

# **Portos e Obras Fluviais e Marítimas**

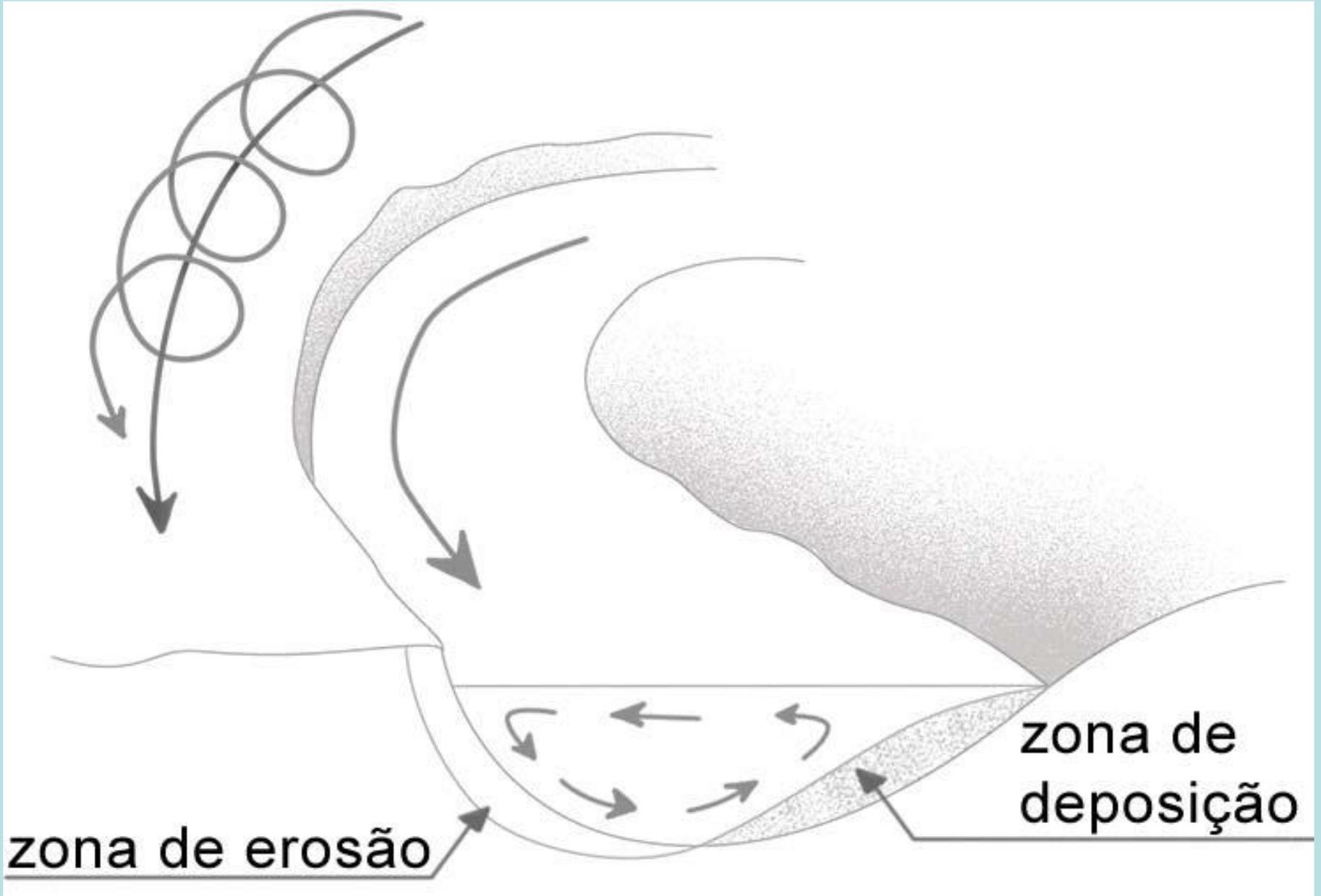
## **PHA 3402**

### **Desenvolvimento de rios – Princípios Básicos de Modelação**

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

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

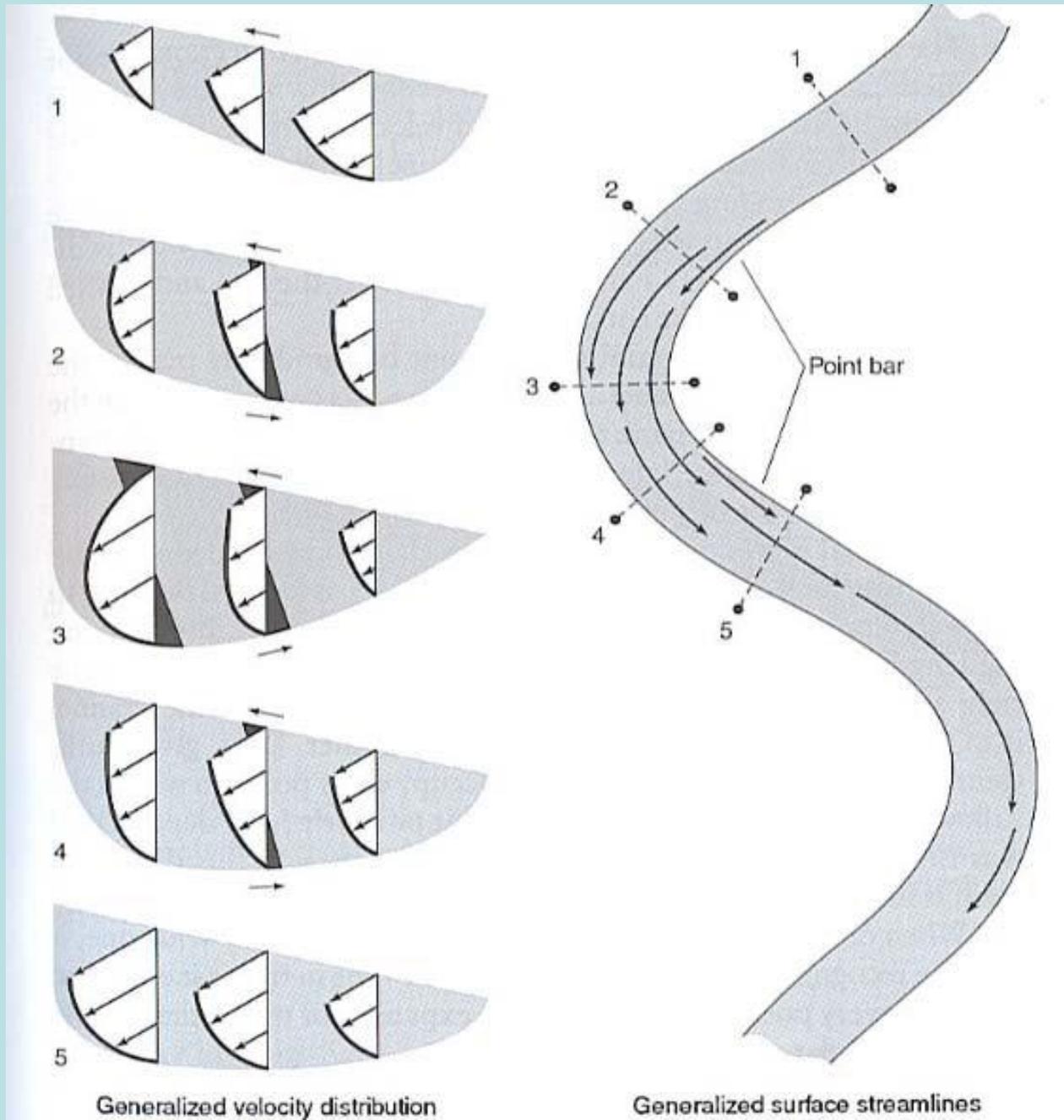
# Escoamento em curva – corrente helicoidal



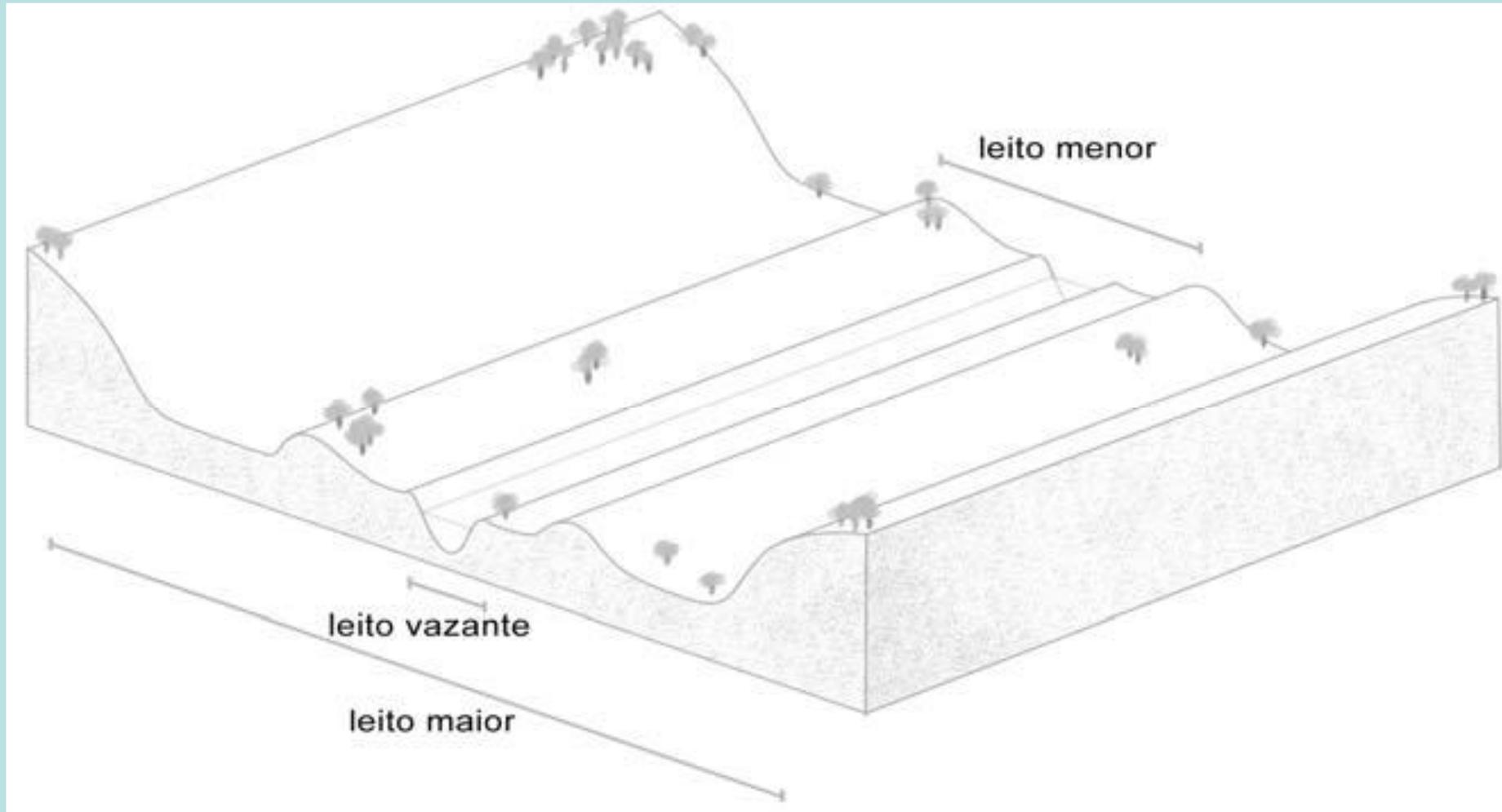
# Formação de correntes transversais gerando transporte de sedimentos e remodelação de leito

- Trechos retilíneos;
- **Formação de correntes secundárias no plano perpendicular ao fluxo, formando duas ou mais células de circulação.**
- Correntes induzidas pela tensão de cisalhamento (*stress induced*);
- **As correntes aparecem em virtude de uma anisotropia na distribuição das tensões de cisalhamento junto ao leito.**

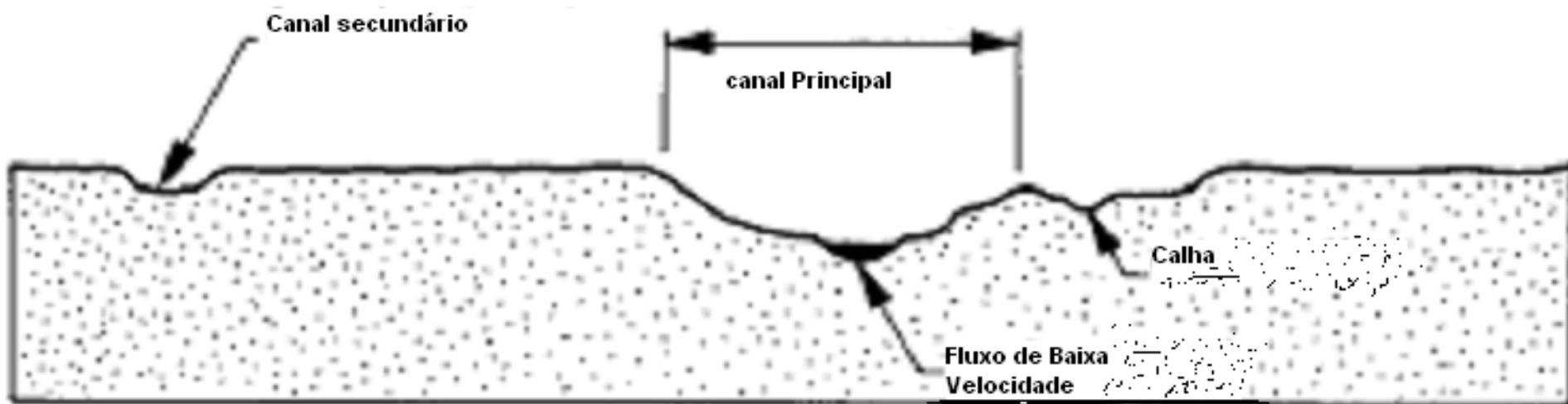
# Distribuição de **Velocidade** ao longo da curva



