

Obras Fluviais e Navegação

PHA - 3402

Erosão da margem devido ao escoamento e proteção de margens

Luís César de Souza Pinto (lcesar@usp.br)

www.phd.poli.usp.br

Conteúdo da Aula 3 – 16_10_2020

- Agente causador de erosão : **Escoamento – Velocidade – tensão;**
- Tipo de erosão de margem;
- Tipo de proteção direta – **enrocamento;**
- Método construtivo de proteção;
- Exercício 3 - Cálculo da proteção – **Enrocamento devido a ondas por embarcação.**

Ondas geradas por um comboio de chatas arrebetando nas margens



CANAL SEM CRUZAMENTO



figura 2 – Dimensões características do canal com cruzamento.

f = folga;
h = altura do NA;
m = inclinação do talude, $1(v) : m(h)$

Erosão por efeito de correntes



Erosão por efeito de correntes



Erosão – Ação do escoamento

MD - Erosão – ME –Deposição - Curva do Rio

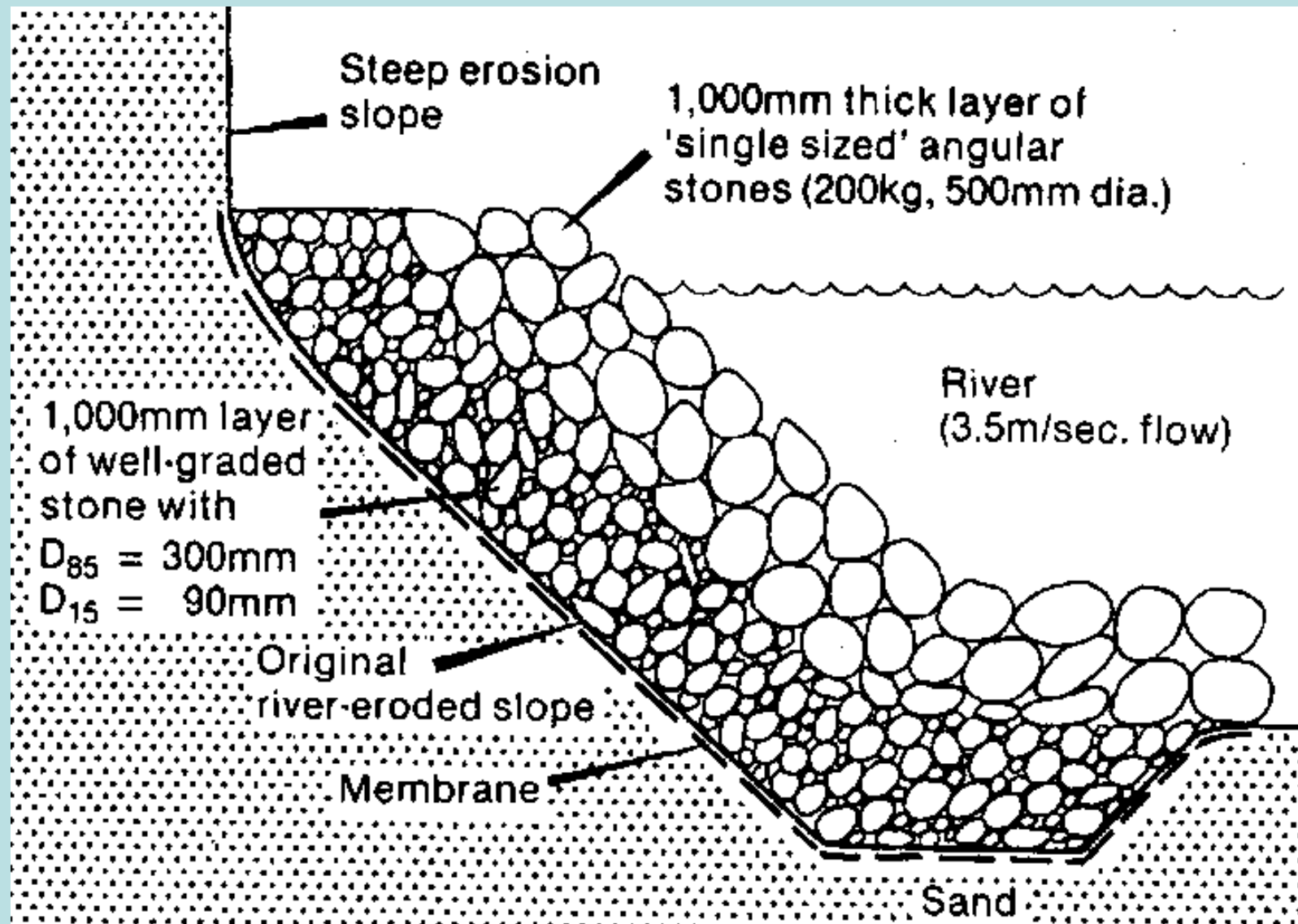


Erosão – Ação do escoamento

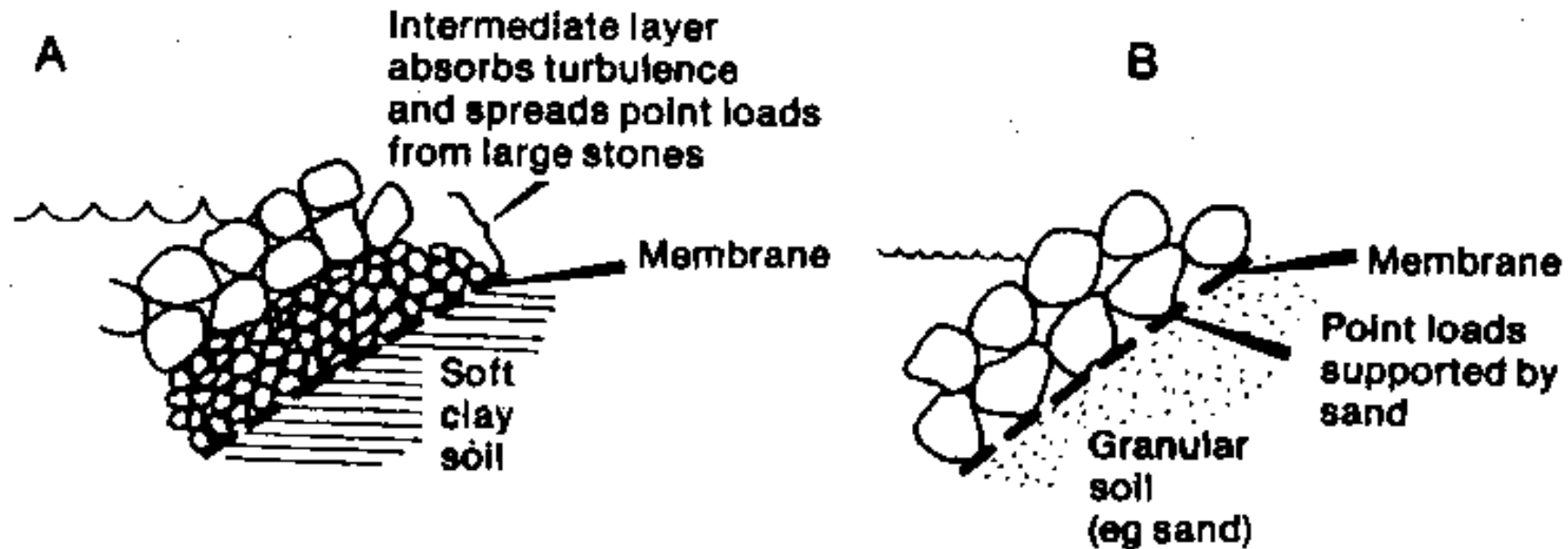
MD - Erosão – ME – Deposição - Curva do Rio



