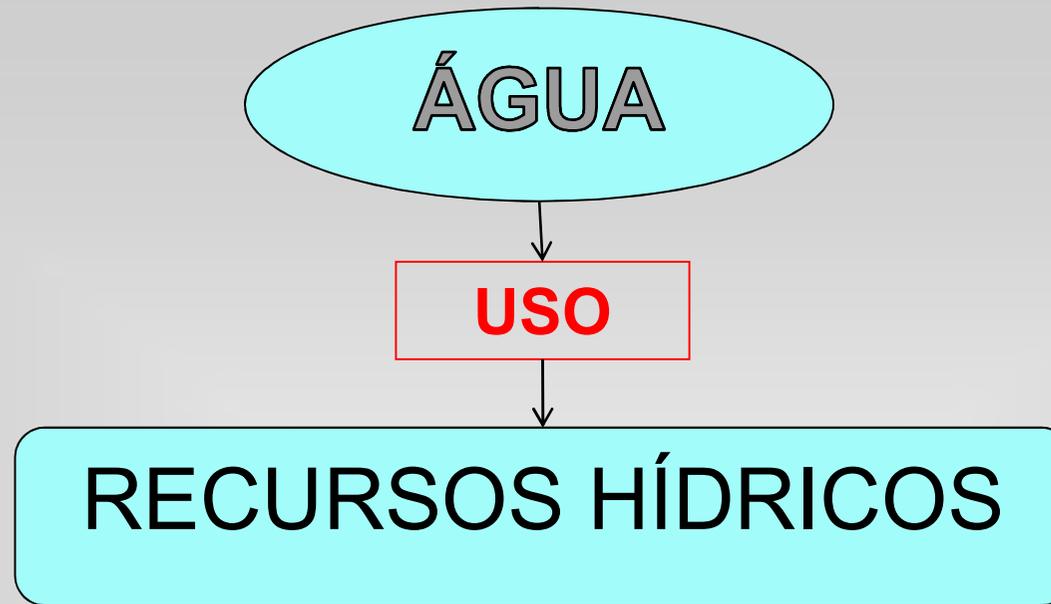


# **CAPACITAÇÃO EM SEGURANÇA DE BARRAGENS**

Podalyro Amaral de Souza

Luiz César de Souza Pinto

Maria de Fátima Curi



- EXPLOSÃO DEMOGRÁFICA ⇒ ESCASSEZ  
POLUIÇÃO
- DEMANDA CRESCENTE
- MÁ DISTRIBUIÇÃO PELO PLANETA
- SÉCULO XX ⇒ ÁGUA BEM ECONÔMICO E FINITO

# **GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**“INSTRUMENTO QUE ORIENTA O PODER PÚBLICO E A SOCIEDADE A LONGO PRAZO, NA UTILIZAÇÃO E NO MONITORAMENTO DOS RECURSOS AMBIENTAIS, NATURAIS, ECONÔMICOS E SÓCIO-CULTURAIS DE FORMA A PROMOVER UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL”. (MMARH)**

# **SÃO PAULO** ⇒ CONSTITUIÇÃO ESTADUAL

**SIGRH** – Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do estado de SP - sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão

# GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

- Abastecimento de água



- Irrigação



# GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

- Lançamento e tratamento de esgoto



# GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

- Navegação



# GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

- Pesca



Turismo  
Recreação  
Serviços

...



# GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

- Sedimentos



(a)

(b)



(c)



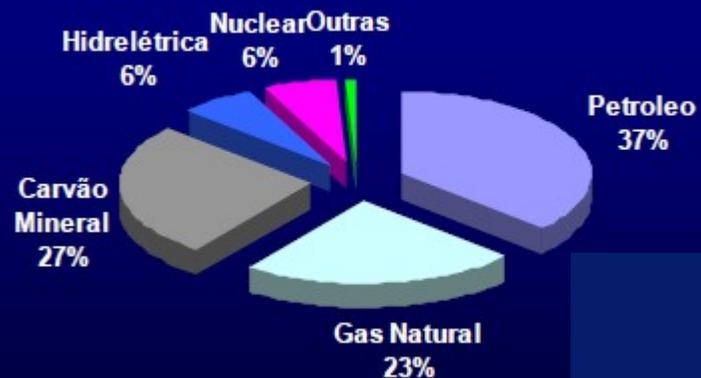
(d)

# GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

- Geração de energia elétrica



**Mundo** (Energy Information Administration, 2008)

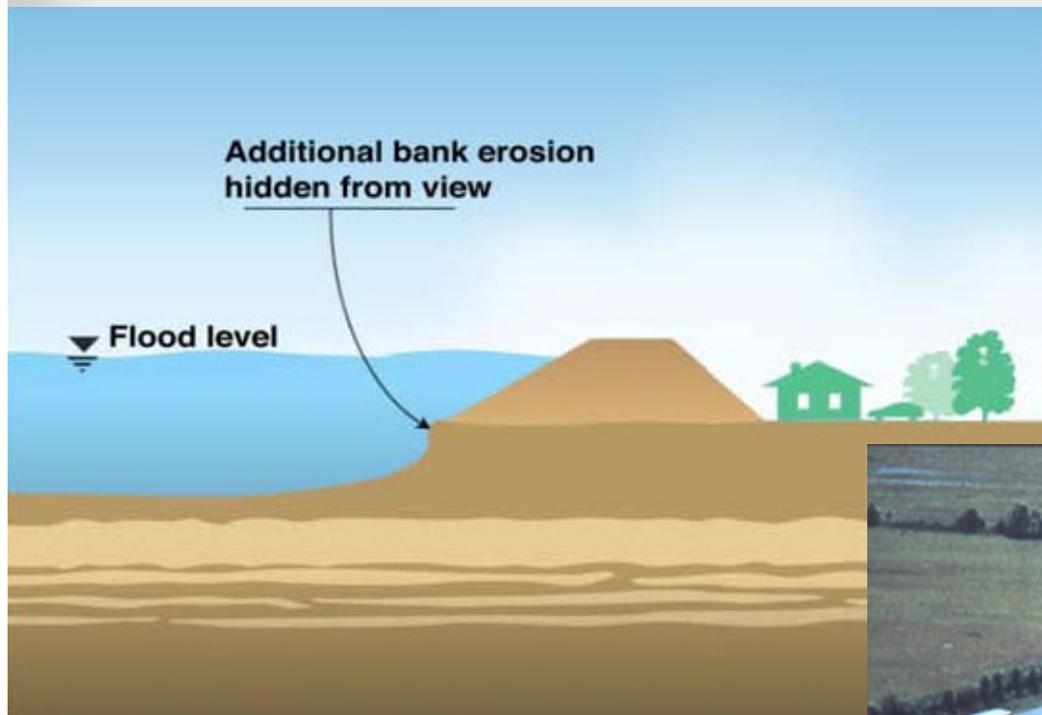


**Brasil** (Empresa de Pesquisa Energética/MME, 2008)



# GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

- Controle de cheias



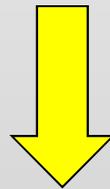
Diques de proteção contra cheias



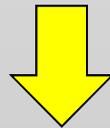
\*Adaptado de UFRG

# **OBRAS HIDRÁULICAS**

CONJUNTO DE ESTRUTURAS  
CONSTRUÍDAS COM O OBJETIVO DE  
MANEJAR A ÁGUA, QUALQUER QUE  
SEJA A ORIGEM, VISANDO O SEU  
APROVEITAMENTO OU PROTEÇÃO.



**BARRAGEM**



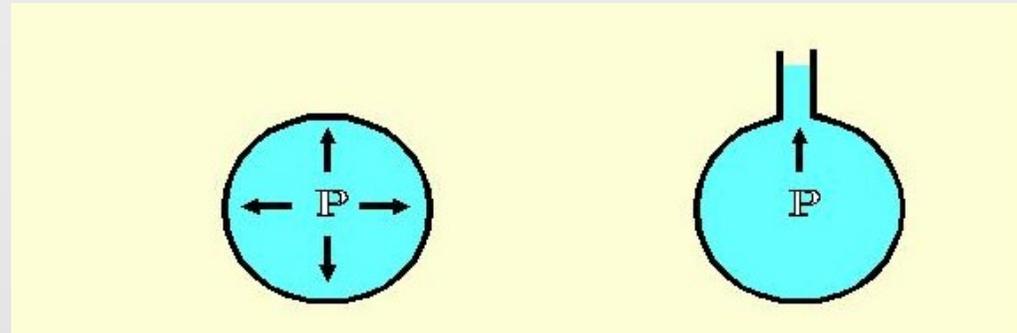
**SEGURANÇA**

- ABASTECIMENTO DE ÁGUA
- IRRIGAÇÃO
- GERAÇÃO DE ENERGIA
- NAVEGAÇÃO
- RECREAÇÃO
- DRENAGEM
- CONTROLE DE INUNDAÇÕES
- OBRAS CONTRA O ESCORREGAMENTO DE ENCOSTAS
- TRANSPOSIÇÃO DE PEIXES
- SANEAMENTO TRATAMENTO DE ÁGUA  
TRATAMENTO DE ESGOTO
- FINALIDADE ÚNICA OU FINALIDADES MÚLTIPLAS

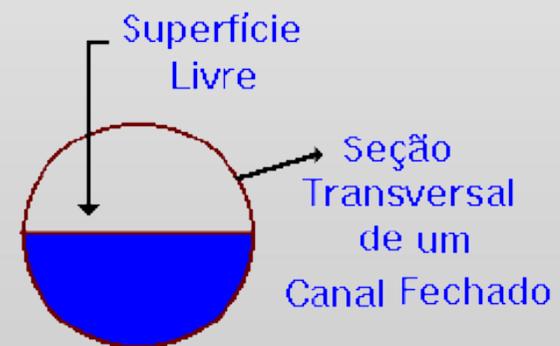
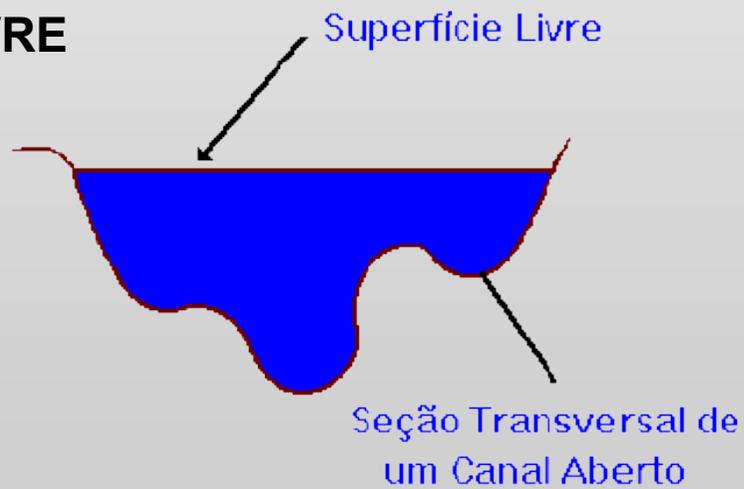
# HIDRÁULICA

