

Portos e Obras Fluviais e Marítimas

PHA - 3402

Formação e Desenvolvimento de rios

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

www.phd.poli.usp.br

DEFINIÇÃO

- Hidráulica Fluvial pode ser entendida como um conjunto de informações e equações que procuram estabelecer relações entre características notáveis do escoamento em rios:
 - Largura da seção transversal
 - Profundidade do escoamento
 - Perfil longitudinal
 - Inclinação das margens
 - Traçado em planta
 - Vazão líquida / Vazão sólida

Morfologia Fluvial

- **Objetivo : Estudar a :**
- **Formação**
- **Evolução e**
- **Estabilização dos cursos d'água naturais...**

Trecho superior do rio



Trecho superior do rio



Rio Itarirú – Município de Itanhaém



Trecho médio do perfil do rio

Abrasão



Rio Itarirú – Município de Itanhaém



Trecho médio do perfil do rio

Trecho inferior do rio – próximo da Fóz



Hidráulica estuarina - Flexas



Fotografia aérea de 2000 da Barra do Rio Una em São Sebastião (SP).(BASE)

O Ciclo da Água

Formação dos cursos D'água

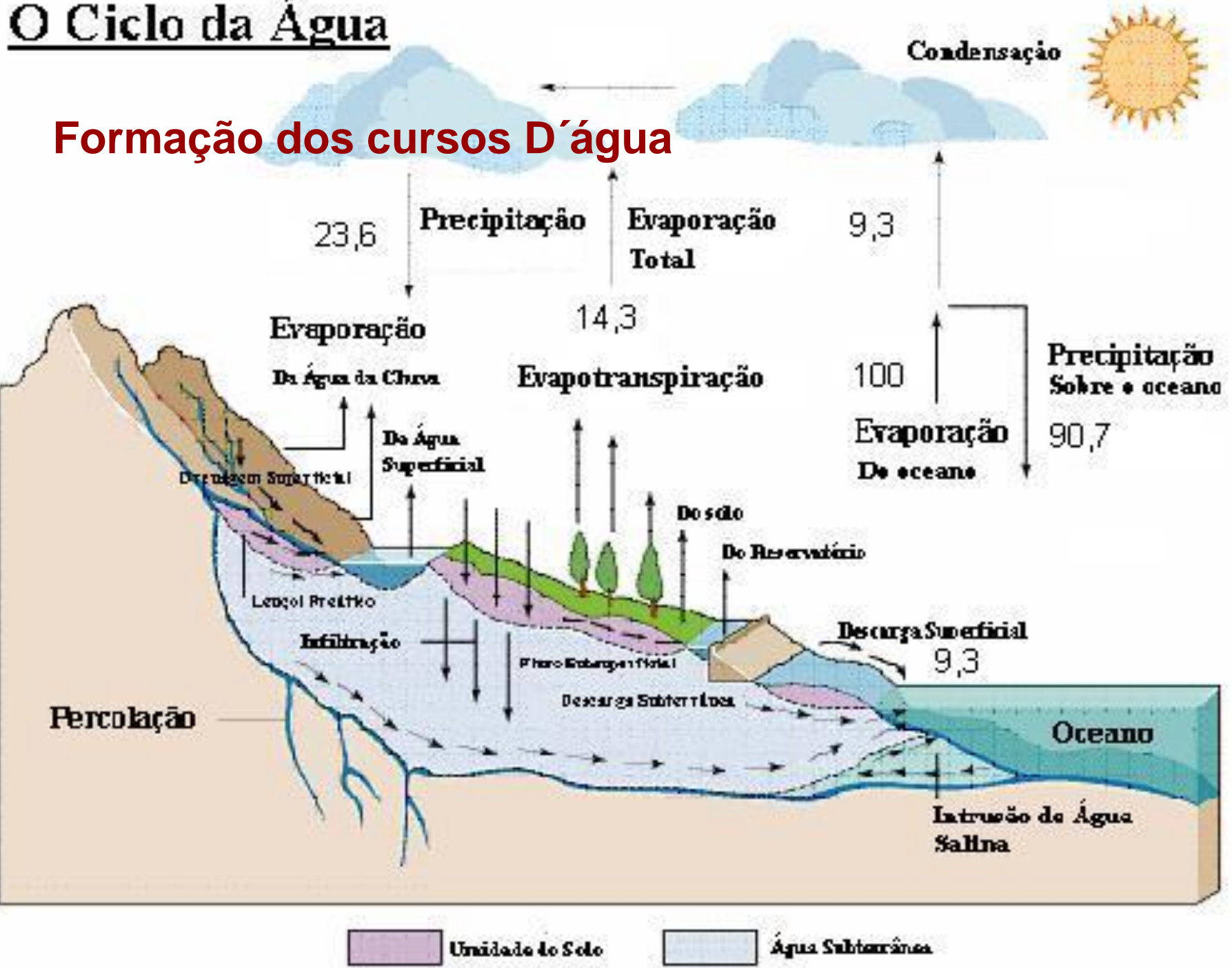
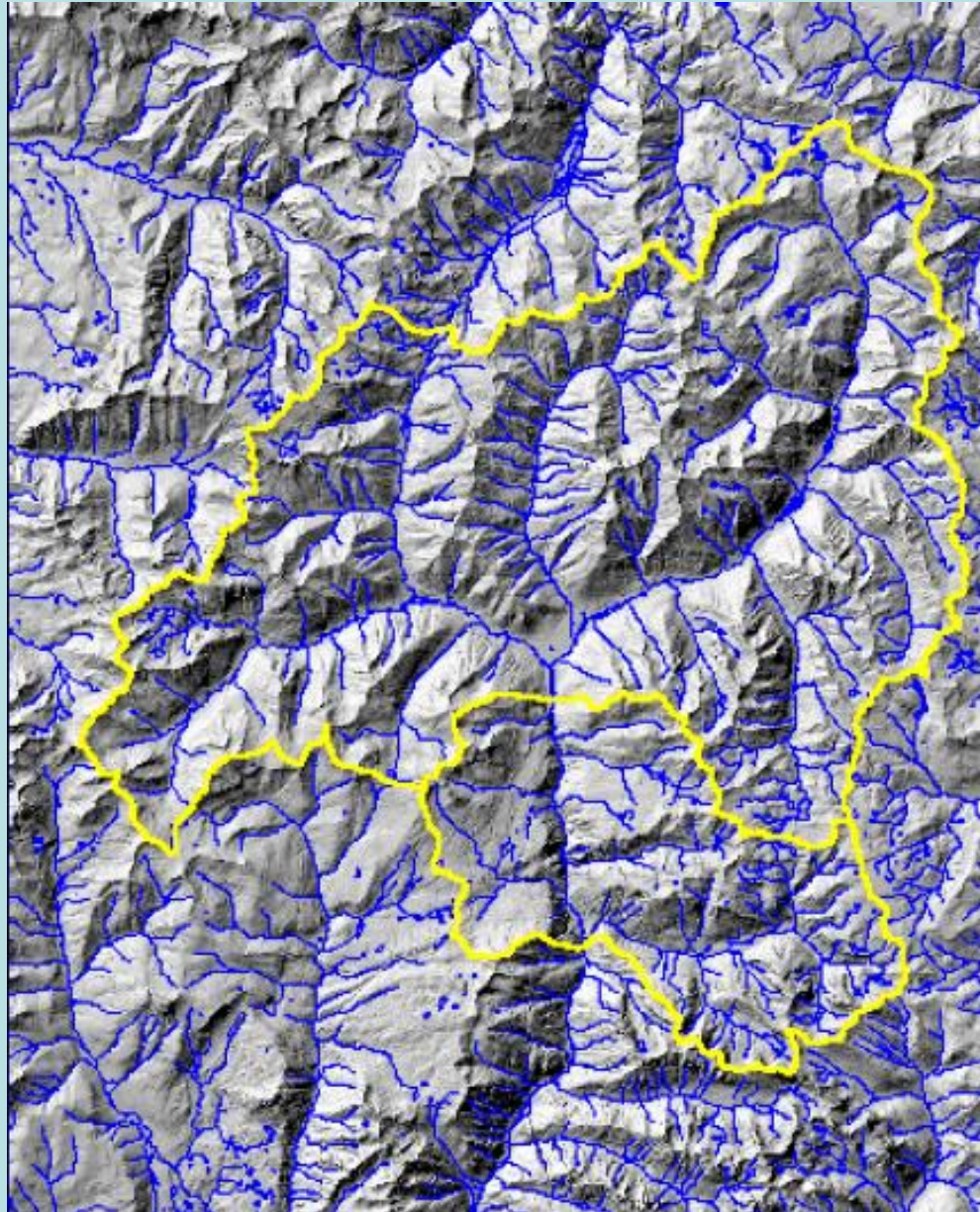
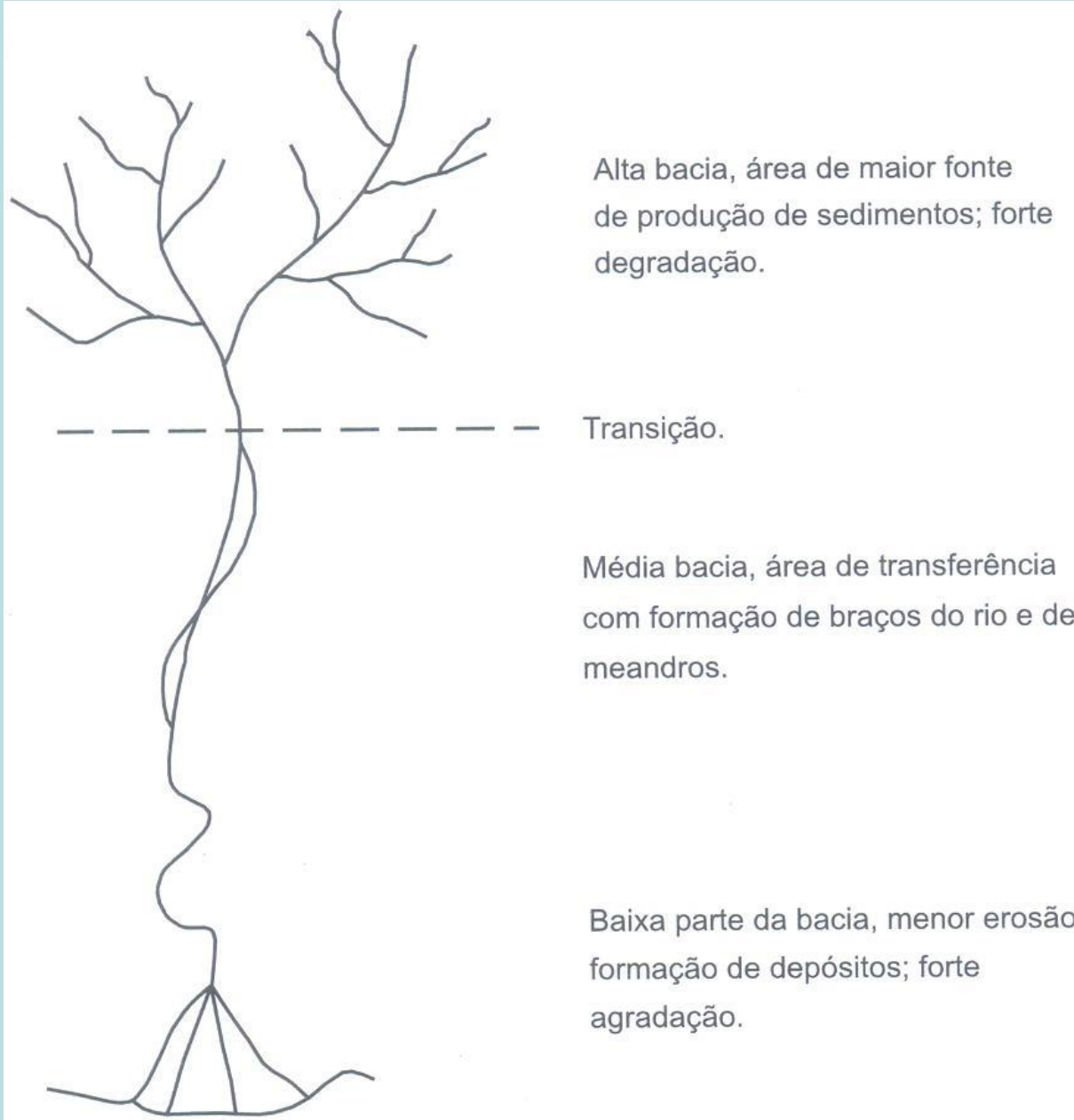


