

# **Portos, Navegação, Obras Marítimas e Fluviais – PHA 3402**

## **Canal Hidroviário e Proteção de Margens com Enrocamento devido a ação de ondas por embarcação**

**Luís César de Souza Pinto ([lcesar@usp.br](mailto:lcesar@usp.br))**

**[www.pha.poli.usp.br](http://www.pha.poli.usp.br)**

# Conteúdo da Aula

- Agentes causadores de erosão : **Ondas devido a embarcação;**
- Tipos de proteção direta – **enrocamento e gabião;**
- Métodos construtivos de proteção por gabião;
- Exercício 3 de cálculo de proteção – **Enrocamento e gabião devido a incidência de ondas por embarcação;**
- Tipos de erosão de margem;
- Outros tipos de proteção

**a) Ondas geradas por um pato; b) Ondas geradas por tipos diferentes de embarcações.**

Fonte: GALLERY OF FLUID DYNAMICS (2002)



a



b

# Diferentes padrões de ondas de embarcação em águas rasas.

Fonte: COASTAL ENGINEERING (2002)



# Diferentes padrões de ondas de embarcação em águas rasas.

Fonte: COASTAL ENGINEERING (2002)

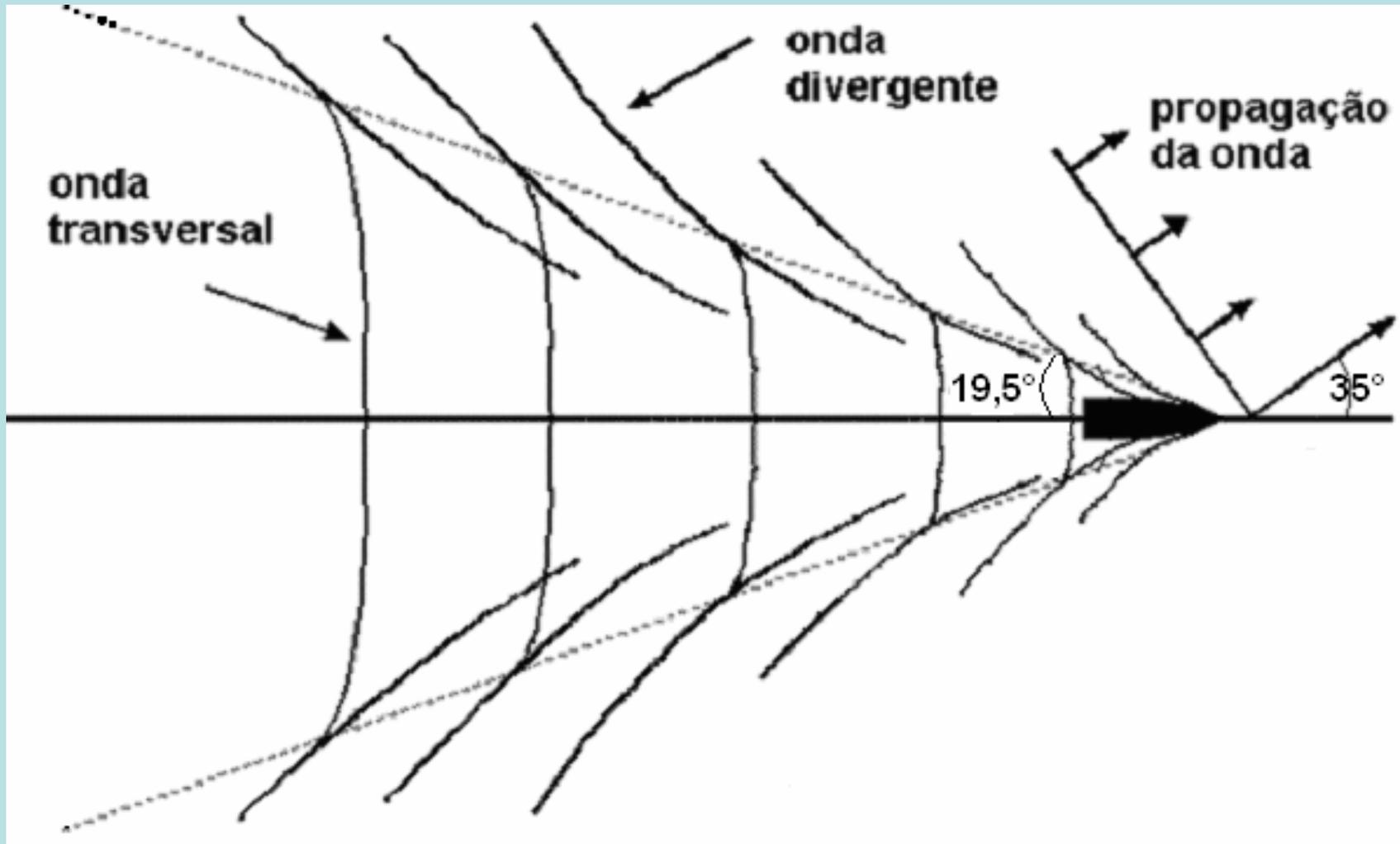


*A settled HSC wave system near critical speed*

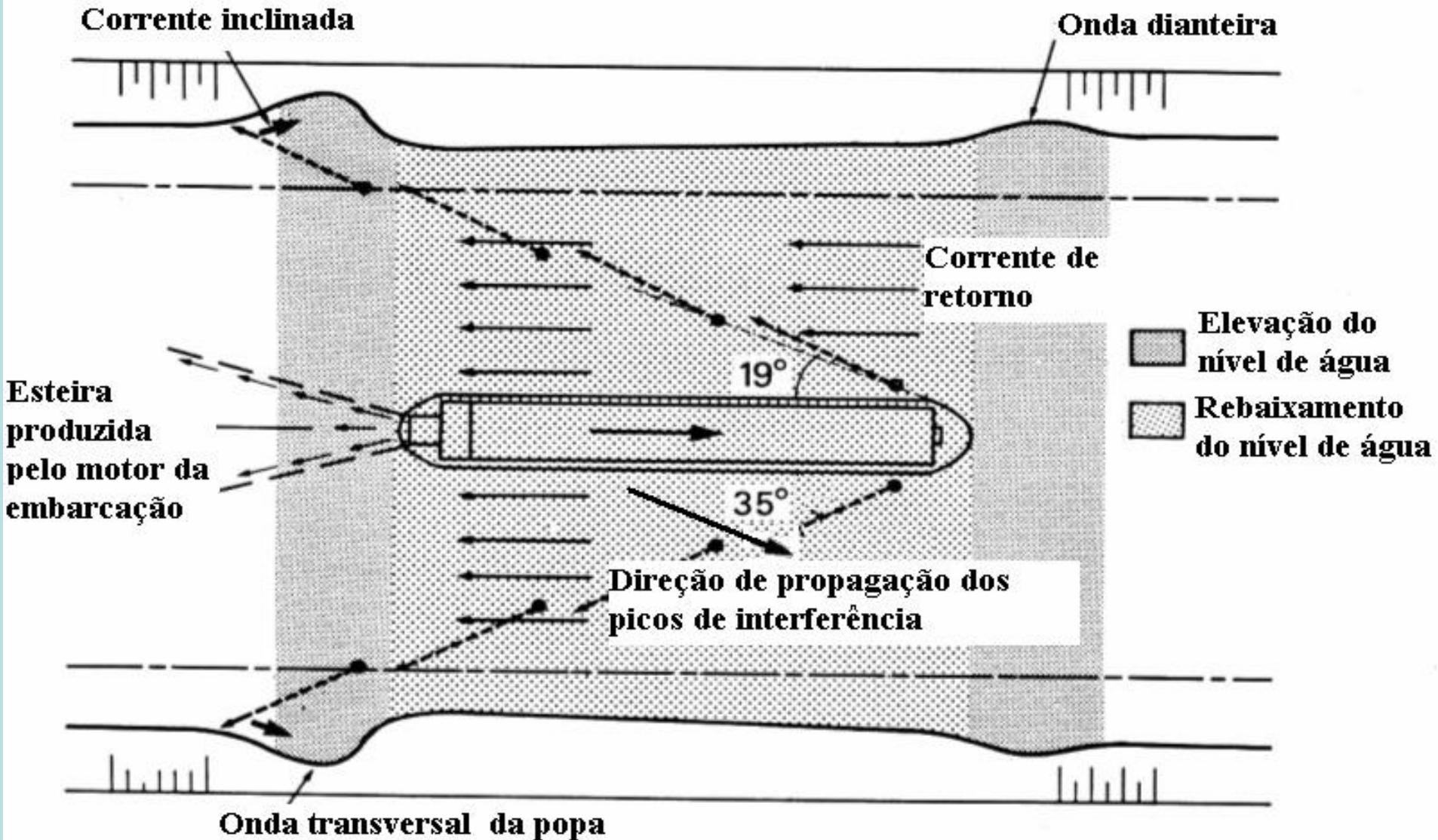
# Ondas geradas por um comboio de chatas arrebeitando nas margens



# Ondas de Embarcação em águas profundas



# Componentes da perturbação da água induzida por uma embarcação.



# Perfil da superfície da água durante o deslocamento da embarcação.

Fonte: Adaptado de PIANC (1987)



# Onda de embarcação tipo ressalto móvel



# Ação de ondas sobre os taludes



# Erosão nas margens do rio Paraguai na Hidrovia do Pantanal. Erosão devido o efeito de ondas



# Erosão nas margens do rio São Lourenço, Canadá. Erosão devido o efeito de ondas



# Erosão devido o efeito de ondas



# Erosão devido o efeito de ondas



# Erosão devido o efeito de ondas



## Fórmula de Hudson

### Determinação do Peso do bloco da Armadura de Proteção devido a ação de ondas

- Pré-dimensionamento da armadura

. FÓRMULA DE HUDSON

$$P \geq \frac{(2h)^3 \gamma_s}{K \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_o} - 1 \right)^3 \cot^2 \alpha}$$

- sendo:
- 2h: altura da onda de projeto
  - $\gamma_s$ : peso específico dos blocos
    - [2,3/3,2] t f/m<sup>3</sup> p/enrocamento
    - [2,0/2,9] t f/m<sup>3</sup> p/concreto
    - (2,4 mais comum)
  - $\gamma_o$ : peso específico da água
  - $\cot^2 \alpha$ : [1,3/3,0], com  $\alpha$  correspondendo ao ângulo do talude
  - K: coeficiente de estabilidade depende de:
    - . onda arrebatando no talude ou não: sem arreb. → maior K → menor P
    - . % admitida de dano: o critério "sem dano" considera o galgamento do maciço desprezável e de 0 a 5% dos blocos deslocados na tempestade de projeto. Maior % dano → maior K → menor P.
    - . forma de bloco: maior embricamento → maior K → menor P
    - . nº blocos por camada: maior nº de blocos → maior K → menor P
    - . colocação dos blocos (lançados ou arrumados): arrumados → maior K → menor P
    - . corpo ou cabeça do maciço: no extremo do maciço (cabeço) há maior concentração da energia das ondas → menor K → maior P