# Formas geométricas do canal fluvial

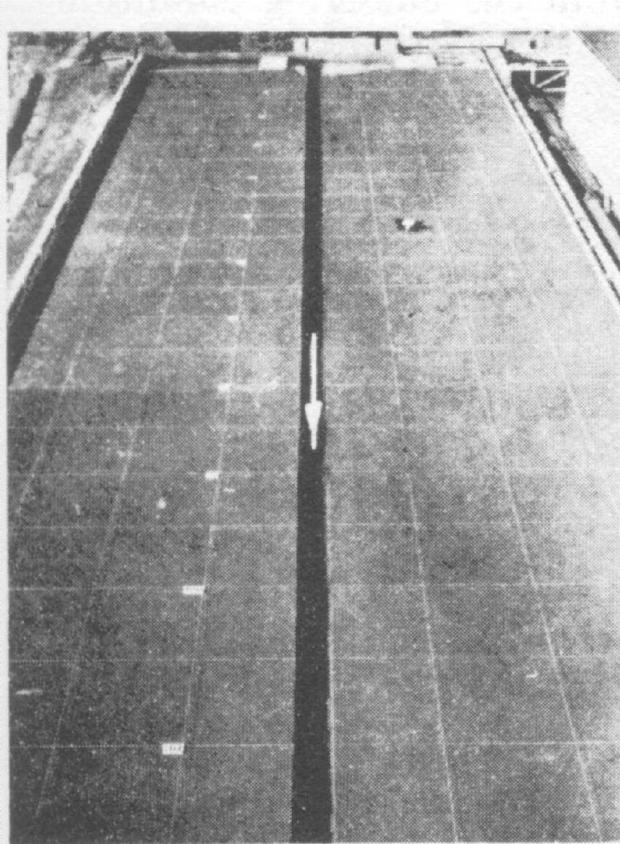


# Tipos de canais, quanto à presença de escoamento

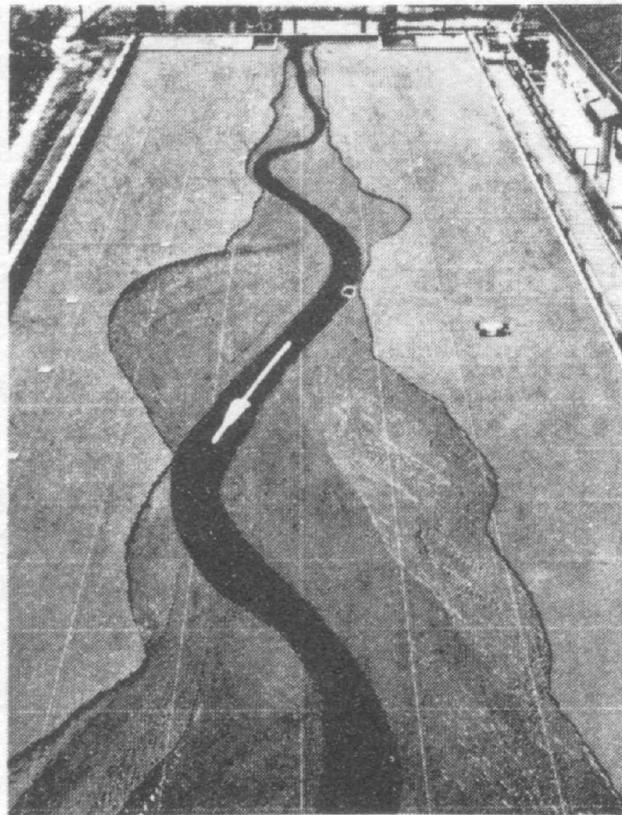


# MORFOLOGIA FLUVIAL

## TRAÇADO EM PLANTA: OBSERVAÇÕES EM LABORATÓRIO



INITIAL STRAIGHT CHANNEL

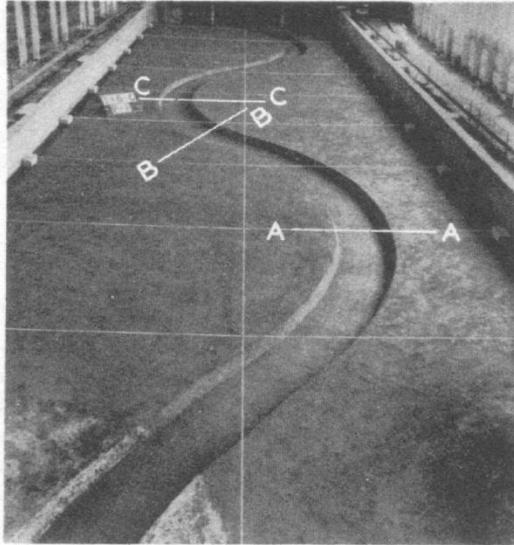


CHANNEL AFTER 48 HRS  
OF FLOW

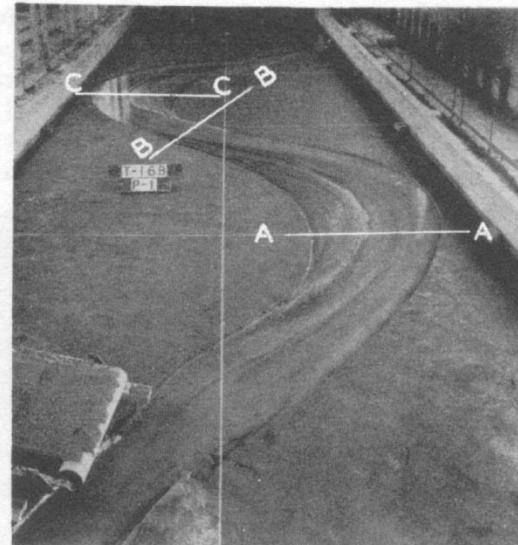


CHANNEL AFTER 72 HRS  
OF FLOW

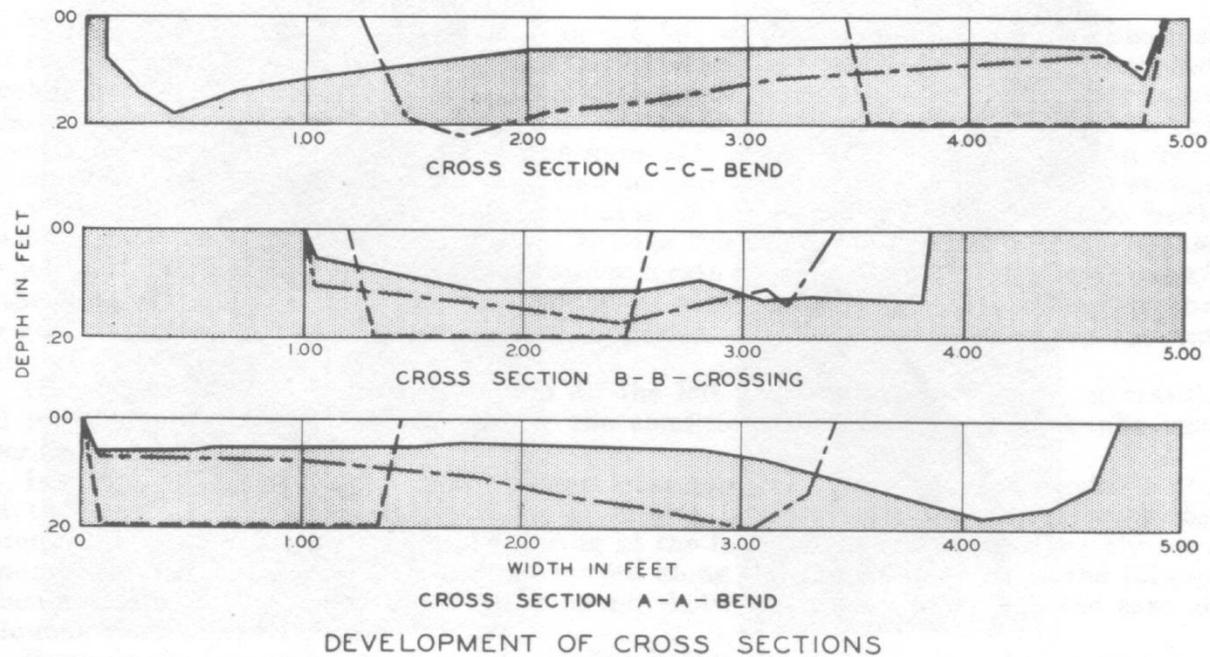
# MORFOLOGIA FLUVIAL - TRAÇADO



INITIAL CHANNEL

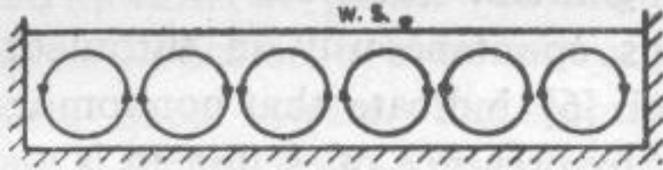


CHANNEL AFTER 12 HOURS

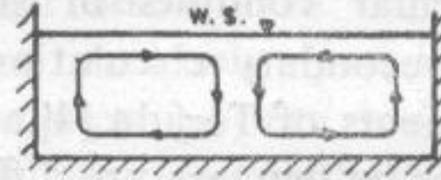


# MORFOLOGIA FLUVIAL

## TRAÇADO EM PLANTA: OBSERVAÇÕES EM LABORATÓRIO



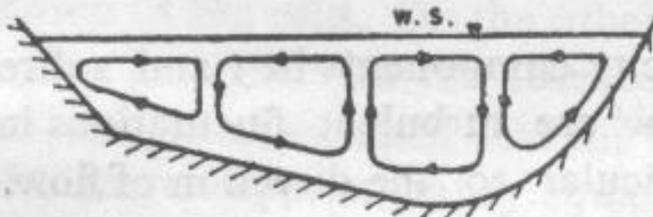
(b) TERADA



(a) MAX MÖLLER AND STERNS



MOVABLE BED  
(c) CASEY



(e) GIANDOTTI (ON PO RIVER, ITAL.)

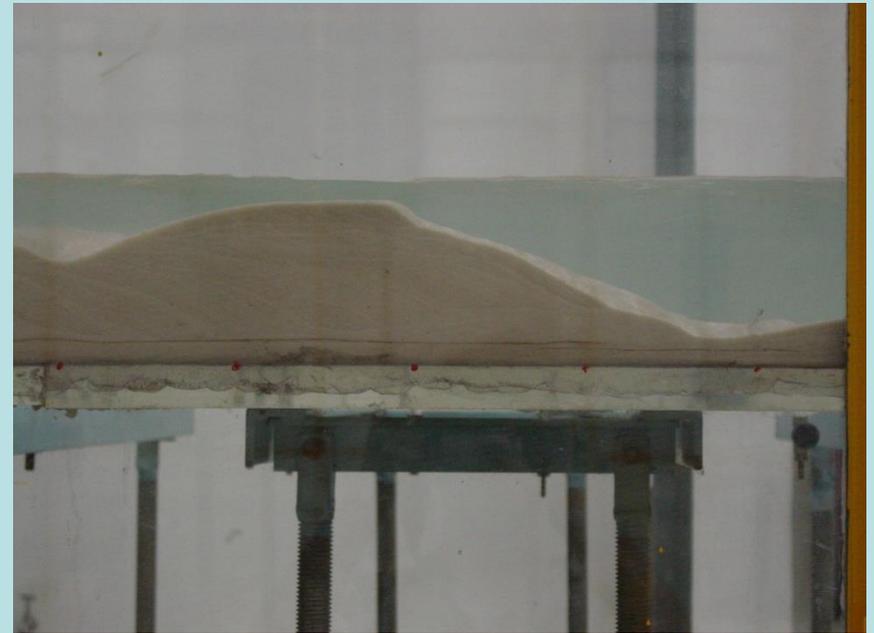
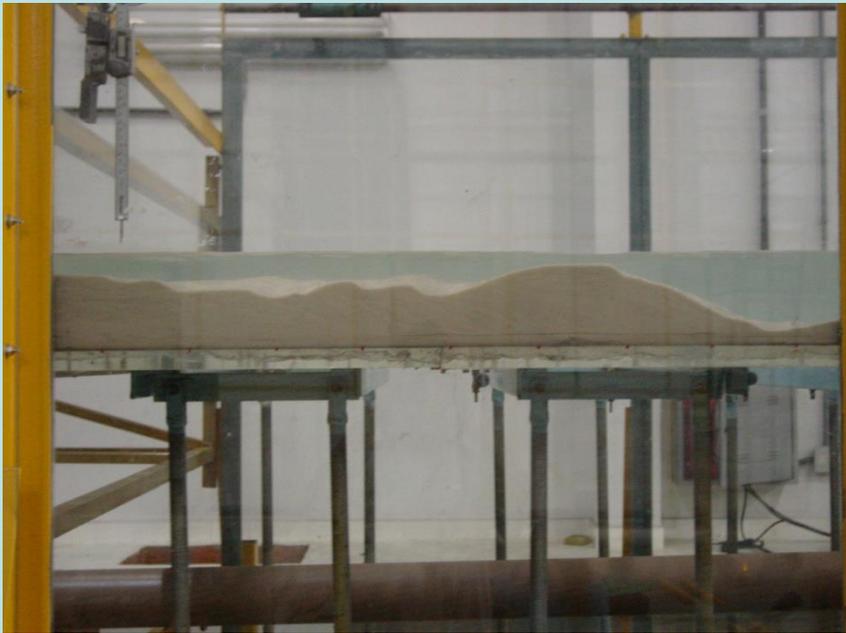


(d) NEMENYI

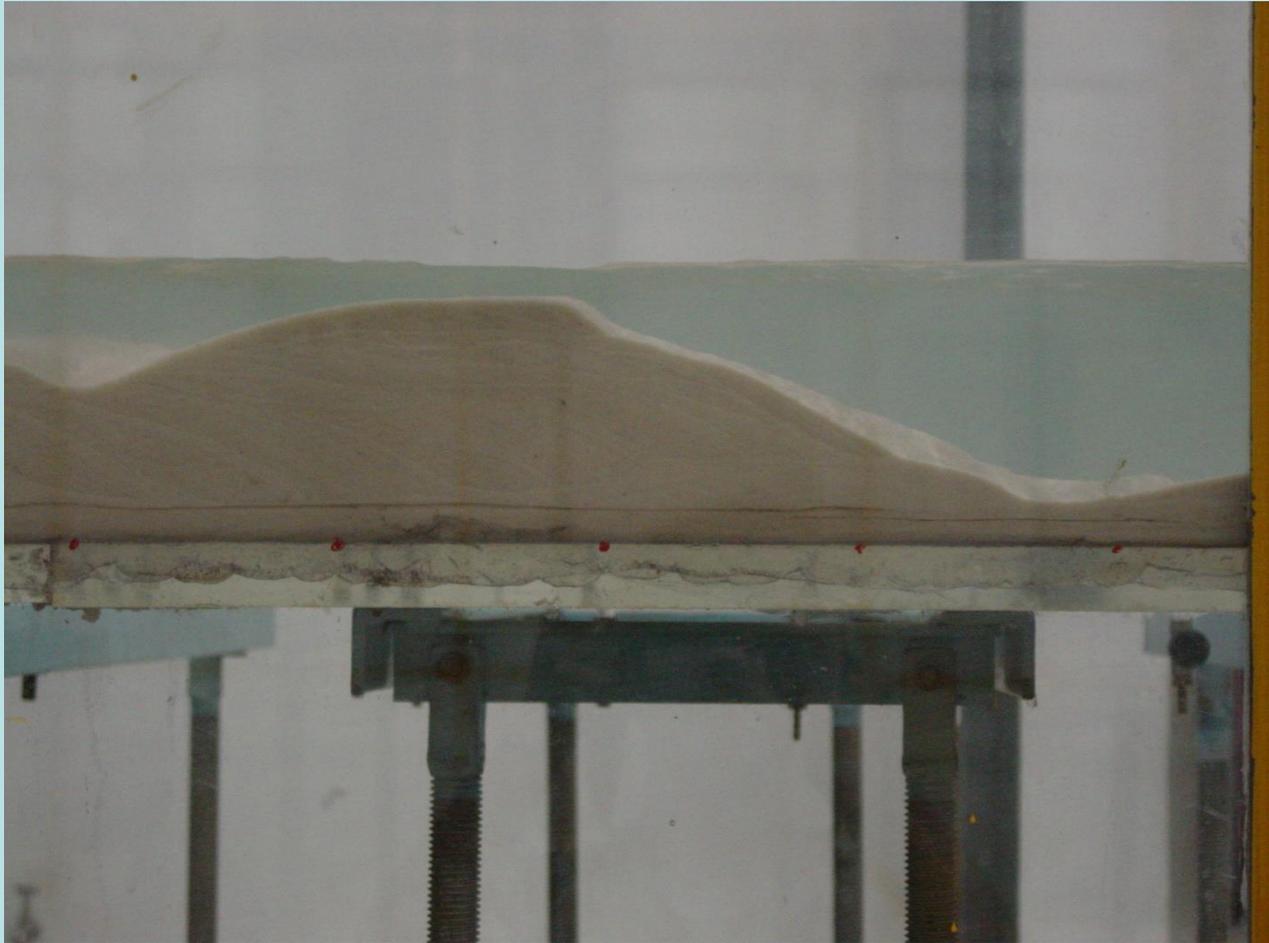
# Transporte de Sedimentos – Formação de dunas- Processo de sedimentação- aumento da declividade