Proteção da Margem com Filtro



Uso de Filtros para Proteção



Proteção da Margem por enrocamento



Causas de Processos Erosivos em rios

- **Ação de correntes** – Tensões de cisalhamento – Resistência ao movimento do material de fundo e margem ;
- **Ação de ondas devido ao vento** – lagos e reservatórios;
- **Ação de ondas devido a embarcações;**
- **Instabilidade geotécnica de Taludes :**

Saturação do terreno : Diminuição do ângulo natural de equilíbrio

Rompimento generalizado da margem : com a descida ou subida rápida do nível d'água ou elevação do lençol freático

'*piping*' ou retroerosão : escoamento através de caminhos preferenciais, erosão progressiva retrógrada.

Objetivos Principais da Proteção de margens

- Evitar a erosão com perda de material e danos aos terrenos adjacentes;
- Melhorar o alinhamento do fluxo e manter a forma da seção transversal;
- Contribuir com a estabilidade geotécnica;
- contribuir com a manutenção, aspectos visuais e paisagísticos, limpeza e etc.

Exemplos Específicos de Proteção de Margens

- Portos, ancoradouros e acesso à eclusas;
- Pistas de tráfego junto às margens, pontes, encontros e acessos;
- Tomadas d'água e estruturas de descarga;
- Propriedades às margens do curso d'água;

Erosão – Ação do escoamento

MD - Erosão – ME –Deposição - Curva do Rio



Erosão – Ação do escoamento

MD - Erosão – ME – Deposição - Curva do Rio



Velocidades Máximas Admissíveis Segundo a Bibliografia Russa (Lencastre, 1972) - Materiais não Coesivos

Material	Diâmetro mm	Velocidade média m s^{-1}	Material	Diâmetro mm	Velocidade média m s^{-1}
Lodo	0,005	0,15	Cascalho fino	15,0	1,20
Areia fina	0,05	0,20	Cascalho médio	25,0	1,40
Areia média	0,25	0,30	Cascalho grosso	40,0	1,80
Areia grossa	1,00	0,55		75,0	2,40
Lodo fino	2,50	0,65	" "	100,0	2,70
Lodo médio	5,00	0,80	" "	150,0	3,50
Lodo grosso	10,00	1,00	" "	200,0	3,90
	15,00	1,20	" "		

Erosão por efeito de correntes



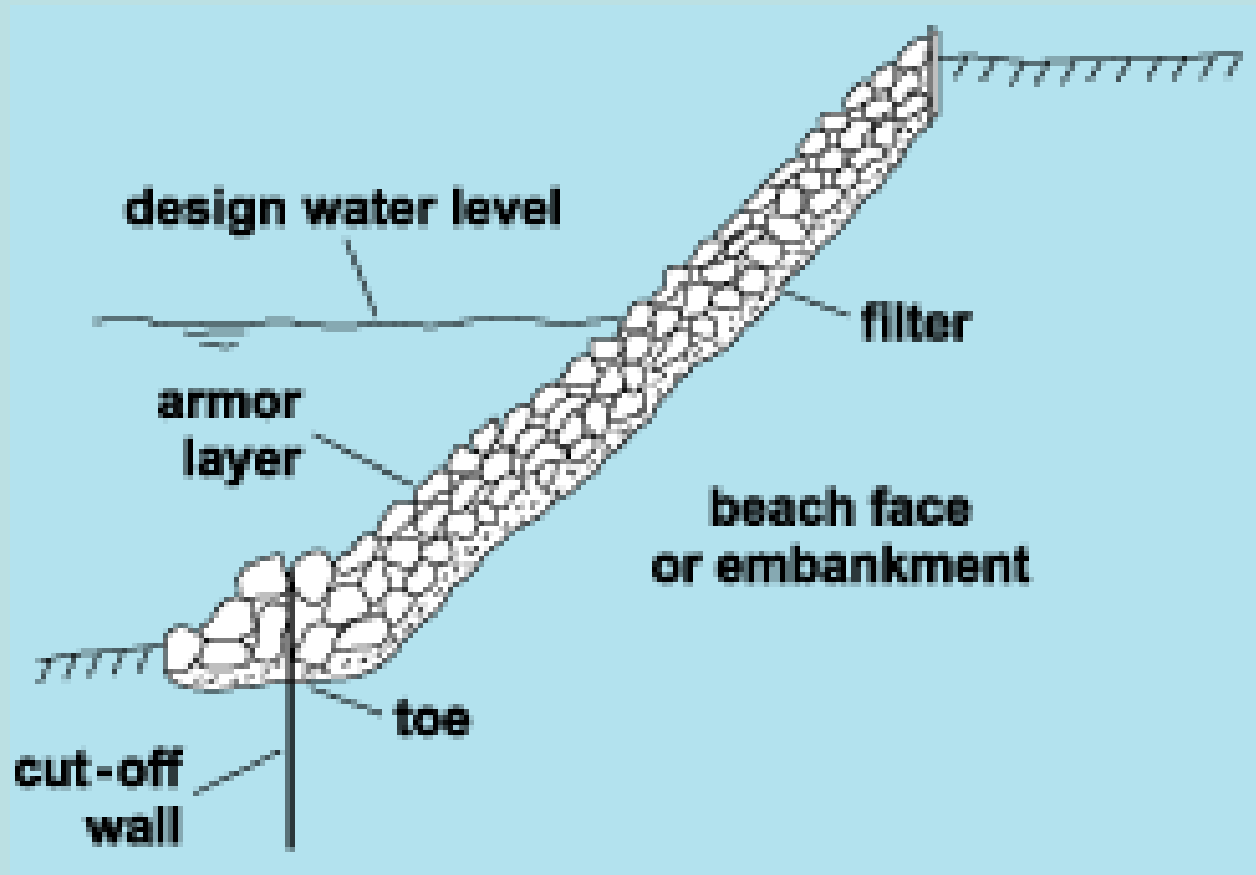
Erosão por efeito de correntes



Proteção da Margem por enrocamento



Proteção por Enrocamento – proteção do pé



Exercício2. Canal com Revestimento da margem, por Enrocamento, devido a ação do Escoamento.

