UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
HIDRÁULICA APLICADA – AD 0195
Prof.: Raimundo Nonato Távora Costa

CONDUTOS LIVRES

01. Fundamentos:

Os condutos livres e os condutos forçados, embora tenham pontos em comum, diferem em importante aspecto: os condutos livres apresentam superfície livre onde atua a pressão atmosférica, enquanto que, nos condutos forçados, o fluído enche totalmente a secção e escoa com pressão diferente da atmosférica.

No que se refere às semelhanças entre estes condutos, os problemas apresentados pelos canais são mais difíceis de se resolverem, porque a superfície livre pode variar no tempo e no espaço e, em conseqüência, a profundidade de escoamento, a vazão, a declividade do fundo do canal e a da superfície livre são grandezas interdependentes.

De modo geral, a secção transversal do conduto forçado é circular, enquanto nos condutos livres pode assumir qualquer outra forma. No conduto forçado, as rugosidades das paredes internas têm menor variedade do que a do conduto livre, que pode ser lisa ou irregular, como a dos canais naturais. Além disto, a rugosidade das paredes pode variar com a profundidade do escoamento e, conseqüentemente, a seleção do coeficiente de atrito é cercada de maiores incertezas do que no caso de condutos forçados.

02. Tipos de escoamento:

2.1. Permanente: $\partial V/\partial t = 0$ e $\partial h/\partial t = 0$, em uma seção transversal do canal. Ex: canais revestidos.

2.2. Não-permanente: $\partial V/\partial t \neq 0$ e $\partial h/\partial t \neq 0$. Ex: Uma onda de cheia em um rio.

2.3. Permanente e Uniforme: $\partial V/\partial t = 0$ e $\partial V/\partial X = 0$. Ex: Canais de irrigação.

2.4. Permanente e Não-uniforme: $\partial V/\partial t = 0$ e $\partial V/\partial X \neq 0$. Ex: Ressalto hidráulico.

03. Elementos geométricos de um canal:

Os elementos geométricos constituem propriedades da secção transversal do canal, as quais podem ser caracterizadas pela forma geométrica e pela altura de água. Estes elementos são indispensáveis ao dimensionamento hidráulico. No caso de secções simples e regulares, os elementos hidráulicos são expressos e relacionados entre si matematicamente em função da altura de água no canal. No entanto, no caso de secções mais complexas e não-uniformes como são os canais naturais, não há uma equação simples que possa correlacioná-los, uma vez que são variáveis. Os principais elementos geométricos são:

3.1. Altura de água ou profundidade de escoamento (h): distância vertical entre a superfície livre e a base do canal. Na prática, é comum desprezar o efeito da declividade no canal (I) sobre a medida de (h), em função do cosseno do ângulo, por ser um erro muito pequeno.

3.2. Área molhada (A_M): área da secção transversal ocupada pela água.

3.3. Perímetro molhado (P_M): comprimento da linha de contato entre a água e as paredes e o fundo do canal.

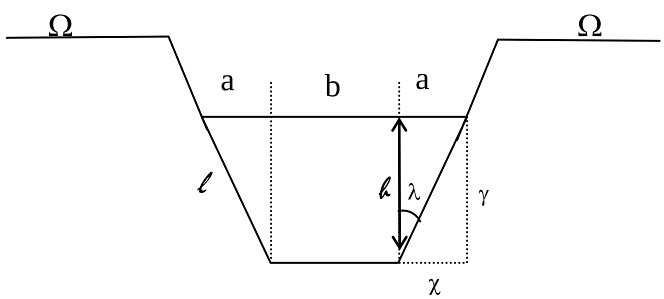
3.4. Raio hidráulico (Rh): resultado da divisão da área molhada pelo perímetro molhado.

3.5. Inclinação dos taludes (λ): Projeção horizontal/projeção vertical.

3.6. Declividade do canal (I): referente ao fundo do canal e igual à tangente do ângulo.

3.7. Coeficiente de rugosidade (n): fornecido em tabelas, sendo função da natureza das paredes.

Na Figura a seguir são ilustrados alguns destes elementos geométricos para um canal de seção trapezoidal.



04. Variação da velocidade na seção transversal:

Nos canais, o atrito entre a superfície livre e o ar acentua as diferenças das velocidades nos diversos pontos da secção transversal. A determinação das velocidades nos diferentes pontos das secções transversais dos canais, de um modo geral, só é possível por via experimental.