**TABELA 13.2**  
Valores sugeridos para K para uso na determinação do peso das unidades da armadura segundo U.S. ARMY (1984)

Critério de dano nulo e mínimo galgamento <sup>(1)</sup>								
Unidades de armadura	n <sup>(3)</sup>	Colocação	Corpo da estrutura		Cabeço da estrutura		Declividade do talude	
			K <sup>(2)</sup>		K			
			Onda arrebatando	Onda não arrebatando	Onda arrebatando	Onda não arrebatando		cot θ
Liso e arredondado	2	Aleatória	1,2	2,4	1,1	1,9	1,5 a 3	
Liso e arredondado	> 3	Aleatória	1,6	3,2	1,4	2,3	(5)	
Rugoso e angular	1	Aleatória <sup>(4)</sup>	(4)	2,9	(4)	2,3	(5)	
Rugoso e angular	2	Aleatória			1,9	3,2	1,5	
			2,0	4,0	1,6	2,8	2,0	
Rugoso e angular	> 3	Aleatória			1,3	2,3	3,0	
Rugoso e angular	> 3	Aleatória	2,2	4,5	2,1	4,2	(5)	
Rugoso e angular	2	Especial <sup>(6)</sup>	5,8	7,0	5,3	6,4	(5)	
Paralelepípedo <sup>(7)</sup>	2	Especial <sup>(11)</sup>	7,0-20,0	8,5-24,0	-	-		
Tetrápodo e Quadrípodo	2	Aleatória			5,0	6,0	1,5	
			7,0	8,0	4,5	5,5	2,0	
					3,5	4,0	3,0	
Tribar	2	Aleatória			8,3	9,0	1,5	
			3,0	10,0	7,8	8,5	2,0	
					6,0	6,5	3,0	
Dolos	2	Aleatória	15,8	31,8	8,0	16,0	2,0 <sup>(8)</sup>	
					7,0	14,0	3,0	

Obs.:

<sup>(1)</sup> Os valores de K em itálico não são fundamentados em resultados de ensaios e são fornecidos somente para fins de projeto preliminar.

<sup>(2)</sup> Aplicável para taludes de 1 para 1,5 a 1 para 5.

<sup>(3)</sup> É o número de unidades que compõem a espessura da camada de armadura.

<sup>(4)</sup> O uso de armadura de enrocamento com uma camada composta por uma única unidade não é recomendado para estruturas sujeitas à arrebatamento das ondas e somente em condições especiais é recomendável para estruturas sujeitas a ondas que não arrebatam. Quando utilizados, os blocos devem ser cuidadosamente dispostos.

<sup>(5)</sup> Até mais informação estar disponível, o uso de K deve estar limitado a taludes 1 para 1,5 a 1 para 3.

<sup>(6)</sup> Colocação especial com o eixo maior do bloco disposto perpendicularmente à face da estrutura.

<sup>(7)</sup> Blocos de forma paralelepípedica: blocos alongados com dimensão maior que cerca de 3 vezes a menor dimensão.

<sup>(8)</sup> A estabilidade dos dolos em taludes mais íngremes do que 1 para 2 deve ser verificada em ensaios em modelo para cada caso específico.

<sup>(9)</sup> Para o corpo do quebra-mar, com n = 2, colocação aleatória, onda não arrebatando e mínimo galgamento, pode-se estimar o dano ocasionado por altura de onda H superior à altura de onda de dano nulo (H<sub>0=0</sub>) como segue, em função de H/H<sub>0=0</sub>:

Para dano de 5% a 10%: 1,08 (enrocamento rugoso), 1,09 (tetrápodos) e 1,10 (dolos):

10% a 15%: 1,19

15% a 20%: 1,27

20% a 30%: 1,37

30% a 40%: 1,47

40% a 50%: 1,56

Para os blocos artificiais de concreto ocorre o risco de ruptura dos blocos e não convém considerar essas hipóteses.

