

Portos e Obras Fluviais e Marítimas

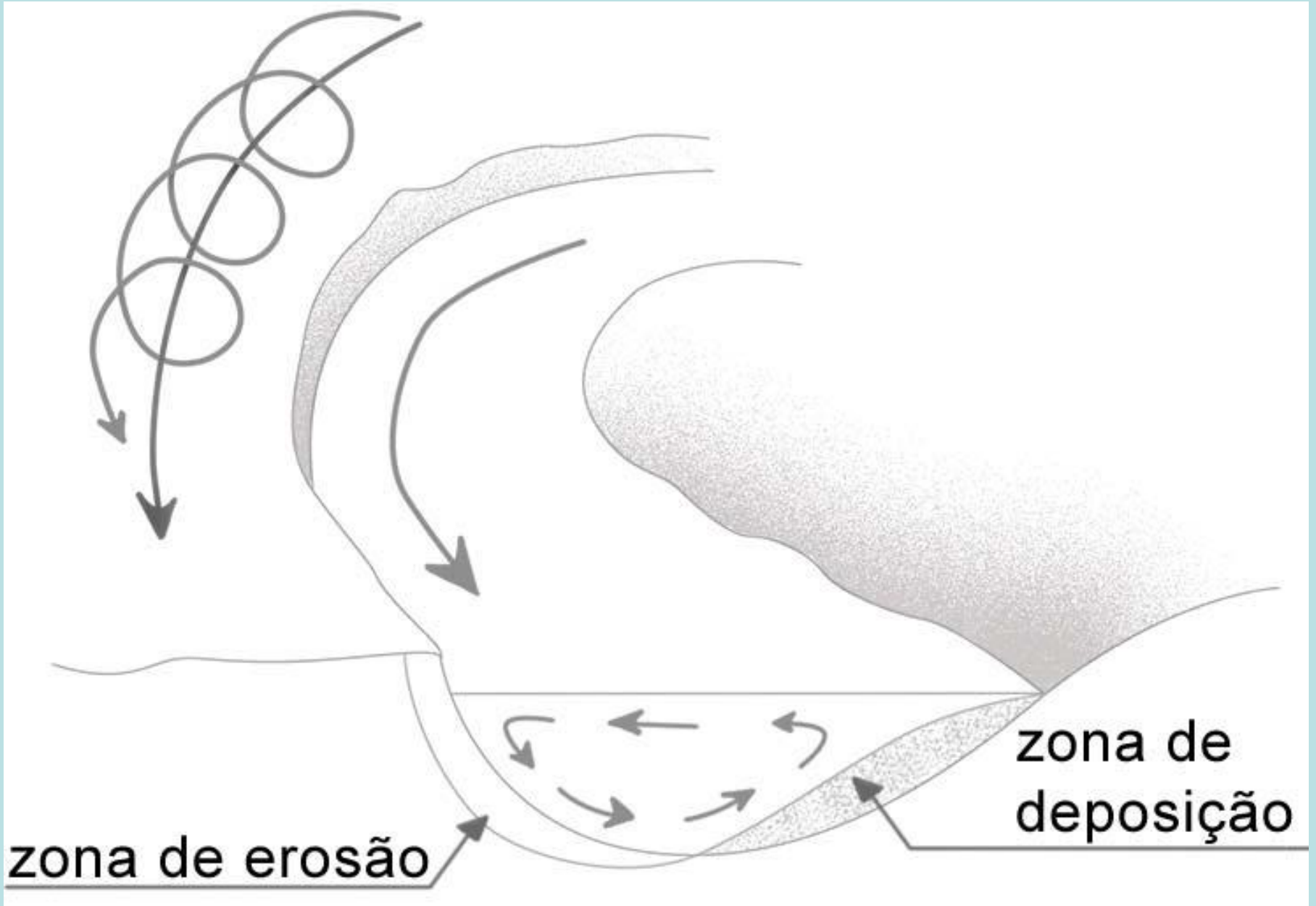
PHA 3402

Desenvolvimento de rios – Princípios Básicos de Modelação

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

www.phd.poli.usp.br

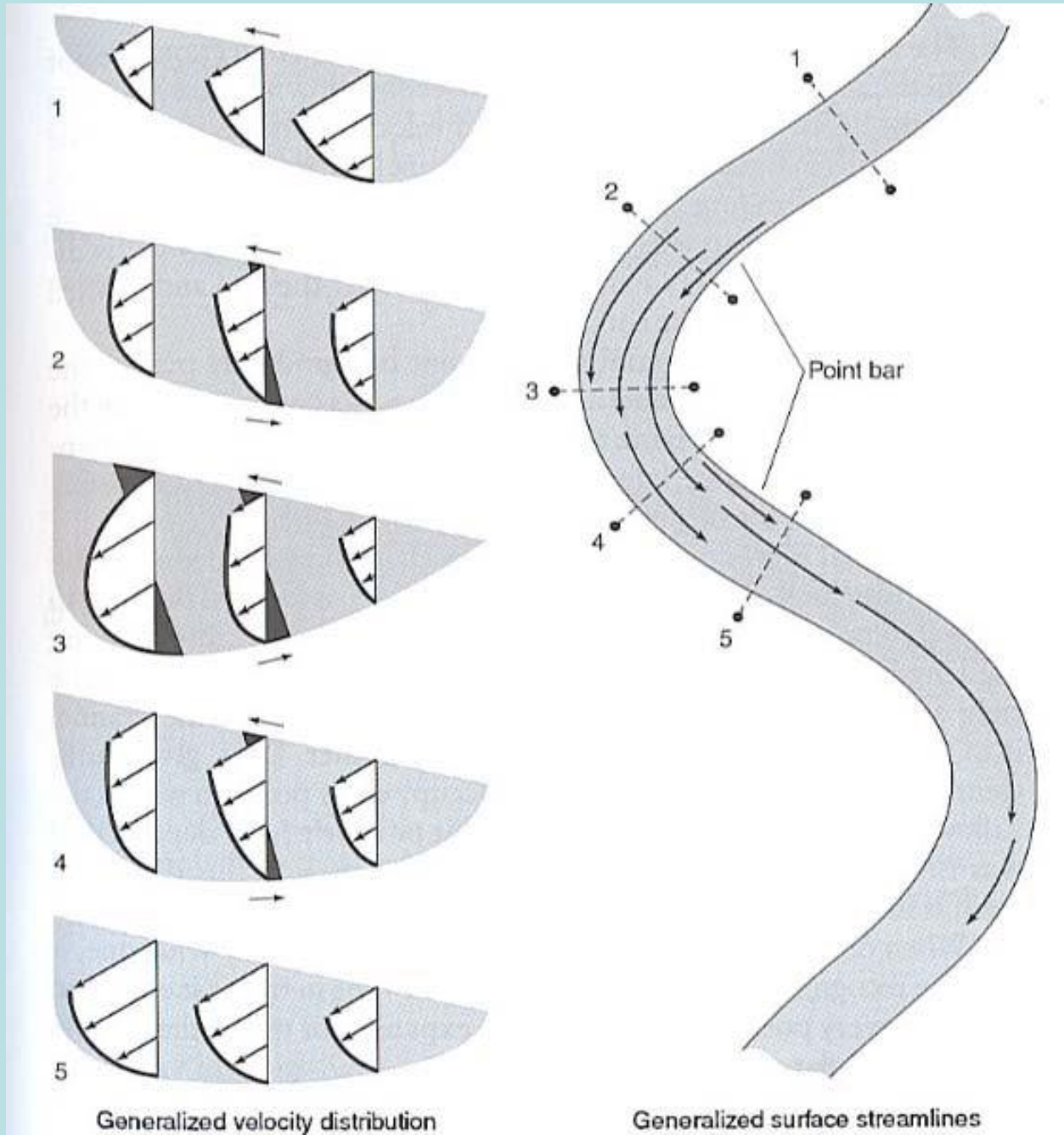
Escoamento em curva – corrente helicoidal



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.**

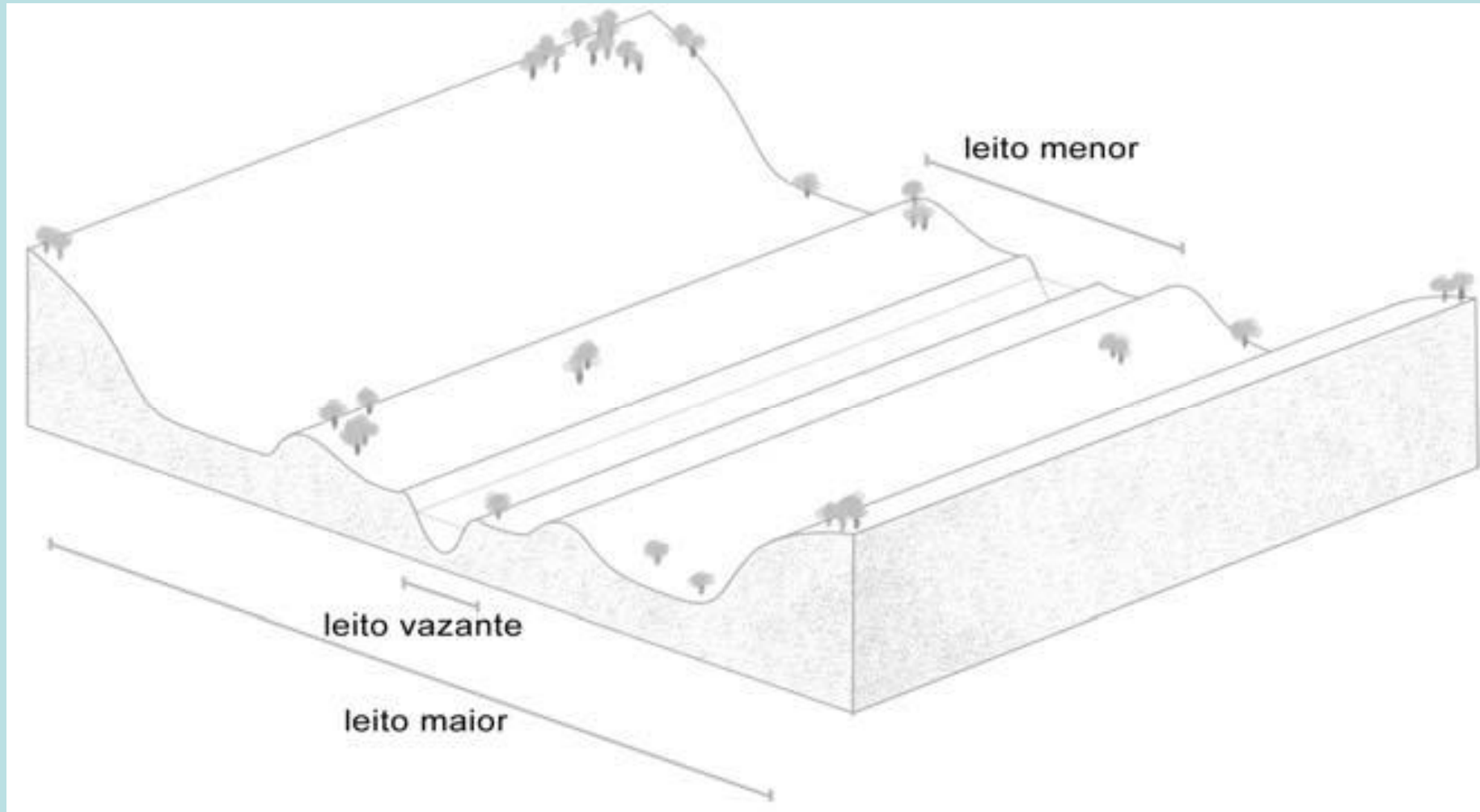
Distribuição de **Velocidade** ao longo da curva