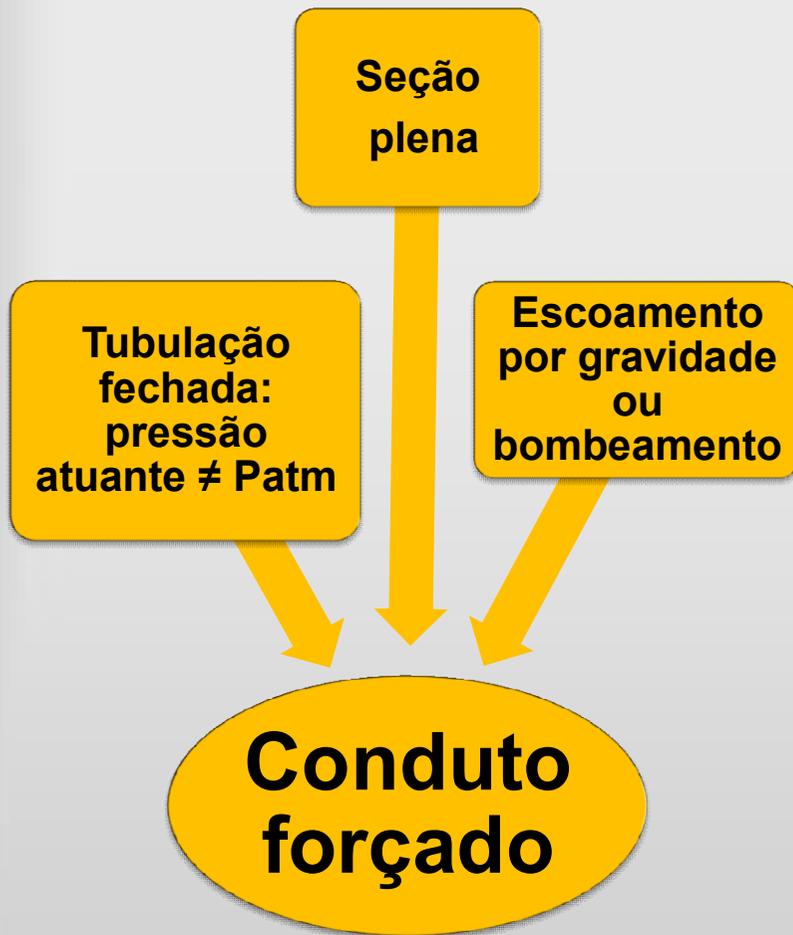
# Escoamento

**FORÇADO**



**LIVRE**

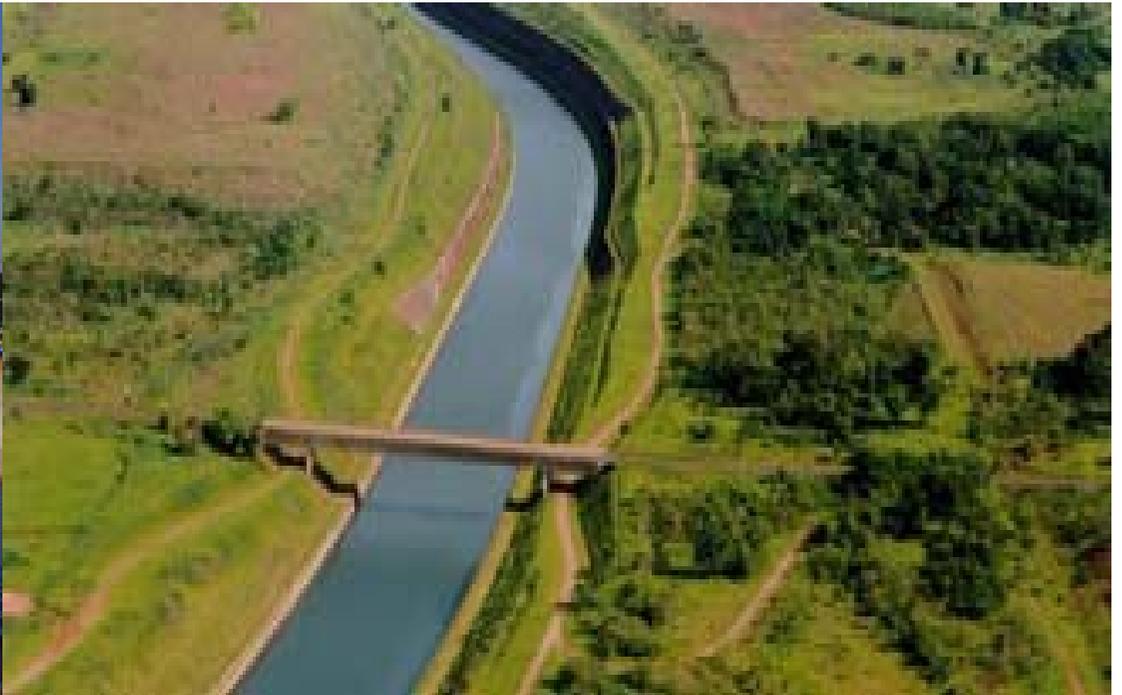




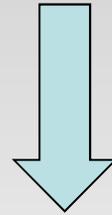
# Escoamento em superfície livre.



Aplicações:  
Macro e  
microdrenagem,  
retificação  
de rios,  
irrigação,  
esgoto.



**ESCOAMENTO**



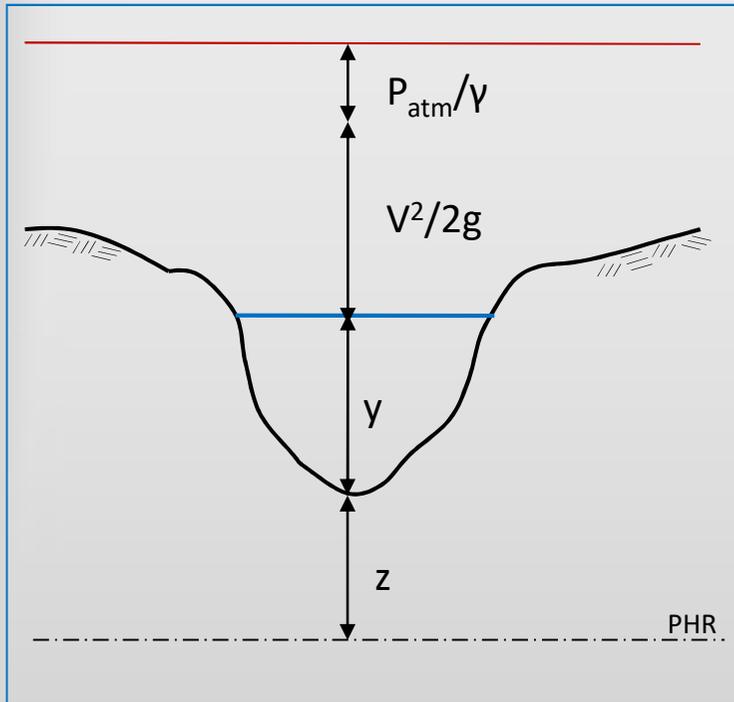
**ENERGIA / CARGA**

**POTENCIAL**

**CINÉTICA**

**PIEZOMÉTRICA**

# CONDUTOS LIVRES



Carga Específica  $H_e$



PHR no fundo do canal

Carga: Altura que representa a energia total numa seção de escoamento

$$H = E_{potencial} + E_{cinética}$$

Considera-se:

$$E_{pot} = z + y$$
$$E_{cin} = V^2/2g$$

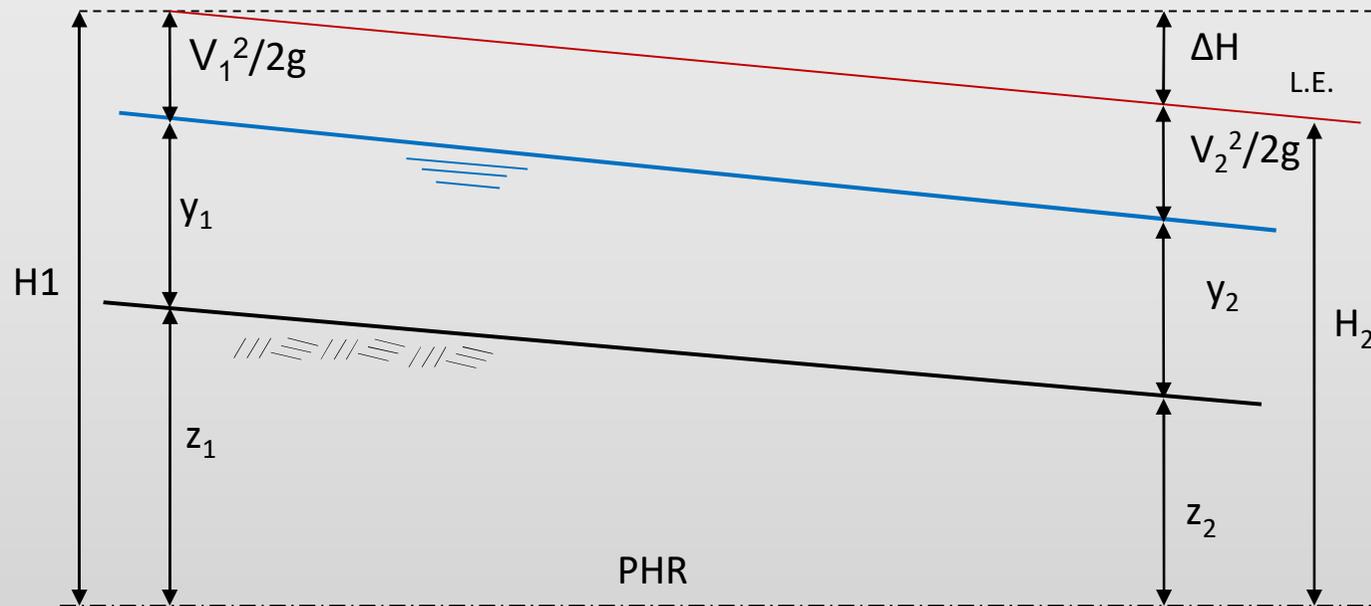
$$H = z + y + \frac{V^2}{2g} + \frac{p_{atm}}{\gamma}$$

- Para uma partícula no fundo:  $E_{pot}=z$
- Para uma partícula na superfície:  $E_{pot}=z+y$

## Escoamento em superfície livre. Parâmetros Característicos

- Profundidade  $y$
- Área molhada  $S$  ou  $A - f(y)$
- Perímetro molhado  $P - f(y)$
- Raio hidráulico  $R_H = \frac{S}{P}$        $D_H = 4R_H$
- Declividade do fundo  $i$
- Carga  $H$
- Declividade da Linha de Energia  $J$

