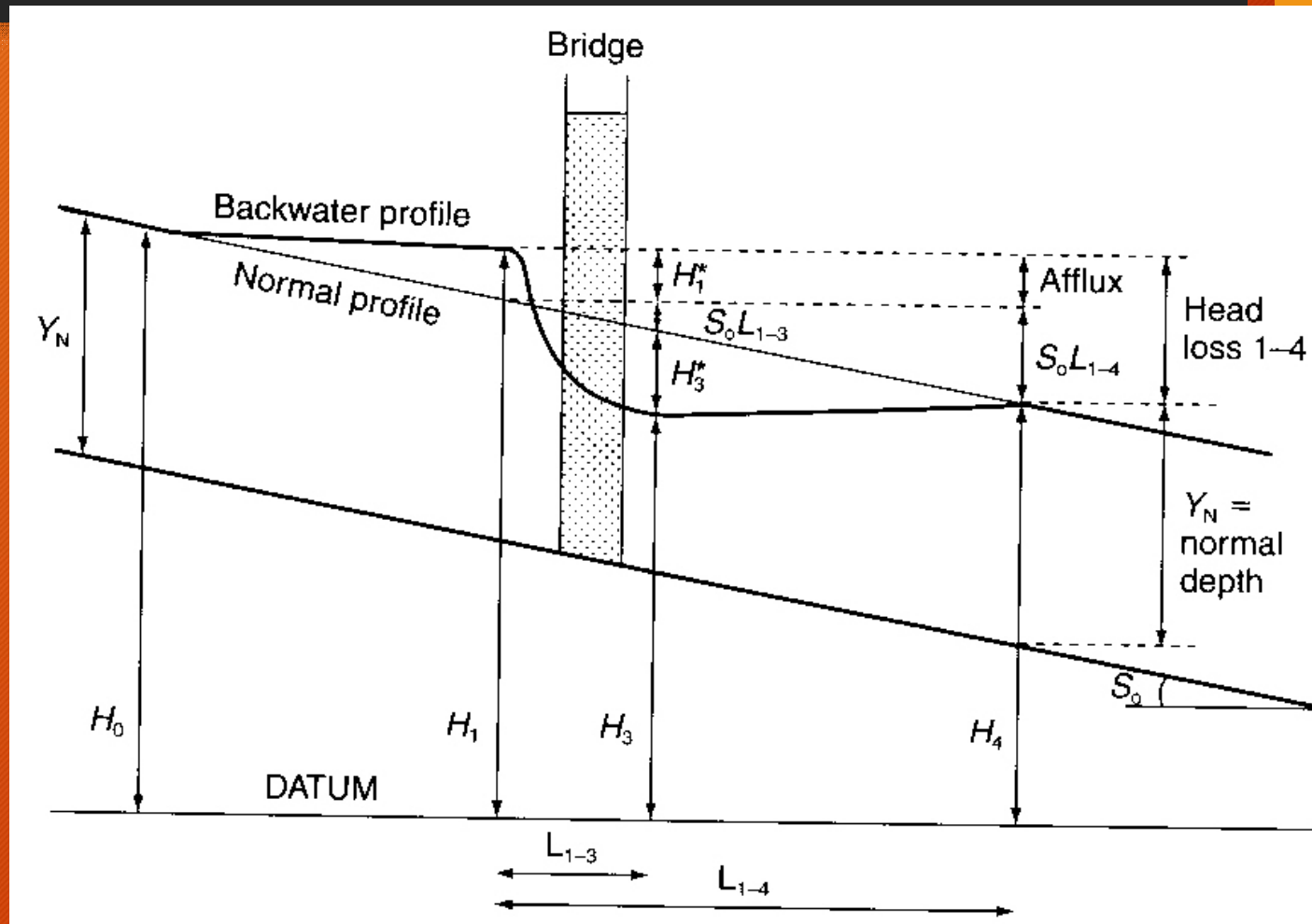
- Remanso (*afflux* em inglês)
- Existem dois tipos de pontes, as que estrangulam a seção provocando um remanso e outras que não interferem nada com os córregos e rios.
- A altura remanso máximo que pode ser admitido a montante é de 0,30m para vazão de período de retorno $Tr=100$ anos.
- **Dica: o remanso máximo admitido na maioria dos países é de 0,30m.**
-

Remanso a montante

erosão nos pilares, nas bases e no fundo

Tr=100anos dr. Les Hamill- Londres

61



(India: Jagadeesh e Jayaram,
2009.

- Vamos apresentar 3 fórmulas práticas usadas na Índia para achar a altura do remanso (*afflux* em inglês)

Remanso fórmula de Molesworth

- Exemplo:
- Achar o vão de uma ponte cuja vazão do rio é de $225 \text{ m}^3/\text{s}$, velocidade do rio de $1,5 \text{ m/s}$ e largura do rio quando há inundação de 60m , sendo que sob a ponte, a velocidade máxima admissível é de $1,80\text{m/s}$

Altura do Remanso

Solução:

$$A = Q/V = 225/1,5 = 150 \text{ m}^2$$

Profundidade d

$$d = A/L = 150/60 = 2,5 \text{ m}$$

$$\text{Velocidade segura} = 0,9 \times 1,80 = 1,62 \text{ m/s}$$

$$\text{Area do vao} = 225/1,62 = 138,9 \text{ m}^2$$

Remanso conforme Mollesworth

Altura do Remanso com Molesworth

- Remanso conforme Molesworth
- $R = (v^2/17,9 + 0,015) \cdot (A^2/a^2 - 1)$
- $R = (1,5^2/17,9 + 0,015) \cdot (150^2/138,9^2 - 1)$
- $R = 0,024\text{m}$

Altura do Remanso com Molesworth

- Caso real Mangaratiba RJ $T_r = 100$ anos
- Rio Ingaíba Rodovia BR-101. Área da bacia 60,95 Km²; Feito também amostragem do material do fundo do rio a montante e jusante da ponte;
- $Q = 241,40 \text{ m}^3/\text{s}$ Largura rio montante = 78m
- Largura da ponte = 40m 1 pilar com largura 1,20m; Largura útil = $40 - 1,2 = 38,8 \text{ m}$ $V = 2,10 \text{ m/s}$
- Estimativa da altura do remanso conforme Molesworth
- $R = (v^2/17,9 + 0,015) \cdot (A^2/a^2 - 1)$
- $R = (2,10^2/17,9 + 0,015) \cdot (104,78^2/50,44^2 - 1)$
- $R = 0,87 \text{ m}$ (Ponte velha; problemas a montante e pior com a maré alta)

Altura do Remanso com Merriman

- Remanso conforme Merriman
- $R = (v^2 / 2g) ((A / C.a)^2 - A / A1)$
- $C = 0,75 + 0,35 (A/a) - 0,1 (A/a)^2$
- A = área da seção a montante da ponte (m²)
- A1 = área a montante da ponte (m²)
- a = área da seção da água na ponte (m²)

Altura do remanso conforme Merriman

- Remanso conforme Merriman
- $R = (v^2 / 2g) ((A/C.a)^2 - A/A1)$
- $C = 0,75 + 0,35 (A/a) - 0,1 (A/a)^2$
- $C = 0,75 + 0,35 (150/138,9) - 0,1 (150/138,9)^2$
- $C = 1,00$
- A = área da seção a montante da ponte (m²)
- $A1$ = área a montante da ponte (m²)
- a = área da seção da água na ponte (m²)
- $R = (1,5^2 / 2 \times 9,81) ((150/1 \times 138,9)^2 - 1)$
- $R = 0,019\text{m}$
-]

Altura do remanso pela fórmula do vertedor de Drown

- A fórmula é muito útil para o dimensionamento de uma ponte, quando impomos uma altura máxima de remanso.
- $R = [(v^2 \cdot d^2) / (2g \cdot (d+R)^2)] \cdot [(L^2 / (C^2 \cdot L1^2))]$
- Sendo:
- R= altura do remanso (afflux) (m)
- V= velocidade média na ponte (m/s)
- d= altura de água na ponte (m)

Altura do remanso pela fórmula do vertedor de Drown

- L = largura natural do rio quando tem uma enchente, ou seja, um alto nível. (m)
- L_1 = largura da base da ponte (m)
- $C = 0,9$ = coeficiente de descarga quando entrada na ponte não é arredondada
- $C = 0,7$ = coeficiente de descarga quando a entrada na ponte é arredondada.

Exemplo 3.3

(India: Jagadeesh e Jayaram, 2009.

- Exemplo 3.3. Calcular a largura de uma ponte sobre uma canal trapezoidal com talude 1:1 e vazão de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ e declividade $S=0,001 \text{ m/m}$. O material é areia com velocidade segura de $2,5 \text{ m/s}$ com coeficiente de Manning $n=0,025$ e a máxima altura do remanso deve ser de $0,08 \text{ m}$. A relação largura / altura deve ser 6:1.

Exemplo 3.3

(India: Jagadeesh e Jayaram, 2009.)

- $\text{Area} = b \cdot d + \frac{2d^2}{2} = bd + d^2 = d(b+d)$
- Como $b/d=6$ teremos
- $\text{Area} = d(b+d) = d(6d+d) = 7d^2$
- Raio Hidráulico R_h
- $R_h = A/P = \frac{7d^2}{8,83d} = 0,80d$

Exemplo 3.3

(India: Jagadeesh e Jayaram, 2009.

- Manning
- $V = (1/n) R_h^{(2/3)} \times S^{0,5}$
- $V = (1/0,025) \times (0,8d)^{(2/3)} \times 0,001^{0,5}$
- $V = 1,1 d^{(2/3)}$
- Equação da continuidade
- $Q = A.V$
- $25 = 7d^2 \times 1.1d^{(2/3)}$
- $d = 1,55m$

Exemplo 3.3

(India: Jagadeesh e Jayaram, 2009.)