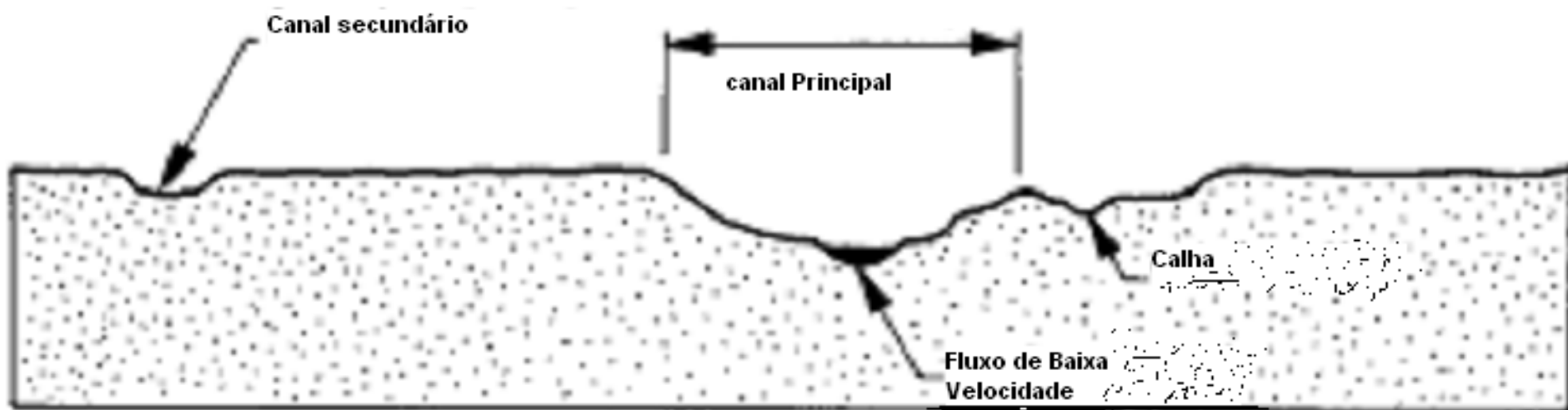
Generalized velocity distribution

Generalized surface streamlines

Formas geométricas do canal fluvial

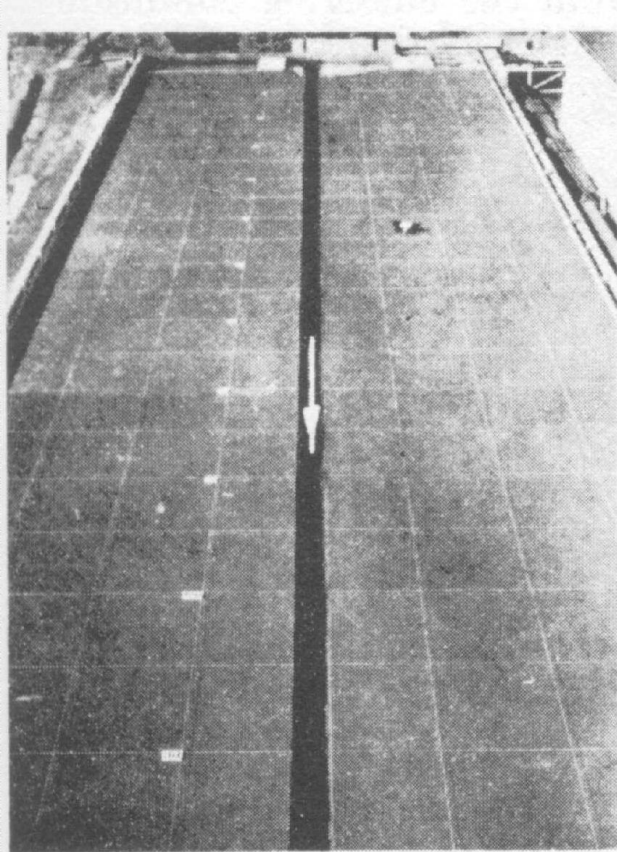


Tipos de canais, quanto à presença de escoamento

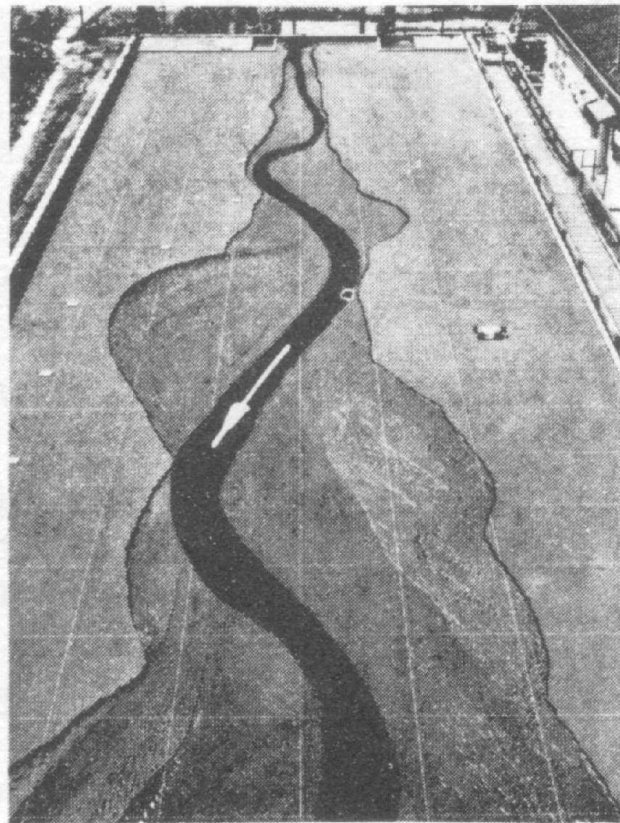


MORFOLOGIA FLUVIAL

TRAÇADO EM PLANTA: OBSERVAÇÕES EM LABORATÓRIO



INITIAL STRAIGHT CHANNEL

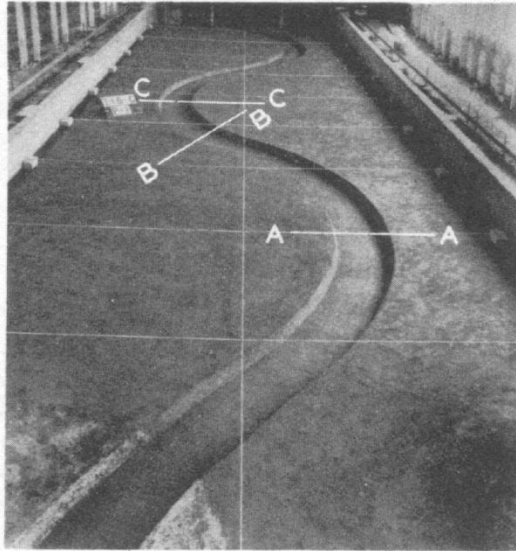


CHANNEL AFTER 48 HRS
OF FLOW

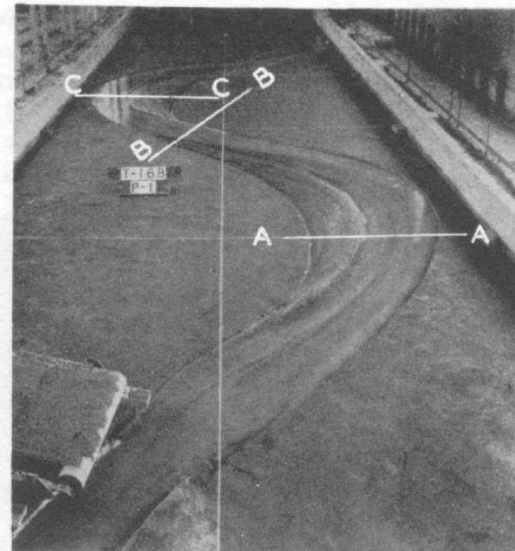


CHANNEL AFTER 72 HRS
OF FLOW

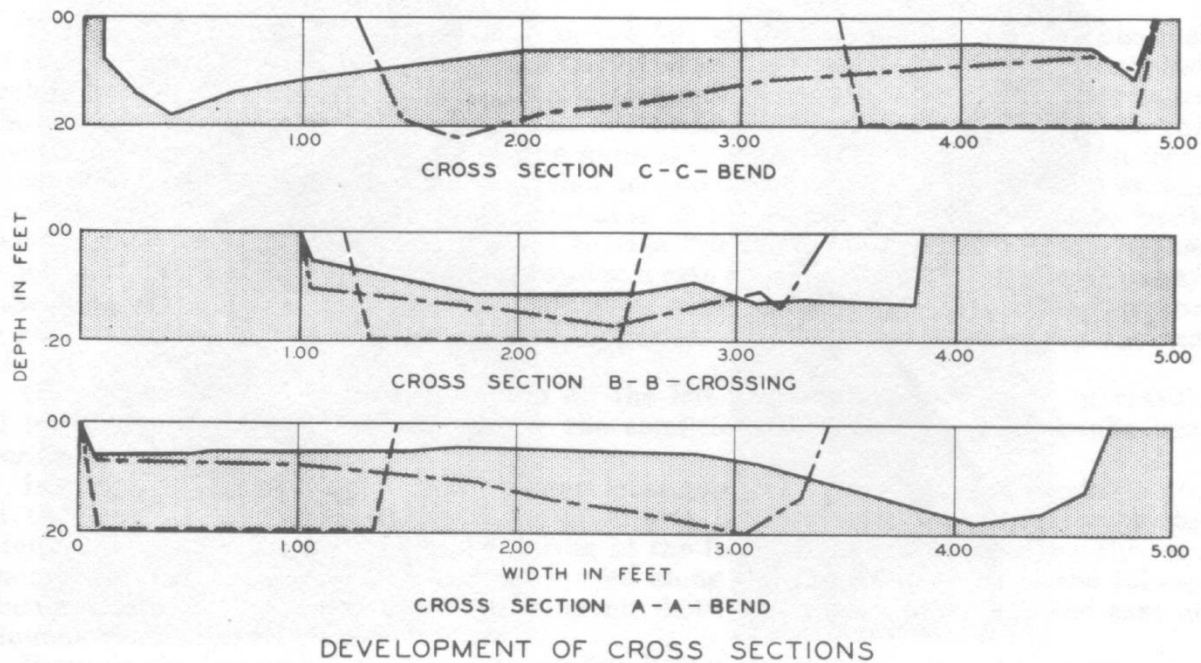
MORFOLOGIA FLUVIAL - TRAÇADO



INITIAL CHANNEL

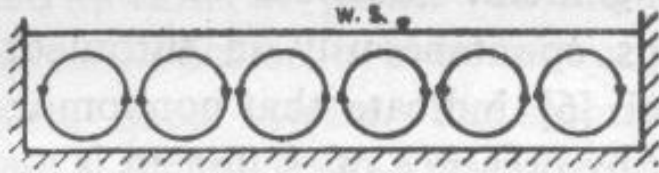


CHANNEL AFTER 12 HOURS

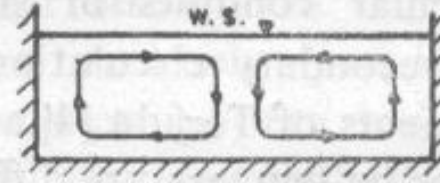


MORFOLOGIA FLUVIAL

TRAÇADO EM PLANTA: OBSERVAÇÕES EM LABORATÓRIO



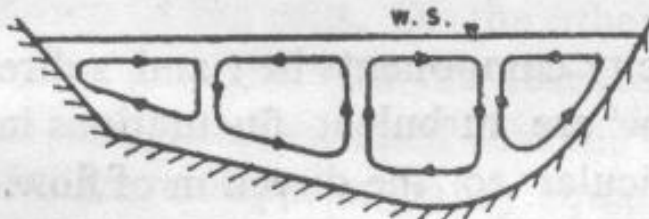
(b) TERADA



(a) MAX MÖLLER AND STERNS



MOVABLE BED
(c) CASEY

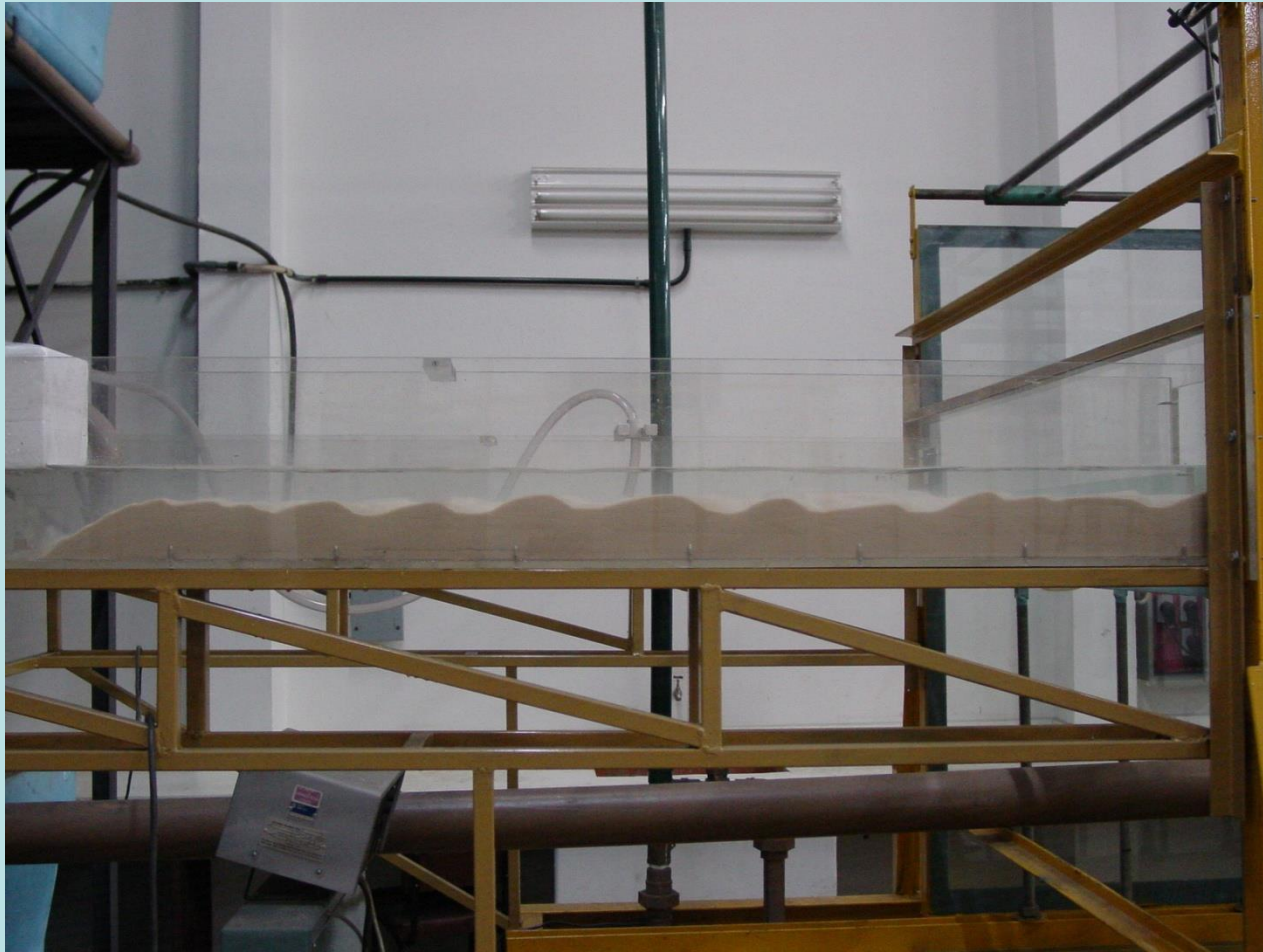


(e) GIANDOTTI (ON PO RIVER, ITAL.)