# Transporte de Sedimentos – Formação de dunas- Processo de sedimentação- aumento da declividade

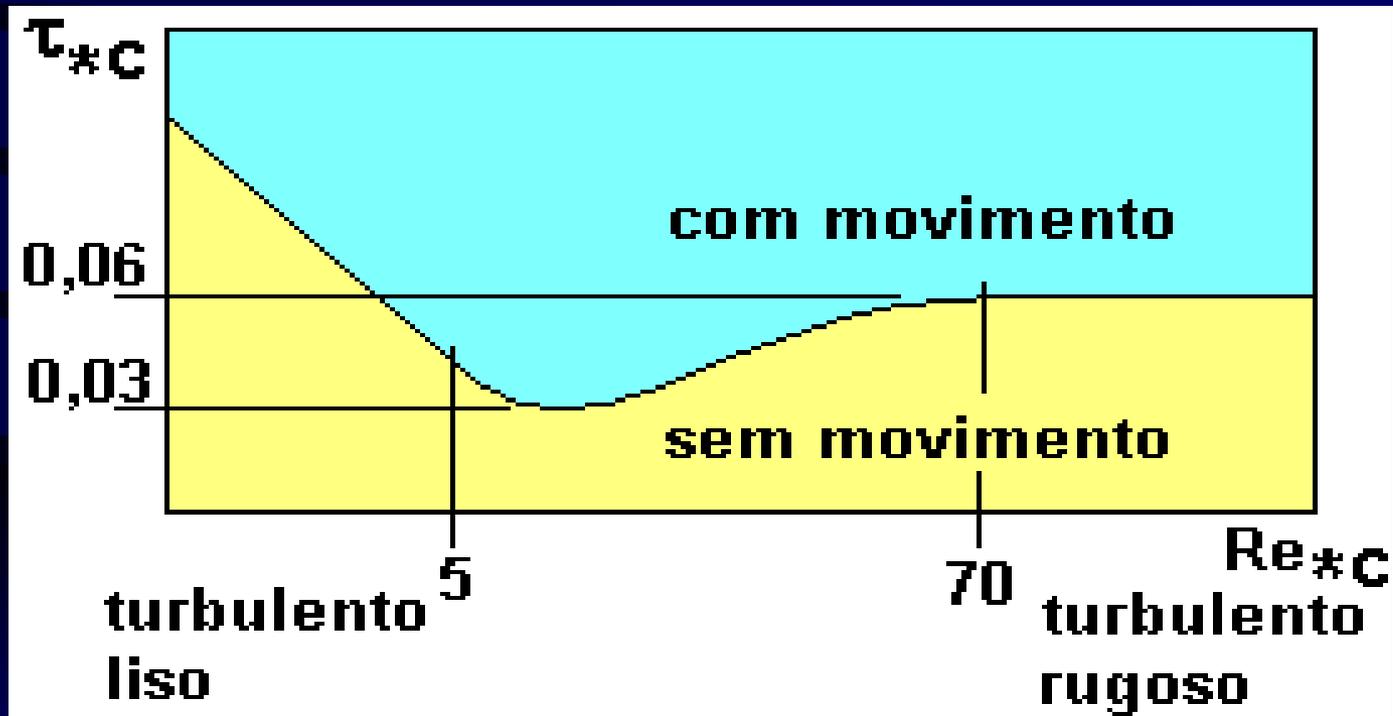


# Transporte de Sedimentos – Formação de dunas- Processo de sedimentação- aumento da declividade



# 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 ( $Re_*$ ))

# Encouraçamento do fundo

- Escoamento sobre leito com granulometria estendida;
- **Princípio da seleção;**
- material mais fino tende a ser arrastado primeiro;
- **arraste seletivo faz com que o material mais grosso forme uma capa superior de fundo;**
- Protege ou cobertura do material original que se encontra abaixo dele;
- **Este fenômeno denomina-se encouraçamento do fundo.**
- Tendência à Erosão em função de determinado escoamento

# Tipos de Estabilidade

- **Estabilidade Estática:** Ocorre quando um escoamento tem capacidade de carregar muito mais partículas sólidas do que realmente está carregando, mas, ao mesmo tempo, não possui energia suficiente para movimentar o material do fundo ou das margens do canal.
- Este tipo de equilíbrio é dito estático, pois não ocorrem alterações na forma da seção transversal, ou na declividade, ao longo do tempo.

# Tipos de Estabilidade

- **Estabilidade Dinâmica** : Largura, profundidade e declividade variam conforme o regime de vazões líquida e sólida.
- Dessa forma, podem ocorrer ajustes anuais nas características geométricas do canal de acordo com a variação do hidrograma.
- Desde que estas condições mantenham-se praticamente as mesmas ao final de cada ciclo.

# Erosão – Ação do escoamento

MD - Deposição – ME – Curva do Rio



# Erosão – Ação do escoamento

MD - Deposição – ME – Curva do Rio



# Estabilização

- Os trechos do rio em que as alterações nas características geométricas (provocadas pelos mecanismos de erosão ou sedimentação) são praticamente imperceptíveis;
- A modelação tornou-se tão lenta, que as conformações do álveo permanecem constantes durante anos;
- As principais características da seção transversal, **declividade e traçado planimétrico** não sofrem mais modificações significativas.

# Equilíbrio do Rio

- Progressão secular
- Rompimento rápido e por várias formas.
- Ação direta ou indireta ( Bacia ).
- Exemplos : Alteração do recobrimento da bacia,  
Construção de Barragem, Retificação, Extração de areia...
- Obras: Conhecimento das leis que regem o equilíbrio e evolução

# Meandros Fluviais

- **Processos erosivos sucessivos, que se desenvolvem em forma de “S“, propagando-se para jusante;**
- **O escoamento busca sua condição de equilíbrio, realizando mínimo trabalho em curva, erodindo a margem côncava das seções em curva e provocando deposição na margem convexa. Ocorre nesta situação a diminuição da declividade do leito;**

# Meandros Fluviais

- **Ao encontrar um obstáculo, o escoamento muda de direção gerando o processo erosivo, por incidência do fluxo junto a margem.**

# Meandros Fluviais

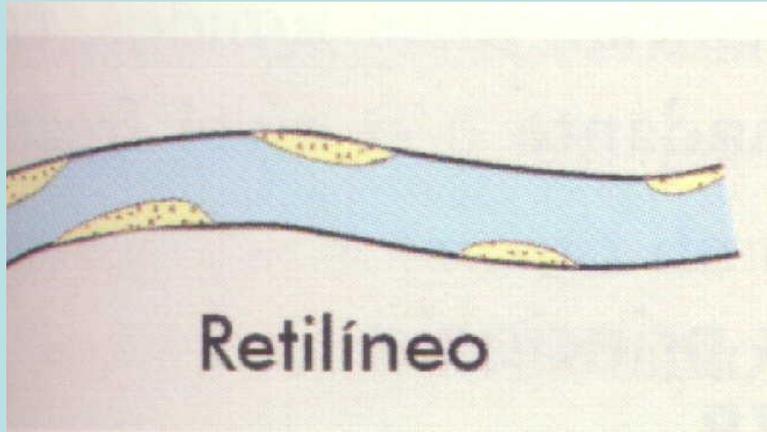
- Não existe curso d'água reto.
- **Distância “d “ em linha reta :  $d \leq 10 L$  ,  $L =$  largura do rio naquela seção.**
- As irregularidades locais pouco influem na formação dos meandros
- **Geometria estável dos meandros: escoamento turbulento ; maneira pela qual o leito e os bancos de areia foram formados ; interação entre a corrente líquida e o leito ; trechos aluvionares ; material suficientemente coesivo para a formação de bancos estáveis**

# Meandros Fluviais

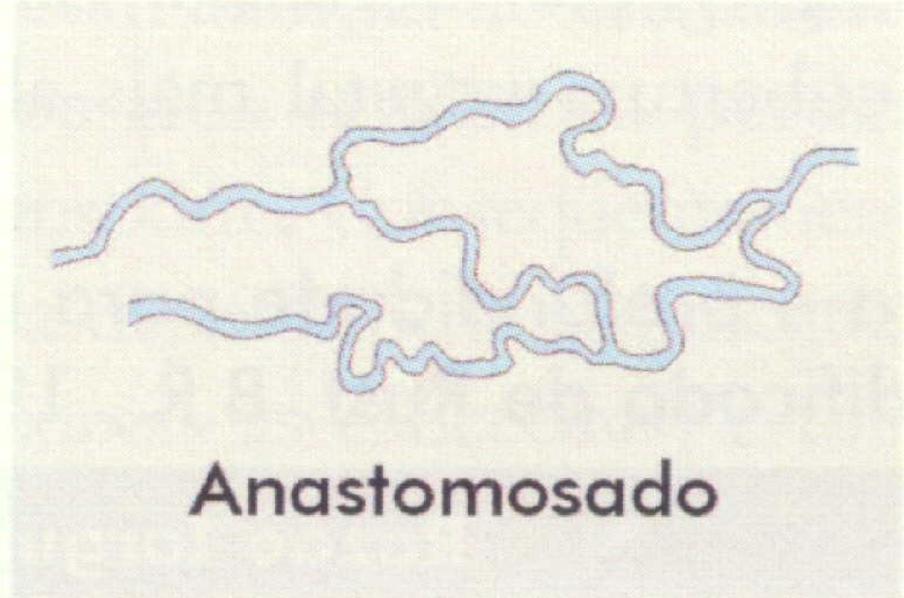
- **Forma real: curva seno – gerada – curva que se obtém através do mais provável caminho ao acaso entre dois pontos de um vale de rio.**
- **Solução matemática : integral elíptica**

# Formação de traçado sinuoso

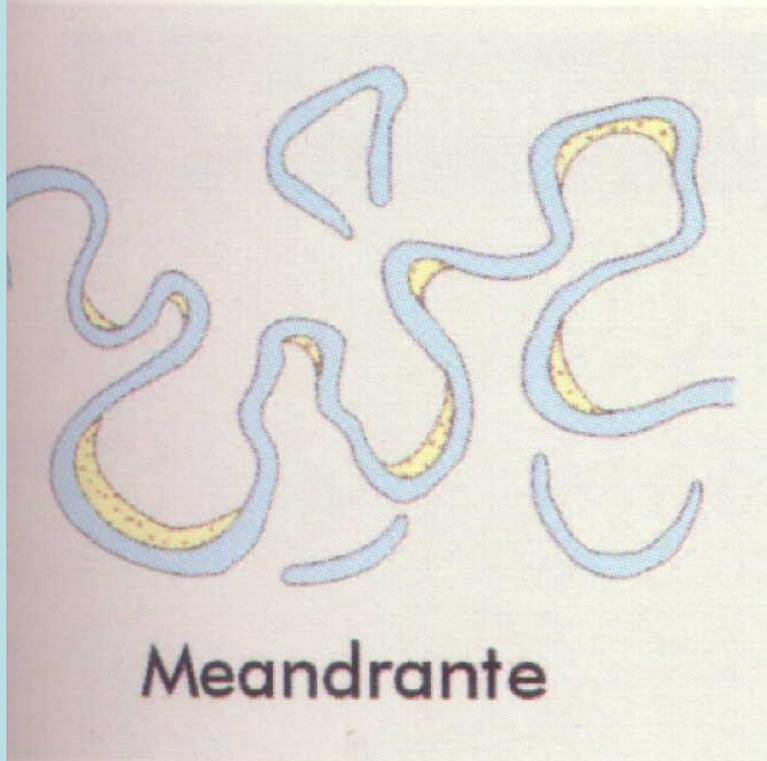
- $Q_s < Q_{smax}$  → Escoamento tende a erodir o trecho de rio;
- Escoamento tende a extrair quantidade complementar de material sólido para atingir seu estado de saturação ou capacidade máxima de transporte ( $Q_{smax}$ ),
- Se  $\zeta_o > \zeta_{oc}$  → **leito instável** → tendência de alteração da forma da seção e do traçado planimétrico → **formação de curvas** → mecanismo natural de redução da declividade do rio → **busca do equilíbrio das ações no meio fluvial;**
- $\tau_o = \gamma R_H i$  →  $\downarrow i$  →  $\downarrow \tau_o$  →  $\tau_o \sim \tau_{oc}$  → **Tendência ao equilíbrio**



Retilíneo



Anastomosado



Meandrante

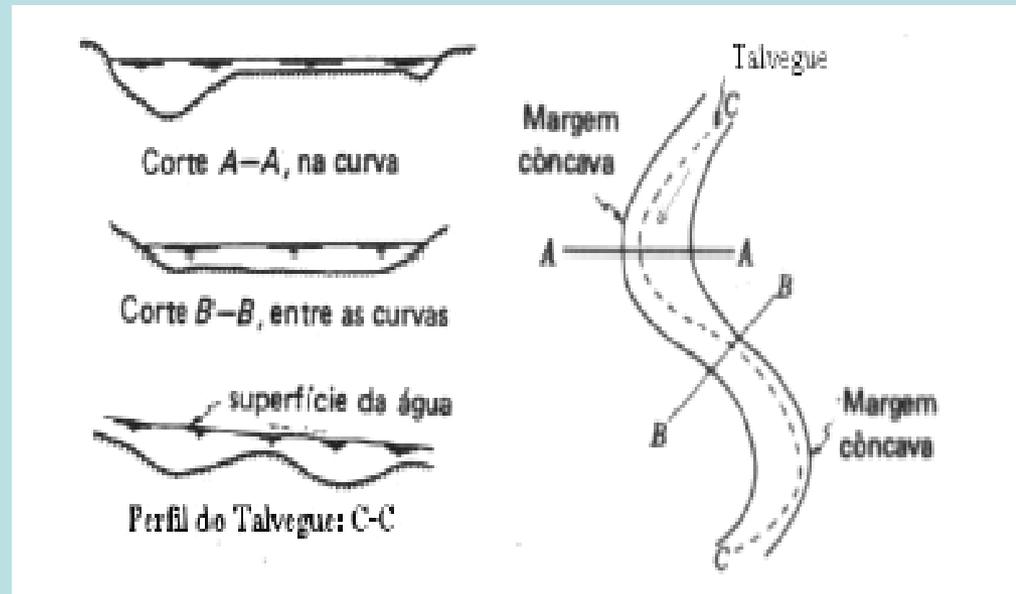


Entrelaçado

# Fargue, 1863 - Leis válidas - rio Garone (França)

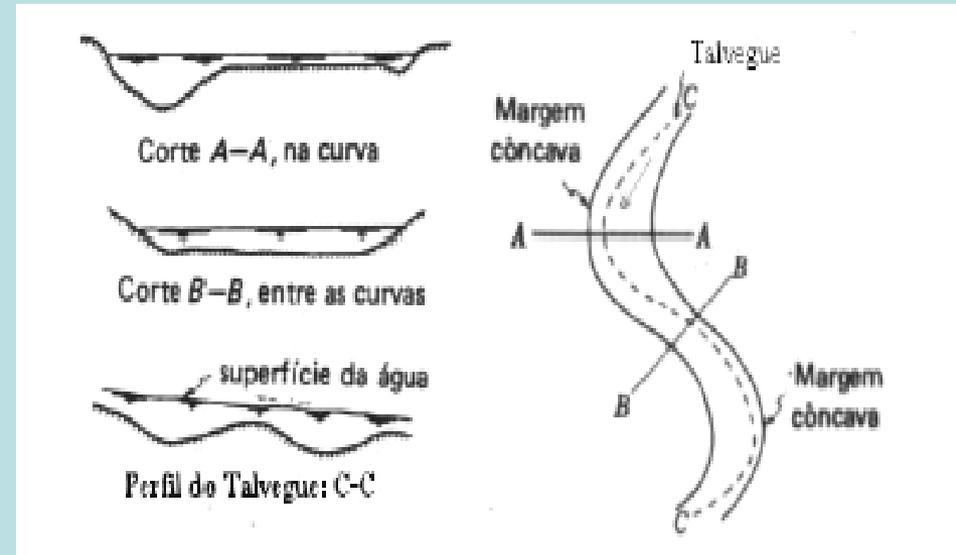
Trecho de 170km, largura média de 10 a 150m, 275 e 4.450m<sup>3</sup>/s  
– ordem de grandeza do rio Tietê

- **1a. Lei do talvegue** : a linha de máxima profundidade ( talvegue ) ao longo do curso d'água tende a se aproximar da margem côncava e o material ali escavado se deposita na margem convexa.