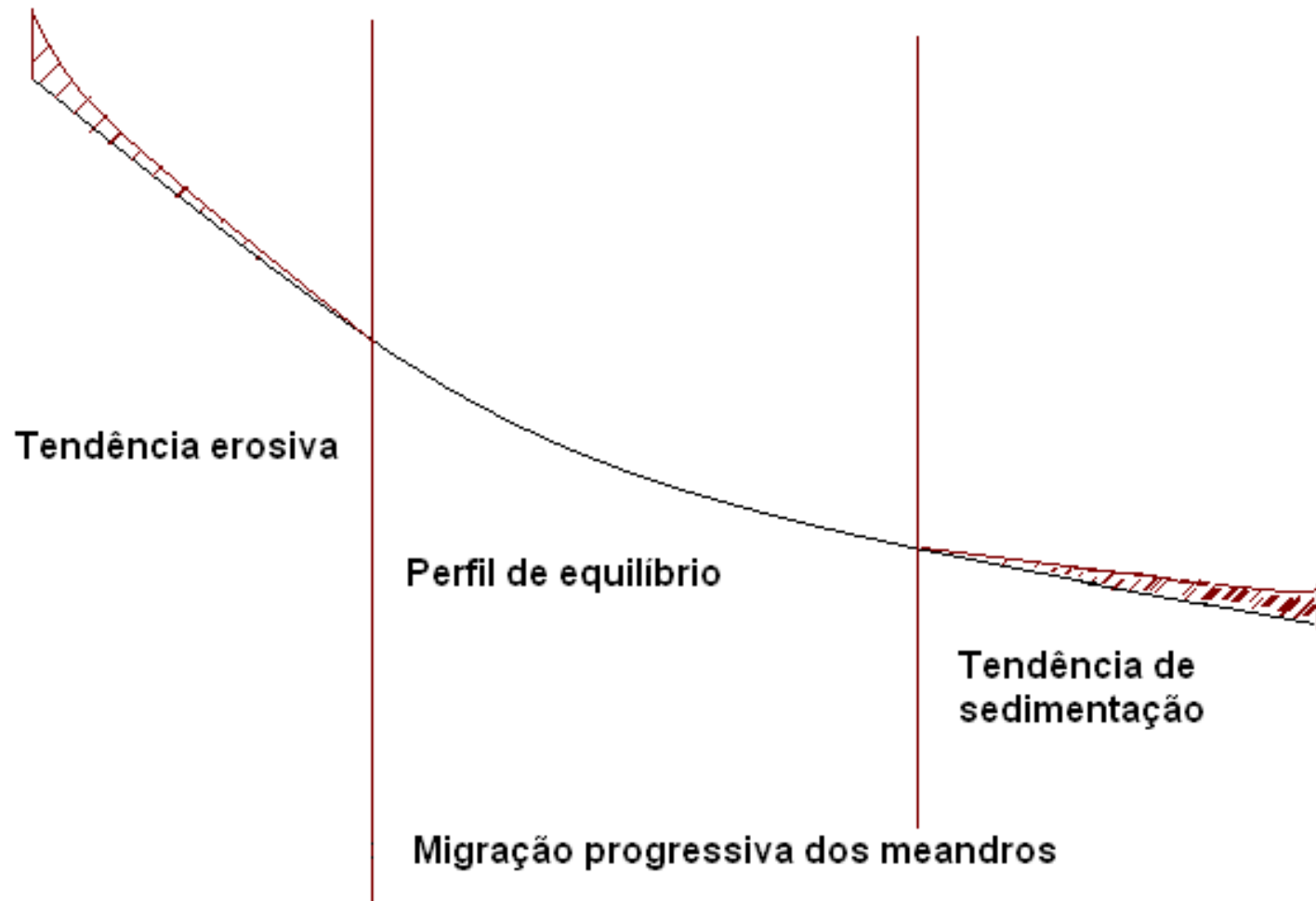
Imagem de Satélite – Delimitação da Bacia



Desenvolvimento do curso D'água ao longo da bacia



Perfil longitudinal do processo hidrossedimentométrico



APLICAÇÕES DA HIDRÁULICA FLUVIAL

- Implantação de obras hidráulicas no curso d'água (barragens, pontes, captações de água, canais artificiais, etc.)
- Hidrovias
- Ocupação dos terrenos ribeirinhos, etc.
- **Fenômenos extremamente complexos e difíceis de serem equacionados analiticamente (grande número de variáveis)**



Barragem

COMBOIO – TIPO – Tietê - Paraná



Canal Pereira Barreto



CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO

- Balanço entre:

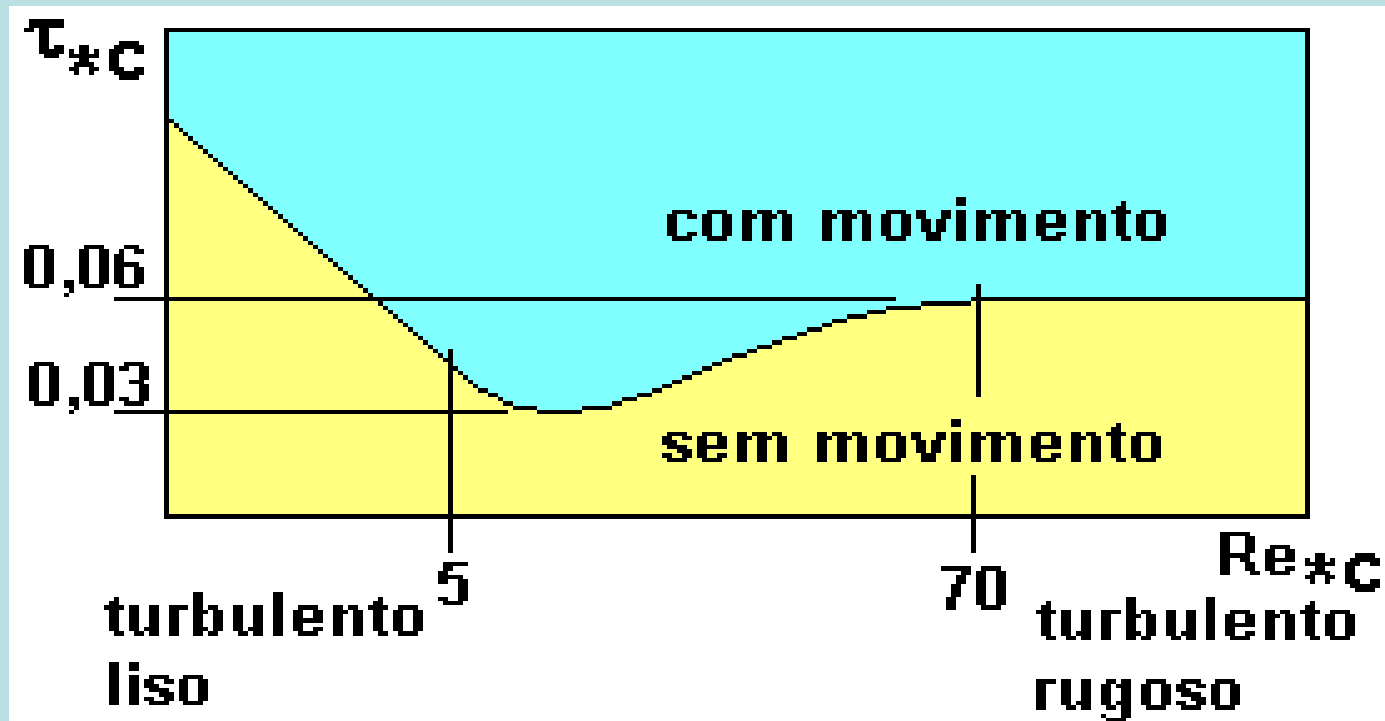
AÇÃO DO ESCOAMENTO

X

RESISTÊNCIA DO MATERIAL DO LEITO
(fundo e margens)

Início de Transporte

- Curva de Shields



CONDIÇÃO DE ESTABILIDADE

- Existe uma relação de equilíbrio entre:
 - Características geométricas do canal
 - Características do escoamento
 - Propriedades do material sólido

EQUILÍBRIO DINÂMICO

- Variações sazonais (hidrológicas)
 - REGIME DE VAZÕES
- Manutenção das características geométricas principais ao longo do tempo