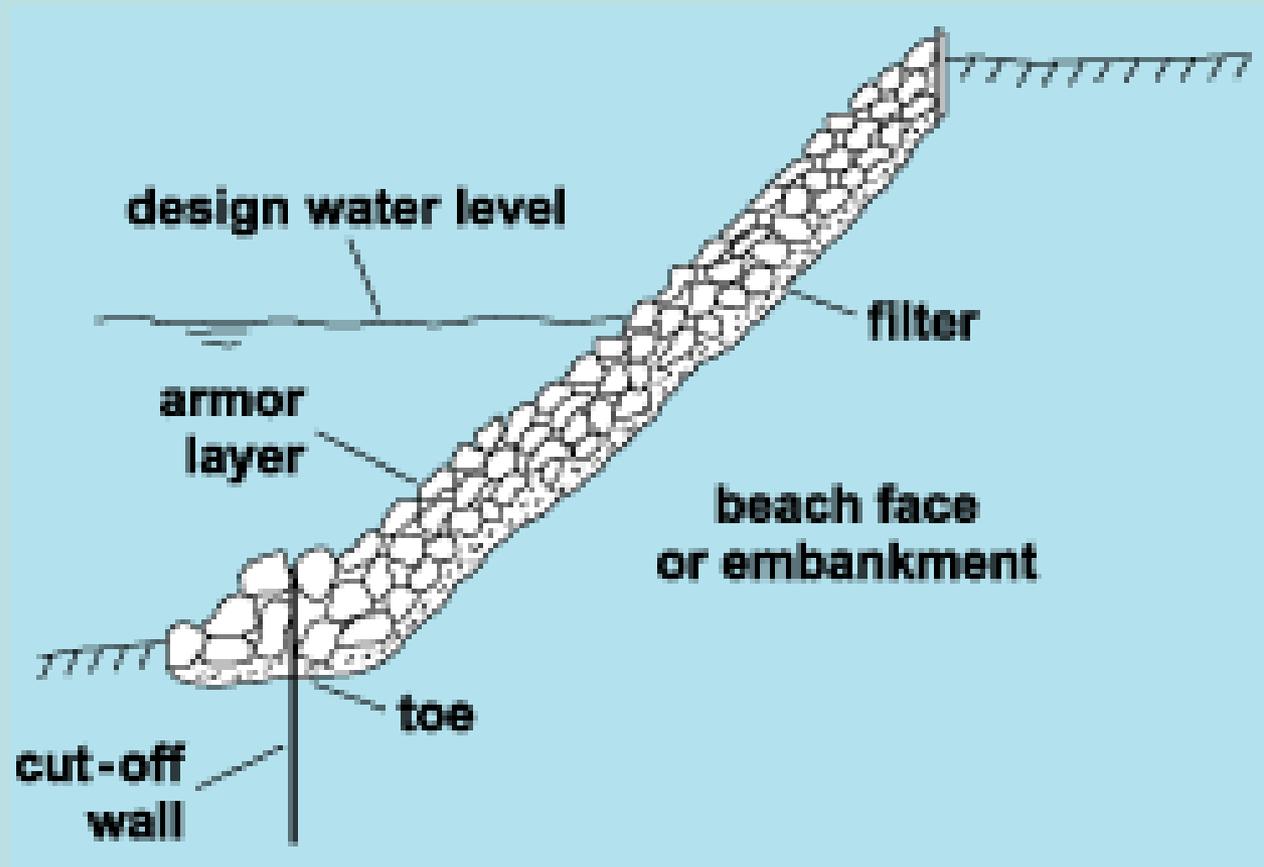
# VALORES DE K

## – Coeficiente de estabilidade do material de proteção

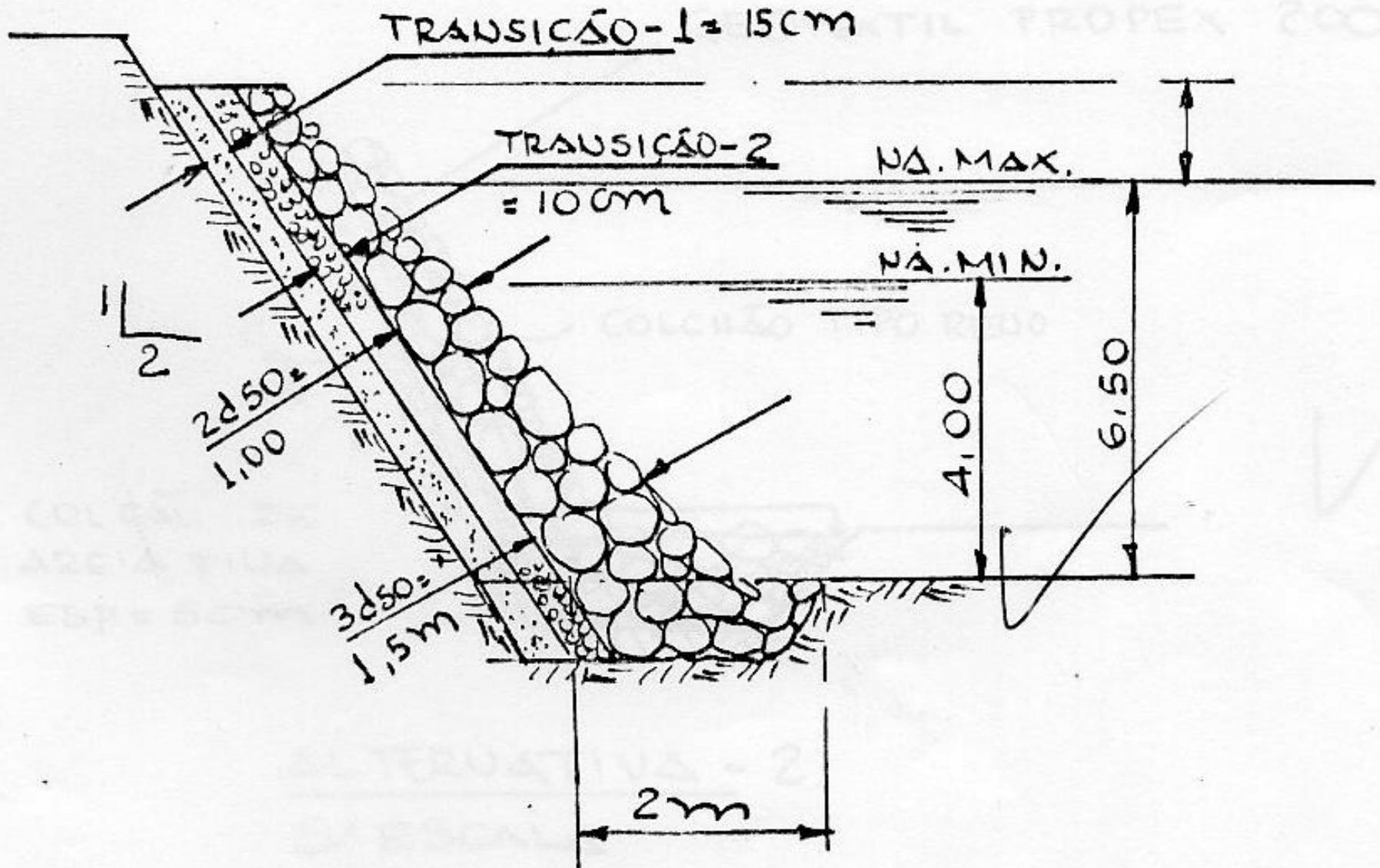
# Proteção da Margem por enrocamento



# Proteção por Enrocamento – proteção do pé



# Proteção do Talude com Enrocamento lançado e Transição com material granular – Filtro invertido



# Transição para Pedra Lançada

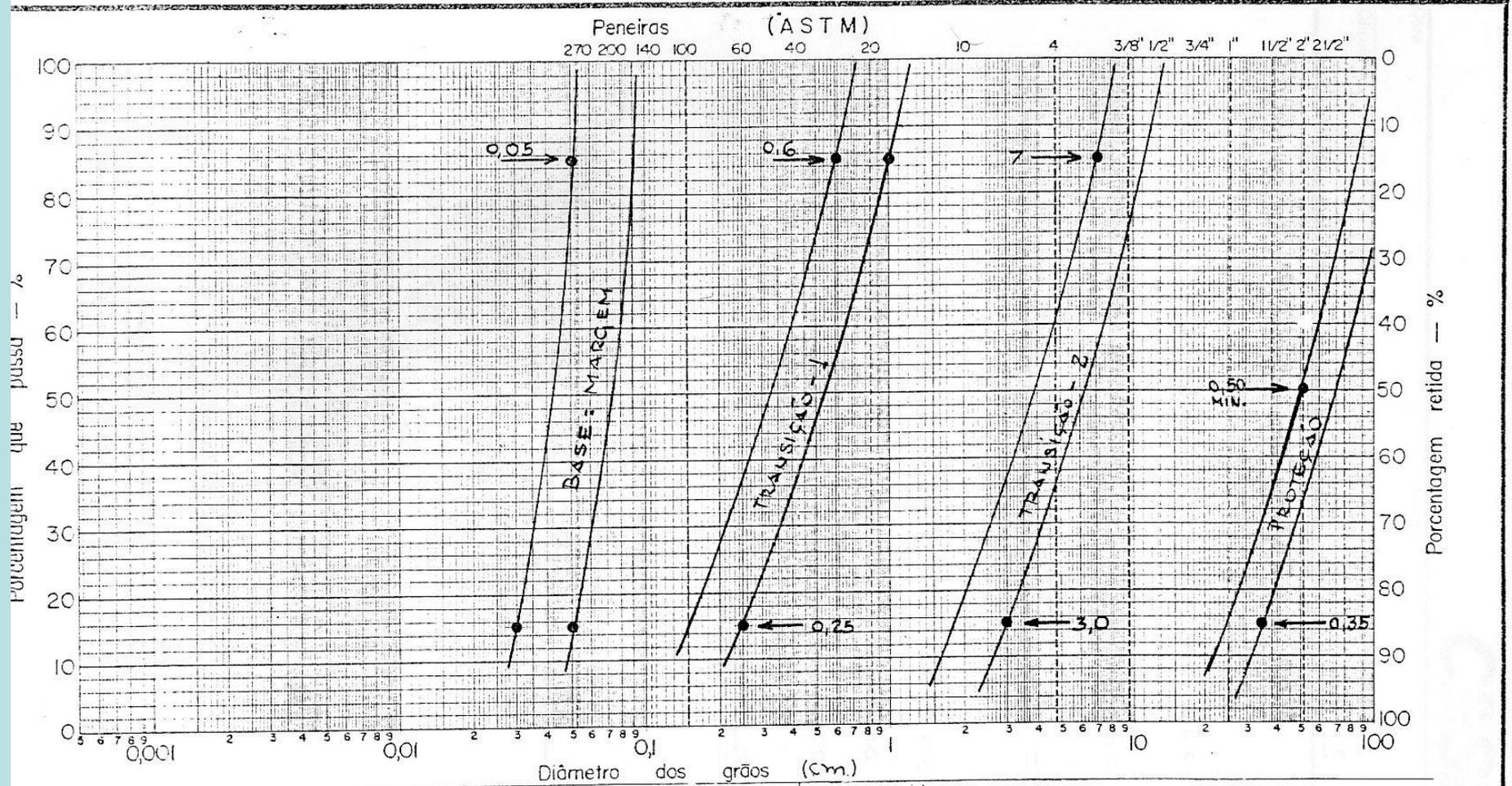
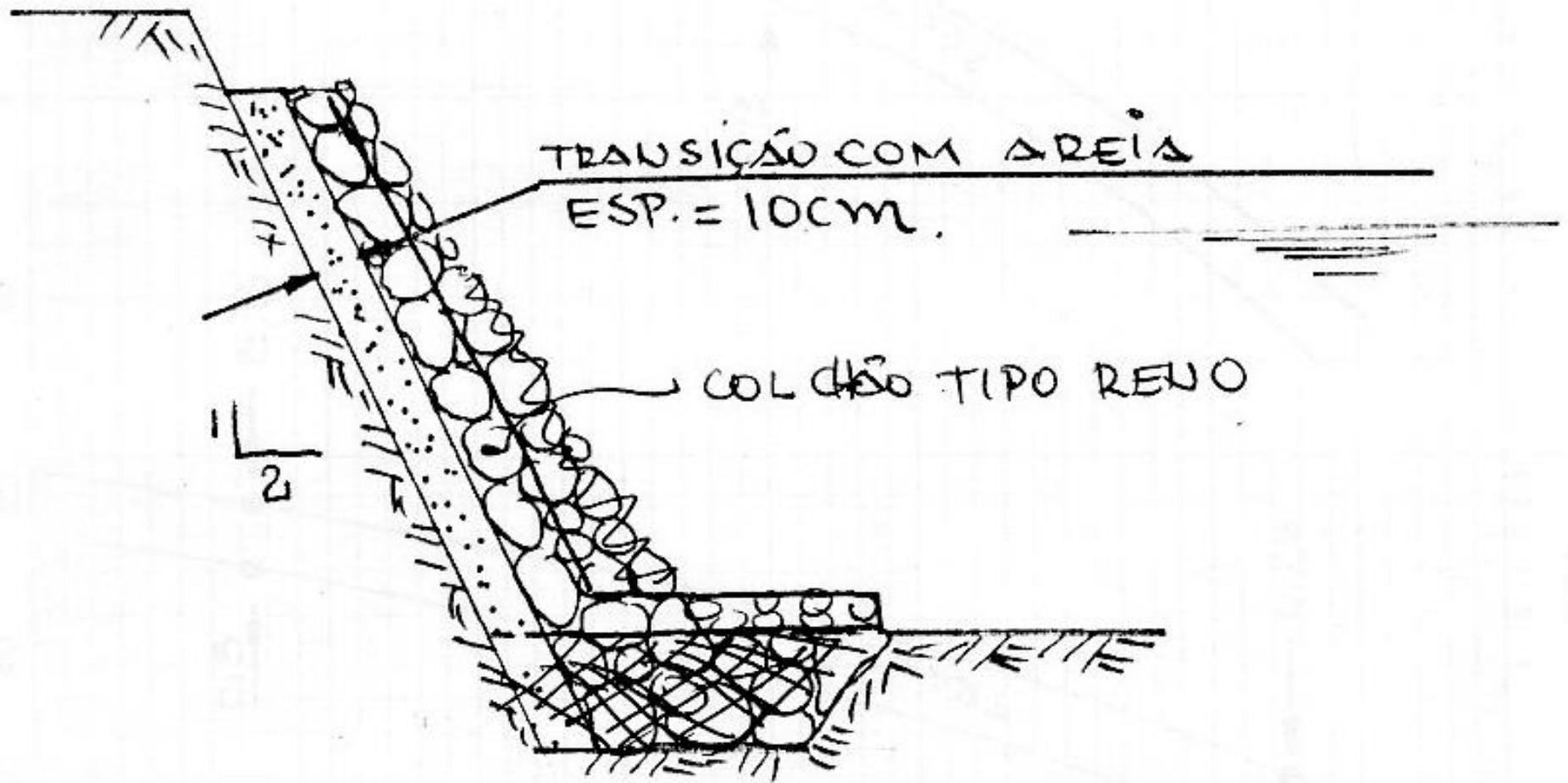


GRÁFICO DE GRANULOMETRIA

Laboratório Central de Engenharia Civil

Setor de Solos FL.