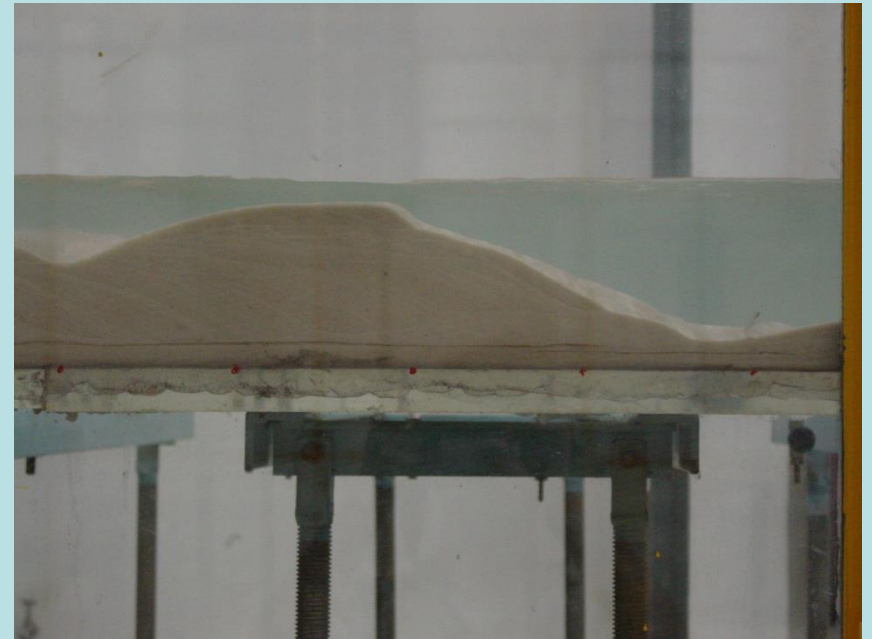


(d) NEMENYI

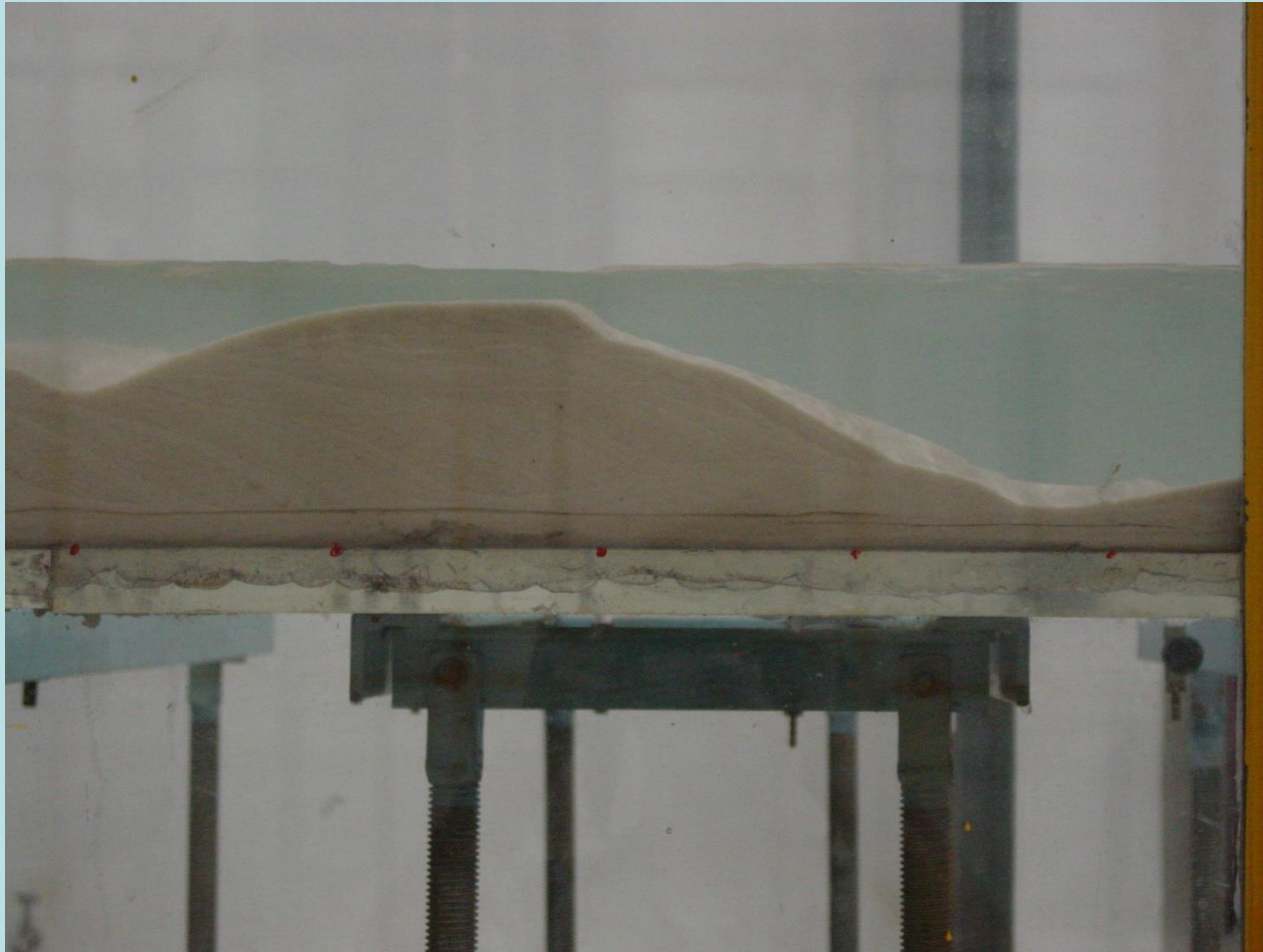
Transporte de Sedimentos – Formação de dunas- Processo de sedimentação- aumento da declividade



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

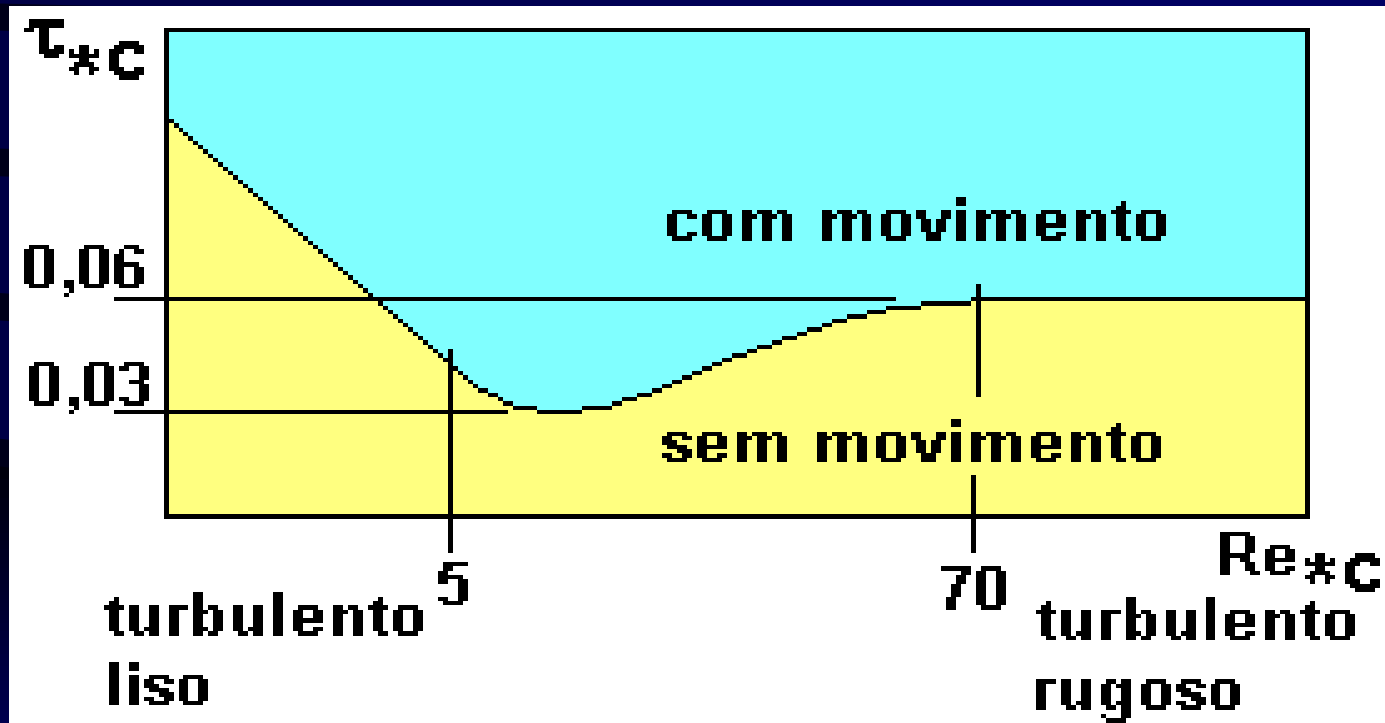


Transporte de Sedimentos – Formação de dunas- Processo de sedimentação- aumento da declividade



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

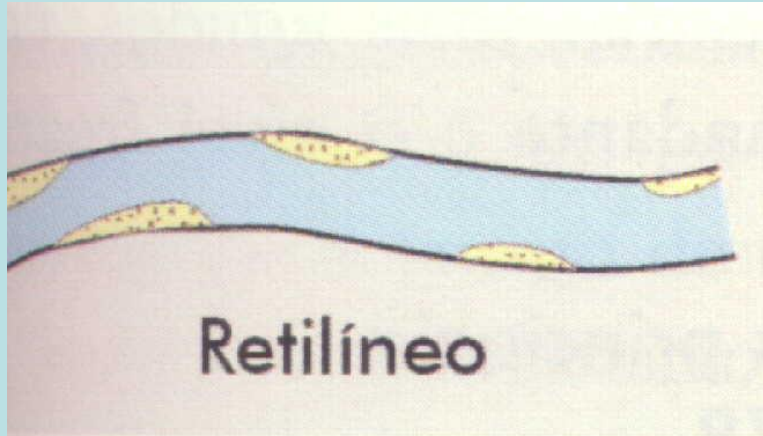
- **Forma real: curva seno – gerada – curva que se obtém através do mais provável caminho ao acaso entre dois pontos de um vale de rio.**
- **Solução matemática : integral elíptica**

Formação de traçado sinuoso

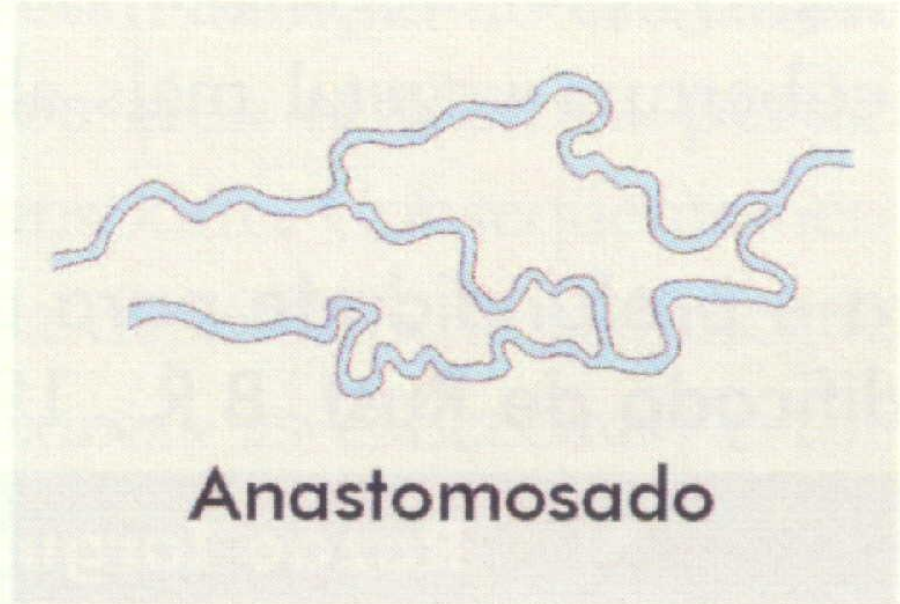
- $Q_s < Q_{smax}$ → Escoamento tende a erodir o trecho de rio;
- Escoamento tende a extrair quantidade complementar de material sólido para atingir seu estado de saturação ou capacidade máxima de transporte (Q_{smax}),
- Se $\zeta_o > \zeta_{oc}$ → **leito instável** → tendência de alteração da forma 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**

