

Capítulo 199

Curvas em canais

Capítulo 199- Curvas em canais

199.1 Introdução

Iremos tratar da sobrelevação do nível da água em canais em curvas.

Trataremos de canais simples e não os compostos conforme se pode ver na Figura (199.1).

Quanto ao regime de escoamento não haverá tratamento especial para regime subcrítico e nem para supercrítico.

Quanto ao raio da curva, pode ser o interno, o externo e o médio.

Já vi projetos de rios em curva onde foi esquecido a sobrelevação da água na curva e quando apresentado o problema causava danos a estrutura de uma ponte onde foi preciso colação de gabiões tipo reno para proteção de erosão.

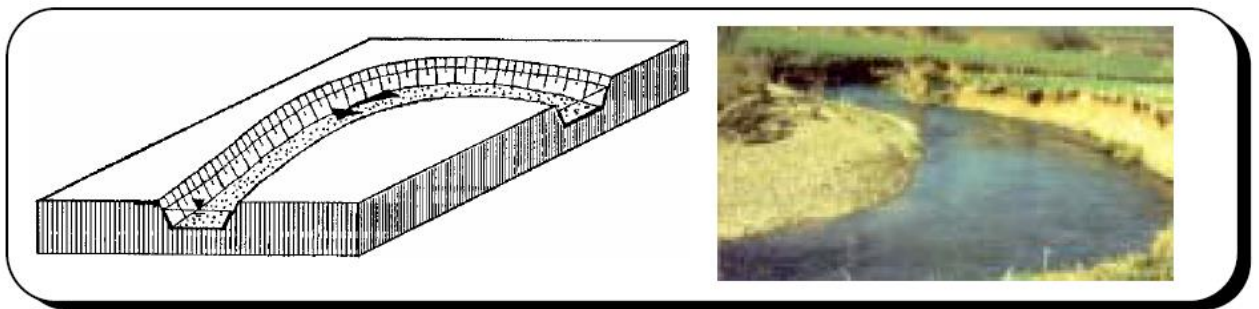


Figura 199.1 Canais em curvas

199.2 Teoria da sobrelevação em curvas

Conforme Nalluri, 2016 vamos mostrar a sobrelevação da curva da Figura (199.2)

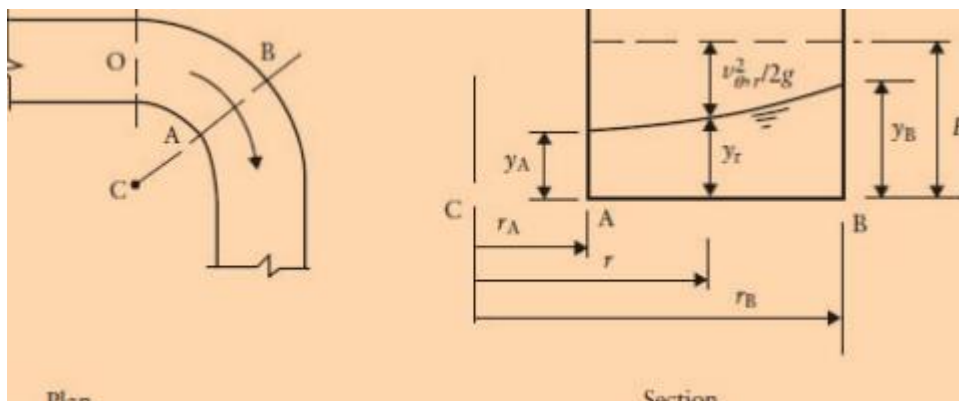


Figura 199.2 Curva em canal com sobrelevação

Exemplo 199.1 Este exemplo é de Nalluri, Example 10.7

Calcular as cotas y_A e y_B do canal em curva com vazão de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ que tem $3,00\text{m}$ de largura, altura do nível de água de $2,2\text{m}$, ângulo da curva de 90° e com raio interno de $5,00\text{m}$ e consideramos que não há perda de energia na curva.

