



Notas de Aula – UNIDADE 1

1. INTRODUÇÃO AO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E HIDRÁULICA DE CANAIS

1.1. Introdução ao Transporte de Sedimentos

O fluxograma a seguir demonstra os processos nos quais culminam no transporte de sedimentos nos corpos hídricos, logo nos problemas causados por esse.



O escoamento superficial gerado por um dos principais agentes erosivos, a chuva, transportam solo em áreas com inadequada cobertura vegetal (erosão laminar). Os processos erosivos podem ser iniciados, também, pelas ações antrópicas como nas obras de engenharia (erosão localizada). Uma vez que nem toda perda de solo gera



sedimento, os desagregados de solo podem se depositar em algum local da bacia hidrográfica, não chegando ao corpo d'água. O solo trazido pelo escoamento ao longo da bacia é sedimento a ser transportado pelo leito dos rios diminuindo a qualidade de água e o tempo útil de vida dos reservatórios. A poluição dos rios pela concentração de sedimentos encarece o tratamento da água, logo do abastecimento público. Também, torna problemática uso dos recursos hídricos para diversos fins. Devido a fatores estudados ao longo do curso, os sedimentos poderão depositar-se nos reservatórios ou ao longo curso d'água, causando transtornos como enchentes. Existem vários métodos que quantificam o transporte de sedimentos, cujo monitoramento é importante para verificar eficácia de práticas de conservação de água e solo, qualidade de água e dimensionamento do volume morto de reservatórios.

Deve-se levar considerar as tendências brasileira e internacional para avaliação quantitativa da descarga sólida em corpos hídricos. Internacionalmente há mais registros em épocas de cheia e monitoramento continuado utilizando turbidímetros, assim correlacionando turbidez e concentração de sedimento. Nacionalmente, faltam redes sedimentométrica e estações com amostragem diária. Dados diários e consistentes é de fundamental importância para estudos e extrapolação de dados para períodos não medidos, usando formulas matemáticas e curvas chave.

Existem diversas formulas para quantificação direta ou indireta da descarga sólida total, de fundo e suspensão. As estimativas indiretas considera parâmetros hidráulicos, em contrapartida, na estimativa direta utiliza-se dados medidos da concentração de sedimento. Os métodos indiretos mais utilizados no Brasil que determinam carga de fundo são Einstein (1950) e Meyer Peter & Muller (1948), já os mais utilizados que estimam carga total são os métodos diretos de Einstein Modificado por Colby & Hembree (1955) e Colby Simplificado (1957).



I. *Métodos Recomendados*

a. **Dados medidos disponíveis**

Usar o método de Einstein Modificado (1955) para estimar carga em suspensão não medida e carga de fundo. Analisar separadamente a carga de fundo e carga em suspensão (*wash load*).

Decidir qual equação de transporte de sedimentos melhor concorda com os dados medidos e usar para estimar o transporte de sedimentos para escoamento de projeto, quando não for possível fazer medições sobre essas condições.

b. **Dados medidos não disponíveis**

Se a carga de fundo é uma porção significativa da carga total de material de fundo usa-se o método de Einstein Modificado (1955). Usar o método de Colby (1964) para rios com profundidade de escoamento menor ou igual a 3,0 m, usar o método de Shen e Hung (1971) para calhas e pequenos rios e usar o método de Toffaleti para grandes rios com fundo de areia.

Segundo Simons e Senturk (1977), o método modificado de Einstein (1955), é plenamente digno de confiança por incorporar o máximo de dados medidos. Sua aplicação para rios profundos foi questionada por Toffaleti (1969), sendo considerado satisfatório para rios pequenos e médios. Graft (1971) considera que sua aplicabilidade para condições diferentes daquelas para as quais foi obtida, ainda deve ser comprovada.

Cogollo Ponce (1990), sugere para o cálculo da descarga de fundo, e na ausência de dados medidos, sugere os seguintes métodos, com modificações:

- YALIN (1963)
- TOFFALETI (1969)
- BAGNOLD (1966)

Paiva (1988), sugere que enquanto não for desenvolvido um modelo que permita estimar com segurança a carga de fundo e a carga em suspensão, os cálculos devem ser feitos visando a obtenção da carga total transportada, sem fazer distinção entre carga de fundo e suspensão, e nesse caso:



- Dispondo-se de dados medidos: Toffaleti (1979) (carga total).
- Dados medidos ausentes: Ackers & White (1972) (carga total) e Van Rijn Simplificado (1984) (carga em suspensão).