A velocidade máxima numa vertical da secção transversal situa-se, geralmente, entre 0,05h e 0,25h. O valor da velocidade média em uma vertical da secção reta, geralmente, é igual à média das velocidades medidas às profundidades correspondentes à 0,2h e 0,8h, ou seja: $V_m = (V_{0,2} + V_{0,8})/2$. Outra alternativa é considerar a velocidade média como sendo a velocidade medida a 0,6h.

05. Dimensionamento hidráulico – escoamento permanente e uniforme:

Entre as equações empíricas válidas para o dimensionamento de condutos livres ou canais em regime de escoamento permanente e uniforme, sem dúvida a equação de Manning é a mais tradicional. A equação fundamental da qual se originaram as demais foi apresentada por Chézy em 1769, conforme a equação:

$V = C\sqrt{Rh.I}$, sendo:

V : velocidade de escoamento, em $m.s^{-1}$;

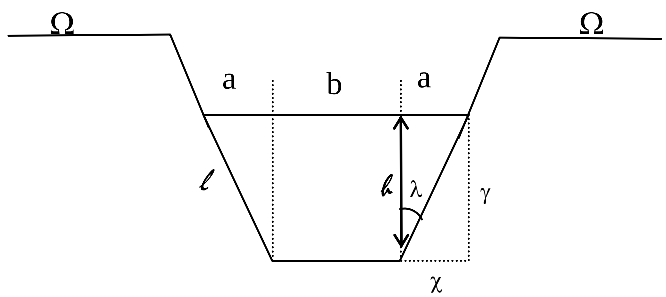
Rh: raio hidráulico

I : declividade do canal, $m.m^{-1}$.

Manning propôs mais tarde que o Coeficiente C fosse calculado por $C = (Rh^{1/6})/n$, sendo n, um coeficiente de rugosidade que depende da natureza das paredes e do fundo do canal. Dessa forma, combinando a equação de Chézy com a proposição de Manning, tem-se que:

V = (Rh$^{1/6}$. Rh$^{1/2}$.I$^{1/2}$)/n, que resulta em V = (Rh^{0,667}.I^{0,5})/n.

Pela figura ao lado:



$$\lambda = \frac{x}{y} = \frac{a}{h}$$

a = λ h

$$A = \frac{2b+2a}{2} \cdot h$$

A = bh + λ h^2

$$\ell = \sqrt{a^2+h^2} = \sqrt{\lambda^2 h^2 + h^2} = h\sqrt{1+\lambda^2}$$

P = 2ℓ + b $\therefore$ P = 2h $\sqrt{1+\lambda^2}$ +b

$$R = \frac{A}{P} \therefore R = (bh + \lambda h^2)/(2h\sqrt{1+\lambda^2} + b)$$

Q = A · V

$$V = \frac{1}{n} R^{0,667} \cdot I^{0,5} \therefore V = \frac{I^{0,5}}{n}\left[\frac{bh+\lambda h^2}{2h\sqrt{1+\lambda^2}+b}\right]^{0,667}$$

<u>Problema tipo 1</u>

São dados o declive I, a rugosidade das paredes n, a base b e a inclinação dos taludes.

Para uma vazão dada, Q (m^3/s), qual será a altura de água h no canal? Qual será a velocidade?

No caso da velocidade ser excessiva, em função do tipo de solo, resulta outro problema como o que segue.

<u>Problema tipo 2</u>

Redimensionar o canal para conduzir a mesma vazão Q com velocidade V permitida. Para isso deve-se encontrar um novo declive I, que satisfaça as condições existentes. O único meio eficaz para reduzir a velocidade é diminuir a declividade do canal.

No Quadro 01 são apresentados valores de referência da velocidade máxima, coeficiente de rugosidade de Manning e inclinação dos taludes em função da textura de solo.

Exemplo proposto: dimensione um canal de secção trapezoidal a ser escavado em um solo de textura franco-arenosa para escoar uma vazão de 600 L.s^{-1}.

Quadro 01. Valores recomendados para alguns tipos de canais, conforme Booher (1974).

Tipo de solo	Velocidade máxima (m/s)	Coeficiente de Manning (n)	Inclinação dos taludes (λ)
Arenoso	0,3 – 0,7	0,030 – 0,040	3:1
Franco-arenoso	0,5 – 0,7	0,030 – 0,035	2:1 a 2,5:1
Franco-argiloso	0,6 – 0,9	0,030	1,5:1 a 2:1
Argiloso	0,9 – 1,5	0,025 – 0,030	1:1 a 2:1
Cascalho	0,9 – 1,5	0,030 – 0,035	1:1 a 1,5:1
Rocha	1,2 – 1,8	0,030 – 0,040	0,25:1 a 1:1

06. Condutos circulares parcialmente cheios:

Conquanto o escoamento ocorra com superfície livre, ou seja, à pressão atmosférica, o conduto é operacionalmente um canal ou um conduto livre, independente de sua forma. Os condutos circulares parcialmente cheios são de interesse por terem vasta aplicação para esgotos, bueiros, galerias pluviais e drenos.