Para determinar y_A e y_B precisamos das velocidades angulares v_A e v_B .

$$y_o = 2,2\text{m} \quad v_o = Q/A = 10 / (2,2 \times 3,0) = 1,515 \text{ m/s}$$

$$v_o^2/2g = 1,515^2 / (2 \times 9,81) = 0,117 \text{ m}$$

O valor da energia específica E_o será:

$$E_o = y_o + v_o^2/2g = 2,2 + 0,117 = 2,317\text{m}$$

Em uma curva para um ponto genérico X temos:

$$v_X \cdot r = \text{constante} = K$$

$$v_X = K/r$$

Sendo:

r = raio da curva.

v_X = velocidade no raio X (m/s)

A vazão total Q será a integral $v_X \cdot y_r \cdot dr$ (velocidade . área da seção) deste y_A até y_B .

$$Q = \int v_X \cdot y_r \cdot dr \quad \text{Equação 199.1}$$

Mas $y_r = E - v_X^2/2g = E - K^2/2gr^2$

Substituindo na Equação (199.1) temos:

$$Q = K \int (1/r) (E - K^2/2gr^2) dr = K \int (E/r - K^2/2gr^2) dr$$

Teremos então:

$$Q = K [E \cdot \ln(r_B/r_A) + K^2/4g (1/r_B^2 - 1/r_A^2)]$$

Fazendo as substituições teremos:

$$10 = K [2,317 \cdot \ln(8/5 + K^2/4 \times 9,81 (1/8^2 - 1/5^2))]$$

Observar que o valor de K aparece duas vezes na parte direita da equação e calculamos no Excel por tentativas e achamos **K= 9,71**.

Então teremos:

$$v_A = K/r_A = 9,71/5 = 1,942$$

$$v_A^2/2g = 0,192\text{m}$$

$$v_B = K/r_B = 9,71/8 = 1,2137$$

$$v_B^2/2g = 0,075\text{m}$$

$$y_A = 2,317 - 0,192 = 2,125\text{ m}$$

$$y_B = 2,317 - 0,075 = 2,242\text{m}$$

A sobrelevação se dará em B e será:

$$y_B - y_o = 2,242 - 2,2 = 0,042\text{m}$$

Portanto, a elevação será de 4,2 cm.

199.3 Método de Leopold, 1960 e Rozovskii, 1957 usados na Alemanha em Baden-Wurtemberg

Em Baden-Wurtemberg Teil 2, 2004 são usados dois métodos básicos, o do americano Leopold, 1960 e o do ucraniano Rozovskii, 1957.

Evitando demonstrações teóricas, vamos mostrar em um exemplo.

Exemplo 199.2 Adaptador de Baden-Wurtemberg Teil 2

O canal retangular da Figura (199.3) tem largura de 24m, raio médio de 60m e ângulo da curva de 120 graus. O comprimento do talvegue no raio médio é de $L=125,7\text{m}$. A velocidade é 1 m/s e a altura do nível de água é 2,00m. A vazão é de $48\text{ m}^3/\text{s}$. A rugosidade de Manning $n=0,028$ Calcular a sobrelevação devido a curva.

