



HIDRÁULICA FLUVIAL E REGULARIZAÇÃO DE CANAIS

Aeroportos, portos e vias navegáveis

Prof. Antônio Nélon Rodrigues da Silva

Prof. Adalberto Leandro Faxina

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Engenharia de Transportes



Tópicos

1. Noções de hidrografia
2. Noções de hidrologia
3. Morfologia fluvial
4. Dimensões desejáveis para canais de navegação
5. Melhoramentos dos cursos d'água para navegação
 - Melhoramentos gerais ou Normalização
 - Regularização
 - Canalização



Noções de Hidrografia

Representação de aspectos reais

Áreas MARÍTIMAS ou FLUVIAIS

No caso de rios ou canais

- Seções transversais
- Vazões
- Velocidades
- Transporte de material sólido
- Qualidade da água



Noções de Hidrografia

Elementos gerais de uma bacia hidrográfica

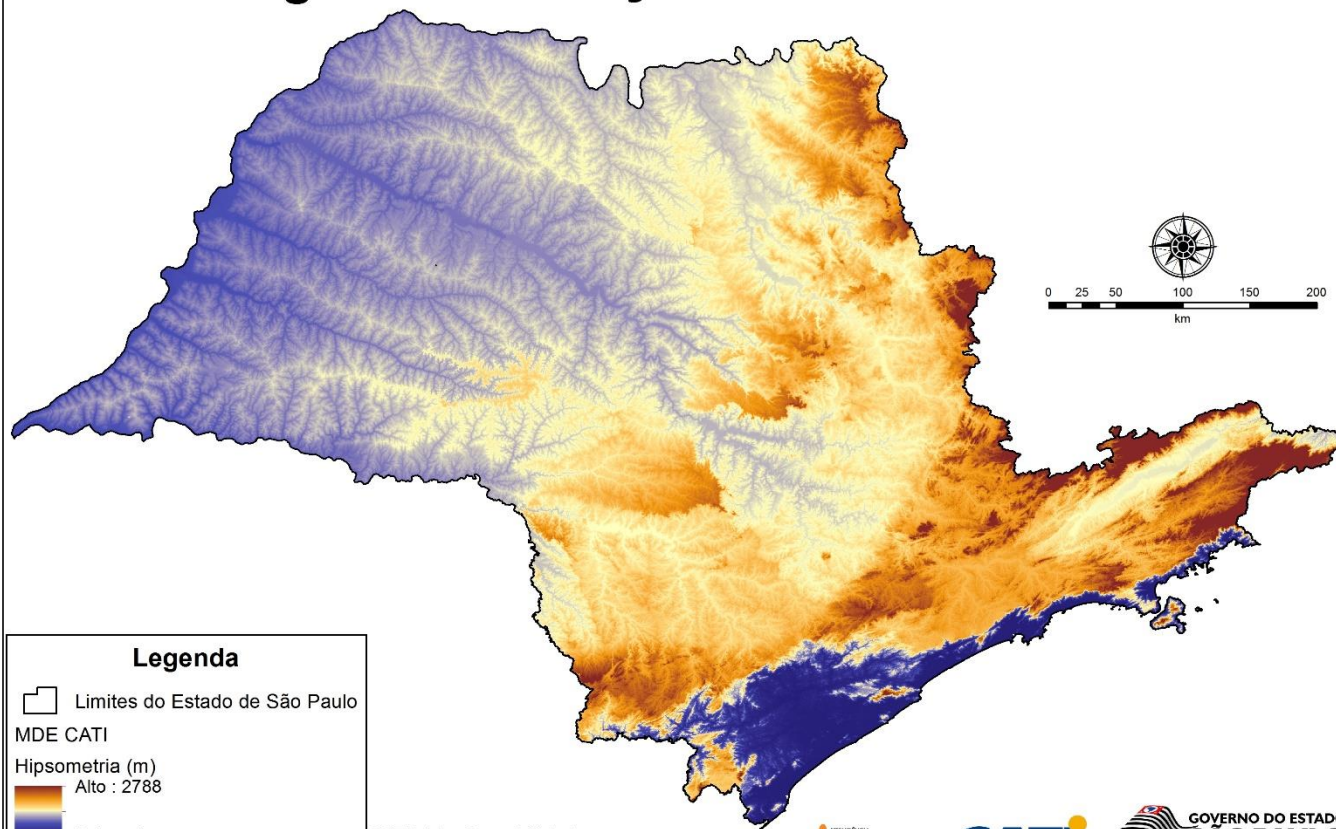
- Área
- Forma
- Geologia
- Declividade
- Ventos e Chuvas

Noções de Hidrografia



Noções de Hidrografia

Modelo Digital de Elevação do Estado de São Paulo



Legenda

- Limites do Estado de São Paulo
- MDE CATI
- Hipsometria (m)
 - Alto : 2788
 - Baixo : 0

SRTM 1 Arc-Second Global
ASTER GDEM V2
MAPGEO2015

<http://www.cati.sp.gov.br/portal/produtos-e-servicos/publicacoes/ace-rvo-tecnico/modelo-digital-de-elevacao-do-estado-de-sao-paulo>



Noções de Hidrografia

Técnicas para obtenção de dados

- Geodésia/Topografia
- Altimetria Fluvial
- Vazão/Velocidades



Noções de Hidrologia

Estudo da ÁGUA

- **Estados**
- **Ocorrência**
- **Distribuição**
- **Circulação na natureza**

Precipitação

Infiltração

Evaporação



Morfologia fluvial

Conformação dos cursos d'água

ÁGUAS LIVRES

- Ocorrem nas cabeceiras das bacias
- Leito não-definido
- Declividade acentuada
- Dependem das precipitações
- Regime descontínuo
- Intensa erosão
- Também denominadas torrentes



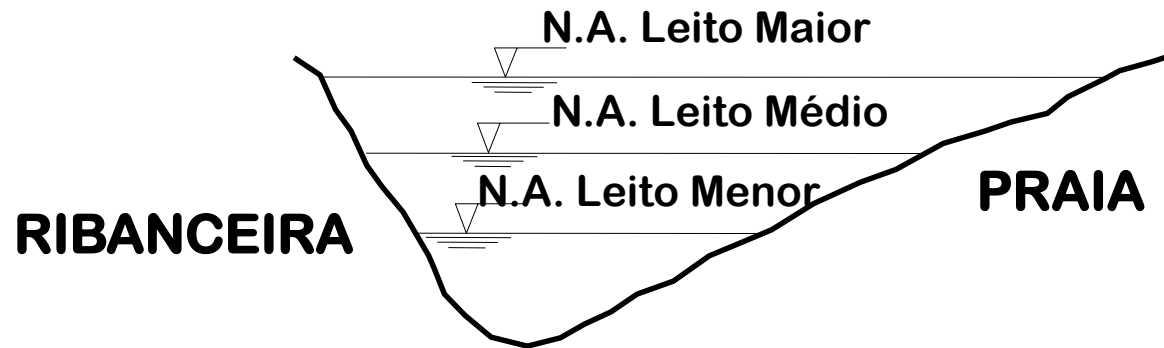
Morfologia fluvial

Conformação dos cursos d'água

ÁGUAS SUJEITAS

- Menor declividade e menor velocidade
- Caminho definido
- Talvegue: lugar geométrico dos pontos de maior profundidade ao longo do rio
- Fluem em calha denominada álveo ou leito
- Rios propriamente ditos

Morfologia fluvial



Características da seção transversal de um rio



Morfologia fluvial

Rios podem ser

Estáveis

- Água sem poder erosivo, devido à baixa declividade

Errantes (ou Divagantes)

- Altera a posição do leito em virtude da alta declividade

Morfologia fluvial

Regimes dos rios

pluvial

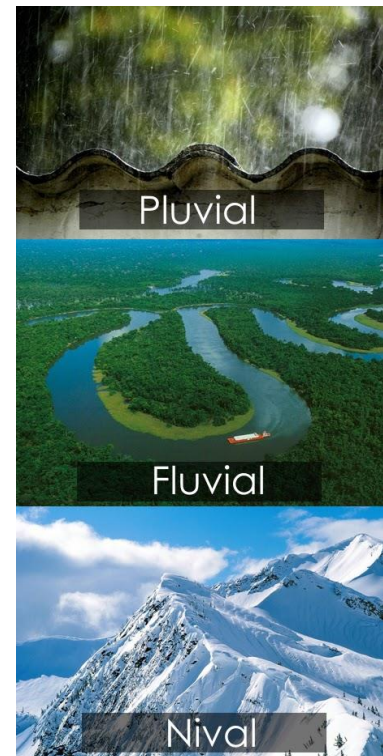
- alimentado por água de chuva

nival

- alimentado por água de degelo

nivo-pluvial

- alimentado por água de chuva e degelo (Rio Amazonas)