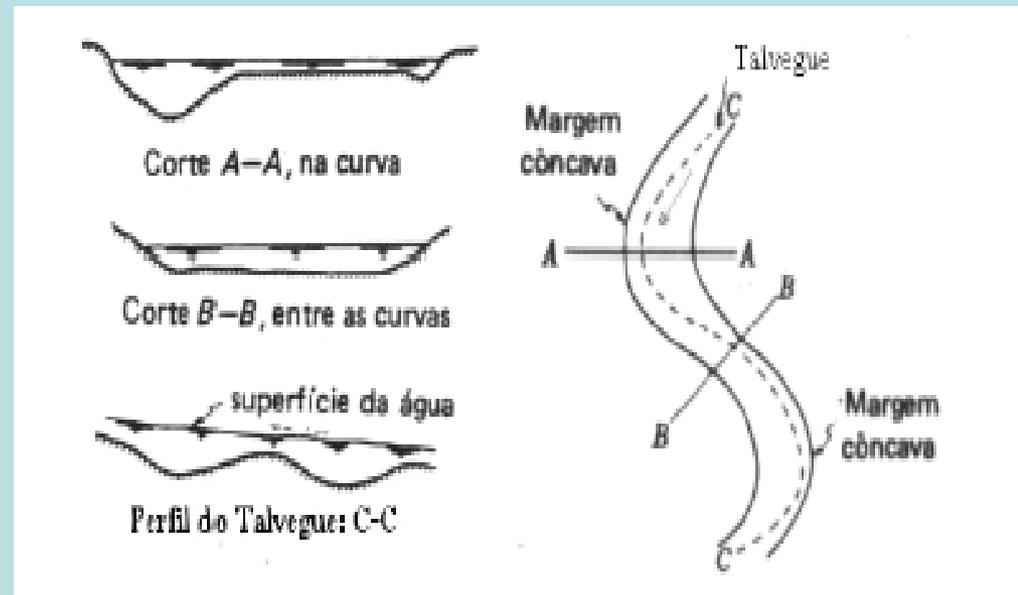
# Fargue, 1863 - Leis válidas - rio Garone (França)

- **2a. Lei do afastamento:** as profundidades máximas e mínimas correspondentes aos vértices e inflexões das curvas, respectivamente, são deslocados ligeiramente para jusante (  $0,25B$  ). Esta afirmação é importante para os projetos de Tomadas d'água;



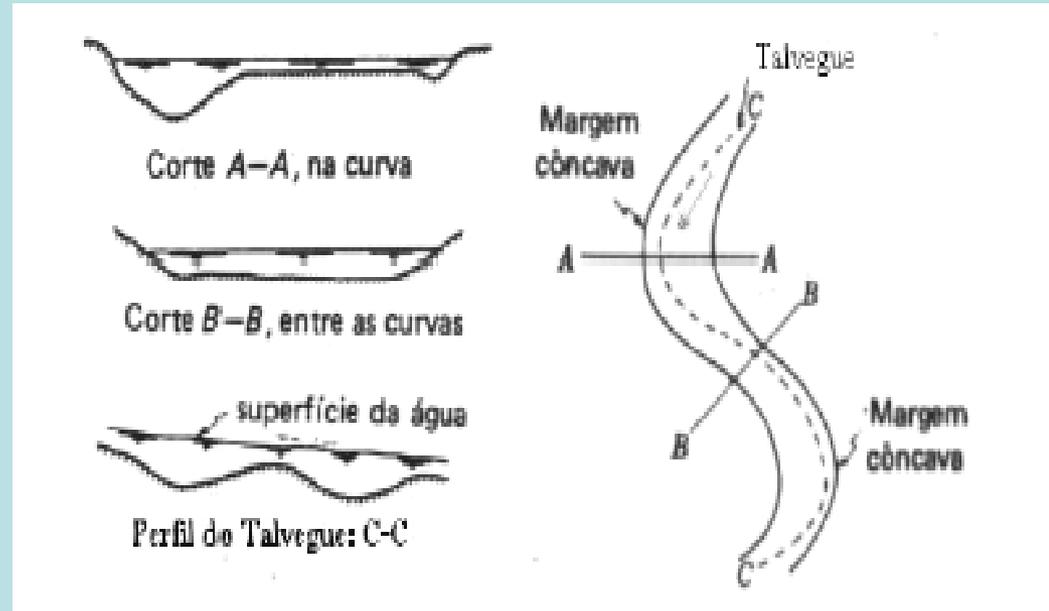
# Fargue, 1863 - Leis válidas - rio Garone (França)

- **3a. Lei da fossa:** a profundidade da fossa é tanto maior quanto maior for a curvatura (  $1/R$  ) do talvegue correspondente ( maior efeito erosivo );



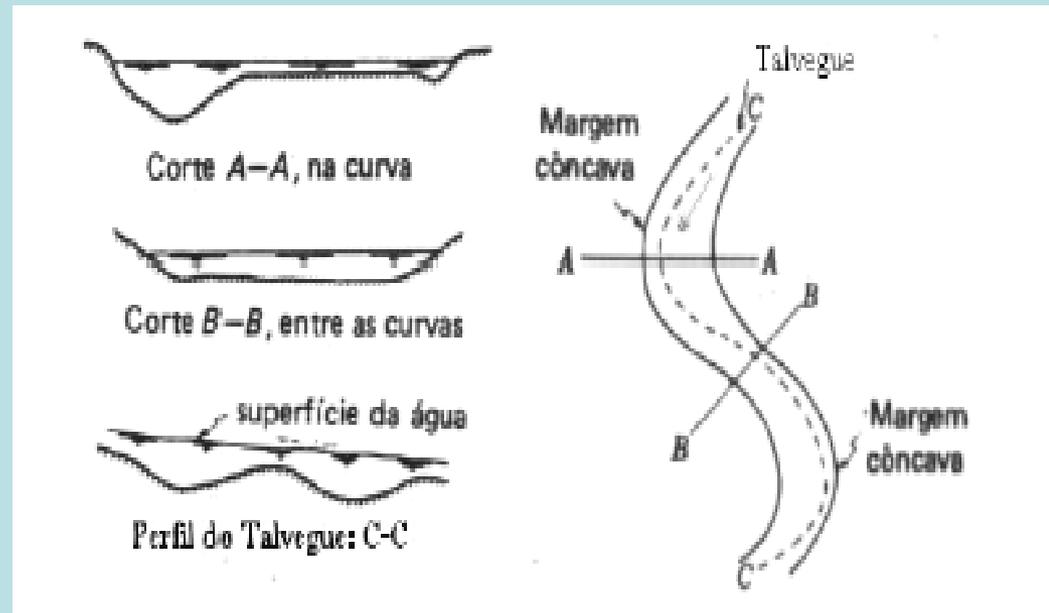
# Fargue, 1863 - Leis válidas - rio Garone (França)

- **4a. Lei do desenvolvimento:**  
As leis tem validade para as curvas de desenvolvimento médio do curso d'água, isto é, nem muito longas, nem muito curtas com relação à largura do canal ( $3B < R < 6B$  e  $5B < L < 11B$ );



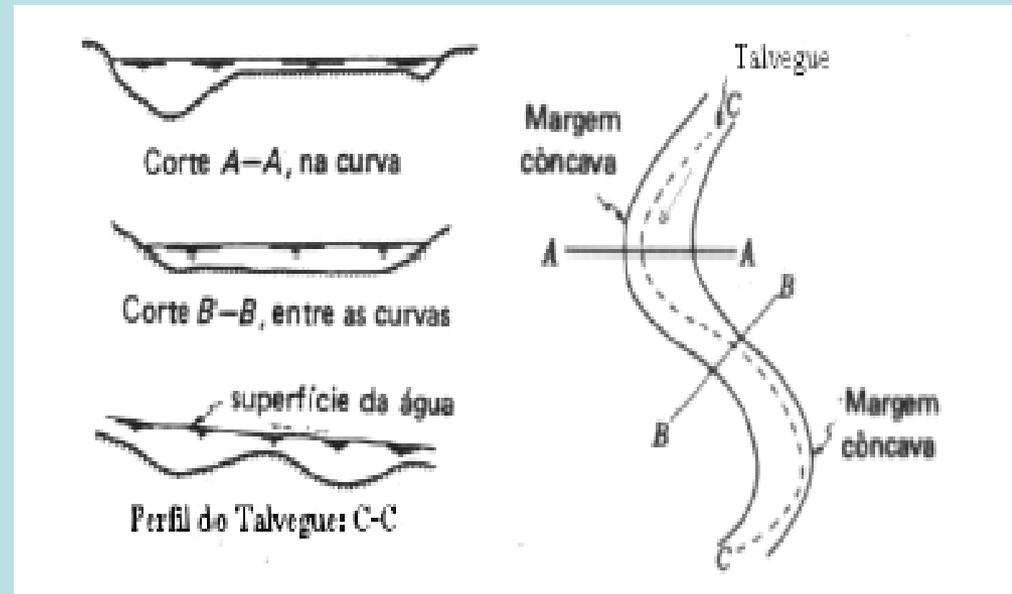
# Fargue, 1863 - Leis válidas - rio Garone (França)

**5a. Lei da continuidade:** toda mudança brusca de curvatura provoca uma redução brusca da profundidade. O perfil do fundo só é regular quando a curvatura varia de forma contínua;



# Fargue, 1863 - Leis válidas - rio Garone (França)

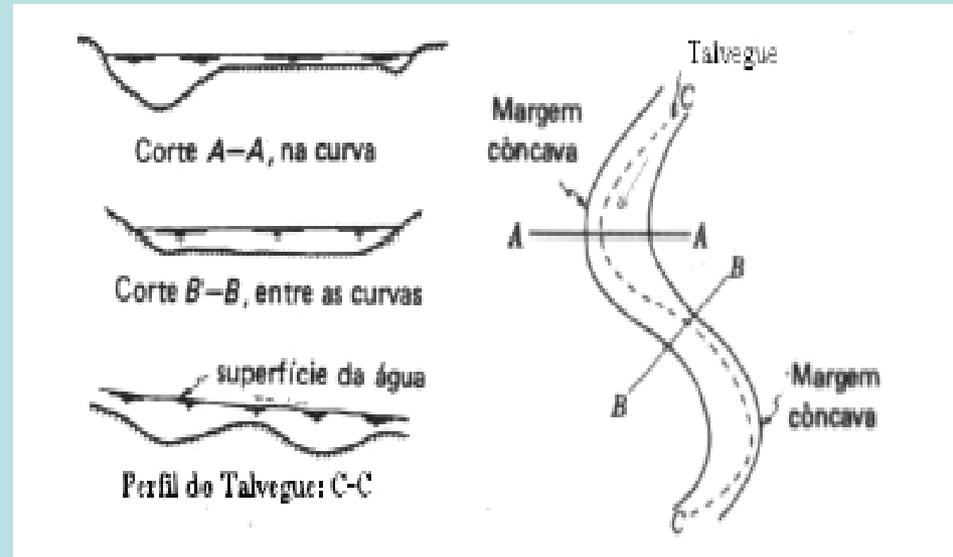
**6a. Lei da declividade de fundo:** A variação da curvatura é proporcional à variação da declividade de fundo