# Transição para Colchão Tipo Manta



ALTERNATIVA - 1

S/ ESCALA

# Gabião Manta



# Gabião Manta



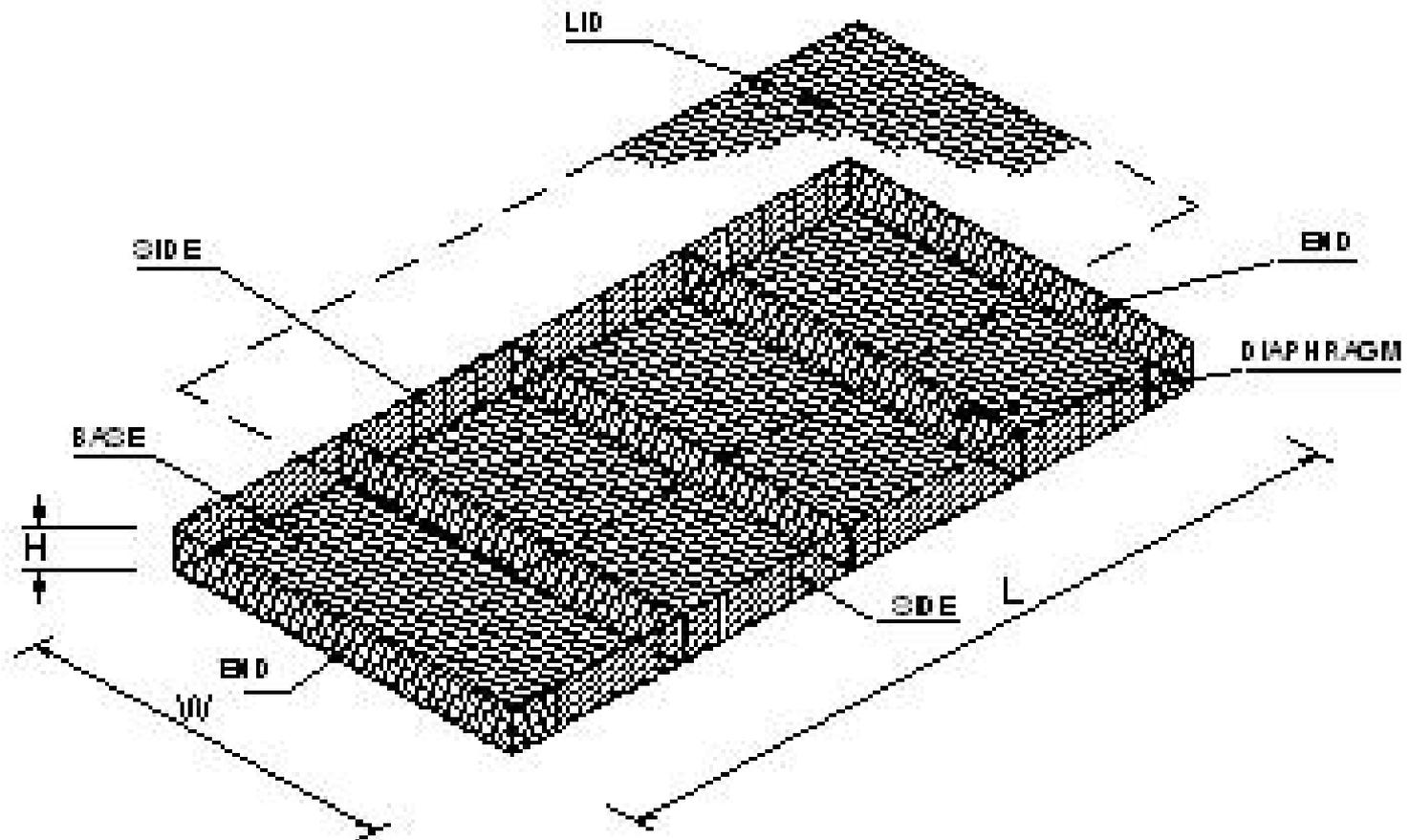
# Filtro – Geotextil



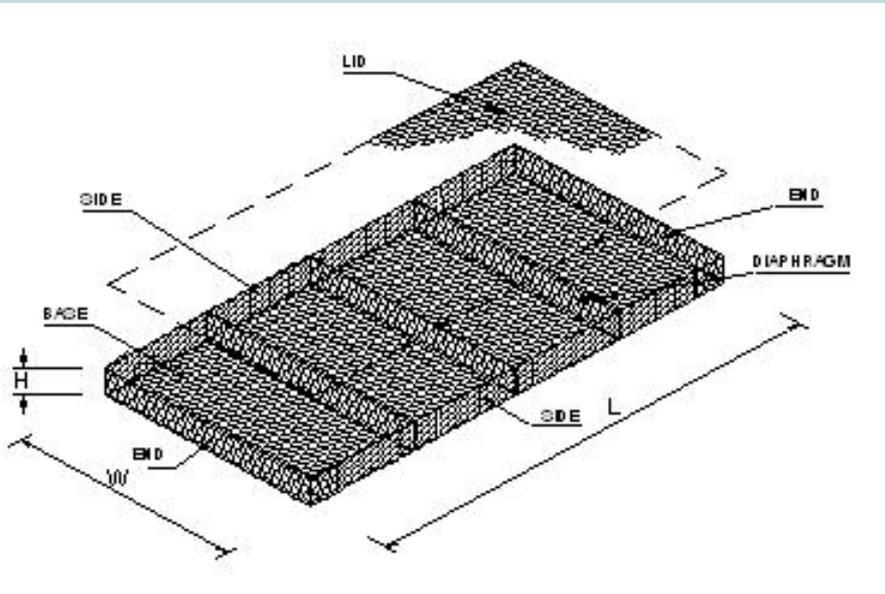
## CTR ESSENCIS – MANTAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO



# Gabião Manta

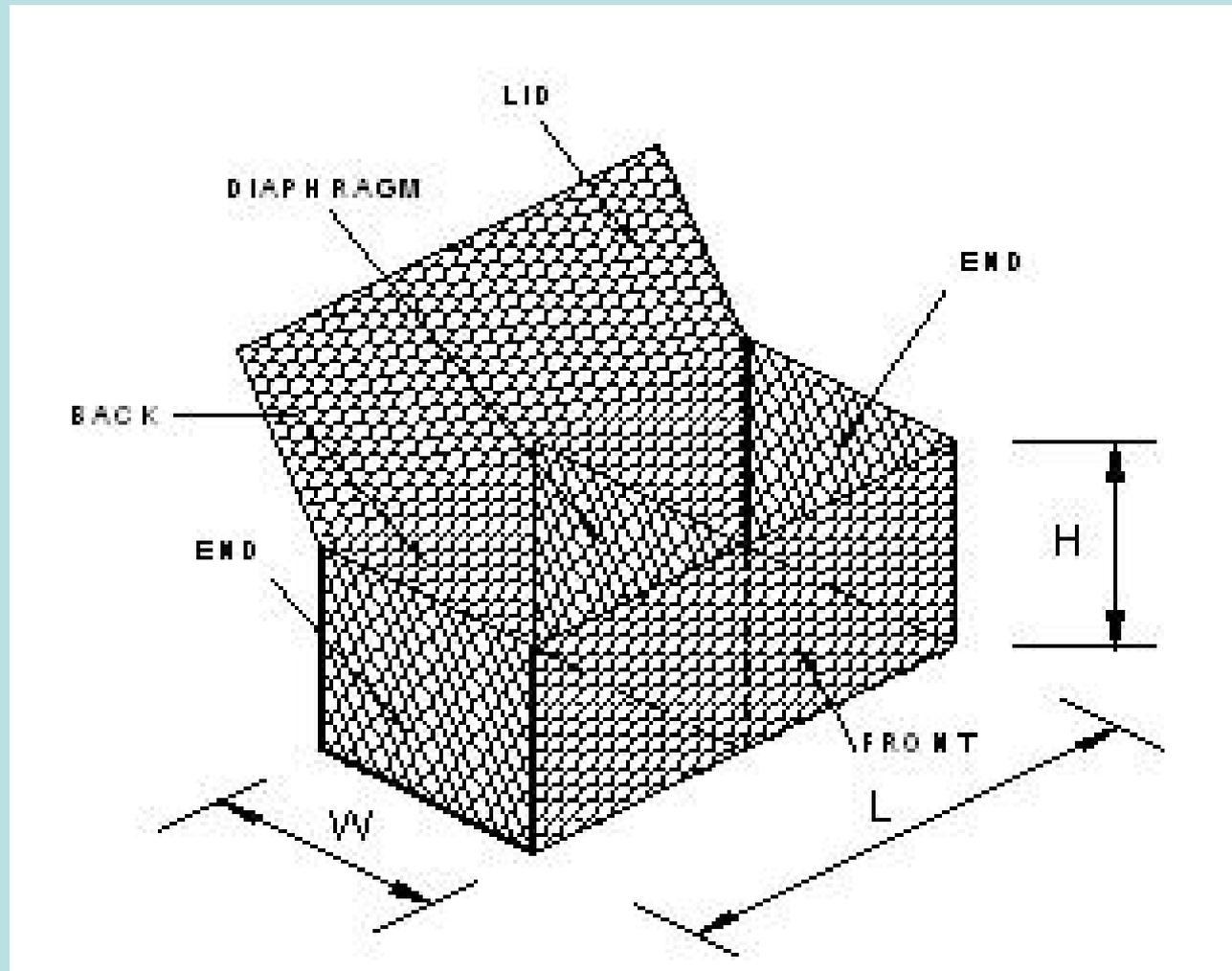


# Gabião Manta

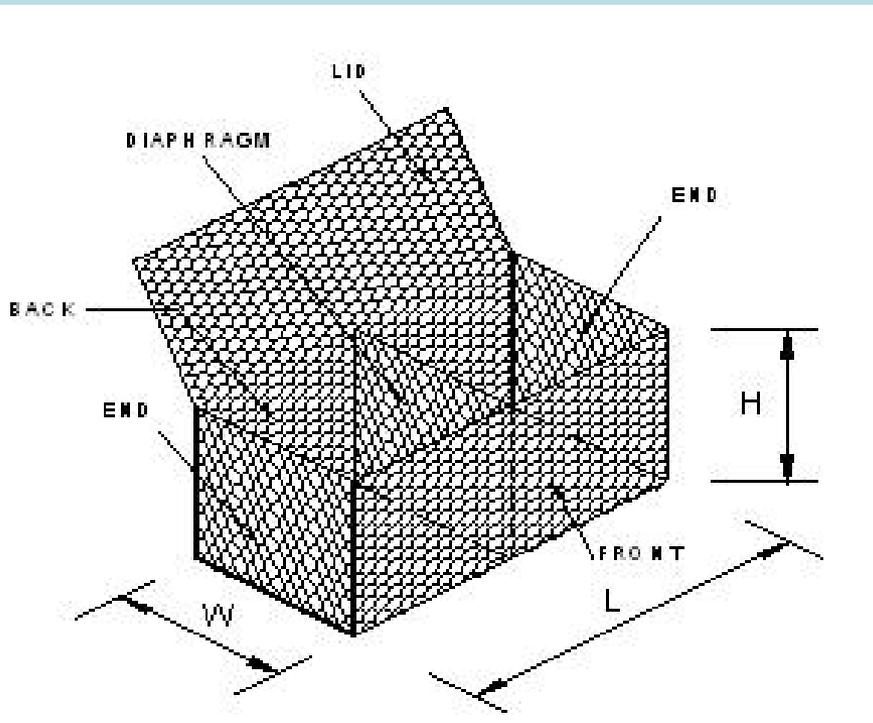


- Estruturas retangulares caracterizadas por sua grande área e pequena espessura, ;
- **Malha hexagonal de dupla torção produzida com arames de baixo teor de carbono revestidos com recobrimento Galfan® e protegidos, adicionalmente, por uma camada contínua de material plástico (aplicada por extrusão).**
- **Subdivisão em células por diafragmas de parede dupla, espaçados em intervalos regulares;**
- **Sua base, paredes laterais e de fechamento (extremidades) são formadas a partir de um único pano contínuo de malha, obtendo-se um recipiente multicelular aberto.**
- **Elementos drenantes, armados, flexíveis e pequena espessura;**
- **Indicados na construção de revestimentos para canais, barragens de solo, escadas dissipadoras e outros.**