Morfologia fluvial

Rios não são ESTÁVEIS

Ciclo vital dos rios (William Morris Davis)

MOCIDADE	Busca talvegue definitivo
MATURIDADE	Talvegue definido Busca perfil de equilíbrio
VELHICE	Perfil estabilizado Acúmulo de matéria sólida Meandros
MORTE	Migração da linha de partilha



Morfologia fluvial

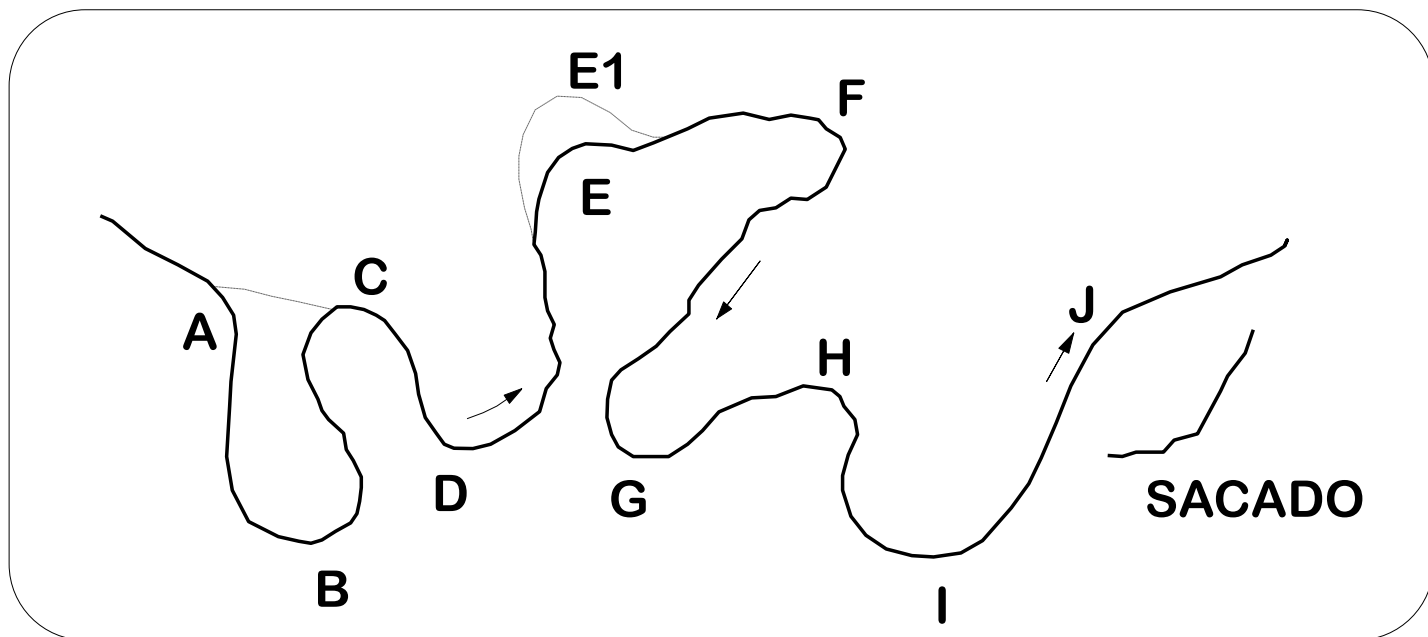
Curvas representam um problema para a navegação

- Maior dificuldade e risco
- Acréscimo na distância

Qual é a solução?

RETIFICAÇÃO dos meandros????

Morfologia fluvial



Vista em planta de um rio meândrico

Morfologia fluvial



Morfologia fluvial

Sacado de Três Unidos em Carauari (AM), rio Juruá



Morfologia fluvial

Ilha do Bananal, rio Araguaia



Morfologia fluvial

Rio Ribeira (PR/SP)



Morfologia fluvial

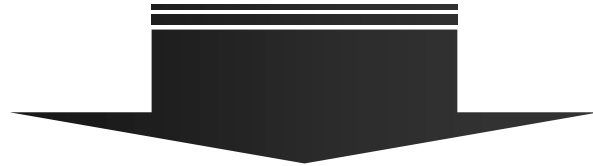
Rio Miranda, Corumbá (MT)





Morfologia fluvial

Retificação de meandros



Busca de novo perfil de equilíbrio

- Alteração da declividade do trecho
- Erosão à montante
- Assoreamento à jusante

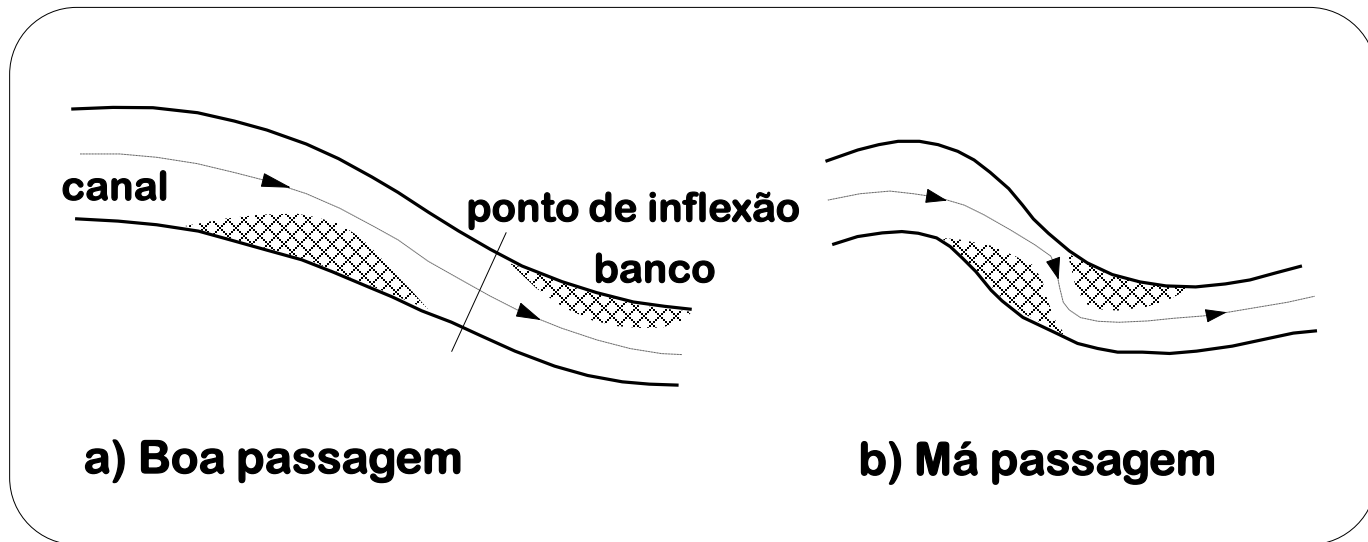


Morfologia fluvial

Leito de cursos d'água é definido pela erosão

- Pode começar no fundo do rio
- Concentração da corrente no ponto frágil
- Alteração da seção
- Filetes d'água incidem sobre margem
- Filetes "refletem" e atingem outra margem
- Até atingir o perfil de equilíbrio