Recomenda-se ainda que o método de Einstein (1950) deixe de ser usado para o cálculo da carga de material de leito em rios naturais e o método de Einstein modificado por Colby e Hembree (1955) deixe de ser usado como padrão para a avaliação de outros métodos que venham a ser desenvolvidos.

II. *Necessidade de Pesquisa*

- Linhas orientativas compreensíveis para seleção e aplicação de fórmulas apropriadas de cálculo do transporte de sedimentos em rios naturais;
- Testes das fórmulas existentes sob condições variadas;
- Análise sistemática das considerações requeridas por cada fórmula e da faixa de condições onde cada fórmula é aplicável;
- Listagem das condições sob as quais cada fórmula não deve ser aplicada e;
- Relações entre a morfologia do rio e a produção de sedimentos.

Há, também, necessidade de estudos que possam responder questões como:

- Qual a taxa de transporte de fundo correta?
- Qual a influência da concentração de sedimentos em suspensão sobre o perfil vertical de velocidade do escoamento?
- Qual a relação entre a carga em suspensão medida, obtida por amostrador que integra na profundidade e na obtida por integração de muitas amostras obtidas em diversos pontos da vertical, com amostrados pontual?
- Quantas amostras são necessárias para definir o valor médio da carga em suspensão, com certa precisão?

Paiva (1988) recomenda que sejam feitas campanhas de medição de transporte de sedimentos por arrasto de fundo, com vistas ao desenvolvimento de modelo de previsão do transporte de fundo, uma vez que os modelos existentes atualmente não fornecem estimativas dentro de uma precisão aceitável. Também, que sejam



desenvolvidas pesquisas que permitam distinguir com precisão, transporte de sedimentos em suspensão de transporte de sedimentos por arraste de fundo.

CONCLUSÕES

- A aplicação dos atuais métodos de avaliação da quantidade de sedimentos transportada pelos rios que podem levar a grandes erros se as condições para as quais está sendo aplicado o método diferir daquelas para as quais ele foi desenvolvido.
- O método de Toffaleti (1969), tem demonstrado boa performance em todas as avaliações que foi submetido.
- É recomendável que a escolha do método para estimar o transporte de sedimentos em determinado rio, seja feita com base em período de medições.

1.2. Mecânica Fluvial: Hidráulica de Canais

1.2.1. Introdução. Conceitos.

I. Introdução



Condutos livres ou canais são condutos sujeitos à pressão atmosférica em pelo menos um ponto de sua seção de escoamento.

UTILIZAÇÃO NA ZONA RURAL

Condução e distribuição de água

Conduzem água da fonte de captação até o local de uso. O nível da água no canal deve estar numa cota que permita: **DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POR GRAVIDADE.**



Exemplos de uso: irrigação, condução de água para tanques de criação de peixes, distribuição de resíduos, etc.

Drenagem

Recolhe água de escoamento superficial ou utilizada em alguma atividade e conduz a um dreno natural. O nível da água no canal deverá estar numa cota menor que a cota do local de uso.

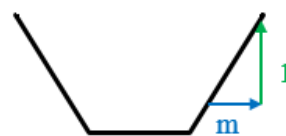
Exemplos de uso: drenagem de superfície (terraços), de quadras de arroz, de tanques e açudes, etc.

FORMA DOS CANAIS

Os canais artificiais devem ter forma geométrica definida. As mais comuns são:

- Trapezoidal (mais utilizada) ou triangular para canais escavados em terra sem revestimento;
- Retangular, semicircular e também trapezoidal para canais revestidos;
- Circular (tubos de concreto) para galerias de águas pluviais e esgoto.