MORFOLOGIA FLUVIAL -

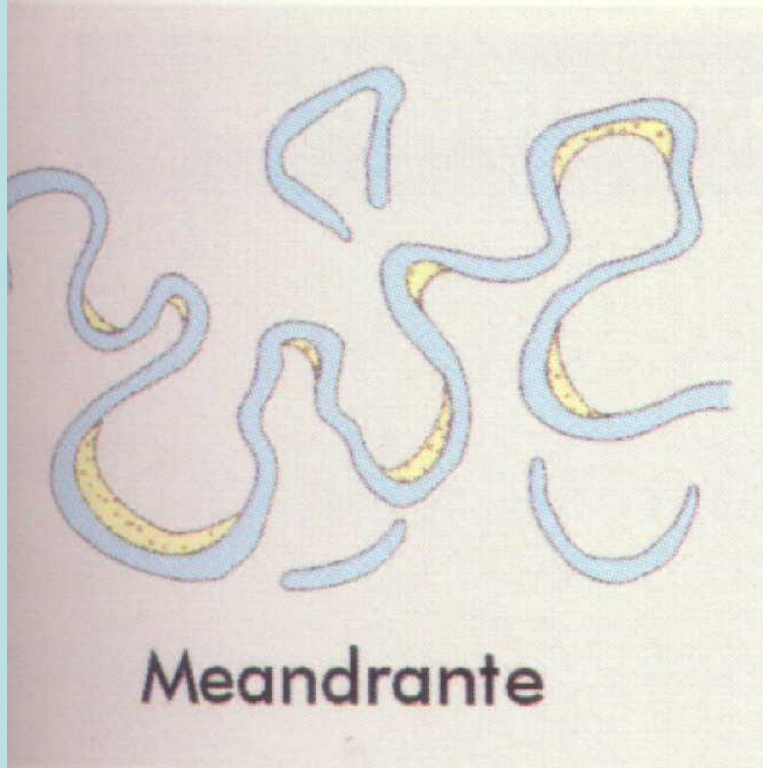
TIPOS DE TRAÇADO



Retilíneo



Anastomosado



Meandrante

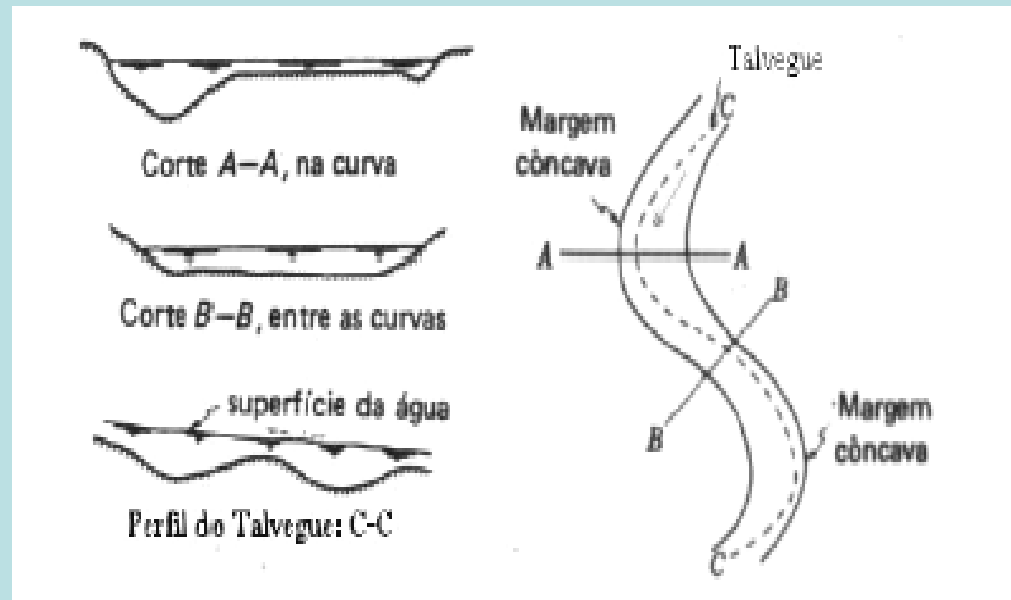


Entrelaçado

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

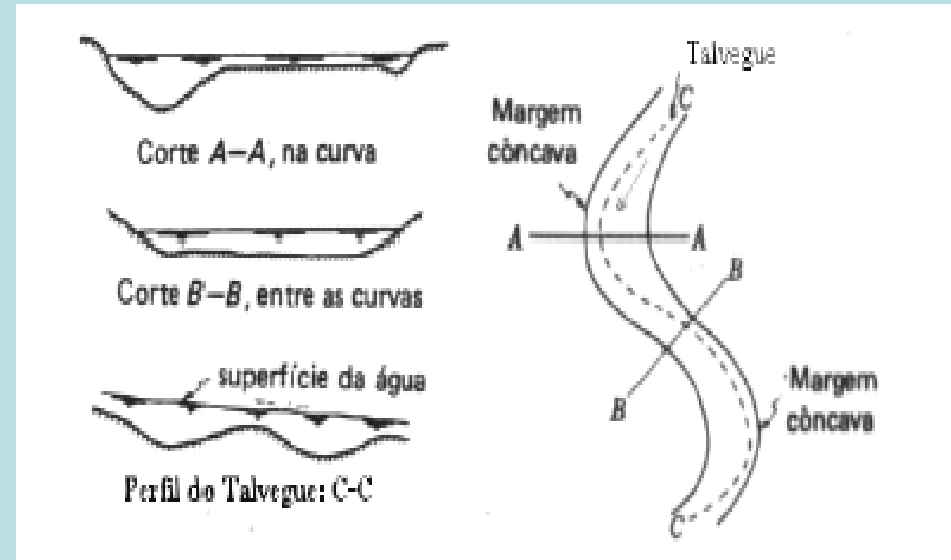
Trecho de 170km, largura média de 10 a 150m, 275 e 4.450m³/s
– ordem de grandeza do rio Tietê

- **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.



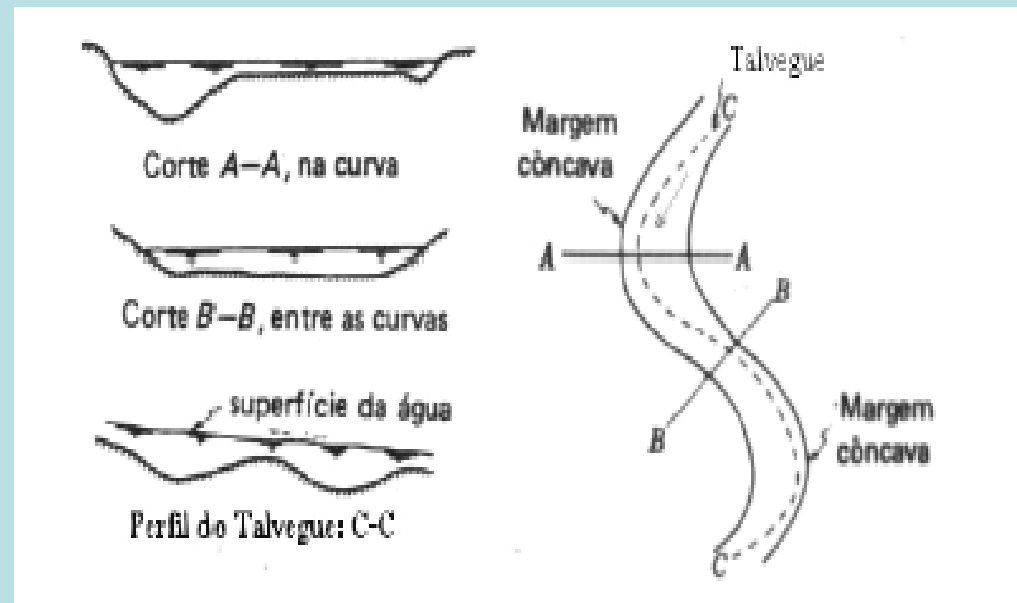
Fargue, 1863 - Leis válidas - rio Garone (França)

- **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;



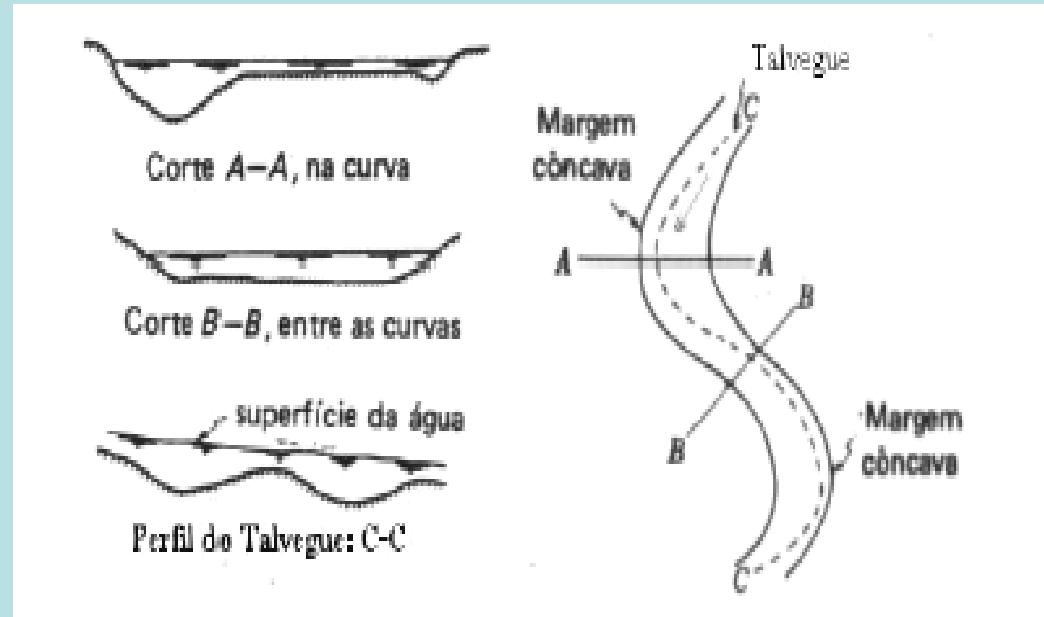
Fargue, 1863 - Leis válidas - rio Garone (França)

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



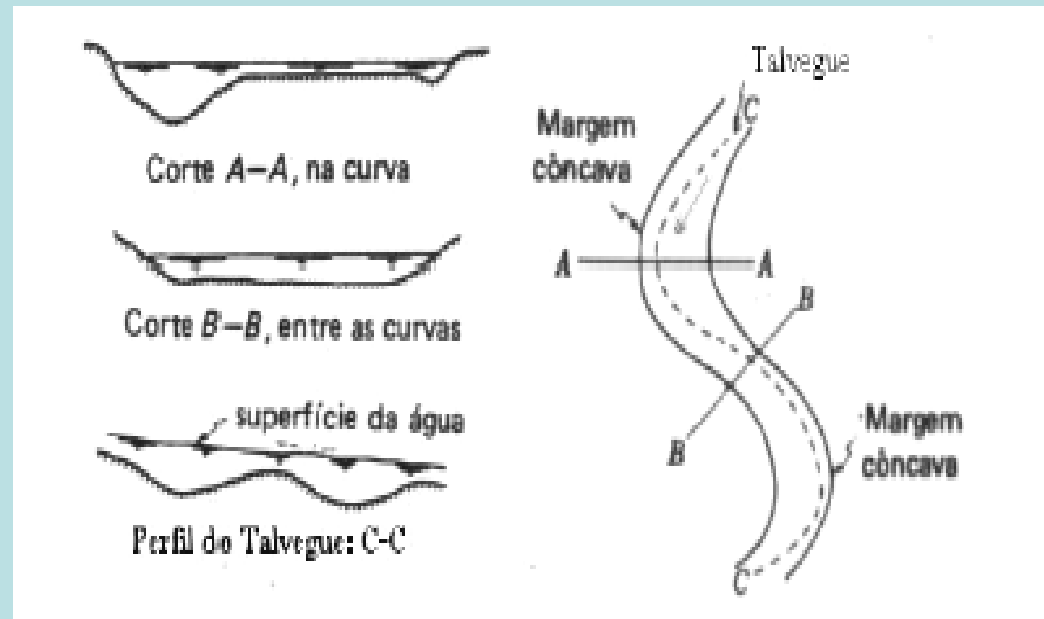
Fargue, 1863 - Leis válidas - rio Garone (França)

- **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)