Morfologia fluvial



Vista em planta de bancos nas curvas de rios



Morfologia fluvial

Princípios que regem a formação dos cursos d'água

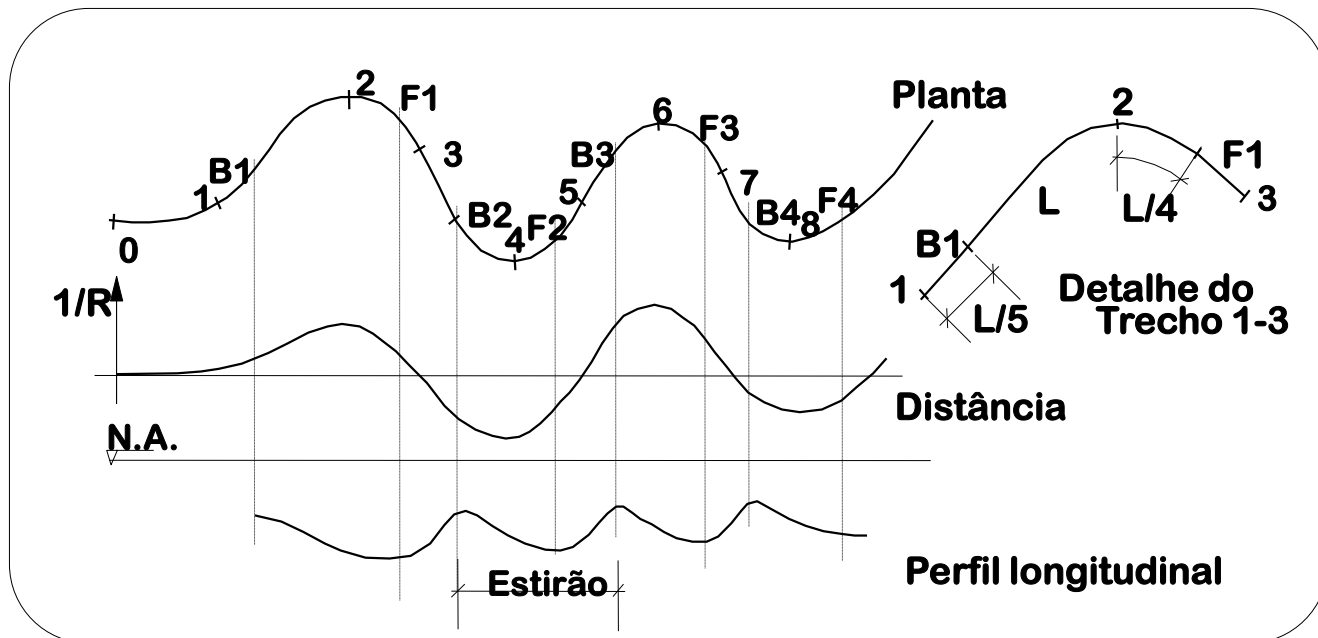
(H. Girardon)

- 1) Forma sinuosa em planta
- 2) Perfil transversal sem profundidades uniformes
- 3) Perfil longitudinal sem declive uniforme
- 4) Série de fossas, separadas por bancos
- 5) Cheias renovam o leito, modificando a forma

MELHORAMENTOS podem INDUZIR o comportamento natural do rio!!!!!!

Morfologia fluvial

Fargue identificou correlações entre acidentes em planta e perfil



Características gerais de um rio, segundo Fargue



Morfologia fluvial

Sendo L o comprimento da curva considerada

- Bancos a L/5 a jusante do ponto de inflexão
- Fossas a L/4 a jusante do vértice da curva
- Valores estudados por Fargue (17 pontos) geraram relação numérica:

$$C = 0,03.H^3 - 0,23.H^2 + 0,78.H - 0,76$$

**Curvatura
quilométrica (inverso
do raio de curvatura)**

**Profundidade máxima
da fossa
(em metros)**

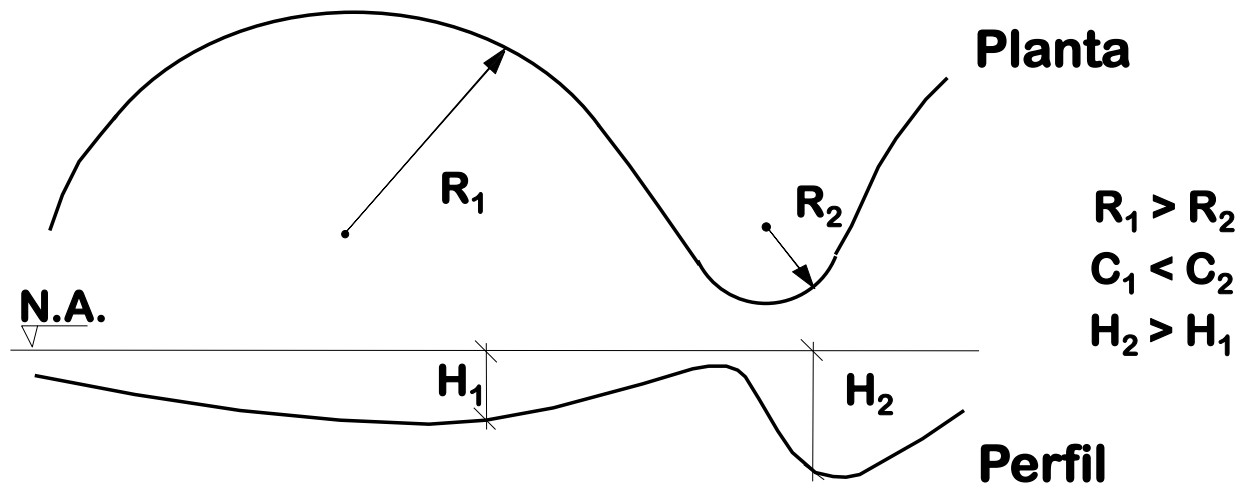
Seis leis de caráter geral e base empírica

1) Lei dos afastamentos

- Profundidades máximas e mínimas à jusante dos vértices e inflexões

2) Lei das fossas (ou da maior profundidade)

- Profundidade de uma fossa é tanto maior, quanto maior a curvatura dos vértices correspondentes

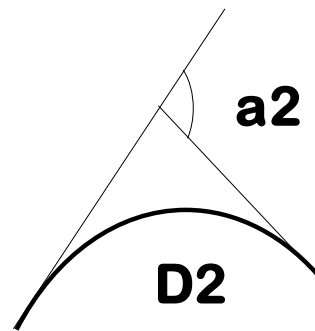
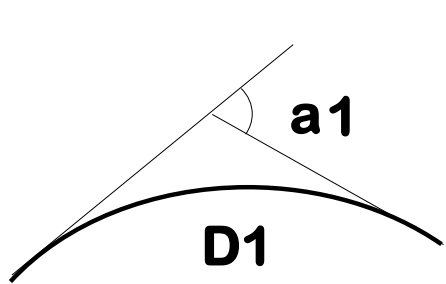


3) Lei dos desenvolvimentos

- Para que as profundidades máxima e média sejam as maiores, o desenvolvimento das curvas deve ter um valor médio entre as curvaturas, específico para cada rio

4) Lei dos ângulos

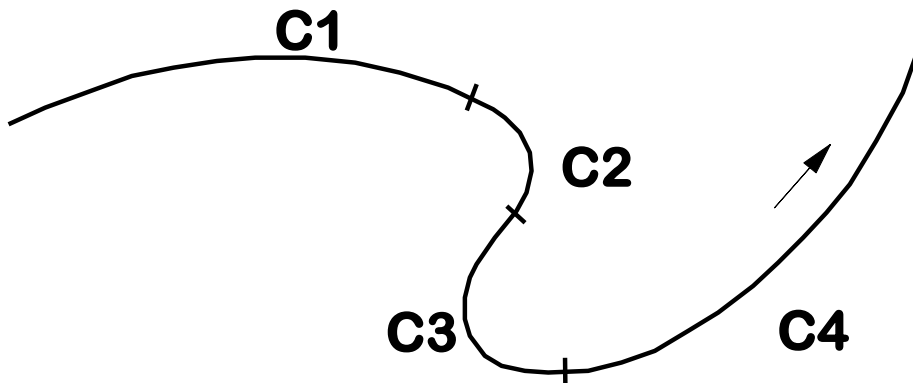
- Para desenvolvimentos iguais de curvas, a profundidade média é tanto maior, quanto maior o ângulo externo formado pelas tangentes