- $V = 1,1 d^{(2/3)}$
- $V = 1,1 \times 1,55^{(2/3)} = 1,47 \text{ m/s} < 2,5 \text{ m/s OK}$
- Como $b/d = 6$ portanto $b = 6d = 1,55 \times 6 = 9,3 \text{ m}$
- Largura da superfície L
- Largura superior = $b + 2 \times 1,55 = 9,3 + 3,1 = 12,4 \text{ m}$
- Média $L = (12,4 + 9,3) / 2 = 10,88 \text{ m}$
- $R = \left[\frac{(v^2 \cdot d^2)}{(2g \cdot (d+R)^2)} \right] \cdot \left[\frac{(L^2 / (C^2 \cdot L_1^2))}{1} \right]$
- $0,08 = \left[\frac{(1,47^2 \times 1,55^2)}{(2 \times 9,81 (1,55 + 0,08)^2)} \right] \cdot \left[\frac{(10,88^2 / (0,95^2 \times L_1^2))}{1} \right]$
- Achamos $L_1 = 8,5 \text{ m}$

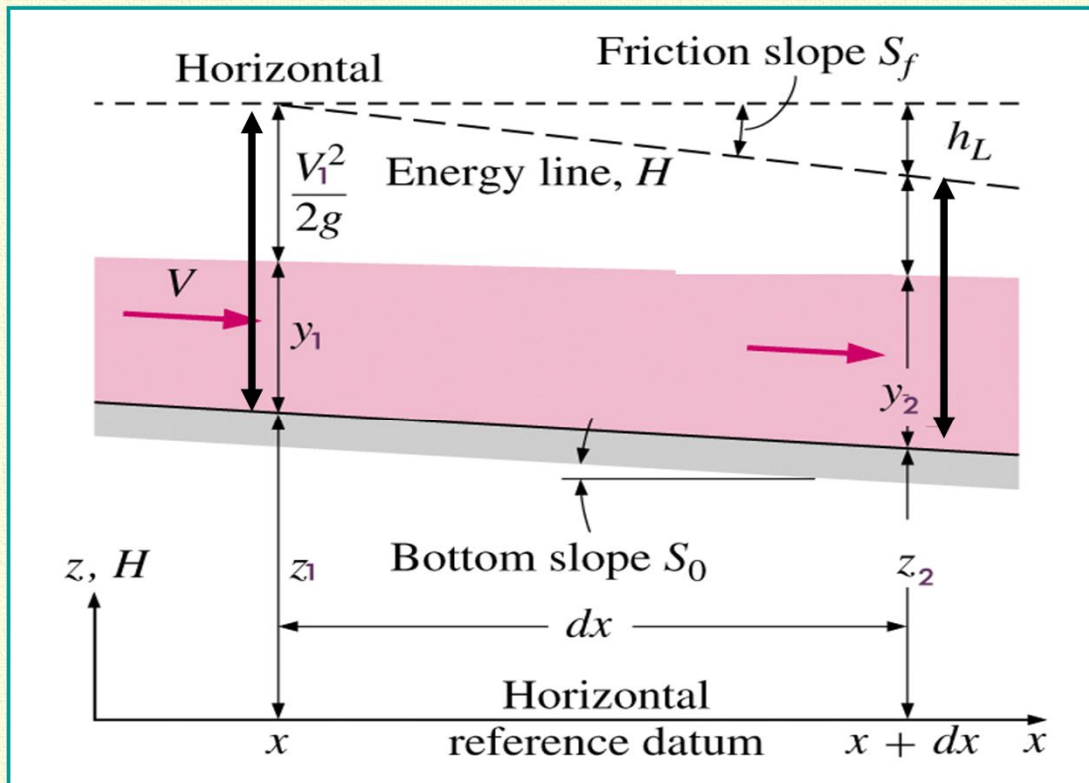
Comprimento do remanso: *direct step method*

- Temos a altura do remanso e o comprimento do remanso
- Pelo *Direct Step Method* podemos calcular para
- $T_r = 100$ anos.

Remanso -Equação do movimento uniforme gradualmente variado

- Basicamente há dois métodos tradicionais denominados por Baptista et al, 2001 de método de integração por passos que são: *Direct Step Method* e o *Standard Method*. Iremos explicar somente um *Direct Step Method* que foi feito por Chow em 1959.
- Informamos que usamos o nome em inglês, *Direct Step Method* pois não temos uma tradução que consideramos ótima.

Direct step method



Direct step method

- Vamos aplicar o Teorema de Bernouilli nas seções 1 e 2 e podemos escrever:
- $Y_1 + V_1^2 / 2g + Z_1 = Y_2 + V_2^2 / 2g + Z_2 + H_L$
- A energia $E = y + V^2/2g$
- Portanto:
- $E_1 = Y_1 + V_1^2/2g$ $E_2 = Y_2 + V_2^2/2g$
- $E_1 + S_o \cdot \Delta x = E_2 + S_f \cdot \Delta x$
- Tirando o valor de Δx temos:
- $\Delta x (S_o - S_f) = E_2 - E_1$
-
- $\Delta x = (E_2 - E_1) / (S_o - S_f)$

Direct step method

- Usaremos a média de Sf_1 com Sf_2 .
- $$Sf = (Sf_1 + Sf_2)/2$$
- O valor de Sf pode ser obtido pela fórmula de Manning explicitando o valor de Sf .
- $$Sf = n^2 \times V^2 / R^{(4/3)}$$
- Uma recomendação feita por Chaudhry, 1993 é que se calcula a profundidade normal y_n e quando vamos usar os cálculos vamos até um valor 10% a mais, isto é, $y_n = 1,10 \times y_n$.
- Nota: o coeficiente de Coriolis denominado α é suposto sempre: $\alpha=1$.

Egito: Soliman, 2013

- Remanso e pontes no Egito

Egito: Soliman, 2013

- A altura máxima de remanso “h” é fornecida pela equação:
-
- $h = (1/C^2) (A^2/a^2 - 1) V^2/2g$
-
- Sendo:
- h= altura de remanso (m)
- C= coeficiente que depende da largura do vão da ponte conforme Tabela (90.7).
-

Tabela 90.12- Valores de C conforme vão da ponte
Fonte: *Egyptian Ministry of Irrigation Code* (2003) in Soliman, 2013

Largura do vão da ponte	C
< 2,00m	0,72
2 a 4m	0,82
>4m	0,92

Egito: Soliman, 2013

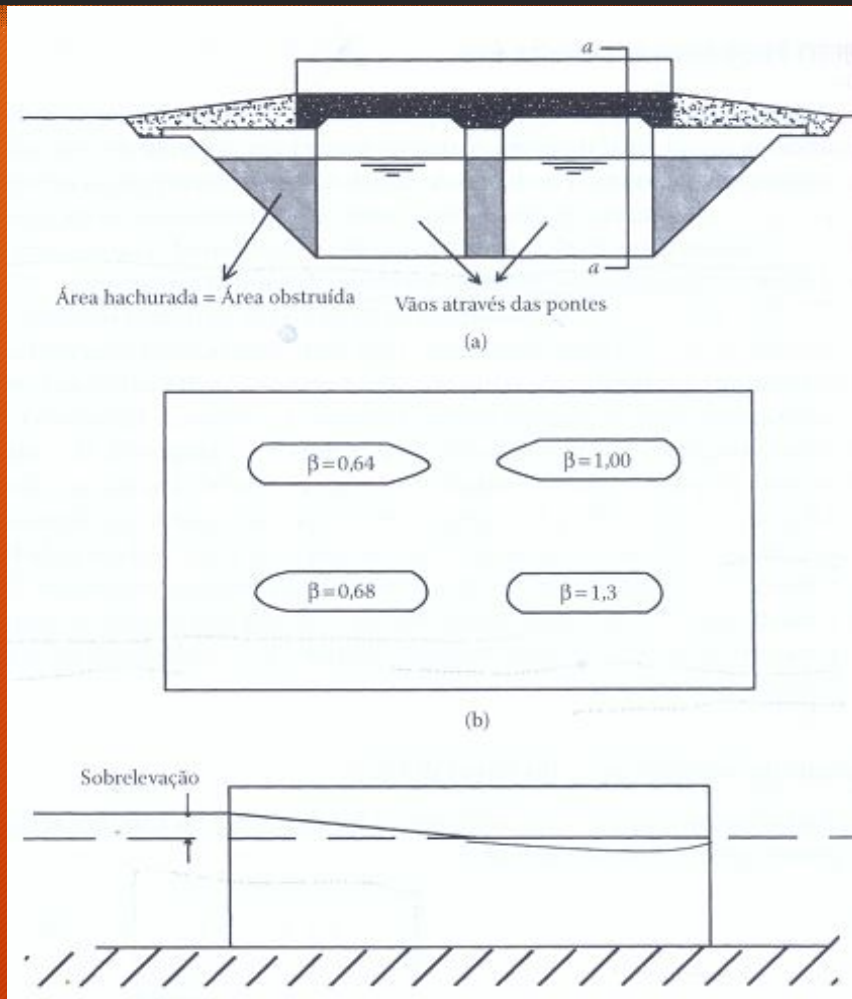
- A = área da seção transversal do rio (m^2)
- a = área da passagem de água na ponte descontando os pilares (m^2)
- V = velocidade média da água (m/s)
- $g = 9,81 \text{m/s}^2$ = aceleração da gravidade

Egito: Soliman, 2013

- Soliman, 2013 apresenta outra equação:
- $h = \alpha \cdot \beta \cdot (V^2 / 2g)$
- Sendo:
- h = altura do remanso (m)
- V = velocidade média (m/s)

- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ = aceleração da gravidade
- $\alpha = (1 - a/A)$
- A = área da seção transversal do rio (m^2)
- a = área da passagem de água na ponte descontando os pilares (m^2)
- β = coeficiente que depende da forma do pilar da ponte conforme Figura (90.24)

Figura 90.24- Seção transversal de uma ponte mostrando



Egito: Soliman, 2013

- Exemplo 90.24
- Verificar a altura do remanso em um curso de água com 30m de largura, altura de 1,5m e talude 1:2 escoando com vazão $Q=50\text{m}^3/\text{s}$. Achar a altura do remanso e que não ultrapasse 0,10m (Soleiman, 2013).
- Área da seção da ponte:
- $A = (b+my)y = (30+2 \times 1,5) \times 1,50 = 49,5 \text{ m}^2$
- Velocidade = $Q/A = 50 / 49,5 = 1,01\text{m/s}$
- Portanto, a velocidade no curso de água é 1,01m/s.
- Para a velocidade da água na ponte a mesma deverá estar entre 1,00m/s e 2,00m/s e vamos adotar 1,5m/s.

