UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DISCIPLINA: IT 503 – FUNDAMENTOS DE HIDRÁULICA

Escoamento em Condutos Livres

Prof. Dr. Conan Ayade Salvador

Seropédica - RJ, 17/05/2023

Programa da Disciplina

- Introdução à Mecânica dos Fluidos;
- Hidrostática;
- Manometria;
- Hidrodinâmica;
- Medição de vazão;
- Escoamento em Condutos Livres;
- Escoamento em Condutos Forçados;
- Instalações Elevatórias; e,
- Estudo das Pequenas Barragens.









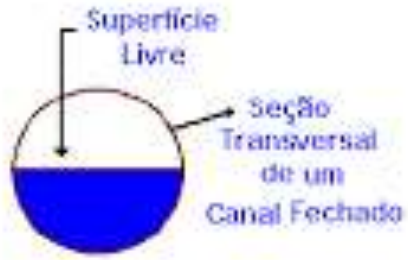
Tópicos da Aula

- Escoamento em condutos livres - introdução;
- Tipos de movimentos; Regime de escoamento;
- Distribuição da velocidade e pressão;
- Elementos geométricos de um canal;
- Equação fundamental do escoamento uniforme;
- Equação de Manning;
- Formas geométricas mais utilizadas em canais;
- Seção hidráulica de máxima eficiência;
- Dimensionamento de canais;
- Velocidade, declividade, inclinação de taludes e borda livre recomendadas;
- Perda de água por infiltração.

Escoamento em Condutos Livres - Introdução

Os condutos livres apresentam como característica principal uma superfície livre onde atua a pressão atmosférica. Também são denominados de canais, os quais podem apresentar seção aberta ou fechada. O escoamento se dá unicamente pela ação da força da gravidade.





Exemplos de condutos livres: cursos d'água naturais, os canais de condução de água (para diversos fins), coletores de esgoto, galerias de águas pluviais, os drenos abertos e fechados, entre outros.

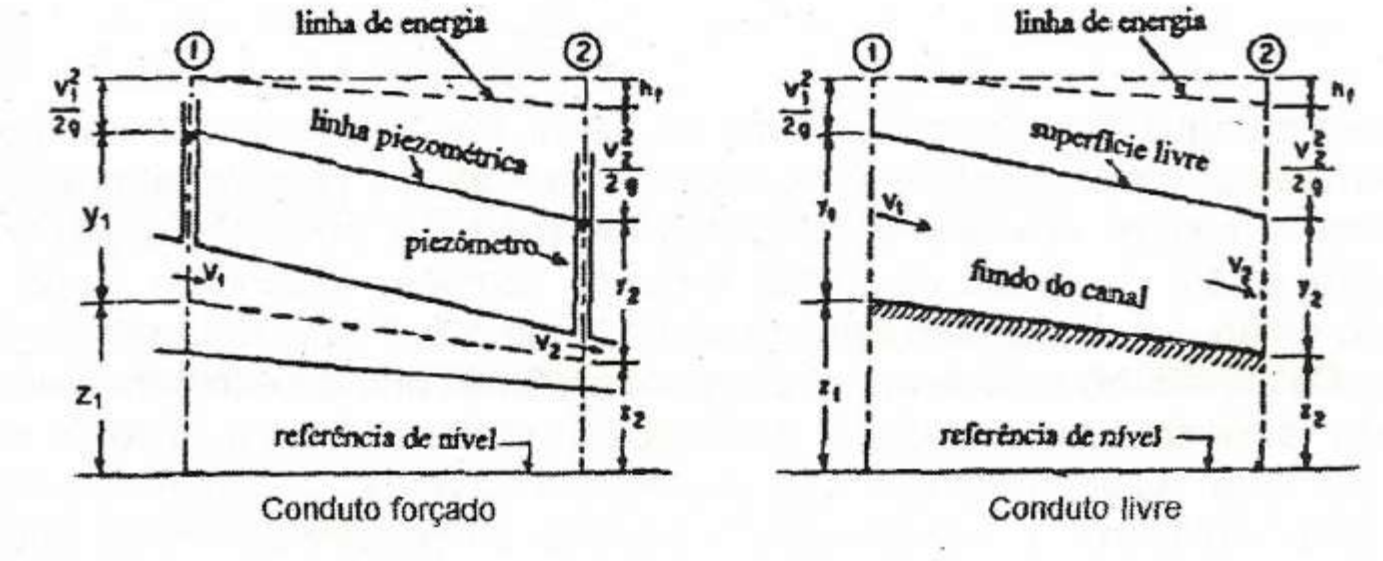






Escoamento em Condutos Livres - Introdução

Os conceitos relativos à linha piezométrica e de energia são aplicados aos condutos livres de maneira similar aos condutos forçados.



A superfície da água é a própria linha piezométrica.

No caso de canais de pequena declividade, a linha piezométrica se localizará a uma altura hidráulica igual a p/γ a contar do fundo do canal.

A solução de problemas hidráulicos envolvendo canais apresenta maior dificuldade do que os relativos aos condutos forçados.

PERES (2006).

Escoamento em Condutos Livres - Introdução

Considerações:

Supondo o *escoamento permanente uniforme* em um canal, observa-se que:

1. apresenta profundidade de escoamento constante (não existe diferencial de pressão para atuar como força motora do escoamento);

2. a dinâmica da água só existe por causa da implantação de uma declividade no fundo, que iguale ou supere a perda de carga que ocorre no movimento;

3. quando a declividade = perda de energia unitária, o escoamento de dá pela ação da gravidade.

OBS.: quando a declividade > perda de energia unitária, a energia cinética (velocidade) aumenta e a profundidade da água (pressão) diminui → escoamento deixa de ser uniforme

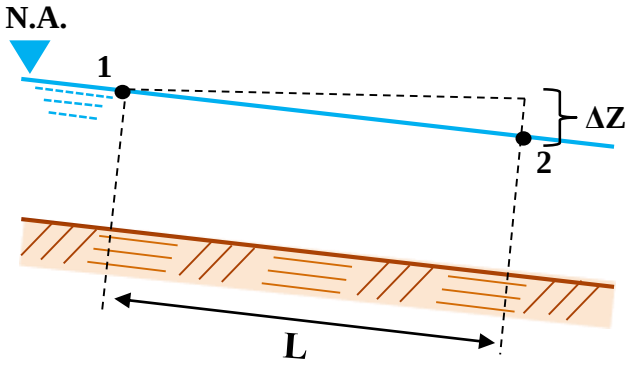
Escoamento em Condutos Livres - Introdução

Considerações (Supondo o *escoamento permanente uniforme*)**:**

Aplicando-se a Equação de Bernoulli para fluidos reais entre os pontos (1) e (2), tem-se:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + hf_{1\to2}$$

Patm = 0 Patm = 0 $V_1 = V_2$ – escoam. uniforme



No escoamento permanente e uniforme a declividade da linha de energia, da superfície da água (linha piezométrica) e do fundo do canal são iguais.

$$hf_{1\to2} = z_1 - z_2$$

Dividindo ambos os membros por L:

$$J = \frac{z_1 - z_2}{L} \quad \therefore \quad J = \frac{\Delta Z}{L} = I \to declividade$$

Perda de carga unitária (m/m)

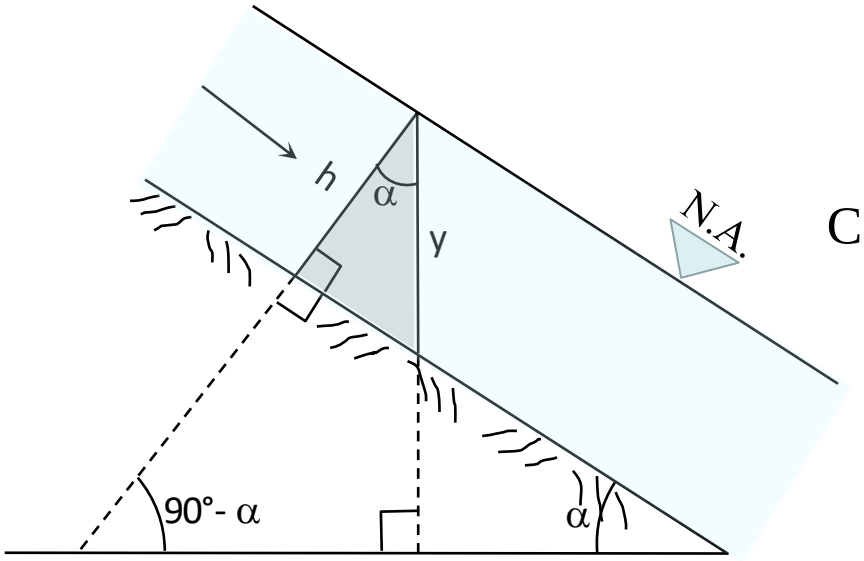
$$J = \frac{hf\ (m.c.f)}{L\ (m)}$$

Escoamento em Condutos Livres - Introdução

Considerações:

No tocante aos elementos geométricos dos canais, é importante ressaltar que existe uma diferença entre a altura da seção (h), que é medida perpendicularmente ao fundo do canal, e a profundidade do canal (y), que é medida na vertical.