$$\begin{aligned} D_1 &= D_2 \\ a_1 &< a_2 \\ H_{m1} &< H_{m2} \end{aligned}$$

5) Lei da continuidade

- Toda a mudança brusca de curvatura produz uma redução brusca de profundidade

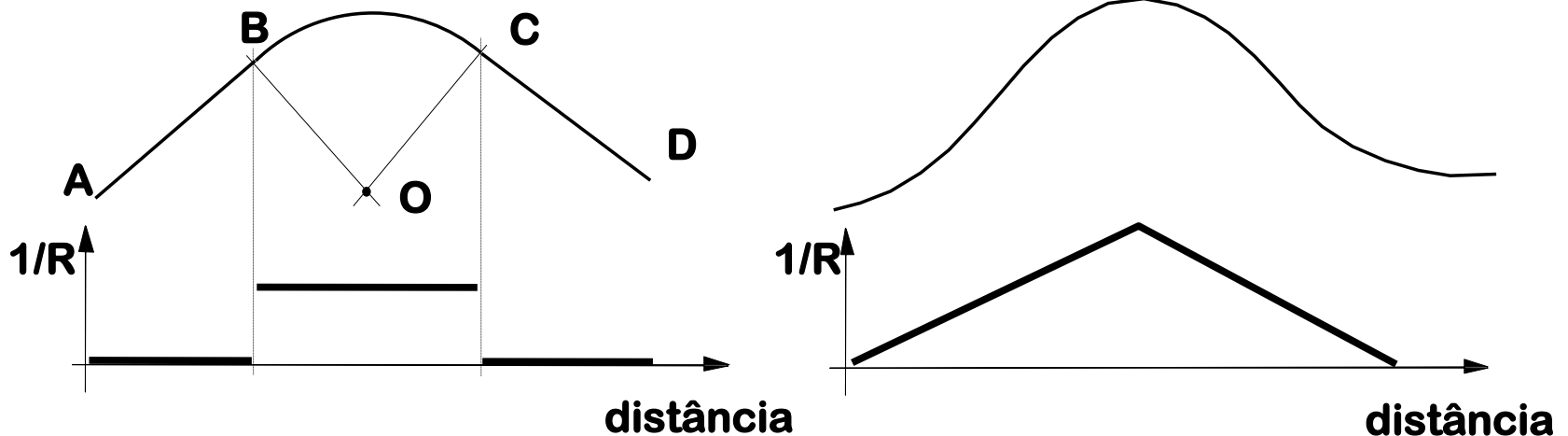


$C1 < C2$ - aumento da profundidade a jusante

$C3 > C4$ - redução da profundidade a jusante

6) Lei da inclinação dos fundos

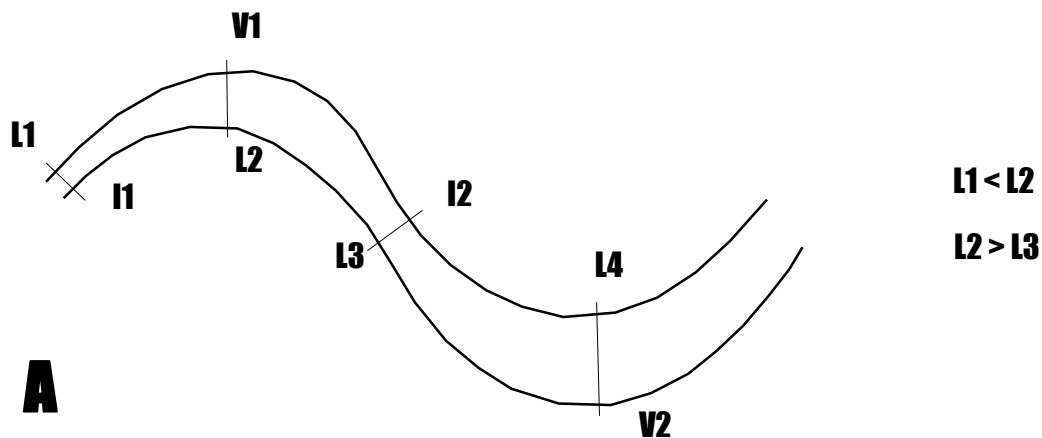
- Se a curvatura varia de maneira contínua, a inclinação da tangente à curva das curvaturas (inverso do raio) determina, em qualquer ponto, a declividade do fundo



Morfologia fluvial

REGRAS COMPLEMENTARES

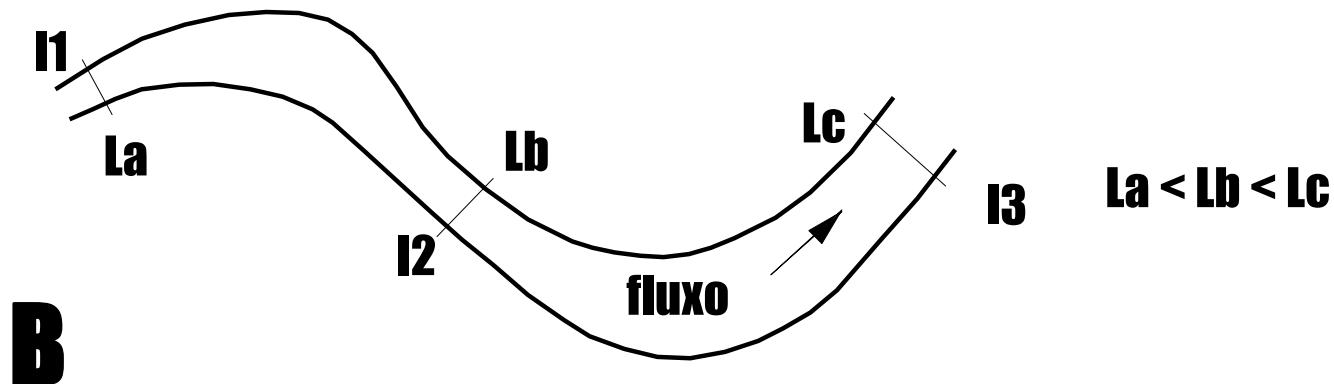
Entre pontos de inflexão consecutivos, a largura deve crescer junto com a curvatura, com o valor máximo no vértice da curva



Morfologia fluvial

REGRAS COMPLEMENTARES

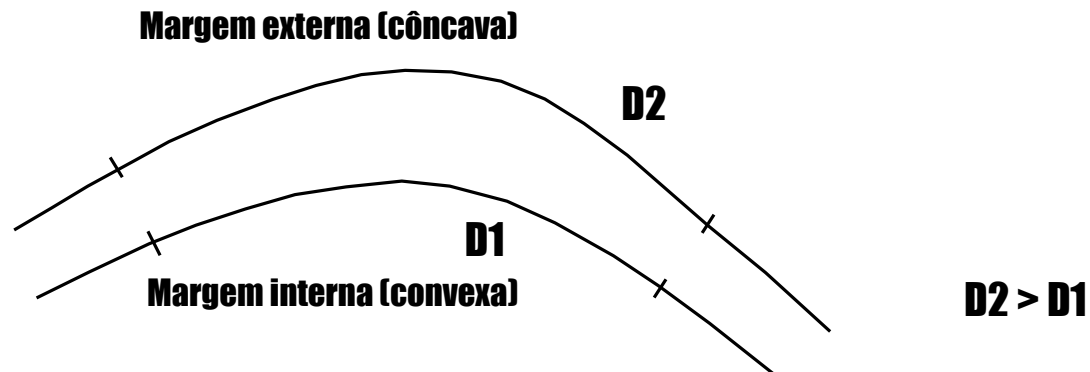
As larguras dos pontos de inflexão sucessivos crescem de montante para jusante



Morfologia fluvial

REGRAS COMPLEMENTARES

Margens côncavas devem ter um desenvolvimento notavelmente superior ao das margens convexas

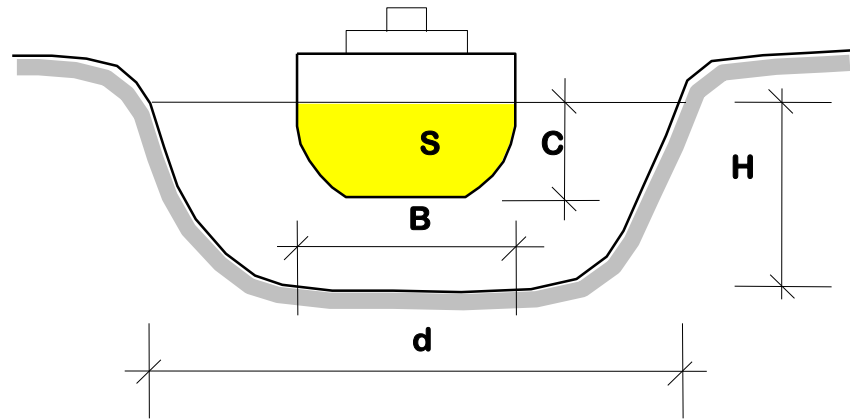




Dimensões desejáveis para canais de navegação

**DEFINIDAS, A PRINCÍPIO,
SEGUNDO CRITÉRIOS ECONÔMICOS**

Dimensões desejáveis para canais de navegação



Profundidade: $h_{\text{mín}} = C + 0,5 \text{ (m)}$, $h_{\text{desejável}} = 1,5.C$