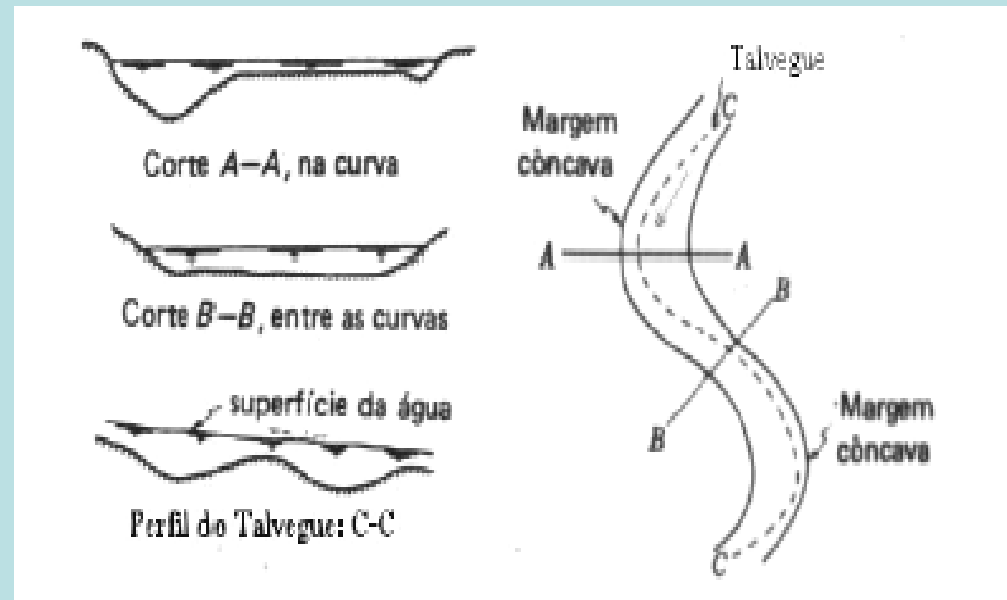
6a. Lei da declividade de

fundo: A variação da

curvatura é

proporcional à variação

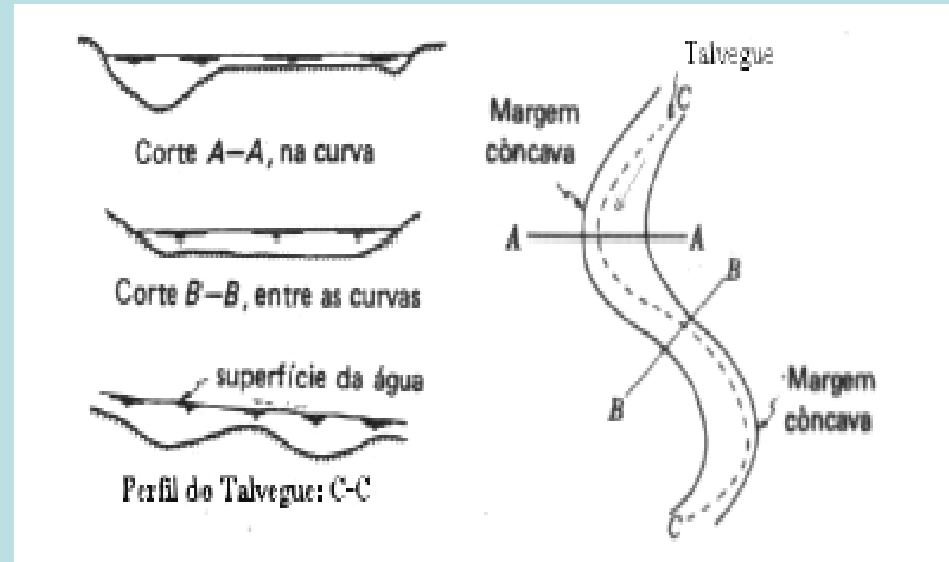
da declividade de fundo

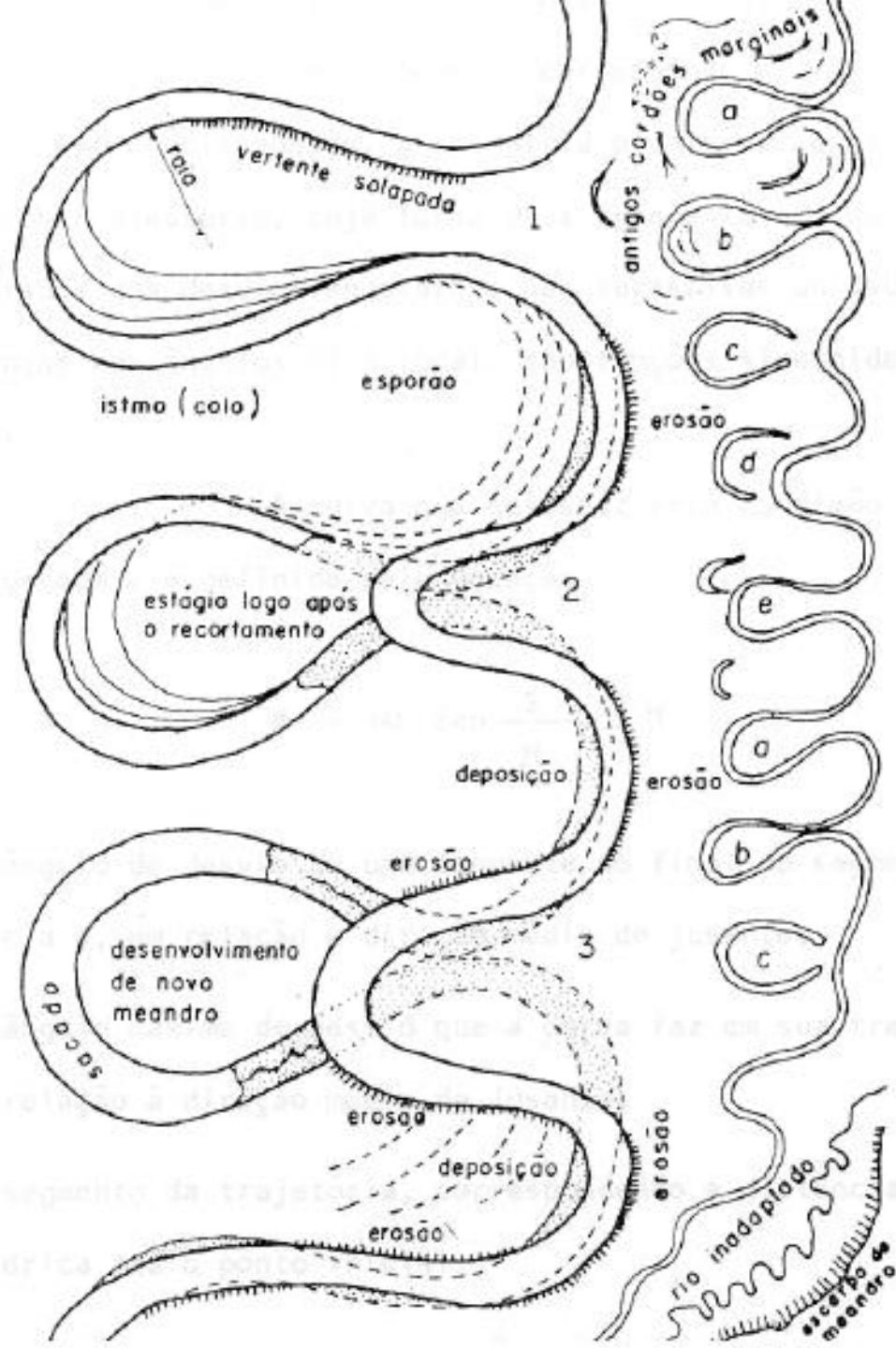


Fargue, 1863 - Leis válidas - rio Garone (França)

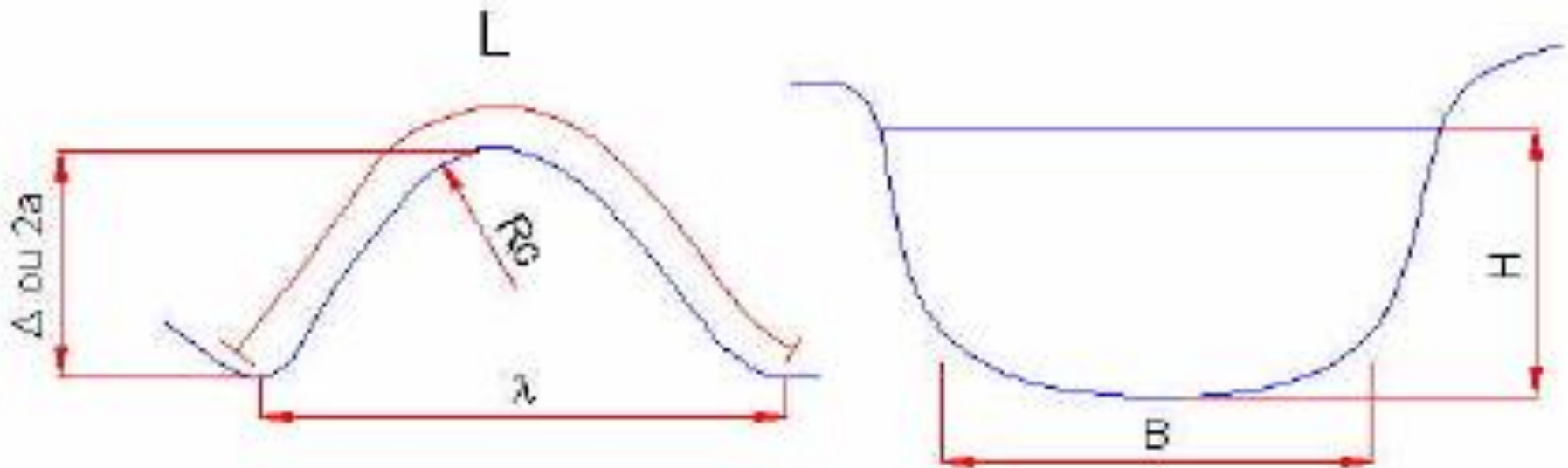
1º COROLÁRIO Para um dado comprimento de curva (IC), a profundidade média (h_{Cm}) é função do ângulo entre as tangentes extremas da curva .

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;

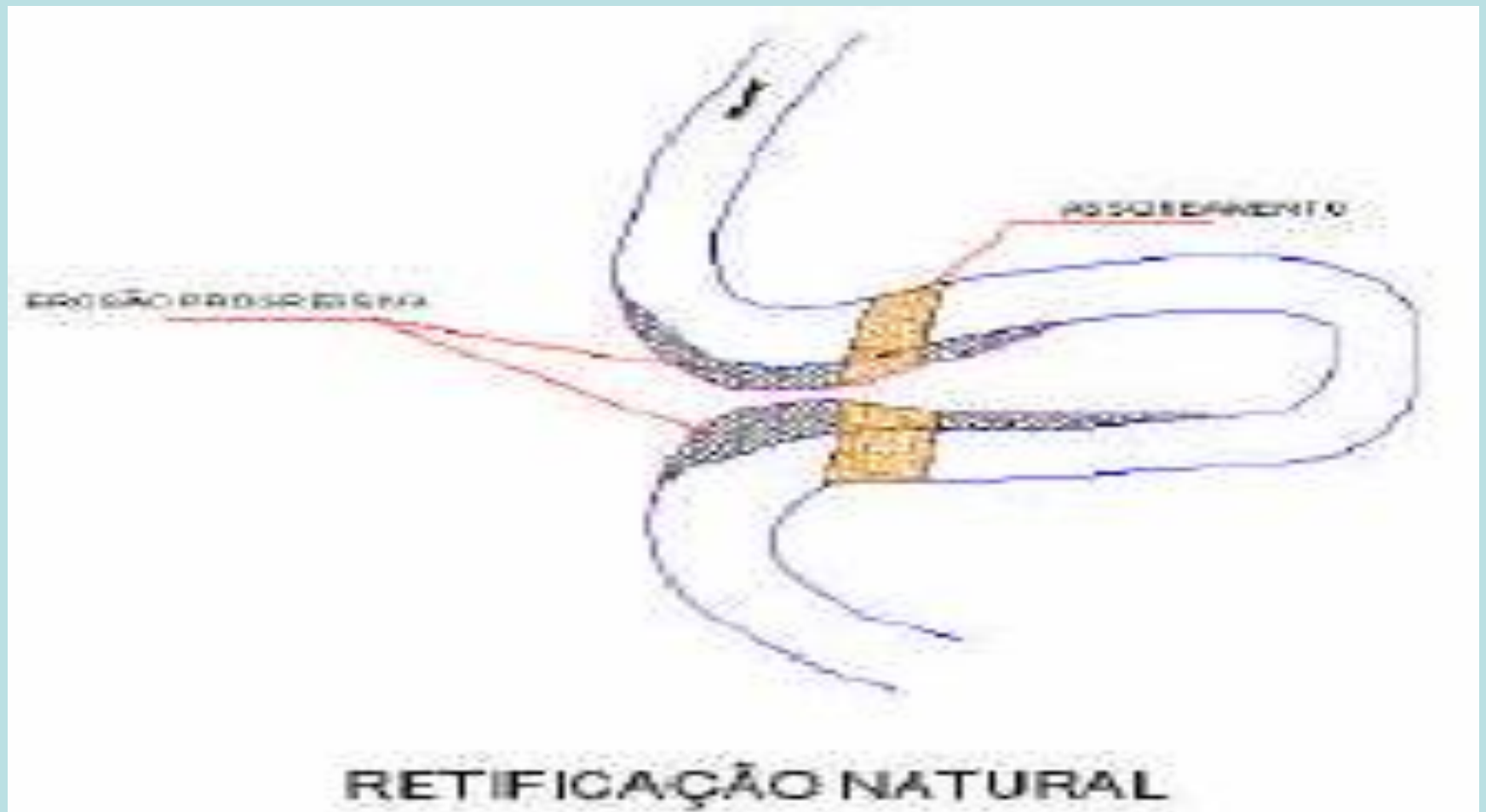
Rc= raio da curva do meandro;

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

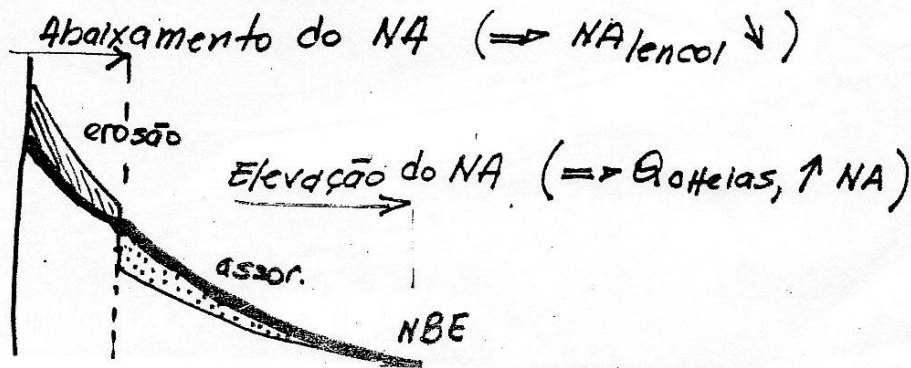
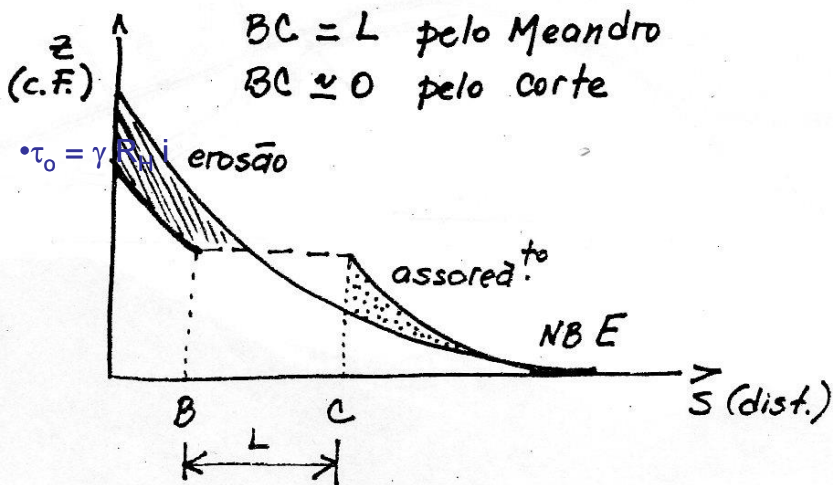
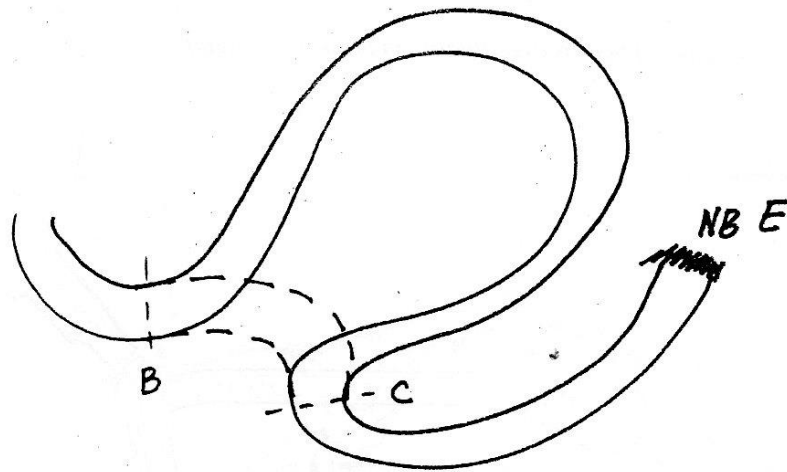
λ= projeção horizontal do comprimento;