# Declividade da linha de energia



$$i = \frac{\Delta z}{L}$$

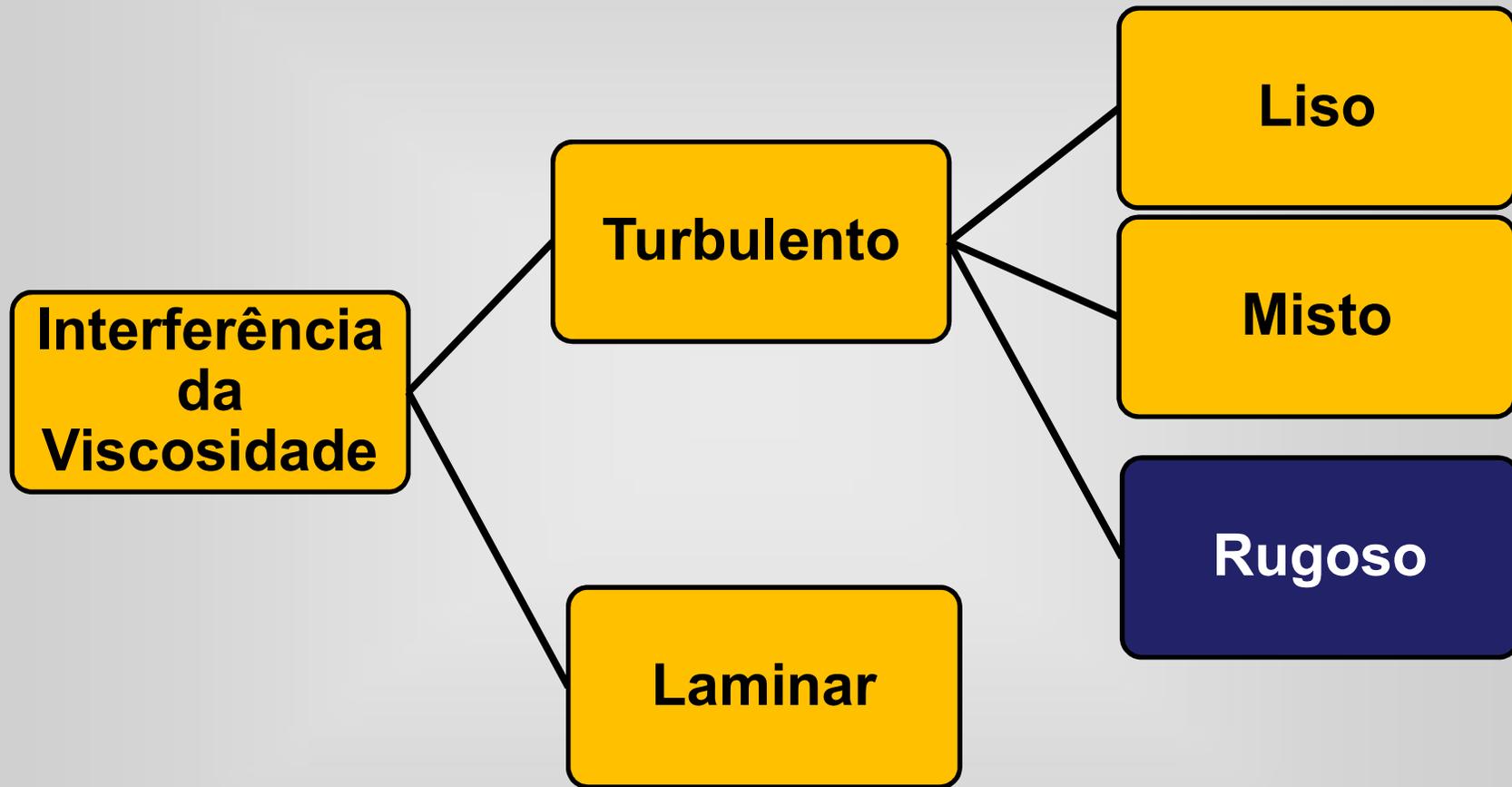
$$J = \frac{\Delta H}{L}$$

\* Vazão de projeto

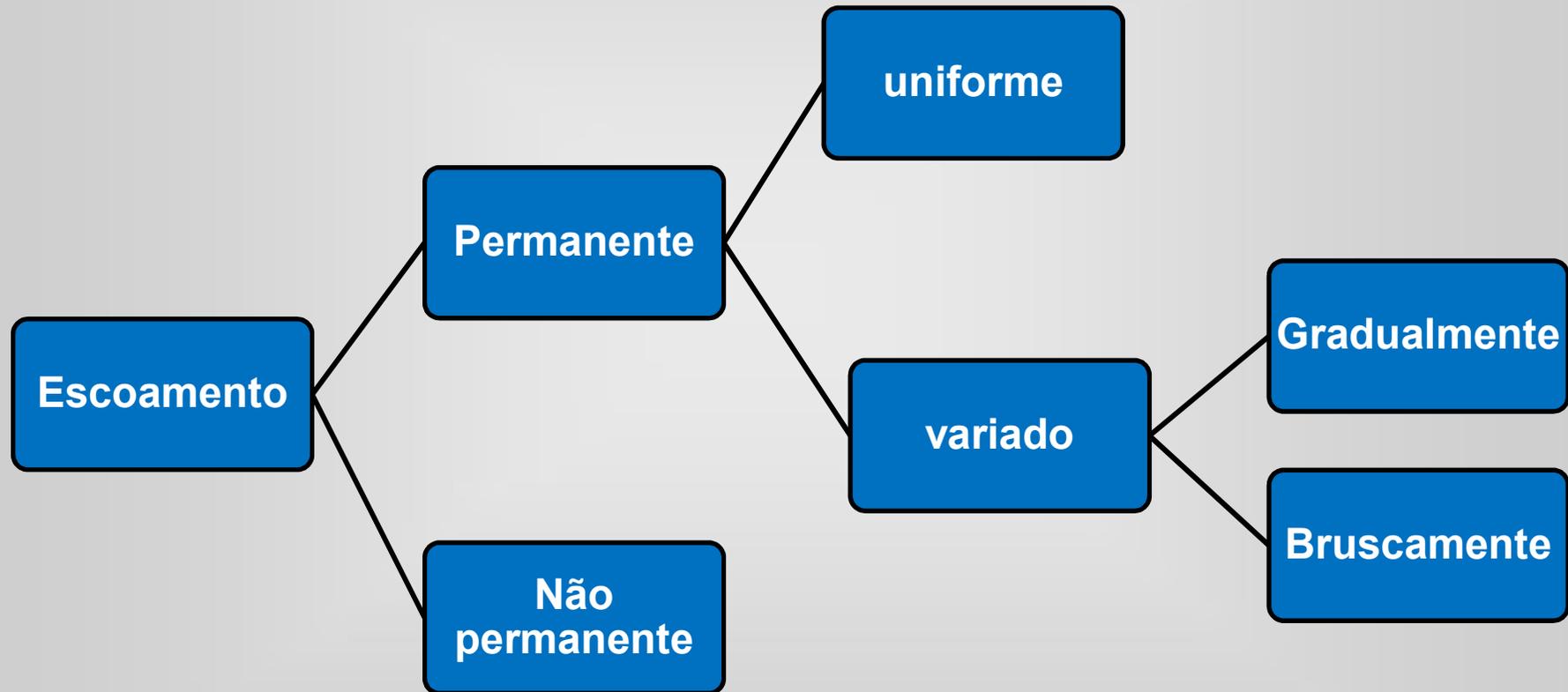
\* Hidrologia: monitoramento  
equação de chuva  
período de retorno