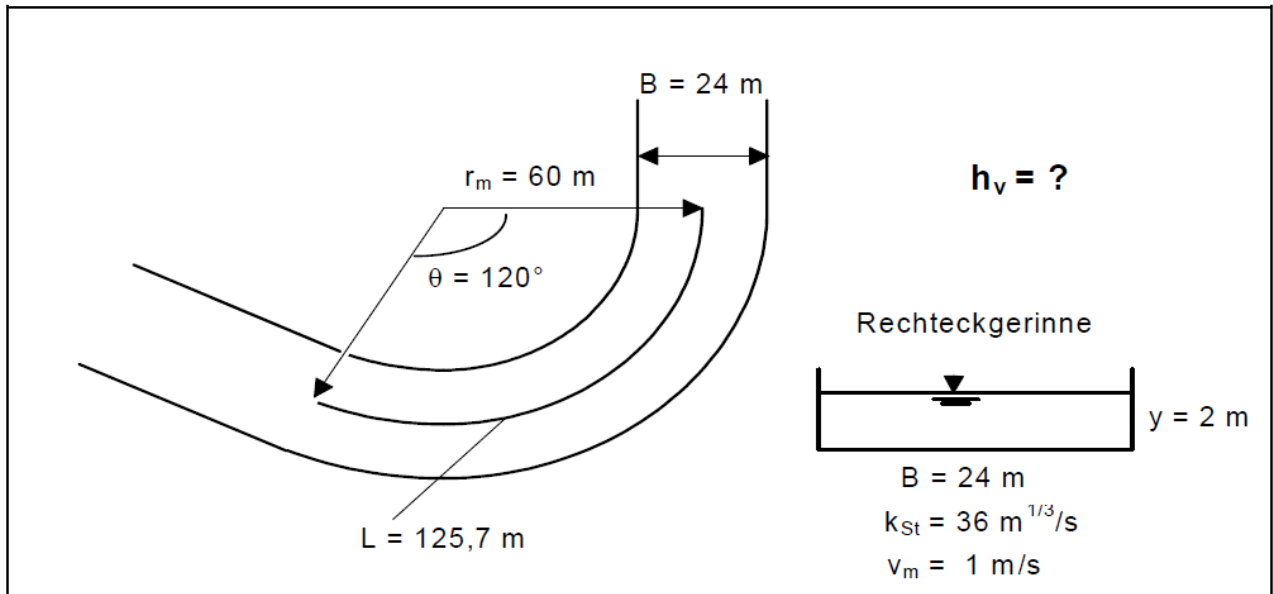


Abb. F12.6: Beispiel einer idealisierten Krümmung.

Figura 199.3- Canal em curva
Fonte: Baden-Wurttemberg Teil 2, 2004

Os cálculos estão resumidos na Tabela (199.1).

Tabela 199.1- Cálculos de Leopold, 1960 e Rozovskii, 1957

<i>Baden-Wurtemberg Teil 2</i>	
<i>Leopold, 1960</i>	
<i>V (m/s)=</i>	1
<i>Largura do canal B (m)+</i>	24
<i>Raio de curvatura r (m)=</i>	60
<i>n=</i>	0,028
<i>y (m)=</i>	2
<i>Ângulo teta (graus)</i>	120
<i>Comprimento da curva L (m)=</i>	125,7
<i>Area molhada (m2)= A</i>	48
<i>Perimetro molhado (m)= P</i>	28
<i>Raio hidraulico (m)= A/P</i>	1,71428571
<i>Leopoldo, 1960 B/r</i>	0,4
<i>Grafico Abb F12.5 com a=1,00m Frc^2=</i>	0,35
<i>Frc=</i>	0,59160798
<i>Numero de Froude Fr</i>	0,22576182
<i>Se Fr < Frc então vale as condições de Leopold</i>	
<i>Coefiente de atrito fr</i>	0,05140997
<i>Graffico Abb F12,4 com B/r=0,4 achamos fk/fr=</i>	0,5
<i>fk=</i>	0,02570498

$f = fr + fK$	0,07711495
Sobrelevação $h_v =$	0,07204961
Rozovskii, 1957	
$C = (1/n) R^{1/6}$	39,07
Sobrelevação $h_v =$	0,00822021

Leopold, 1960

Primeiro vamos usar a Figura (199.4). Entrando com a altura $a=2,00\text{m}$ e $B/r_m=0,4$ achamos $Fr_c^2 = 0,35$ e, portanto, $Fr_c=0,59$