Largura: $d_{\text{mín}} = 4.B$, $d_{\text{desejável}} = 10.B$

Área da seção molhada (seção do canal): $A_{\text{mín}} = 6.S$, $A_{\text{desejável}} = 15.S$

Raio de Curvatura (função do comprimento L da embarcação): $R_{\text{mín}} = 10.L$

Raios menores só com superlargura (s): $s = \frac{L^2}{2.R}$



Melhoramentos dos cursos d'água para navegação

Problemas que dificultam a utilização plena dos cursos d'água

- Obstáculos naturais ou acidentais
- Desbarrancamentos
- Irregularidade das vazões
- Instabilidade do canal
(talvegue pode se alterar após uma enchente)
- Pluralidade de canais
- Corredeiras e quedas

Melhoramentos dos cursos d'água para navegação

MELHORAMENTOS GERAIS ou NORMALIZAÇÃO

LIMITAÇÃO DO LEITO DE INUNDAÇÃO

REMOÇÃO DE OBSTÁCULOS

PROTEÇÃO DAS MARGENS

FECHAMENTO DE BRAÇOS SECUNDÁRIOS

RETIFICAÇÃO DE MEANDROS

REGULARIZAÇÃO

SIMPLES CONTRAÇÃO

CONSERVAÇÃO DE SOLEIRAS

CORRENTES HELICOIDAIS

CANALIZAÇÃO

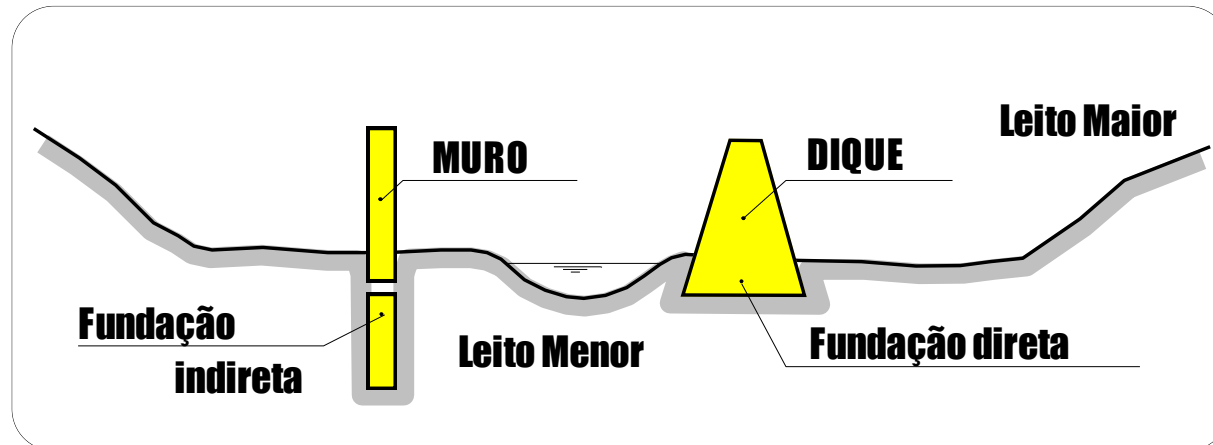


Melhoramentos Gerais ou Normalização

- obras de baixo custo
- simples
- exigem intervenções permanentes para manutenção
- menor vida útil
- não se utilizam da energia natural do rio

Limitação do Leito de Inundação

- Protege terrenos ribeirinhos
- Barragens longitudinais no leito maior
- Diques ou muros
- Limitam as águas nas cheias, prevenindo inundações





Limitação do Leito de Inundação

Diques

- Barragens de terra ou enrocamento
- Geralmente de gravidade
- Materiais impermeáveis
- Solo local ou gabiões, com núcleo impermeável

Muros

- Estruturas esbeltas
- Em geral, de concreto armado
- Podem ser de alvenaria de pedra e madeira



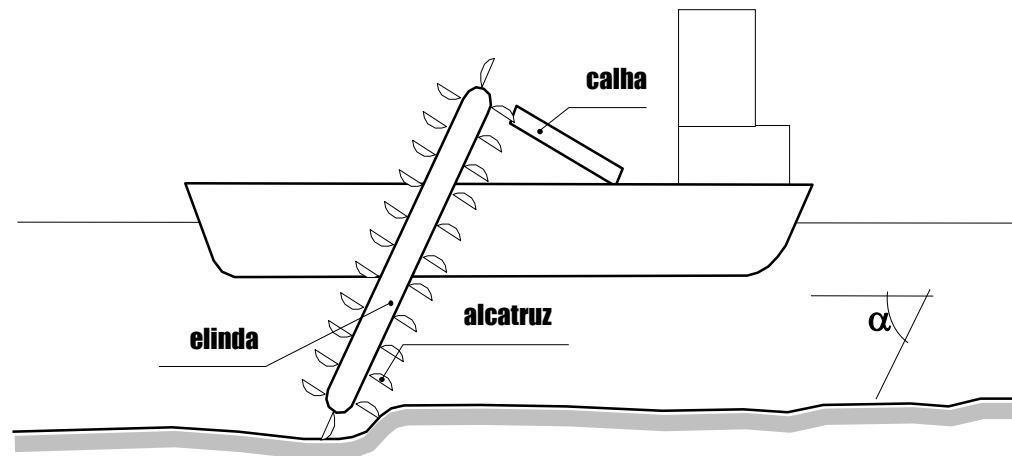
Remoção de Obstáculos

- Retirada de material sólido do leito do rio
- Obstáculo ocasional
- Rochas permanentes
- Sedimentos trazidos pela corrente

Remoção de Obstáculos

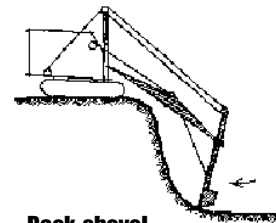
Dragagem

- Equipamentos mecânicos ou hidráulicos
- Pouca influência no regime dos rios
- É comum ocorrer sedimentação do canal dragado
- Material pode ser removido do leito ou deixado no mesmo
- Equipamentos contínuos (alcatruzes)

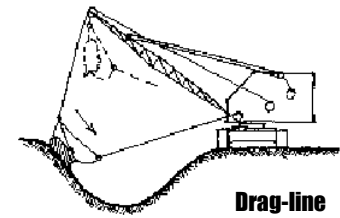


Remoção de Obstáculos

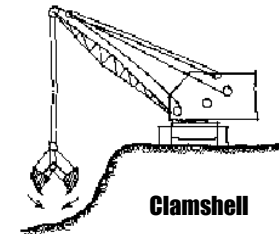
- Equipamentos descontínuos
 - Colher
 - Concha
 - Pá-de-arrasto



Back-shovel



Drag-line



Clamshell

Dragagem por concha (clamshell)



Dragagem por colher (shovel)

<http://superradio1150.com.br/wp-content/uploads/2017/03/desassoriamento-rio-tiete-001.jpg>



<http://s.glbimg.com/jo/g1/f/original/2012/02/13/plataforma-rio.jpg>

Dragagem por pá de arrasto (dragline)