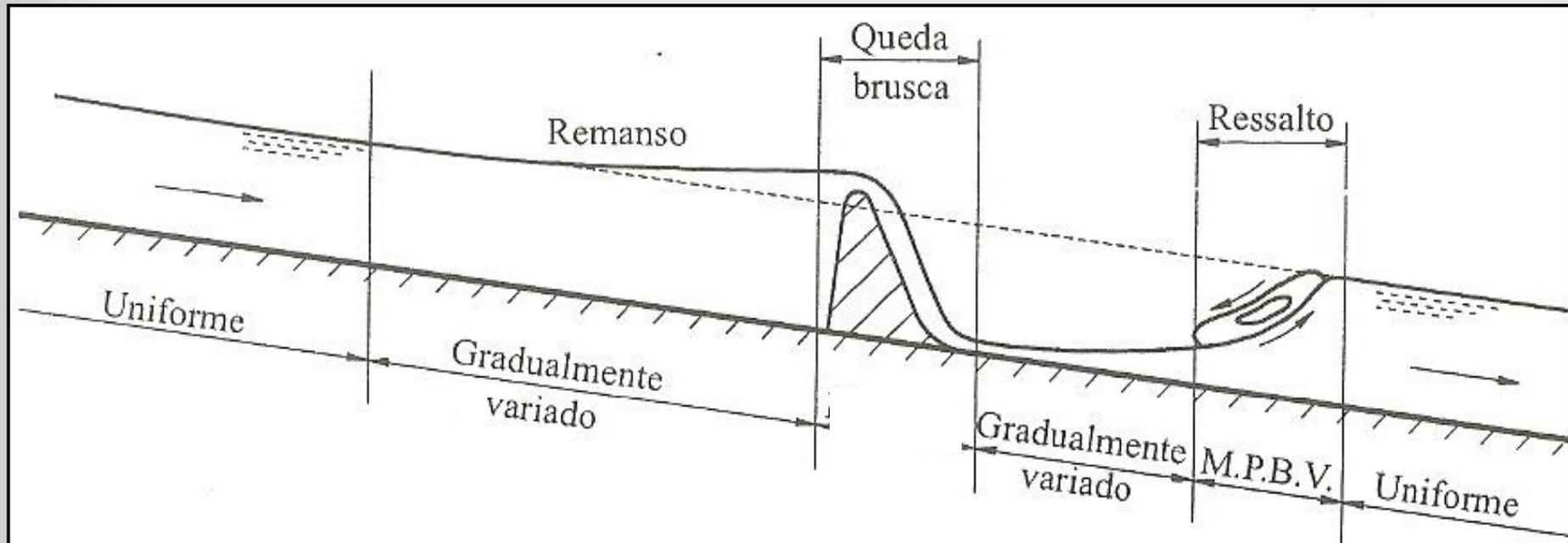
# Tipos de escoamento



# Tipos de escoamento

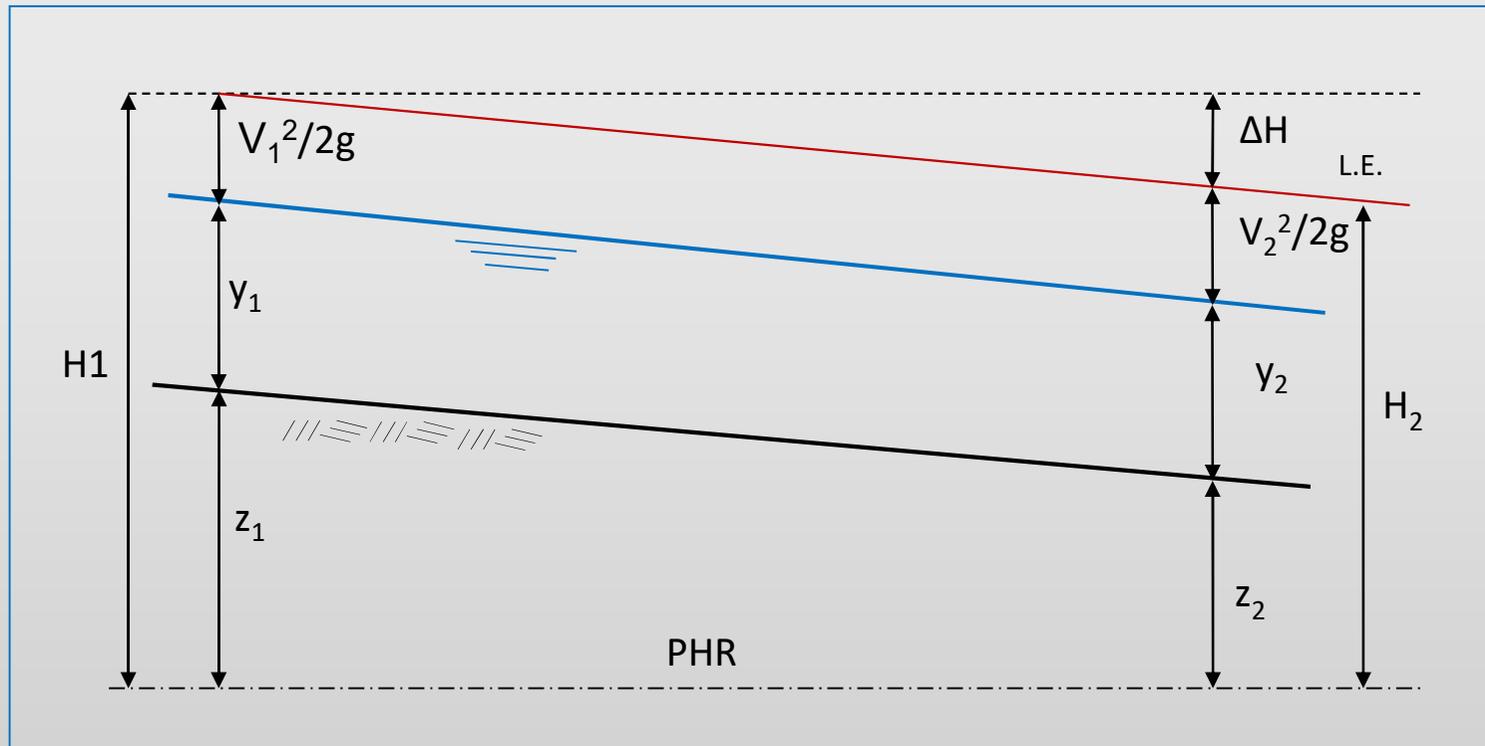


# Escoamento em conduto livre

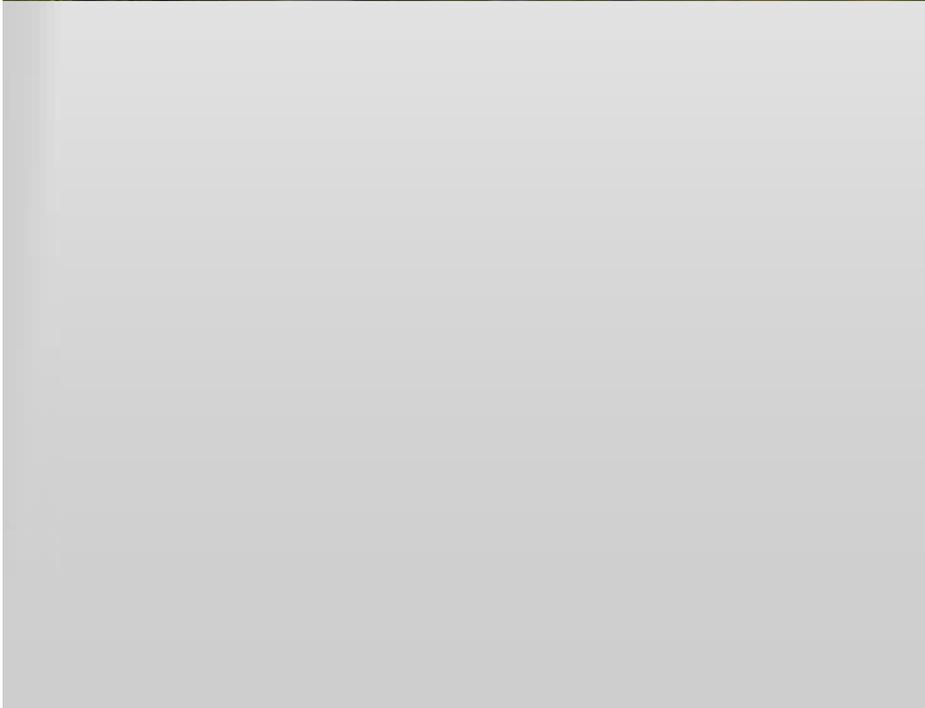
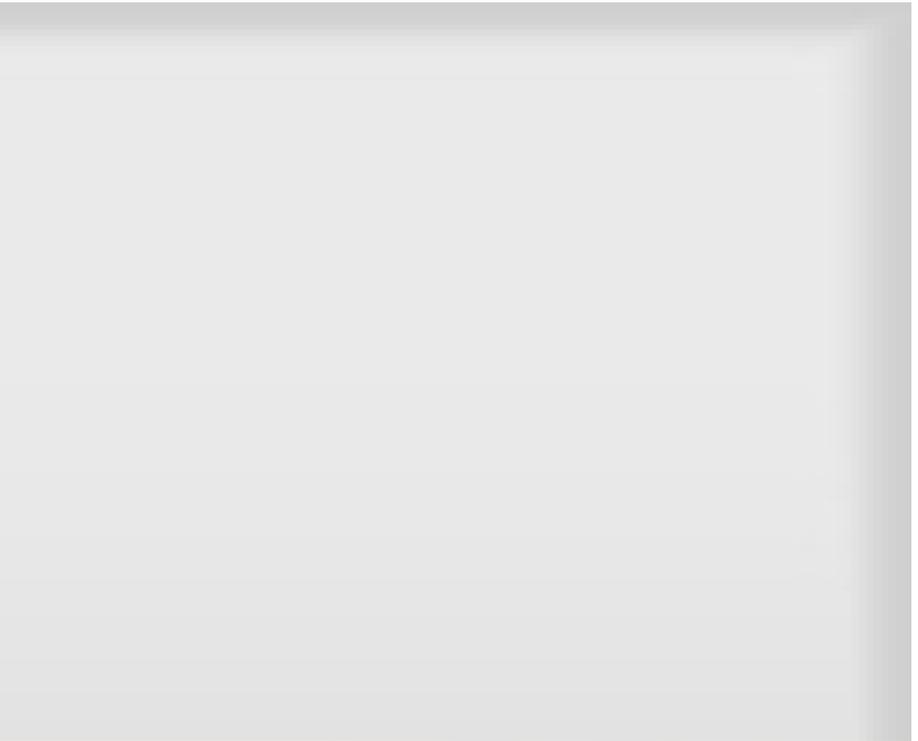


Obs: Qualquer obra no rio vai alterar a linha da água e deve ser previsto no projeto a elevação do nível da água. Elevação do NA gera custo.

# Relação entre a energia potencial e cinética



Bernoulli  $H_1 = H_2 + \Delta H$   $\Rightarrow$   $z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H$





# Equação de Chezy

Fórmula Universal da Perda de Carga:

$$\Delta H = f \frac{L}{D_H} \frac{V^2}{2g} \quad \Rightarrow \quad V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{R_H \cdot J} \quad \Rightarrow \quad V = C \sqrt{R_H \cdot J}$$

**Eq Chezy para condutos livres**  $Q = CS \sqrt{R_H \cdot J}$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad \Rightarrow \quad \text{Manning} \\ \text{Bazin}$$

TABELA 12.2 – Coeficientes de rugosidade de Manning

Natureza das paredes	Condições			
	Muito boa	Boa	Regular	Má
Alvenaria de pedra argamassada	0,017	0,020	0,025	0,030
Alvenaria de pedra aparelhada	0,013	0,014	0,015	0,017
Alvenaria de pedra seca	0,025	0,033	0,033	0,035
Alvenaria de tijolos	0,012	0,013	0,015*	0,017
Calhas metálicas lisas (semicirculares)	0,011	0,012	0,013	0,015
Canais abertos em rocha (irregular)	0,035	0,040	0,045	-
Canais c/ fundo em terra e talude c/ pedras	0,028	0,030	0,033	0,035
Canais c/ leito pedregoso e talude vegetado	0,025	0,030	0,035	0,040
Canais com revestimento de concreto	0,012	0,014*	0,016	0,018
Canais de terra (retilíneos e uniformes)	0,017	0,020	0,023	0,025
Canais dragados	0,025	0,028	0,030	0,033
Condutos de barro (drenagem)	0,011	0,012*	0,014*	0,017
Condutos de barro vitrificado (esgoto)	0,011	0,013*	0,015	0,017
Condutos de prancha de madeira aplainada	0,010	0,012*	0,013	0,014
Gabião	0,022	0,030	0,035	-
Superfícies de argamassa de cimento	0,011	0,012	0,013*	0,015
Superfícies de cimento alisado	0,010	0,011	0,012	0,013
Tubo de ferro fundido revestido c/ alcatrão	0,011	0,012*	0,013*	-
Tubo de ferro fundido sem revestimento	0,012	0,013	0,014	0,015
Tubos de bronze ou de vidro	0,009	0,010	0,011	0,013
Tubos de concreto	0,012	0,013	0,015	0,016
Tubos de ferro galvanizado	0,013	0,014	0,015	0,017
Córregos e rios Limpos, retilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
Igual anterior porém c/ pedras e vegetação	0,030	0,033	0,035	0,040
Com meandros, bancos e poços, limpos	0,035	0,040	0,045	0,050
Margens espraçadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
Margens espraçadas, muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

Fonte: Porto (1998) e Cirilo et al. (2001)

# Número de Froude

Razão entre as forças de inércia e gravitacionais

$$F = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

Sendo:

V=Velocidade média do escoamento (m/s)

y=Altura da linha d'água (m)