As equações usadas para dimensionamentos são duas formas derivadas da equação de Manning, apropriada para esses casos, conforme descrição a seguir:

$$V = \frac{1}{n} \cdot Rh^{0,667} \cdot I^{0,5} \text{ e } Q = VA \therefore Q = \frac{I^{0,5}}{n} \cdot Rh^{0,667} \cdot A;$$

$$\begin{cases} A = \pi D^2/4 \\ Rh = A_M/P_M \\ Rh = \cancel{\pi} D^2/4\cancel{\pi} D = D/4 \end{cases}$$

☞ Considerando seção de descarga totalmente cheia:

Portanto:

$$Q = \frac{I^{0,5}}{n} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{0,667} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \therefore Q = \frac{I^{0,5}}{n} \cdot \frac{D^{0,667}}{2,521} \cdot 0,785 D^2 \therefore Q \cdot n = I^{0,5} \cdot D^{2,667} \cdot 0,311$$

$$D = \left[\frac{Q \cdot n}{I^{0,5} \times 0,311}\right]^{0,375} \text{ e } Q = \frac{0,311}{n} D^{2,667} I^{0,5}$$

☞ Considerando descarga a meia seção tem-se que:

$$D = \left[\frac{Q \cdot n}{I^{0,5} \times 0,156}\right]^{0,375}$$

$$Q = \frac{0{,}156}{n} D^{2{,}667} I^{0{,}5}.$$

Os drenos laterais subterrâneos, conforme o ilustrado na Figura a seguir, constitui exemplo de aplicação das equações acima discutidas.

Dreno lateral subterrâneo com descarga para um canal coletor.

Exemplo proposto: um dreno lateral subterrâneo instalado com declividade de 0,3% deve apresentar uma descarga de 1,8 $L.s^{-1}$. Considerando que serão utilizados drenos corrugados flexíveis de PVC (n = 0,018) e a condição de dimensionamento para que a descarga ocorra à meia secção, discuta o diâmetro comercial do dreno a ser utilizado no projeto.

07. Secção hidráulica de máxima eficiência:

A secção transversal de um conduto livre é de máxima eficiência quando, para determinada área e declividade, a vazão é máxima. Dessa forma, pela equação de Manning, verifica-se que o raio hidráulico deve ser máximo, ocorrendo tal condição quando o perímetro molhado for mínimo. Tais secções hidráulicas são também conhecidas como de mínimo atrito.

Em geral, os canais devem ser dimensionados para operarem com máxima eficiência, no entanto, as condições locais podem limitar a obtenção dessa secção. Em alguns casos, a velocidade de escoamento é inadequada para a textura de solo. Dentre as diversas formas de secção transversal, a semicircular é a mais eficiente, sendo utilizada em canais de irrigação revestidos, como exemplo as acéquias. Em razão da facilidade de construção, porém, os canais de secção trapezoidal são os mais freqüentemente utilizados.

Seja um canal de secção trapezoidal, em que A = bh + λh^2 e P = 2h $\sqrt{1+\lambda^2}$ +b. Explicitando b da fórmula da área do canal e substituindo na equação do perímetro molhado, tem-se que: $P = \frac{A}{h} - \lambda h + 2h\sqrt{1+\lambda^2}$. Na análise, considerando-se constantes a área do canal e a inclinação dos taludes e variáveis a largura do fundo do canal (b) e a altura da lâmina de água (h); fazendo-se dP/dh = 0, tem-se que: $-\frac{A}{h^2} - \lambda + 2\sqrt{1+\lambda^2} = 0$ ou seja: $A = h^2(2\sqrt{1+\lambda^2} - \lambda)$, sendo esta a área de máxima eficiência.

Tendo em vista que A = bh + λh^2 , igualando-se as equações e explicitando o valor de b, tem-se que $b = 2h(\sqrt{1+\lambda^2} - \lambda)$. A relação entre b e h, na secção de máxima eficiência, será portanto: $\frac{b}{h} = 2(\sqrt{1+\lambda^2} - \lambda)$.

Considerando a relação entre b e h na secção de máxima eficiência e a inclinação dos taludes (λ), têm-se os seguintes valores:

λ	0,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
b/h	2,0	0,83	0,61	0,47	0,39	0,32