# Gabião Caixa



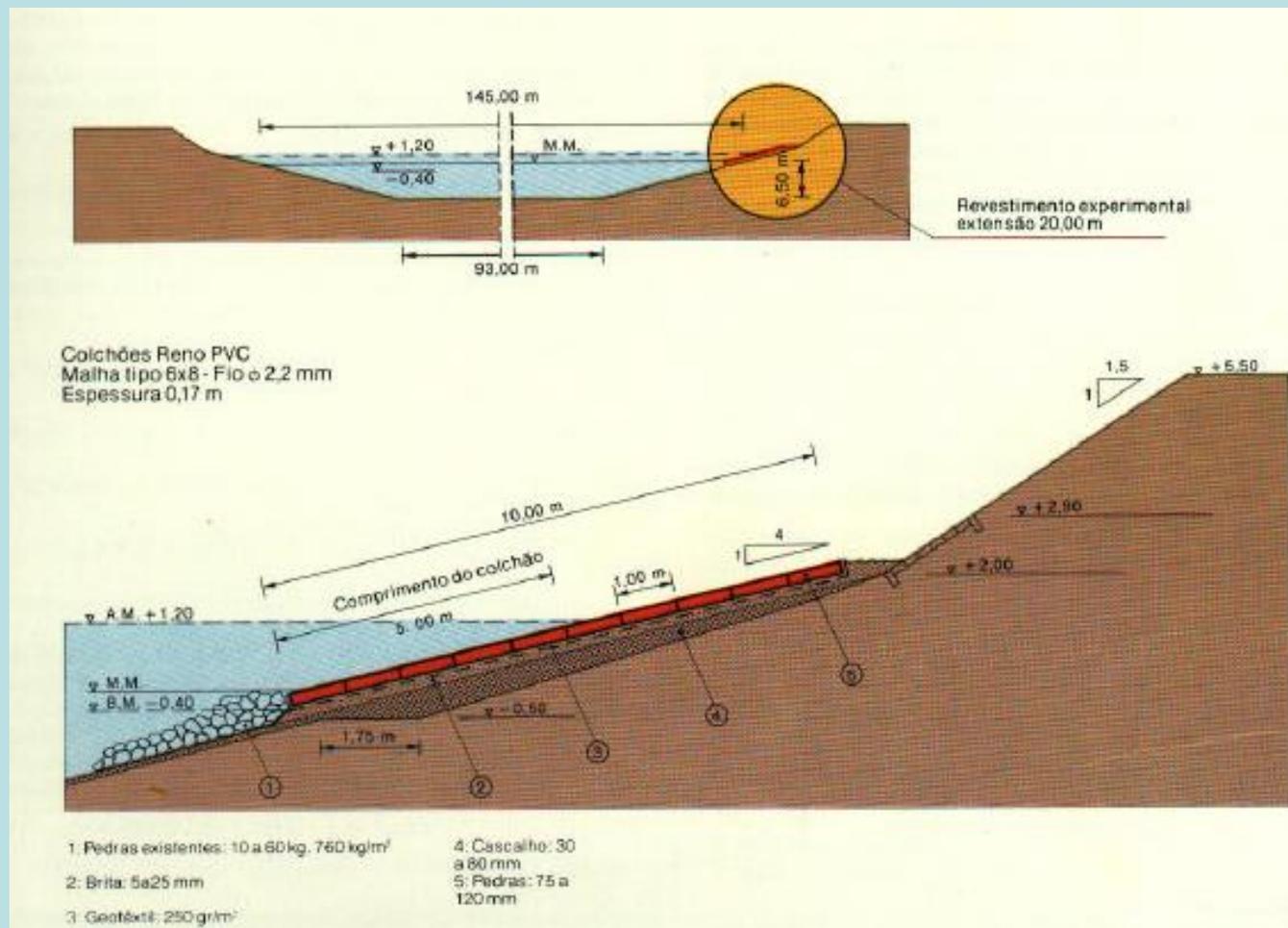
# Gabião Caixa



- Prisma retangular - Malha hexagonal de dupla torção - Arames de baixo teor de carbono revestidos com Galfan®;
- **Sub-divididos em células por diafragmas cuja função é reforçar a estrutura;**
- Revestimento com liga zinco alumínio e se necessário com camada contínua de PVC (cloreto de polivinil);
- **Proteção contra a corrosão - uso em marinas, ambientes poluídos e/ou quimicamente agressivos ao seu revestimento metálico;**
- Elementos estruturais flexíveis, armados, drenantes;
- **Utilização: Na construção dos mais diversos tipos de estruturas (muros de contenção, barragens, canalizações, etc.).**

# Proteção Direta contra ação de ondas e correntes

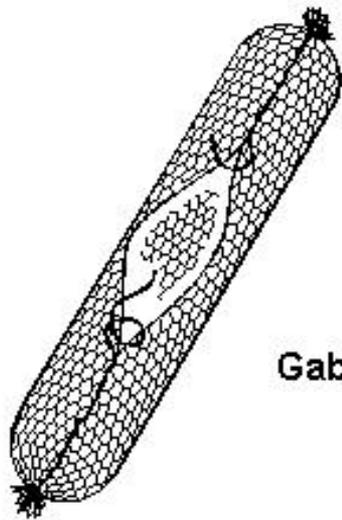
## Gabião / Proteção do pé com enrocamento



# Proteção Direta - Revestimento de contenção em margem com gabião caixa



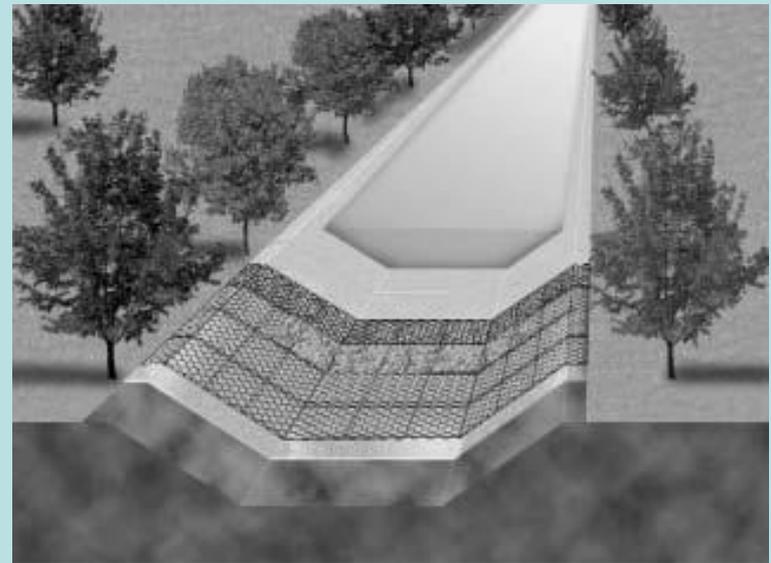
# Gabião Saco



Gabião Saco

- Único painel de malha hexagonal de dupla torção;
- **Arames de baixo teor de carbono revestidos com Galfan® e adicionalmente protegidos por uma camada contínua de material plástico (aplicada por extrusão).**
- **Utilização principal:**
- **Obras emergenciais;**
- **Obras hidráulicas onde as condições locais requerem uma rápida intervenção;**
- **A água não permite fácil acesso ao local (instalações subaquáticas);**
- **Quando o solo de apoio apresenta baixa capacidade de suporte.**

# Canal revestido com gabião Caixa e Reno revestidos com argamassa



**Filtro geotêxtil ou cascalho ; Colchão Reno**

**Junta de dilatação ; Diafragma**

**Argamassa**

# Proteção Direta - Com gabião longitudinal no encontro de pontes



# Dique Longitudinal para proteção de pilar de ponte – Gabião Caixa



# **Método Construtivo de Revestimento de Talude com Gabião tipo Manta**

































2

23 7 2004



2004 9 13



## Dimensionamento da espessura de Gabião Manta para proteção de taludes

FORAM DESENVOLVIDAS DUAS EQUAÇÕES PARA DETERMINAR A ESPESSURA NECESSÁRIA DOS COLCHÕES RENO PARA PROTEÇÃO DE MARGENS.

PARA INCLINAÇÕES SUPERIORES A 1:3,5:

$$t = \frac{Hd}{3 \cdot (1-v)(sr-1) \cot \theta}$$

ESPESSURA DO COLCHÃO  
--- [ D ]

ONDE:  $v$  = PORCENTAGEM DOS VAZIOS DAS PEDRAS DE ENCHIMENTO

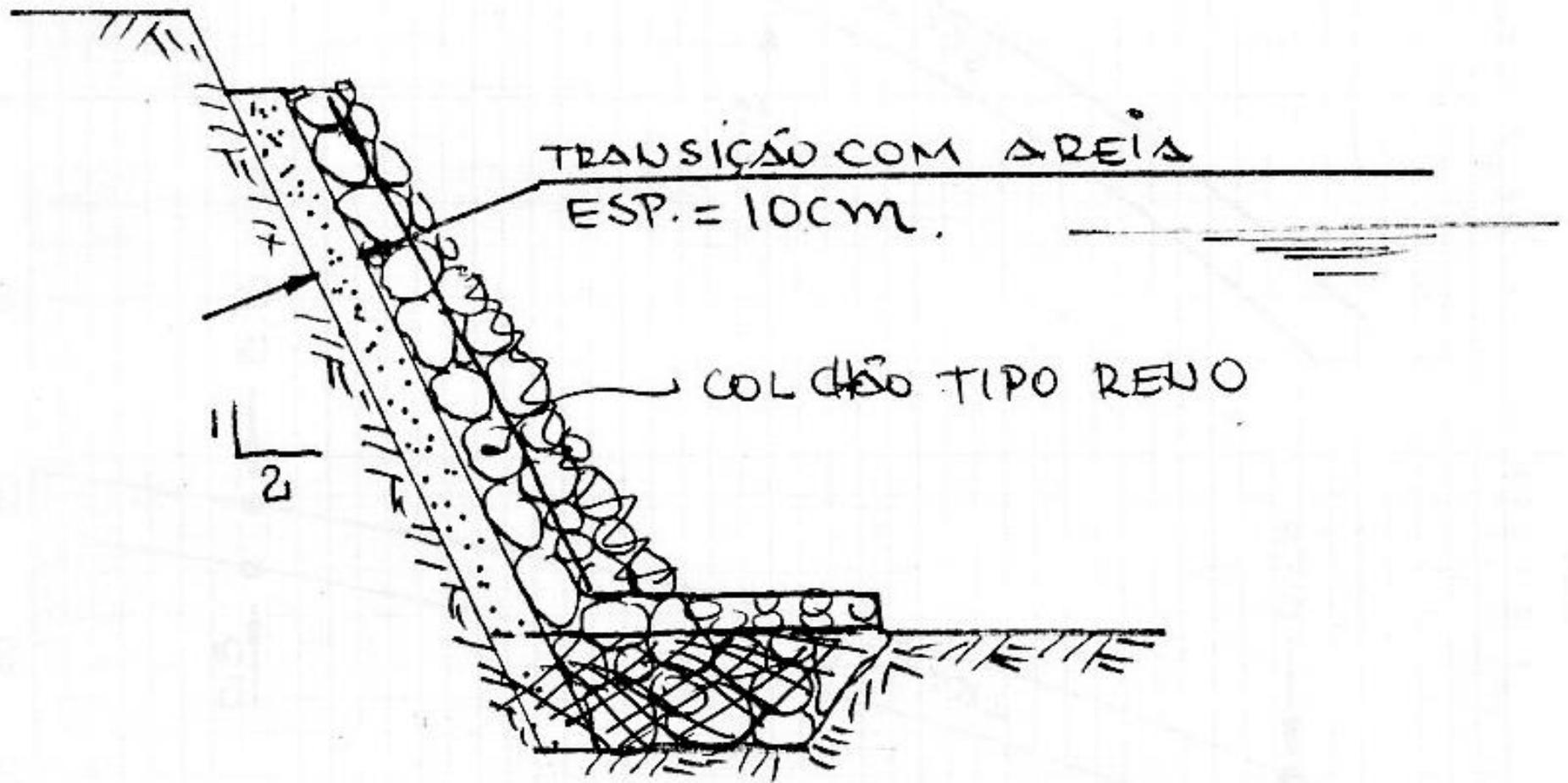
PARA INCLINAÇÕES INFERIORES A 1:3,5:

$$t = \frac{Hd}{7 \cdot (1-v)(sr-1) \cot^{\sqrt{3}} \theta}$$

[ E ]