Ampliando o valor da declividade, visando refinar os aspecto visual, tem-se:



Fonte: Adaptado de Duarte et al. (2015)

$$\cos\alpha = \frac{h}{y} \quad \rightarrow \quad h = \cos\alpha \,.\, y$$

Como os valores de $\alpha \ll 10°$, tem-se:

$$\cos\alpha \cong 1$$

assim

$$h \cong y$$

empregado nos modelos matemáticos.

Escoamento em Condutos Livres - Introdução

Dificuldades ao tratar-se com condutos livres:

- Rugosidade das paredes: Em condutos livres não se tem um controle de qualidade industrial como nos tubos para condutos forçados. Além dos diferentes tipos de materiais empregados;
- Parâmetros geométricos: Enquanto que nos condutos forçados na maioria dos casos são seções circulares, nos condutos livres utilizam-se diversas formas de seções (circulares, trapezoidal, retangular, oval);
- Responsabilidade técnica: Em condutos forçados um erro de 0,3 m no Plano Piezométrico não traz grandes consequências, mas um erro de 0,3 m no nível d' água de um canal pode ser desastroso.

terra compactada



manta de borracha



alvenaria (pedras)



polietileno



Tipos de Movimento

PERMANENTE $\frac{\partial Q}{\partial t} = 0$

- **Uniforme** $\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$
  - velocidade média constante
  - profundidade constante
- **Variado** $\frac{\partial Q}{\partial x} \neq 0$
  - **Gradualmente**
    - profundidade e velocidade variáveis com o espaço
  - **Bruscamente** → **Ressalto** → elevação brusca da superfície livre

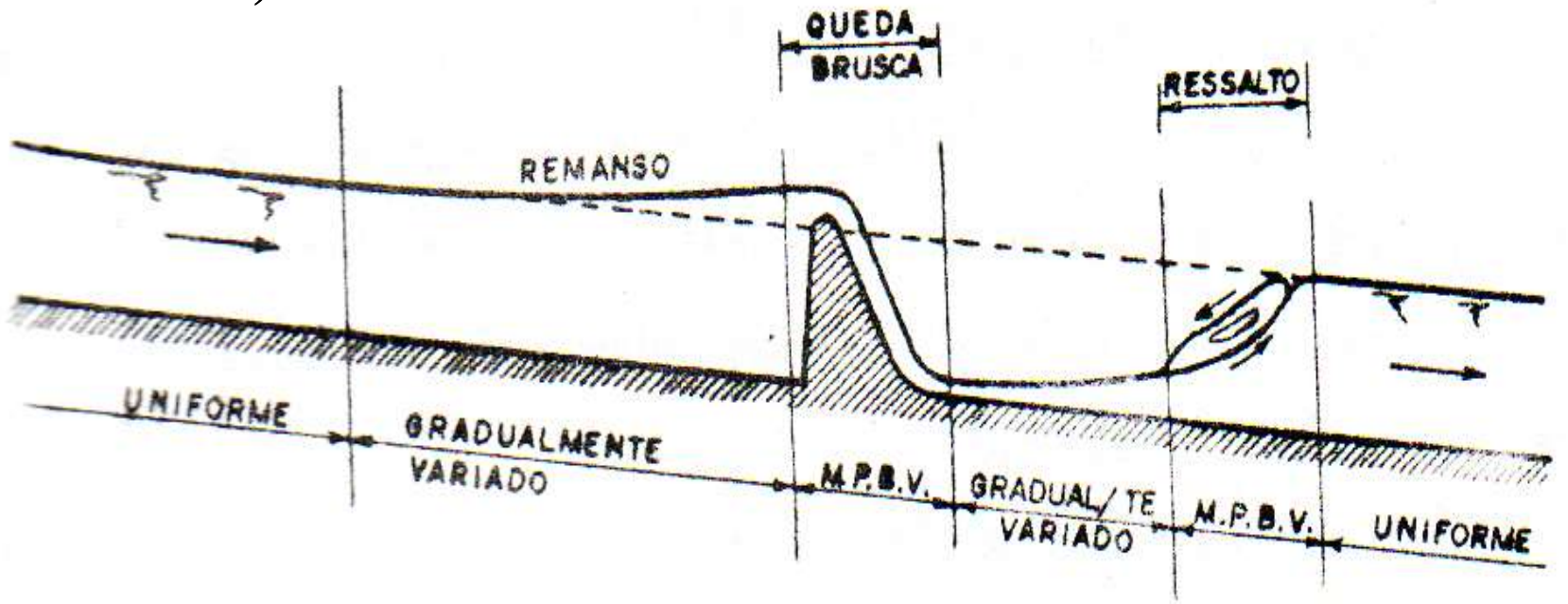
NÃO PERMANENTE $\frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0$

- profundidade e velocidade variáveis com o tempo

- **Movimento Permanente:** O escoamento em canais prismáticos (lados paralelos a um eixo normal ao fundo do canal considerando a sua área transversal) tende a ser permanente em condições normais de operação;
- **Movimento Não-Permanente:** O caminhamento de uma onda de cheia ao longo de rio é um exemplo desse escoamento;

Tipos de Movimento

- **<u>Movimento Uniforme:</u>** Não existem na natureza. Condutos artificiais prismáticos, com seção transversal e declividade constante se aproximam dessa condição. Nesse último caso, o fluxo é considerado **permanente e uniforme**;
- **<u>Movimento Não-Uniforme (Variado):</u>** Ocorrem a uma distância a partir da seção inicial e a uma certa distância da seção final; como também nos ressaltos hidráulicos; e, ondas de cheias (são não-permanentes e não-uniformes).



Regime de Escoamento

- **<u>Número de Reynolds (Re):</u>** é a razão entre as forças de inercia (ρV) e as forças viscosas (μ/R_h), conforme equação abaixo. No caso de condutos livres a dimensão característica do conduto é o seu raio hidráulico (R_h).

$$Re = \frac{\rho V 4 R_h}{\mu} \Rightarrow Re = \frac{V 4 R_h}{\upsilon}$$

$$R_h = \frac{A_m}{P_m} = \frac{\pi D^2/4}{\pi D} = \frac{D}{4}$$

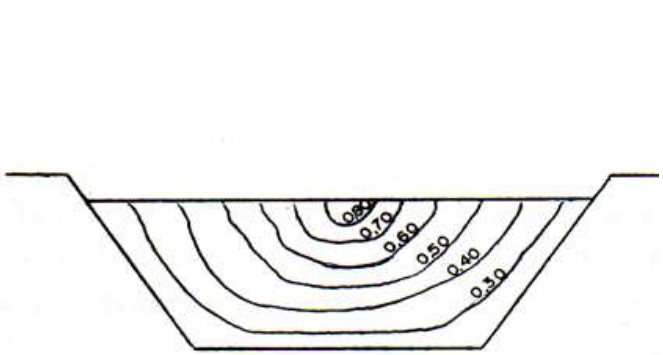
ρ – massa específica do fluido;
V – velocidade média do escoamento;
R_h – dimensão linear do conduto (raio hidráulico);
μ – viscosidade dinâmica do fluido; e,
ν – viscosidade cinemática do fluido.

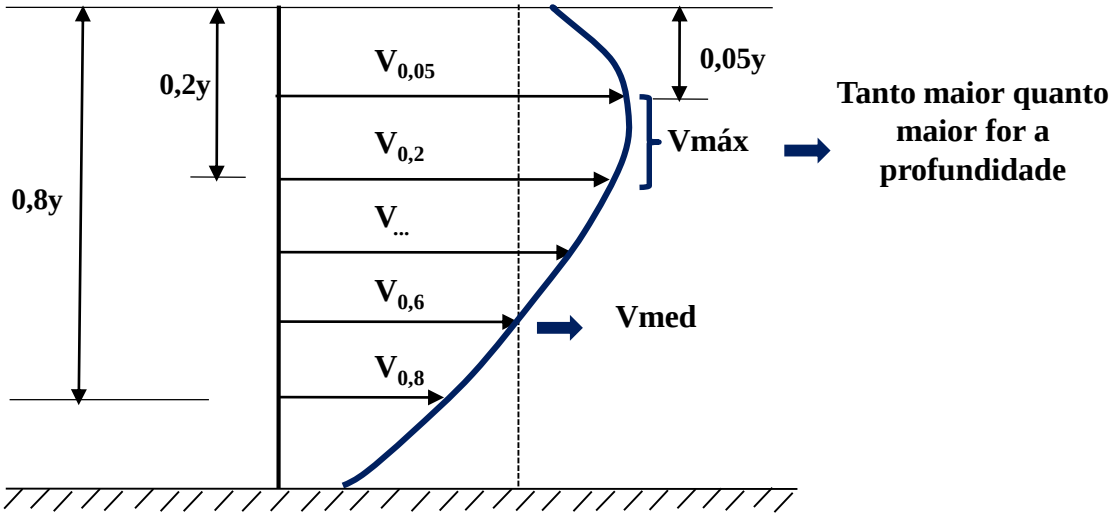
Dados experimentais mostram que:

✓ Re ≤ 500:	Regime Laminar;
✓ 500 < Re < 2000:	Regime de Transição;
✓ Re ≥ 2000:	Regime Turbulento.