Egito: Soliman, 2013

- $Q = S.V$
- $50 = S \times 1,5$
- $S = 50/1,5 = 33,33\text{m}^2$
- $\text{Area} = 33,33\text{m}^2$
- $H = 1,50\text{m}$
- $\text{Comprimento} = 33,33/1,50 = 22,2\text{ m}$
- Escolho 3 vãos de 7,00m que dá 21m.
-

Egito: Soliman, 2013

- Largura dos pilares: $22,2\text{m} - 21\text{m} = 1,20\text{m}$
- Teremos 3 vãos, mas 2 pilares
- Cada pilar terá largura de $1,2/2 = 0,60\text{m}$
- A área “a” será:
- $a = 21 \times 1,50 = 31,5\text{m}^2$
- $A = 49.5 \text{ m}^2$
- $C = 0,92$
- $h = (1/C^2) (A^2/a^2 - 1) V^2/2g$
- $h = (1/0,92^2) (49,5^2/31,5^2 - 1) \times (1,01^2/2 \times 9,81) = 0,0941\text{m} < 0,10 \text{ OK}$

Egito: Soliman, 2013

- Observar que colocamos na equação acima a velocidade $V = 1,01\text{m/s}$ e não a velocidade na ponte que foi admitida como $1,5\text{m/s}$.
-
-

- Dimensionamento preliminar de erosão em pontes

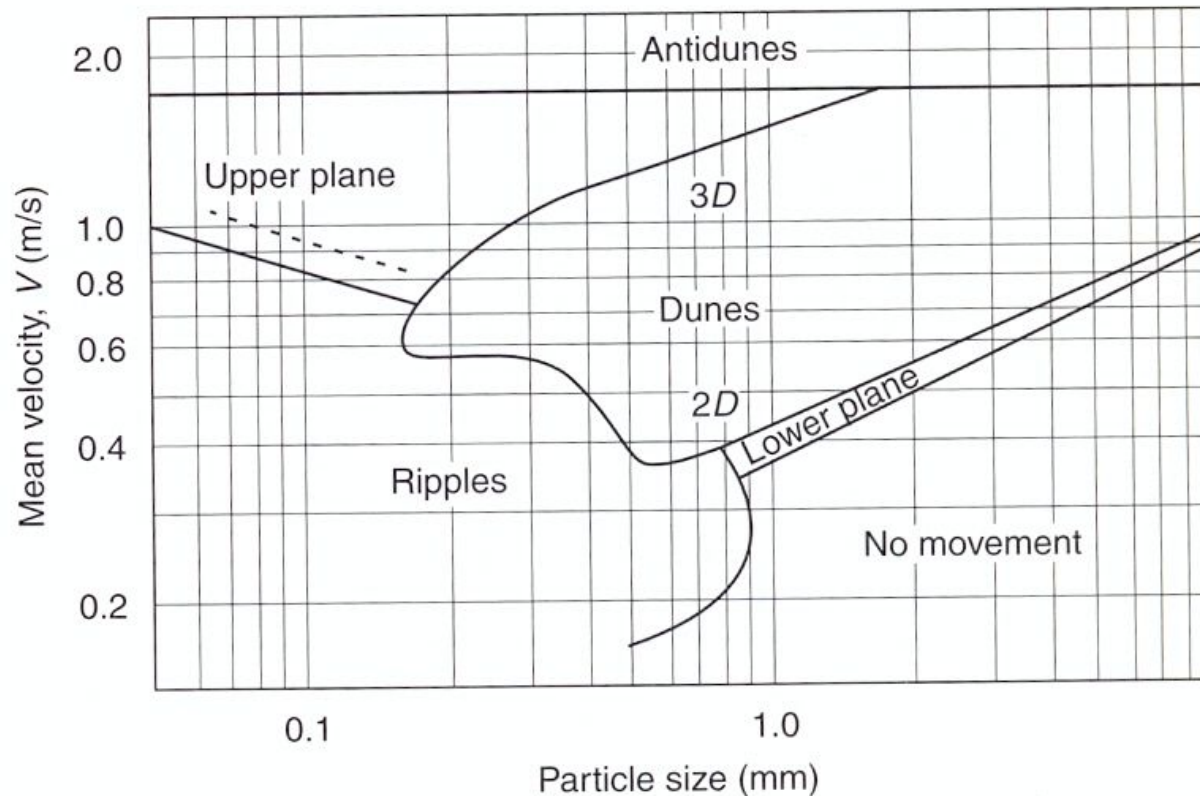
Observações:

- **Influência da maré: não esquecer que se o rio despeja no mar, devemos considerar uma altura aproximada de 1,70m para SP e RJ. Haverá soma dos efeitos de remanso (maré+ponte).**

- Verificar declividade do fundo do rio a 750m a montante da ponte e 750m a jusante da ponte de 10 em 10m.
- .

Tipo de leito: D50 x velocidade

observar D50=0,7mm



- Quando $D_{50} < 0,7\text{mm}$ teremos a formação de *ripples* (dunas).
- Quando $D_{50} > 0,7\text{mm}$ teremos duas condições:
- $(dsp/bp) = 0,5 (bp/D_{50})^{0,53}$ quando $(bp/D_{50}) < 18$
- $(dsp/bp) = 2,3$ quando $(bp/D_{50}) > 18$
- Sendo:
- dsp = profundidade da erosão (m)
- bp = diâmetro de pilar cilíndrico (m)

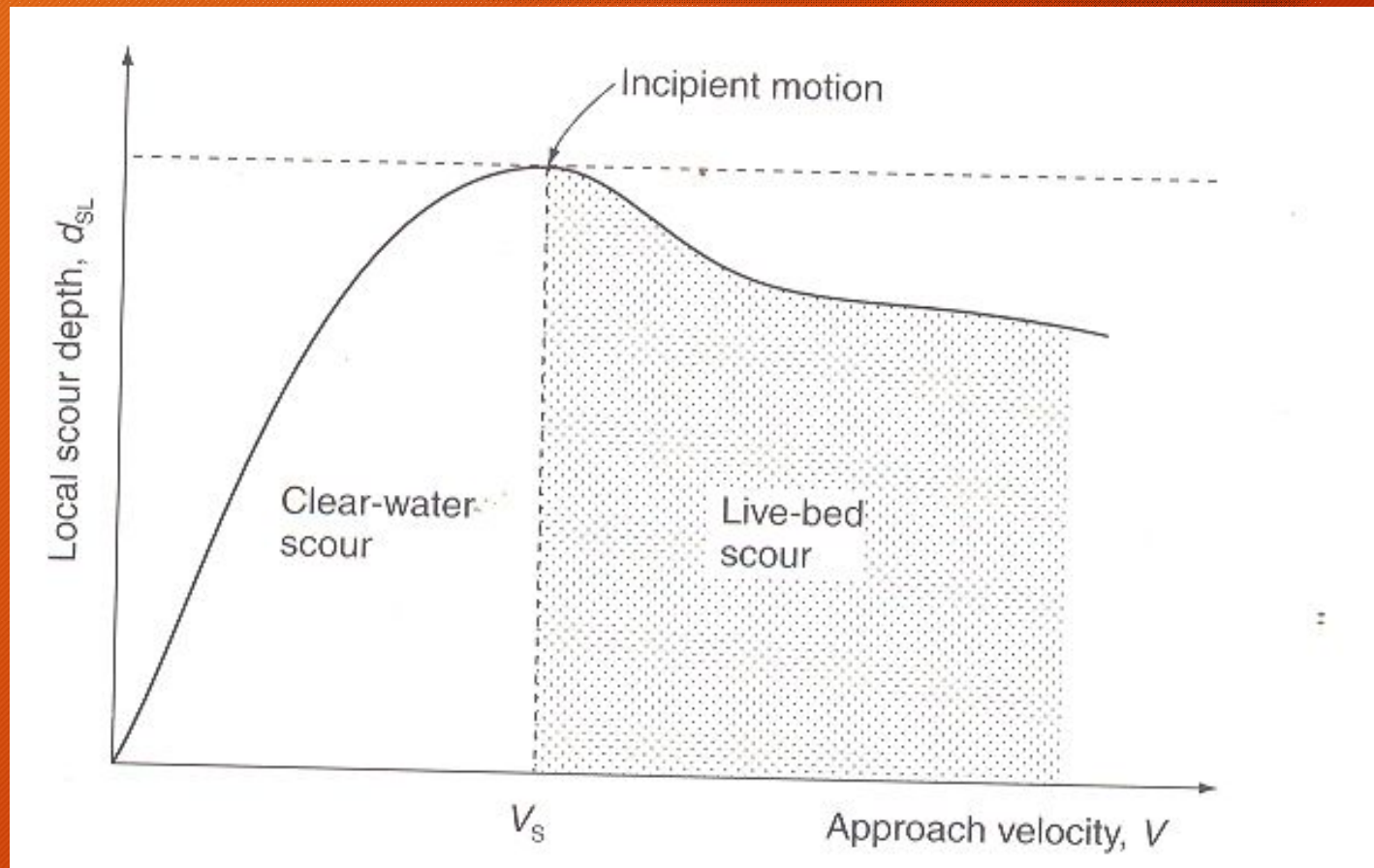
Velocidade crítica

- Velocidade crítica para início do movimento dos sedimentos
- A erosão em uma ponte se pode dar nos seguintes locais:
 - No vão da ponte,
 - Junto aos pilares e
 - Nos apoios da ponte.
- Calcula-se a velocidade crítica V_{c_t} em função da altura da lâmina de água e do diâmetro 50% da partícula D_{50} . Compara-se esta velocidade com a velocidade local na ponte.

Velocidade crítica conforme Hamill, 1999

- Se a velocidade crítica for maior que V , então não haverá movimento do leito do rio, caso contrário, haverá e o canal é de leito móvel conforme equação de Fond e Neill, 1968 in Hamill, 1999.
-
- $V_c = 6,36 \cdot y^{1/6} D_{50}^{1/3}$
- Sendo:
- V_c = velocidade crítica (m/s)
- y = altura da água no escoamento (m)
- D_{50} = diâmetro médio da partícula (m)
-

Velocidade V_c separa leito fixo de leito móvel (Hamill, 1999).