- Para as margens do canal do enunciado **do Exercício 1**, **projete proteção com enrocamento lançado**, considerando a ação da Tensão de Arraste. Determine a granulometria desse material (d_{50}) e a espessura da camada de proteção. Faça um esquema do projeto na seção. Indique, também, os diagramas de tensão atuantes no fundo e nas margens.

Exercício2. Canal com Revestimento da margem, por Enrocamento, devido a ação do Escoamento.

- Dados :
- Ângulo de atrito interno do material, da margem, submerso :
 $\phi_{\text{marg.}} = 32^\circ$
- Massa específica da rocha : $\rho_s = 2.700 \text{ Kg} / \text{m}^3$
- Inclinação das margens : 1 (V) : 2 (H) : $\text{Cotg } \theta = 2$
- O leito e as margens tem o mesmo material descrito no Exercício 1.

Exercício2. Canal com Revestimento da margem, por Enrocamento, devido a ação do Escoamento.

- **Material do leito e da margem**
- Tensão crítica do material da margem : $\tau_{m,c} / \tau_{o,c} = \sqrt{ (1 - \text{sen}^2\theta / \text{sen}^2\phi_{\text{marg.}}) } ;$
- $\tau_{m,c}$ - Tensão crítica de início de movimento do material da margem, com θ = ângulo de inclinação do talude e $\phi_{\text{marg.}}$ o ângulo de atrito interno do material submerso da margem.
- Tensão crítica de início de movimento do material no fundo: $\tau_{o,c} = \tau^* g (\rho_s - \rho) d_{50} \text{ N/m}^2$

Exercício2. Canal com Revestimento da margem, por Enrocamento, devido a ação do Escoamento.

- **Tensões devido ao escoamento**

- Formulário e Dados : $\tau_o = \gamma R_H i$; $Q = K_s R_H^{2/3} i^{1/2} A$;
 $\tau_m = 0,75 \tau_o$;
- τ_o - Tensão tangencial junto ao fundo, devido a ação do escoamento.
- τ_m - Tensão tangencial junto a margem, devido a ação do escoamento.
- Q_p Capacidade de vazão de projeto na seção transversal do canal.

Exercício2. Canal com Revestimento da margem, por Enrocamento, devido a ação do Escoamento.

- **Material de proteção**
- $\tau_{o,c,p} = \tau^* g (\rho_s - \rho) d_{m,p}$ - Tensão crítica de início de movimento do material de proteção
- Tensão crítica do material de proteção da margem :
 $\tau_{m,c,p} / \tau_{o,c,p} = \sqrt{ (1 - \text{sen}^2\theta / \text{sen}^2\phi_{\text{prot.}}) }$; com θ dado e $\phi_{\text{prot.}}$ em função de seu diâmetro e forma, conforme gráfico.
- $\tau_{m,c,p}$ - Tensão crítica de início de movimento do material de proteção na margem.

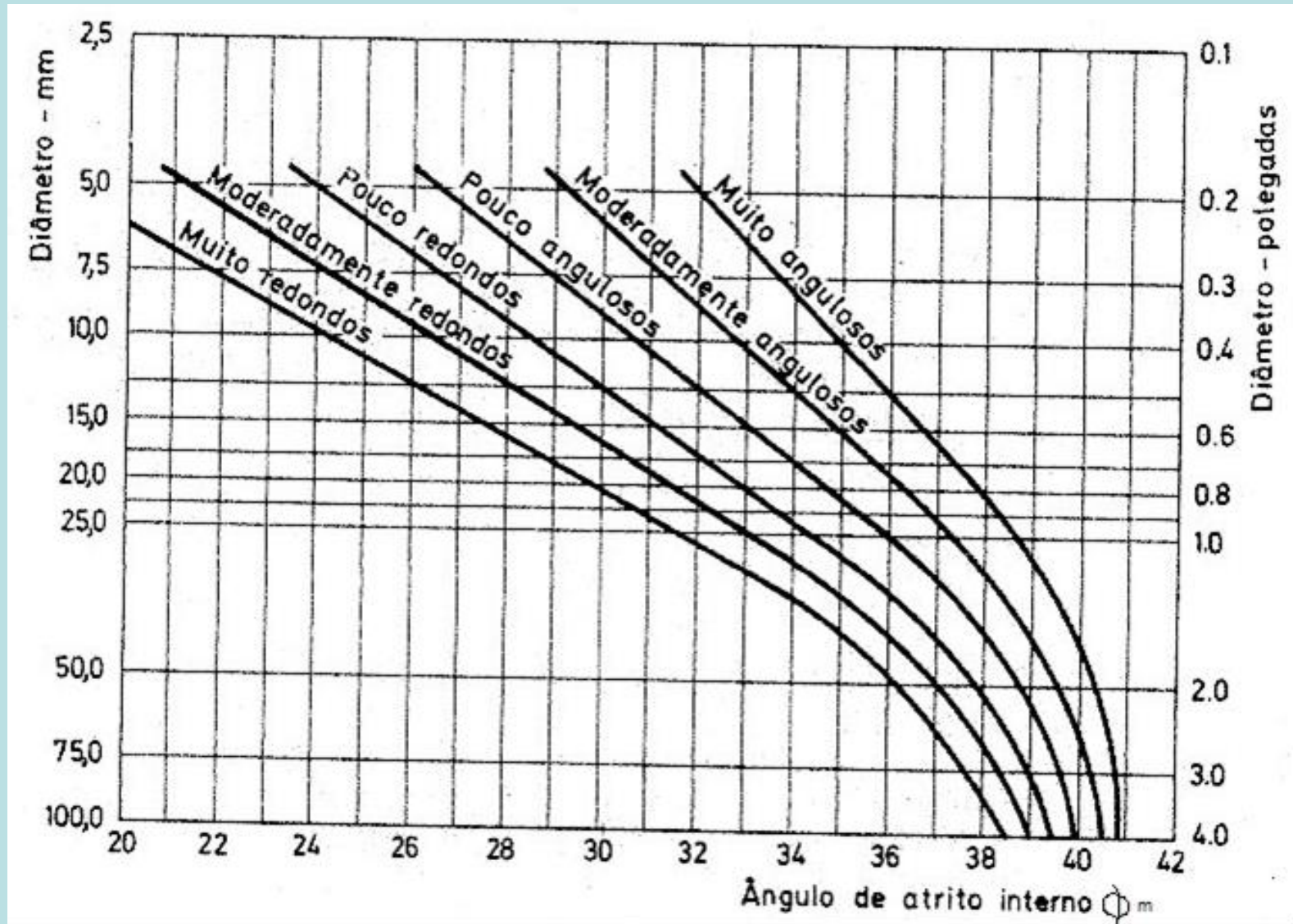
Exercício2. Canal com Revestimento da margem, por Enrocamento, devido a ação do Escoamento.