Distribuição da velocidade e pressão

- A velocidade adotada nos cálculos será o valor médio. Como visto no capítulo anterior, deve-se lembrar que as velocidades das várias partículas em um canal estão distribuídas de forma aproximadamente parabólica;
- A velocidade máxima ocorre um pouco abaixo da superfície livre devido a efeitos de resistência externa, tanto na superfície (tensão superficial, ventos), como na margem e do fundo;
- A distribuição da velocidade na seção depende da forma geométrica, rugosidade e curvas do canal.





Distribuição da velocidade e pressão

- Devido a grande variação da velocidade a carga cinética deve ser expressa por:

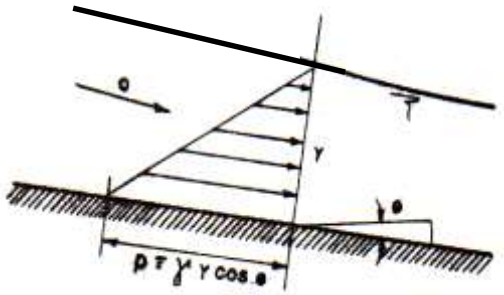
$$\alpha . \frac{V^2}{2.g}$$

α – coeficiente de Coriolis (1,0 – 1,36 (1,1)), adm;
Obs: na prática adota-se o valor unitário (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

- Quanto a distribuição de pressão: A distribuição de pressão é considerada hidrostática para escoamento uniforme e declividade pequena (≈ 0,01 m m^{-1}), e, gradualmente variado. Nessas condições o paralelismo das linhas de corrente não é influenciado por acelerações normais ao fluxo devido a força centrífuga.

Incremento linear da pressão com a profundidade.

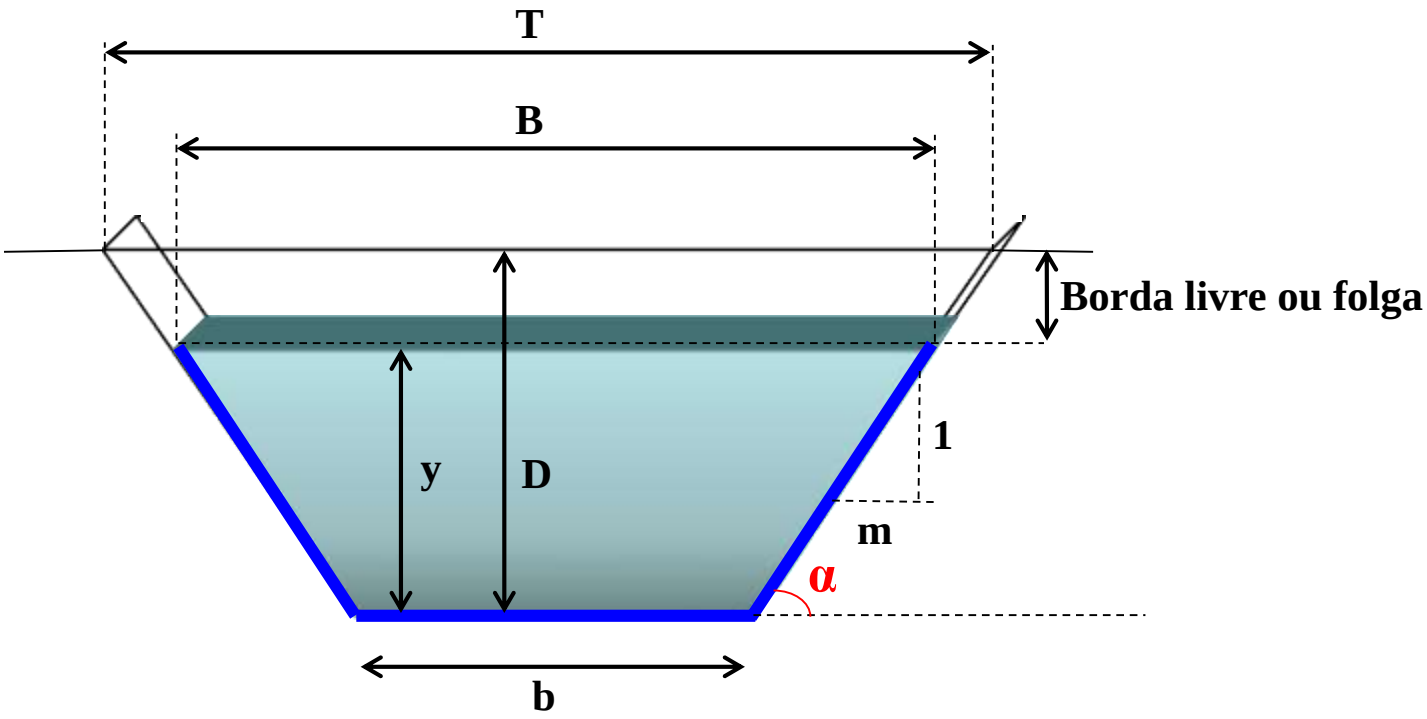
Considera-se **P/γ = y**.



Nesse caso a equação de energia total seria: $H = y + \alpha \frac{V^2}{2g} + Z$

Elementos geométricos de um canal

Os principais elementos geométricos serão descritos de acordo com as informações apresentadas na Figura abaixo.



T – largura do topo do canal; **B** – largura da superfície livre da água; **D** – profundidade total do canal; **y** – profundidade de escoamento; **b** – largura do fundo do canal; **α** – ângulo de inclinação do talude; **m** – cotangente do ângulo α.

Elementos geométricos de um canal

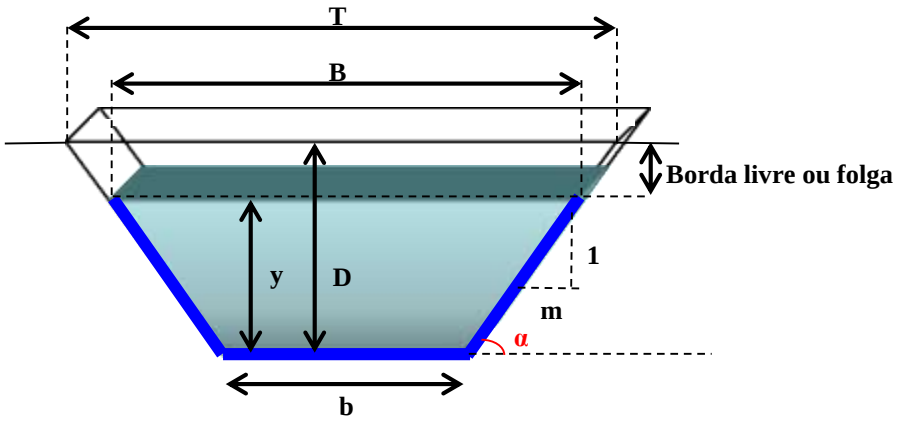
Área transversal do canal: corresponde a seção plena do canal, normal a direção do escoamento.

Área molhada (A): é a parte da seção transversal ocupada pelo líquido (água).

Perímetro molhado (P): trata-se da soma dos comprimentos relativos ao fundo e aos taludes que estão em contato direto com o líquido (água). **Não abrange** a superfície livre da água (B).

Raio hidráulico (R_h): é a razão entre a área molhada e o perímetro molhado. É a dimensão característica dos canais abertos, assim como o diâmetro interno nos tubos é para o escoamento forçado.

Borda livre (B): corresponde a distância entre o nível d' água e o topo do canal (B = D – y).

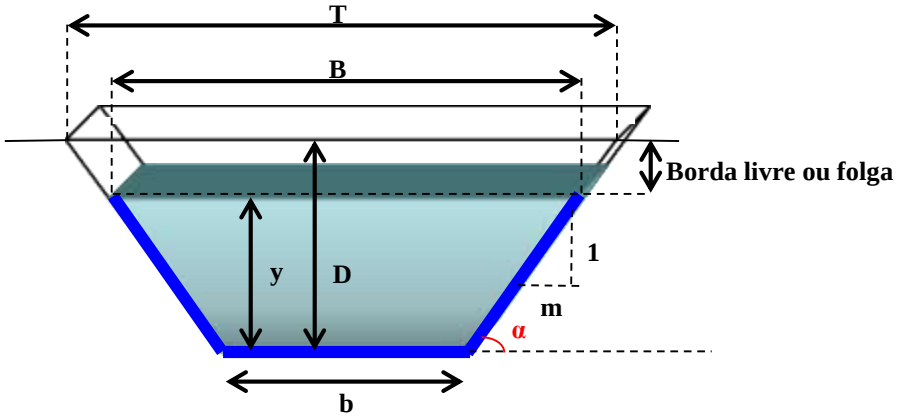


Elementos geométricos de um canal

Inclinação do talude: dado pelo valor de α ou pela relação 1 : m.