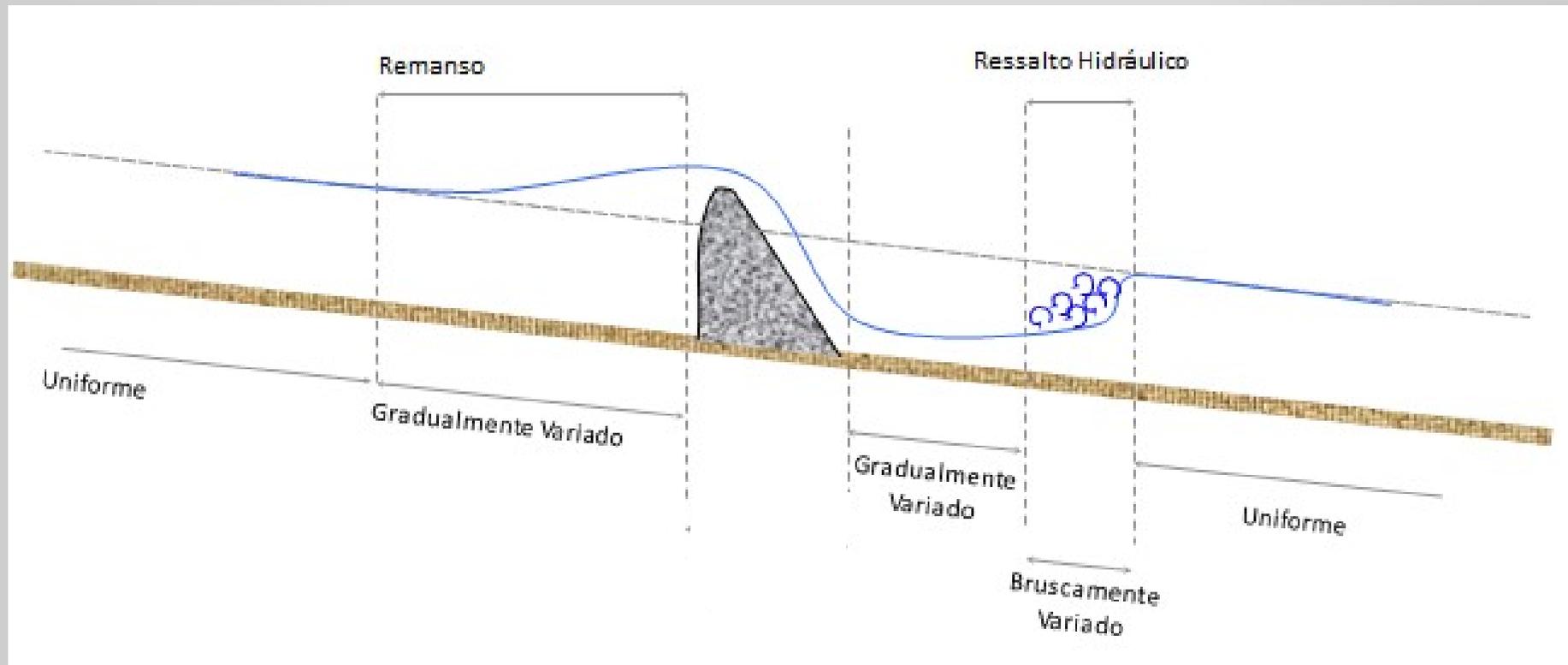
$F > 1$  : Energia cinética predomina. O escoamento é torrencial.

$F = 1$  : Energia cinética e potencial em equilíbrio. O escoamento é crítico.

$F < 1$  : Energia potencial predomina. O escoamento é fluvial.

# ESCOAMENTO PERMANENTE GRADUALMENTE VARIADO

## CURVA DE REMANSO

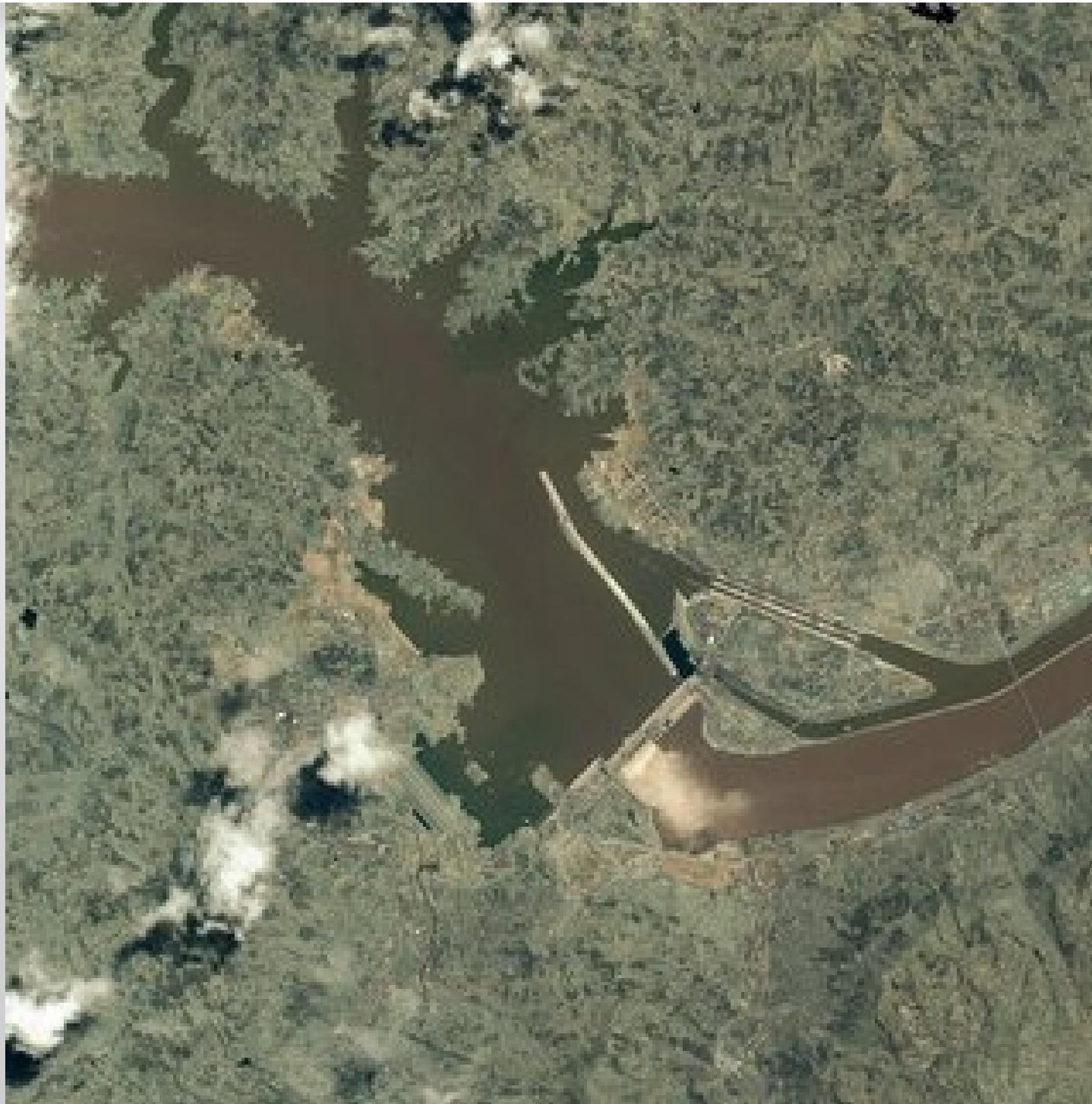


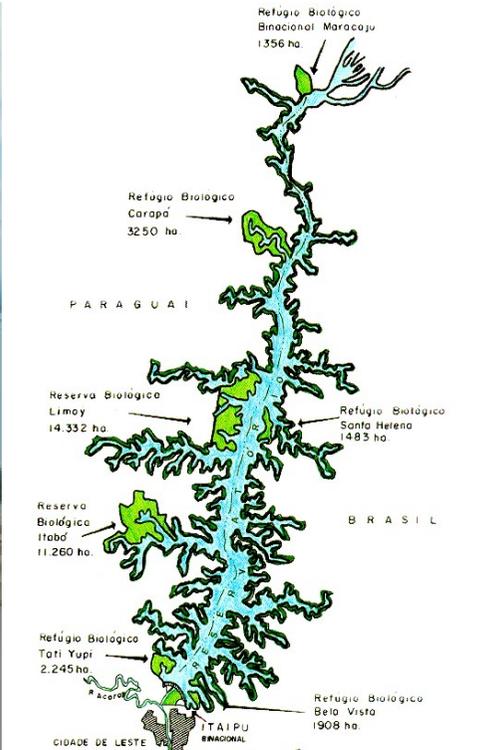
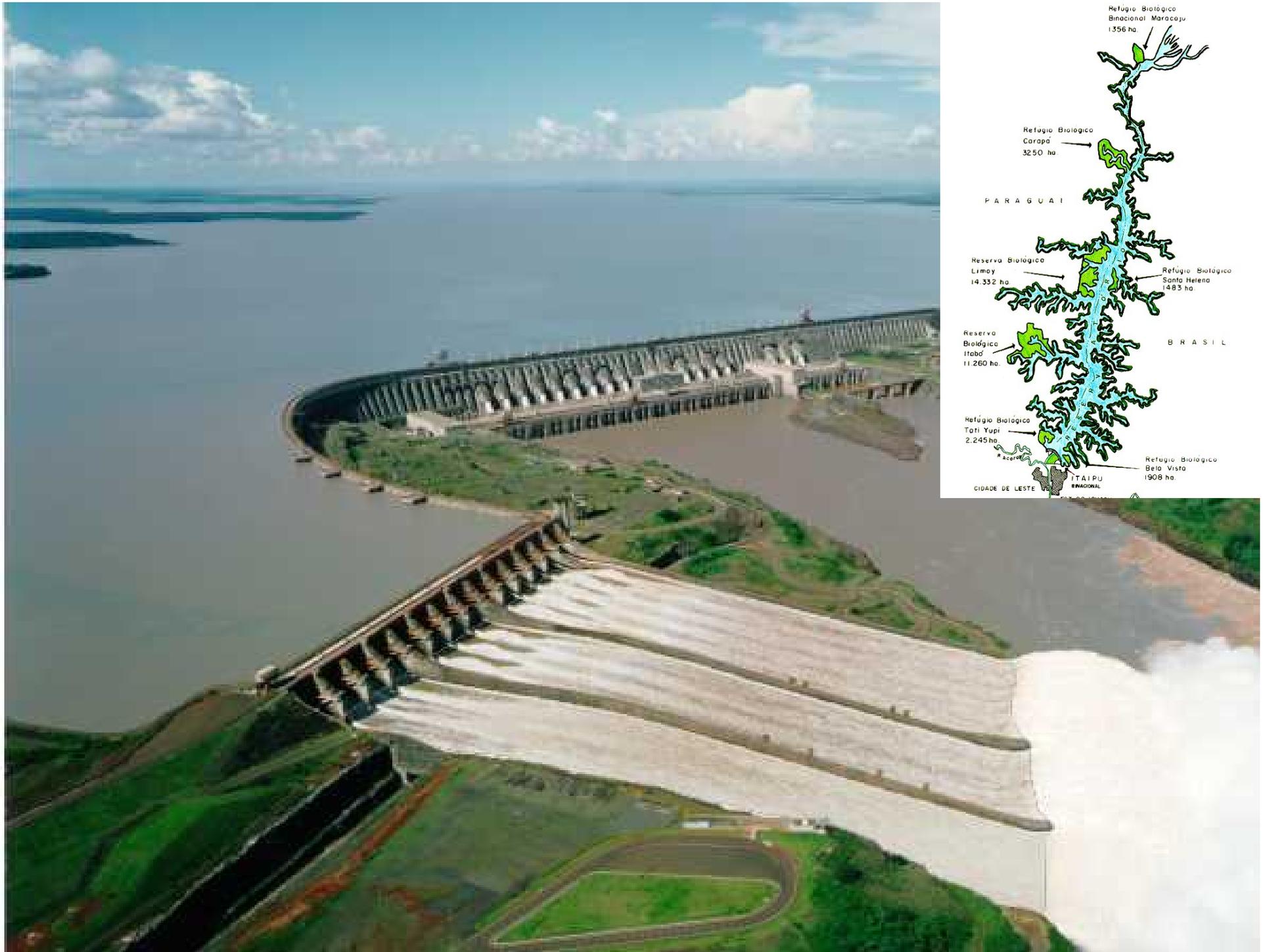
CURVA DE REMANSO – LINHA D'ÁGUA DO ESCOAMENTO GRADUALMENTE VARIADO