- **Dados Gerais**
 - Admitir Coeficiente de Segurança, **CS = 1,20** , tanto para o fundo quanto para a margem.
 - Considere que o material do leito , da margem e de proteção tenham o **formato muito anguloso**.
 - Considere no máximo **duas tentativas de aproximação** para a solução de proteção da margem, com $d_{m,p}$ e ϕ_{prot}

Formulário da Hidráulica

- $V = 8 \sqrt{g} / K_s^{1/6} R_H^{2/3} i^{1/2}$; $Q = V.A$; $n = K_s^{1/6} / 25,06$;
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- $\gamma = \rho \cdot g$ - peso específico da água ; $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$ e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.
- $\gamma_s = \rho_s \cdot g$ - peso específico do material de leito, margem ou proteção ;
 $\rho_s = 2700 \text{ Kg/m}^3$

Ângulo de atrito interno ou de repouso do material (ϕ_m)



Tensões de cisalhamento junto ao fundo e margem

1—Canal de largura indefinida

Num canal de largura indefinida a força de arrastamento no fundo é $\tau = \gamma h i$

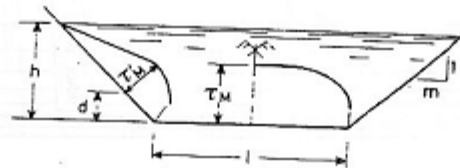
2—Canal trapezoidal

Num canal trapezoidal a distribuição da força de arrastamento tem o aspecto indicado na figura.

A força máxima no fundo é:
 $\tau_M = K_M \gamma h i$

A força máxima nos lados é:
 $\tau'_M = K'_M \gamma h i$

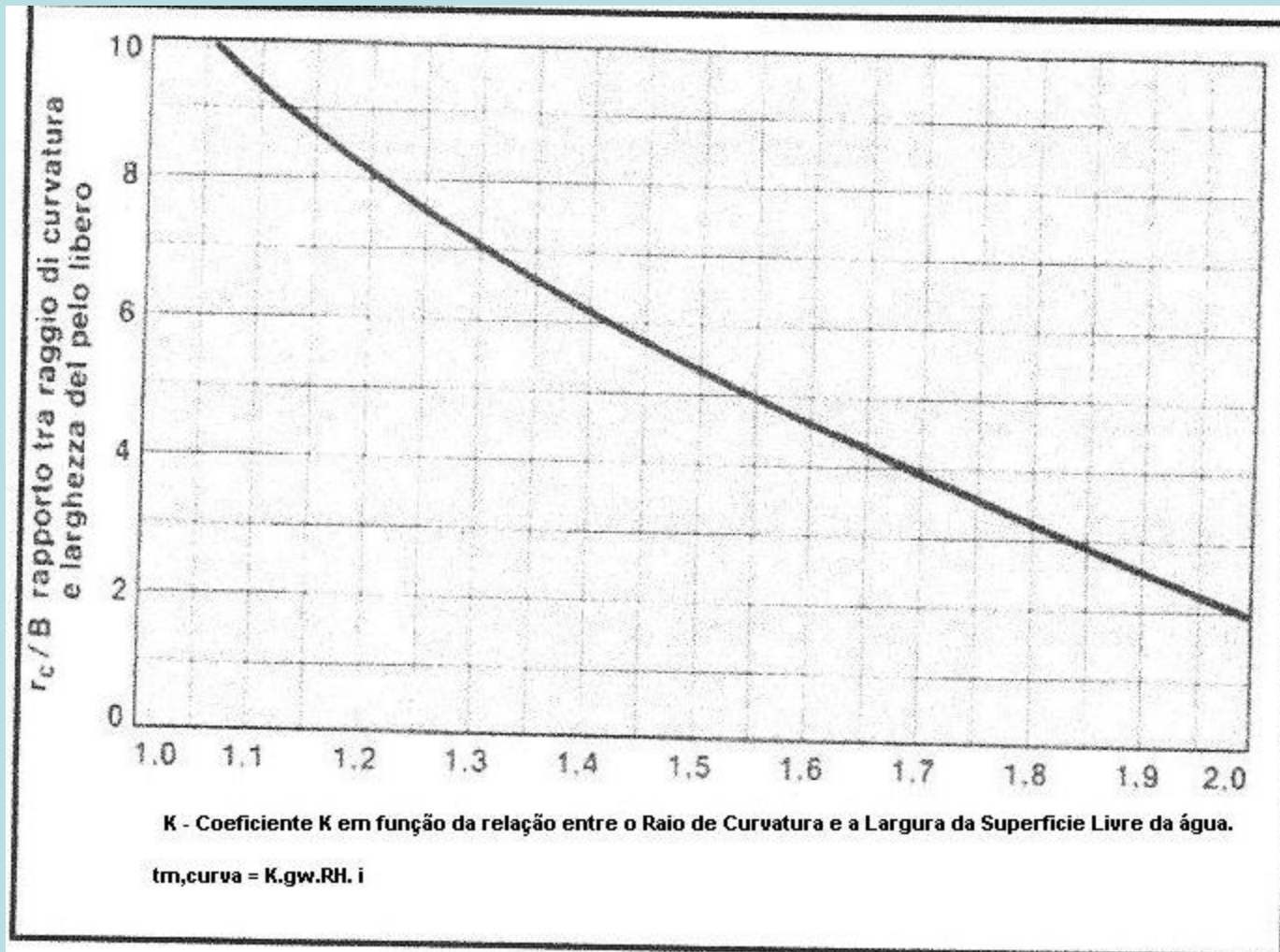
No fundo, τ_M ocorre a meio; nos lados, τ'_M verifica-se a uma distância do fundo $d = K_d h$.



τ_M — Máxima no fundo
 τ'_M — Máxima nos lados

m	2			1.5			0 (rectangular)		
$\frac{l}{h}$	K_M	K'_M	K_d	K_M	K'_M	K_d	K_M	K'_M	K_d
0*	0	0,650	0,3	0	0,565	0,3	0	0	—
1	0,780	0,730	—	0,780	0,695	—	0,372	0,468	1,0
2	0,890	0,760	0,2	0,890	0,735	0,2	0,686	0,686	1,0
3	0,940	0,760	—	0,940	0,743	—	0,870	0,740	1,0
4	0,970	0,770	0,2	0,970	0,750	0,2	0,936	0,744	1,0
6	0,980	0,770	—	0,980	0,755	—	—	—	—
8	0,99	0,770	0,2	0,990	0,760	0,2	—	—	—

Coeficiente de correção da tensão de cisalhamento na curva



123 — Tensões críticas de arrastamento para águas limpas, segundo Lane⁽¹⁾

Os valores aqui indicados referem-se a canais *rectilíneos*. Para canais com *poucas curvas* (terreno ligeiramente acidentado) tome-se 0,90 dos valores indicados; para uma *quantidade média de curvas* (terreno medianamente acidentado) tome-se 0,75; para canais com *muitas curvas* (terreno muito acidentado) tome-se 0,60.