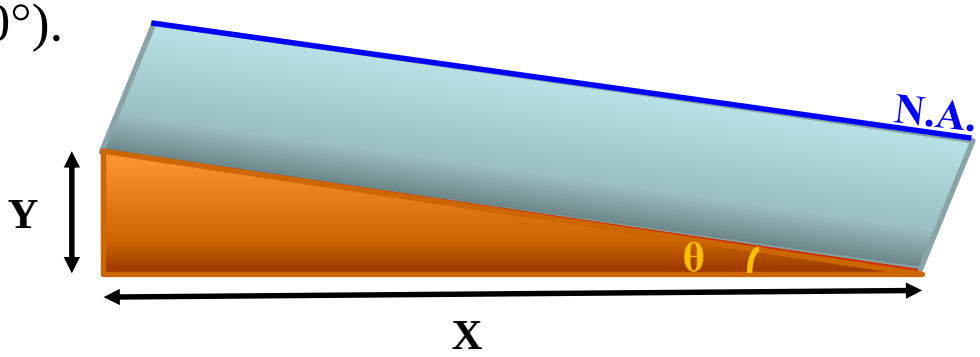
$$\tan\alpha = \frac{Dist.vertical}{Dist.horizontal}$$

$$\cot\alpha = \frac{Dist.horizontal}{Dist.vertical} = m$$



Utilizando a calculadora comum, lembre-se: $\cot\alpha = \frac{1}{\tan\alpha} \therefore m = \frac{1}{\tan\alpha}$

Declividade do canal (I ou S): para canais de irrigação e de drenagem de pequenas dimensões, os valores usuais variam de 0,1% a 0,4%. Segundo Azevedo Netto et al. (1998) a declividade do canais é relativamente pequena (θ << 10°).



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

Equação fundamental do escoamento uniforme

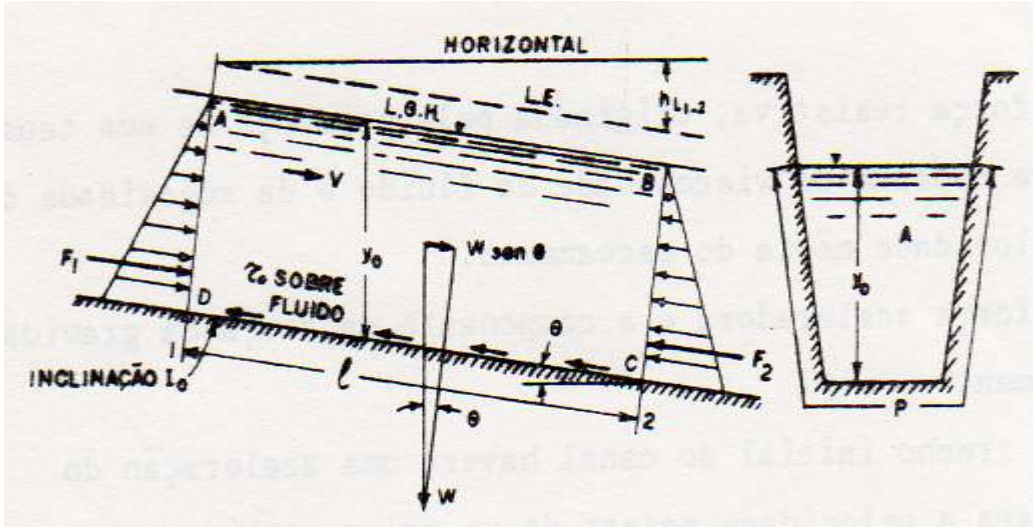
Trata-se de uma equação de resistência ao escoamento, relacionando a perda de carga com a velocidade média, por meio do parâmetro de rugosidade.

Admitindo-se um canal prismático de pequena declividade, suficientemente longo, para que exista o escoamento uniforme. Tem-se as forças atuantes:

(a) Força de resistência: tensão de cisalhamento gerada pela viscosidade do fluido e pela rugosidade das paredes do canal; (depende da velocidade);

(b) Força de aceleração: devido a aceleração da gravidade e declividade do canal.

Condição de equilíbrio dinâmico



Equação de Chezy

A Equação de Antoine Chezy (1769), também conhecida como Equação Fundamental do Escoamento Uniforme, é expressa da seguinte forma:

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}}\sqrt{R_h I}$$

Equação de Antoine Chezy (1769)

Eq. Fund. do Escoam. Uniforme

$$V = C\sqrt{R_h I}$$

C – coeficiente de Chezy, $L^{0,5}T^{-1}$.

$$Q = CA\sqrt{R_h I}$$

Limitação: considera a rugosidade como função da natureza e estado das paredes do canal, não levando em conta as dimensões geométricas da área molhada.

Equação de Manning

A fórmula de Robert Manning surgiu em 1889, e é amplamente utilizada devido a sua simplicidade de aplicação e excelentes resultados práticos (PERES, 2006).

A equação de Manning é baseada na anterior, porém com uma alteração no coeficiente C:

$$C = \frac{R_h{}^{1/6}}{n} \quad (1)$$

n – coeficiente de rugosidade de Manning (tabelado), $LT^{-1/3}$.

Substituindo C na equação de Chezy, tem-se:

Equação de Manning ⟵

$$V = \frac{1}{n} R_h{}^{2/3} I^{1/2} \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{n} A R_h{}^{2/3} I^{1/2} \quad (3)$$

V – velocidade média, m s^{-1};
R_h – raio hidráulico, m;
I – declividade da linha de energia, m m^{-1};

Autores como Ganguillet & Kütter e Bazin também desenvolveram fórmulas empíricas para a estimativa de C, podendo ser observadas em manuais de hidráulica.

Equação de Manning

Alguns valores do coeficiente de rugosidade de Maninng (*n*):

Natureza da Parede	Estado da parede			
	Perf.	Bom	Reg.	Mau
Cimento liso	0,010	0,011	0,012	0,013
Argamassa de cimento	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueduto de madeira aparelhada	0,010	0,012	0,012	0,014
Aqueduto de madeira não aparelhada	0,011	0,013	0,014	0,015
Canais revestidos de concreto	0,012	0,014	0,016	0,018
Pedras brutas rejuntadas com cimento	0,017	0,020	0,025	0,030
Pedras não rejuntadas	0,025	0,030	0,033	0,035
Pedras talhadas	0,013	0,014	0,015	0,017
Paredes metálicas, lisas e semi-circulares	0,011	0,012	0,028	0,030
Paredes de terra, canais retos e uniformes	0,017	0,020	0,023	0,030
Paredes de pedra lisa em canais uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Paredes rugosas de pedras irregulares	0,035	0,040	0,045	--
Canais de terra com grandes meandros	0,023	0,025	0,028	0,030
Canais de terra dragados	0,025	0,028	0,030	0,033
Canais com leito de pedras rugosas e com vegetação	0,025	0,030	0,035	0,040
Canais com fundo de terra e com pedras nas margens	0.028	0.030	0.033	0.035

CARVALHO (2011).

Tabela 8.1. Coeficientes de rugosidade de Manning (n)

Tipo de Canal	Valores de n		
	Mínimo	Normal	Máximo
a) Tubo parcialmente cheio			
.Aço soldado	0,010	0,012	0,014
.Ferro fundido revestido	0,010	0,013	0,014
.Metal corrugado	0,021	0,024	0,030
.Bueiro de concreto bem acabado	0,011	0,012	0,014
.Tubo de concreto liso	0,012	0,013	0,014
.Manilha vitrificada	0,011	0,014	0,017
.Manilha de drenagem	0,011	0,013	0,017
b) Canal aberto revestido			
.Aço plano e liso	0,011	0,012	0,014
.Madeira aplainada	0,010	0,012	0,014
.Madeira não aplainada	0,011	0,013	0,015
.Cimento liso	0,010	0,011	0,013
.Concreto bem acabado	0,011	0,013	0,015
.Concreto não acabado	0,014	0,017	0,020
.Alvenaria de tijolos	0,012	0,015	0,018
.Alvenaria de cacos cerâmicos	0,017	0,025	0,030
.Asfalto liso		0,013	
.Asfalto rugoso		0,016	
.Grama		0,200	
c) Canal aberto não revestido			
c1) Canal escavado em terra			
.Reto e uniforme, limpo	0,016	0,018	0,020
.Reto e uniforme, com vegetação baixa	0,022	0,027	0,033
.Sinuoso, vagaroso, limpo	0,023	0,025	0,030
.Sinuoso, vagaroso, com vegetação baixa	0,025	0,030	0,033
.Cascalhado, reto e uniforme, limpo	0,022	0,025	0,030
.Dragado, limpo	0,025	0,028	0,033
c2) Canal escavado em rocha			
.Liso e uniforme	0,025	0,035	0,040
.Recortado e com saliências, irregular	0,035	0,040	0,050
d) Canais naturais			
.Reto, limpo, sem represamento	0,025	0,030	0,033
.Sinuoso, limpo, com pouco represamento	0,033	0,040	0,045
.Vagaroso, com vegetação rasteira	0,050	0,070	0,080
.Planície de inundação, pastagem	0,025	0,030	0,035
.Idem, com poucos arbustos e árvores	0,035	0,050	0,060

Fonte: CHOW (1959)

PERES (2006).