Verificar se é leito móvel ou não

Sendo V a velocidade média achada pela fórmula de Manning na seção do canal e se $V_c > V$ a base do canal não está em movimento e teremos canal com solo coesivo ou canal de leito não móvel.

- Caso $V_c < V$ então haverá movimento dos sedimentos no fundo do canal e teremos canal de leito móvel.

-

Leito móvel

- Exemplo 90.4
- Dada a altura do nível de água a montante $y = 4,57\text{m}$, $D_{50} = 0,165 \times 10^{-3}\text{m}$ e velocidade a montante $V = 1,43\text{m/s}$;
- Verificar se há início ou não do movimento de sedimentos no leito do rio.
- $V_c = 6,36 \cdot y^{1/6} D_{50}^{1/3}$
- $V_c = 6,36 \times 4,57^{1/6} \times 0,000165^{1/3} V_c = 0,44\text{m/s}$
- Como $V > V_c$ então haverá início do movimento do leito e o rio terá leito móvel.

Largura mínima da ponte sem que haja remanso a montante

101

- Exemplo: Chaudhry, 1993
- $Q=200\text{m}^3/\text{s}$ $B=50\text{m}$ $H=4,00$
- Largura mínima da ponte sem que haja remanso a montante.
- Area seção= $50\text{m} \times 4\text{m} = 200\text{m}^2$
- $V=Q/S = 200/200 = 1\text{m/s}$
- Energia específica E
- $E=y + V^2/2g = 4,00 + 1^2/(2 \times 9,81) = 4,05\text{m}$

Largura mínima da ponte sem que haja remanso a montante

102

- Continuação
- Seção retangular
- $Y_c = (2/3) \cdot E = (2/3) \cdot 4,05 = 2,7\text{m}$
- Mas $Y_c = (q^2/g)^{(1/3)}$
- $q = (9,81 \cdot Y_c^3)^{0,5} = (9,81 \times 2,7^3)^{0,5} = 13,9\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$
- $q = Q/b$
- $b = Q/q = 200 / 13,9 = 14,4\text{m}$

Largura mínima da ponte sem que haja remanso a montante

103

- Exemplo de Hamill, 1999
- Dado $Q=200\text{m}^3/\text{s}$ $B= 50\text{m}$ (largura)
 $H=4,00\text{m}$
- Largura mínima da ponte para não haver remanso a montante ?
- $Q= S \times V$ $V= Q/S = 200 / (50 \times 4) = 1\text{m/s}$
- Número de Froude F
- $F= V/ (g.y)^{0,5} = 1,0/ (9,81 \times 4,00)^{0,5} = 0,16$

Largura mínima da ponte sem que haja remanso a montante

104

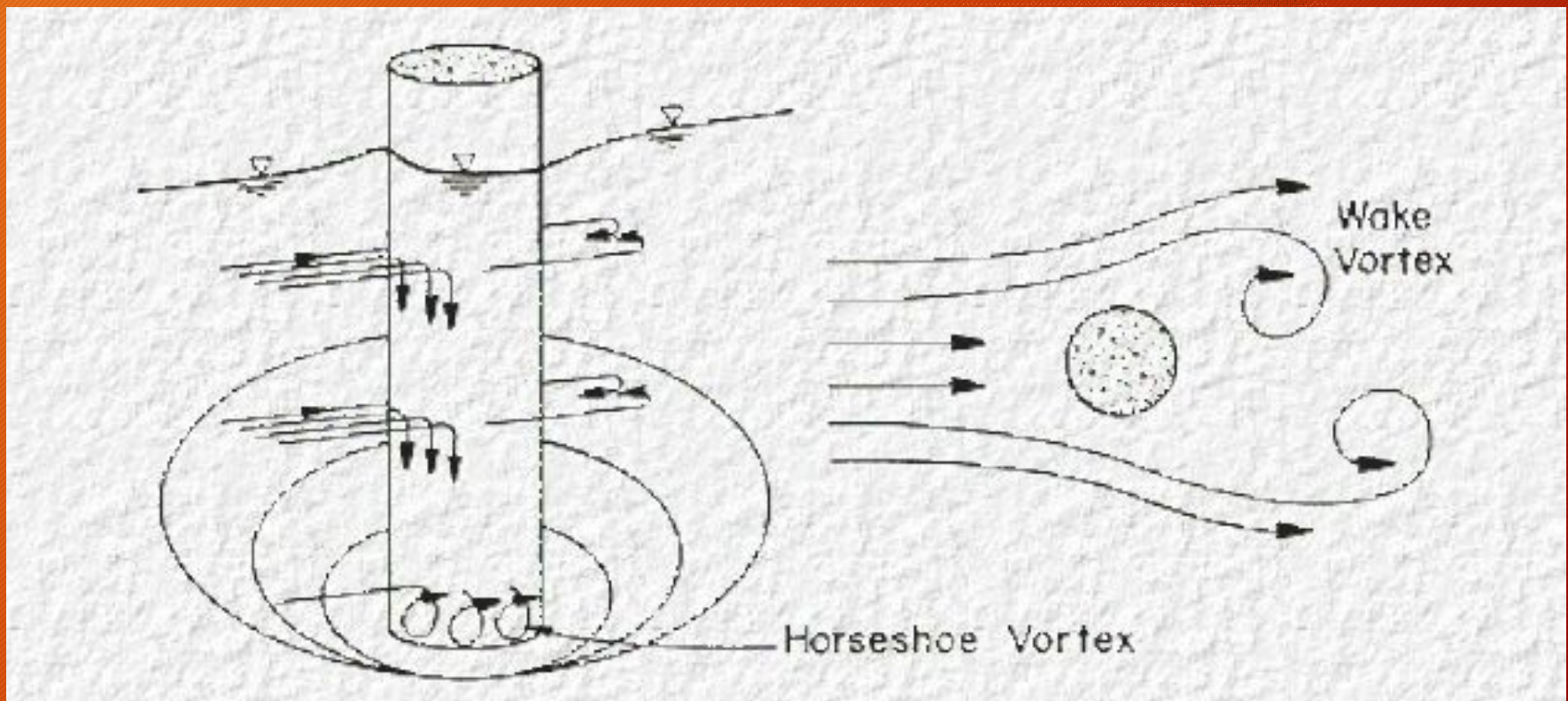
- Conforme Yarnel, 1934
- $M_L^2 = (27F_1^2) / (2 + F_1^2)^3 = (27 \times 0,16^2) / (2 + 0,16^2)^3$
- $M_L = 0,29$
- $M_L = b/B$
- $b = M_L \times B = 0,29 \times 50 = 14,4\text{m}$

- Erosão
- Hamill, 1990 define erosão como uma escavação de material do solo sob uma ponte causado pelo fluxo da água.
- A base dos pilares e dos apoios das pontes, devem ficar abaixo da erosão.
- Há mais de 35 equações desde 1949 a 1987 para determinar a erosão em um pilar de uma ponte.

Erosão nos pilares das pontes

(FHWA)

106



Dimensionamento hidráulico preliminar de uma ponte

107

- Dados: rio onde queremos fazer uma ponte Hamill, 1999 página 30
- $Q = 490 \text{ m}^3/\text{s}$ Largura do rio = 60m
- Altura de água no rio = 1,60m
- Altura do rio quando enche = 1,00m (150m de largura)
- Altura total do nível de água = 2,60m
- $D_{50} = 1,0 \text{ mm}$

Dimensionamento hidráulico preliminar de uma ponte

108

- Largura mínima do rio conforme Lacey
- $L_{min} = 3,20 \times Q^{0,5}$ (Teoria do Regime)
- $L_{min} = 3,20 \times 490^{0,5} = 71m$
- Largura adotada = 80m
- Supomos 3 pilares espaçados de 20m
- Cada pilar supomos ter largura de 1,20m
- Largura útil da ponte = $80,00 - 3 \times 1,20 = 76,40m$
- Como a altura da água é 2,60m teremos:
- $Area = 76,40 \times 2,60 = 199m^2$
- $Q = A \times V$ $V = Q/A = 490 / 199 = 2,5m/s$