1 — Materiais não coerentes grosseiros

No fundo toma-se como valor do projecto $\tau_{0(crit.)}$ (N/m^2) $= 8 \times d_{75}$ (cm) — d_{75} é o diâmetro ao qual, na curva de composição granulométrica, correspondem 75%, em peso, de materiais de diâmetro inferior.

Nos lados toma-se $\tau'_{0(crit.)} = K \tau_{0(crit.)}$ (K é função do ângulo de repouso, ϕ , do material, e do ângulo dos lados com a horizontal ϕ' — ver ábaco 124).

2 — Materiais não coerentes finos: $\tau_{0(crit.)}$ em N/m^2

Diâmetro mediano d_{50} em mm	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0
Água clara	1,2	1,3	1,5	2,0	2,9	6,0
Água com sedimentos finos em pequena quantidade	2,4	2,5	2,7	2,9	3,9	8,1
Água com sedimentos finos em grande quantidade	3,8	3,8	4,1	4,4	5,4	9,0

3 — Materiais coerentes: $\tau_{0(crit.)}$ em N/m^2

Natureza do leito	Muito pouco compactado com uma relação de vazios de 2,0 a 1,2	Pouco compactado com uma relação de vazios de 1,2 a 0,6	Compactado com uma relação de vazios de 0,6 a 0,3	Muito compactado com uma relação de vazios de 0,3 a 0,2
Material coerente do leito				
Argilas arenosas (percentagem de areia inferior a 50%)	2,0	7,7	16,0	30,8
Solos com grandes quantidades de argilas	1,5	6,9	14,9	27,5
Argilas	1,2	6,1	13,7	25,9
Argilas muito finas	1,0	4,7	10,4	17,3

Tensões Críticas para
água limpa e canal
retilíneo.

a) Inclinação dos Taludes

b) Ângulo de Atrito Interno ou de Repouso, ϕ

c) Valores de $K = \frac{\cos \phi \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \phi}}}{\tan \phi}$

onde : θ - ângulo dos lados com a horizontal;

ϕ - ângulo de atrito interno ou de repouso.

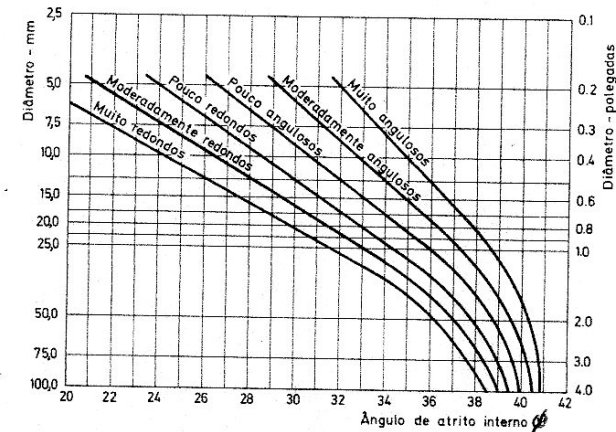
124 — Estabilidade dos lados

a) Inclinação dos taludes

(Horizontal para a vertical) (1) — m

Natureza dos taludes	Inclinação	Natureza dos taludes	Inclinação
Rocha dura, alvenaria ordinária, betão	0 a $\frac{1}{4}$	Aluviões compactos ...	$\frac{1}{1}$
Rocha fissurada, alvenaria de pedra seca ..	$\frac{1}{2}$	Cascalho grosso	$\frac{3}{2}$
Argila dura	$\frac{3}{4}$	Terra ordinária, areia grossa	$\frac{2}{1}$
		Terra mexida, areia normal	$\frac{2,5}{1}$ a $\frac{3}{1}$

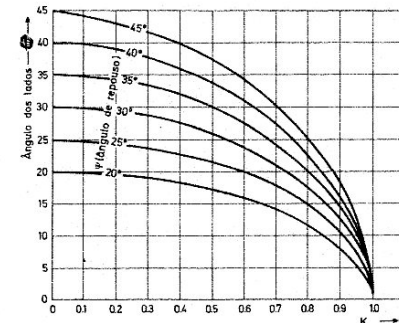
b) Ângulo de atrito interno ou de repouso, ψ



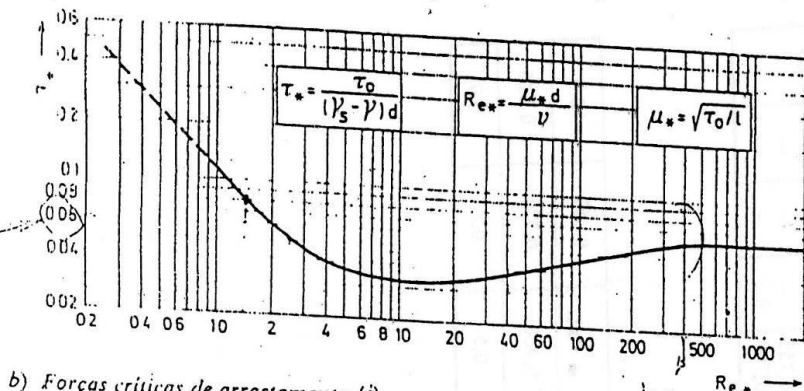
124 (cont.)

c) Valores de $K = \frac{\cos \phi \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \phi}}}{\tan \phi}$

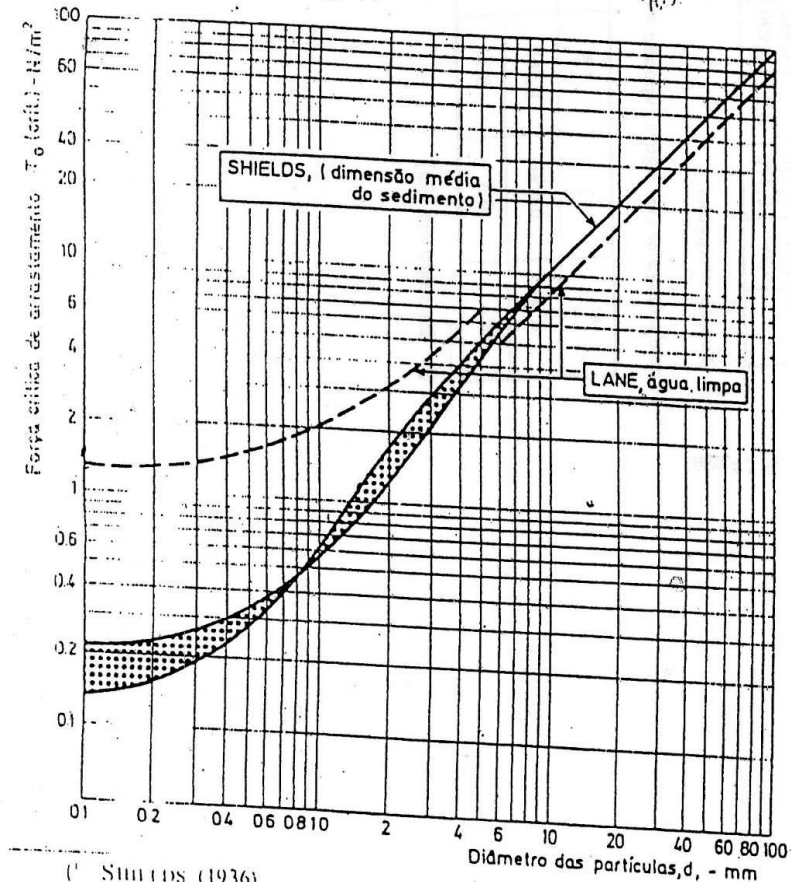
ϕ - ângulo de repouso
 θ - ângulo dos lados com a horizontal
 m - inclinação dos lados