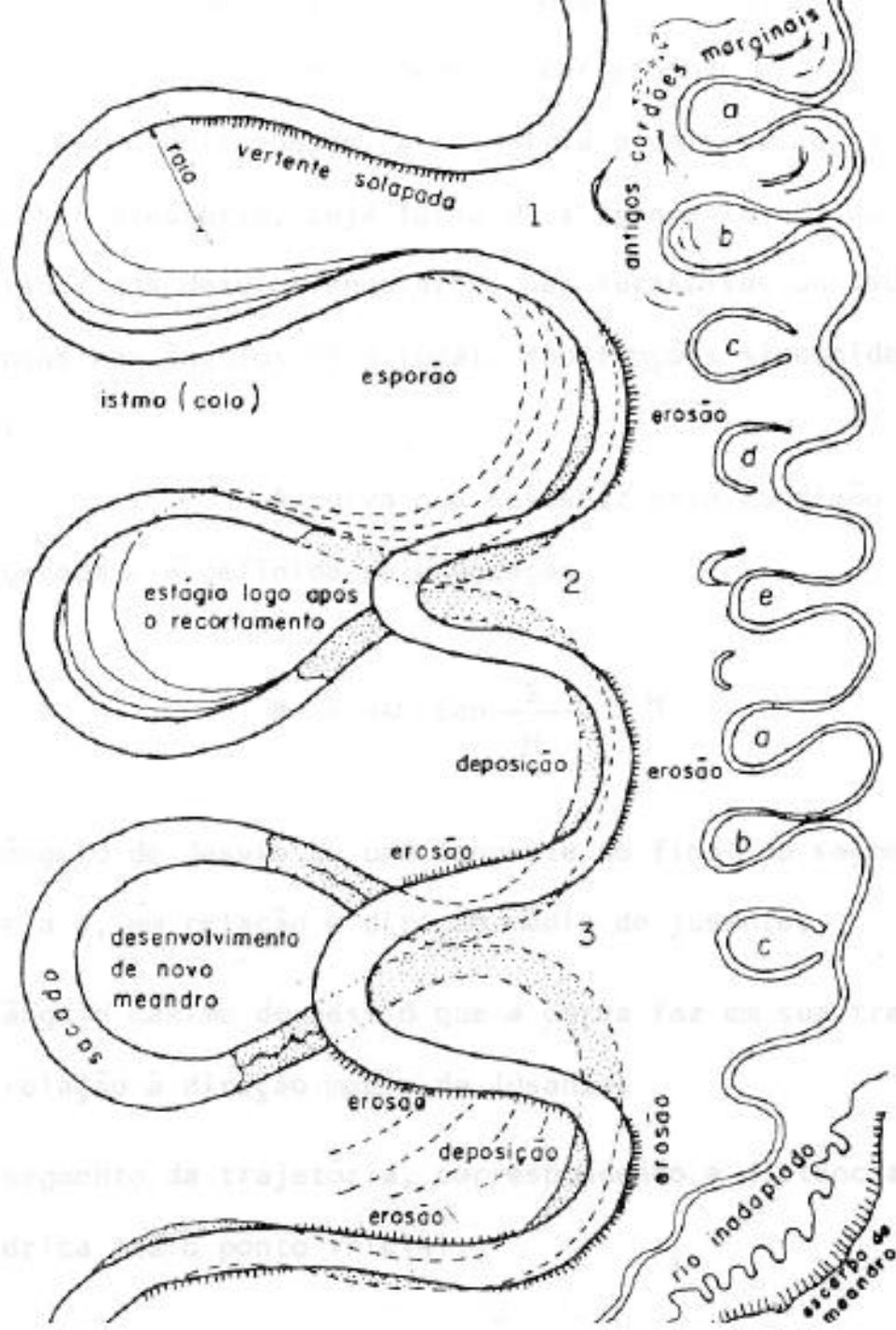


# Fargue, 1863 - Leis válidas - rio Garone (França)

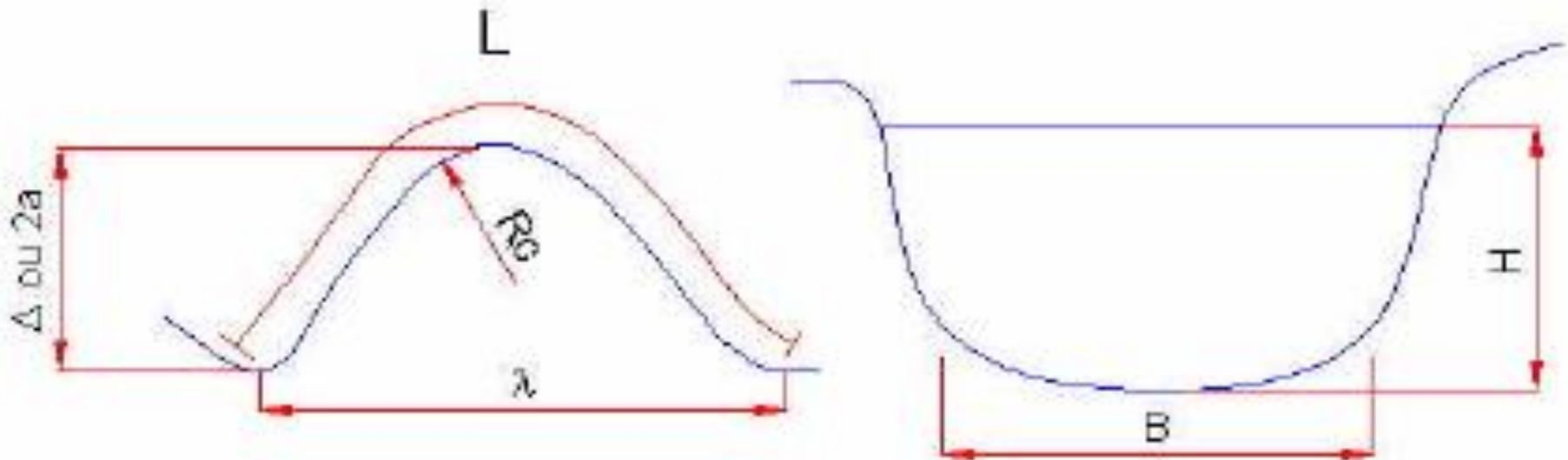
**1º COROLÁRIO** Para um dado comprimento de curva ( $IC$ ), a profundidade média ( $h_{Cm}$ ) é função do ângulo entre as tangentes extremas da curva .

**2º COROLÁRIO** A regularidade do perfil longitudinal do talvegue e sua declividade são funções da variação gradual da curvatura em planta do trecho.





# Características de um Meandro



Relações de dimensões

**L= comprimento retificado de uma curva do meandro;**

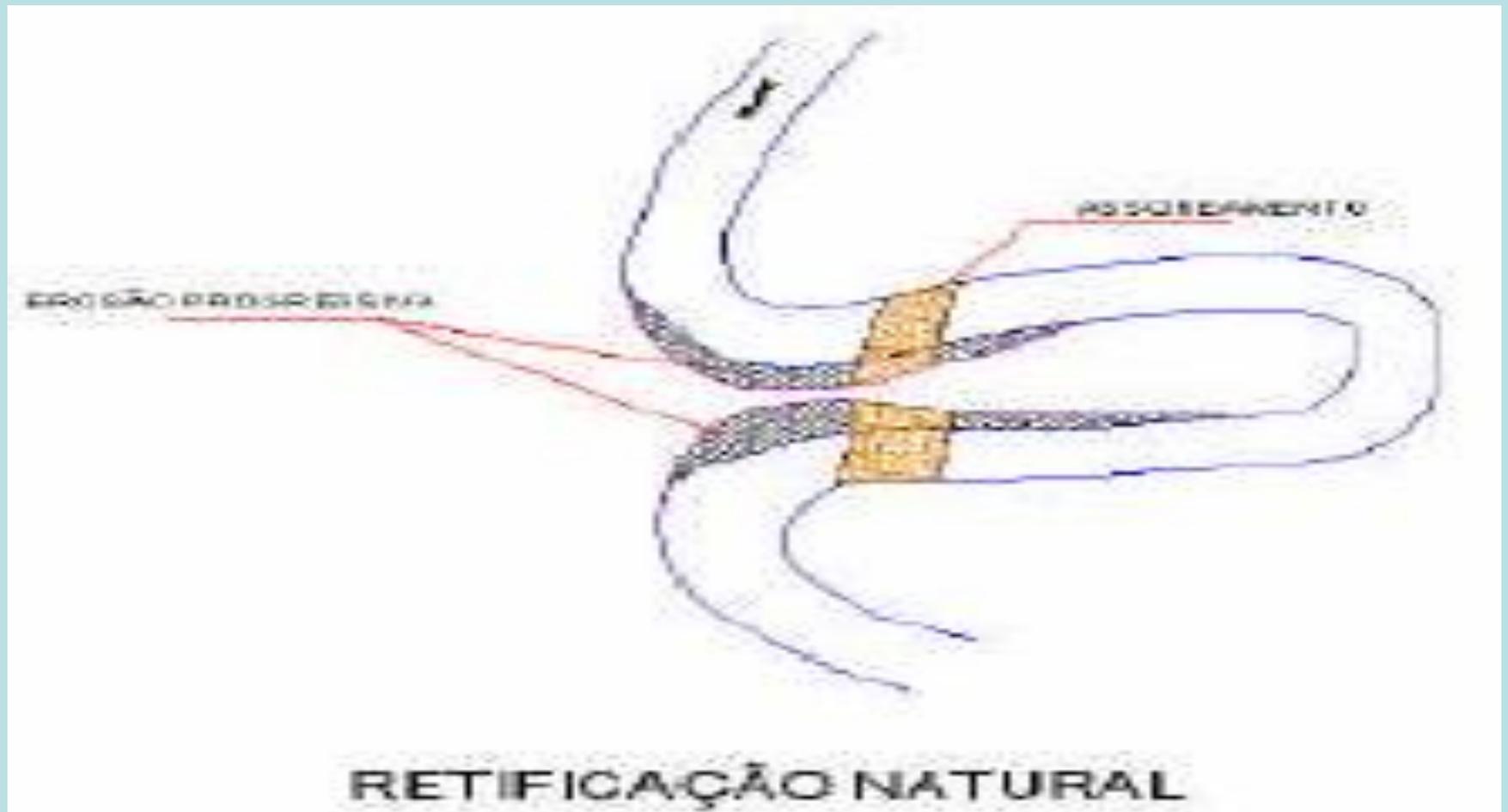
**Rc= raio da curva do meandro;**

**Δ ou 2a= altura ou amplitude da curva do meandro;**

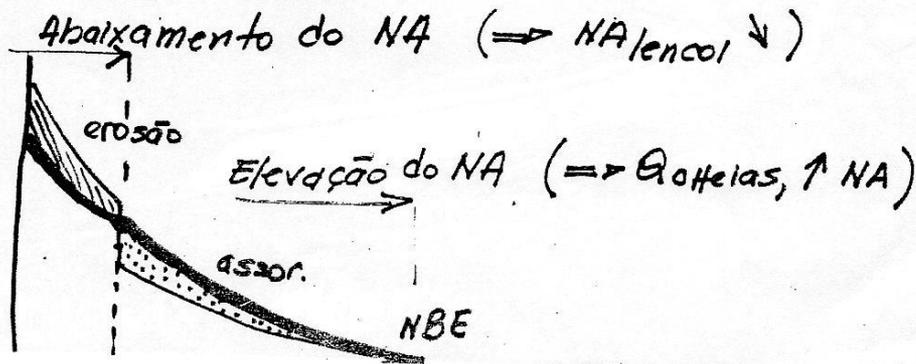
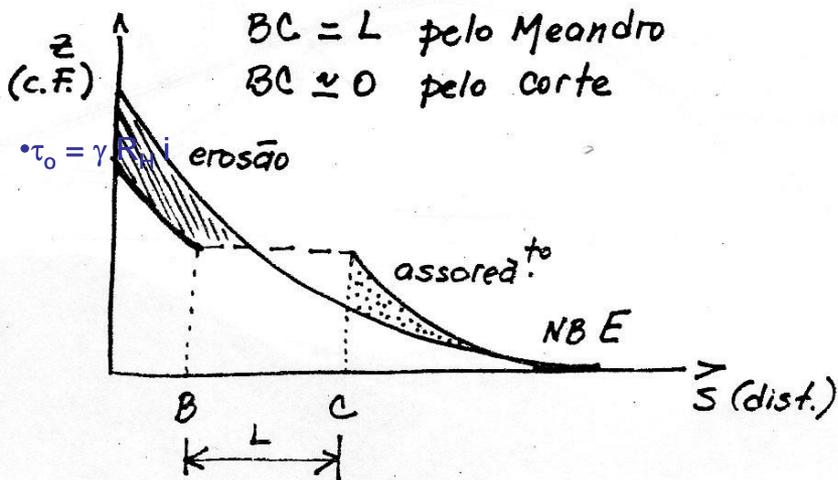
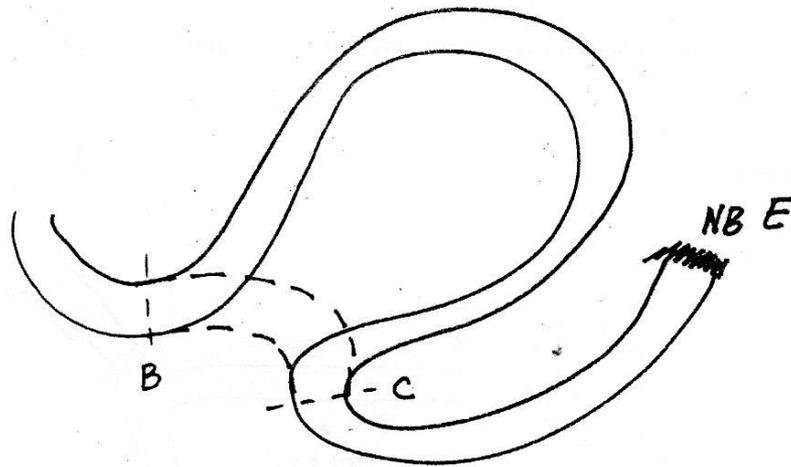
**λ= projeção horizontal do comprimento;**

**B= comprimento da base do canal; H= profundidade.**

# Retificação Natural – Corte de Meandro

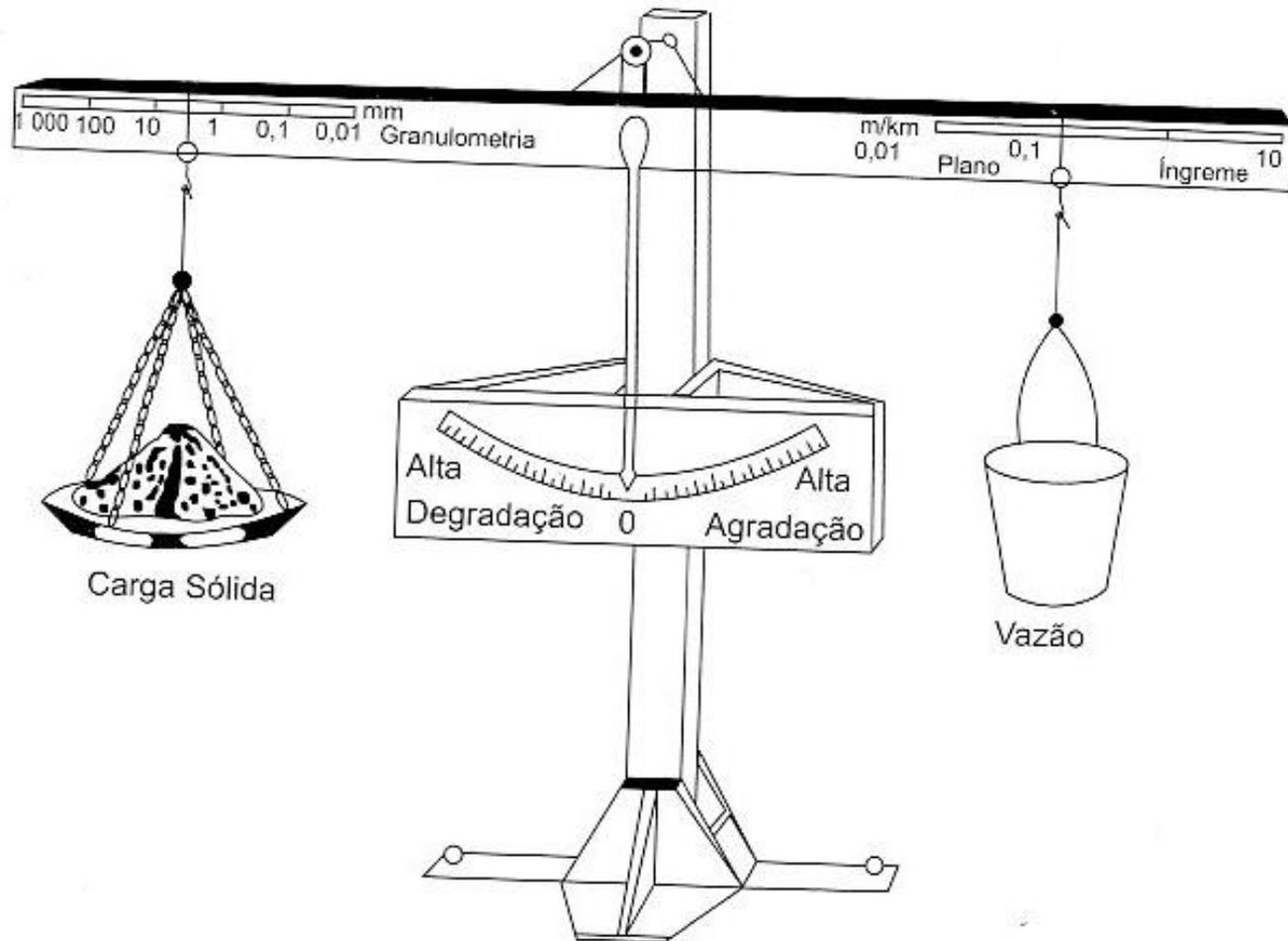


# Corte de Meandros



- **Corte de Meandro**
- Igual desnível entre Início e Fim do corte;
- Menor comprimento do trecho retificado;
- Maior declividade do trecho:  
 $i = \Delta z / L$  ;
- **Maior Tensão devido ao escoamento** :  $\tau_o = \gamma R_H i$  e se  $\tau_o > \tau_{o,c}$  - tendência à erosão;
- Trecho em erosão - montante ;
- Rebaixamento de fundo – da linha d'água e de seus afluentes com tendência à erosão no afluente;
- Trecho com assoreamento – jusante;
- **Elevação de fundo** – da linha d'água e de seus afluentes com tendência à sedimentação no afluente;