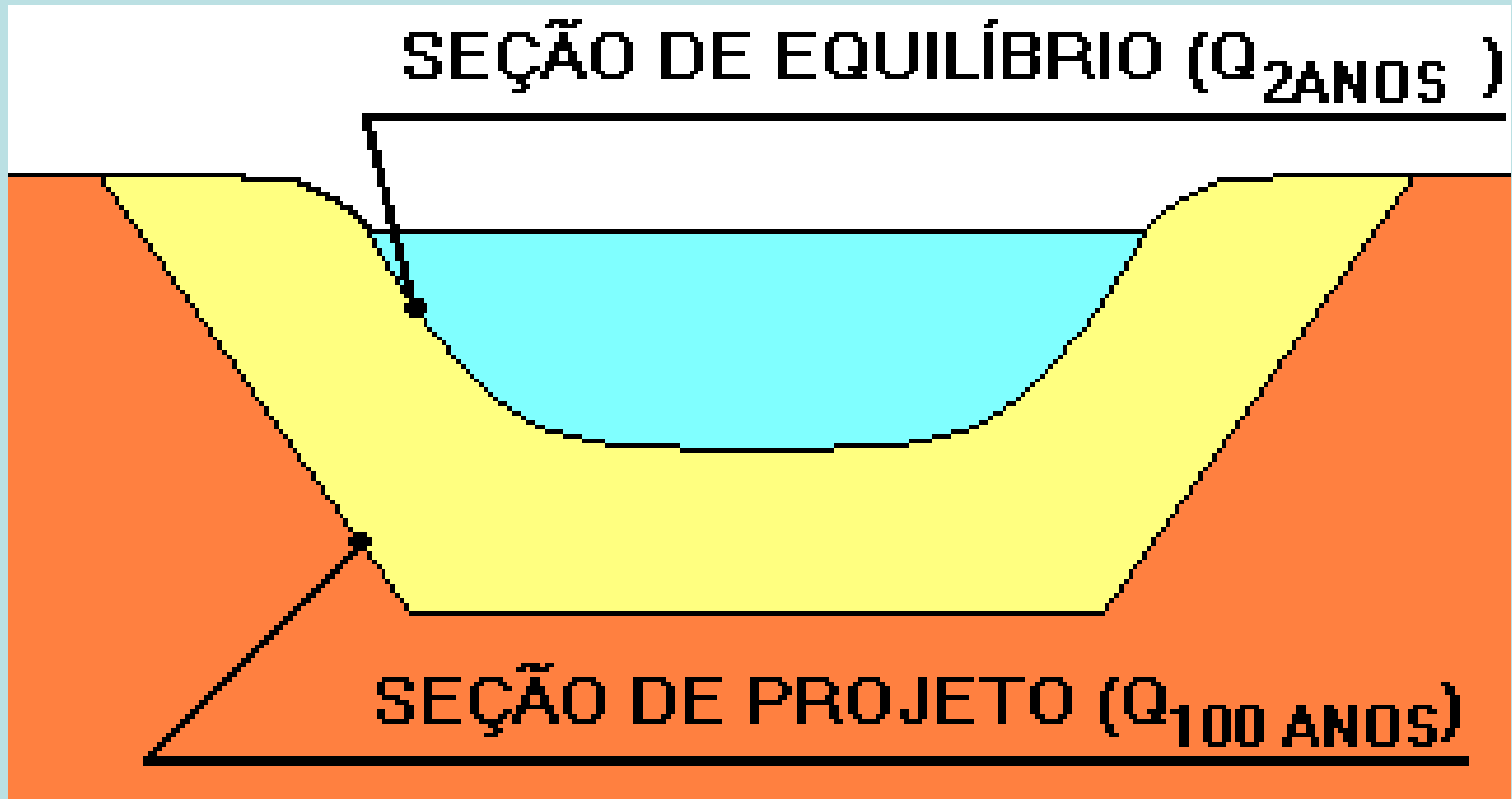
Meandro



Formação de traçado sinuoso

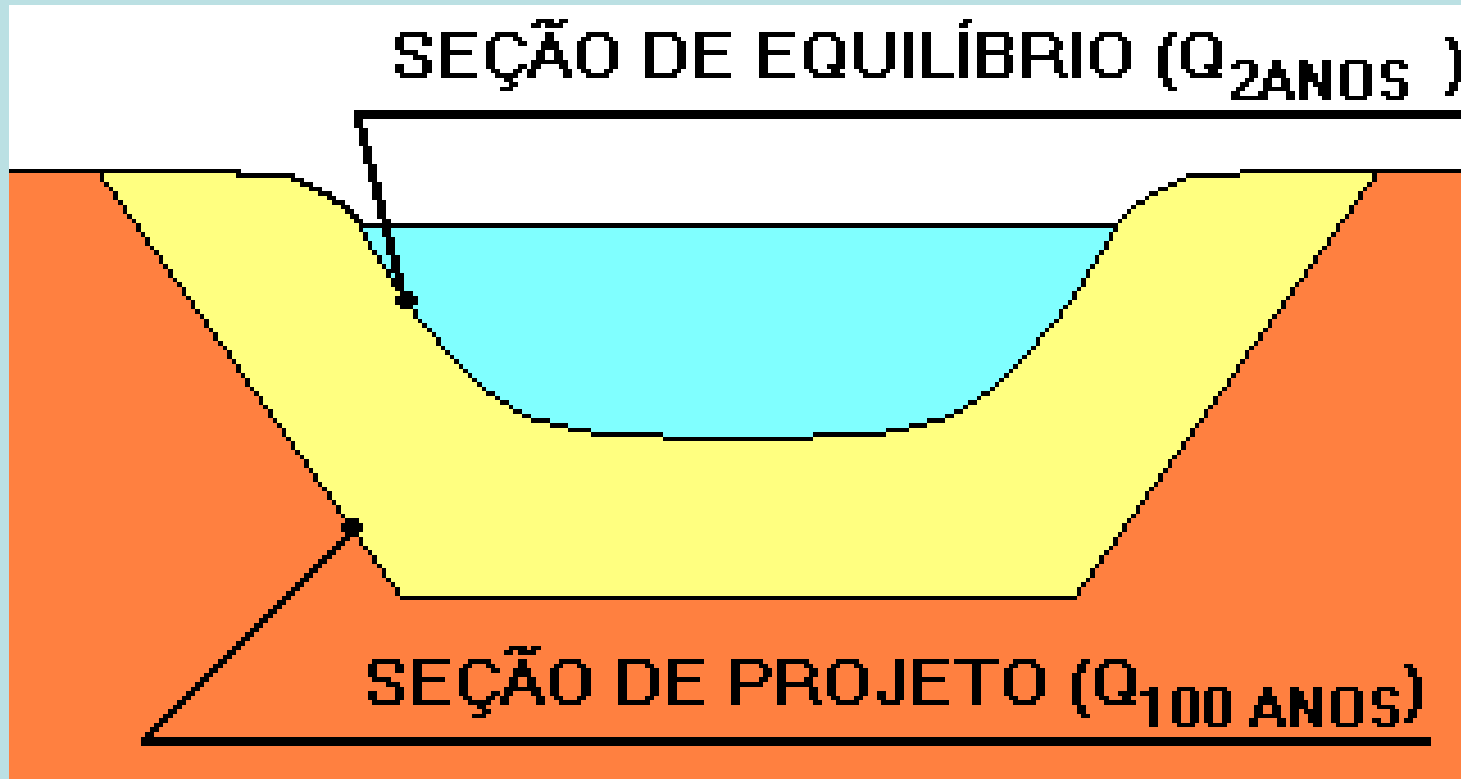
- $Q_s < Q_{smax}$ → Escoamento tende a erodir o trecho de rio;
- Escoamento tende a extrair quantidade complementar de material sólido para atingir seu estado de saturação ou capacidade máxima de transporte (Q_{smax}),
- Se $\zeta_o > \zeta_{oc}$ → **leito instável** → tendência de alteração da forma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

EXEMPLO: MUDANÇA DE SEÇÃO TÍPICA
PROJETOS DE DRENAGEM / NAVEGAÇÃO / ADUÇÃO



EXEMPLO: MUDANÇA DE SEÇÃO TÍPICA

PROJETOS DE DRENAGEM / NAVEGAÇÃO / ADUÇÃO



- Redução da capacidade de transporte sólido
- Assoreamento para retomar a seção original

MECANISMO DE AJUSTE

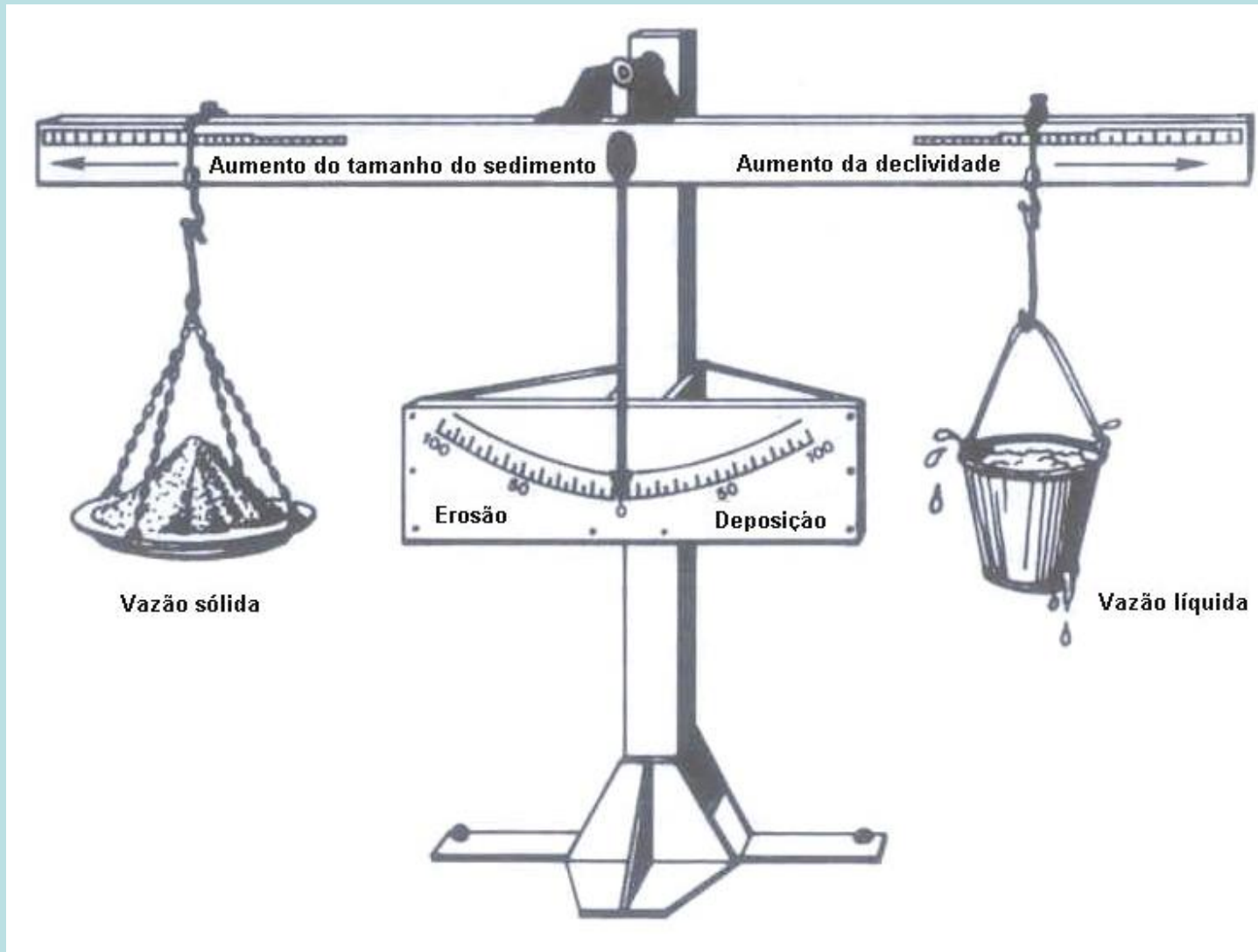
- PROCESSOS FLUVIAIS:
 - ASSOREAMENTO
 - EROSÃO

**TRANSPORTE
DE
SEDIMENTOS**

TRANSPORTE SÓLIDO

- Pode ser considerado estável um trecho de rio no qual a quantidade de material sólido transportado pela corrente na seção de entrada e saída é a mesma (não há nem deposição, nem arraste de material sólido)
 - Arraste ou deposição de sedimentos dependem fundamentalmente da relação entre a energia do escoamento e a energia resistiva do material sólido (peso próprio, coesão)

BALANÇA DE LANE (1955)



EVOLUÇÃO DOS CURSOS D'ÁGUA

- ETAPAS:
 - FORMAÇÃO
 - MODELAÇÃO
 - Princípio da saturação
 - Lei das declividades
 - Princípio da seleção
 - ESTABILIZAÇÃO

Trecho superior do rio



Trecho médio do rio



Meandro



Corte Natural braço do meandro



Trecho inferior do rio



Foz do rio



Princípios Básicos que Regem a Modelação

- **Princípio da Saturação:** Vazão Líquida (Q_L) → Vazão Sólida Máxima (Q_{smax}) → Máxima capacidade de Transporte de sedimentos numa dada seção, para um dado material, numa dada vazão.
- $Q_{sm} = f (Q, i, R_H, d, \text{etc...})$