$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad R_{e*} = \frac{u_* d}{\nu} \quad u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$$



b) Forças críticas de arrastamento⁽²⁾



(1) SHIELDS (1936)

123 — Tensões críticas de arrastamento para águas limpas, segundo Lane⁽¹⁾

Os valores aqui indicados referem-se a canais *rectilíneos*. Para canais com *poucas curvas* (terreno ligeiramente acidentado) tome-se 0,90 dos valores indicados; para uma *quantidade média de curvas* (terreno medianamente acidentado) tome-se 0,75; para canais com *muitas curvas* (terreno muito acidentado) tome-se 0,60.

1 — Materiais não coerentes grosseiros

No fundo toma-se como valor do projecto $\tau_{0(crit.)}$ (N/m^2) $= 8 \cdot d_{15}$ (cm) — d_{15} é o diâmetro ao qual, na curva de composição granulométrica, correspondem 75%, em peso, de materiais de diâmetro inferior.

Nos lados toma-se $\tau'_{0(crit.)} = K \tau_{0(crit.)}$ (K é função do ângulo de repouso, ψ , do material, e do ângulo dos lados com a horizontal ϕ' — ver ábaco 124).

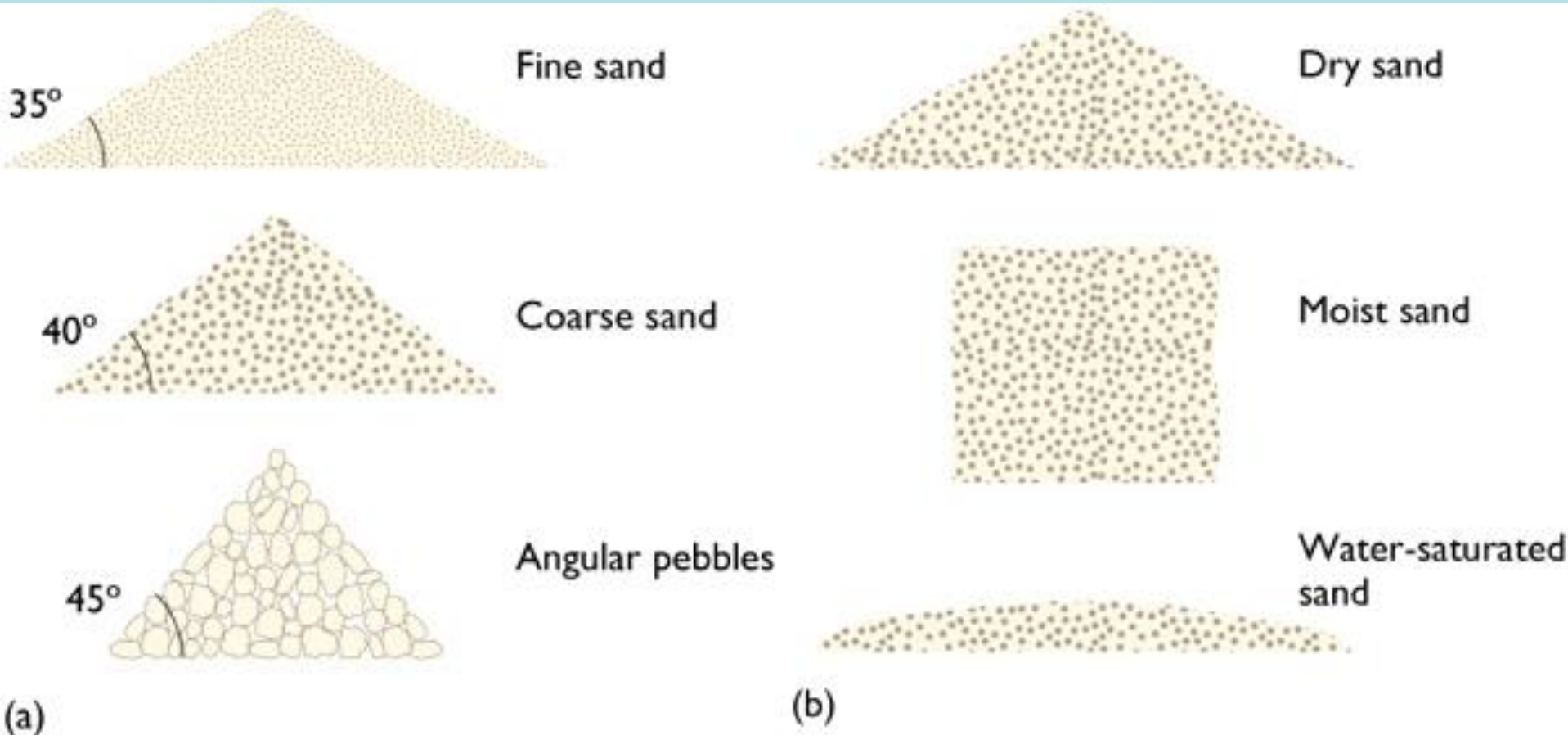
2 — Materiais não coerentes finos: $\tau_{0(crit.)}$ em N/m^2

Diâmetro mediano d_{50} em mm	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0
Água clara	1,2	1,3	1,5	2,0	2,9	6,0
Água com sedimentos finos em pequena quantidade	2,4	2,5	2,7	2,9	3,9	8,1
Água com sedimentos finos em grande quantidade	3,8	3,8	4,1	4,4	5,4	9,0

3 — Materiais coerentes: $\tau_{0(crit.)}$ em N/m^2

Natureza do leito	Muito pouco compactado com uma relação de vazios de 2,0 a 1,2	Pouco compactado com uma relação de vazios de 1,2 a 0,6	Compactado com uma relação de vazios de 0,6 a 0,3	Muito compactado com uma relação de vazios de 0,3 a 0,2
Material coerente do leito				
Argilas arenosas (percentagem de areia inferior a 50%)	2,0	7,7	16,0	30,8
Solos com grandes quantidades de argilas	1,5	6,9	14,9	27,5
Argilas	1,2	6,1	13,7	25,9
Argilas muito finas	1,0	4,7	10,4	17,3

Ângulos de estabilidade de material não coesivo



Exemplo



Diagrama de Shields

- Ensaio de laboratório;
- Controle das condições de vazão, declividade, profundidade e material do leito;
- O material com distribuição granulométrica uniforme;
- Diâmetro médio representativo de toda a amostra.