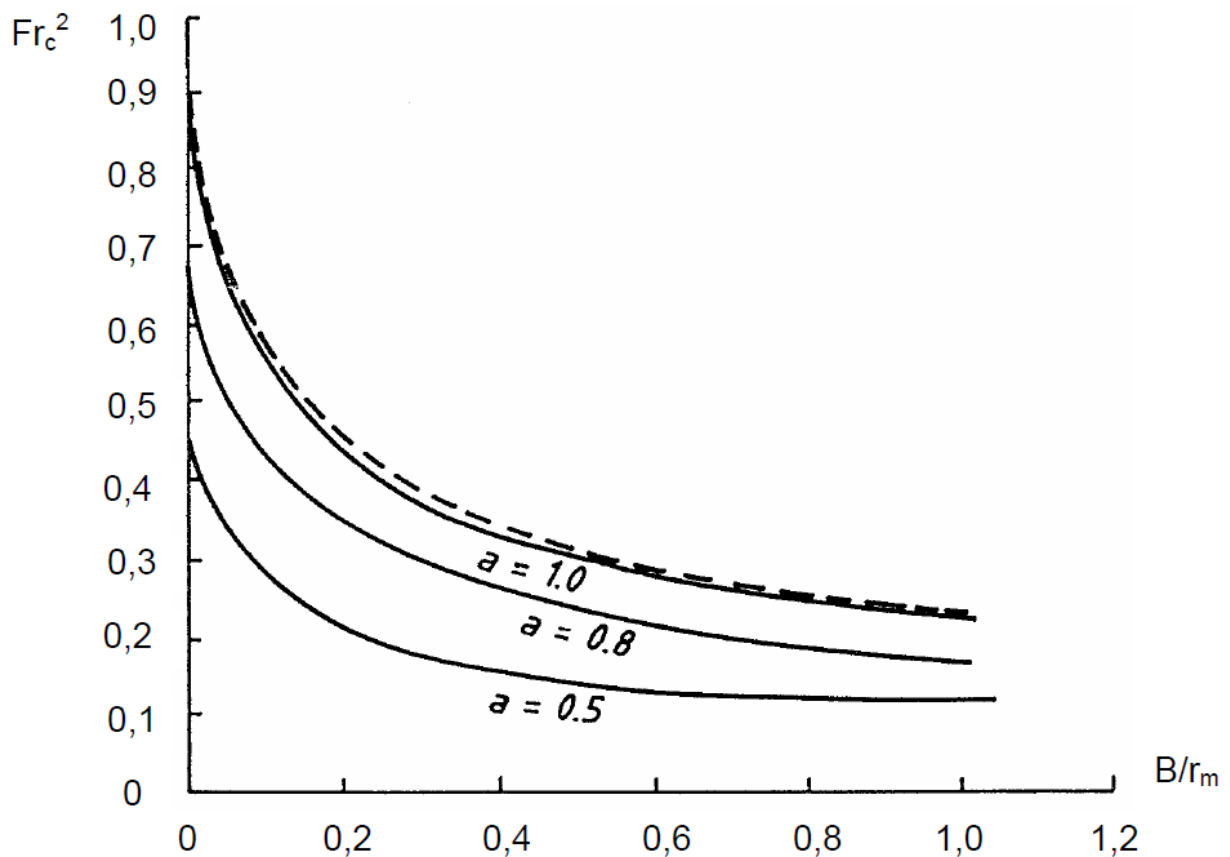


Figura 199.4- Leopold, 1960. Entramos com B/r_m e temos a altura a e achamos o valor de Fr_c^2 . Observar que a curva pontilhada da altura “ a ” é limitada. Fonte: Baden-Wurttemberg Teil 2, 2004.

$$R = A / U = (24 \times 2) / (24 + 2 \times 2,2) = 1,71\text{m}$$

Sendo:

R = raio hidráulico (m)

A = área molhada (m^2)

U= perímetro molhado (m)

$$C = (1/n) \times R^{(1/6)} = (1/0,029=8) \times 1,71^{(1/6)} = 39,4 \text{ m}^{(1/2)}/\text{s}$$
$$B/rm = 24/60 = 0,4$$

O número de Froude Fr será:

$$Fr = vm/(gxy)^{0,5} = 1/(9,81 \times 2)^{0,5} = 0,23$$

O número de Froude do canal calculado é $Fr=0,23$ que é menor que o número de Frc de Leopold que é 0,59 e, portanto, são válidas as condições de Leopold.

$$fR = (8 \cdot g \cdot n^2) / R^{(1/3)} = (8 \times 9,81 \times 0,028^2) / 1,71^{(1/3)} = 0,051$$

Nota: os alemães usam normalmente para o coeficiente de atrito o símbolo grego lambda λ , enquanto que no Brasil e Estados Unidos usamos a letra "f".

Vamos calcular conforme Leopold. 1960.

Temos que entrar na Figura (199.5) onde entrando com $B/rm=0,4$ achamos a relação $fK/fR= 0,5$.