Dimensionamento hidráulico preliminar de uma ponte

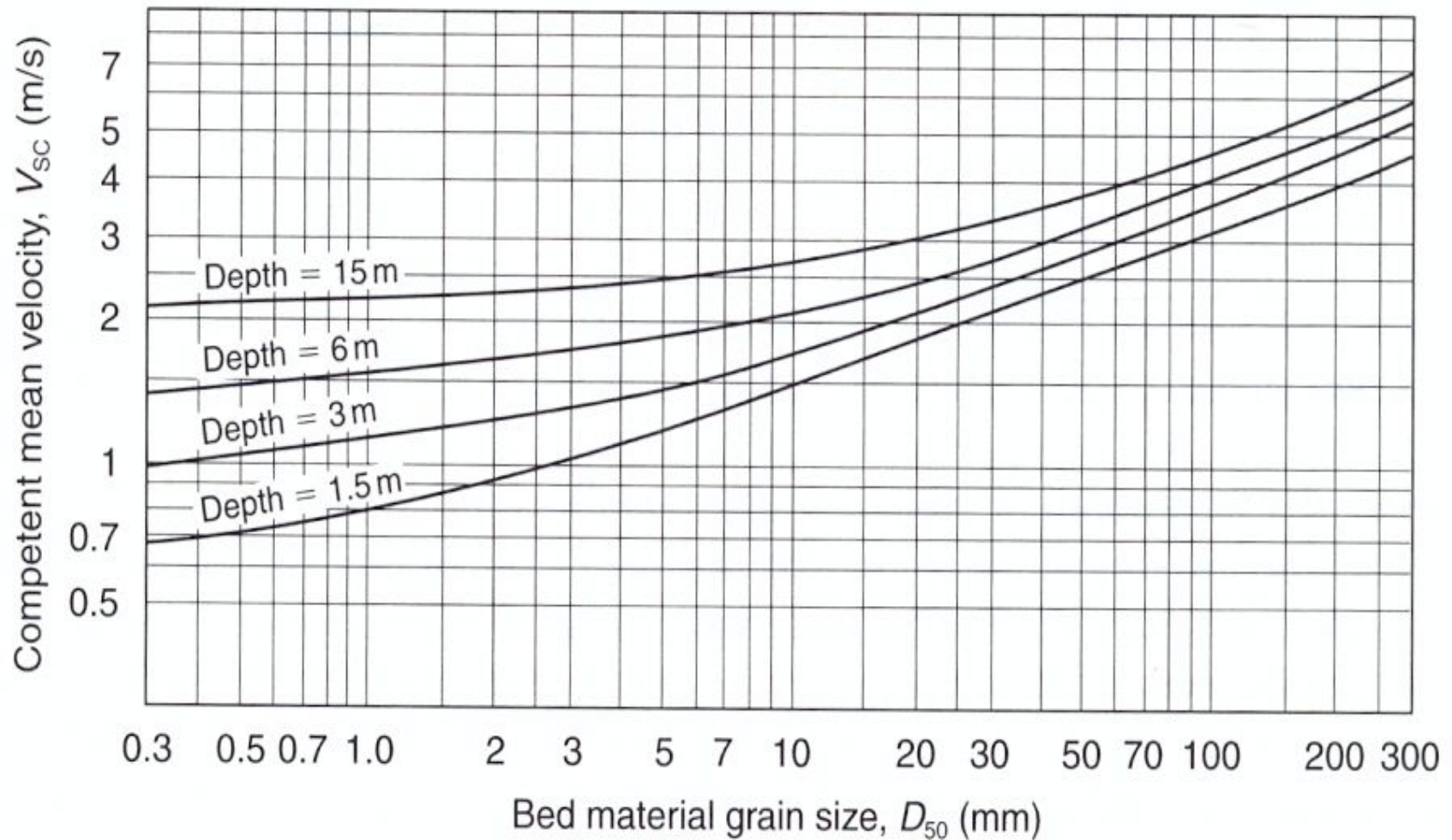
109

- Cálculo da profundidade da erosão ds devido a contração
- Primeira iteração:
- Ver figura adiante: $D_{50} = 1\text{mm}$ e $y = 2,60$ achamos $V_{sc} = 1,00\text{m/s}$
- $\text{Area} = Q/V_{sc} = 490 / 1,00 = 490\text{m}^2$
- $\text{Altura} = 490\text{m}^2 / 76,4\text{m} = 6,4\text{m}$
- Entrando novamente na Figura adiante com
- $D_{50} = 1\text{mm}$ e $y = 6,4\text{m}$ achamos $V_{sc} = 1,6\text{m/s}$

Velocidade crítica V_{sc} em função de D_{50} e da altura do nível de água Y

Fonte: Hamill, 1999

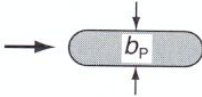
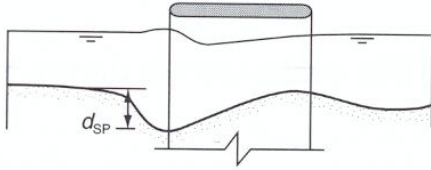

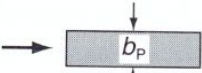

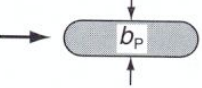
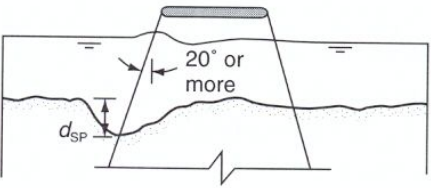
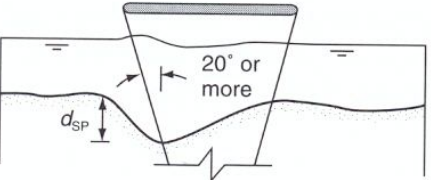
110



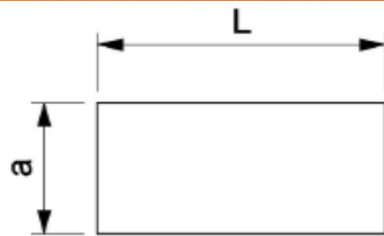
Valores sugeridos de profundidade de erosão dsp em pilares conforme o formato. Fonte: Hamill, 1999.

111

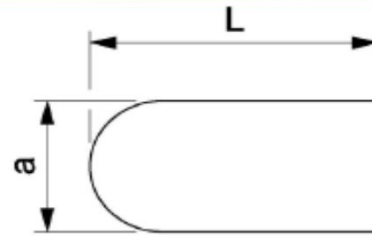
(a)

Pier shape in plan	Pier shape in profile	Suggested allowance for local scour
		$d_{SP} = 1.5 b_P$
	Ditto	Ditto
	Ditto	$d_{SP} = 2.0 b_P$
	Ditto	$d_{SP} = 1.2 b_P$
		$d_{SP} = 1.0 b_P$
Ditto		$d_{SP} = 2.0 b_P$

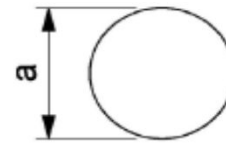
Escolher pilar com frente (nariz) arredondada



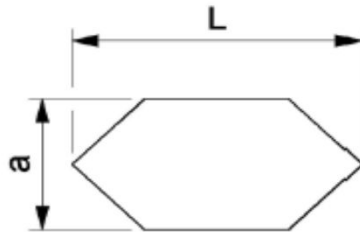
(a) Square Nose



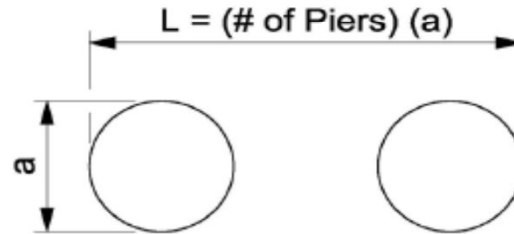
(b) Round Nose



(c) Cylinder



(d) Sharp Nose



(e) Group of Cylinders
(See multiple columns)

Dimensionamento hidráulico preliminar de uma ponte

113

- Segunda iteração:
- Achamos $V_{sc}=1,00\text{m/s}$ e $V_{sc}= 1,60\text{m/s}$
- Supomos uma média $V_{sc}= 1,35\text{m/s}$
- $\text{Area} = Q/V_{sc} = 490 / 1,35 = 363\text{m}^2$
- $\text{Altura } y = 363\text{m}^2 / 76,4\text{m} = 4,8\text{m}$
- Entrando na Figura novamente com $D_{50}=1\text{mm}$ e $y=4,8\text{m}$ achamos $V_{sc}= 1,35\text{m/s}$
- Coincide com o adotado e portanto está OK
- Profundidade da erosão no vão da ponte = d_{sc}
- $D_{sc} = 4,8 - 2,6 = 2,2\text{m}$

Dimensionamento hidráulico preliminar de uma ponte

114

- Cálculo da erosão nos pilares da ponte
- Largura do pilar $b_p = 1,20\text{m}$
- Forma do pilar = ponta arredondada
- Ver Figura atrás dos pilares
- $D_{sp} = 1,5 \times b_p$
- $D_{sp} = 1,5 \times 1,2 = 1,8\text{m}$
- Profundidade total de erosão:
- Vão da ponte + pilar = $2,2\text{m}(\text{vão}) + 1,8 = 4,00\text{m}$

Dimensionamento hidráulico preliminar de uma ponte

115

- Observações:
- Não esquecer:
- É somente um dimensionamento preliminar
- A fórmula de Lacey fornece valores grandes
- Estudos econômicos
- Condições locais do solo
- Navegação
- Remanso a montante
- Fazer alternativas

- Hamill, 1999: melhor maneira de a erosão não afetar uma estrutura, é fazer com que a base das fundações estejam abaixo do máximo de erosão.
- Caso haja muita erosão podemos jogar pedras de grandes diâmetros juntos aos pilares e base da ponte.

- Potencial de erosão
- Estética
- Largura da ponte= largura da rio
- Rever todo o projeto.
- Fazer um checklist
- Cálculo estruturais: choque com barcos e resíduos flutuantes deve ser previsto
- Considere as alternativas de projeto

- **Contração do leito do rio**
- **Leito móvel**
- **Leito fixo**

90.13 Erosão devido a contração horizontal do escoamento na condição de leito móvel

- A equação básica para o cálculo da erosão devido a contração em janeiro de 2021.
- $y_2 = y_1 (Q_2/Q_1)^{(6/7)} (B/b)^{K1}$
- $y_s = y_2 - y_0$
- Sendo:
- y_2 = profundidade média na seção contraída (m)
- y_1 = profundidade média a montante da seção contraída (m)
- Q_1 = vazão na seção a montante da contração (m^3/s) não incluindo a vazão de inundação na várzea.
- Q_2 = vazão na secção contraída (m^3/s)
- B = largura do fundo do canal a montante (m)
- b = largura do canal na seção contraída descontando os pilares se houver (m)

- k_1 = expoente do leito movel do canal
- w = velocidade de queda do sedimento na base (m/s)
- v_s = velocidade de tensão na seção de montante (m/s) = $(g y_1 / S_1)^{0,5}$
- D_{50} = diâmetro médio da partícula (m)
- S_1 = declividade do canal principal (m/m)
- y_o = profundidade média do escoamento na seção contraída, antes do início do processo erosivo (m)
- y_s = rebaixamento do leito devido à erosão (m)

Tabela 90.1- Expoentes K_1 para a condição de leito móvel

U_1^*/w	K_1	Maneira de transporte dos sedimentos no leito
$< 0,5$	0,59	Os materiais estão no leito
Entre 0,5 a 2,0	0,64	Alguns materiais do leito estão suspensos
$\geq 2,0$	0,69	A maioria dos sedimentos na base estão suspensos

- O valor U_1^* é dada pela equação:

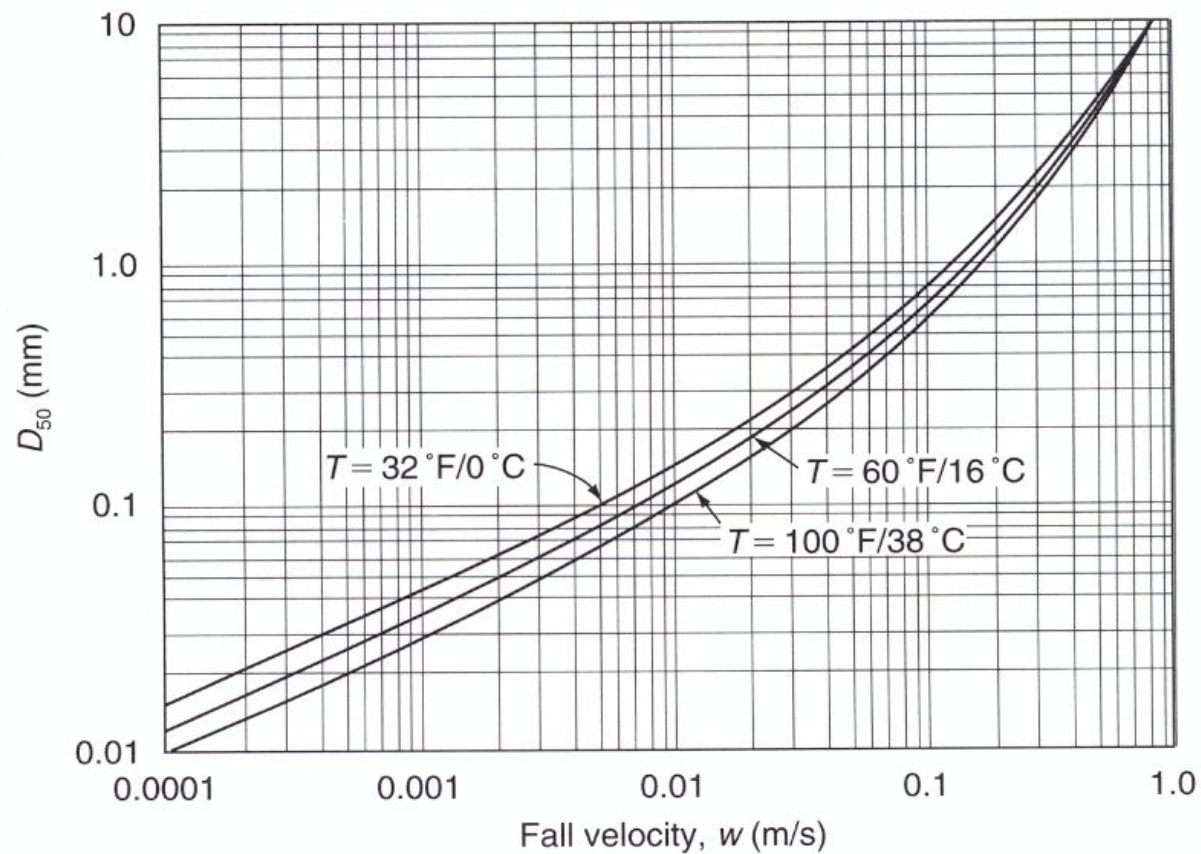
- $$U_1^* = (g \cdot y_1 \cdot S_o)^{0,5}$$

- Sendo:

- U_1^* = velocidade de arraste na seção de montante da ponte (m/s)
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- y_1 = altura da seção a montante da ponte (m)
- S_o = declividade do canal onde está a ponte (m/m)
- w = velocidade média de queda do sedimento (m/s) usando D_{50} da equação de Stokes ou usar Figura (90.10).

Figura 90.10- Velocidade de queda w do sedimento com D_{50}

Fonte: Hamill, 1999



- Exemplo de contração em leito móvel

Exemplo de leito móvel

- Exemplo conforme Hamill, 1999 página leito móvel
- Seja um canal retangular com largura de 20m e vazão de $25,84 \text{ m}^3/\text{s}$. Profundidade do canal é de 1,70m. O diâmetro $D_{50}=0,5\text{mm}$; Declividade $0,00033\text{m/m}$. A ponte tem dois pilares separados na distância de 5m sendo o vao total de 10m
- Achar a profundidade da erosão no canal

Exemplo de leito móvel

- Primeiramente vamos calcular a velocidade crítica para ver se é mesmo fundo móvel.
- $V_c = 6,36 \cdot Y^{(1/6)} \cdot D_{50}^{(1/3)}$
- $V_c = 6,36 \times 1,7^{(1/6)} \times 0,0005^{(1/3)} = 0,55 \text{ m/s}$
- Mas $V = Q / \text{Area} = 25,84 / (20 \times 1,7) = 0,76 \text{ m/s}$
- Como $0,76 \text{ m/s} > 0,55 \text{ m/s}$ teremos leito móvel.

Exemplo de leito móvel

- O valor U_1^* é dada pela equação:
- $$U_1^* = (g \cdot y_1 \cdot S_o)^{0,5}$$
- $U_1^* = (9,81 \times 1,70 \times 0,00033)^{0,5}$
- $U_1^* = 0,075 \text{ m/s}$
- Na Figura 90,10 entrando com $D_{50} = 0,5 \text{ mm}$ achamos velocidade de deposição $w = 0,08 \text{ m/s}$
- Mas $U_1^*/w = 0,075/0,08 = 0,93$
- Na Tabela 90.1 achamos $K_1 = 0,64$

Exemplo de leito móvel

- $y_2 = y_1 (Q_2/Q_1)^{(6/7)} (B/b)^{K1}$
- $y_2 = 1,70 (25,84/25,84)^{(6/7)} (20/10)^{0,64}$
- $Y2 = 2,65\text{m}$
- $D_{sc} = y_2 - y_1 = 2,65 - 1,70 = 0,95\text{m}$

90.14 Erosão devido a contração horizontal do escoamento na condição de leito fixo.

- Em canal de solo coesivo onde não há movimento no leito vale a equação:
- $y_2 = [Q_2^2 / (36 \cdot D_m^{2/3} \cdot b^2)]^{3/7}$
- $dsc = y_2 - y_1$
- Sendo:
- Q_2 = vazão que passa pela ponte (m^3/s)
- $D_m = 1,25 \times D_{50}$ (m)
- b = largura da contração (m)
- y_2 = profundidade da seção contraída (m)
- dsc = média de erosão (m)
- y_1 = profundidade da seção antes da contração (m)
-

- Exemplo de contração de leito fixo (clear water)

Exemplo de contração com leito fixo (clear water)

- Exemplo (Hamill, 199 página 279:
- Seja um canal com vazão de $6,9 \text{ m}^3/\text{s}$. A gravidade específica do sedimento é 2,65. A largura do canal é 7,5m e a profundidade é 1,00. O diâmetro $D_{50}=0,01\text{m}$. Toda a vazão deve passar em uma seção retangular com 4,00m da largura.
- Calcular a profundidade da erosão no canal.

Exemplo de contração com leito fixo (clear water)

- Primeiramente temos que achar a velocidade critica para ver se temos leito móvel ou fixo.
- Velocidade no canal
- $V = Q/Area = 6,9 / (7,50 \times 1,00) = 0,92 \text{ m/s}$
- $V_c = 6,36 \times 1,00^{(1/6)} \times (0,01)^{(1/3)} = 1,37 \text{ m/s}$
- Como $v_c > V$, temos então leito fixo (clear water).

Exemplo de contração com leito fixo (clear water)

- Diâmetro médio do sedimento
- $D_m = 1,5 \times D_{50} = 1,25 \times 0,01 = 0,0125\text{m}$
- Para leito fixo temos:
- $y_2 = [Q_2^2 / (36 \cdot D_m^{2/3} \cdot 4^2)]^{3/7}$
- $y_2 = [6,9^2 / (36 \times 0,0125^{2/3} \times 4^2)]^{3/7} = 1,20\text{m}$
- $d_{sc} = y_2 - y_1$
- $D_{sc} = 1,2 - 1 = 0,20\text{m}$
- Portanto, teremos 0,20m de erosão no canal.

- Erosão no pilar da ponte

Erosão nos pilares da ponte

- A erosão nos pilares pode ocorrer mesmo em canais de fundo móvel e em canais de fundo não móvel e em ambos os casos teremos erosão em pilares.
- A altura máxima da fossa de erosão no pilar é dada pela conforme WisDOT, janeiro de 2021 CSU equation
- $y_s = 2,0 K_1 K_2 K_3 K_4 (y_1/a)^{0,35} Fr^{0,43}$
- Sendo:
- y_s = máxima altura de erosão no pilar (m)
- y_1 = profundidade de escoamento imediatamente a montante do pilar (m)
- K_1 = fator de correção devido a forma do pilar conforme Tabela (90.3)
- K_2 = fator de correção no ângulo de ataque conforme Tabela (90.4)
- K_3 = fator de correção para a forma do leito Tabela (90.5)

Erosao no pilar

- K_4 =fator de correção para preenchimento da fossa de erosão por diâmetros superiores.
- Fr = número de Froude a imediatamente a montante do pilar
- a = largura do pilar (m)
- v_1 = velocidade média da água imediatamente a montante do pilar (m/s)

Tabela 90.3- Fatores de correção K_1 nos pilares devido a forma

Forma do nariz do pilar	K_1
Quadrado	1,1
Redondo	1,0
Pontudo (sharp)	0,9
Cilindro circular	1,0
Grupo de cilindros	1,0

Tabela 90.4- Fatores de correção K_2 no ângulo de ataque dos pilares a= largura do pilar L=comprimento do pilar

Ângulo de ataque	K_2		
	L/a= 4	L/a=8	L/a=12
0	1,0	1,0	1,0
15	1,5	2,0	2,5
30	2,0	2,5	3,5
45	2,3	3,3	4,3
90	2,5	3,9	5,0

Tabela 90.5- Correção de fator K_3 das condições da base de sedimentos

Condição da base de sedimentos	H	K_3
Erosão de sedimentos em canal com escoamento não móvel	ND	1,1
Leito de sedimentos plano e escoamento anti-duna	ND	1,1
Pequenas dunas	$3,0 > H > 0,6$	1,1
Dunas médias	$9,0 > H > 3,0$	1,1 a 1,2
Dunas grandes	$> 9,0$	1,3

- **Exemplo 90.7**

- Calcular a profundidade de erosão de um pilar de uma ponte sendo fornecidos os seguintes dados:
- $Fr=0,24$ (a montante)
- $y_1= 4,57\text{m}$ (a montante)
- $a= 0,80\text{m}$ (largura do pilar de nariz redondo)
- $K_1=1$
- $K_2=1$
- $K_3=1,1$
- $K_4= 1$

- $y_s = 2,0 K_1 K_2 K_3 K_4 (y_1/a)^{0,35} Fr^{0,43}$

- Sendo:

- $y_s = 2,0 \times 1 \times 1 \times 1,1 \times 1 \times (4,57/0,8)^{0,35} 0,24^{0,43}$

- $Y_s = 2,19m$

Hamill, 1999

Forças hidrodinâmicas

- Hamill, 1999 apresenta fórmulas especiais para determinar :
 - 1) Força de impacto hidrodinâmica da água nos pilares das pontes
 - 2) Força de levantamento (uplift) nos pilares
 - 3) Força hidrostática para levantamento da ponte quando a água passa por cima da ponte
 - 4) Força de impacto devido ao transporte de gelo pelos rios
 - 5) Força de impacto nos pilares devido aos detritos flutuantes
-

Custo total da ponte

Deriva o custo em relação ao comprimento e iguala a zero.