Remoção de Obstáculos

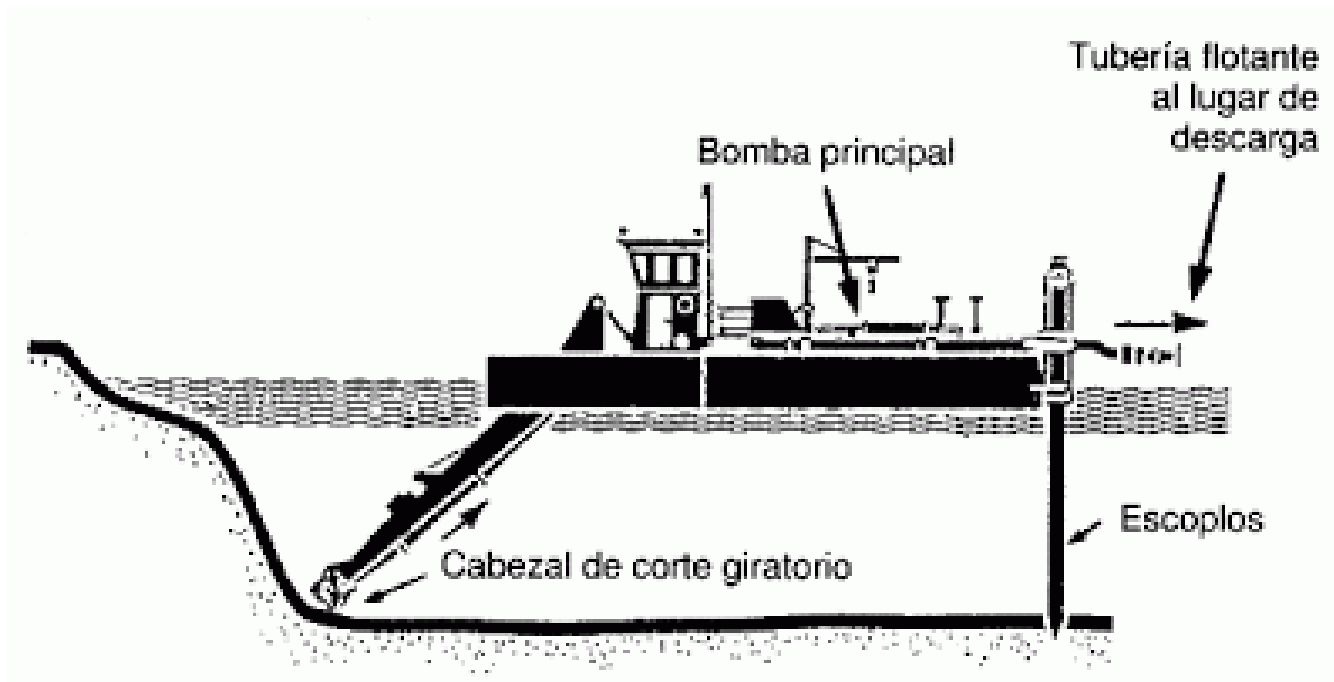
- Equipamentos hidráulicos (dragas de sucção)
 - Simples
 - Com desagregador giratório
 - Com pá de sucção

Draga de sucção (simples)



Fonte: <http://aquatecsub.com.br/obras-realizadas.php?cc=4>

Draga de sucção (pá de sucção)



Draga de sucção (desagregador)



Fonte: <http://portuguese.alibaba.com/product-gs/cutter-suction-dredger-china-cutter-suction-dredger-1256672946.html>



Draga de sucção

Material sólido e água são despejados:

- Nas próprias dragas
- Em batelões (barcas)
- Na corrente, fora do canal
- Na margem, recalçados por tubulação

Derrocamento fluvial

- Explosivos
- Percussão (hastes de derrocagem ou marteletes pneumáticos)

Derrocamento





Proteção das Margens

- Busca a fixação do canal navegável
- Reduz transporte de sólidos
- Permite o equilíbrio da seção transversal
- Protege terrenos ribeirinhos
- Desgaste das margens pode ser provocado por:
 - Arrancamento (oriundo da erosão)
 - Escorregamento da ribanceira (erosão no pé das margens ou escoamento de águas de infiltração)
 - Ação das ondas (vento ou embarcações)



Proteção das Margens

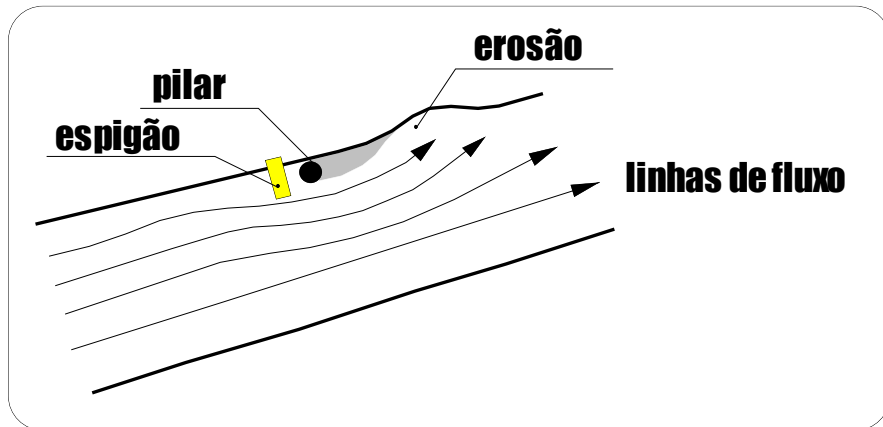
Diretas ou Contínuas

- Taludamento
- Revestimento simples
- Proteção com enrocamentos, alvenaria de pedra e cortinas contínuas

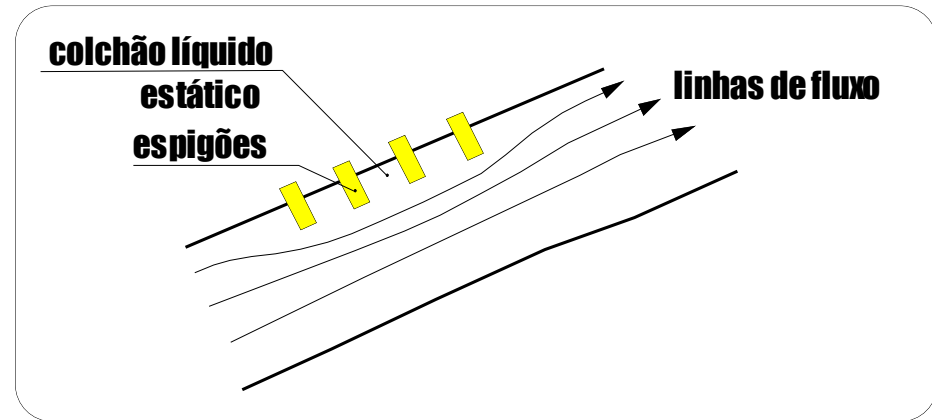
Indiretas ou Descontínuas

- Obras localizadas
- A curta distância das margens
- Desviam o curso d'água
- Provocam a deposição de material sólido
- Espigões isolados
- Espigões de repulsão
- Espigões de sedimentação

Espigões

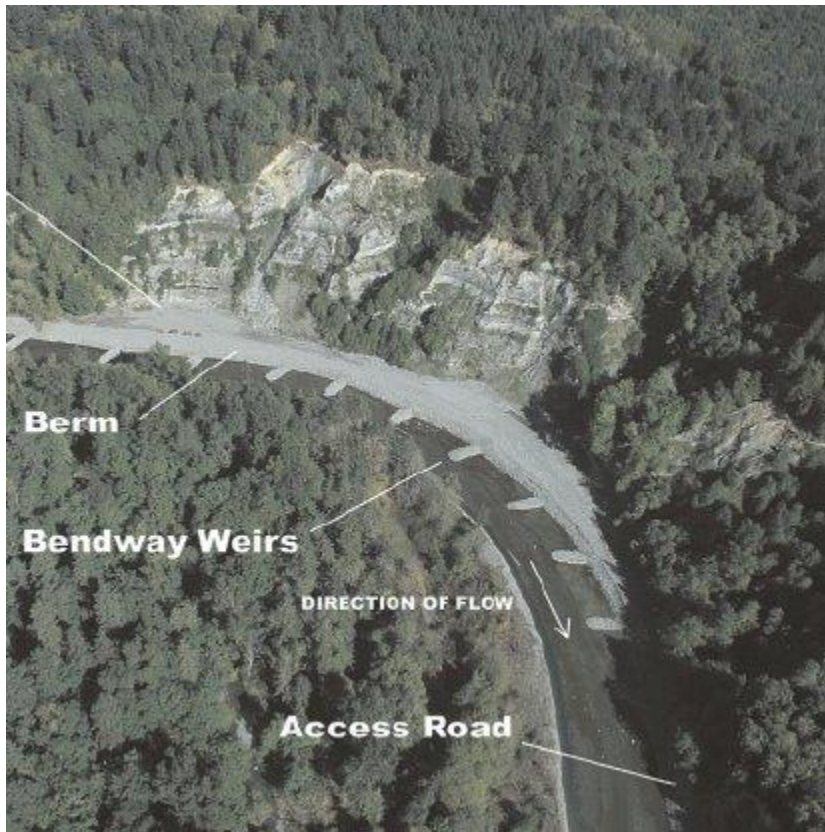


Espigão isolado e seu efeito na margem a jusante



Rio com espigões de repulsão

Espigões



https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTCNuyU4GTQ-ZnFk_hhdv8BkApqw7DdHDxJa2i0yHFt6GMRGJ&usqp=CAU

https://www.researchgate.net/profile/Arelia_Werner/publication/228654010/figure/fig17/AS:301909677232134@1448992284670/Stoltz-Bluff-berm-terrace-and-bendway-weirs-in-summer-of-2007-one-year-after_Q640.jpg