Princípio da Saturação

- Trecho : $Q_s > Q_{sm} \rightarrow$ **Sedimentação**

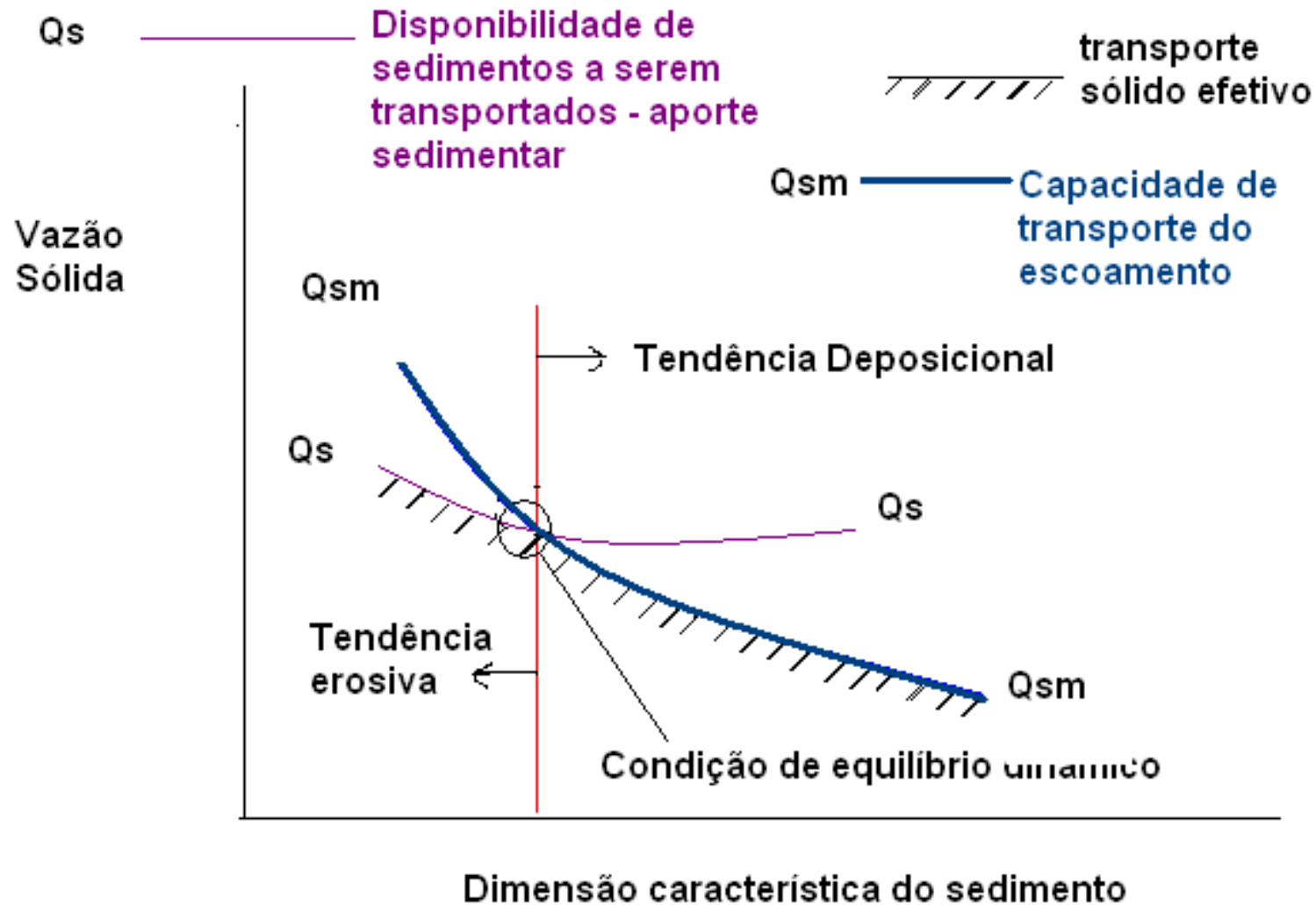
$Q_s < Q_{sm} \rightarrow$ Tendência de erosão - se o material do leito permitir.

$Q_s \sim Q_{sm} \rightarrow$ **Equilíbrio** - toda a carga de sedimentos trazida pela rede de afluentes é transportada, **sem que haja erosão ou deposição no leito.**

Ex: Tendência de deposição (aporte ao leito) : **Ocorrência em trechos de menor declividade ou de maior aporte sólido.** O aporte sólido supera a capacidade de transporte do escoamento . Ocorrências : **Reservatórios de barragens; Cones de dejeção de planícies aluvionares ; Bacias hidrográficas com pouco recobrimento vegetal .**

Princípio da Saturação

- **Tendência à erosão (do leito)** : Ocorrência em trechos com maior declividade ou menor aporte sólido. A capacidade de transporte do escoamento supera o aporte sólido .
- **Ocorrências** : Cabeceiras de rios ; trechos a jusante de barragens.



Transporte sólido efetivo numa dada seção

Princípio da Declividade

- Para determinada vazão Q_L , a declividade é tanto maior , quanto maior a Turbidez (Q_s / Q_L);
- Parâmetros fundamentais : Q , (Q_s/Q); (h,C)
- Quando a turbidez Q_s/Q é maior e [Rh,C (Coef. Chezy)] são menores, a tendência da declividade de equilíbrio i_{eq} é ser maior – perfil de equilíbrio por sedimentação.
 - Portanto : $Q_s > Q_{sm} \rightarrow$ Assoreamento com aumento da declividade – leitos retilíneos $\rightarrow i \sim 0,5$ a $0,6$ m / km; Leito Maior \rightarrow maior declividade \rightarrow processo de sedimentação em enchentes.

Princípio da Declividade

- $Q_s > Q_{sm} \rightarrow$ tendência à sedimentação \rightarrow i tende a crescer para atingir $i_{equil.} \rightarrow$ onde $Q_s \sim Q_{sm} \rightarrow$ Princ. Decliv. \rightarrow O perfil de equilíbrio é atingido por deposição \rightarrow fase de evolução do rio
- $Q_s < Q_{sm} \rightarrow$ tendência à erosão \rightarrow i tende a decrescer para atingir $i_{equil.} \rightarrow$ onde $Q_s \sim Q_{sm} \rightarrow$ Princ. Decliv. \rightarrow O perfil de equilíbrio é atingido por erosão \rightarrow **trechos de montanha** – aprofundamento do leito ; **Meandros** – aumento do percurso do rio em planícies de sedimentação.

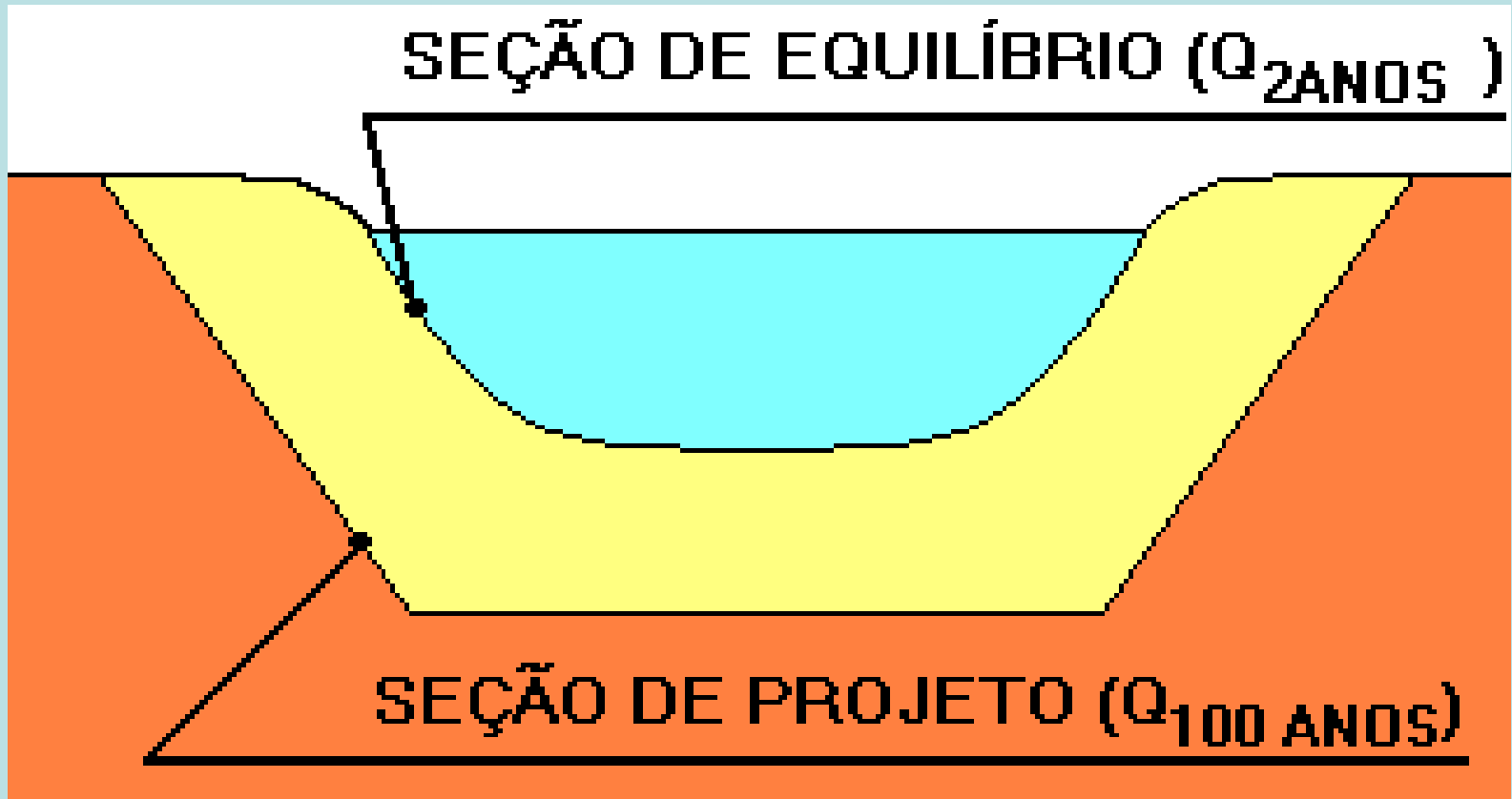
FATORES QUE DETERMINAM AS CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO

- Intensidade - frequência das precipitações
- Declividade do vale
- Propriedades do solo
- Cobertura vegetal
- Afloramentos rochosos
- Ações humanas