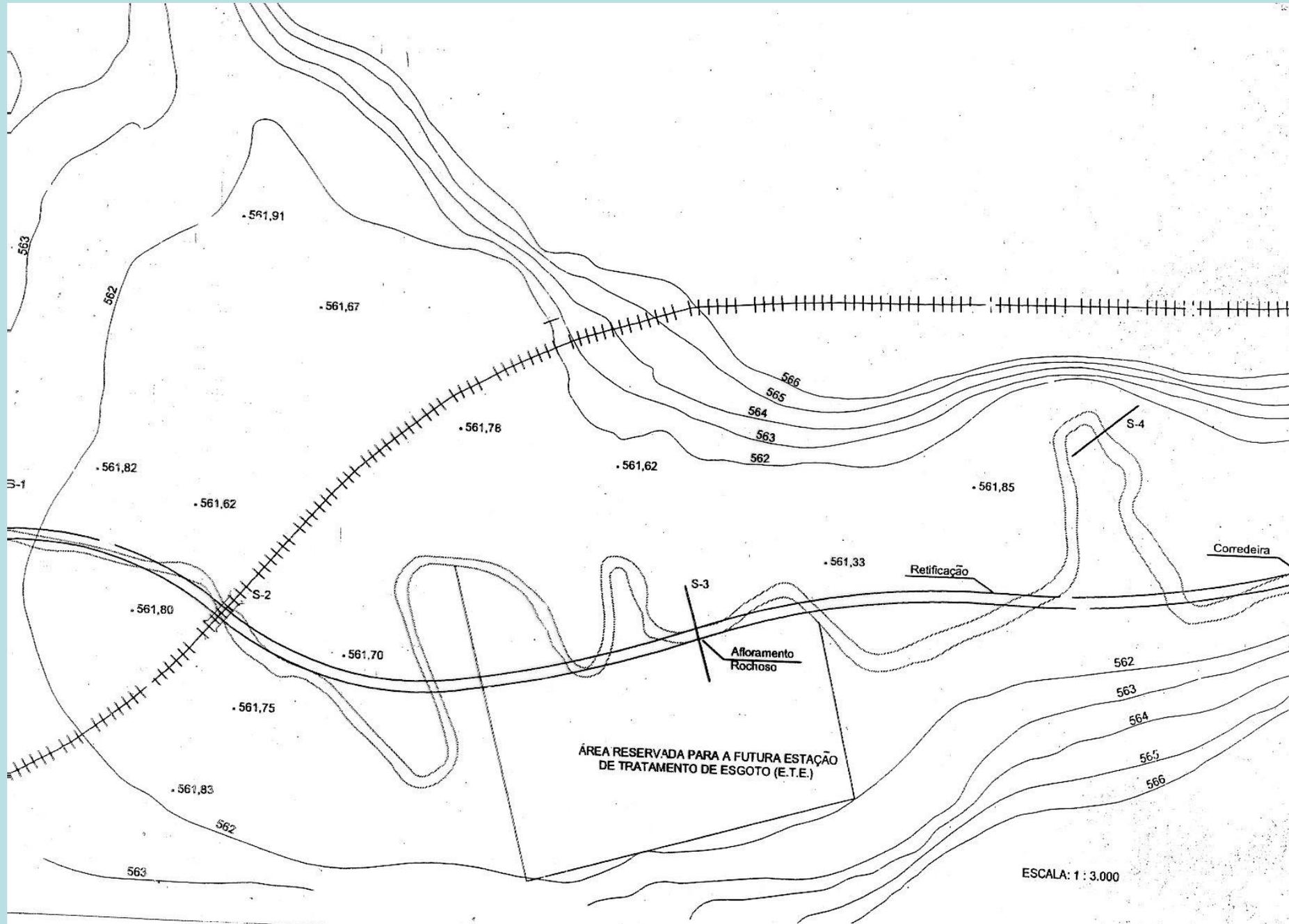
# Distribuição de sedimentos no curso d'água



Descarga Sólida X Diâmetro da Partícula  $\alpha$  Declividade do Leito X Vazão

Figura 3.4 Relacionamento entre os fatores que contribuem para estabelecer um equilíbrio estável num canal de rio, segundo Lane (1954) (WMO, 1981).

# Retificação de Trecho de Rio Meandrado



# Finalidades da Retificação

- **Melhoria do traçado para a Navegação,**
- **Construção de avenidas de fundo de vale ou marginais,**
- **Recuperar o Terreno Marginal,**
- **Utilização da várzea para a agricultura Irrigada (rio São Francisco),**
- **Reversão (rio Pinheiros,SP),**
- **Utilização das Lagoas para Tratamento de Esgoto (São José dos Campos, SP),**
- **Aqüicultura, Controle de Cheias, Interligação de Sistemas de Reservatórios, etc.**

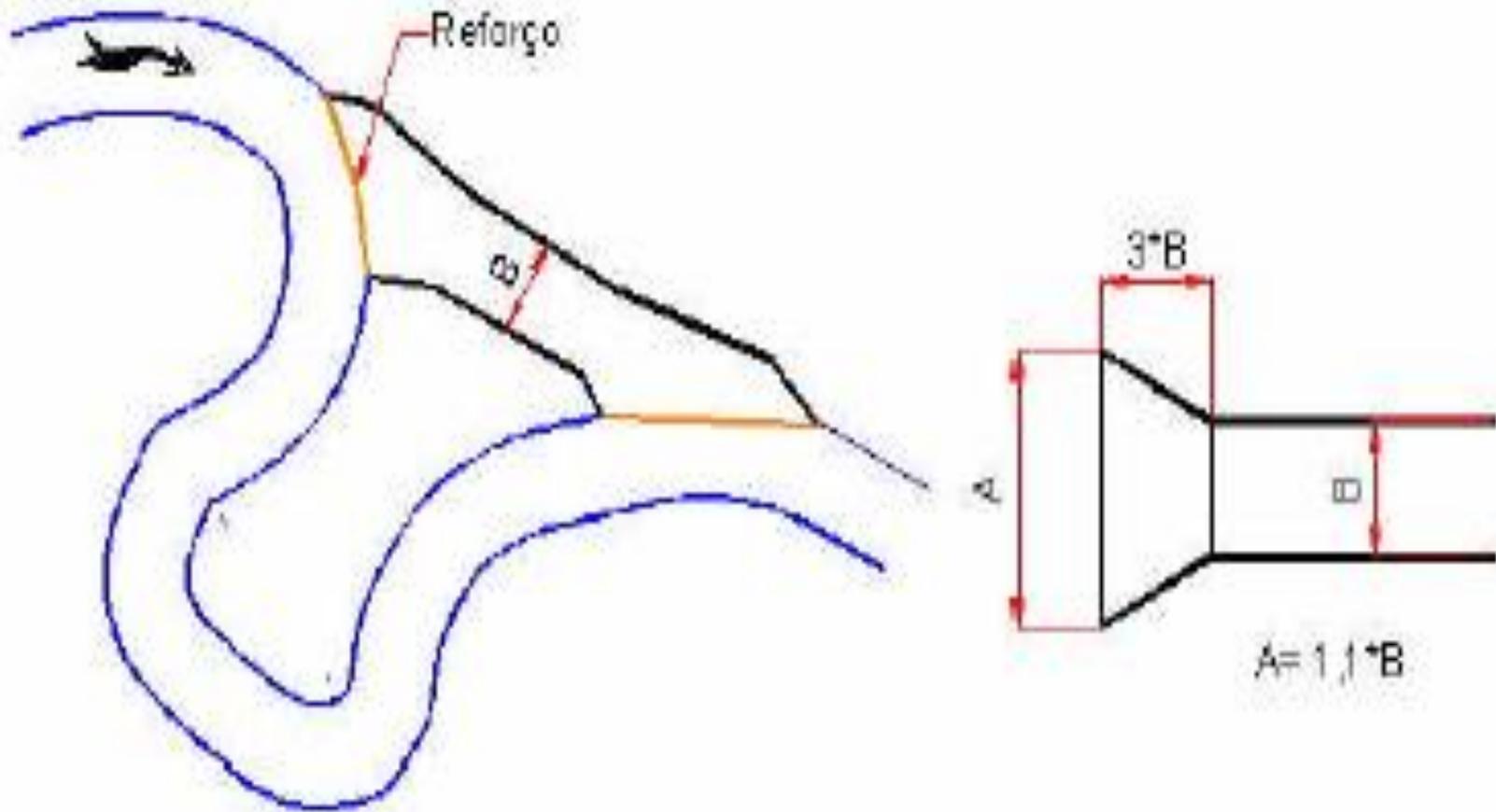
# Retificação de trecho de rio

- A retificação pode ter um traçado retilíneo ou curvilíneo dependendo da sua finalidade e das características locais.
- O processo de retificação, devido ao dinamismo fluvial, ocorre na natureza, buscando o equilíbrio, no caso específico aumentando a declividade longitudinal.

# Retificação de trecho de rio

- **O abaixamento do leito a montante e o conseqüente rebaixamento do nível d'água, pode baixar sensivelmente o lençol freático, com conseqüências para a agricultura.**
- **A retificação conduz ao transporte de grandes volumes de material sólido que podem ocasionar consideráveis dificuldades a jusante.**

# Esquema de Retificação



Esquema de Retificação.

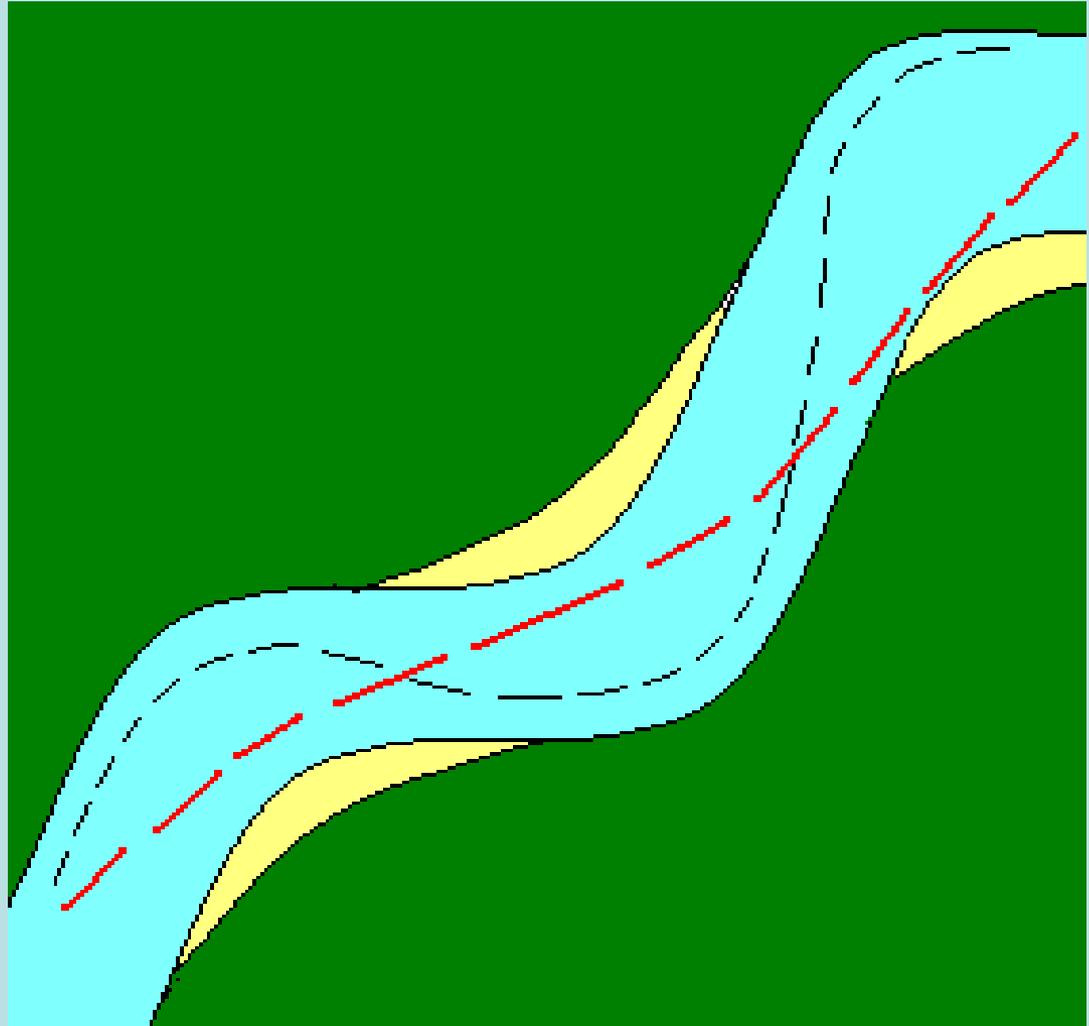
# ASPECTOS DA INSTABILIZAÇÃO

EXEMPLO: ALTERAÇÃO DE TRAÇADO

PROJETOS DE NAVEGAÇÃO / ATIVIDADES DE MINERAÇÃO

MUDANÇA DE TRAJETÓRIA  
PRODUZINDO EROSÕES  
DE MARGEM

REBAIXAMENTO DO LEITO  
E LENÇOL FREÁTICO  
(EFEITO SEMELHANTE  
AO DO RESERVATÓRIO)