1987

2006





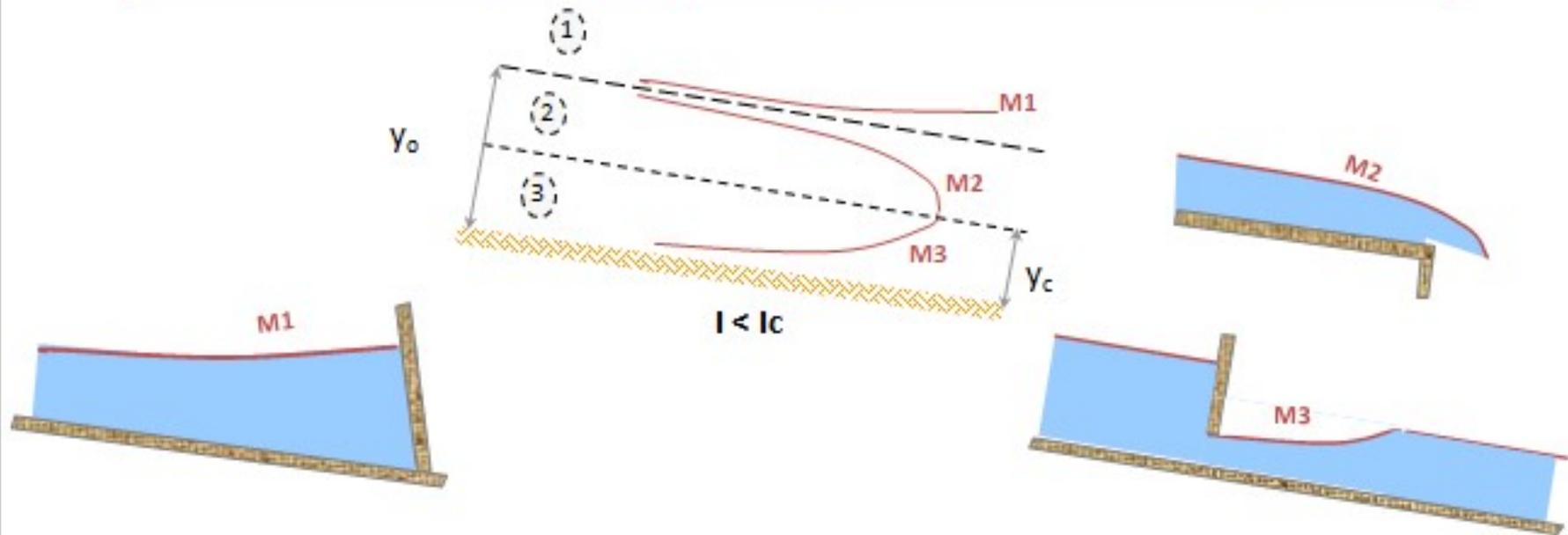


## Tipos de Curvas de Remanso

Declividade	Profundidade	Descrição	Curvas	
			Tipo	Quantidade
$I_o < I_c$	$Y_o > Y_c$	<b>Declividade fraca</b> ( <i>mild slope</i> )	<b>M</b>	3 curvas
$I_o > I_c$	$Y_o < Y_c$	<b>Declividade forte</b> ( <i>steep slope</i> )	<b>S</b>	3 curvas
$I_o = I_c$	$Y_o = Y_c$	<b>Declividade Crítica</b>	<b>C</b>	2 curvas
$I_o = 0$	$\infty$	<b>Declividade nula</b> ( <i>horizontal</i> )	<b>H</b>	2 curvas
$I_o < 0$	-	<b>Declividade negativa</b> ( <i>active</i> )	<b>A</b>	2 curvas

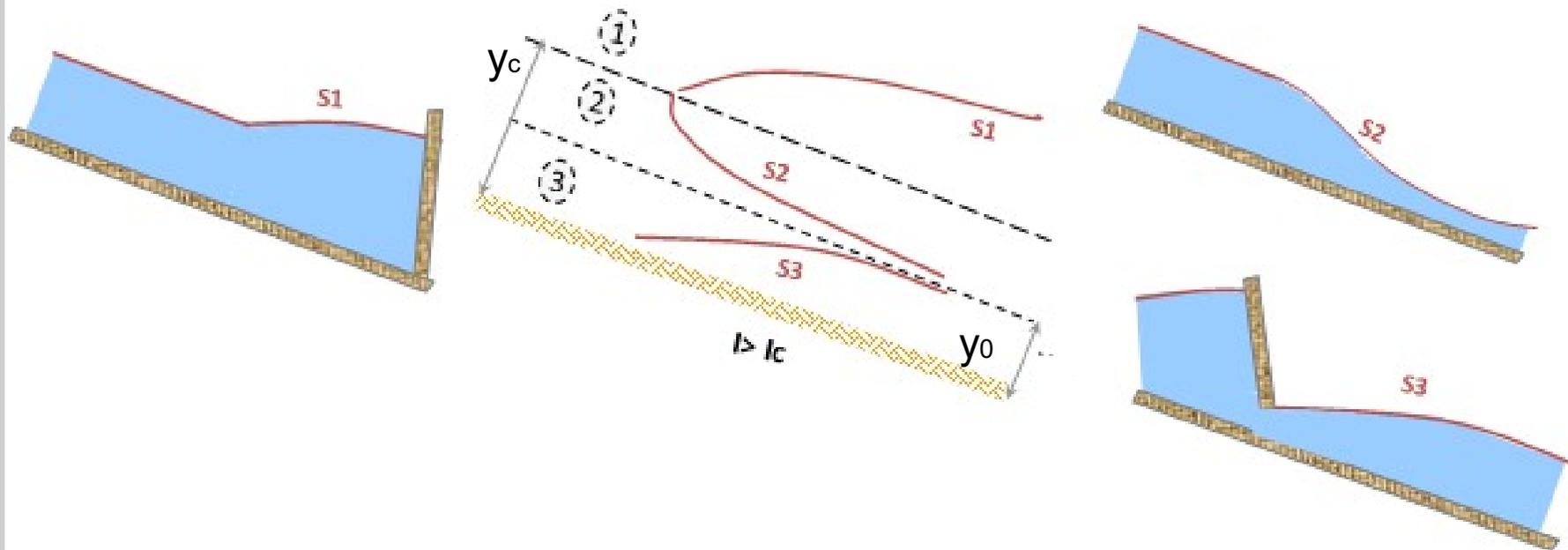
# Canais com Declividade Moderada

Zona	Curva	Profundidade	Tipo de Remanso
1	<b>M1</b>	$y > y_o > y_c$	Elevação
2	<b>M2</b>	$y_c < y < y_o$	Depressão
3	<b>M3</b>	$y < y_c < y_o$	Elevação



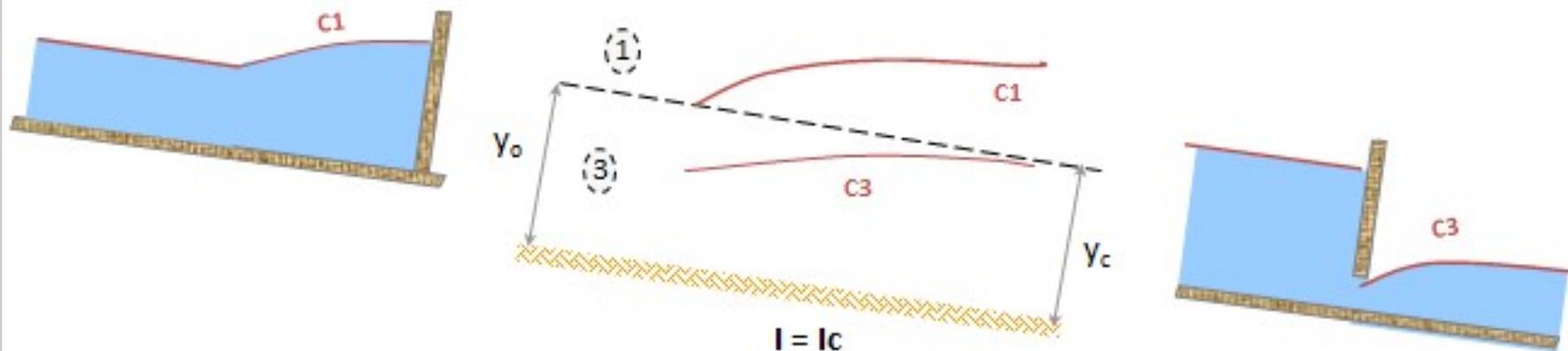
# Canais com Declividade **S**evera

Zona	Curva	Profundidade	Tipo de Remanso
1	<b>S1</b>	$y > y_o > y_c$	Elevação
2	<b>S2</b>	$y_c < y < y_o$	Depressão
3	<b>S3</b>	$y < y_c < y_o$	Elevação



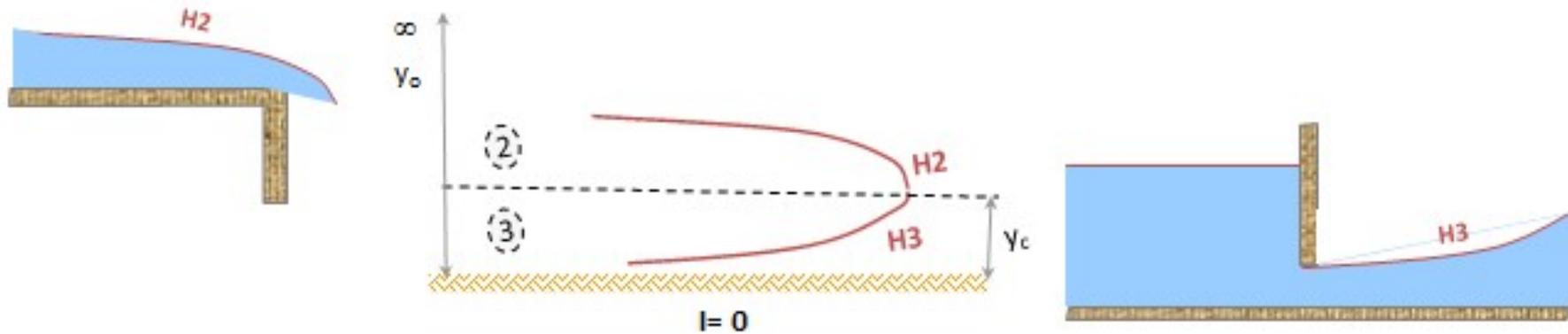
# Canais com Declividade Crítica

Zona	Curva	Profundidade	Tipo de Remanso
1	<b>C1</b>	$y > y_o = y_c$	Elevação
	-	-	
3	<b>C3</b>	$y < y_o = y_c$	Elevação



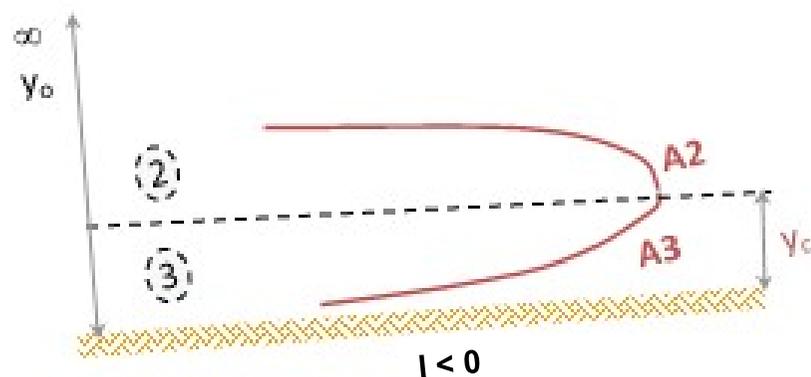
# Canais **H**orizontais (Declividade Nula)