ALTERAÇÕES NO ESTADO DE EQUILÍBRIO

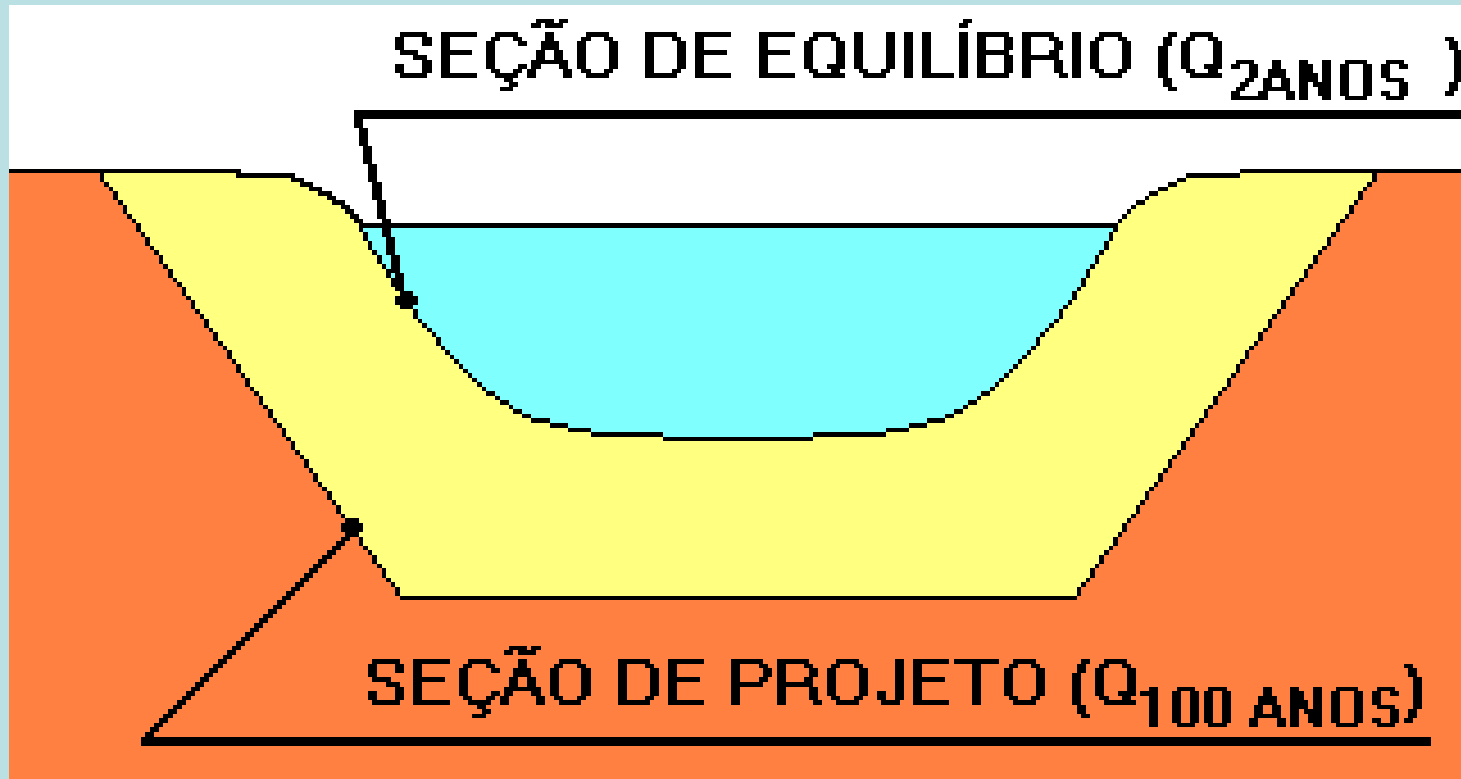
- Mudanças climáticas, hidrológicas ou efeitos tectônicos
- AÇÕES HUMANAS
 - Modificações no traçado do rio
 - Construção de canais artificiais
 - Construção de barragens
 - Uso e ocupação do solo da bacia, etc.

EXEMPLO: MUDANÇA DE SEÇÃO TÍPICA
PROJETOS DE DRENAGEM / NAVEGAÇÃO / ADUÇÃO



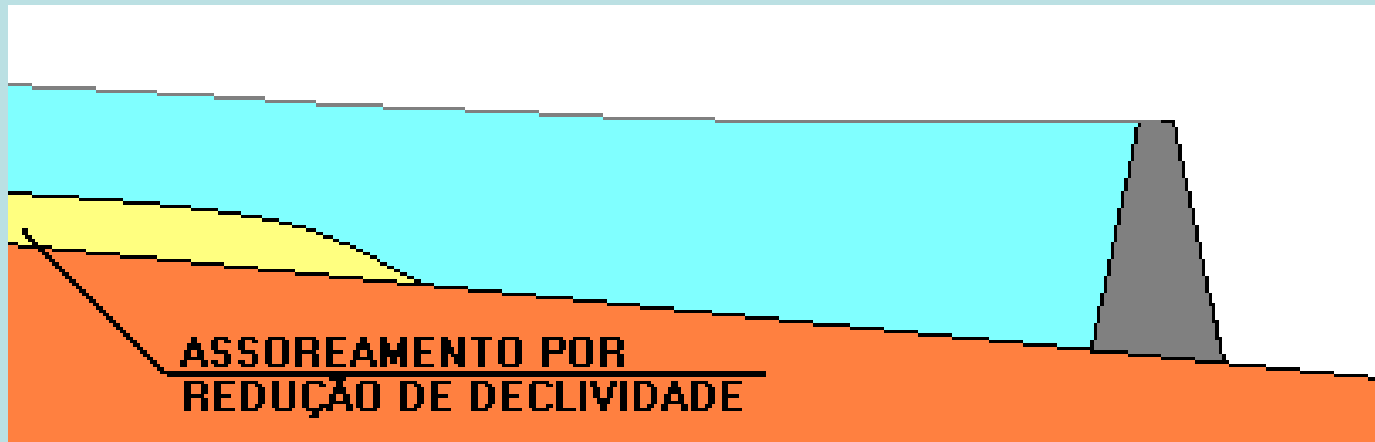
EXEMPLO: MUDANÇA DE SEÇÃO TÍPICA

PROJETOS DE DRENAGEM / NAVEGAÇÃO / ADUÇÃO



- Redução da capacidade de transporte sólido
- Assoreamento para retomar a seção original

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

EXEMPLO: ALTERAÇÃO DE VAZÃO

PROJETOS DE DERIVAÇÕES EM DRENAGEM / DIQUES LONGITUDINAIS

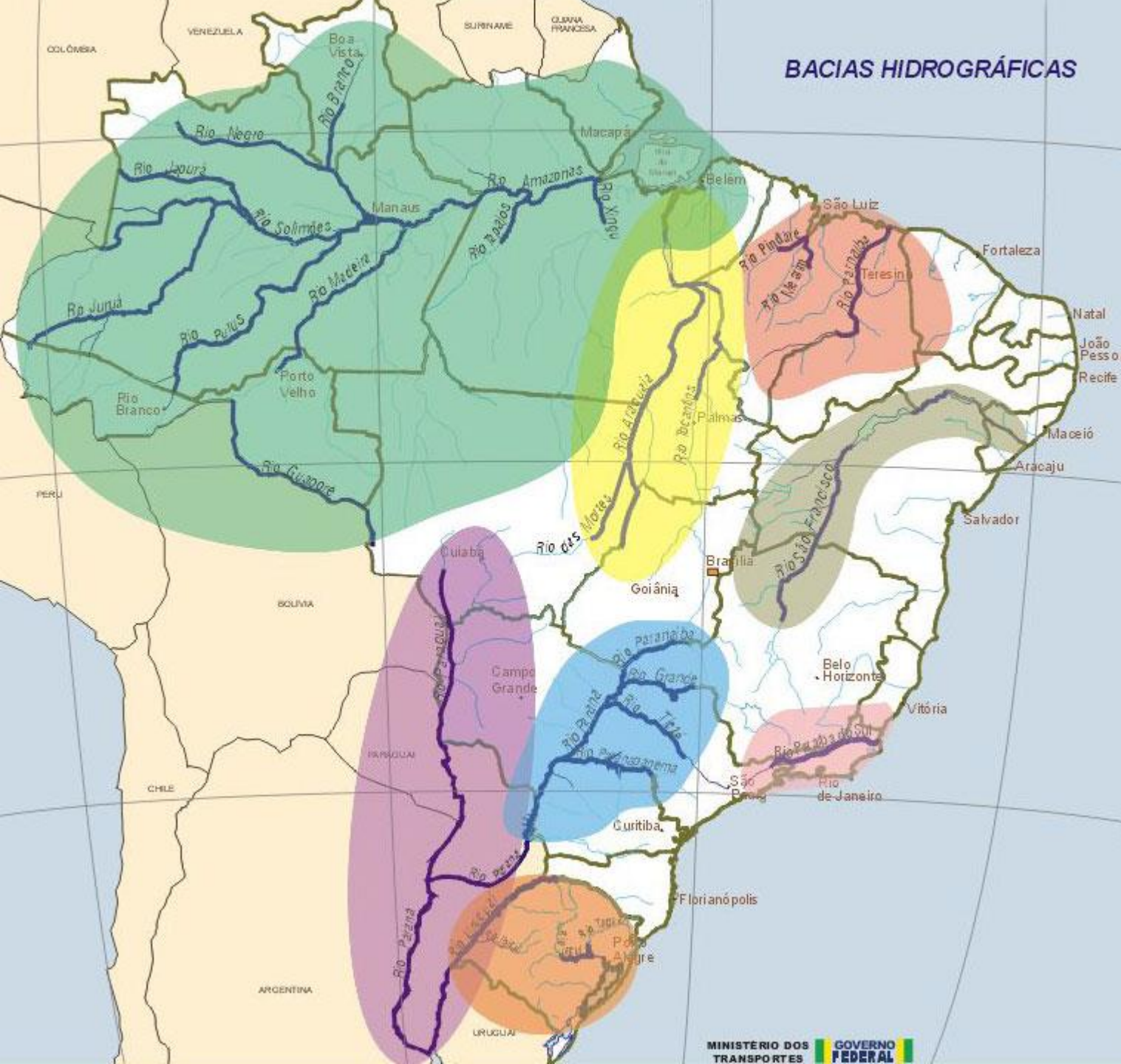


- Aumento da capacidade de transporte sólido
- Erosão para a retomada do equilíbrio

Meandro



BACIAS HIDROGRÁFICAS



Bacias Hidrográficas do Brasil

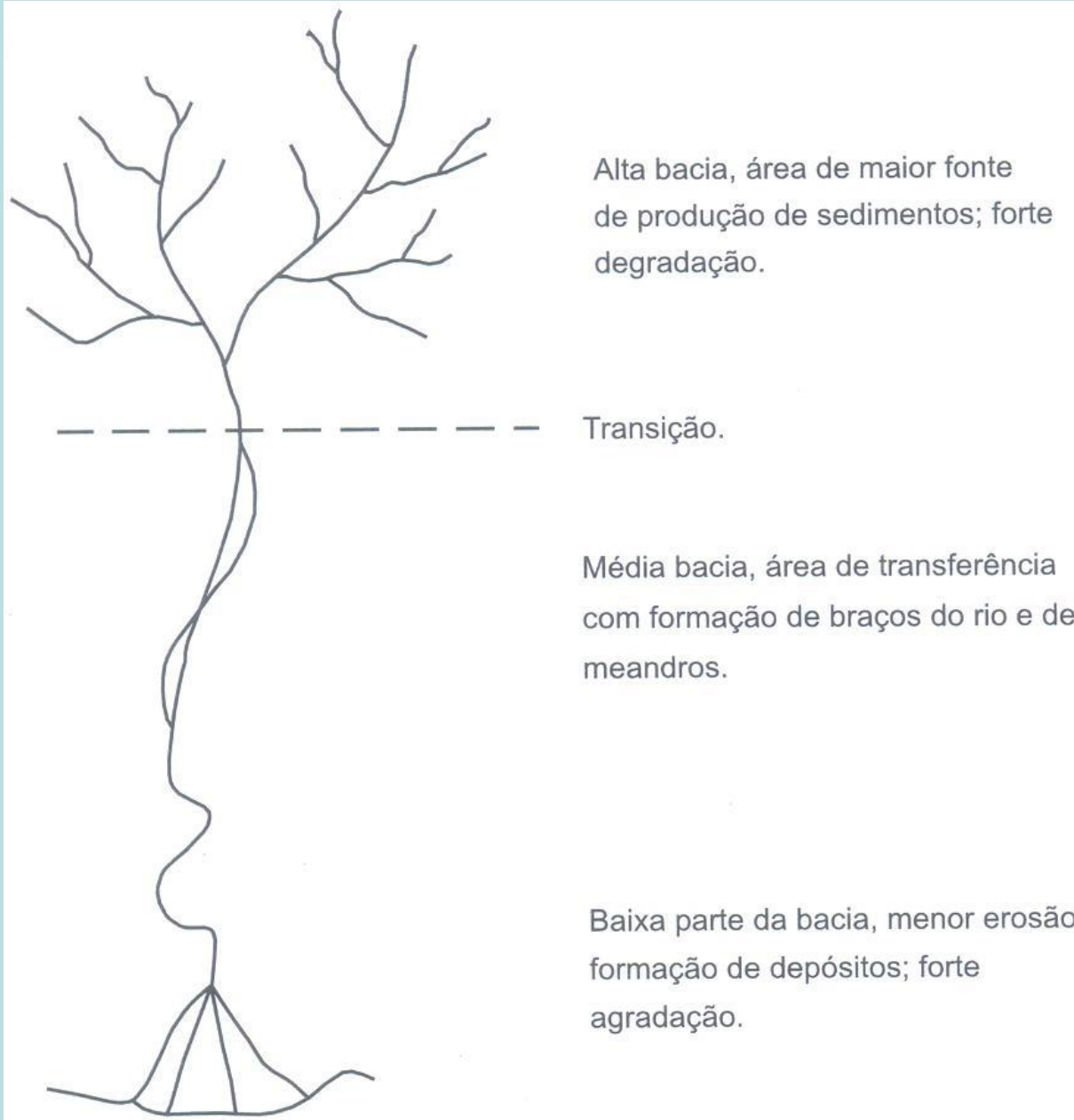
Características de um Curso D'água

- **Bacia Hidrográfica** : forma, topografia, geologia, recobrimento vegetal, regime hidrológico, etc...
- **Leito** : traçado, largura, profundidade, rugosidade, declividade, etc...
- **Propriedades do material sólido** : peso específico, diâmetro, coeficiente de forma...
- Estes parâmetros variam no tempo e no espaço, mantendo essas características na condição de equilíbrio dinâmico.