PARA PEDRAS COMUNES DE PEDREIRA RESULTA  
 $(1-v)(sr-1) \cong 1$

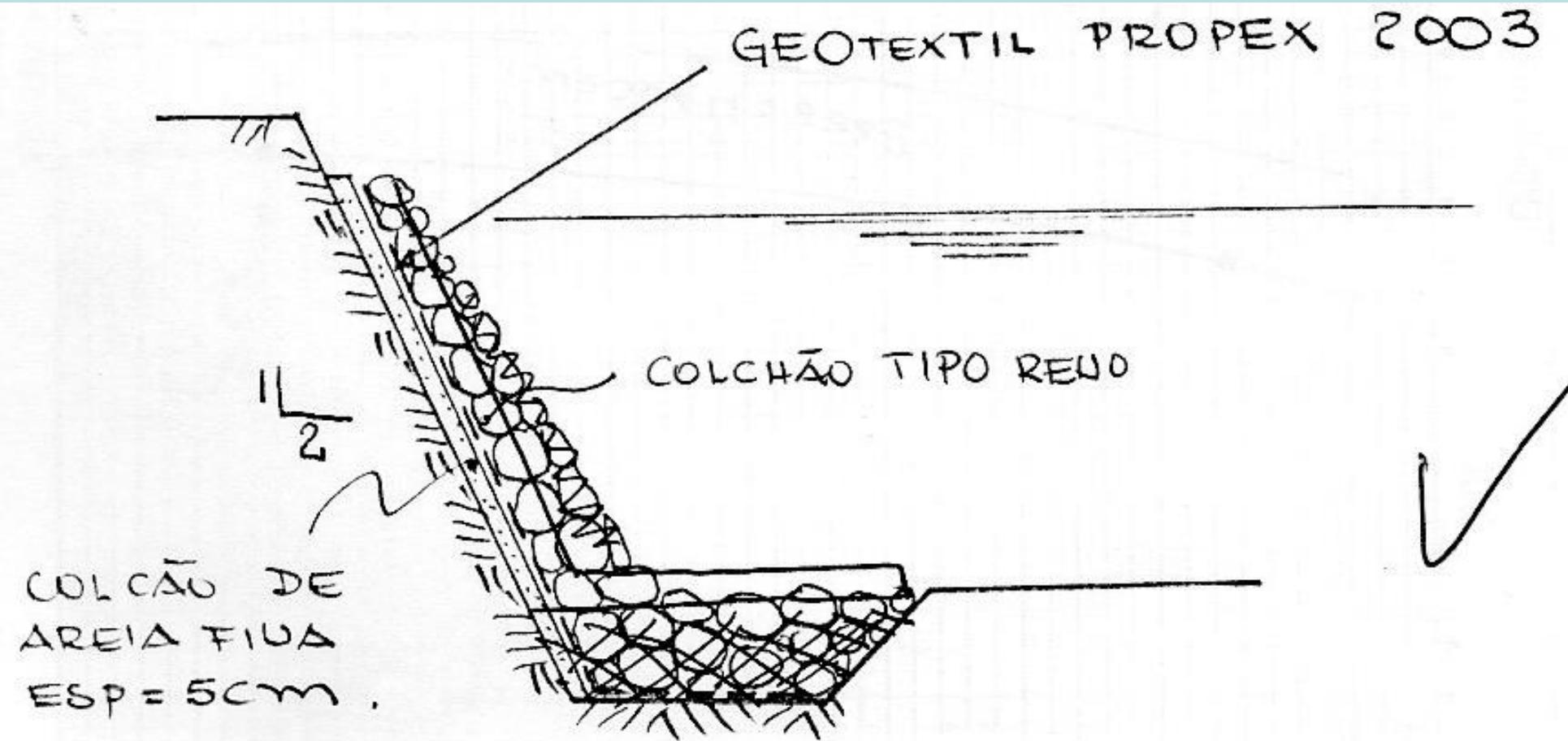
# Transição para Colchão Tipo Manta



ALTERNATIVA - 1

S/ ESCALA

# Transição para Colchão Tipo Manta



# Transição para colchão tipo Manta

TRANSIÇÃO PARA COLCHÃO TIPO RENO

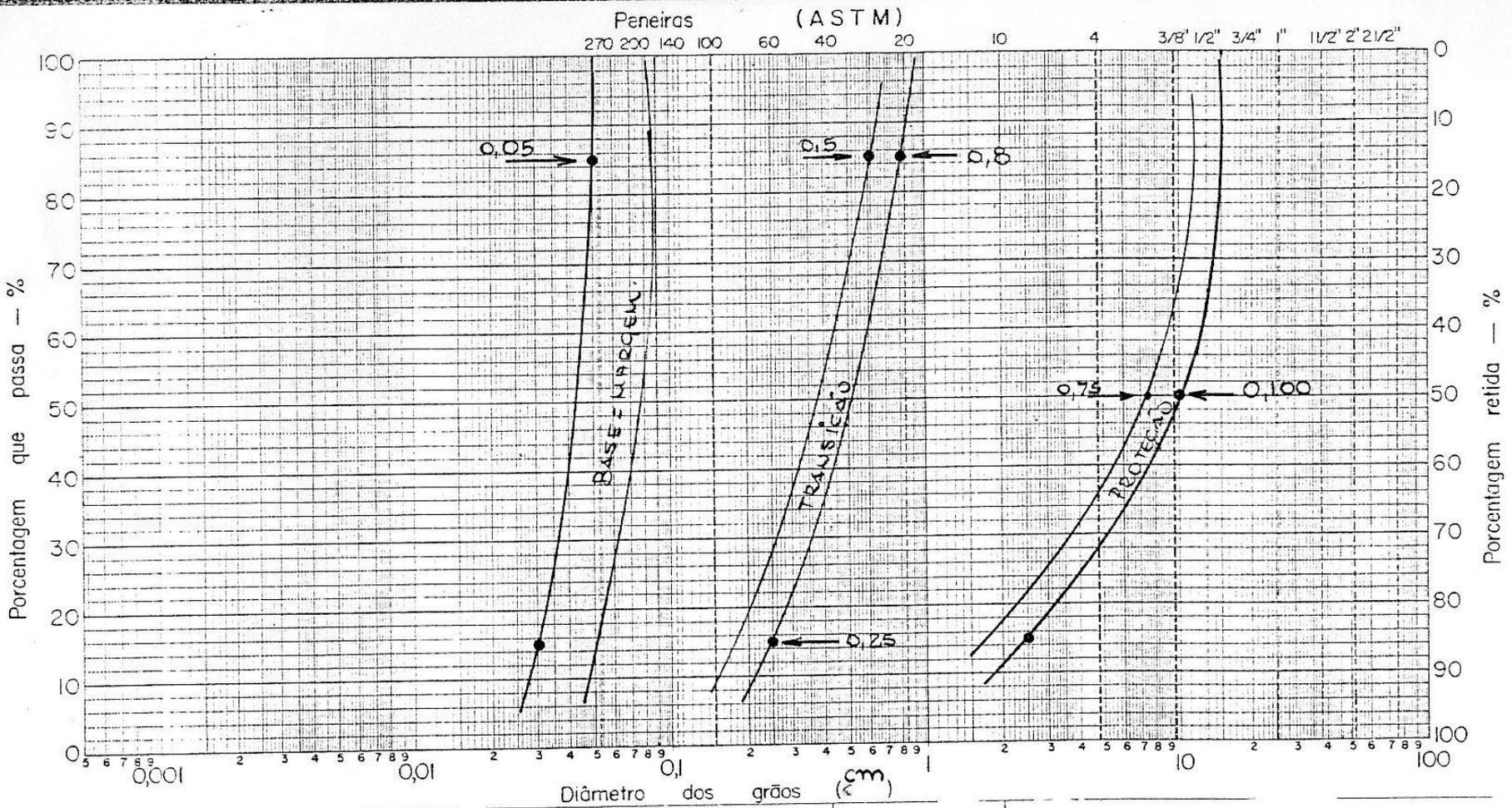


GRÁFICO DE GRANULOMETRIA

Laboratório Central de Engenharia Civil

Sector de Solos

FL

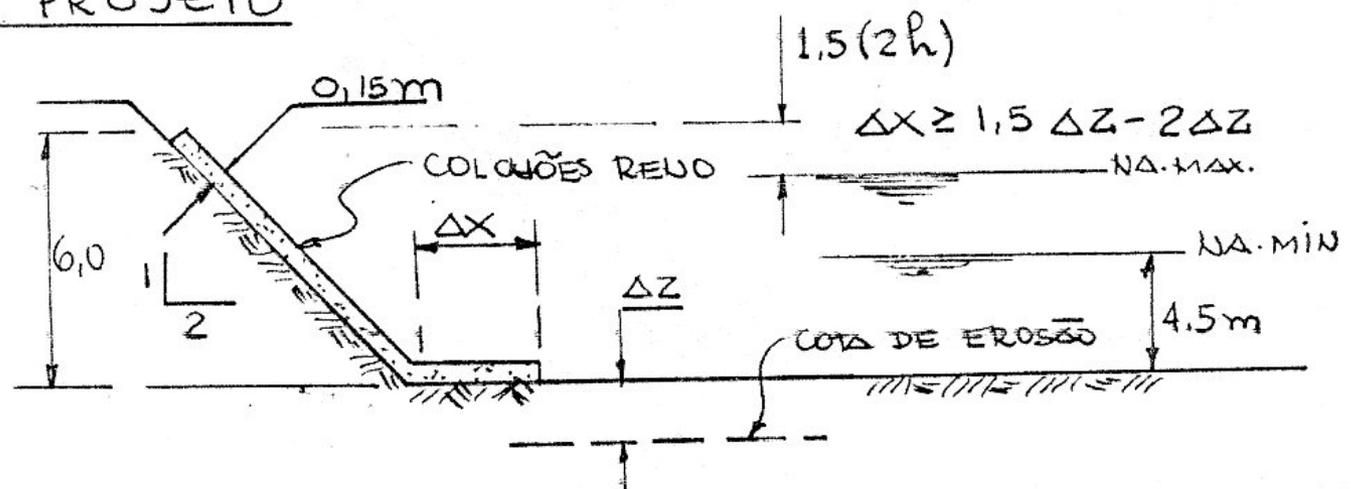
# Projeto de Proteção com Colchão Reno

Tabela 9 - Características dos colchões Reno submetidos às provas em Fort Collins (Colorado, E.U.A.).

n.	Prova	Modelo				Escala real			
		Espessura m	Malha mm	Fio $\phi$ mm	Dimensões das pedras mm	Espessura m	Malha Tipo	Fio $\phi$ mm	Dimensões das pedras mm
1	Prototipo	—	—	—	—	0,15	6x8	2,0	75 a 150
2		—	—	—	—	0,23	6x8	2,0	75 a 150
3	Modelo	0,075	25x38	0,8 a 0,9	38 a 50	0,23	8x10	2,4 a 2,7	115 a 150
4		0,050	20x30	0,6 a 0,7	25 a 50	0,15	6x8	2,0 a 2,2	75 a 150
5		0,075	20x30	0,6 a 0,7	25 a 50	0,23	6x8	2,0 a 2,2	75 a 150
6		0,100	20x30	0,6 a 0,7	38 a 50	0,30	6x8	2,0 a 2,2	115 a 150
7		0,150	25x38	0,8 a 0,9	38 a 63	0,45	8x10	2,4 a 2,7	115 a 190
8		0,050	20x30	0,6 a 0,7	25 a 50	0,15	6x8	2,0 a 2,2	75 a 150

— A prova n. 1 foi efetuada numa canaleta de 2,40 m de largura; enquanto as provas n. 4, 5, 6, 7, 8, em canaleta de 1,20 m de largura.  
— A prova n. 8 foi efetuada sobre modelo consolidado com mástique de betume.