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

Retificação Natural – Corte de Meandro

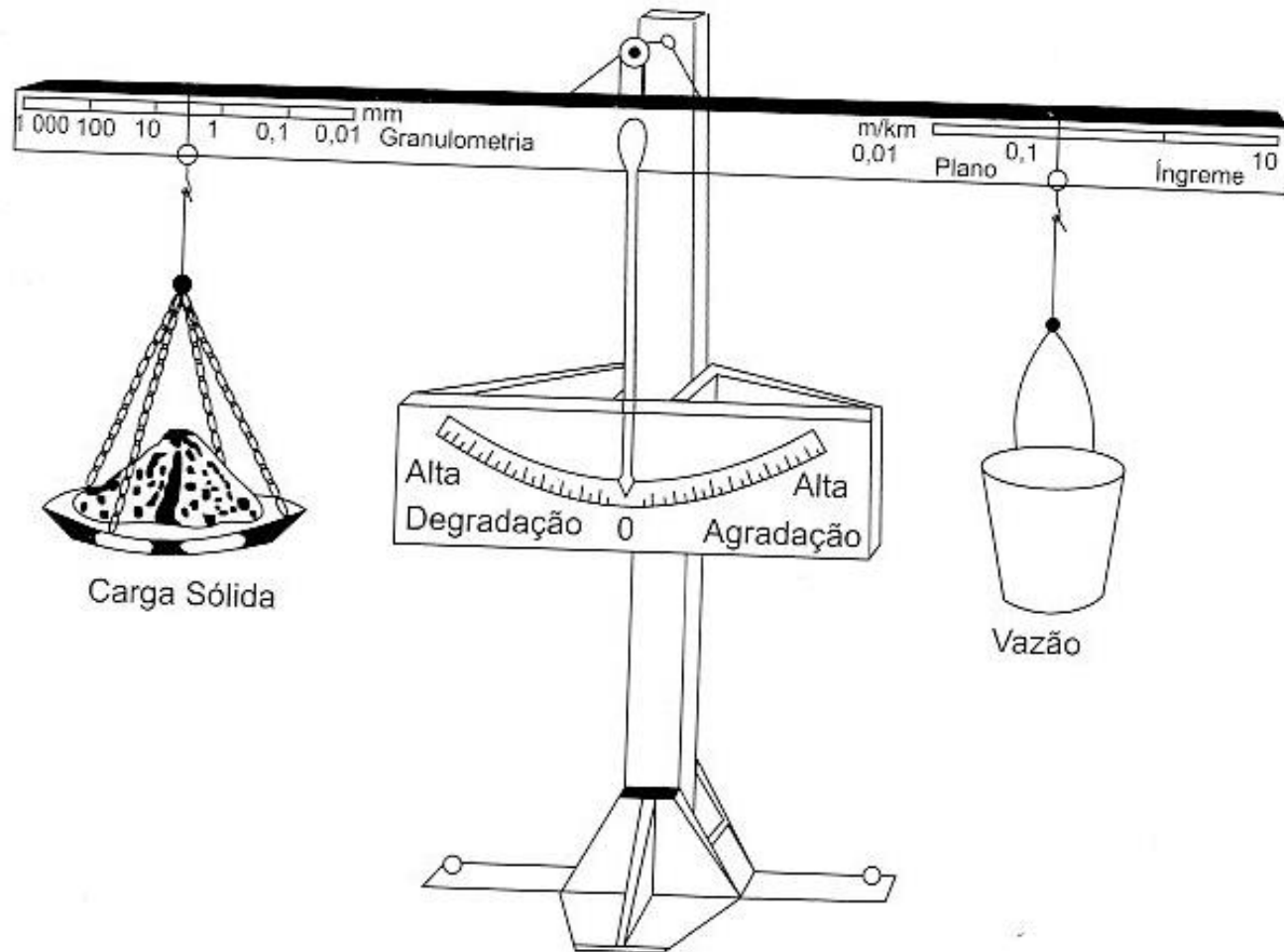


Corte de Meandros



- **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;

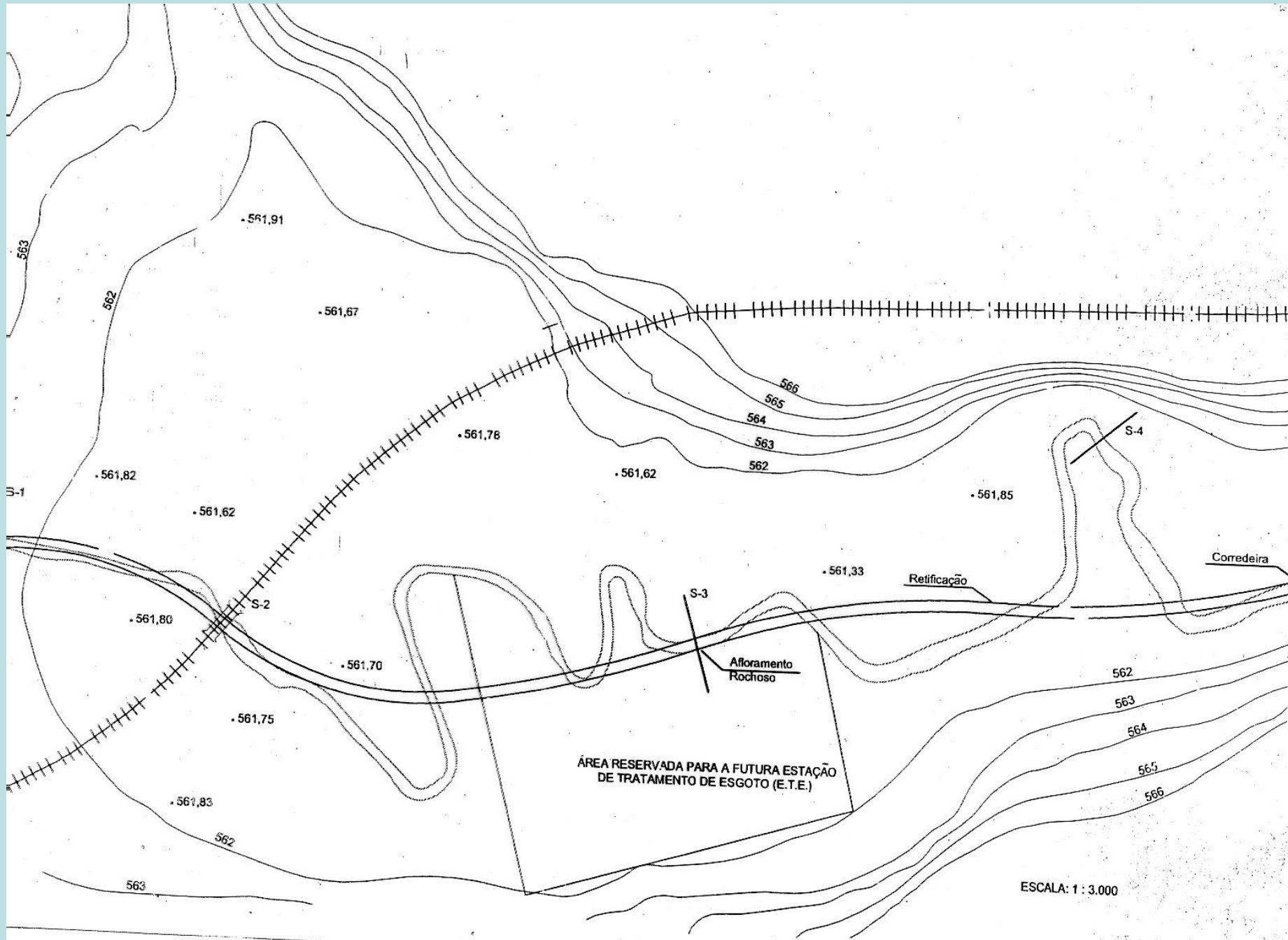
Distribuição de sedimentos no curso d'água



Descarga Sólida X Diâmetro da Partícula α 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.**

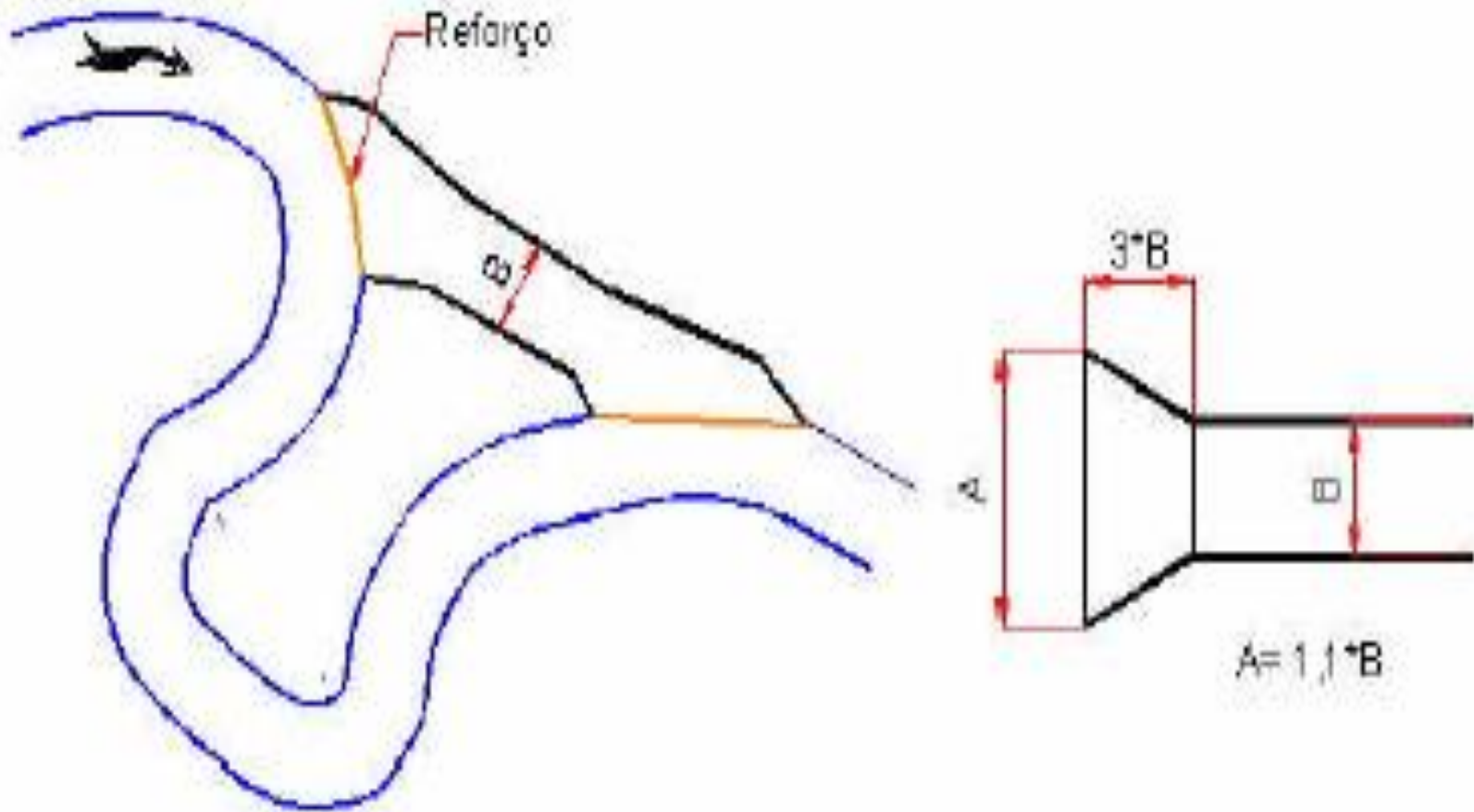
Retificação de trecho de rio

- 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.