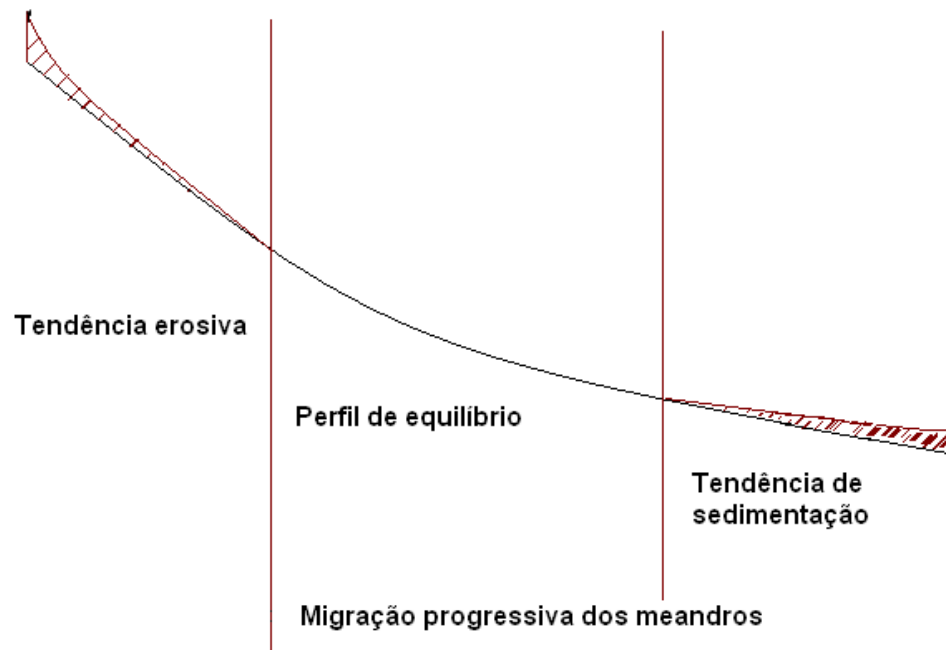
Modalidades do Transporte Sólido

- Arrastamento de fundo,
- Suspensão,
- Saltitação.
- Na maioria dos escoamentos fluviais, é o material mais grosseiro, transportado por arrastamento, que condiciona a morfologia (forma) dos leitos. Em reservatórios e estuários, as condições podem ser bem diversas, por conta das baixíssimas velocidades e do fenômeno da floculação (coagulação).

Desenvolvimento do curso D'água ao longo da bacia



Perfil longitudinal do processo hidrossedimentométrico



Média bacia ou curso médio

- b) Trecho aluvionar – deposição – granulométricas maiores a montante e menores a jusante
- Dois álveos – Enchente e Estiagem – Maior tendência a meandrar ($i \sim 0,1$ m/km)
- Média Bacia : erosão diminui por decréscimo de velocidade;
menor intensidade de chuvas;
área de transferência de sedimentos;

Média bacia ou curso médio

- tendência a um perfil de equilíbrio com moderada sinuosidade;
- formação de braços e suaves meandros fluviais;
- efeitos de erosão de margem;
- tendência de aprofundamento no vale;
- modelação das margens não consolidadas;
- maiores contribuições de vazão na bacia

Média bacia ou curso médio

- trechos com alargamentos de seção;
- menores velocidades de escoamento;
- Cone de dejeção, caso haja vale largo

Rio Itarirú – Município de Itanhaém



Erosões no trecho Alto da bacia e no próprio leito do rio com materiais de maior granulometria – trecho medio – declividade média

Baixa bacia ou curso inferior

- **c) Trecho de Planície** – Álveo sobre “terreno natural” – um único curso sinuoso – processo mais intenso de meandreamento
- baixa declividade longitudinal;
- **acentuado decréscimo de velocidade;**
- leito maior de origem aluvionar, conformado pelas enchentes ;
- **reduzida ação erosiva;**
- limitação pela proximidade altimétrica do nível de base final (oceano)

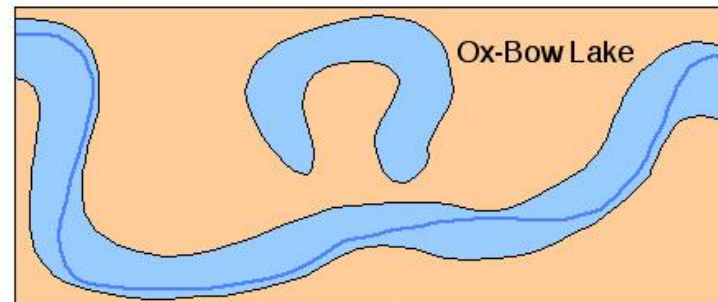
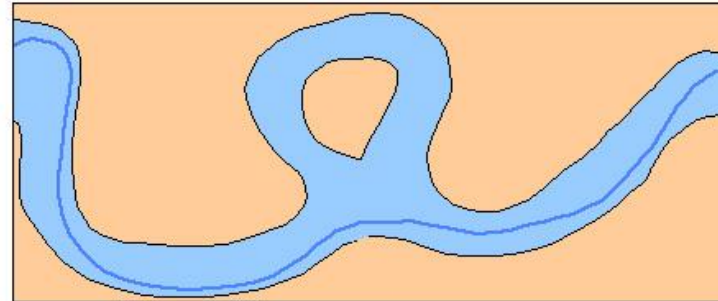
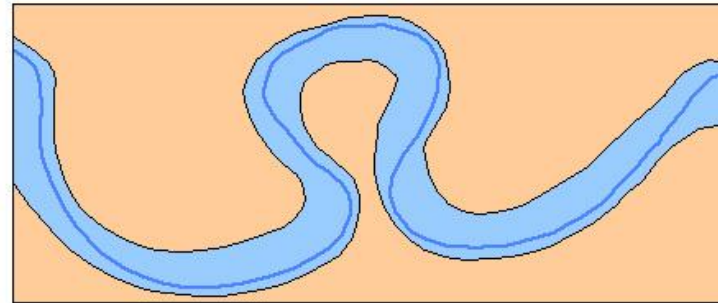
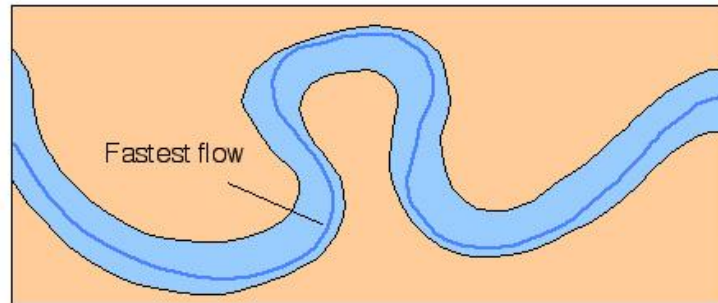
Meandro



Corte Natural braço do meandro



Corte



Meandro



Trecho inferior do rio - Foz



Trecho inferior do rio – próximo da Fóz



Trecho inferior do rio – próximo da Foz



Hidráulica estuarina - **Lagunas**



Hidráulica estuarina - Delta



Delta do Rio Nilo(Egito)



Delta do Rio Pó (Itália) no Mar Adriático

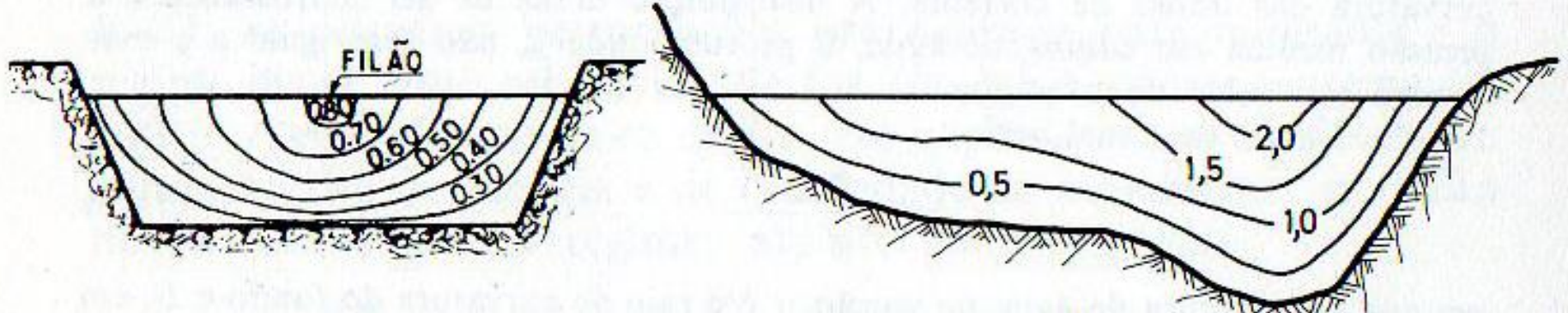
Hidráulica estuarina - Flexas



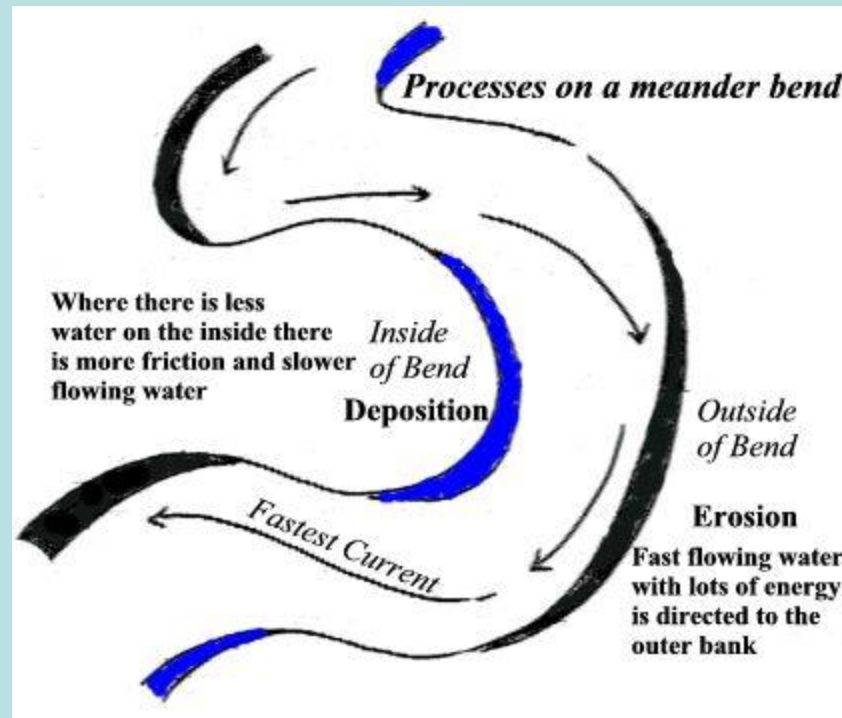
Fotografia aérea de 2000 da Barra do Rio Una em São Sebastião (SP).(BASE)