INCLINAÇÃO DAS PAREDES LATERAIS (TALUDE)



Canais trapezoidais

INCLINAÇÃO DAS PAREDES LATERAIS: RECOMENDAÇÕES

Tipo de solo	m
Arenoso	3:1
Barro-arenoso	2 a 2,5:1
Barro-argiloso	1,5 a 2:1
Argiloso	1 a 2:1
Cascalho	1 a 1,5:1
Rocha	0,25 a 1:1

REVESTIMENTO

Objetivos:



- Reduzir perdas por infiltração durante a condução de água
- Evitar o crescimento de vegetação
- Evitar o desmoronamento das paredes do canal

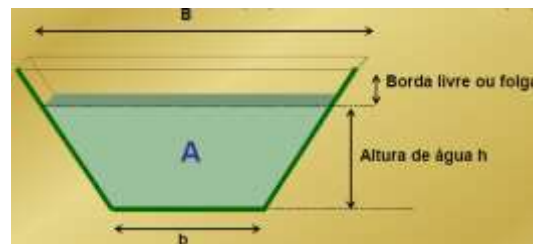
Materiais para revestimento:

- Concreto;
- Lona plástica, manta de borracha;
- Alvenaria de tijolos ou pedras;
- Compactação, solo-cimento;
- Uso de pré-moldados: Telhas de cimento amianto, canaletas de concreto, plástico, etc.

II. Equacionamento hidráulico de canais

1. Elementos que caracterizam os CANAIS

1.1. Seção transversal (S) e área molhada (A)



A seção transversal S engloba toda a área de escavação para construção do canal (definida pela linha verde);

A seção molhada A é aquela ocupada pela água durante o escoamento e pode variar de acordo com a vazão do canal.

A seção transversal de um trapézio pode ser calculada por uma destas duas fórmulas:

$$S = \frac{B + b}{2} \times h \qquad S = h \times (b + m \times h)$$

1.2. Perímetro molhado (P)

É a linha que limita a seção molhada junto às paredes e ao fundo do canal.





Nas figuras acima o perímetro molhado do canal trapezoidal e do canal retangular estão definidos pela linha **roxa**.

O perímetro molhado de um canal trapezoidal pode ser obtido por meio da fórmula:

$$P = b + 2 \times h\sqrt{m^2 + 1}$$

Quanto maior o perímetro molhado de um canal, maior será a superfície de contato entre a água que escoar e as paredes; o atrito ocasionado por este contato contribui para reduzir a velocidade média do escoamento.

1.3. Raio hidráulico (Rh)

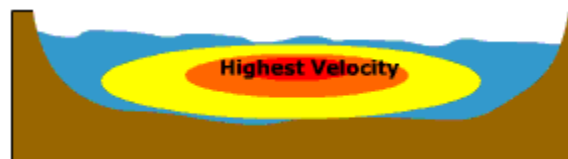
Raio hidráulico é a relação entre a seção molhada (A) e o perímetro molhado (P) de um canal.

$$Rh = \frac{A}{P}$$

1.4. Velocidade da água nos canais

A velocidade adotada nos cálculos será um valor médio, já que na seção molhada, a velocidade varia com a posição e com a profundidade considerada.

- Junto às margens e ao fundo do canal, o atrito da água contra essas superfícies sólidas, reduz a velocidade.
- No centro do canal, um pouco abaixo da superfície (devido à resistência oferecida pelo ar na superfície), a velocidade será máxima.