Zona	Curva	Profundidade	Tipo de Remanso
	-	$\rightarrow \infty$	Não existe esta zona
2	<b>H2</b>	$y > y_c$	Depressão
3	<b>H3</b>	$y < y_c$	Elevação



## Canais em **A**ctive (Contrainclinados)

Zona	Curva	Profundidade	Tipo de Remanso
	-	$\rightarrow \infty$	Não existe esta zona
2	<b>A2</b>	$y > y_c$	Depressão
3	<b>A3</b>	$y < y_c$	Elevação



## ANÁLISE DO ESCOAMENTO GRADUALMENTE VARIADO: O REMANSO

Aplicando Bernoulli entre as seções 0 e 1:

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + y_1 = z_0 + \frac{V_0^2}{2g} + y_0 + \Delta H$$

$$z_1 - z_0 = \Delta z = \Delta x \cdot i$$

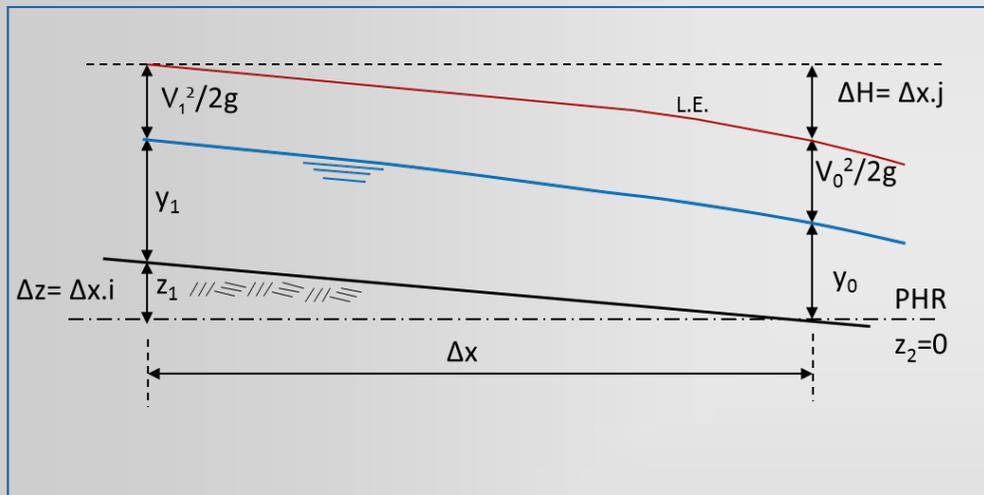
$$H_1 - H_0 = \Delta H = \Delta H \cdot j$$

$$\frac{V_1^2}{2g} + y_1 = He_1$$

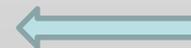
$$\frac{V_0^2}{2g} + y_0 = He_0$$

$$\Delta x \cdot i = He_0 - He_1 + \Delta x \cdot j$$

$$\Delta x = \frac{He_0 - He_1}{(i - j)}$$

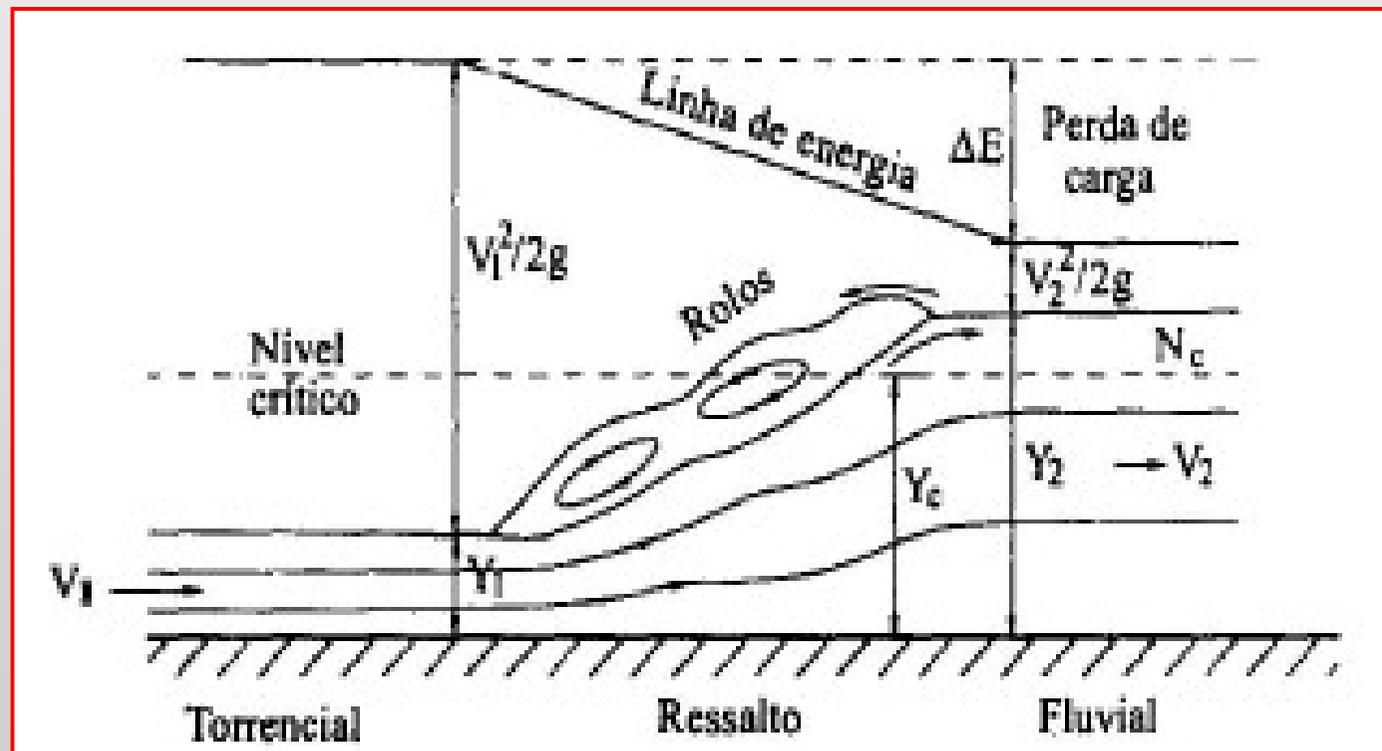


“Step Method”



# Escoamento Permanente Bruscamente Variado

## RESSALTO HIDRÁULICO



## RESSALTO HIDRÁULICO

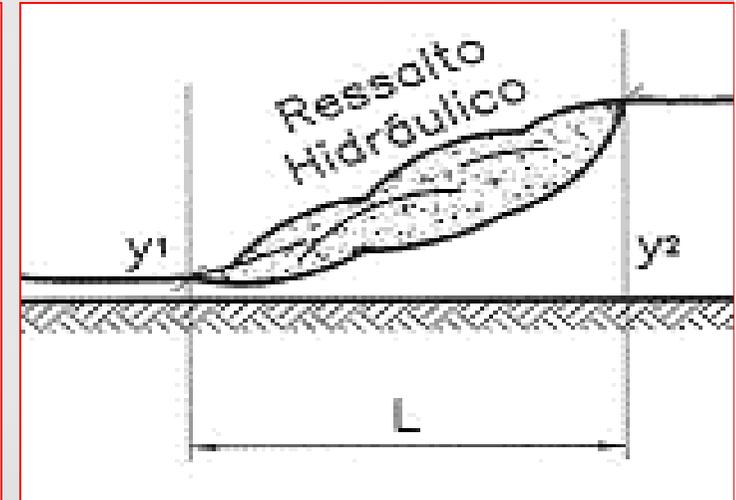
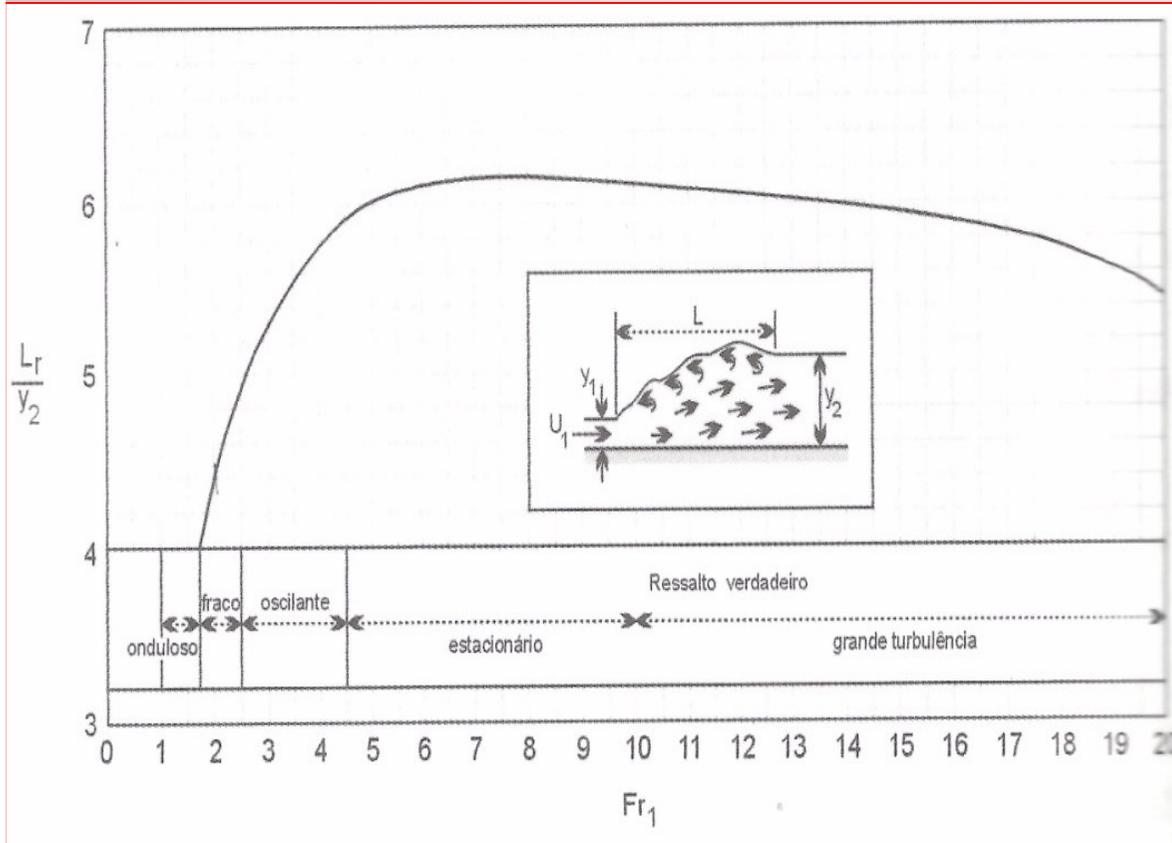
- Fenômeno que ocorre **SEMPRE** que acontece a transição de um escoamento torrencial para escoamento fluvial.
- Ocorre a elevação brusca da linha da água em curta distância.
- Há instabilidade na superfície com ondulações.
- Ocorre considerável **perda de energia** → dissipadores de energia.