MORFOLOGIA FLUVIAL

Distribuição Transversal de Velocidade: Seções trapezoidal e irregular

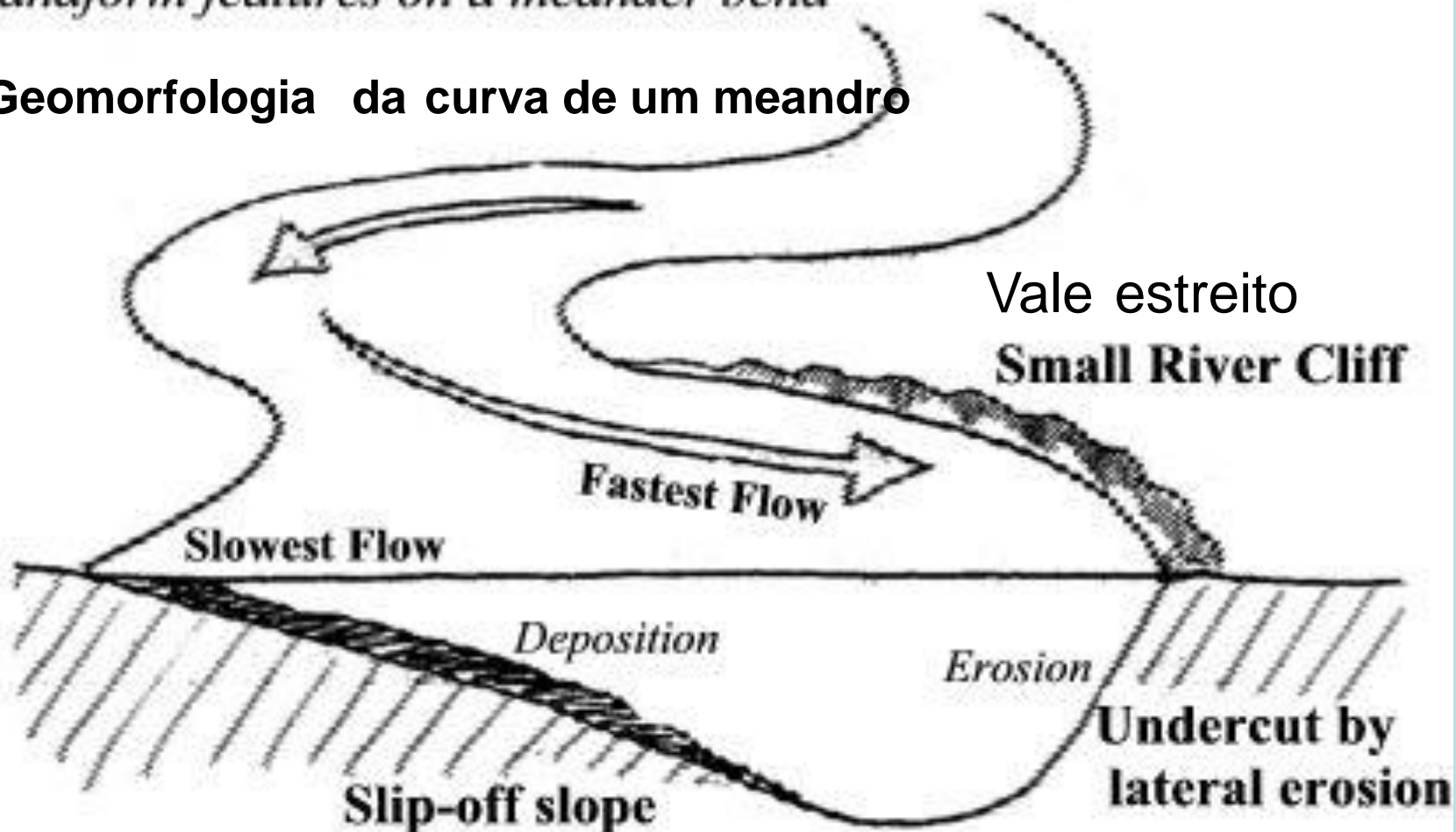


Processo de Meandreamento



Landform features on a meander bend

• **Geomorfologia da curva de um meandro**



Declividade de estabilidade do material Escavação por erosão lateral

FORMAÇÃO DE MEANDROS

Condições necessárias:

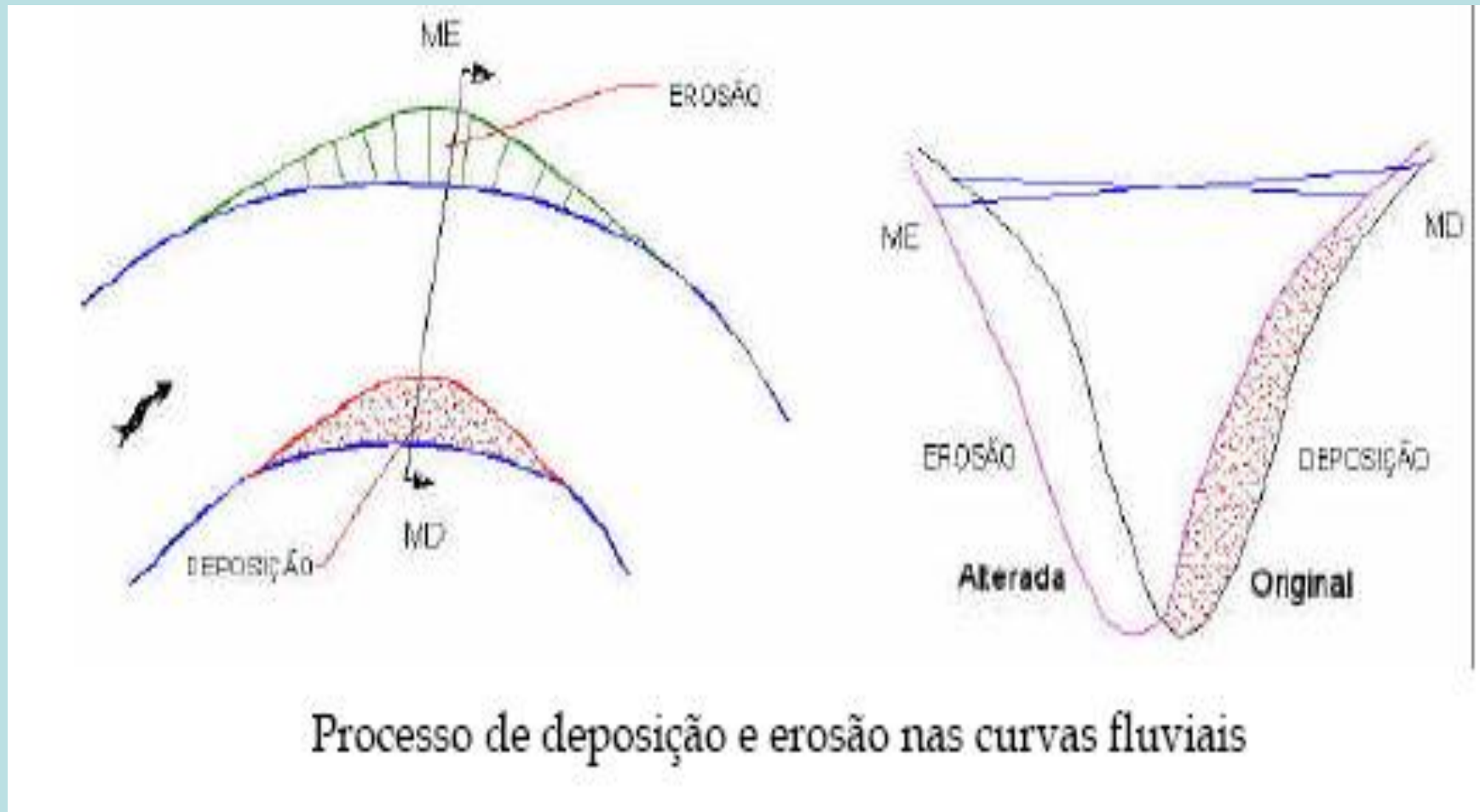
- Transporte de sedimentos (margens erodíveis)
- Turbulência
- Declividade do vale (i_v) maior do que declividade de equilíbrio (i_R)
- Causas:

Caminho mais provável

Correntes secundárias

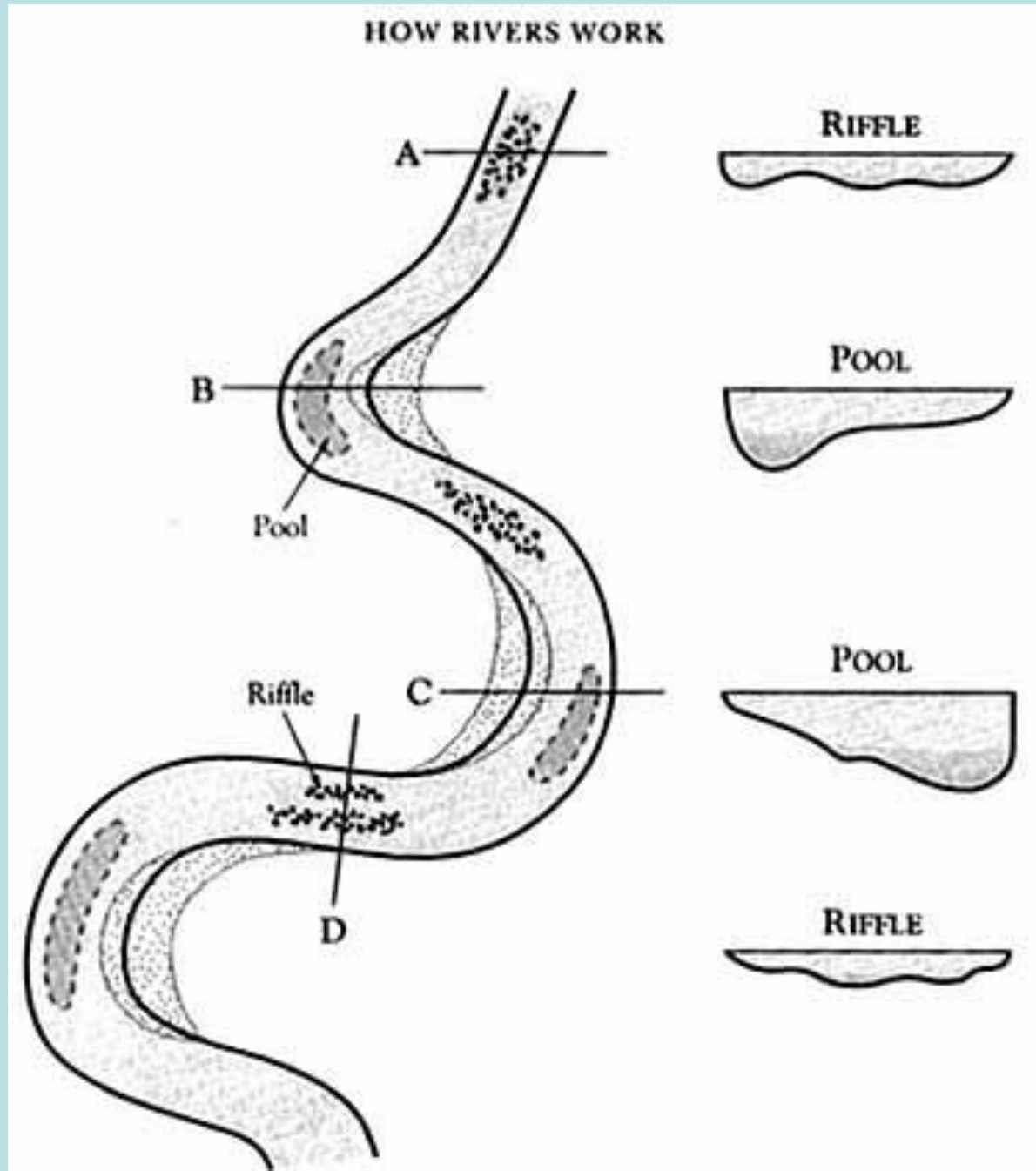
Ajuste da condição de equilíbrio ($i_v > i_R$)