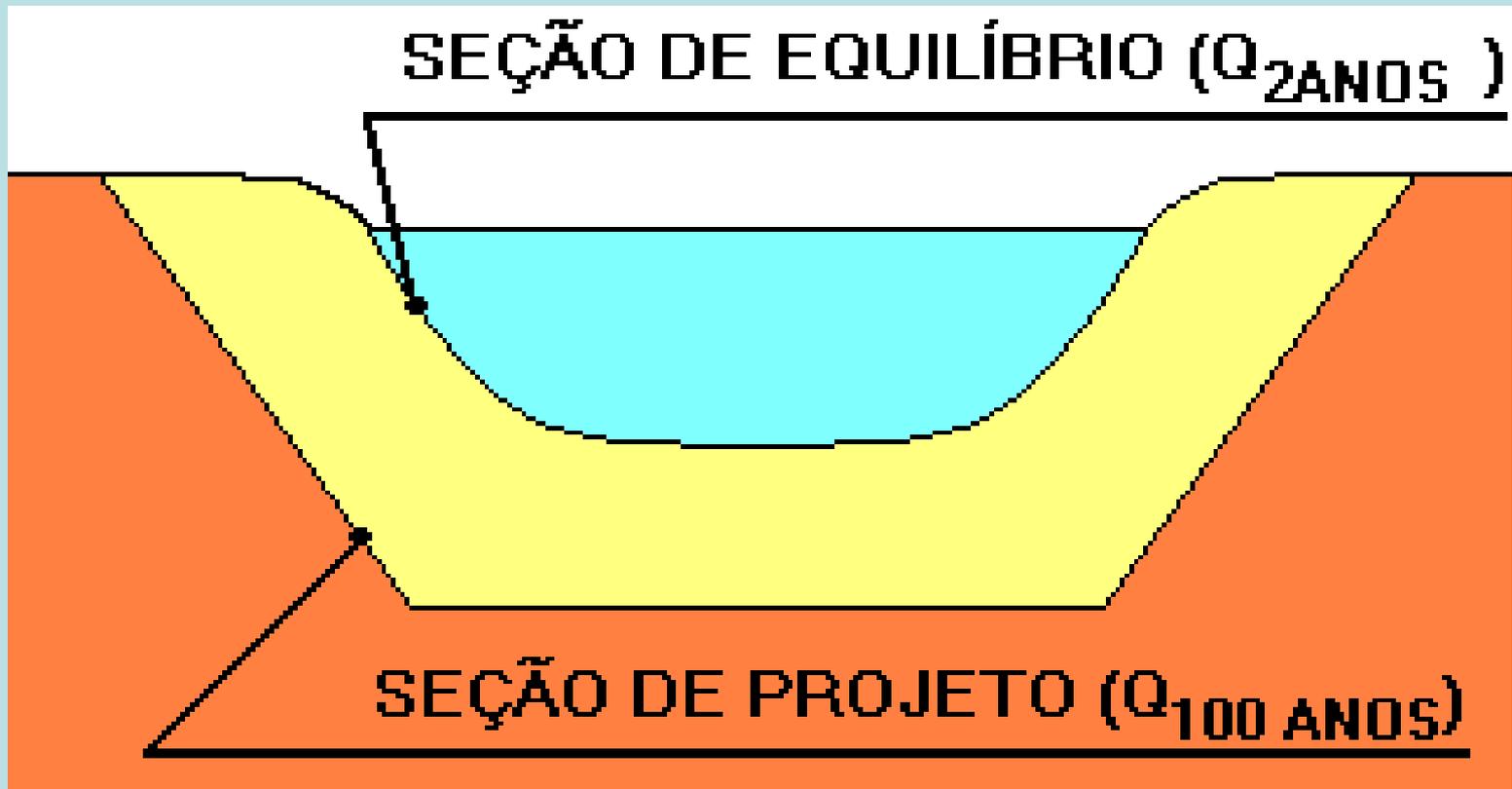
# ASPECTOS DA INSTABILIZAÇÃO

EXEMPLO: MUDANÇA DE SEÇÃO TÍPICA

PROJETOS DE DRENAGEM / NAVEGAÇÃO / ADUÇÃO

REDUÇÃO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE SÓLIDO

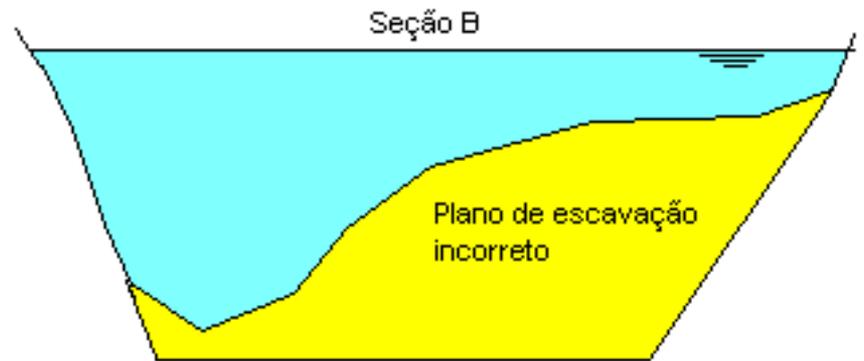
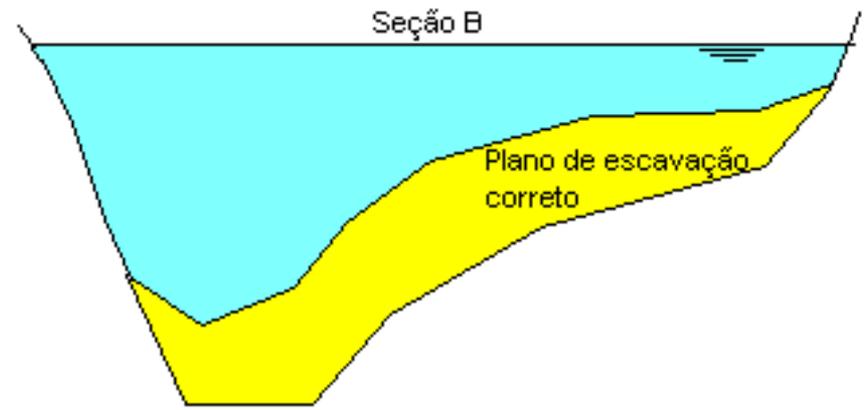
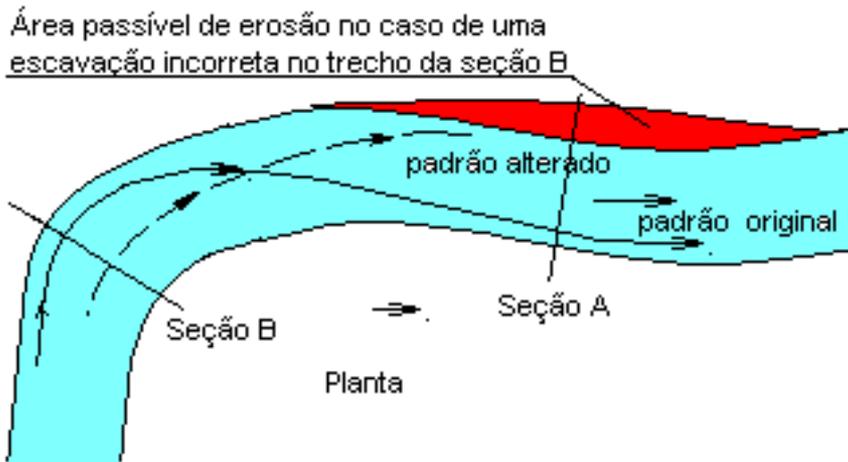
ASSOREAMENTO PARA RETOMAR A SEÇÃO ORIGINAL



# Aspectos da Instabilização

## Exemplo: Alteração de Traçado

### ATIVIDADES DE MINERAÇÃO



# Retificação de trecho de rio

- **O dimensionamento do canal retificado deverá preservar e melhorar o estado do rio natural nos aspectos de capacidade de escoamento, estabilidade, retenção ou acumulação, profundidades, ambiental e ecológico, etc.**
- **Os critérios de dimensionamento do canal retificado podem ser hidráulicos ou de navegação ou ambos.**

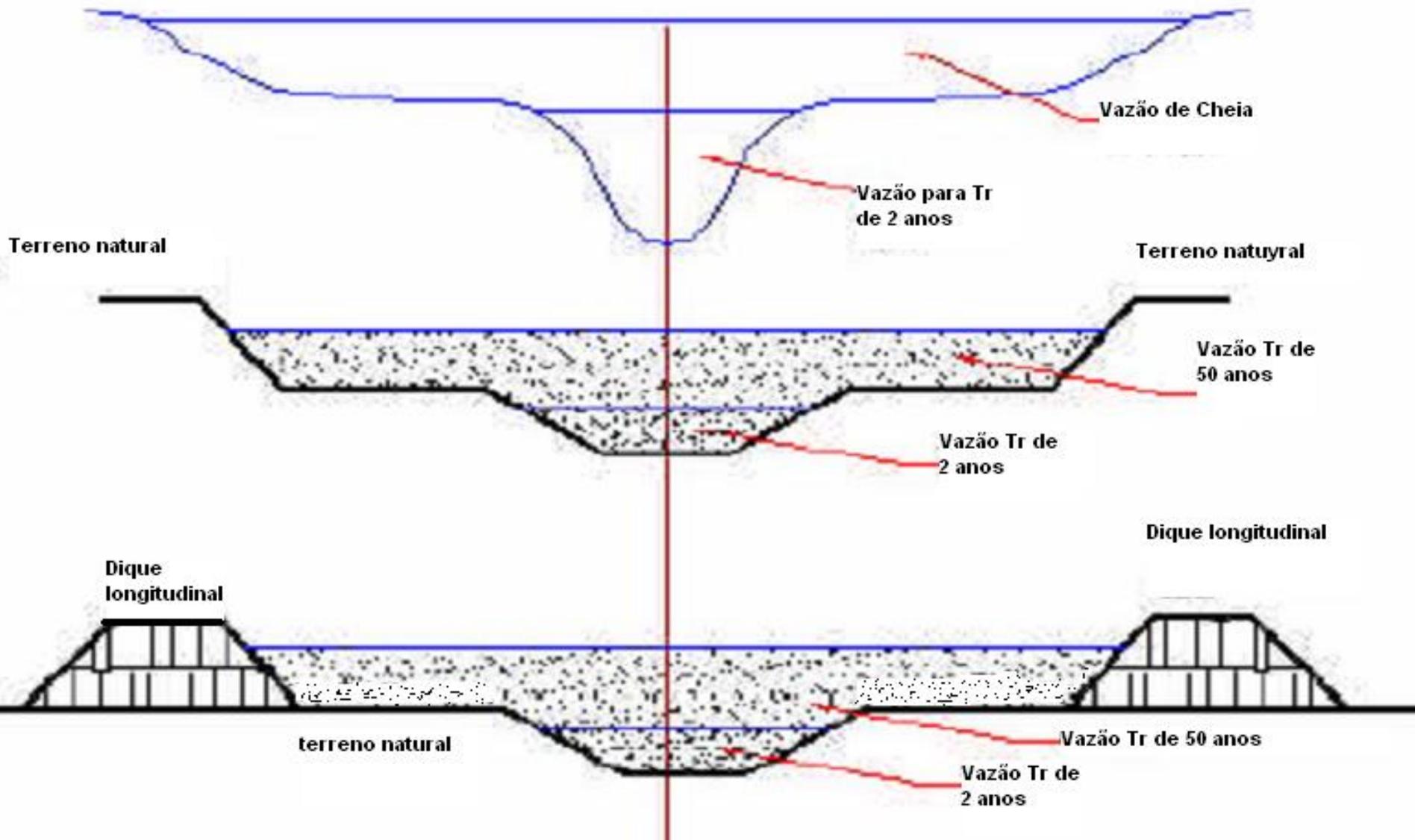
# Retificação de trecho de rio

- **Os critérios hidráulicos visam obter uma seção ótima que atenda a finalidade, as vazões previstas e estabilidade do leito e margens.**
- **Tratando-se do controle de cheias, o dimensionamento hidráulico poderá contemplar a vazão mínima (sanitária ou de base, período de retorno de 1,5 ou 2anos – cheia anual) para evitar deposições, crescimento de vegetação, otimização de áreas adjacentes durante a estiagem, etc.,**

# Retificação de trecho de rio

- **A vazão máxima (período de retorno de 50 anos) preservando a capacidade de retenção ou amortecimento, isto é, procura-se imitar a natureza com uma calha menor principal para vazões costumeiras e a calha maior para cheias ou vazões extraordinárias.**
- **Os critérios visando a navegabilidade do canal retificado, objetivam o dimensionamento para as vazões mínimas, velocidade do fluxo limite, ondas, traçado navegável (curvas e contra-curvas suaves, trechos retilíneos, largura mínima, profundidade mínima, etc.) e estabilidade da margem e fundo.**

# Dimensionamento do canal Retificado – exemplo da natureza



# ASPECTOS DA INSTABILIZAÇÃO

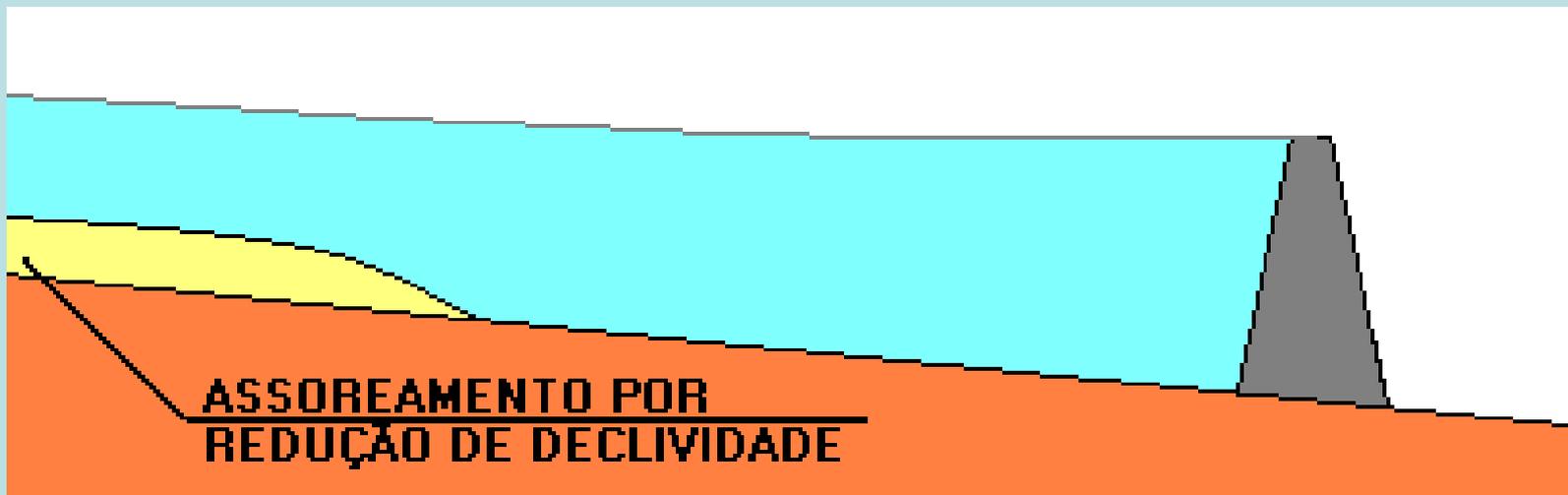
**EXEMPLO: ALTERAÇÃO DE DECLIVIDADE**

PROJETOS DE DRENAGEM / BARRAGENS / NAVEGAÇÃO

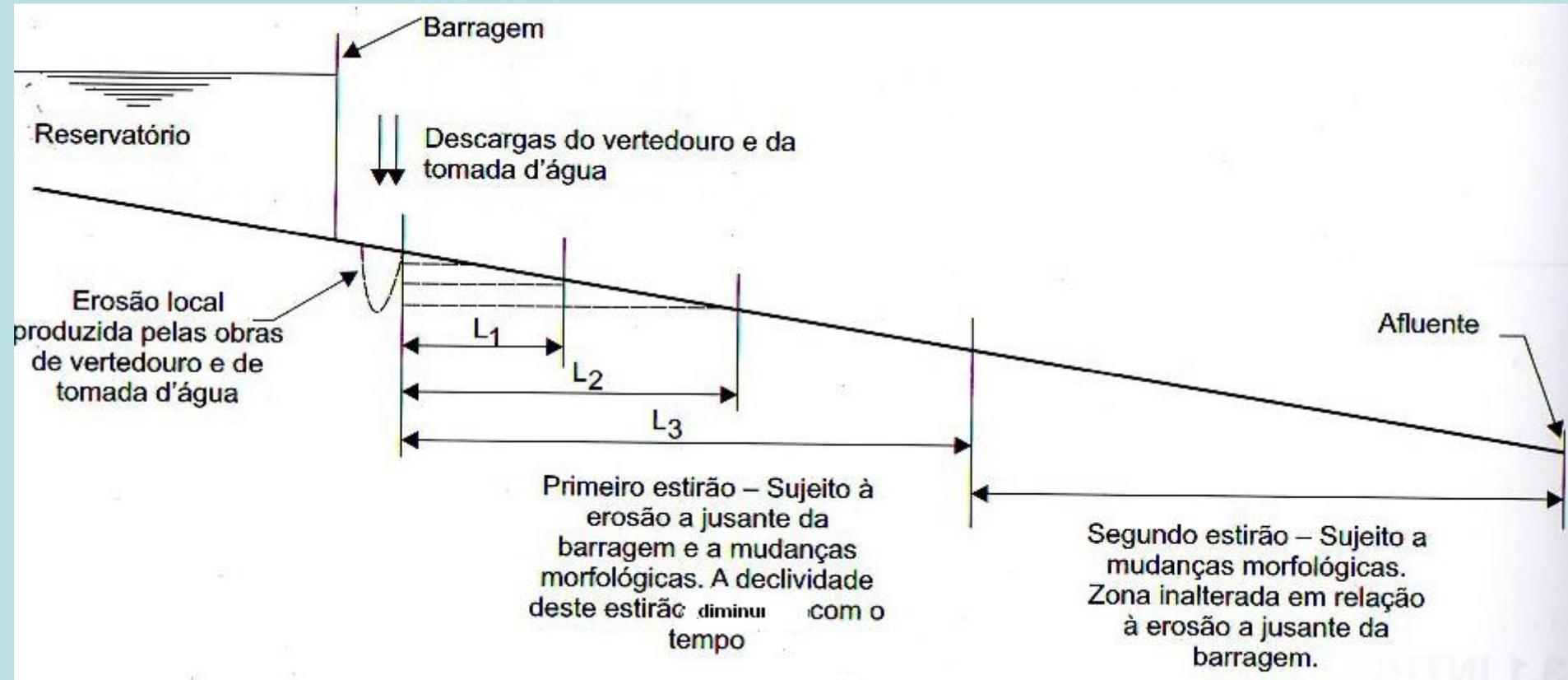
REDUÇÃO OU AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE SÓLIDO