## PROJETO

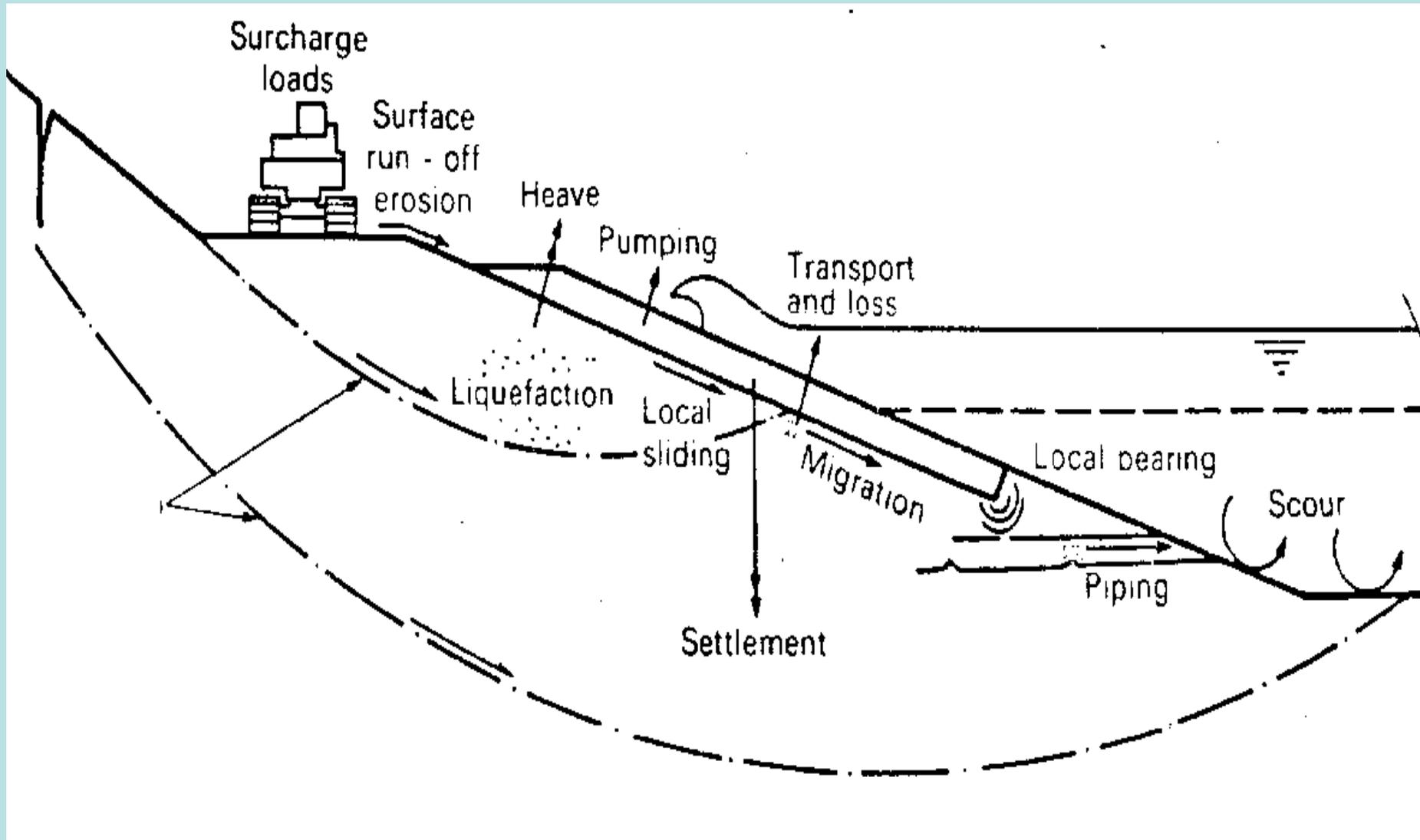


# Outros tipos de erosão

## “ Piping” ou Retro – Erosão Erosão por Solapamento da Margem



# “ Piping” ou Retro – Erosão Erosão por Solapamento da Margem



# Causas do processo erosivo por solapamento

- **gradiente hidráulico elevado, presença de íons solúveis no solo,**
- **ocorrência de períodos de seca prolongados, que favorecem a ocorrência de fissuras,**
- **Chuvas intensas e irregulares que reativam percolações concentradas subsuperficiais.**

# Causas do processo erosivo por solapamento

- **erosão fluvial sub-superficial, promovida pela ocorrência de olhos d'água (minas) em situações de alto gradiente hidráulico ou baixo poder de agregação do solo,**
- **passagens deixadas por raízes decompostas e a ação de escavação de micro, meso e macro-fauna.**

## **Causas do processo erosivo por solapamento**

- **ocorrência de rocha não alterada ou de horizontes menos permeáveis, podem induzir à concentração sub-superficial da água levando, eventualmente, à formação desses canais.**

# Causas do processo erosivo por solapamento

- Os dutos (*pipes*) ou túneis se formam a partir do carreamento de pequenos grãos do solo, partículas de argila e outros colóides,
- ou mesmo através da remoção dos componentes do solo por solução, ou seja, pelo processo de *piping*.

**Duto sem colapso** - sinais de colapso por desabamento parcial do teto pelo efeito da enxurrada, formando uma alcova ao longo de uma das paredes de uma voçoroca.



# Dutos com colapso parcial de teto



# Causas do processo erosivo por solapamento

- O transporte desse material se faz através do transporte de sólidos e de componentes dissolvidos em rotas preferenciais, o que lhes confere tanto a atuação de forças físicas, quanto químicas.

**Dutos mais comuns, encontrados nas paredes de todas as voçorocas estudadas e atribuídos à ação de animais, em especial de roedores.**



# **Causas do processo erosivo por solapamento**

- **O desenvolvimento dessas rotas preferenciais de escoamento sub-superficial pode levar à formação de uma verdadeira rede interligada de fluxos.**
- **O surgimento das voçorocas ocorreria com o colapso do teto dos túneis e o alargamento, por escoamento superficial e por movimentos de massa, do canal assim formado.**

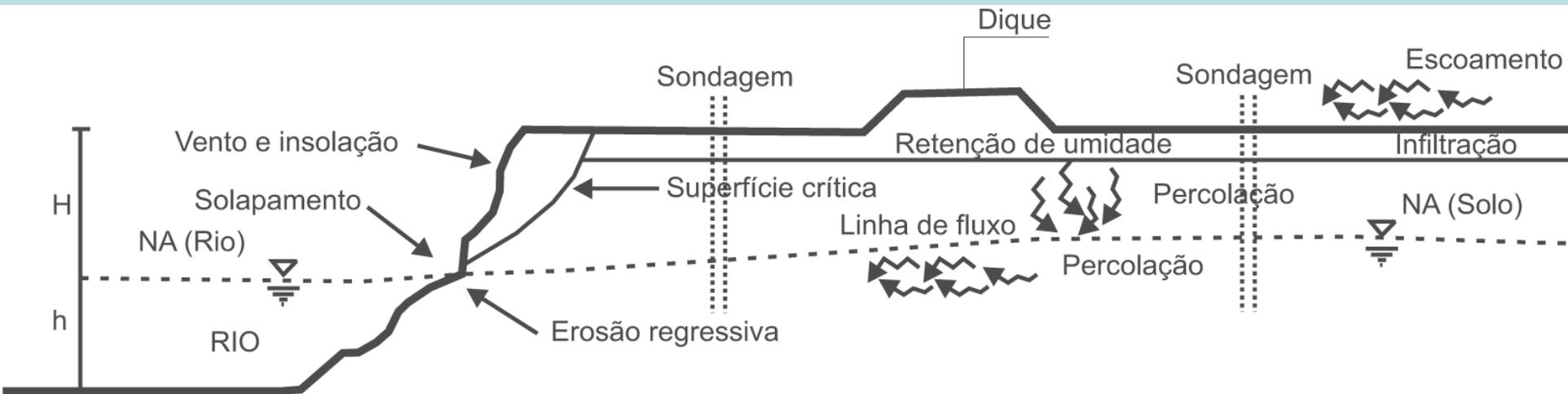
# Formação de Voçoroca do Córrego Água Comprida



# Formação de Voçoroca



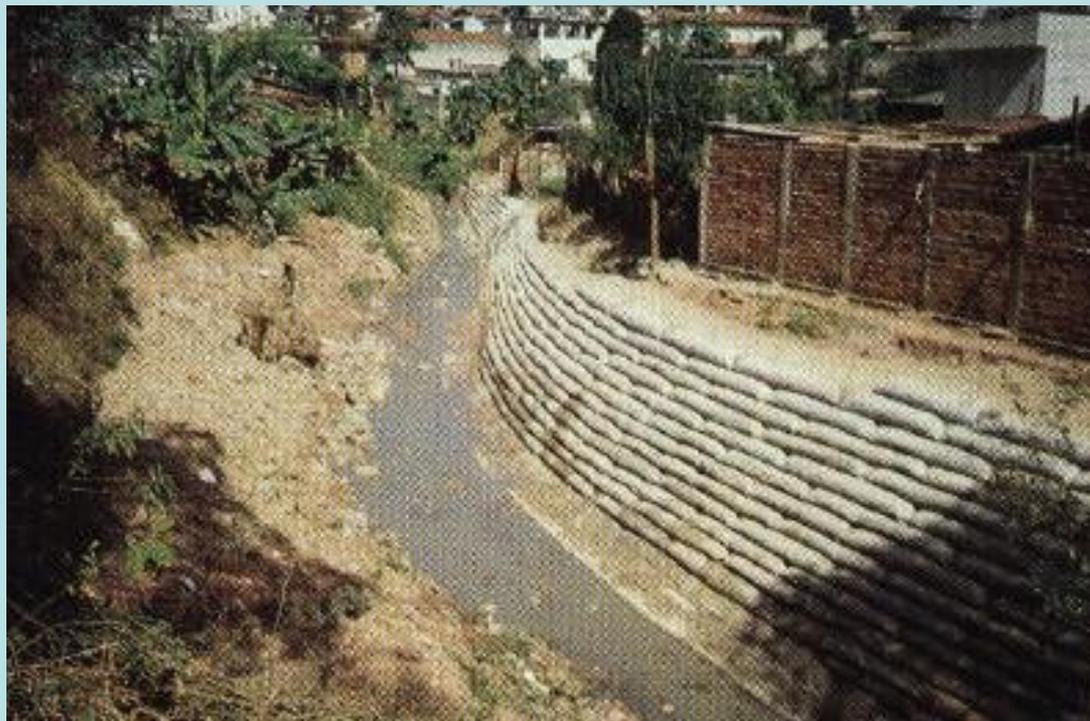
# Representação esquemática dos principais mecanismos de desestabilização dos taludes marginais estudados no Baixo São Francisco