Espigões



Orientam a corrente e auxiliam na proteção das espécies aquáticas

https://www.waterprotectionnetwork.org/wp-content/uploads/2016/06/Wing-Dikes_RTS-2-700x400.jpg

Chevrons



Orientam a corrente e auxiliam na proteção das espécies aquáticas

<http://www.waterprotectionnetwork.org/wp-content/uploads/2016/06/Melissa-Samet-Blog-May-2016.png>

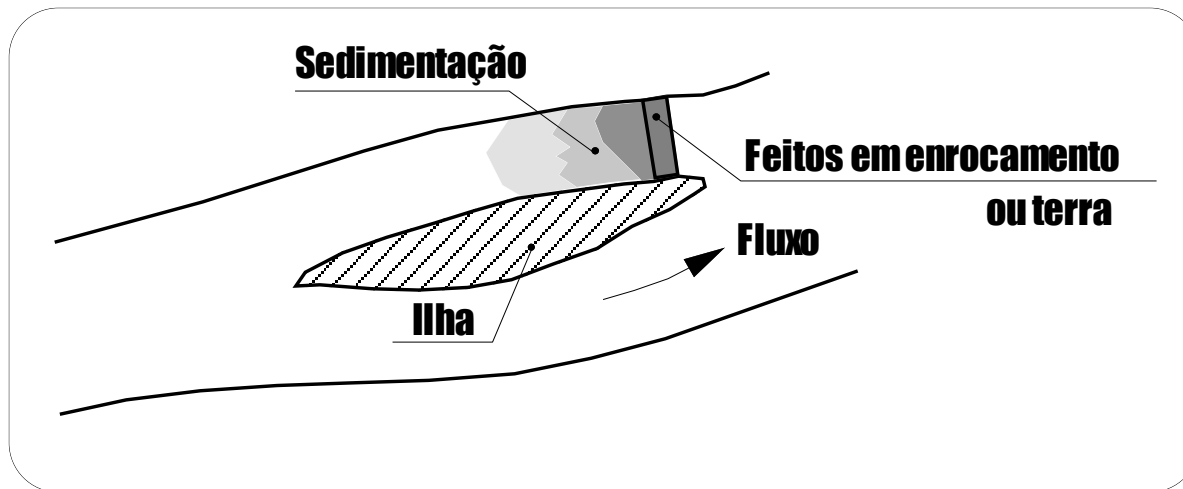
Espigões e diques



<https://www.dutchwatersector.com/sites/default/files/dws-rftr-groynes-dam-waal-aerial-350px.jpg>

Fechamento de Braços Secundários

- Aprofundamento do canal principal
- Deposição dos materiais sólidos, à jusante



Fechamento de Braços Secundários



chevrons



Retificação de Meandros

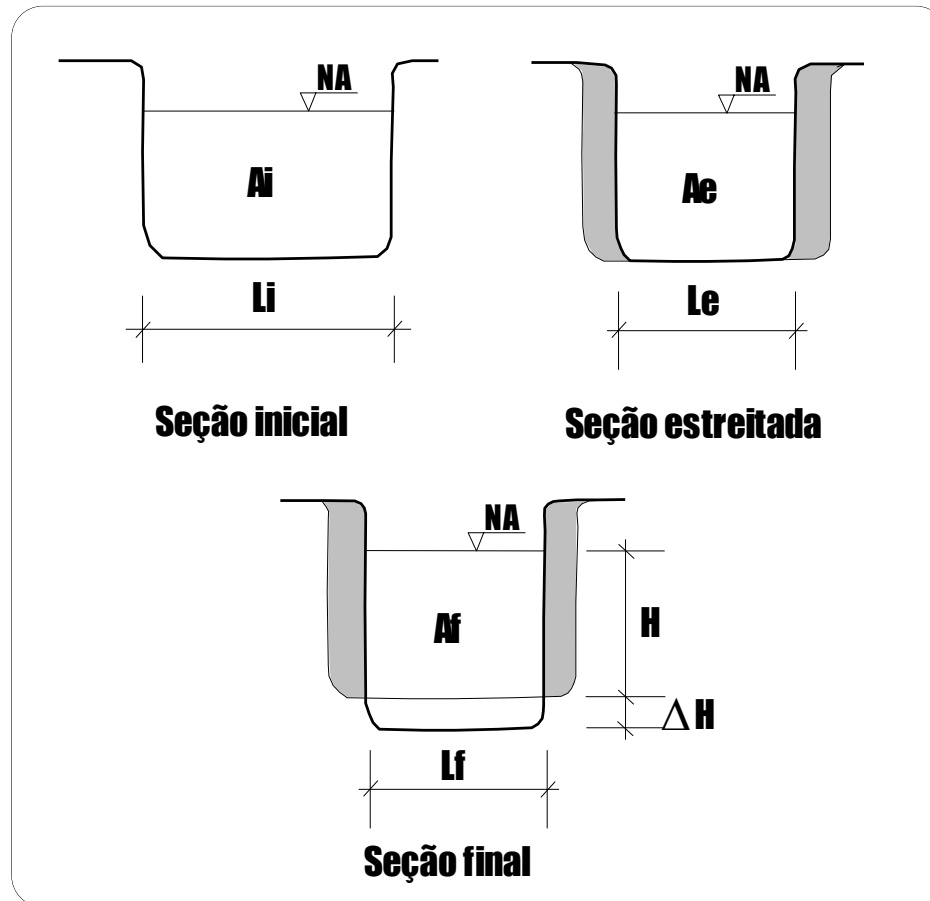
- Pode gerar problemas
- Embocadura do novo canal próxima do vértice da curva pode evitar que o rio consiga refazer o meandro



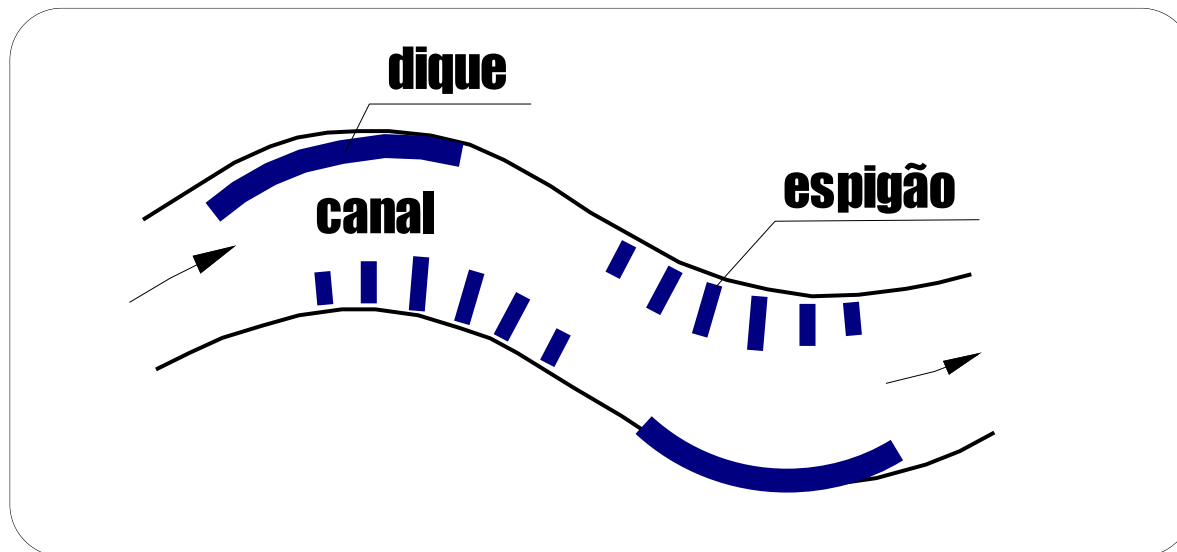
Regularização

- Obras de custo elevado
- Necessitam de pouca manutenção
- Resultados permanentes
- Se utilizam da energia natural do rio