ASSOREAMENTO OU EROSÃO

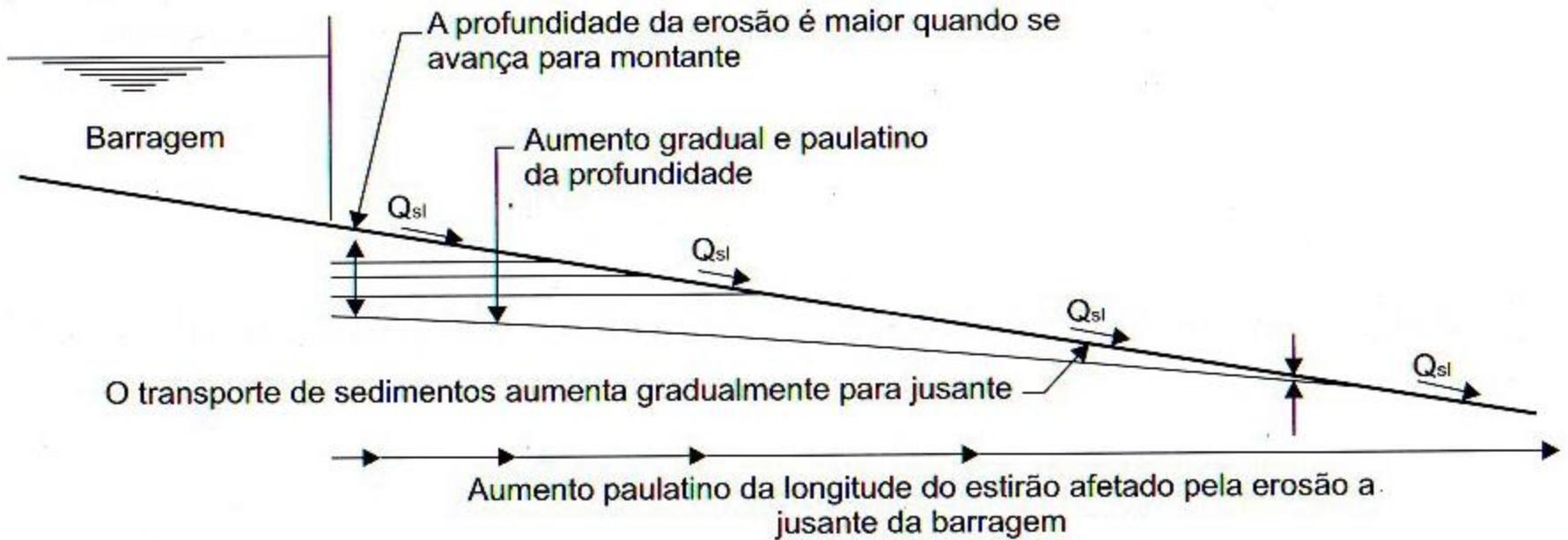
PARA A RETOMADA DA DECLIVIDADE DE EQUILÍBRIO



# Alterações que sofre um rio a jusante de barragens



# Efeitos devidos à erosão a jusante de barragens



# Alterações nos cursos d'água a jusante de Barragens

**Tabela 13.1** Alterações nos cursos d'água a jusante de barragens (Alvarez, 1986)

<b>Mudanças</b>	<b>Efeitos</b>
Hidrológicas e no controle de inundações	Modificação da vazão Maior uniformidade do hidrograma Redução da frequência e da magnitude das cheias Maior controle de vazões máximas descarregadas Maior segurança contra inundações Incremento de vazões mínimas Redução de áreas inundadas

# Alterações nos cursos d'água a jusante de Barragens

Morfológicas	<p>Modificação da geometria (largura e profundidade) da seção transversal e da declividade do canal</p> <p>Tendência de formação de um só canal estável, quando originalmente o rio é meandrado ou tem ilhas e bifurcações</p> <p>Redução da declividade geral do primeiro estirão do rio</p> <p>Modificação da erosão lateral nas curvas</p>
--------------	---

# Alterações nos cursos d'água a jusante de Barragens

Hidráulicas	<p>Mudança de funcionamento das obras dissipadoras de energia por redução do nível de energia no rio. Quando há bacia amortecedora se pode vencer o salto hidráulico se a sua formação depende do nível de energia do rio. Quando o controle hidráulico fica no final da bacia, chega a produzir logo a jusante uma erosão no pé da estrutura</p> <p>Rebaixamento do nível da superfície livre da água e do gradiente de energia. Afeta todas as obras hidráulicas e fluviais que dependem desse nível: obras de tomada d'água, cais, estações de bombeamento etc.</p> <p>Perda da capacidade hidráulica do canal por crescimento de vegetação em ilhas e bancos e pela mudança morfológica da geometria da seção e da declividade</p>
-------------	--

# Alterações nos cursos d'água a jusante de Barragens

do leito e por erosão	<p>O nível de descarga de centrais hidrelétricas se modifica</p> <p>Maiores possibilidades de navegação</p> <p>Rebaixamento do nível do leito do rio no primeiro estirão</p> <p>Aumento da erosão ou escavação total em obras construídas no primeiro estirão: pilares e fundações de pontes, obras de tomada d'água, estação de bombeamento</p> <p>Modificação do processo erosivo local nas descargas de obras de vertedouro da barragem</p> <p>Encouraçamento do primeiro estirão</p> <p>Possível falha de proteção marginal sobre todo o revestimento e diques longitudinais</p>
-----------------------	--

# Alterações nos cursos d'água a jusante de Barragens

## Ecológicas

Ao evitar ou reduzir inundações se impede o umedecimento natural dos solos agrícolas e o recebimento de nutrientes e sedimentos em suspensão

Evita ou reduz o enchimento com sedimento das partes baixas da planície

A construção de barragens para água potável e sobretudo para uso agrícola, reduz as quantidades de água doce para lagoas e mares interiores

Ficam garantidos os cultivos (em contrapartida, embora dependente de adubação)

Quando as barragens não têm dispositivos para que subam os peixes, fica interrompido o ciclo vital de algumas espécies

A atenuação dos picos de cheias a jusante impede o espalhamento de sedimentos finos contendo nutrientes nas várzeas e matas ciliares, além de diminuir as concentrações de nutrientes da cadeia alimentar da ictiofauna.

# ASPECTOS DA INSTABILIZAÇÃO

## EXEMPLO: ALTERAÇÃO DE VAZÃO

PROJETOS DE DERIVAÇÕES EM DRENAGEM / DIQUES LONGITUDINAIS

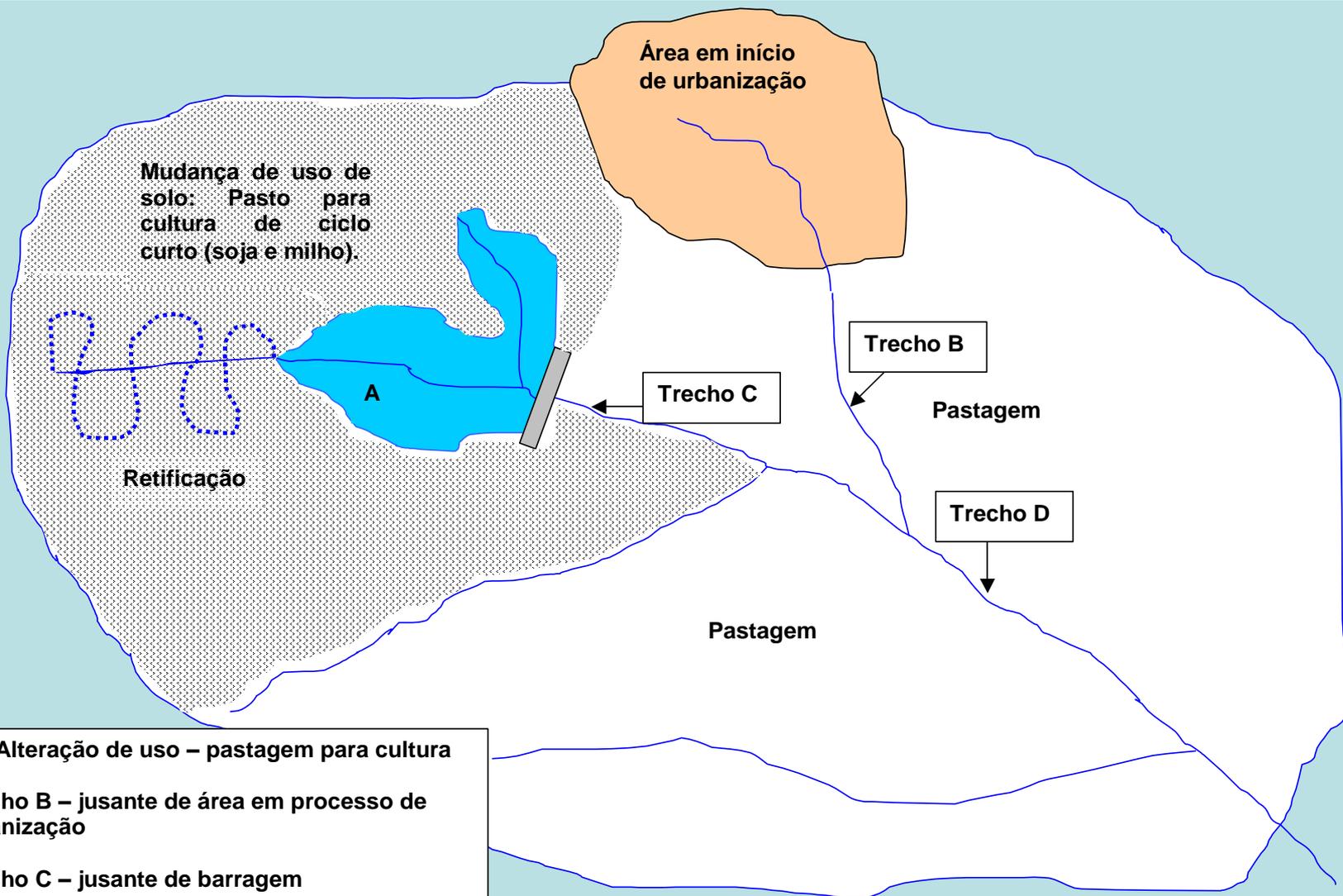
REDUÇÃO OU AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE SÓLIDO

ASSOREAMENTO OU EROSÃO PARA A RETOMADA DO EQUILÍBRIO



# 1- Uso e Ocupação da Bacia Hidrográfica

## 2- Desenvolvimento do Curso D'água em função da dinâmica da bacia



A - Alteração de uso – pastagem para cultura

Trecho B – jusante de área em processo de urbanização

Trecho C – jusante de barragem

Trecho D – Jusante de Barragem e de área em processo de urbanização

# Análise do comportamento dos cursos d'água em função dos usos e ocupações do solo

- Apresenta-se nesta **Bacia Hidrográfica** os seguintes **usos e ocupações**, assim como, as **interferências diretas no curso principal** :
  - **Usos e ocupações** :
    - **Mudança de uso de solo** : De pasto para cultura de ciclo curto ( soja ou milho ).
    - Área em **início de urbanização** com intensa movimentação de terra, sem adequado manejo ambiental.
    - **Pastagem.**
    - **Interferências diretas no curso principal:**
      - **Retificação** de trecho do curso d'água.
      - **Barragem.**

# Análise do comportamento dos cursos d'água em função dos usos e ocupações do solo

- Considerando –se estes usos e interferências como **ações antrópicas** que tendem a alterar as **condições de equilíbrio do curso principal e de seus afluentes**, responda :

1. Interprete os efeitos individuais e conjuntos que cada uso e interferência podem causar nos trechos correspondentes do curso principal e nos afluentes, em função do maior ou menor aporte de sedimentos provocado por estas ações, conforme especificado abaixo:

- Trecho **retificado**
- Trecho contido na **área A** do reservatório da Barragem.
- Trechos de rio indicados pelas **letras B, C e D.**

# Análise do comportamento dos cursos d'água em função dos usos e ocupações do solo

• Nesta análise de interpretação das alterações de processos naturais por **ações antrópicas e seus efeitos junto ao leito**, considere os conceitos apresentados em aula e procedimentos como:

- Princípios da **Saturação, Declividade e Seleção**.
- Justificativa técnica e avaliação do comportamento de **alteração da declividade de fundo** dos trechos correspondentes.
- Desenhe uma seção transversal do curso principal, constituída de **leito principal e secundário** e analise estes efeitos em épocas de **estiagem e de cheias**.
- Analise as tendências do comportamento natural do trecho de rio retificado e o de que será necessário fazer para mantê-lo assim e por quê ?
- Considere que o solo da bacia apresente características preponderantemente arenosas, ou seja, **material sem coesão**.

# Análise do comportamento dos cursos d'água em função dos usos e ocupações do solo

Considere , em termos comparativos, a tendência de equilíbrio dos cursos d'água, **antes e após as interferências antrópicas**, ou seja, a quebra de sua tendência natural e a necessidade de recomposição da busca deste mesmo equilíbrio.

- Que medida, **não estrutural**, seria salutar no trecho do rio principal, a montante do reservatório, tendo em vista a tentativa de minimização dos efeitos negativos a serem provocados pela retenção de sedimentos ?
- Considere que a bacia apresente um processo natural de erosão, transporte e aporte de sedimentos ao leito do rio e seus afluentes, por ações hidráulicas e eólicas, que foi fortemente afetado pela **falta de procedimentos de manejo ambiental adequado**, nas interferências e usos considerados.