Equação de Manning

Observações importantes:

No processo de seleção do coeficiente de rugosidade ***n*** deve-se ter conhecimento de que a velocidade de escoamento do canal é inversamente proporcional ao coeficiente ***n***, ou seja, quanto maior o seu valor, menor será a velocidade média do escoamento e, consequentemente, maiores as dimensões do canal e seus custos de instalação e manutenção (PERES, 2006).

O coeficiente n pode ser escrito em função do coeficiente de atrito f de Darcy-Weisbach, conforme a equação abaixo:

$$n = \sqrt{\frac{f}{8g}} R_h{}^{1/6}$$

A fórmula de Manning é válida somente para condição de fluxo turbulento completo, cuja condição é verificada pela relação proposta por CHIN (2000).

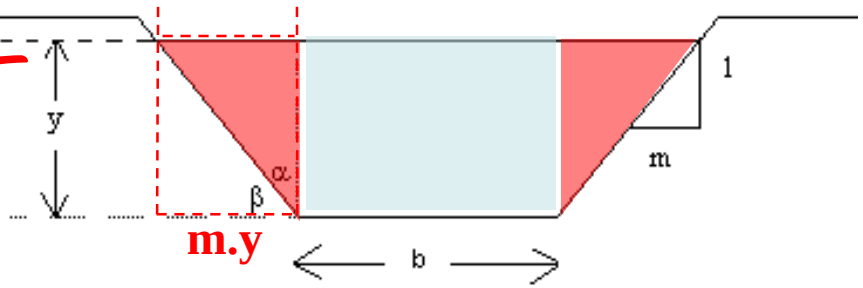
$$n^6 \sqrt{R_h I} \geq 1{,}1.\,10^{-13}$$

Caso essa condição não se verifique a velocidade média do escoamento deve ser determinada pela equação de Darcy-Weisbach (que será vista em Condutos Forçados).

Formas geométricas mais utilizadas em canais

(a) Seção trapezoidal:

É a mais popular por algumas razões, dentre elas destaca-se: hidraulicamente eficiente por apresentar área molhada grande em relação ao perímetro molhado; ângulo do talude pode ser ajustado conforme a estabilidade do material utilizado.



$$A = yb + (y\,.\,my)$$

$$A = yb + (my^2)$$

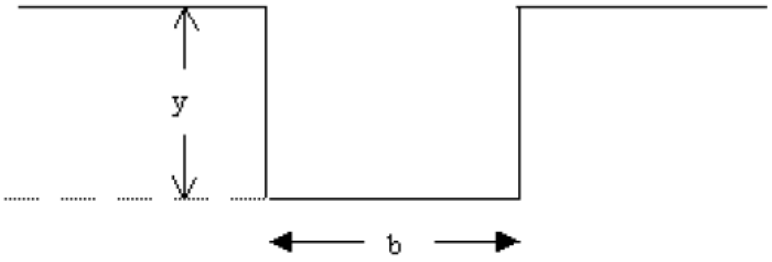
$$A = y(b + my) \qquad P = b + 2y\sqrt{1 + m^2} \qquad R_h = \frac{y(b + my)}{b + 2y\sqrt{1 + m^2}}$$

2 faces inclinadas

Formas geométricas mais utilizadas em canais

(b) Seção retangular:

É um caso especial do canal trapezoidal, no qual α = 90°. Como cotan 90° = 0, logo, m = 0, de modo que as formulas anteriores passam a ser:



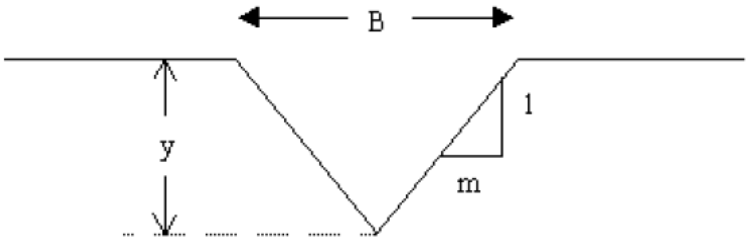
$$A = yb$$

$$P = b + 2y$$

$$R_h = \frac{yb}{b + 2y}$$

(c) Seção triangular:

Também é um caso especial do canal trapezoidal, no qual b = 0. As formulas anteriores passam a ser:



$$A = my^2$$

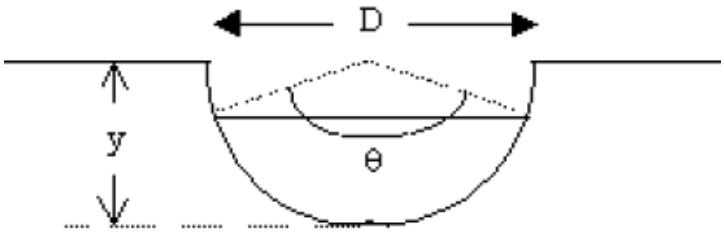
$$P = 2y\sqrt{1 + m^2}$$

$$R_h = \frac{my^2}{2y\sqrt{1 + m^2}}$$

Formas geométricas mais utilizadas em canais

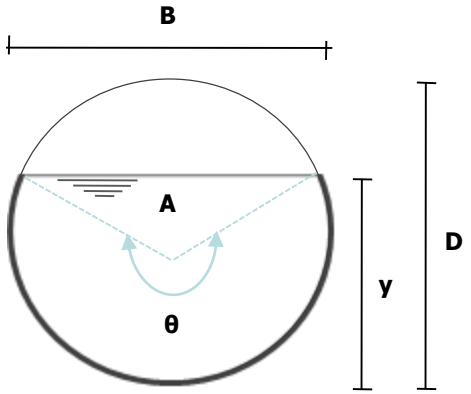
(d) Seção circular e semicircular:

São as que apresenta o menor P e o maior R_h por unidade de A. São, por isso as seções econômicas ideais.



$$A = \frac{\pi D^2}{8} \qquad R_h = \frac{D}{4}$$

$$P = \frac{\pi D}{2} \qquad B = D = 2y$$

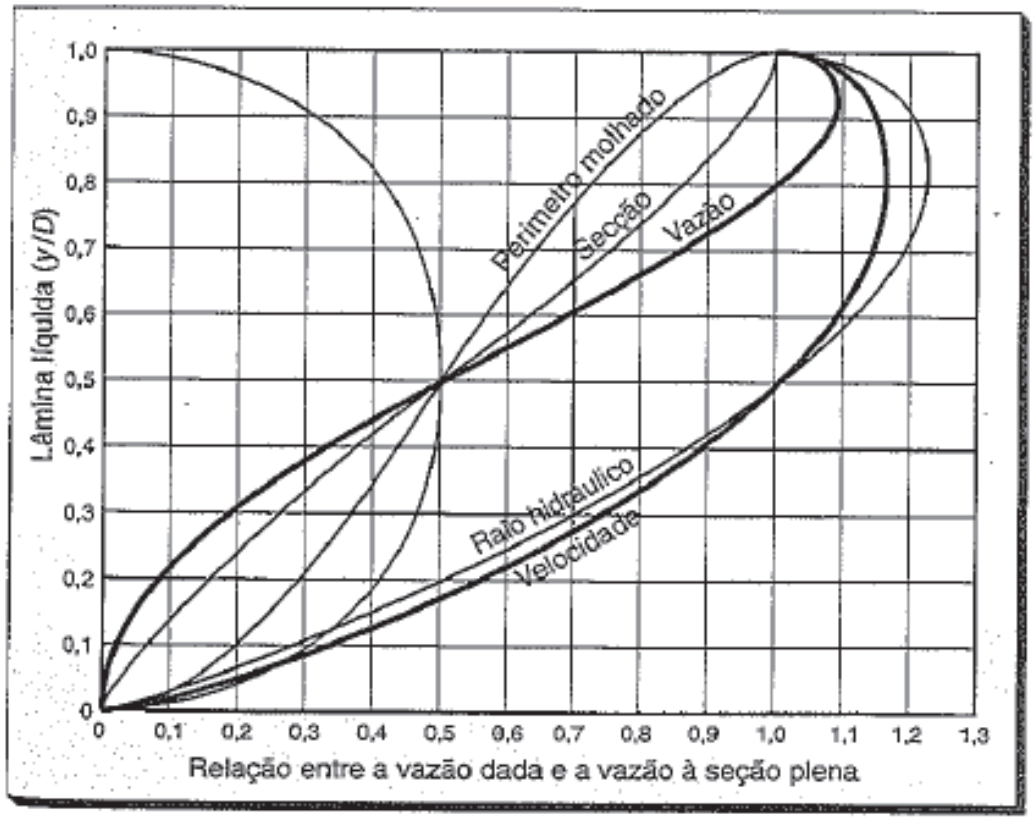


$$A = \frac{D^2(\theta - sen\theta)}{8} \qquad R_h = \frac{D^2(\theta - sen\theta/\theta)}{4}$$

$$P = \theta\frac{D}{2} \qquad B = D\frac{sen\theta}{2}$$

Formas geométricas mais utilizadas em canais

(d) Seção circular:



Observa-se que para o elemento velocidade existe um máximo para y = 0,81D.