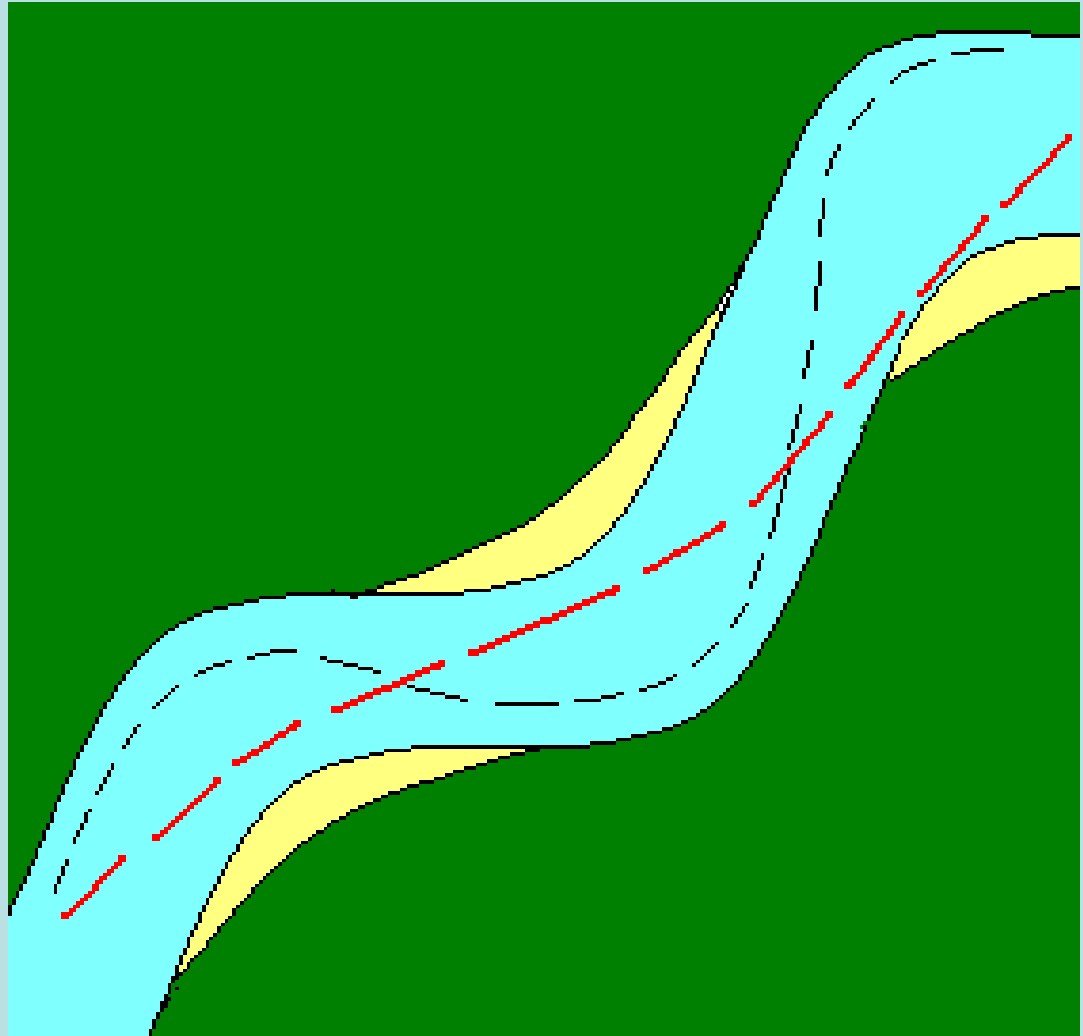
ASPECTOS DA INSTABILIZAÇÃO

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)



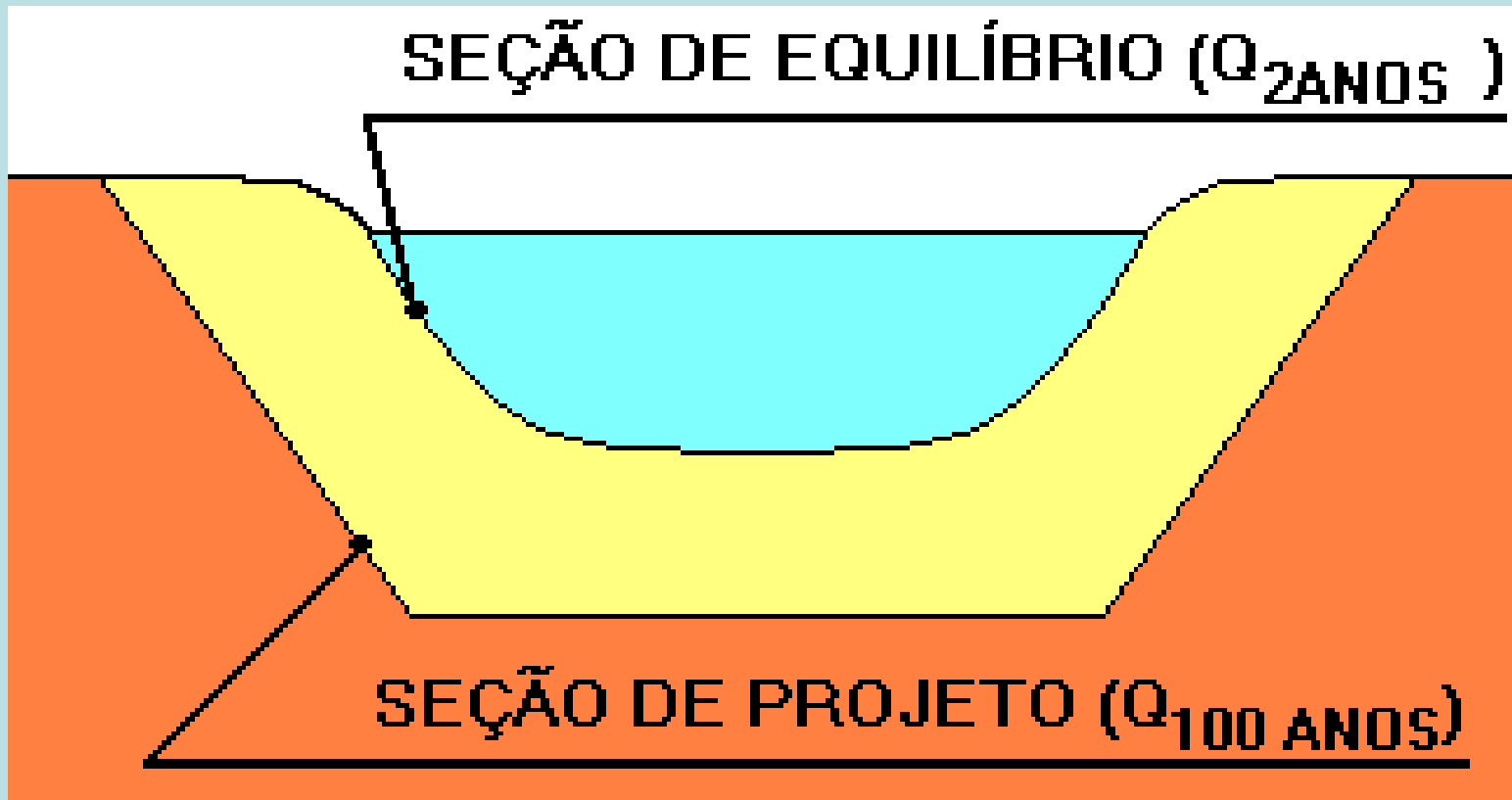
ASPECTOS DA INSTABILIZAÇÃO

EXEMPLO: MUDANÇA DE SEÇÃO TÍPICA

PROJETOS DE DRENAGEM / NAVEGAÇÃO / ADUÇÃO

REDUÇÃO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE SÓLIDO

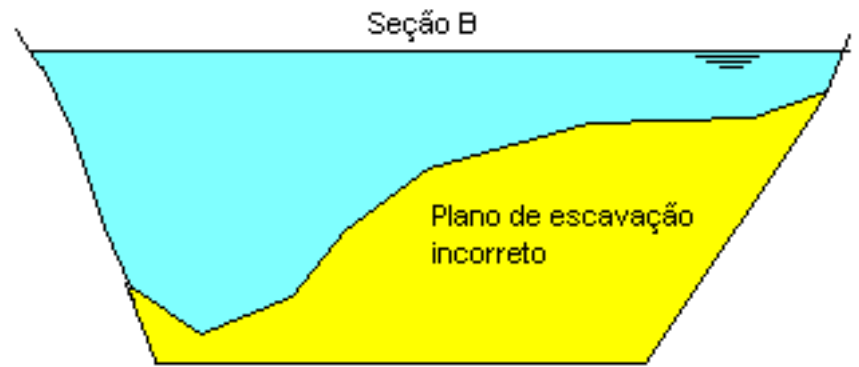
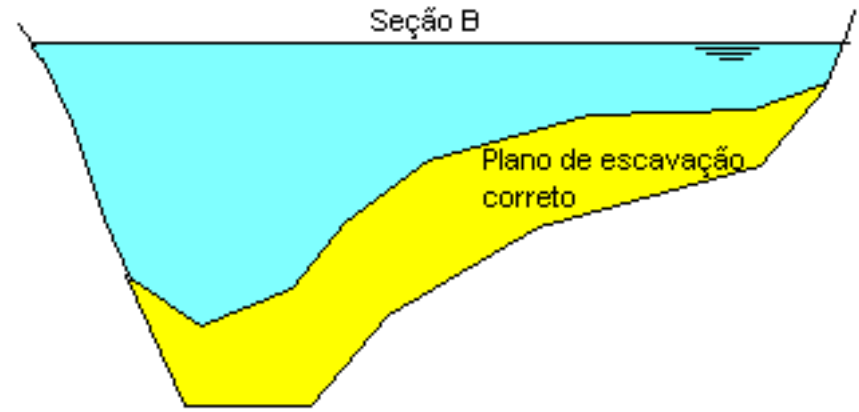
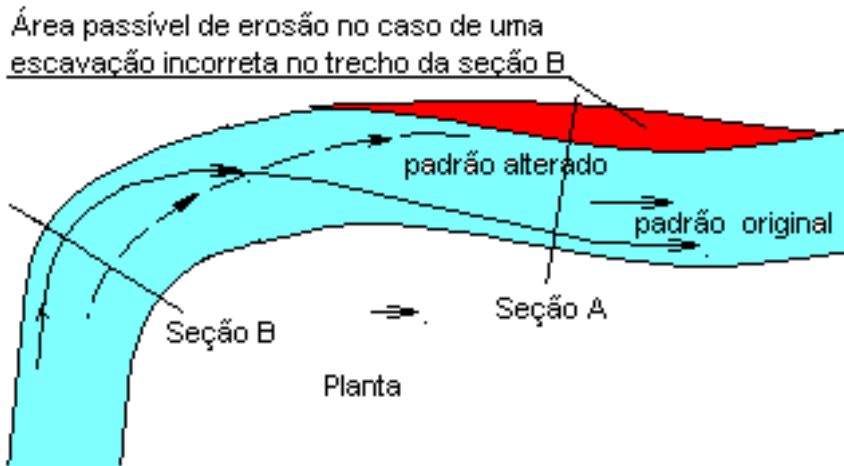
ASSOREAMENTO PARA RETOMAR A SEÇÃO ORIGINAL