Mínimo custo. Jagadeesh e Jayaram, 2009

- **Custo total = $K \cdot L^2$**
- **K = coeficiente**
- **L = comprimento da ponte (m)**
- **Varia como quadrado do comprimento da ponte**
- **Não tenho o valor de K.**
- **Importância da manutenção da ponte**

Largura máxima da fossa de erosão de um pilar

- Cálculo da largura da fossa de erosão de um pilar
- Conforme Martins e Mendes a largura de uma fossa medida à cota do leito e para um dos lados do pilar, para material sem coesão pode ser estimada pela seguinte equação:
$$W = y_s [K + 1 / \tan (\theta)]$$

- Sendo:
- W = largura da fossa de erosão (m)
- y_s = profundidade da fossa de erosão (m)
- K = largura da fossa de erosão no fundo (m)
- θ = ângulo de repouso do material do fundo.
-

Largura da fossa de erosão do pilar

- Exemplo 90.8
- Calcular a largura da fossa de erosão do pilar com $y_s=1,35\text{m}$, sendo a largura da fossa $K=1,00\text{m}$ e ângulo de repouso $\theta= 39,7^\circ$.
- $$W= y_s [K + 1/\tan (\theta)]$$
- $\theta= 37,9^\circ= 0,69\text{rad}$
- $$W= 1,35 [1,00 + 1/ \tan (39,7)] = 2,98\text{m}$$
- Portanto, a largura da fossa do pilar é 2,98m

90.20 Erosão causada pela contração vertical do escoamento

- Conforme Martins e Mendes o escoamento sob uma ponte entra em pressão quando a superfície livre da água entra em contato com a face inferior do tabuleiro da ponte. Nesta situação o escoamento reparte-se, entre a fração que galga a ponte e a outra fração do caudal que passa em pressão sob a ponte.
- Na situação de o escoamento ser realizar sob pressão, as fossas de erosão geradas pelos pilares e encontros são consideravelmente superiores, visto que, o escoamento é redirecionado pelo tabuleiro, na direção do leito.

90.20 Erosão causada pela contração vertical do escoamen

- O aumento das fossas de erosão gerado pelo escoamento sob pressão é atenuado se a velocidade de escoamento sob a obra de arte diminuir quando está é galgada.
- Vamos calcular a profundidade da erosão provocada pela contração vertical do escoamento usando a equação de Arneson conforme Martins e Mendes
- $$\frac{y_s}{y_1} = -5,08 + 1,27 (y_1/H_b) + 4,44 (H_b/y_1) + 0,19 (V_a/V_c)$$

90.20 Erosão causada pela contração vertical do escoamen

- Sendo:
- y_s = profundidade da erosão gerada pela contração vertical do escoamento (m)
- y_1 = profundidade do escoamento imediatamente a montante da ponte (m)
- H_b = distância vertical entre a parte inferior do tabuleiro e o leito antes do processo erosivo (m)
- V_a = velocidade média do escoamento pela abertura da ponte antes do processo erosivo (m/s)
- V_c = velocidade crítica para D_{50} (m/s)

90.20 Erosão causada pela contração vertical do escoamen

- Exemplo 90.9
- Calcular a profundidade da erosão causada pela contração vertical de uma ponte sendo dados:
- $y_1 = 4,57\text{m}$
- $V_c = 0,44\text{m/s}$
- $V_a = 2,84\text{m/s}$
- $H_b = 3,53\text{m}$
- $y_s / y_1 = -5,08 + 1,27 (y_1 / H_b) + 4,44 (H_b / y_1) + 0,19 (V_a / V_c)$
- $y_s / 4,57 = -5,08 + 1,27 (4,57 / 3,53) + 4,44 (3,53 / 4,57) + 0,19 (2,84 / 0,44)$
- $y_s = 5,58\text{m}$

90.21 Análises das fossas de erosão junto dos encontros da ponte

Conforme Martins e Mendes, o escoamento obstruído pelo encontro de uma ponte e aterro de aproximação, forma um vórtice horizontal, que tem origem na extremidade de montante do encontro e percorre todo o pé do encontro e um vórtice vertical provocado pela separação do escoamento que se forma na extremidade de jusante do encontro.

90.21 Análises das fossas de erosão junto dos encontros da ponte

- Os encontros podem ser localizados nas margens ou no próprio leito, sendo a erosão mais severa quando estes se localizam no leito e provocam um estrangulamento não gradual.

90.21 Análises das fossas de erosão junto dos encontros da ponte

- Os encontros podem ser localizados nas margens ou no próprio leito, sendo a erosão mais severa quando estes se localizam no leito e provocam um estrangulamento não gradual.
- A equação usada para a erosão é de Froehlich que foi desenvolvida em ensaios laboratoriais sendo recomendada a aplicação quando $L' / y < 25$.

90.21 Análises das fossas de erosão junto dos encontros da ponte

- $y_s/y_1 = 2,27 \cdot K_1 \cdot K_2 (L' / y_a)^{0,43} \cdot Fr^{0,61} + 1$
- Sendo:
- y_s = profundidade da fossa de erosão (m)
- y_1 = profundidade do escoamento imediatamente a montante (m)
- Fr = número de Froude calculado a montante do encontro.
- K_1 = coeficiente da forma do encontro. Exemplo $K_1 = 0,82$
- K_2 = coeficiente do ângulo de viés. Exemplo $K_2 = 1,00$
- y_a = profundidade média do escoamento na margem de inundação (m)
- L' = comprimento do aterro que obstrui o escoamento ativo (m)
-

90.21 Análises das fossas de erosão junto dos encontros da ponte

- Exemplo 90.10
- Calcular a profundidade de erosão junto aos encontros da ponte sendo dado:
- $Fr=0,214$
- $K_1= 0,82$
- $K_2=1,00$
- $L' = 4,00m$
- $y_a= 4,34m$
- $y_1=4,57m$

90.21 Análises das fossas de erosão junto dos encontros da ponte

- $y_s/y_1 = 2,27 \cdot K_1 \cdot K_2 (L' / y_a)^{0,43} \cdot Fr^{0,61} + 1$
- $y_s/4,57 = 2,27 \times 0,82 \times 1,00 (4,0/4,34)^{0,43} \times 0,214^{0,61} + 1$
- $y_s = 7,78\text{m}$
- Observar que o valor $y_s=7,78\text{m}$ é muito grande e deve-se examinar a geologia local, pois pode haver uma camada de rocha dura que não permitirá que atinja aquela profundidade.

Riprap em pontes

Riprap em pontes

- Há duas maneiras básicas de se prevenir erosão em pontes.
 - Uma delas é fazer um projeto de ponte com fundações seguras contra a erosão e outra solução é proteger os pilares e os apoios das pontes com riprap.
- O riprap segundo Hamill, 1999 é uma medida preventiva boa, mas se for instalado erradamente pode ocasionar erosão.
- O talude do riprap
- *Riprap* no vão da ponte
- O riprap no vão da ponte depende do número de Froude.
-

Quando $F \leq 0,8$

- Quando o número de Froude $F \leq 0,8$ usamos a equação de Richardson, 1993 citado por Hamill, 1999 que calcula o diâmetro médio das pedras em função de algumas características:

$$D_{50} = (K \cdot Y) (S_s - 1) \times (V^2 / gY)$$

- Sendo:
- D_{50} = diâmetro das pedras (m)
- $K=0,89$ abertura horizontal
- $K=1,02$ parede vertical no curso da água
- S_s = gravidade específica da pedra. Geralmente $S_s = 2,65$. Para água doce $S_s = 1,0$ e para água salgada $S_s = 1,025$.
- Y = profundidade da água na ponte (m)
- V = velocidade na ponte na seção contraída (m/s)
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ = aceleração da gravidade

Quando $F \leq 0,8$

- A espessura mínima do *riprap* é D_{50} a $2 \times D_{50}$.
- O comprimento do *riprap* deve ser o dobro da altura:
 $2 \times Y$
-
- Exemplo 90.18- Baseado em Hamill, 1999
- Calcular o diâmetro médio da pedra para *riprap* em vão de ponte com profundidade $Y = 2,4\text{m}$, velocidade $V = 2,92\text{m/s}$ e número de Froude $F = 0,60 < 0,80$.
- $$D_{50} = (K \cdot Y) (S_s - 1) \times (V^2 / gY)$$
- $$S_s = 2,65$$
- $$K = 0,89$$
- $$D_{50} = (0,89 \times 2,4) (2,65 - 1) \times (2,92^2 / 9,81 \times 2,4) = 0,47\text{m}$$
- Espessura do *riprap* = D_{50} a $2D_{50} = 0,47\text{m}$ a $0,94\text{m}$
- Comprimento do *riprap* = $2 \times Y = 2 \times 2,4 = 4,8\text{m}$

Quando $F > 0,8$

-
- $$D_{50} = (K \cdot Y) (S_s - 1) \times (V^2 / gY)^{0,14}$$
- Sendo:
- D_{50} = diâmetro das pedras (m)
- $K=0,61$ abertura horizontal
- $K=0,69$ parede vertical no curso da água
- S_s = gravidade específica da pedra. Geralmente $S_s = 2,65$. Para água doce $S_s = 1,0$ e para água salgada $S_s = 1,025$.
- Y = profundidade da água na ponte (m)
- V = velocidade na ponte na seção contraída (m/s)
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ = aceleração da gravidade
-