Nota-se também a maior vazão que se pode conseguir ocorre quando y = 0,95D.

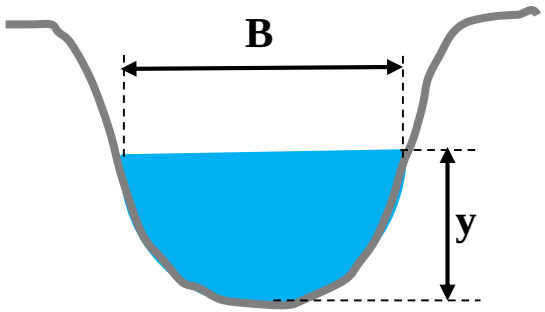
Quando o enchimento é completo do conduto, maior é a resistência ao escoamento.

Figura. Elementos hidráulicos da seção circular.

Formas geométricas mais utilizadas em canais

(e) Seção parabólica:

Utilizado principalmente em terraços agrícolas.



$$A = \frac{2}{3} By$$

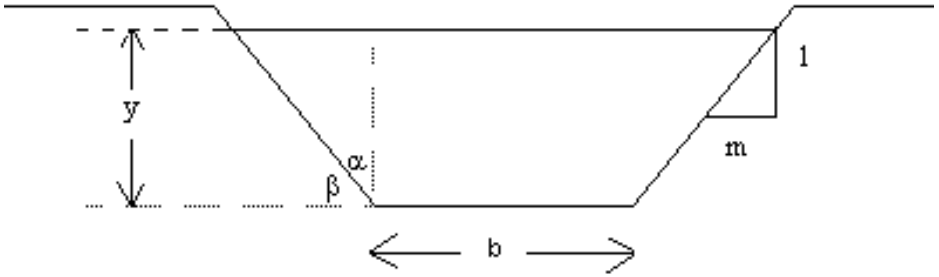
$$P = B + \frac{8}{3}\frac{h^2}{B}$$

$$R_h = \frac{\frac{2}{3} By}{B + \frac{8}{3}\frac{h^2}{B}}$$

Equação de Manning e formas geométricas

Exemplo 1: Determine a velocidade média de escoamento e a vazão de um canal trapezoidal com as seguintes características: I = 1 m em 1500 m; inclinação do talude = 1 (vertical): 1,5 (horizontal); b = 3,5 m; e, y =1,2 m.

a) Considere o canal com paredes de terra, reto, uniforme e limpo;
b) Considere o canal com paredes revestidas de concreto bem acabado.

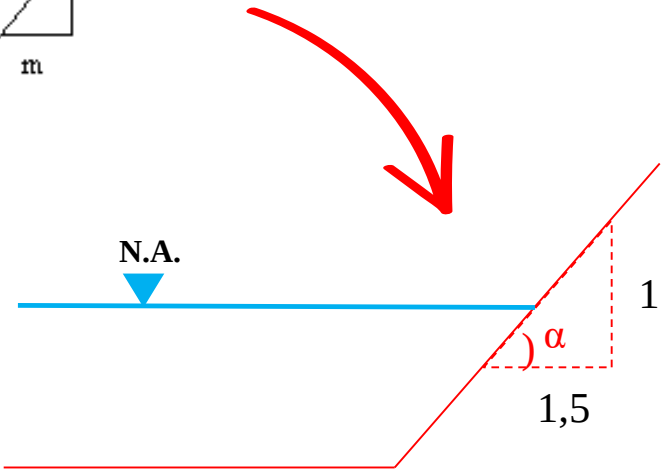


Observação:

$$\cot\alpha = m$$

$$\frac{1}{\tan\alpha} = m \rightarrow \tan\alpha = \frac{1}{m} \rightarrow \alpha = arc\ tan\frac{1}{m}$$

$$\alpha = arc\tan\frac{1}{1{,}5} \cong 33{,}7° \cong 34°$$



Equação de Manning e formas geométricas

Exemplo 1: Determine a velocidade média de escoamento e a vazão de um canal trapezoidal com as seguintes características: I = 1 m em 1500 m; inclinação do talude = 1 (vertical): 1,5 (horizontal); b = 3,5 m; e, y =1,2 m.

Dados Gerais para resolução:

1. $I = \frac{1\,m}{1500\,m} \cong 0{,}00067\,m\,m^{-1} \rightarrow 0{,}00067\frac{m}{m}\,.100 = 0{,}067\%$

$\rightarrow 0{,}00067\frac{m}{m}\,.1000 = 0{,}67‰$

2. $\mathrm{m} = \cot\alpha = \frac{1{,}5}{1{,}0} = 1{,}5$

3. $A = y(b + my) = 1{,}2.(3{,}5 + 1{,}5.1{,}2) = 6{,}36\,m^2$

$P = b + 2y\sqrt{1 + m^2} = 3{,}5 + 2\,.\,1{,}2\,.\sqrt{1 + 1{,}5^2} = 7{,}83\,m$

$Rh = \frac{A}{P} = \frac{6{,}36\,m^2}{7{,}83\,m} = 0{,}81\,m$

Equação de Manning e formas geométricas

Exemplo 1: Determine a velocidade média de escoamento e a vazão de um canal trapezoidal com as seguintes características: I = 1 m em 1500 m; inclinação do talude = 1 (vertical): 1,5 (horizontal); b = 3,5 m; e, y =1,2 m.

a) Considere o canal com paredes de terra, reto, uniforme e limpo:

Pela tabela de coeficiente de rugosidade de Manning (n), pode-se encontrar para a condição do item a, o valor de n = 0,018.

Observação: pode-se aplicar a Equação de Manning para resolver o problema em questão???

Aplicando-se a equação de CHIN (2000), tem-se que

$$n^6\sqrt{R_h I} \geq 1{,}1.10^{-13} \rightarrow (0{,}018)^6 .\sqrt{0{,}81 . 0{,}00067} = 7{,}9x10^{-13} > 1{,}1x10^{-13}$$

OK!!!

$$V = \frac{1}{n}.Rh^{2/3}.I^{1/2} \rightarrow V = \frac{1}{0{,}018}.(0{,}81)^{2/3}.(0{,}00067)^{1/2} = 1{,}25\ m\ s^{-1}$$

$$Q = A.V = 6{,}36m^2.1{,}25\frac{m}{s} = 7{,}95\ m^3s^{-1}$$

Equação de Manning e formas geométricas

Exemplo 1: Determine a velocidade média de escoamento e a vazão de um canal trapezoidal com as seguintes características: I = 1 m em 1500 m; inclinação do talude = 1 (vertical): 1,5 (horizontal); b = 3,5 m; e, y =1,2 m.

b) Considere o canal com paredes revestidas de concreto bem acabado:

Pela tabela de coeficiente de rugosidade de Manning (n) → n = 0,013.

Observação: pode-se aplicar a Equação de Manning???

$$n^6\sqrt{R_h I} \geq 1{,}1.10^{-13} \rightarrow (0{,}013)^6 .\sqrt{0{,}81 . 0{,}00067} = 1{,}2x10^{-13} > 1{,}1x10^{-13}$$

OK!!!

$$V = \frac{1}{n}.Rh^{2/3}.I^{1/2} \rightarrow V = \frac{1}{0{,}013}.(0{,}81)^{2/3}.(0{,}00067)^{1/2} = 1{,}73\ m\ s^{-1}$$

$$Q = A.V = 6{,}36m^2.1{,}25\frac{m}{s} = 11{,}0\ m^3s^{-1}$$

Observa-se que com o revestimento a vazão transportada aumentou ***38,5%***, e ainda teria como benefício a redução de custo perda de água com infiltração ao longo do escoamento da água no canal, e, energia utilizada no bombeamento. Por outro lado, ressalta-se que o custo de implantação do revestimento pode ser elevada.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DISCIPLINA: IT 503 – FUNDAMENTOS DE HIDRÁULICA

Escoamento em Condutos Livres

Prof. Dr. Conan Ayade Salvador

Seropédica - RJ, 24/05/2023

Seção hidráulica de máxima eficiência

Para canais artificiais, tendo-se o coeficiente de Manning, a declividade e a vazão, o projetista pode minimizar a área da seção transversal A. Se A for mínimo, V deve ser máximo e pela equação de Chezy-Manning chega-se que o raio hidráulico deve ser máximo, ou seja, deve-se minimizar o perímetro molhado para uma dada área.

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} I^{1/2} \quad \rightarrow \quad \uparrow V = C \uparrow R_h^{2/3} \quad \rightarrow \quad \uparrow R_h = \frac{A}{\downarrow P}$$

Essas seções também são denominadas de **mínimo custo**. Contudo, condições topográficas e de tipo solo, e as práticas construtivas e de manutenção podem limitar a sua adoção. Pode ser verificado:

- Velocidade maior que a permitida pela natureza das paredes do canal, levando a erosão;
- Profundidades elevadas, o que dificulta sua implantação e manutenção.