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.**

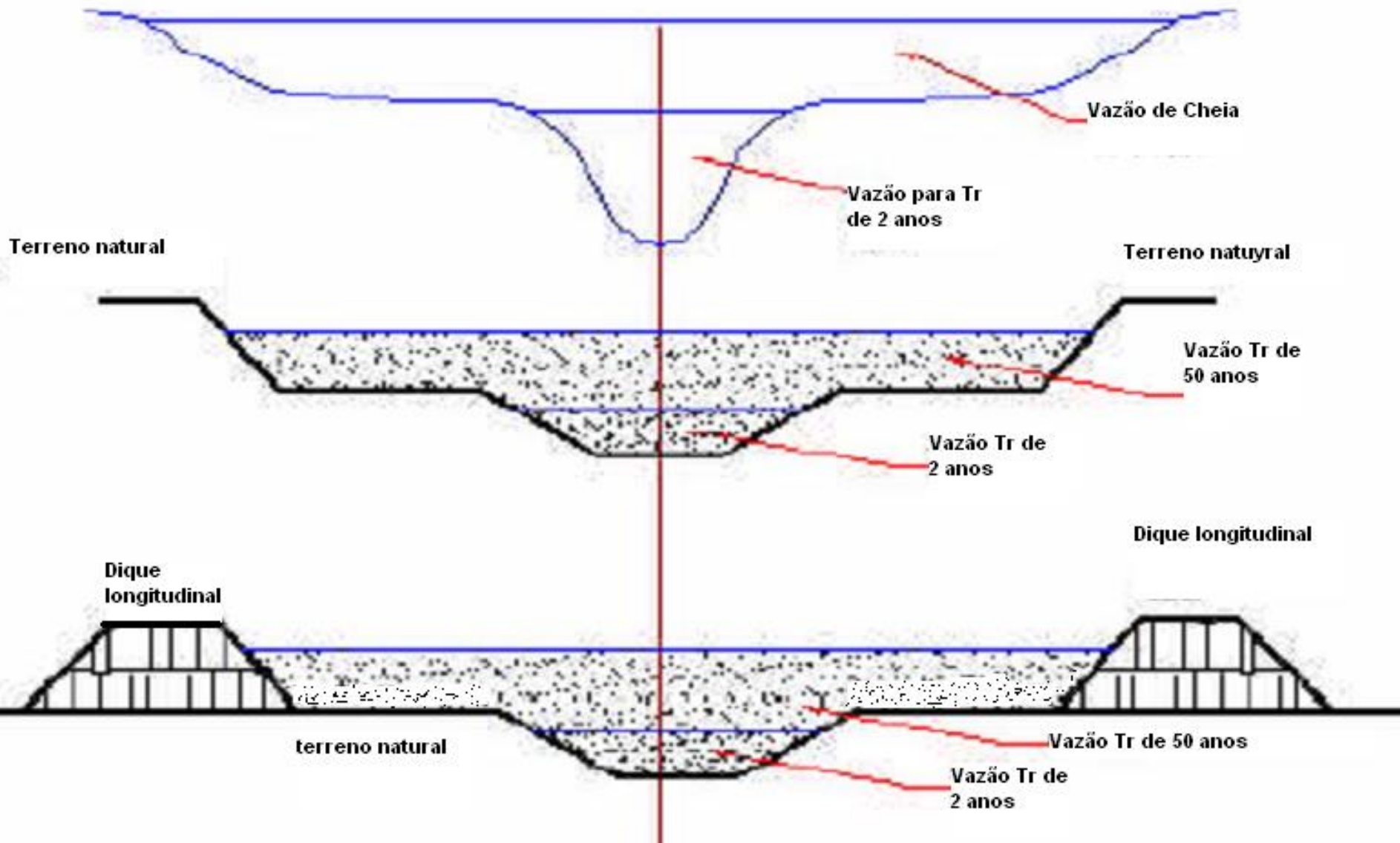
Retificação de trecho de rio

- **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

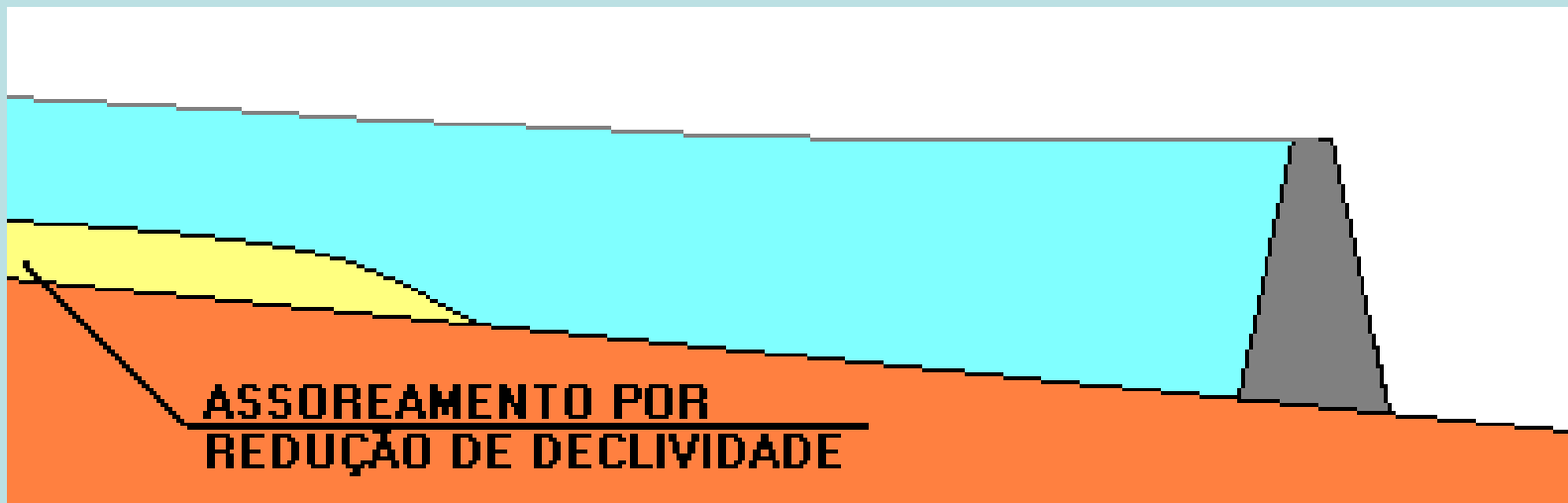
EXEMPLO: ALTERAÇÃO DE DECLIVIDADE

PROJETOS DE DRENAGEM / BARRAGENS / NAVEGAÇÃO

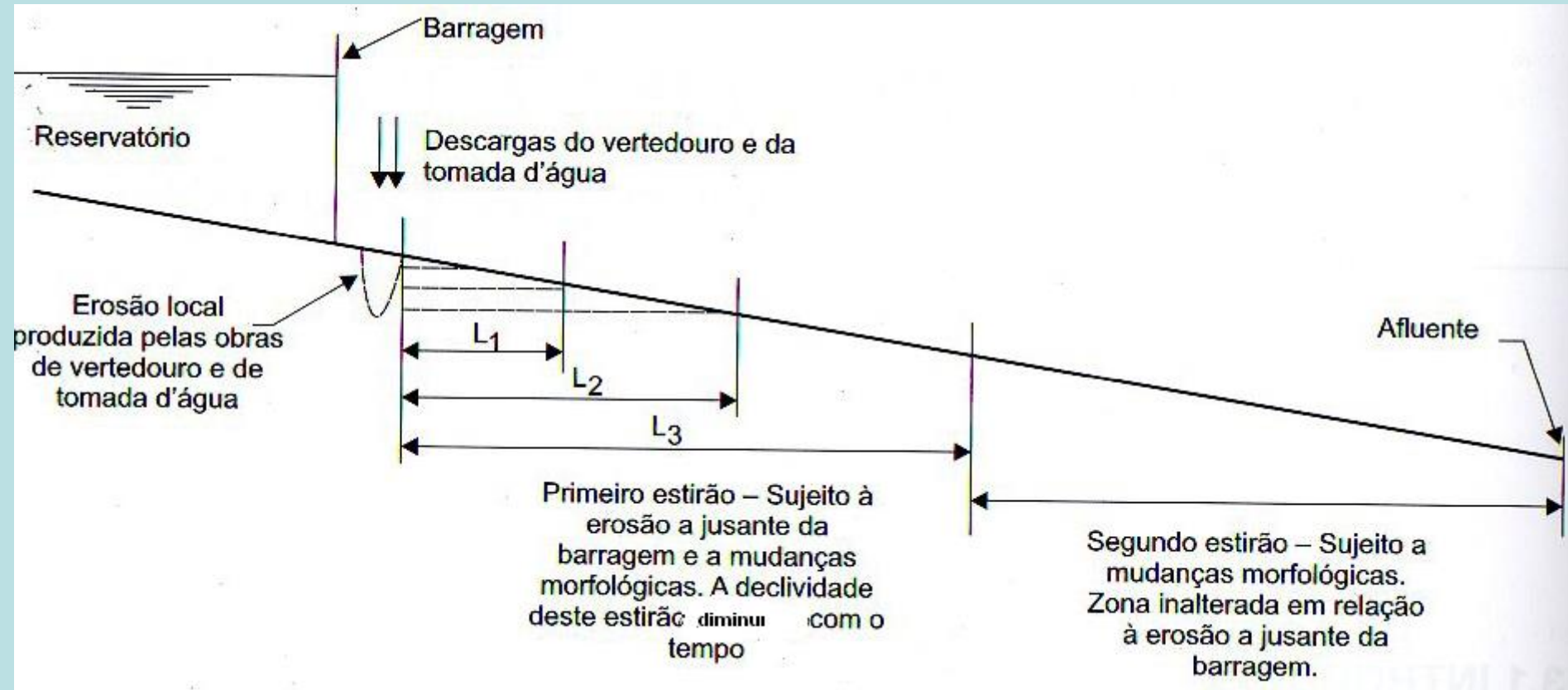
REDUÇÃO OU AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE SÓLIDO

ASSOREAMENTO OU EROSÃO

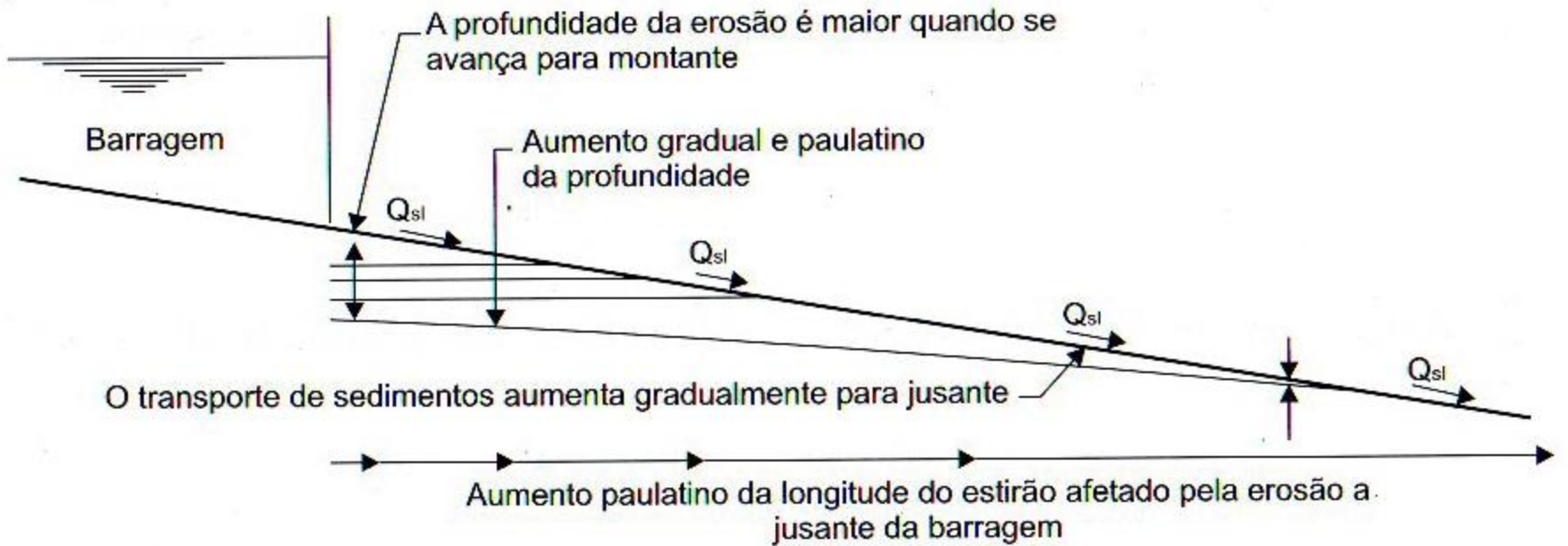
PARA A RETOMADA DA DECLIVIDADE DE EQUILÍBRIO



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)

Mudanças	Efeitos
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

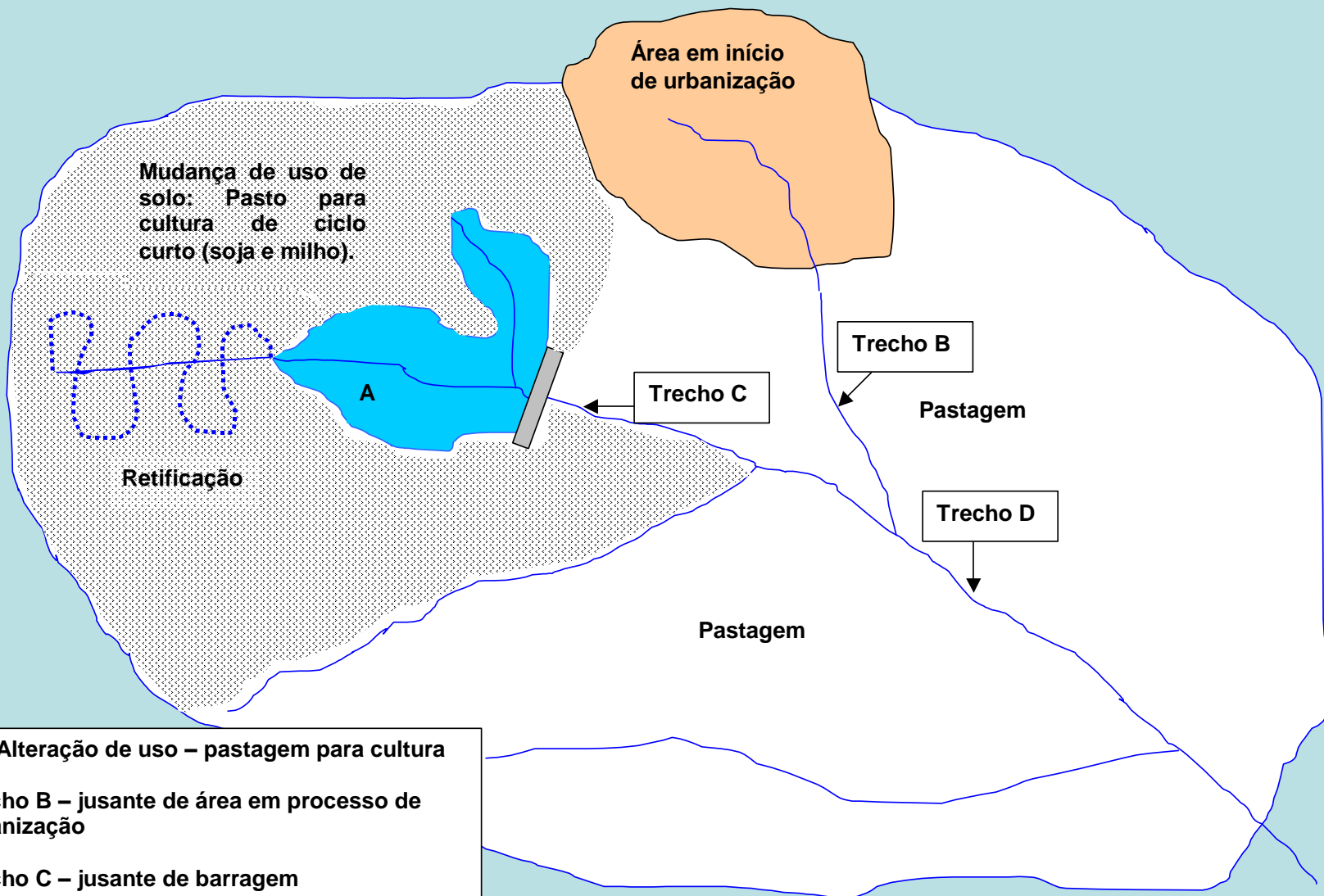
REDUÇÃO OU AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE SÓLIDO

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.