Diagrama de Shields modificado. Fonte: CHANG (1988).

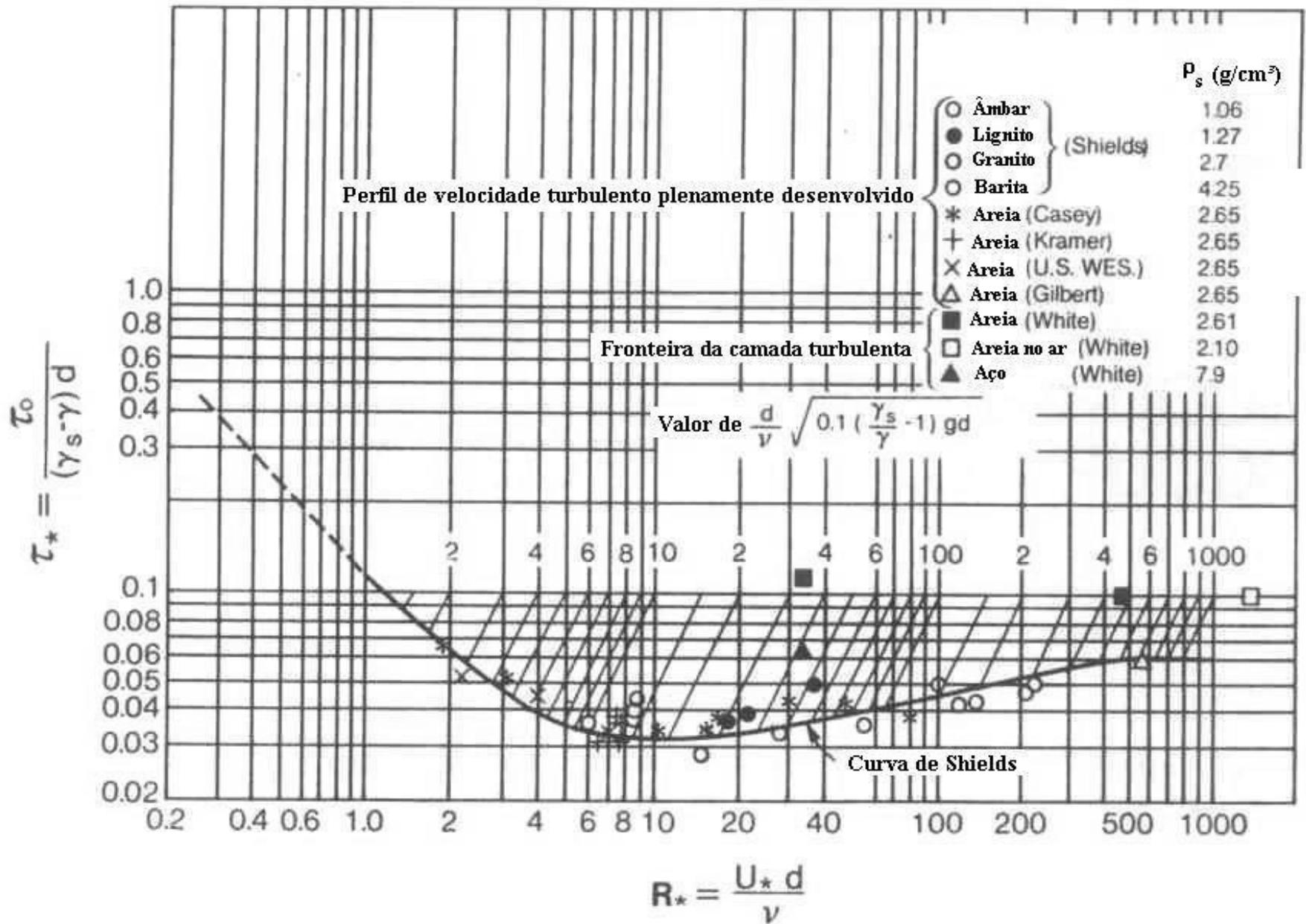


Diagrama de Shields

- Cada ponto representado corresponde à condição crítica de início de movimento do material do leito;
- **Escoamento turbulento plenamente desenvolvido;**
- Sedimentos com faixa de variação granulométrica entre 0,4mm a 3,4mm.

As regiões do diagrama de Shields são:

- $Re^* < 5$: o escoamento é hidraulicamente liso, ou seja, a subcamada laminar (δ) é muito maior do que o diâmetro da partícula (d) e, portanto, a grandeza d deixa de ser característica do fenômeno . A única forma disto acontecer é se:
- $\tau_{*c} = f(R_{e*c}) \quad \tau_{*c} = \text{Const.} / R_{e*c}$

As regiões do diagrama de Shields são:

- $Re^*_c > 500$: o escoamento é hidraulicamente rugoso, ou seja, a subcamada laminar é muito menor do que o diâmetro da partícula e, portanto, a viscosidade (μ) deixa de ser uma grandeza característica, assim como Re^* . A única forma disto ocorrer é quando:

$$\square \tau_{*c} = f'(Re^*_c) \tau_{*c} = const'$$

Análise Dimensional

3. Significado dos Adimensionais Independentes

Parâmetro de Shields τ_*

$$\pi_2 = \frac{\rho \cdot (V^*)^2}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d} = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d}$$