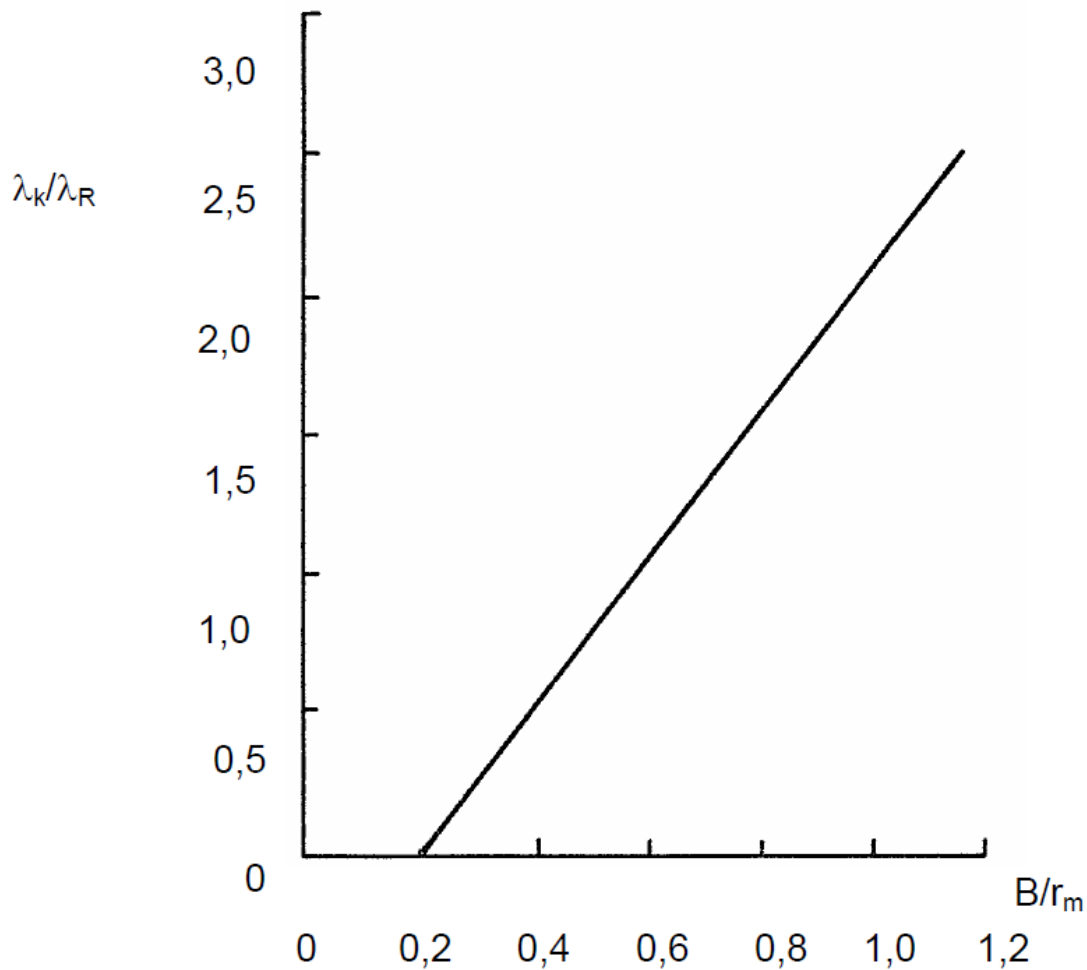


Figura 199.5- Para o método de Leopold, 1960. Entramos com B (largura do canal) dividido pelo raio médio da curva do canal r_m e achamos no gráfico a relação f_k/f_R . Fonte: Baden-Wurtemberg Teil 2, 2004.

Com o valor $B/r_m = 24/60 = 0,4$ achamos $f_k/f_R = 0,5$

Como temos o valor de $f_R = 0,051$ vamos achar $f_k = 0,5 \times f_R = 0,025$

Mas segundo Leopoldo, 1969 $f = f_k + f_R = 0,051 + 0,025 = 0,076$

Com os valores calculados podemos então achar calcular o valor da sobrelevação h_v .

$$h_v = f \cdot L \cdot v_m^2 / (4R^2g) = 0,076 \times 125,7 \times 1^3 / (4 \times 1,71 \times 2 \times 9,81) = 0,07m$$

Portanto, a sobrelevação é de 7 cm conforme Leopold;

Vamos agora calcular a sobrelevação conforme Rozovskii, 1957;

$$h_v = [(24 \times g^{0,5}/C) + (60 \cdot g/C^2)] \times (y \cdot L \cdot v_m^2) / (r_m^2 \times 2 \cdot g)$$

Sendo:

h_v = sobrelevação (m)

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

C = valor calculado acima

L = comprimento do talvegue (m)

v_m = velocidade média (m/s)

r_m = raio médio da curva (m)

$h_v = [(24 \times 9,81^{0,5}/39,4) + (60 \times 9,81/39,4^2)] \times (2 \times 125,7 \times 1^2) / (60^2 \times 2 \times 9,81)$

Portanto, a sobrelevação conforme Rozovskii, 1957 será de 0,81cm;

Verificamos que segundo Leopold, 1969 a sobrelevação foi de 7cm e segundo Rozovskii, 1957 de 0,81cm e o valor correto estaria entre o intervalo.

Exemplo 199.3

Aplicamos o método de Naluri no exemplo alemão de Baden Wutemberg Teil 2, 2004 conforme Tabela (199.2) e achamos sobrelevação de 5cm.

Tabela 199.2- Método de Naluri aplicado a Baden-Wurtemberg, Teil 2, 2004.