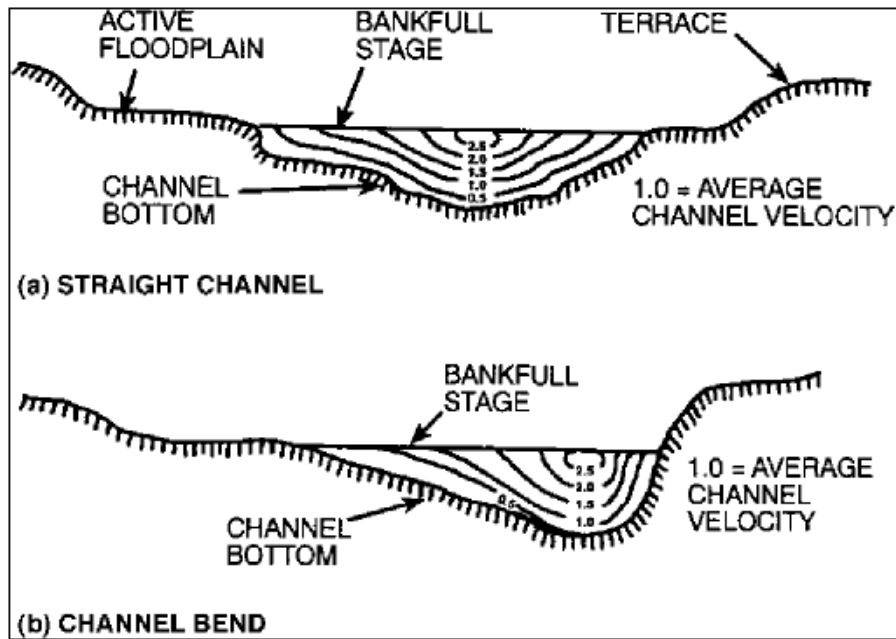
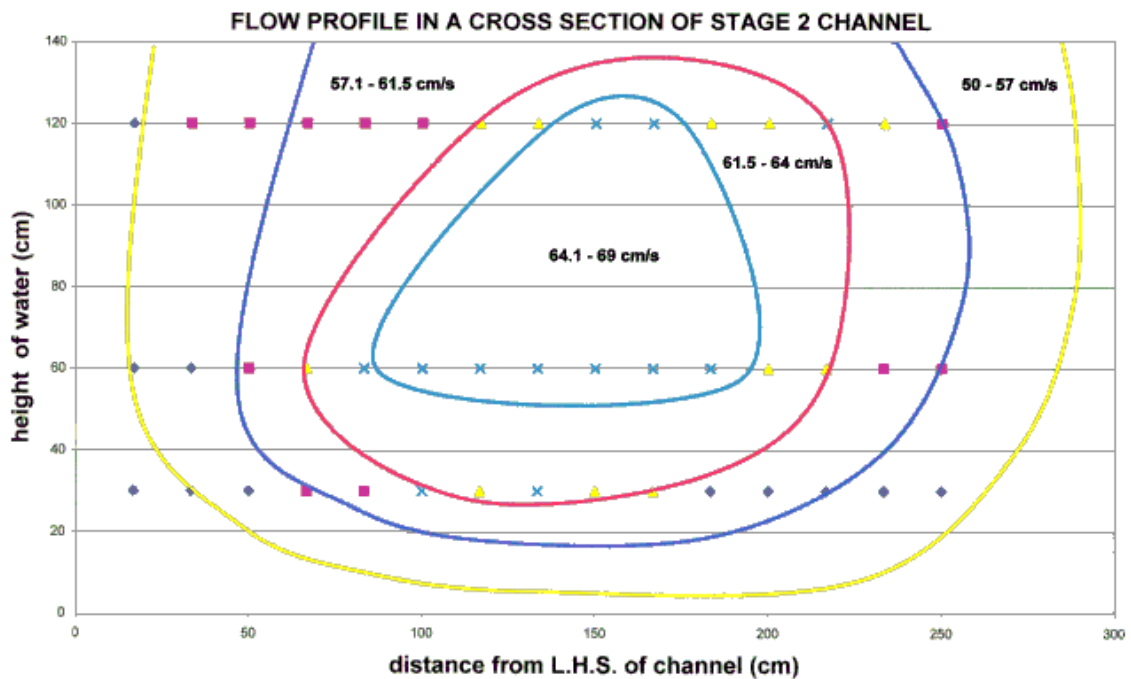


Figure 5. Cross Sections of Natural Channels Showing Velocity Distributions



VELOCIDADES MÉDIAS MÁXIMAS RECOMENDADAS PARA QUE NÃO OCORRA EROSIÃO NO CANAL

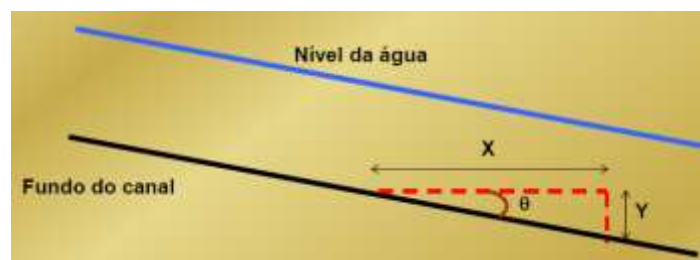
Tipo de solo	Velocidade média máxima recomendada (m/s)
Arenoso	0,3 a 0,7
Barro-arenoso	0,5 a 0,7



Barro-argiloso	0,6 a 0,9
Argiloso	0,9 a 1,5
Cascalho	0,9 a 1,5
Rocha	1,2 a 1,8

1.5. Declividade do canal (I)

$$I = \frac{Y}{X} = \tan \theta$$



A **declividade I** define a inclinação do fundo do canal em relação ao plano horizontal.