# Outros tipos de Materiais de Proteção **Direta**

**Bolsacreto e Concreto**

# Revestimento Direto de Margem com Bolsacreto



# Revestimento Direto de Margem com Bolsacreto revestida com argamassa



# Revestimento inadequado de talude em concreto



# Outros tipos de Proteção

**Proteção indireta**

**Espigões**

# Gabião Caixa - Espigões



# Gabião Caixa - Espigões



# Solução com Gabião Caixa e Saco



## Solução com Gabião Caixa





## **Solução com Gabião Caixa e Manta**



# Execução de Gabião Saco



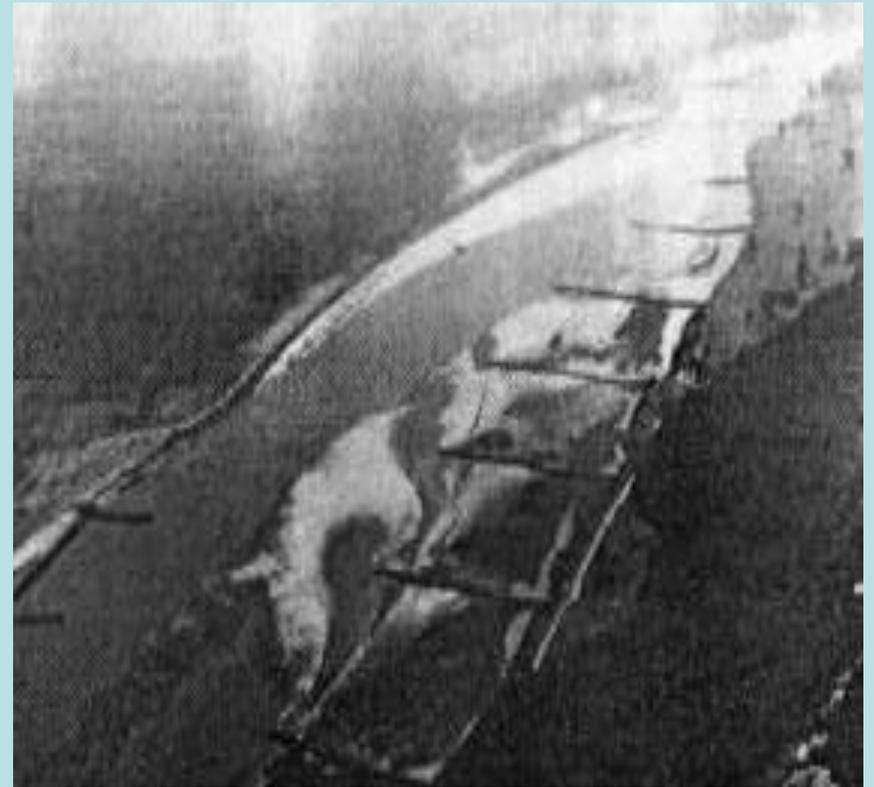
# Solução com Gabião Caixa e Saco



# Proteção Indireta - espigões



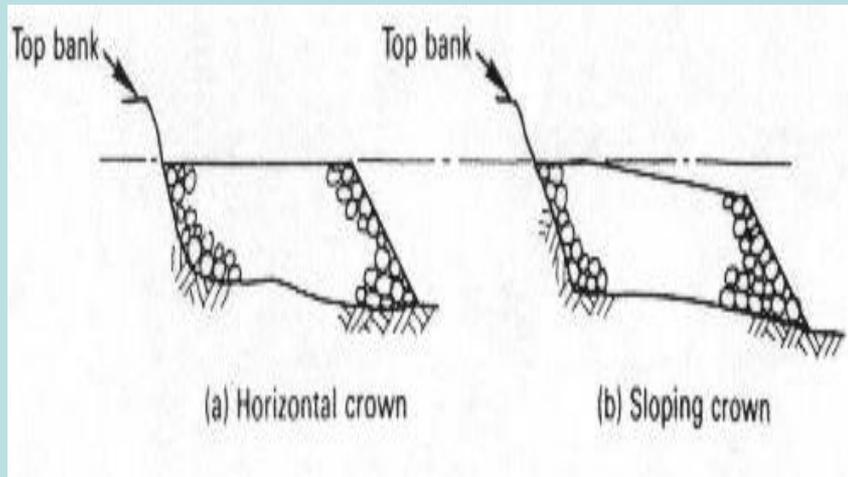
# Proteção Clássica com espigões de repulsão e sedimentação nas margens côncavas de um rio



# Proteção Clássica com espigões de repulsão e sedimentação nas margens côncavas de um rio



# Características dos Espigões



- Ancoragem ou Enraizamento
- **Frente**
- Costa
- **Cabeça**
- Crista

# Detalhe dos espigões com bolsacreto, Rio Mogi-Guaçu, SP



# Dique Longitudinal para proteção de pilar de ponte



# Classificação das Proteções

- Proteção : Diretas ou Contínuas
- Método : apoiadas ou executadas diretamente no talude das margens
- Principais Obras : redução do ângulo de talude, revestimento das margens com pedregulhos, cascalhos, pedras britadas, vegetação, revestimento asfáltico, enrocamento com pedras lançadas, gabiões, cortinas contínuas e muros
- Proteção : Indireta ou Descontínua
- Método : obras construídas a uma certa distância da margem para desviar as correntes
- Principais Obras : espigões e diques

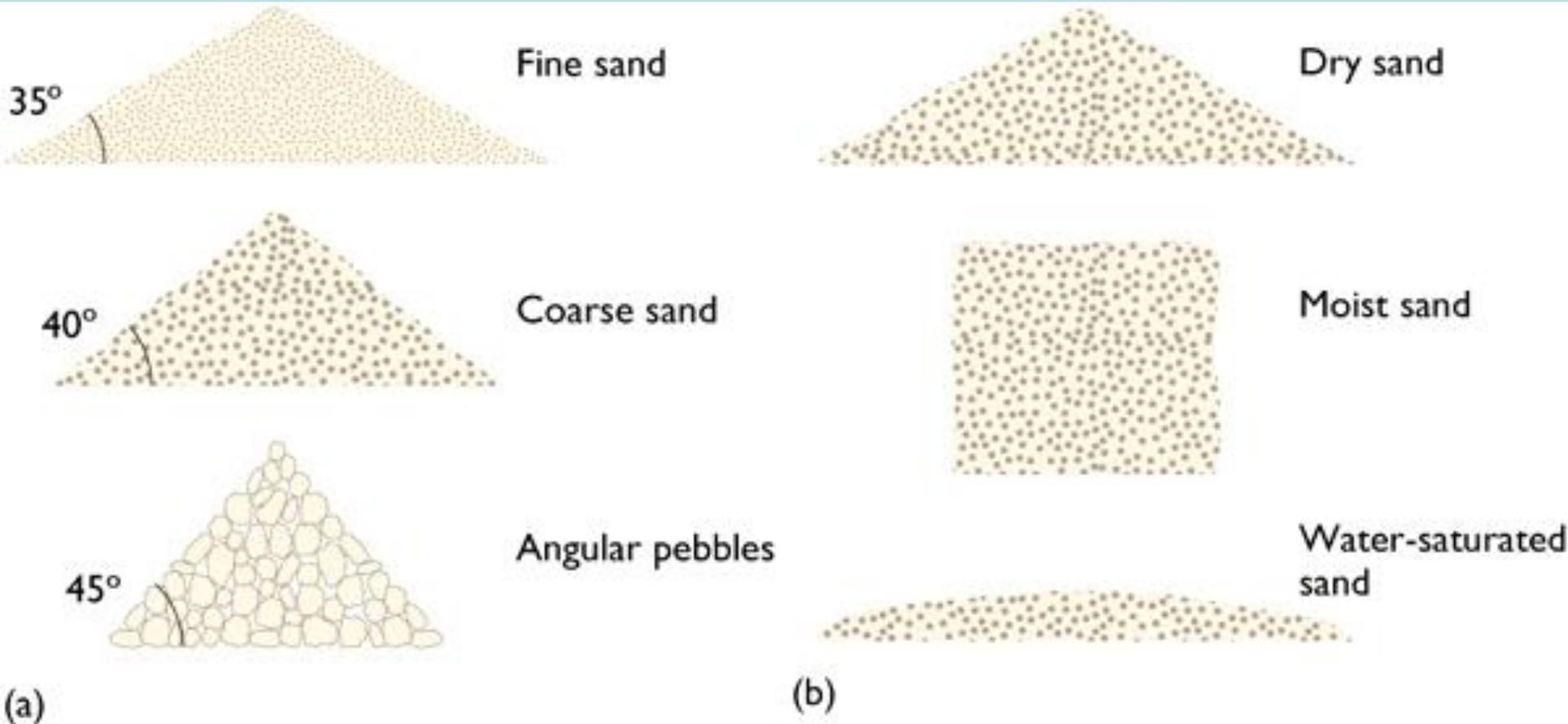
# Comparação entre as Obras de Proteção Direta e Indireta

- **Obras : Proteção Direta**
- **Vantagens :** não há diminuição da área hidráulica do rio ;  
normalmente mais eficientes;  
maior garantia da fixação definitiva das margens .

- **Desvantagens :** Construção mais complicada e precisa, encarecendo a obra ;  
Necessidade de manutenção cuidadosa para não se colocar em perigo toda proteção.

- **Obras : Proteção Indireta**
- **Vantagens :** Normalmente mais econômicas;  
Custos da manutenção diminuem no tempo;  
Destruição em um trecho da obra não põe em perigo todo o resto;  
Podem ser construídas por etapas;  
A retenção de sedimentos  $\implies$  proteção adicional .
- **Desvantagens :** menos eficazes e de menor garantia  
Diminuem a área hidráulica  
Aumentam a rugosidade das margens  
Produzem perdas de carga adicionais  
Limitação para raios  $< 2*b$

# Ângulos de estabilidade de material não coesivo



# Exemplo