Baden-Wurtembur Teil 2 usando Naluri Exampnle 10.7		
Curva do um canal sem considerar perda de carga		
Largura (m)=	24	
Altura do nível de água (m)=	2	
Raio da curva interno (m)=	48	
Raio da curva externa (m)=	72	
Curva de 120 graus		
Vazão (m ³ /s)= Q=	48	
Area (m ²)	48	
Velocidade V_0 (m/s)=	1,00	
Cota linha energia E_0 (m=		2,051
Tentativa valor de K	9,71	
Tem que dar a vazão Q	8,07	
V_A (m/s)=	0,202291667	
V_B (m/s)=	0,134861111	
y_A (m)	2,049	
y_B (m)=		2,050
Sobreelevação (m)=		0,050

199.4 Superelevação em curvas horizontais

Subramanya, 2009 e Pazwasgm 2016 mostram equação para escoamento subcrítico:

$$E = (V^2 \cdot T) / (g \cdot r)$$

Sendo:

E= sobrelevação (m) ou superelevação

V= velocidade média na seção (m/s)

T=largura da superfície da água ou largura do canal *m). Observar que pode ser um canal de seção trapezoidal ou outra seção qualquer.

g= 9,81=aceleração da gravidade (m/s²)

r= raio médio do canal (m)

Exemplo 199.4

Calcular a superelevação de um canal com V=1,8m/s largura B=80m e raio médio de curvatura de 500m.

$$E = (V^2 \cdot B) / (g \cdot r)$$

$$E = (1,8^2 \times 80) / (9,81 \times 500) = 0,053m$$

Quando o escoamento em um canal ou rio for subcrítico a superelevação E pode ser calculada conforme Subramanya, 2009 pelas seguintes equações.

Canal retangular

$$E = (3 \cdot V^2 \cdot B) / (4 \cdot g \cdot r)$$

Sendo:

E= altura máxima que a água atinge acima do nível do escoamento y_0 (m)

V= velocidade média na seção (m/s)

B= largura da seção (m)

g= 9,81m/s²= aceleração da gravidade

r= raio da curva medido do centro do canal (m)

Exemplo 199.5

Calcular a superelevação de um canal retangular com V=1,8m/s largura B=80m e raio de curvatura de 500m.

$$E = (3 \cdot V^2 \cdot B) / (4 \cdot g \cdot r)$$

$$E = (3 \times 1,8^2 \times 80) / (4 \times 9,81 \times 500) = 0,04m$$

Canal trapezoidal

$$E = V^2 (B + 2.z.y_0) / 2 (g.r - 2.z.V^2)$$

Sendo:

y_0 = altura do nível de água (m)

z = declividade do talude.

Exemplo 199.6

Calcular a superelevação de um canal trapezoidal com talude 1 (V): 2(H) ($z=2$); $V=1,8\text{m/s}$ largura $B=80\text{m}$ e raio de curvatura de 500m.

$$E = V^2 (B + 2.z.y_0) / 2 (g.r - 2.z.V^2)$$

$$E = 1,8^2 (80 + 2 \times 2 \times 1,2) / 2 (9,81 \times 500 - 2 \times 2 \times 1,8^2) = 0,03\text{m}$$

199.5 Raio de curvatura para curvas horizontais

Segundo French, 2007 não há uma regra para estimar o mínimo raio de curvatura.

Na Índia o mínimo raio de curvatura é 91m para canais com vazões de $0,30\text{m}^3/\text{s}$ e raio de 1500m para vazões maiores que $85\text{m}^3/\text{s}$.

Khatsuria, 2005 recomenda o raio mínimo de curvatura aceitável para canal com seção retangular os estudos de Wes, 1970.

$$R_{\min} = 4 V^2 B / g.y$$

Exemplo 199.7

Calcular a superelevação de um canal, $V=1,8\text{m/s}$ largura $B=80\text{m}$ e $y=1,20\text{m}$.
Calcular o raio mínimo de curvatura de 500m.

$$R_{\min} = 4 V^2 B / g.y$$

$$R_{\min} = 4 \times 1,8^2 \times 80 / (9,81 \times 1,20) = 88,00\text{m}$$

Máxima superelevação

$$E_{\max} = 0,09. B$$

Exemplo 199.8

Calcular a máxima superelevação em um canal com 80m de largura.

$$E_{\max} = 0,09. B$$

$$E_{\max} = 0,09 \times 80 = 7,2\text{m}$$

Khatsuria, 2005 recomenda que o mínimo comprimento de transição de cada lado da curva seja dado pela equação:

$$L_t = 20 \times E$$

Sendo:

Lt= comprimento de transição em metros de cada lado da curva

E= superelevação na curva (m)

Exemplo 199.9

Calcular o comprimento mínimo de transição para superelevação de 0,50m.

$$L_t = 20 E$$

$$L_t = 20 \times 0,50 = 10,00\text{m}$$

Khatsuria, 2005 conforme Figura (199.6) informa ainda que se pode usar dois raios de curvatura (R_t e R_c) da seguinte maneira:

$$\theta = 2.\theta_t + \theta_c$$

Sendo: θ_t

$$\theta_t = \tan^{-1} [b / \tan \beta_1 / (R_t + b/2)]$$

Sendo:

$$R_t = 2.R_c$$

R_c = raio da curva central (m)

F_1 = número de Froude do escoamento no começo da curva

$$\beta_1 = \sin^{-1} (1/F_1)$$

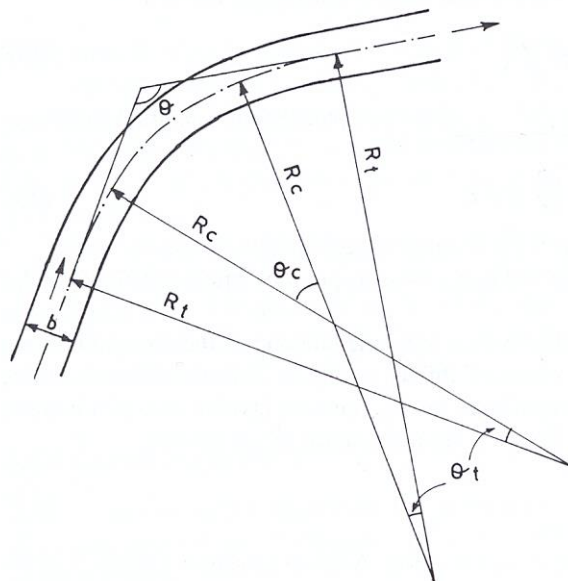


Figura 199.6- Curva composta de dois raios
Fonte: Khatsuria, 2005

]

199.6 Superelevação conforme French para curvas horizontais

Uma equação que fornece uma estimativa boa da superelevação de um canal em curva conforme French, 2007 é:

$$E = (V^2 / g) [20R/3.B - 16R^3/B^3 + (4R^2/B^2 - 1)^2 \ln((2R+B)/(2R-B))]$$

Exemplo 199.10

Calcular a superelevação de um canal, $V=1,8\text{m/s}$. largura $B=80\text{m}$ e raio de curvatura de 500m .

$$E = (V^2 / g) [20R/3.B - 16R^3/B^3 + (4R^2/B^2 - 1)^2 \ln((2R+B)/(2R-B))]$$

$$E = (1,8^2 / 9,81) [20 \times 500 / 3 \times 80 - 16 \times 500^3 / 80^3 + (4 \times 500^2 / 80^2 - 1)^2 \ln((2 \times 500 + 80) / (2 \times 500 - 80))] = 0,028\text{m}$$

199.7 Superelevação em curvas conforme Pazwash

Pazwash.2016 mostra equação para escoamento em uma curva de um canal.

$$E = (V^2 \cdot T) / (g \cdot r)$$

Sendo:

E = sobrelevação (m) ou superelevação

V = velocidade média na seção (m/s)

T =largura da superfície da água ou largura do canal (m). Observar que pode ser um canal de seção trapezoidal ou outra seção qualquer.

$g = 9,81$ =aceleração da gravidade (m/s²)

r = raio médio do canal (m)

Pazwash, 2016 salienta que na curva aparecerão forças centrífugas que aumentarão as tensões superficiais, ou seja, a tensão trativa.

$$\sigma_b = K_b \cdot \sigma_d$$

Sendo:

σ_d = tensão trativa se não houvesse curva (Pa)

σ_b = tensão trativa na curva (Pa)

K_b = fator de curva do canal

O fator da curva K depende da relação do raio médio da curva dividido pela largura da superfície do canal T.