É um número de Mobilidade do Sedimento

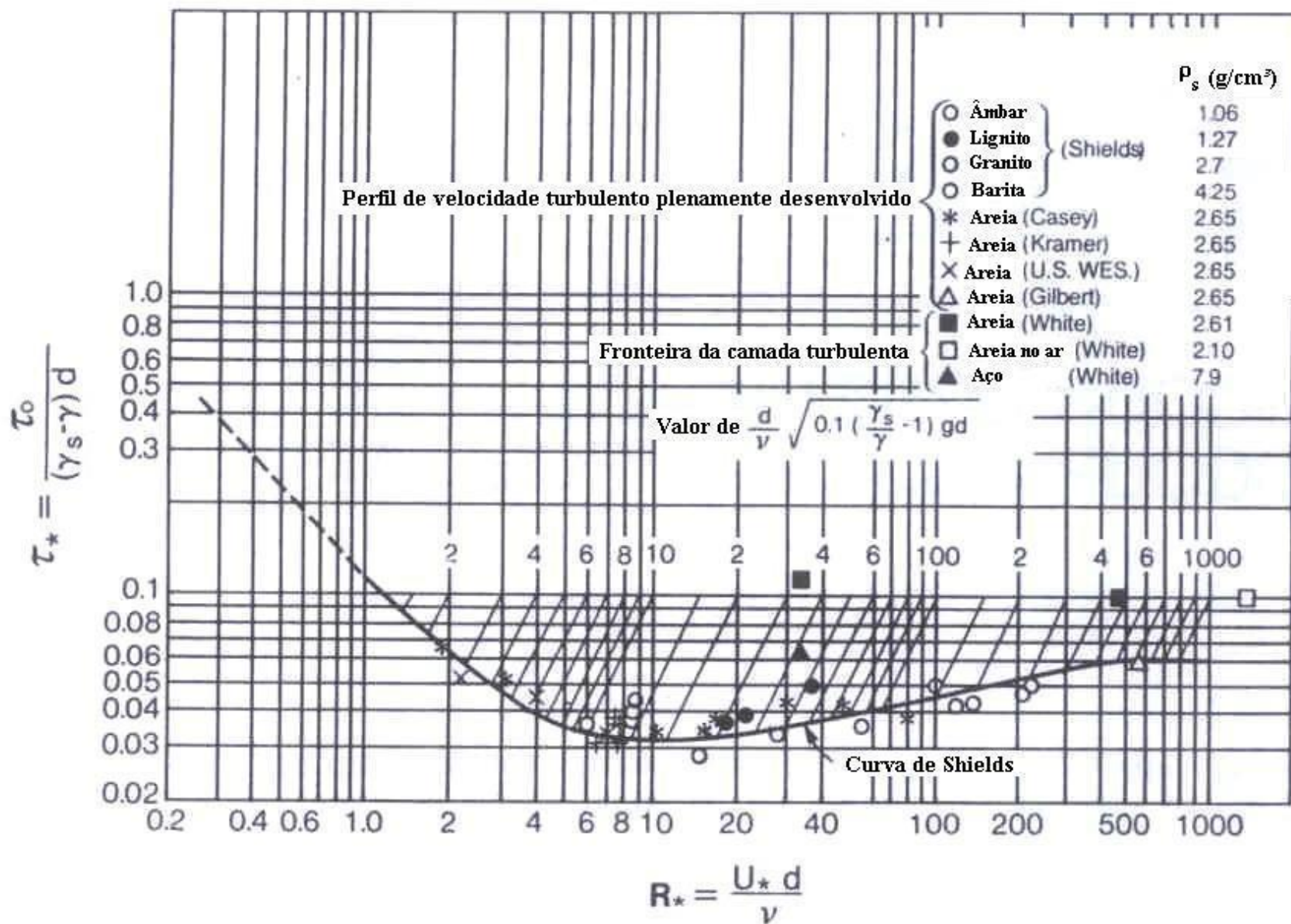
Assemelha-se ao número de Froude no escoamento líquido

Representa a relação entre a

Força Dinâmica do Escoamento sobre o Grão e o seu Peso

$$\tau^* = \frac{F}{G} \quad \text{onde} \quad F = \rho \cdot d^2 \cdot W_r^2 \cdot \phi \cdot \left(\frac{W_r \cdot d}{\nu} \right) ; \quad G = (\gamma_s - \gamma) \cdot K \cdot d^3$$

Diagrama de Shields



Bibliografia

Dissertação Prof. Bernardino :

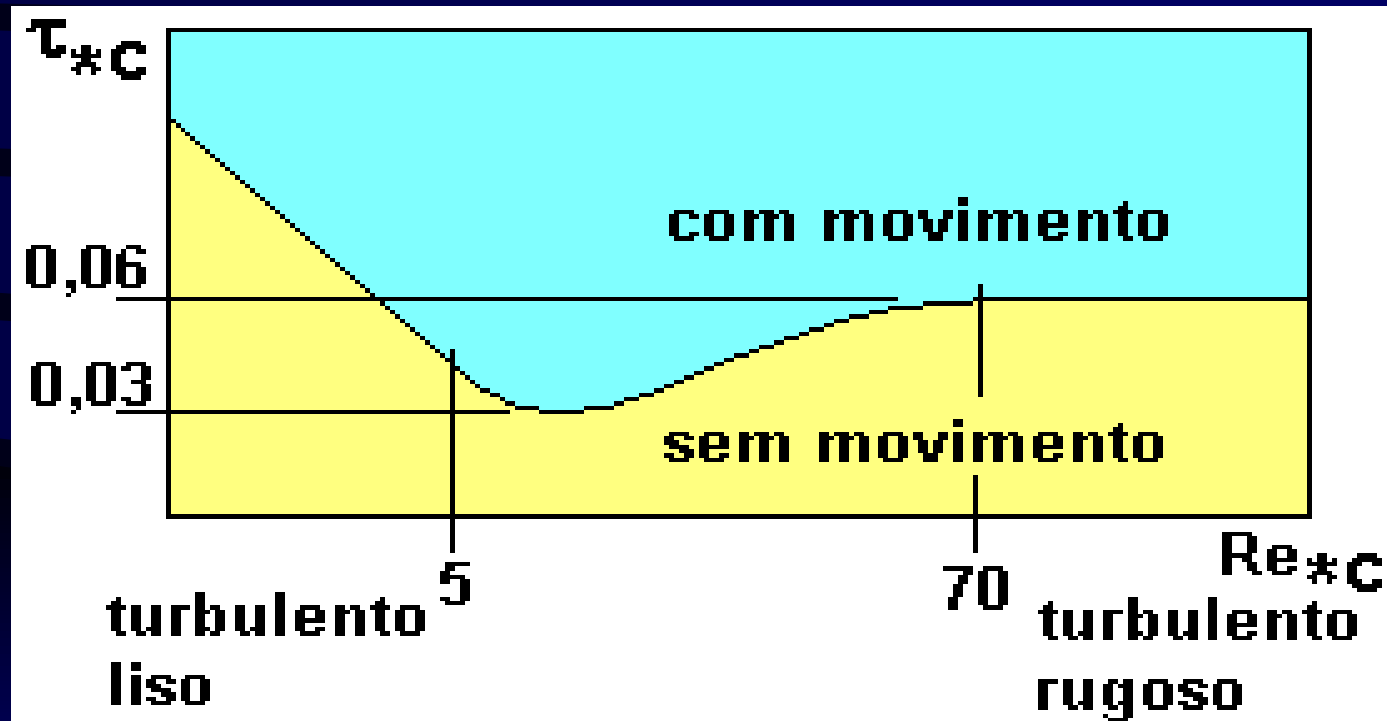
Estabilidade de Cursos D'água Escoando sobre
Leitos Aluvionares Não Coesivos

Capítulo 7 : Métodos para definição da declividade e
das características geométricas da seção transversal
de canais estáveis.

Item 7.5 – Metodologia simplificada para projeto de
canais – Equilíbrio Estático

Início de Transporte

Curva de Shields



Início de Transporte

Curva de Shields

$$Re_{*c} > 70$$

Regime turbulento rugoso a viscosidade não é importante.

$$\tau_{*c} = \text{const.} \cong 0,05 - 0,06$$

$5 < Re_{*cr} < 70$ Região de transição (ex: função B (Re_*))