Seção hidráulica de máxima eficiência

De forma similar são realizadas as deduções para as demais formas geométricas, obtendo-se os parâmetros hidráulicos apresentados abaixo.

Seção do Canal	**Largura do fundo (b)**	**Área molhada (A)**	**Perímetro molhado (P)**	**Raio Hidráulico (R_h)**
Retangular	2y	$2y^2$	4y	0,50y
Trapezoidal ($\alpha = 60°$; m =0,577)	1,15 y	$1,73y^2$	3,46y	0,50y
Semicircular	-------	$1,57y^2$	3,14y	0,50y
Triangular ($\theta = 90°$)	-------	y^2	2,82 y	0,35y

Adaptado de PERES (2006).

Tipos de problemas determinados em canais:

1º) Conhecendo m, I, A e Rh, calcular Q (resolução direta):

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

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

Exemplo: Saber qual deverá ser a declividade do canal.

3º) Conhecendo Q, m e I, calcular A e Rh (solução iterativa ou por tentativas).

Exemplo: Definir os parâmetros geométricos do canal (y e b), ou seja, é o problema de dimensionamento geométrico do canal

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} I^{1/2} \quad \Rightarrow \quad \frac{nQ}{\sqrt{I}} = A R_h^{2/3}$$

constante ***?***

Considerando problemas do tipo 3:

Variáveis definidas

A vazão de interesse (**Q**) é conhecida pelo projetista. Com isso, utilizando-se tabelas que relacionam a vazão com a declividade recomendada, obtém-se a declividade do canal (**I**). O tipo de solo permitirá que se conheça a inclinação recomendada para os taludes do canal (**m**).

Variáveis indefinidas

São duas variáveis indefinidas nesse tipo de problema (**y e b**). São disponíveis na literatura diferentes métodos para resolver esse problema. A seguir será abordado:

a) método das tentativas;

b) método gráfico; e,

c) método aplicado a seção de máxima eficiência.

a) Método das tentativas:

Para resolver esse problema fixa-se uma das variáveis e trabalha-se com a outra, por meio de tentativa, até que se obtenha a vazão desejada.



Definição de b: em função da largura da caçamba da retroescavadeira;
Definição de y: em função de profundidade do solo (solos rasos).

Aplica-se a equação de Manning e a equação da continuidade, para calcular qual será a vazão com os valores assumidos. Para facilitar os cálculos, recomenda-se utilizar o seguinte tipo de quadro:

b	y	A	P	Rh	$Rh^{2/3}$	$I^{1/2} / n$	V	Q'	Q'=Q ?
...	...	...	...	...	...	...	...	...	....

Se o valor de velocidade for maior que o limite não-erosivo, mudanças deverão ser realizadas de modo a reduzir a velocidade média (aumentar P ou reduzir I).

Exemplo 2: Dimensione um canal retangular revestido com cimento liso (n = 0,013), que transporta uma vazão de 0,2 $m^3\ s^{-1}$, possui uma declividade de 0,4‰. Considere a base do canal igual a 1 m.

Dados :

$$I = 0{,}4\ ‰ = \frac{0{,}4\ m}{1000\ m} \cong 0{,}0004\ m\ m^{-1}$$

b	y	A	P	Rh	$Rh^{2/3}$	$I^{1/2}$	V	Q'	Q'=Q ?
(m)	(m)	(m^2)	(m)	(m)	($m^{2/3}$)	$(m/m)^{1/2}$	(m s^{-1})	($m^3\ s^{-1}$)	-------
1	1	1,0	3,0	0,333	0,481	0,02	0,739	0,739	0,739 ≠ 0,2

Em vermelho, apresenta-se variáveis que permanecerão constantes nas tentativas.

Deve-se considerar 3 ou 4 casas decimais para o Rh.

$$A = yb = 1\ m\ x\ 1\ m = 1\ m^2$$

$$P = b + 2y = 1\ \text{m} + 2\ \text{x}\ 1\ \text{m} = 3\ \text{m}$$

$$R_h = \frac{yb}{b + 2y} = \frac{1\ m^2}{3\ m} = 0{,}333\ m$$

$$R_h{}^{2/3} = (0{,}333\ m)^{2/3} = 0{,}481\ m^{2/3}$$

$$I^{2/3} = (0{,}0004\ m\ m^{-1})^{1/2} = 0{,}02(m/m)^{1/2}$$

$$V = \frac{1}{0{,}013}\ .\ 0{,}481\ .\ 0{,}02 = 0{,}74\ m\ s^{-1}$$

$$Q = A\ .\ V = 1\ m^2\ .\ 0{,}74\ m\ s^{-1} = 0{,}739\ m^3 s^{-1}$$

Exemplo 2: Dimensione um canal retangular revestido com cimento liso (n = 0,013), que transporta uma vazão de 0,2 $m^3\ s^{-1}$, possui uma declividade de 0,4‰. Considere a base do canal igual a 1 m.

Dados :

b	y	A	P	Rh	$Rh^{2/3}$	$I^{1/2}$	V	Q'	Q'=Q ?
(m)	(m)	(m^2)	(m)	(m)	($m^{2/3}$)	$(m/m)^{1/2}$	(m s^{-1})	($m^3\ s^{-1}$)	-------
1	1	1,0	3,0	0,333	0,481	0,02	0,739	0,739	0,739 ≠ 0,2
1	0,5	0,5	2,0	0,250	0,397	0,02	0,610	0,305	0,305 ≠ 0,2
1	0,3	0,3	1,6	0,188	0,327	0,02	0,504	0,151	0,151 ≠ 0,2
1	0,37	0,37	1,74	0,213	0,356	0,02	0,548	0,203	0,203 ≅ 0,2

Como a vazão obtida foi **maior** do que a desejada, deve-se **diminuir** o valor do y.

Como a vazão obtida foi **menor** do que a desejada, deve-se **aumentar** o valor do y.

OK!!!

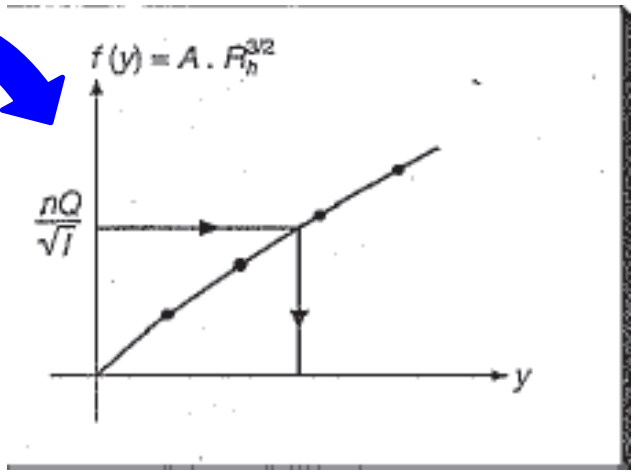
b) Método gráfico:

Isolando-se os parâmetros conhecidos do canal obtém-se a equação abaixo. Observa-se que, fixando b, o segundo termo varia em função de y.

$$\frac{nQ}{\sqrt{I}} = AR_h{}^{2/3} \quad (1) \quad \Rightarrow \quad f(y) = AR_h{}^{2/3} \quad (2)$$

Utiliza-se uma tabela em que P e A são funções de y.

Y (m)	A (m^2)	P (m)	Rh (m)	f (y) = $AR_h^{2/3}$
...	...	...	...	....



Permite alterar os parâmetros Q, n e I, desde que sejam mantidos inalterados os parâmetros geométricos do canal b e m.

c) Método aplicado a seção de máxima eficiência:

No caso de seções econômicas, a solução é explícita mesmo quando se deseja conhecer os valores de y e b, pois as equações de área molhada e raio hidráulico são funções somente de y.

Como exemplo, substituindo as equações de área e raio hidráulico, para canais trapezoidais, na equação de Chezy-Manning, tem-se:

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{\,2/3} I^{1/2} \qquad (1)$$

$$Q = \frac{1}{n} y^2 (2\sqrt{m^2+1} - m) \left(\frac{y}{2}\right)^{2/3} I^{1/2}$$

$$Q = \frac{1}{n} \frac{(2\sqrt{m^2+1} - m)}{2^{2/3}} I^{1/2} y^{8/3} \qquad (2)$$

conhecido

Exemplo 3: Projeta-se um canal trapezoidal não revestido, em um solo argiloso e compactado (n = 0,020). A vazão prevista é de 5 $m^3\ s^{-1}$ e a declividade de 1 m km^{-1}. Dimensione o canal tendo como critério ser de seção hidráulica de máxima eficiência. Comente o resultado encontrado.