DECLIVIDADE DOS CANAIS

Para canais de irrigação e de drenagem de pequenas dimensões, os valores usuais de **I** variam entre 0,1 e 0,4%, ou seja:

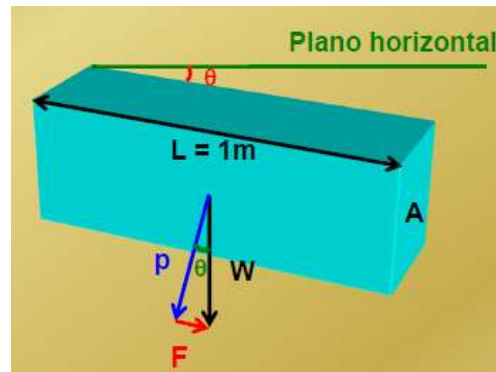
- 0,001 m de desnível por metro de comprimento de canal até,
- 0,004 m de desnível por metro de comprimento de canal.

DIMENSIONAMENTO DE CANAIS CONSIDERANDO MOVIMENTO UNIFORME

Equação geral: $W = \gamma_{H_2O} \times L \times A$

Para $L = 1$: $W = \gamma_{H_2O} \times A$

W é peso do volume de água no trecho estudado.



Corte longitudinal de um canal

Considerando que:

- F é a componente de W que produz o movimento da água no canal (paralela à direção do escoamento).
- p é a componente de W que exerce pressão no fundo canal (perpendicular à direção do escoamento).

$$\text{sen } \theta = F/W \rightarrow F = W \times \text{sen } \theta$$

$$F = \gamma H_2O \times A \times \text{sen } \theta$$

(Força que produz o escoamento)

Forças que opõe resistência ao escoamento:

- Peso específico do líquido (γH_2O);
- Perímetro molhado do canal (P);
- Comprimento do canal (L);
- Uma função da velocidade média da água no canal ($f = f(V)$).

A resultante R destas forças, que irá se contrapor à força F , será dada pela expressão:

$$R = \gamma H_2O \times P \times L \times f(V) \text{ ou } R = \gamma H_2O \times P \times f(V) \text{ (considerando } L = 1)$$

Para que o movimento seja uniforme (**equilíbrio dinâmico**), deve haver equilíbrio entre as forças aceleradoras e retardadoras. Ou seja:

$\gamma H_2O \times A \times \text{sen } \theta$ é proporcional a $\gamma H_2O \times P \times f(V)$

$$\frac{A}{P} \times \text{sen } \theta \propto f(V) \quad Rh \times \text{sen } \theta \propto f(V)$$



Considerando que a inclinação do fundo dos canais em relação ao plano horizontal é sempre pequena, podemos dizer que θ é muito menor que 10° e que, portanto:

$$\text{sen } \theta \cong \text{tg } \theta$$

Então, a tangente do ângulo θ é a própria declividade **I** do canal, conforme definido anteriormente. Então podemos escrever:

$$Rh \times I \propto f(V)$$

Que é a equação geral da resistência ao escoamento nos canais.

EQUAÇÕES PRÁTICAS PARA DIMENSIONAMENTO DOS CANAIS

Equação de Manning	Equação da continuidade
$V = \frac{Rh^{2/3} \times I^{1/2}}{n}$	$Q = V \times A$
<ul style="list-style-type: none">• V é a velocidade média do escoamento (m/s);• Rh é o raio hidráulico do canal (m);• I é a declividade do fundo do canal (m/m);• n é um coeficiente dado em função da rugosidade das paredes e do fundo do canal.	<ul style="list-style-type: none">• Q é a vazão escoada no canal (m³/s);• V é a velocidade média do escoamento (m/s);• A é a área molhada na seção transversal (m²).