Se $2 < r/T < 10$

$$K_b = 2,38 - 0,206(r/T) + 0,0073 (r/T)^2$$

Se $r/T \leq 2,0$

$$K_b = 2,0$$

Se $r/T \geq 10$

$$K_b = 1,05$$

Tabela 199.1- Fator da curva do canal K_b em função de r/T

r/T	10	9	8	7	6	5	4	3	2
K _b	1,05	1,13	1,20	1,30	1,41	1,53	1,670	1,83	2,0

Ao passar a curva existe uma distância L_b na qual há influência do aumento da tensão trativa e o interessante salientado por Pazwash, 2016 é que o raio da curva não influencia no comprimento L_b .

$$L_b = 0,74 R^{(7/6)} / n_b$$

Sendo:

L_b = comprimento até onde há influencia no aumento da tensão trativa (m)

R= raio hidráulico (m)

n_b = coeficiente de rugosidade de Manning

199.8 Bibliografia e livros recomendados

- BADEN-WURTTEMBERG. *Hydraulic naturnaher fliessgewasser*. Teil 1, ano 2002 com 97 paginas.
- BADEN-WURTTEMBERG. *Hydraulic naturnaher fliessgewasser*. Teil 2, ano 2004 com 218 paginas.
- BADEN-WURTTEMBERG. *Hydraulic naturnaher fliessgewasser*. Teil 3, ano 2003 com 113 paginas.
- BADEN-WURTTEMBERG. *Hydraulic naturnaher fliessgewasser*. Teil 4, ano 2003 com 60 paginas.
- COON, WILLIAN F. *Estimates of roughness coefficients for selected natural stream channels with vegetated banks in New York*. US Geological Survey Open-file report 93-161, Ithaca, New York, 1995.
- FRENCH, RICHARD H. *Open channel hydraulics*. Water Resources Publications, 2007, USA, 638 páginas.
- GARBRECHT, G. *Abflussberechnung fur flusse und kanal*. Die wasserwirtschaft, 51m S, 40-45 und S. 72-77, ano 1961.
- HAMILL, LES. *Bridge Hydraulics*. Editora Spon London, m 1999, 367 páginas.
- HYDRAULICS RESEARCH LABORATORY. Wallinford, 1988. *Assessing the hydraulic performance of environmentally acceptable channels*. Repoert EX 1799, Wallingford.
- KHATSURIA, R.M. *Hydraulics of Spillways and energy dissipators*. New Yorkm 2005, 649 páginas.
- MALCHEREK, ANDREAS. *Gerinnehydraulik und flusswasserbau*. Hydromechanik und wasserbau Band 2. Amazon/Kindle
- MALCHEREK, ANDREAS. *Sedimenttransport und morphodynamik*. Hydromechanik und wasserbau Band3 . Amazon/Kindle
- MCCUEN, RICHARD H. *Hydrologic analysis and design*. 2ª ed. Prentice-Hall, 1998, 814 páginas.
- NALLURI & FEATHERSTONES. Civil engeeneering Hydraulics. Editora John Wiley, 6ª ed, ano 2016, Amazon/Kindle.
- PATT, HEINZ E GONSOWKI, PETER. *Wasserbau*. Springer, 2011. Amazon/Kindle
- PATT, HEINZ E ROBERT, JUPNER. *Hochwasser Handbuch*. Springer. Amazon/Kindle.
- PAZWASH, HORMOZ. *Urban stormwater management*. Editora CRC Press, 2ª ed ano 2016, 683 oáginas.
- PRADHAN S. E KHATUA, K.K. *Composite roughness for rough compound channels*. India, 7 paginas.
- QUINTELA, ANTONIO DE CARVALHO. *Hidráulica*. Fundação Calouste Gul benkian, janeiro de 1961/ Lisboa, 539 paginas.
- SELLIN, ROBERT HENRY JOHN. *A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain*. Ano de 1964, 10 paginas. University of Belfast. Department of civil engineering.
- SUBRAMANYA, K. *Flow in open channels*. McGraw-Hill, New Delhi, 2009, 3ª ed, 548 páginas.
- SUBRAMANYA, K. *Flow in open channels*. Tata McGraw-Hill, New Delhi, 3ª ed, 2009, 548 páginas.
- WEISBACH, JULIUS. *Experimental Hydraulik*. Freiberg, 1855.
- WURTENBERG, LARS. *Desertification, sertatiion und durren, Ursachen und wirkungen von problemen*. Studienarbeit. Amazon/Kindle.
- ZANKE, ULRICH. *Hydraulik fur den wasserbau*. Amazon, Kindle, Editora Springer, ano 2013, Berlim.

--ZIDAN, ABDEL KUSIK AHMED. *Review of friction formulae in open channel flow*. 14 de março de 2015 com 14 páginas.