Processo de Erosão e Deposição nas Curvas Fluviais



Processo de deposição e erosão nas curvas fluviais

Caracterização de seções ao longo do meandro



Meandro



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;**

Erosão – Ação do escoamento

MD - Deposição – ME – Curva do Rio



Formação de Meandros

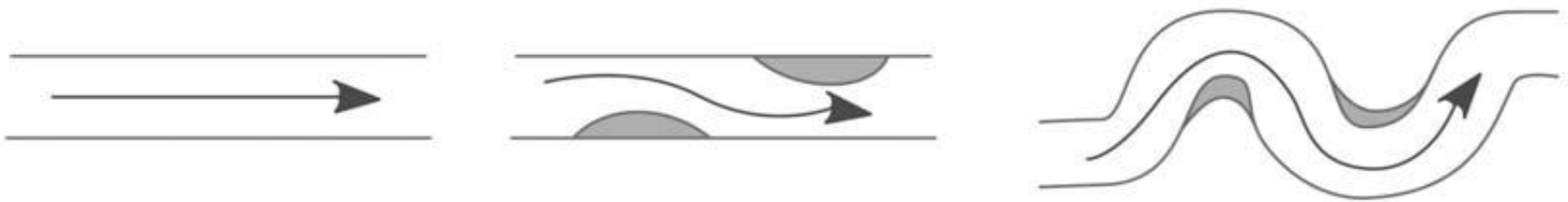
- Rios meândricos são característicos de zonas de baixas declividades, planícies, sendo indicativos de estágios de “maturidade” da evolução geomorfológica e de equilíbrio do perfil longitudinal;
- A formação dos meandros está ligada à busca de uma condição de equilíbrio, correspondente ao ajustamento das variáveis topográficas, hidrológicas e sedimentológicas;

Formação de Meandros

- **A distribuição irregular da velocidade de escoamento nas seções e os processos de erosão e deposição de sedimentos estão na origem dos processos de meandramento;**
- **Característica dinâmica da geomorfologia fluvial e forte interrelação entre os diversos tipos de canais fluviais:**

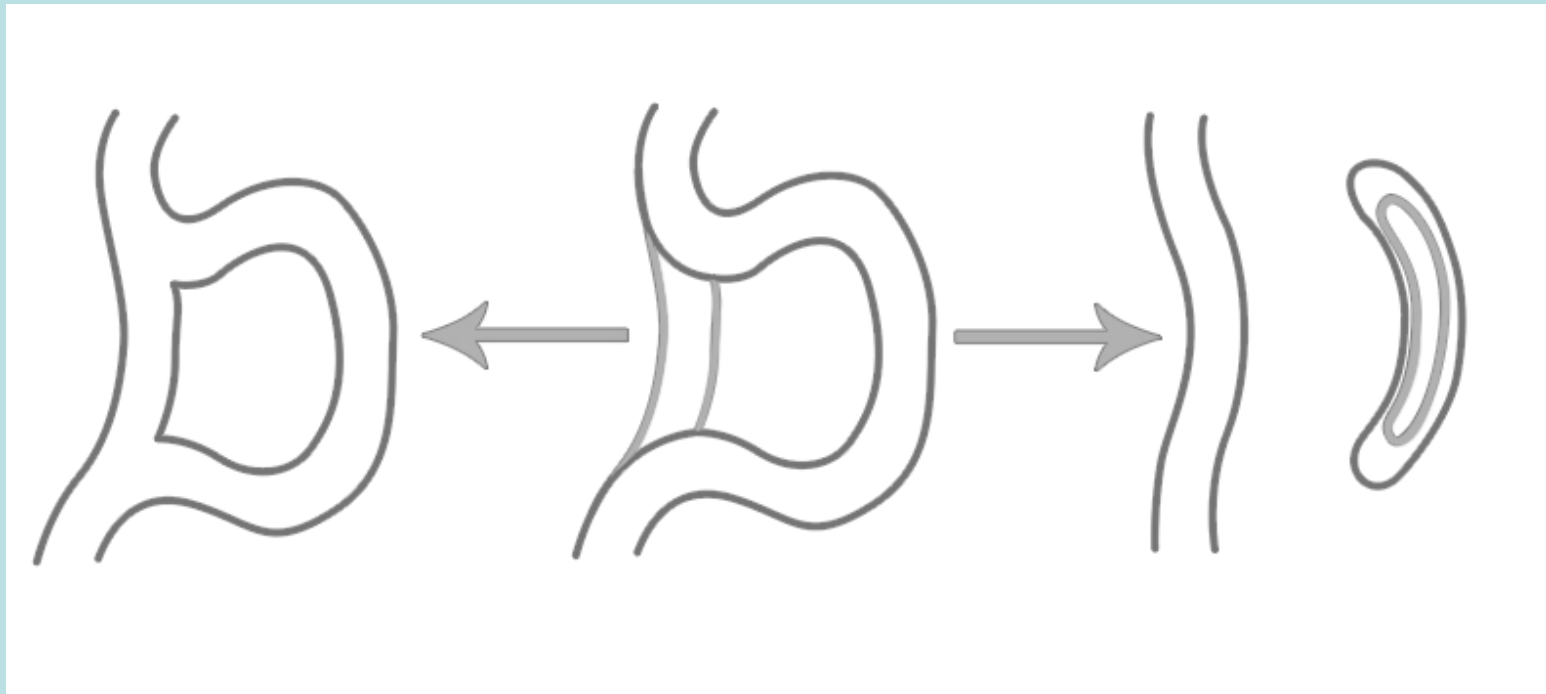
Formação de Meandros

- **Formação: Distribuição irregular da velocidade de escoamento nas seções e os processos de erosão e deposição de sedimentos correspondentes;**

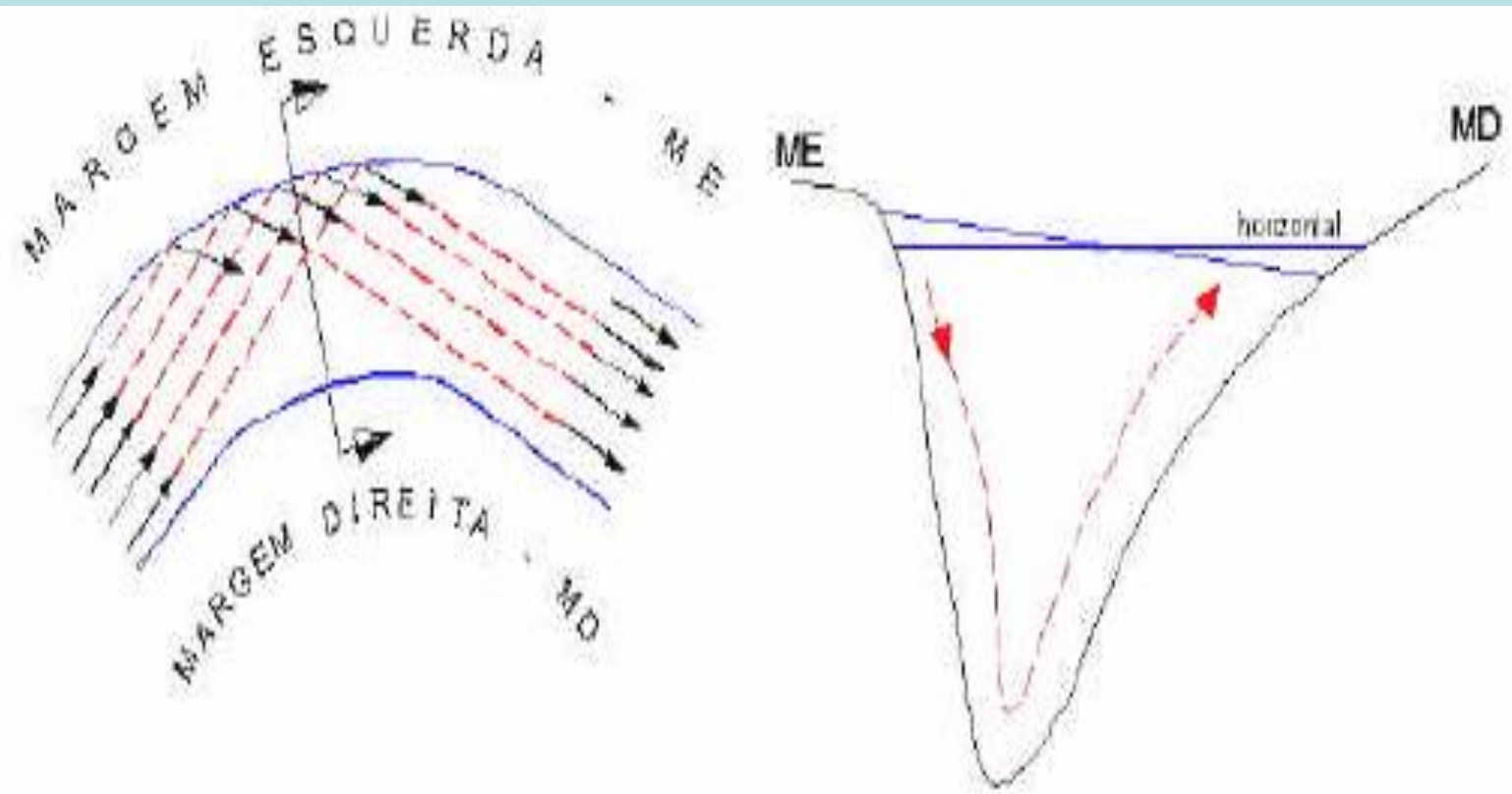


Característica dinâmica da geomorfologia fluvial

- Abandono de um meandro e evolução de um rio meândrico a retilíneo;



Linhas de Fluxo na Curva Fluvial



Linhas de fluxo na curva fluvial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFREDINI, P. ARASAKI, E. Engenharia Portuária, Ed. Blucher, 1ª Ed. 2014.
- BERNARDINO, J.C.M. Estabilidade de cursos d'água escoando sobre leitos aluvionares não coesivos. Dissertação Mestrado. EPUSP, 2005.
- RAMOS, C. L. Mecânica do transporte de sedimentos e do escoamento em leito móvel. Dissertação de Mestrado. EPUSP, 1984.
- SILVA, R.C.V. et. al. Hidráulica Fluvial. Volume II. COPPE/UFRJ, 2005.