# Eficiência do Ressalto

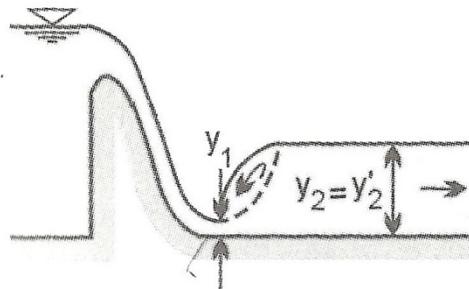
$$\epsilon = \frac{\Delta H}{He_1} = \frac{He_1 - He_2}{He_1}$$

# Comprimento do Ressalto

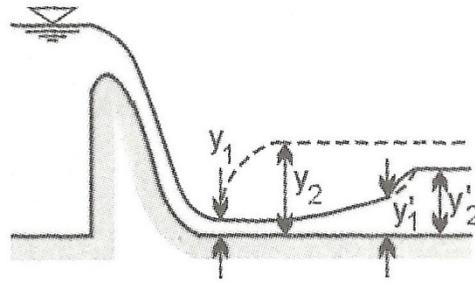


$$L_{RESS} = 6,9(y_2 - y_1)$$

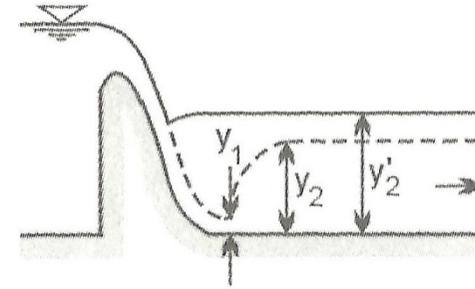
# Localização do ressalto



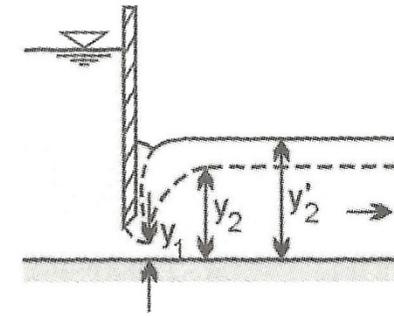
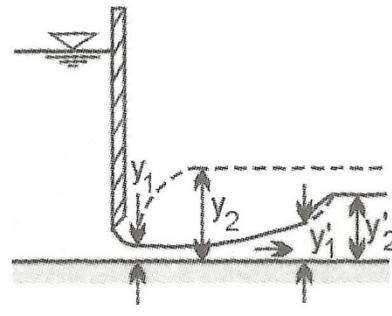
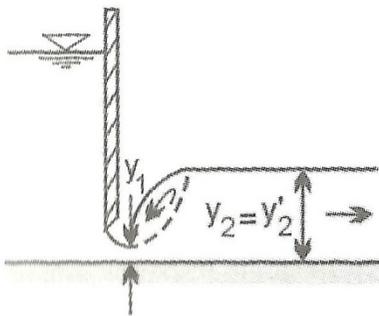
Caso 1:  $y'_2 = y_2$



Caso 2:  $y'_2 < y_2$



Caso 3:  $y'_2 > y_2$



Sendo:

$y_2$ : profundidade conjugada do ressalto a jusante.

$y'_2$ : profundidade final do escoamento a jusante

**MEDIDORES  
DE VAZÃO EM CONDUTOS LIVRES**

**Estruturas de controle:** relação bem definida entre a carga  $H$  e a vazão  $Q$   
Exemplos: vertedores, orifícios.



Extravasador de Superfície e de Fundo

# Vertedor Triangular



# UTILIZAÇÃO DOS VERTEDORES

- Medição da vazão em cursos d'água.
- Órgãos de descarga (extravasores) de reservatórios.

# Vertedor Retangular de Parede Delgada

## VAZÃO

$$Q = C_Q L H^{3/2}$$

**Q** = Vazão

**L** = Largura do vertedor

**C<sub>Q</sub>** = Coeficiente de vazão

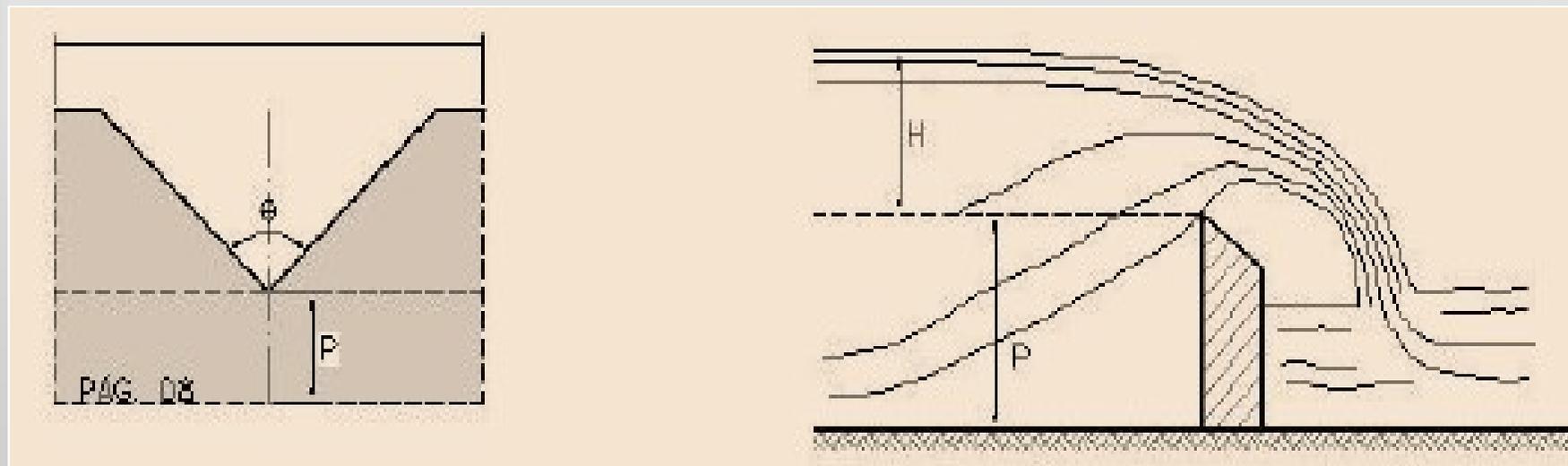


# Vertedor Triangular de Paredes Delgadas

*Para  $\theta = 90^\circ$  - Thompson*

$$Q = 1,42 H^{5/2}$$

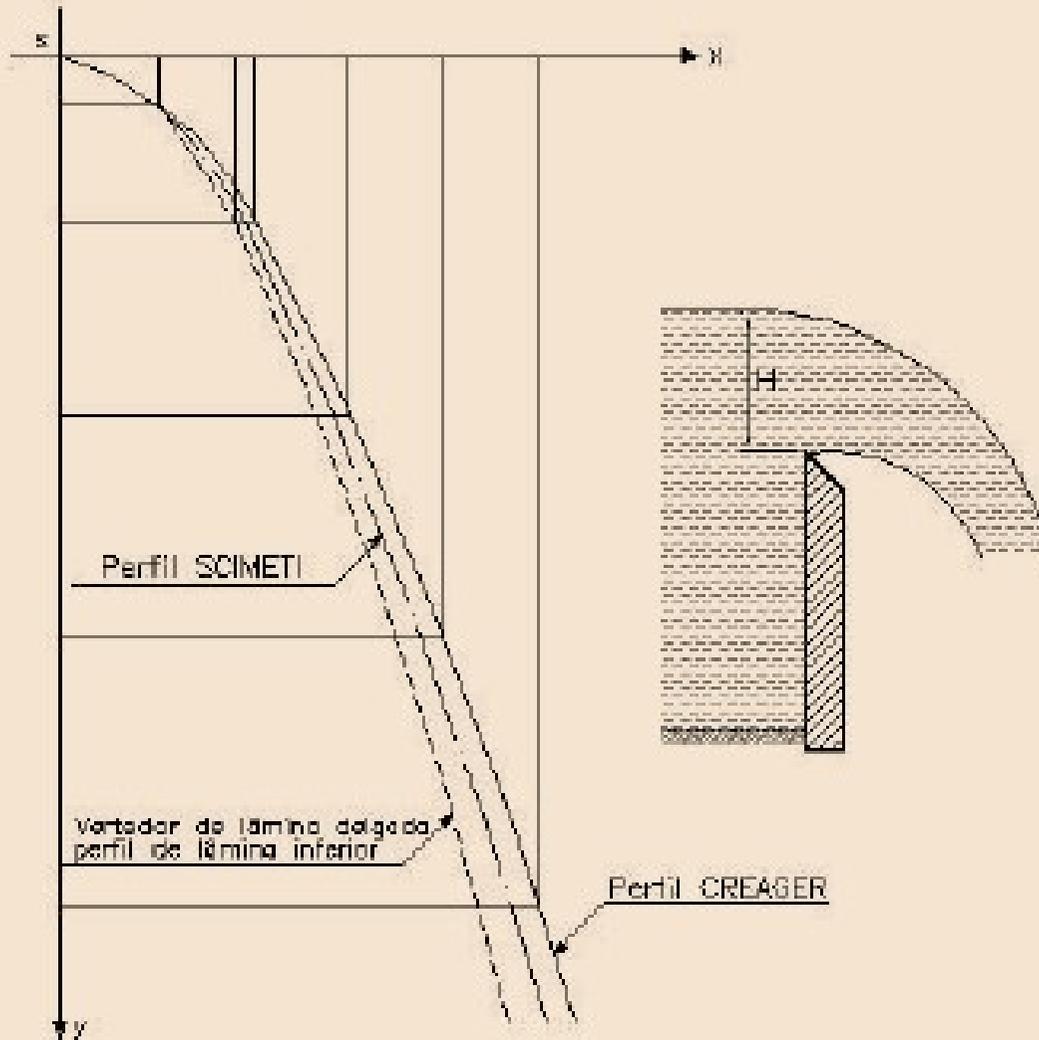
$H$  : (m) ;  $Q$  : (m<sup>3</sup>/s)



## Vertedores com Perfis Normais

**Creager:**

$$Y = 0,47 \left[ \frac{x^{1,30}}{H^{0,30}} \right]$$



Como se trata de um vertedor retangular, a vazão é dada por:

$$Q = C_Q L H^{3/2}$$

**Perfil muito deprimido:** Pressões negativas – cavitação.

**Perfil muito comprimido:** Pressões positivas – menor vazão

# CALHA PARSHALL

- Redução de Largura – regime crítico (permite estabelecer a relação entre a vazão e a carga a montante)
- 3 trechos: **convergente, garganta central e divergente.**
- A largura  $W$  da garganta central indica o tamanho nominal da calha.

## Vazão: escoamento livre ou afogado

$$Q_{\text{livre}} = 0,381 \cdot h_1^{1,58}$$

$h_1$  (m)

$Q_{\text{livre}}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

Afogado – interferência do NA jusante

$$Q_{\text{AFOGADO}} = Q_{\text{livre}} - \Delta Q_{\text{REDUÇÃO}}$$