Dados :

$$I = 1\ m\ km^{-1} = 1\ ‰ = \frac{1\ m}{1000\ m} \cong 0{,}001\ m\ m^{-1}$$

Para um canal de máxima eficiência hidráulica tem-se que: $\alpha = 60^{\circ} \rightarrow m = 0{,}577$

$$b = 1{,}15.y \qquad A = 1{,}73y^2 \qquad R_h = 0{,}5y$$

Aplicando na Equação de Manning:

$$V = \frac{1}{n}.{R_h}^{2/3}.I^{1/2} \rightarrow V = \frac{1}{0{,}020}.(0{,}5y)^{2/3}.(0{,}001)^{1/2}$$

$$V = 1y^{2/3}$$

Como: $Q = A\,.V$ e $A = 1{,}73y^2$ $\rightarrow$ Portanto: $Q = 1{,}73y^2.y^{2/3}$

$$Q = 1{,}73y^{8/3}$$

PERES (2006)

Exemplo 3: Projeta-se um canal trapezoidal não revestido, em um solo argiloso e compactado (n = 0,020). A vazão prevista é de 5 $m^3\ s^{-1}$ e a declividade de 1 m km^{-1}. Dimensione o canal tendo como critério ser de seção hidráulica de máxima eficiência. Comente o resultado encontrado.

Portanto: $Q = 1{,}73y^{8/3}$

Substituindo-se a vazão, tem-se que: $5 = 1{,}73y^{8/3} \rightarrow y = \left(\frac{5}{1{,}73}\right)^{3/8} = 1{,}49\ m$

Com o valor de y, determina-se a base e verifica-se se a velocidade média de escoamento é erosiva.

$$b = 1{,}15.y = 1{,}15\ .\ 1{,}49\ m = 1{,}71\ m$$

$$V = 1y^{2/3} = (1{,}49)^{2/3} \cong 1{,}30\ m\ s^{-1}$$

A velocidade média do escoamento > velocidade máxima permitida para o tipo de material empregado (0,8 < V < 1,2 m/s). A utilização dessa seção de escoamento provavelmente levará a erosão do leito do canal.

PERES (2006)

Velocidade de escoamento em canais

As dimensões dos canais está diretamente ligada a velocidade média de escoamento. A utilização de velocidades altas é limitada pela capacidade das paredes e fundo do canal resistirem as forças erosivas. Por outro lado velocidades baixas implicam na deposição de material em suspensões e/ou aparecimento de plantas aquáticas.

Tabela 1. Velocidade média mínima de escoamento permitida em canais.

Material em suspensão	Velocidade mínima (m s^{-1})
Água com material fino em suspensão	0,30
Água com areia fina em suspensão	0,45
Água de esgoto	0,60
Águas pluviais	0,75

Fonte: AZEVEDO NETTO et al. (1998).

Em canais para irrigação velocidades de escoamento da ordem de 0,6 a 0,9 m s^{-1} evitam assoreamento e crescimento de vegetação no canal (PERES, 2006).

Velocidade de escoamento em canais

Tabela 2. Velocidade média máxima de escoamento permitida em canais, para situações mais encontradas na prática.

Material do canal	Velocidade máxima (m s^{-1})	
	Água limpa	Água com sedimentos
Areia fina	0,45	0,75
Franco arenoso	0,55	0,75
Franco siltoso	0,60	0,90
Argila compacta	0,80	1,20
Cascalho fino	0,75	1,50
Cascalho grosso	1,20	1,80
Rocha	2,40 – 2,50	
Concreto	4,50 – 6,00	

Fonte: CHOW (1959) apud PERES (2006).

Declividades recomendadas para canais

A velocidade é função da declividade. Em consequência, os limites estabelecidos para a velocidade, decorrem em limites para a declividade.

Tabela 3. Declividade de canais em função da sua utilização.

Tipo de uso	Declividade (m m^{-1})
Canais de navegação	até 0,00025
Canais industriais	0,0004 a 0,0005
Canais de irrigação: pequenos	0,0006 a 0,0008
grandes	0,0002 a 0,0005
Aquedutos de água potável	0,00015 a 0,001

Fonte: AZEVEDO NETTO et al. (1998).

Tabela 4. Declividade para canais em função da sua capacidade.

Capacidade do canal (m^3 s^{-1})	Declividade (‰)
Canais grande ($Q \geq 10$)	0,10 – 0,30
Canais médios ($3 \leq Q < 10$)	0,25 – 0,50
Canais pequenos ($0,1 \leq Q < 3$)	0,50 – 1,00
Canais muito pequenos ($Q < 0,1$)	1,00 – 4,00

Fonte: PERES (2006).

Declividades recomendadas para canais

Casos particulares:



Curvas podem ser necessárias para adaptação ao relevo do terreno.



Degraus podem ser necessários para terrenos com declividade natural do terreno acentuada.

Inclinação recomendadas para os taludes de canais

A estabilidade dos taludes de um canal depende do material empregado em sua construção. Outros fatores como método de construção e perda de água por infiltração, também afetam a sua escolha.

Recomenda-se construí-los o mais íngreme possível (o que limita-se por características espaciais).

Tabela 5. Inclinação para taludes em função do material do canal.

Tipo de material	Inclinação (vertical: horizontal)
Rocha firme	1:0 a 1:0,25
Turfa	1:0,25
Argila dura	1:0,5 a 1:1
Terra revestida de pedra	1:1
Terra arenosa solta	1:2
Franco arenosa ou argila porosa	1:3
Canal revestido	1:1,5

Fonte: CHOW (1959) apud PERES (2006).

Perdas de água por infiltração em canais sem revestimento

A decisão de se revestir ou não um canal é feita, dentre outros motivos, comparando-se o custo decorrente do seu revestimento com o custo de bombeamento da água perdida por infiltração. A Tabela 6 apresenta valores médios de perda de água por infiltração de canais não revestidos.

Tabela 6. Perdas de água por infiltração em canais não revestidos.

Material do canal	Infiltração (m^3/m^2.dia)
Franco argiloso impermeável	0,018 a 0,107
Franco argiloso com substrato impermeável	0,107 a 0,152
Franco argiloso; solo siltoso	0,152 a 0,229
Franco argiloso com pedregulho	0,229 a 0,305
Franco arenoso	0,305 a 0,457
Franco arenoso solto	0,457 a 0,553
Franco arenoso com cascalho	0,610 a 0,762
Solo cascalhento	0,762 a 0,914

Fonte: LINSLEY-FRANZINI (1972).

Perdas de água por infiltração em canais sem revestimento

Na literatura existem equações para estimar, embora de forma grosseira, as perdas de água por infiltração.

O modelo proposto por KRAATZ (1977) se aplica especialmente para canais de irrigação sem revestimento.

$$q = \left(\frac{\sigma}{100}\right) Q$$

q – perda de água por infiltração, $m^3\ s^{-1}\ km^{-1}$;
Q – vazão do canal, $m^3\ s^{-1}$;
σ – coeficiente de percolação, %.

O coeficiente de percolação é estimado pelas equações abaixo:

Solos de alta permeabilidade: $\sigma\ (\%) = \frac{3{,}4}{Q^{0{,}5}}$

Solos de média permeabilidade: $\sigma\ (\%) = \frac{1{,}9}{Q^{0{,}4}}$

Solos de baixa permeabilidade: $\sigma\ (\%) = \frac{0{,}7}{Q^{0{,}3}}$

PERES (2006).

Equação de Manning e formas geométricas

Exemplo 4: Estime a perda de água por infiltração em um canal de irrigação de seção transversal trapezoidal, escanado em um terreno arenoso, o qual transborda a vazão (Q) de 15 $m^3\ s^{-1}$.

Dados :

Como o solo é de textura arenosa, a sua permeabilidade é considerada alta, ou seja, existe facilidade de condução de água no meio poroso do solo. Assim:

$$\sigma\ (\%) = \frac{3{,}4}{Q^{0{,}5}} \quad \rightarrow \quad \sigma\ (\%) = \frac{3{,}4}{(15)^{0{,}5}} \cong 0{,}88\ \%$$

A vazão perdida por infiltração será:

$$q = \left(\frac{\sigma}{100}\right) Q \quad \rightarrow \quad q = \left(\frac{0{,}88}{100}\right) 15 = 0{,}132\ m^3\ s^{-1} km^{-1} = 132\ L\ s^{-1} km^{-1}$$

<u>Observação:</u> embora de menor magnitude, em regiões de clima seco (áridas e semi-áridas), a perda de lâmina evaporada do espelho d'água em contato com a atmosfera local, deve ser considerada, especialmente quando a superfície livre tiver grandes dimensões.

Borda livre para canais

A borda livre deve ser suficiente para oscilações verificadas na superfície de água do canal, evitando o seu transbordamento. De maneira geral, tem-se a seguinte recomendação:

- Borda livre = 0,3 m para pequeno canais;
- Borda livre = 0,6 a 1,2 m para grandes canais;

Como regra geral, segundo PERES (2006) pode-se tomar a borda livre como sendo ¼ de y (profundidade de escoamento).





“Dê a quem você ama: Asas para voar, raizes para voltar e motivos para ficar.”

“É muito melhor perceber um defeito em si mesmo do que dezenas no outro, pois o seu defeito você pode mudar. ”

Dalai Lama