Quando $F > 0,8$

- Riprap nos pilares
-
- $$D_{50} = 0,692 (K.V)^2 / [(S_s - 1) \cdot 2 \cdot g]$$
- Sendo:
- D_{50} = diâmetro das pedras (m)
- $K=1,5$ para pilar de frente arredondada
- $K=1,7$ para pilar retangular
- S_s = gravidade específica da pedra. Geralmente $S_s = 2,65$
- V = velocidade na ponte na seção contraída (m/s)
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ = aceleração da gravidade
-

Quando $F > 0,8$

- $V = C \cdot Q / A$
- Sendo:
- V = velocidade média na seção (m/s)
- Q = vazão de pico (m³/s)
- A = área da seção transversal do canal principal (m²)
- $C=0,9$ para pilar próximo a margem
- $C=1,7$ para pilar no local de maior velocidade da água
- C = para pilares intermediários deve ser escolhido entre os extremos 0,9 e 1,7.
-
- O riprap deve ser estender 2 vezes a largura do pilar bp:
- Extensão = $2 \times bp$
- Espessura mínima = $3 \times D_{50}$

Quando $F > 0,8$

- Exemplo 90.19
- Calcular o riprap em pilares de uma ponte com $Y=2,4m$, $V= 2,92m/s$ com $K=1,5$ $C=1,2$.
- $V= 1,2 \times 2,92= 3,50m/s$
- $D_{50}= 0,692 (K.V)^2 / [(Ss-1) \cdot 2 \cdot g]$
- $D_{50}= 0,692 (1,5 \times 3,50)^2 / [(2,65-1) \times 2 \times 9,81]= 0,59m$
- O riprap deve ser estender 2 vezes a largura do pilar bp:
- Extensão= $2 \times bp= 2 \times 1,20= 2,40m$
- Espessura mínima = $3 \times D_{50}= 3 \times 0,59= 1,77m$

Velocidade da água no meio das pedras britadas do riprap

- Em um canal de riprap a água tem uma velocidade média e tem também uma velocidade no meio das pedras britadas. Esta velocidade nas pedras britadas é em geral muito baixa, mas deve ser menor que a velocidade máxima permitida pela D50 do solo,
- Fazendo análise granulométrica do solo, temos o diâmetro D50 e a máxima velocidade que se pode admitir para que a partícula não seja arrastada conforme Figura (271.1).

Velocidade da água no meio das pedras britadas do riprap

- Conforme Hamil, 1999 a velocidade entre as pedras é dada pela formula de Stephenson, 1979:
- $V_v = 0,092V (D_{50}/Y)^{(2/3)}$
- Sendo:
- V_v = velocidade no vazio entre as pedras britadas (m/s)
- V = velocidade no canal (m/s)
- Y = altura do nível de água no canal (m)
 - D_{50} = diâmetro de 50% do peso (m)
-

Velocidade da água no meio das pedras britadas do riprap

- Exemplo 271.1 Calcular velocidade V_v entre as pedras britadas e verificar se é menor que o admitido sendo $V=3,50\text{m/s}$ $D_{50}=0,65\text{m}$ $Y=2,40\text{m}$, O diâmetro da partícula d_{50} do solo é 1mm .
- $V_v = 0,092V (D_{50}/Y)^{(2/3)}$
- $V_v = 0,092 \times 3,50 (0,65/2,40)^{(2/3)} = 0,13 \text{ m/s}$
 $< 0,60\text{m/s}$ OK
- Sendo a particular de solo 1 mm , então vendo a Tabela (271.1) achamos que a velocidade máxima deve ser $0,60\text{m/s}$.

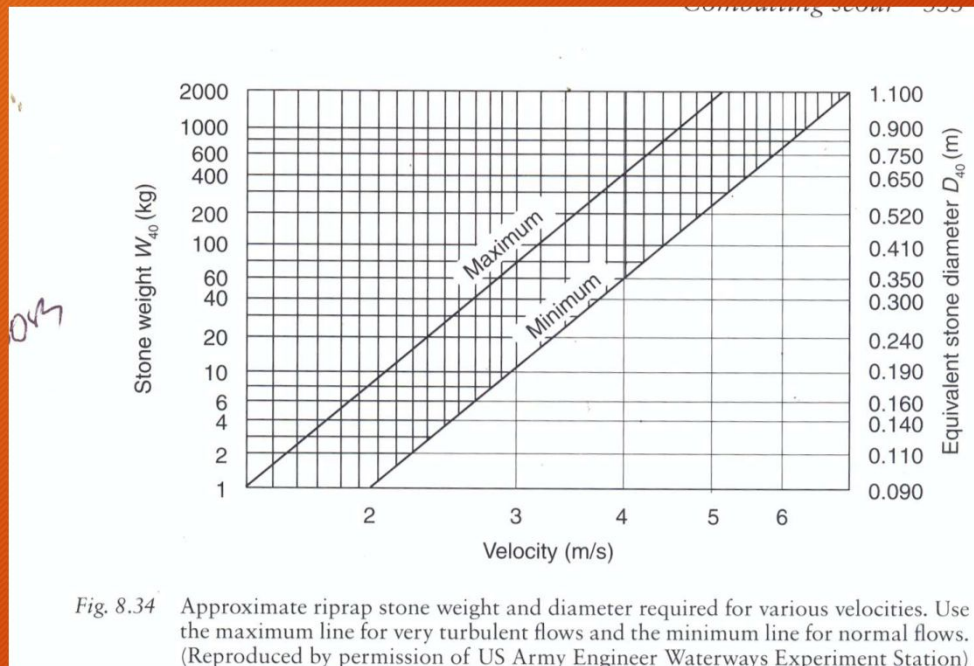
Tabela 271.1-Velocidades máximas para evitar erosão, conforme diâmetro das partículas. Fonte: Hamill, 1999

Table 1.3 (a) Approximate erosion threshold velocities, V_E . If water velocities exceed V_E then erosion is predicted

<i>Bank material</i>	<i>Approximate diameter, D (mm)</i>	<i>V_E (m/s)</i>
Clay	< 0.002	> 1.2
Silt	0.002–0.06	0.2
Fine sand	0.06–0.2	0.3
Medium sand	0.2–0.6	0.5
Coarse sand	0.6–2	0.6
Sandy loam		0.6
Loam		0.9
Gravel	2–60	1.0
Pebbles/stones	>60	3.0

After Netlon Ltd

Figura 271.1-Diâmetros D50 uado em pilares de pontes, em função da velocidade. Para regime turbulento, tomar a linha superior e para regime fluvial pegar a linha inferior. Fonte: Hamill, 1999



- W=Peso da pedra britada
- Peso especifico da pedra= 2650 kg/m³
- $W=0,524.D^3 \times 2650=1388 D^3$
-
- Exemplo 271.16-Achar o peso da pedra britada com D=0,45m
- $W=0,524.D^3 \times 2650=1388 D^3$
- $W=1388 \times 0,45^3 = 126 \text{ Kg}$
-

Softwares

- Existem dois softwares que são usados em dimensionamento de pontes e bueiros e que HEC-RAS do *USACE*: escoamento de superfícies livres com efeito de pontes.
- HY-8 do *FHWA* para bueiros
- Hamill, 1999 chama a atenção de que o engenheiro experiente mesmo usando um software deve fazer uma análise do problema devido a erros em equações.
-

Bibliografia e livros consultados

- - TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA. *Guide to bridge hydraulics*. 2ª ed. 181 páginas, ISBN 072773262-5, ano 2004.
- -AKAN, A. OSMAN. *Open Channel hydraulics*. Elsevier, 2006, ISBN 978-0-7506-6857-6, 364 páginas.
- -BRIGHETTI, GIORGIO e BRANDAO, JOÃO LUIZ BOCCIA. *Obras de regularização de leito- Obras fluviais*, EPUSP, maio de 2001.
- -DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES). *Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem*. Versão preliminar, 2005, 117 páginas.
- -FHWA. *Evaluating Scour at Bridge*. HEC 18, 2a ed, fevereiro, 1993, 260 páginas.
- -FHWA. *Hydraulics of bridge waterways*, março de 1978. HDS1
- -HAMILL, LES. *Bridge Hydraulics*. London, 1999, 367páginas.
- -HEC-RAS. US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Institute for water resources. *Bridge Hydraulic Analysis with HEC-RAS*. abril de 1996
- -MARTINS, CRISTINA E MENDES, JOÃO. *Metodologia para o estudo hidráulico e sedimentológico em pontes. Aplicação à Ribeira de Oeiras entre as localidades de Corte de Pão e Água e de*

Bibliografia e livros consultados

- *Morena*, concelho de Mértola. Portugal.
- -MARTINS, RODOLFO. *Hidráulica Fluvial*. Epusp 21 de julho de 2005
- -MATA-LIMA, H. *Escoamento com superfície livre- leito móvel*. Universidade da Madeira, 2010, Portugal.
- -MAYS, LARRY W. *Stormwater Collection Systems Design Handbook*. McGraw-Hil, NY, 2001.
- -QUINTELA, ANTONIO DE CARVALHO. *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1981
- -SOLIMAN, MOSTAFA M. *Engenharia hidrológica das regiões áridas e semi-áridas*. Editora LTC, 358 páginas, 2013, Rio de Janeiro.
- -SOUZA, ADEMILTON LUIZ RODRIGUES. *Estudo do movimento incipiente de sedimentos não-coesivos em escoamentos com superfície livre*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Prof. orientador> Geraldo Wilson Júnio, Rio de Janeiro, janeiro de 2010.
- -TENNESSEE. *Design procedures for hydraulic structures*, 2004
- -TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Hydraulic Design Manual*, texto revisado de março de 2009.
- -WISCONSIN, DEPARTMENT OF TRANSPORTATION OF THE STATE. *Hydraulics design of bridges*. 31 de julho de 1997.

Bibliografia e livros consultados

- Jaadeesh T. R. e Jayaram, M.A. *Desig of bridges structures*. 2ª edição, New Delhi, 2009. Amazon/Kindle

JAMES. C. S. *Hydraulic Structures*. 2020. África do Sul, Amazon/Kindle

-WISDOT. *Bridge Manual*. Janeiro de 2021. Chapter 8- Hydraulics.

-

Obrigado !!!

- Engenheiro Plinio Tomaz
- pliniotomaz.com
- pliniotomaz@gmail.com