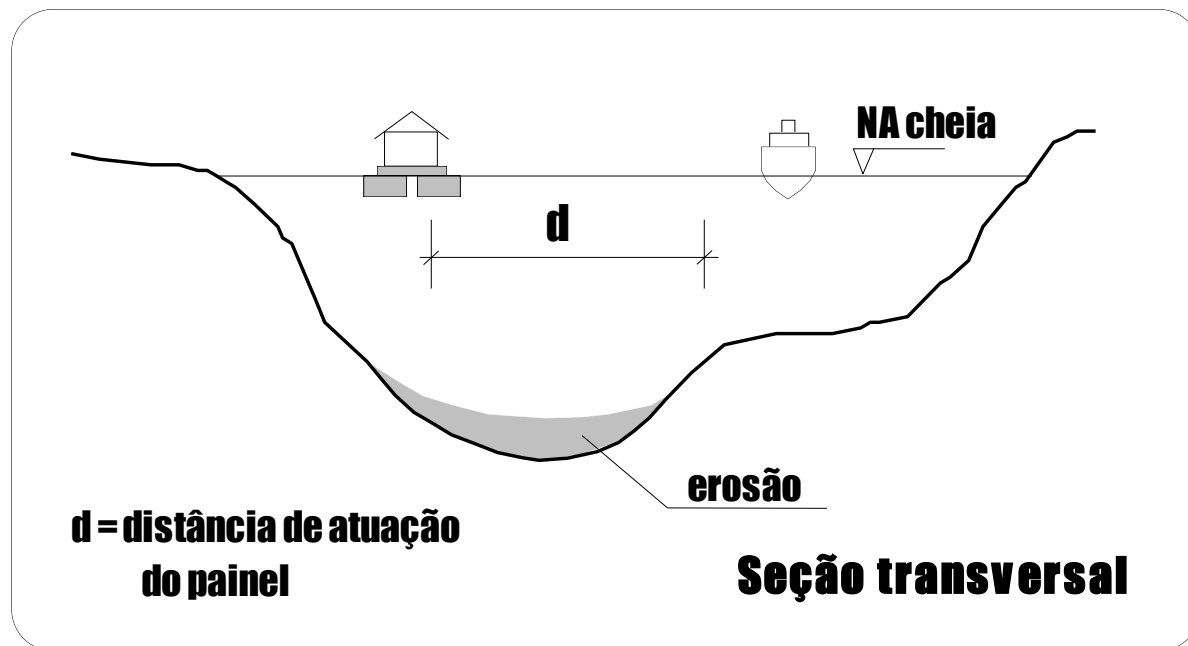
Simple contraction



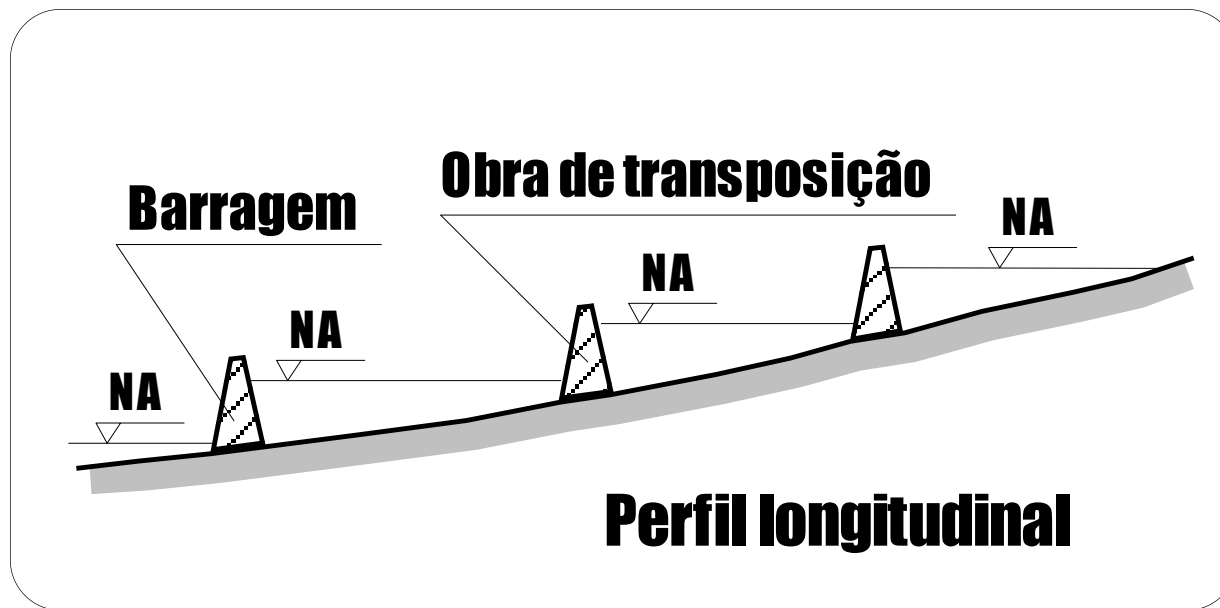
Conservação de soleiras



Correntes helicoidais



Canalização





Canalização

Vantagens

- permite maiores calados
- reduz os tempos de viagem
- menor percurso pela retificação por recobrimento
- controle da vazão na estiagem
- facilidade para construção de portos
- aproveitamento hidrelétrico
- irrigação

Desvantagens

- alto custo construtivo
- inundação de áreas ribeirinhas
- limitação do tráfego nas obras de transposição de desnível
- problemas ecológicos

Investimentos na Hidrovia Tietê-Paraná

Implosão dos vãos da ponte da SP-333 em Pongaí (SP) – jun/2012

- aumentou o vão disponível para navegação de 40m para 120m
- ponte metálica de 120m de comprimento e 900 toneladas
- investimento de R\$ 27 milhões



http://www.brasilengenharia.com/portal/images/stories/noticias/construcao/singulare_ponte.jpg



<https://s2.glbimg.com/vkr6PNepGBqBgLLs90I9BvJ-JY4=/620x465/s.glbimg.com/jo/g1/f/original/2013/10/23/45550.jpg>



Investimentos na Hidrovia Tietê-Paraná

Implosão dos vãos da ponte da SP-333 em Pongaí (SP) – jun/2012



<https://www.saopaulo.sp.gov.br/wp-content/uploads/old/9454/45555.jpg>



https://1.bp.blogspot.com/-vCkZGMGPzbI/T8tOpcBOi1I/AAAAAAAAEu8/MUhx183lsac/w1200-h630-p-k-no-nu/implosao_ponte.jpg



Investimentos na Hidrovia Tietê-Paraná

Aprofundamento da calha do Rio Tietê - 2017

- rebaixamento de 2,4 metros ao longo de 10 quilômetros
- remoção de 1,2 milhões de metros cúbicos de rocha/solo
- investimento de R\$ 200 milhões
- R\$ 700 milhões é a estimativa feita pelo Departamento Hidroviário de SP para o prejuízo com quase dois anos de escoamento feito por caminhões, por conta da interrupção da movimentação de cargas na hidrovia em 2015/2016

<http://g1.globo.com/sao-paulo/sao-jose-do-rio-preto-aracatuba/noticia/2017/02/hidrovia-tiete-parana-recebe-obra-para-aprofundar-canal-do-rio.html>

Exemplo

Obra de aprofundamento da calha do Rio Tietê em São Paulo

- iniciada em 1998 e concluída em 2005
- aprofundamento do leito e alargamento ao longo de 24,5 km
- aprofundamento de 2,5 m e larguras finais entre 41 e 46 m
- aumento da vazão de
640 m³/s para 1.060 m³/s
- obras incluíram a canalização de parte do Rio Cabuçu de Cima (entre a foz no Rio Tietê e a Ponte Três Cruzes)



Fonte [imagem e informações]:

http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=64%3Acalha-do-tiete&catid=36%3Aprogramas&Itemid=18

Exemplo

Obra de desassoreamento do Rio Tietê em São Paulo

- obras entre 1998 e 2005 retiraram 6,8 mi m³ de rochas e sedimentos, porém até o fim de 2010 houve acúmulo de 3 mi m³
- R\$ 1,7 bi investidos entre 1998 e 2005
- Abri/2012: anunciados investimentos do Estado de SP para dragagem de 900 mil m³



<https://uploads.metropoles.com/wp-content/uploads/2016/09/22075623/rio-tiet%C3%AA-s%C3%A3o-paulo-840x577.jpg>



Obras na calha do Rio Tietê em São Paulo

<https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=G6dRkTFcEoM>