Tipos de problemas:

1) Conhecendo n, I, A e Rh, calcular Q (resolução direta);

Exemplo: Saber a vazão em canal já construído ou formado por unidades pré-moldadas.

2) Conhecendo n, A, Rh e Q, calcular I (resolução direta);

Exemplo: Saber qual deverá ser a declividade do canal.

3) Conhecendo Q, n e I, calcular A e Rh (por tentativas).

Exemplo: Definir que forma deverá ter o canal.



Exemplo de cálculo para o terceiro tipo de problema:

01. Deseja-se construir um canal para conduzir água até uma lavoura de arroz irrigado por inundação. O canal deverá ter seção transversal trapezoidal, retilínea e uniforme em todo o seu comprimento e declividade de 0,4%. A vazão a ser transportada é de 310 l/s.

Dimensione a seção transversal deste canal (forneça todas as dimensões esquematizadas), considerando que a velocidade média da água não deve ultrapassar 0,9 m/s e a inclinação lateral das paredes (m) deve ser de 1,5:1.

Com relação à natureza das paredes, utilize o coeficiente de Manning para canais com paredes de terra, retos, uniformes e em bom estado ($n = 0,025$).

Equações necessárias:

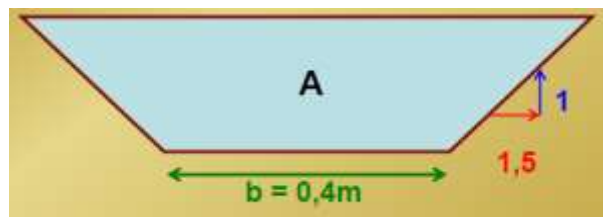
$$\text{Área Molhada: } A = h \times (b + m \times h)$$

$$\text{Perímetro Molhado: } P = b + 2 \times h\sqrt{m^2 + 1}$$

$$\text{Velocidade Média: } V = \frac{Rh^{2/3} \times I^{1/2}}{n}$$

$$\text{Vazão: } Q = V \times A$$

Todos os cálculos referem-se à seção molhada A:



Passos para a resolução do problema:

a) Haverá duas variáveis indefinidas neste tipo de problema, h e b, já que o tipo de solo permitirá definir o valor de m. Para resolver o problema deveremos pré-definir uma delas e trabalhar com a outra, fazendo tentativas.

Iniciaremos escolhendo qual valor será estabelecido, h ou b. Neste exemplo vamos supor que o valor de b tenha que ser definido em função das dimensões da caçamba da retroscavadora que será contratada para construir o canal.

Definiremos $b = 0,4\text{m}$. A seguir atribuiremos um valor qualquer para h e daremos prosseguimento aos cálculos;

b) Com o valor de h escolhido, calcular a seção molhada A;



- c) Calcular o perímetro molhado P ;
- d) Calcular o raio hidráulico R_h ;
- e) Calcular a velocidade média do escoamento V . Se o valor calculado for maior que o limite estabelecido para impedir erosão, mudanças devem ser feitas de modo a reduzir a velocidade média. Pode-se conseguir isto aumentando o perímetro molhado ou reduzindo a declividade do canal, quando isto for possível;
- f) Calcular a vazão Q e verificar se coincide ou aproxima-se suficientemente do valor solicitado no enunciado do problema.
- Caso o valor encontrado seja menor que o necessário, o valor de h deverá ser aumentado, em nova tentativa.
 - Caso a vazão seja excessiva, o valor atribuído a h deverá ser reduzido.

A sequência de cálculos deve ser refeita até encontrar o valor de Q necessária, como apresentado no quadro a seguir:

largura do fundo (b)	Altura de água	Área molhada	Perímetro molhado	Raio hidráulico	Velocidade	Vazão
(metros)	(metros)	(m ²)	(metros)	(metros)	(m/s)	(m ³ /s)
0,4	0,4	0,40	1,84	0,217	0,91	0,366
0,4	0,35	0,32	1,66	0,195	0,85	0,275
0,4	0,38	0,37	1,77	0,208	0,89	0,328
0,4	0,37	0,35	1,73	0,204	0,88	0,310

Considerando uma borda livre para evitar transbordamentos de 0,13m, as dimensões da seção transversal S do canal serão:

