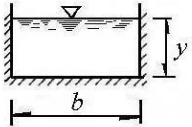
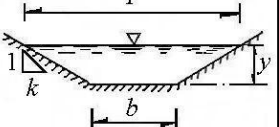
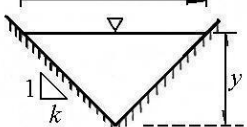
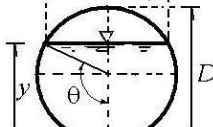


Hidráulica de canales.**1. Conceptos fundamentales****Tabla 1.1 Cálculo de elementos geométricos de las secciones más usuales**

Sección Elemento geométrico	Rectangular	Trapecial	Triangular	Circular
				
Área, A	$b y$	$(b + k y) y$	$k y^2$	$\frac{1}{4}(\theta - \frac{1}{2} \text{sen } 2\theta) D^2$ donde $\theta = \cos^{-1}(1 - \frac{2y}{D})$
Perímetro mojado P	$b + 2 y$	$b + 2 \sqrt{1 + k^2} y$	$2 \sqrt{1 + k^2} y$	θD
Radio hidráulico $R_h = A / P$	$\frac{b y}{b + 2 y}$	$\frac{(b + k y) y}{b + 2 \sqrt{1 + k^2} y}$	$\frac{k y^2}{2 \sqrt{1 + k^2} y}$	$\frac{1}{4} \left(1 - \frac{\text{sen } 2\theta}{2\theta} \right) D$
Ancho de la superficie libre, T	b	$b + 2 k y$	$2 k y$	$\frac{(\text{sen } \theta) D}{2 \sqrt{y (D - y)}}$
Tirante medio A / T	y	$\frac{(b + k y) y}{b + 2 k y}$	$\frac{1}{2} y$	$\frac{1}{4} \left(\frac{\theta - \frac{1}{2} \text{sen } 2\theta}{\text{sen } 2\theta} \right) D$

En la tabla 1 el ángulo θ corresponde a la definición mostrada en la figura de la sección circular y no se debe confundir con el ángulo de plantilla. Para determinar los elementos geométricos de la sección circular también se puede emplear la tabla 2.1

Tabla 2.2. Fórmulas usuales para el cálculo del factor de fricción C de Chezy.
En estas fórmulas el radio hidráulico R_h en m

Autor	Ecuación	Observaciones
Ganguillet y Kutter	$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R_h}}}$	Aconsejable en canales naturales, para los que usualmente conduce a resultados satisfactorios. Es compleja y tiene la desventaja de que ocurren cambios grandes en C para cambios pequeños en n . Este coeficiente depende de la rugosidad del canal, según la tabla 2.3
Kutter	$C = \frac{100 \sqrt{R_h}}{m + \sqrt{R_h}}$	Es una simplificación de la de Ganguillet y Kutter, m es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3
Bazin	$C = \frac{87}{1 + \frac{N_B}{\sqrt{R_h}}}$	Está basada en una buena cantidad de experimentos y es relativamente sencilla, N_B es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3
Kozeny	$C = 20 \log \frac{A}{T} + N_K$	Es análoga a la de los conductos a presión y fue obtenida con base en los resultados experimentales de von Misses y Bazin. N_K es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3
Martínez	$C = 17.7 \log \left[\frac{R_h}{d_m} \right] + 13.6$	Se obtuvo de muchas mediciones en ríos de la exUnión Soviética. d_m es el diámetro medio del grano de material en el fondo del río en m. Es válida cuando $0.15 \leq R_h \leq 2.25$ m, $0.00004 \leq S \leq 0.0039$ y $0.004 \leq d_m \leq 0.25$ m (referencia 9).
Manning	$C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$	Originalmente fue obtenida a partir de siete ecuaciones diferentes basadas en ensayos de Bazin, y posteriormente verificada por observaciones. Es una de las más utilizadas por su sencillez. n es el mismo coeficiente que utilizó Ganguillet y Kutter, según la tabla 2.3
Pavlovski	$C = \frac{R_h^z}{n}$	Considera que el exponente en la ecuación de Manning no es constante sino que varía con la forma del canal y la rugosidad, como sigue: $z = 1.5\sqrt{n}$, para $R_h < 1$ m, y $z = 1.3\sqrt{n}$, para $R_h > 1$ m. El valor de n es el mismo que el de Manning.

Tabla 2.3 Coeficiente de rugosidad en las ecuaciones de la tabla 2.2

1. Conductos cerrados parcialmente llenos	Ganguillet y Kutter n	Kutter m	Bazin N_B	Kozeny N_K
Fierro fundido nuevo.	0.012	0.20	0.06	
Fierro fundido usado.		0.25	0.12	
Fierro colado.	0.012	0.20		
Barro vitrificado nuevo.		0.25		
Barro vitrificado usado.	0.017	0.30 a 0.35		
Tubos de alcantarillado.	0.017 a 0.020	0.30 a 0.35		
Túneles de concreto pulido.	0.011 a 0.013	0.20 a 0.25	0.22	
2. Canales abiertos	Ganguillet y Kutter n	Kutter m	Bazin N_B	Kozeny N_K
Madera cepillada.	0.010	0.15 a 0.20	0.06	
Madera de acabado rugoso.		0.30 a 0.35		
Mampostería de ladrillo bien acabada.	0.013	0.25	0.16	70 a 76
Cemento pulido.		0.20 a 0.25	0.10 a 0.16	84 a 90
Concreto pulido.	0.012	0.20	0.11 a 0.22	
Concreto rugoso.	0.017	0.65	0.45	58 a 62
Piedra brasa bien acabada.	0.017	0.65	0.46	60 a 70
En tierra, arroyos y ríos.	0.025	1.75	1.4 a 1.6	
En tierra con material grueso y plantas.	0.035	2.0 a 2.5	1.75	
Con cantos rodados.	0.04 a 0.5	3.5 a 5.0	hasta 3.5	
Con gran rugosidad de fondo y maleza tupida.	hasta 0.9			
Roca acomodada.				36 a 50
Roca a volteo.				28 a 36
Grava { gruesa (10 a 15 cm).				32 a 38
{ media (5 a 10 cm).				38 a 42
{ fina (2 a 3 cm).				42 a 46
Cantos rodados (15 a 20 cm).				28 a 32

Tabla 2.4 Valores del coeficiente n de Manning

Conductos cerrados operando parcialmente llenos

Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
A. Metales:			
a) Latón liso	0.009	0.010	0.013
b) Acero:			
1. Con bridas soldado	0.010	0.012	0.014
2. Remachado y espiral	0.013	0.016	0.017
c) Hierro fundido:			
1. Con recubrimiento superficial	0.010	0.013	0.014
2. Sin recubrimiento	0.011	0.014	0.016
d) Hierro forjado:			
1. Negro	0.012	0.014	0.015
2. Galvanizado	0.013	0.016	0.017
e) Metal corrugado			
1. Subdren	0.017	0.019	0.021
2. Dren pluvial	0.021	0.024	0.030
B. No metales:			
a) Acrílico	0.008	0.009	0.010
b) Vidrio	0.009	0.100	0.013
c) Cemento:			
1. Pulido	0.010	0.011	0.013
2. En mortero	0.011	0.013	0.015
d) Concreto:			
1. Alcantarilla recta y libre de azolve	0.010	0.011	0.013
2. Alcantarilla con curvas, conexiones y algunos azolvamientos	0.011	0.013	0.014
3. Terminado	0.011	0.012	0.014
4. Alcantarilla recta, con pozos de visita, entradas, etc.	0.013	0.015	0.017
5. Colado en molde de acero, sin acabado	0.012	0.013	0.014
6. Colado en molde de madera, sin acabado	0.012	0.014	0.016
7. Colado en molde de madera rugosa, sin acabado	0.015	0.017	0.020
e) Madera:			
1. Machihembrada	0.010	0.012	0.014
2. Laminada y tratada	0.015	0.017	0.020
f) Arcilla:			
1. Tubos de barro cocido, común	0.011	0.013	0.017
2. Tubos de albañal vitrificado	0.011	0.014	0.017
3. Tubos de albañal vitrificado para drenes, con pozos de visita, accesos, etc.	0.013	0.015	0.017
4. Tubo vitrificado para subdrenes, con juntas abiertas	0.014	0.016	0.018
g) Mampostería de ladrillo			
1. De vitricota	0.011	0.013	0.015
2. Revestida con mortero de cemento	0.012	0.015	0.017
h) Alcantarillado sanitario, cubierto de lama de desechos, con curvas y conexiones.	0.012	0.013	0.016
i) Drenaje con fondo liso, pavimentado en el fondo	0.016	0.019	0.020
j) Mampostería de piedra pequeña cementada en las juntas	0.018	0.025	0.030

Canales Recubiertos o revestidos

Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
A. Metal:			
a) Superficie de acero lisa:			
1. No pintada	0.011	0.012	0.014
2. Pintada	0.012	0.013	0.017
b) Corrugado	0.021	0.025	0.030
B. No metales:			
a) Cemento:			
1. Superficie lisa	0.010	0.011	0.013
2. En mortero	0.011	0.013	0.015
b) Madera:			
1. Cepillada, no tratada	0.010	0.012	0.014
2. Cepillada, creosotada	0.011	0.120	0.015
3. No cepillada	0.011	0.013	0.015
4. Entablada con listones	0.012	0.015	0.018
5. Cubierta de papel impermeable	0.010	0.014	0.017
c) Concreto:			
1. Acabado con llana metálica	0.011	0.013	0.015
2. Acabado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
3. Acabado con grava en el fondo	0.015	0.017	0.020
4. Sin acabado	0.014	0.017	0.020
5. Gunitado, buena sección	0.016	0.019	0.023
6. Gunitado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7. Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
8. Sobre roca de excavado irregular	0.022	0.027	
d) Fondo de concreto acabado con llana, bordos de:			
1. Piedra acomodada sobre mortero	0.015	0.017	0.020
2. Mampostería de piedra mal acomodada sobre mortero	0.017	0.020	0.024
3. Mampostería de piedra pequeña, cementada y revocada	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería de piedra pequeña cementada	0.020	0.025	0.030
5. Mampostería seca de piedra pequeña o zampeado	0.020	0.030	0.035
e) Fondo de grava con taludes de:			
1. Concreto colado en moldes	0.017	0.020	0.025
2. Piedra mal acomodada en mortero	0.020	0.023	0.026
3. Mampostería seca de piedra pequeña o zampeado	0.023	0.033	0.036
f) Ladrillo:			
1. Vitricota	0.011	0.013	0.015
2. Con mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g) Mampostería de piedra:			
1. Pequeña, cementada	0.017	0.025	0.030
2. Pequeña, seca	0.023	0.032	0.035
h) Piedra labrada	0.013	0.015	0.017
i) Asfalto:			
1. Liso	0.013	0.013	
2. Rugoso	0.016	0.016	
j) Cubierta vegetal	0.030		0.500
k) Suelo-cemento	0.015	0.016	0.017

Cauces naturales

Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
A. Arroyos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas <30m)			
a) Corrientes en planicie:			
1. Limpios, rectos, sin deslaves ni estancamientos profundos, tirante alto	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero más rocoso y con hierba	0.030	0.035	0.040
3. Limpios, sinuosos, algunas irregularidades del fondo	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, algo de hierbas y rocas	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, pero menor profundidad y secciones poco eficaces	0.040	0.048	0.055
6. Igual que el 4, peor con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos irregulares con hierba y estancamientos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con mucha hierba, estancamientos profundos, cauces de inundación con raíces y plantas subacuáticas	0.075	0.100	0.150
b) Corrientes de montaña, sin vegetación en el cauce, bordos muy			
1. Fondo de grava, boleó y algunos cantos rodados	0.030	0.040	0.050
2. Fondo de boleó y grandes rocas	0.040	0.050	0.070
B. Planicies de inundación:			
a) Pastura sin arbustos:			
1. Pasto bajo	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b) Áreas de cultivo:			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivo maduro en surcos	0.025	0.035	0.045
3. Cultivo maduro en campo	0.030	0.040	0.050
c) Arbustos			
1. Arbustos escasos y mucha hierba	0.035	0.050	0.070
2. Pocos arbustos y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos arbustos y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Mediana a densa población de arbustos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Mediana a densa población de arbustos, en verano	0.070	0.100	0.160
d) Árboles			
1. Población densa de sauces en verano, rectos	0.110	0.150	0.200
2. Terrenos talados con troncos muertos	0.030	0.040	0.050
3. Igual al anterior, pero con troncos retoñados	0.050	0.060	0.080
4. Gran concentración de madera, algunos árboles caídos, pocos de escaso crecimiento, nivel de inundación debajo de las ramas.	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero el nivel de inundación alcanza a las ramas	0.100	0.120	0.160
C. Ríos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas >30m). El valor de n es menor que en los arroyos de igual descripción, pero donde los bordos ofrecen menor resistencia:			
a) Secciones regulares sin cantos rodados ni arbustos	0.025		0.060
b) Secciones rugosos e irregulares	0.035		0.100

Canales excavados o dragados en diferentes tipos de suelo.

Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
a) Tierra recto y uniforme:			
1. Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de intemperizado	0.018	0.022	0.025
3. Grava, sección uniforme y limpia	0.022	0.025	0.030
4. Con poco parto y poca hierba	0.022	0.027	0.033
b) Tierra, sinuoso, flujo con poca velocidad:			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pasto, algo de hierba	0.025	0.030	0.033
3. Hierba densa o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fondo de tierra y mampostería en los bordos	0.028	0.030	0.035
5. Fondo rocoso y hierba en los bordos	0.025	0.035	0.040
6. fondo empedrado y bordos limpios	0.030	0.040	0.050
c) Excavado o dragado en línea recta:			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Pocos arbustos en los bordos	0.035	0.050	0.060
d) Cortado en roca:			
1. Liso y uniforme	0.025	0.035	0.040
2. Con salientes agudas e irregulares	0.035	0.040	0.050
e) Canales abandonados, hierbas y arbustos sin cortar:			
1. Hierba densa, tan alta como el nivel del agua	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, arbustos en las orillas	0.040	0.050	0.080
3. Igual al interior, con máximo nivel del agua	0.045	0.070	0.110
4. Arbustos densos, altos niveles de agua	0.080	0.100	0.140

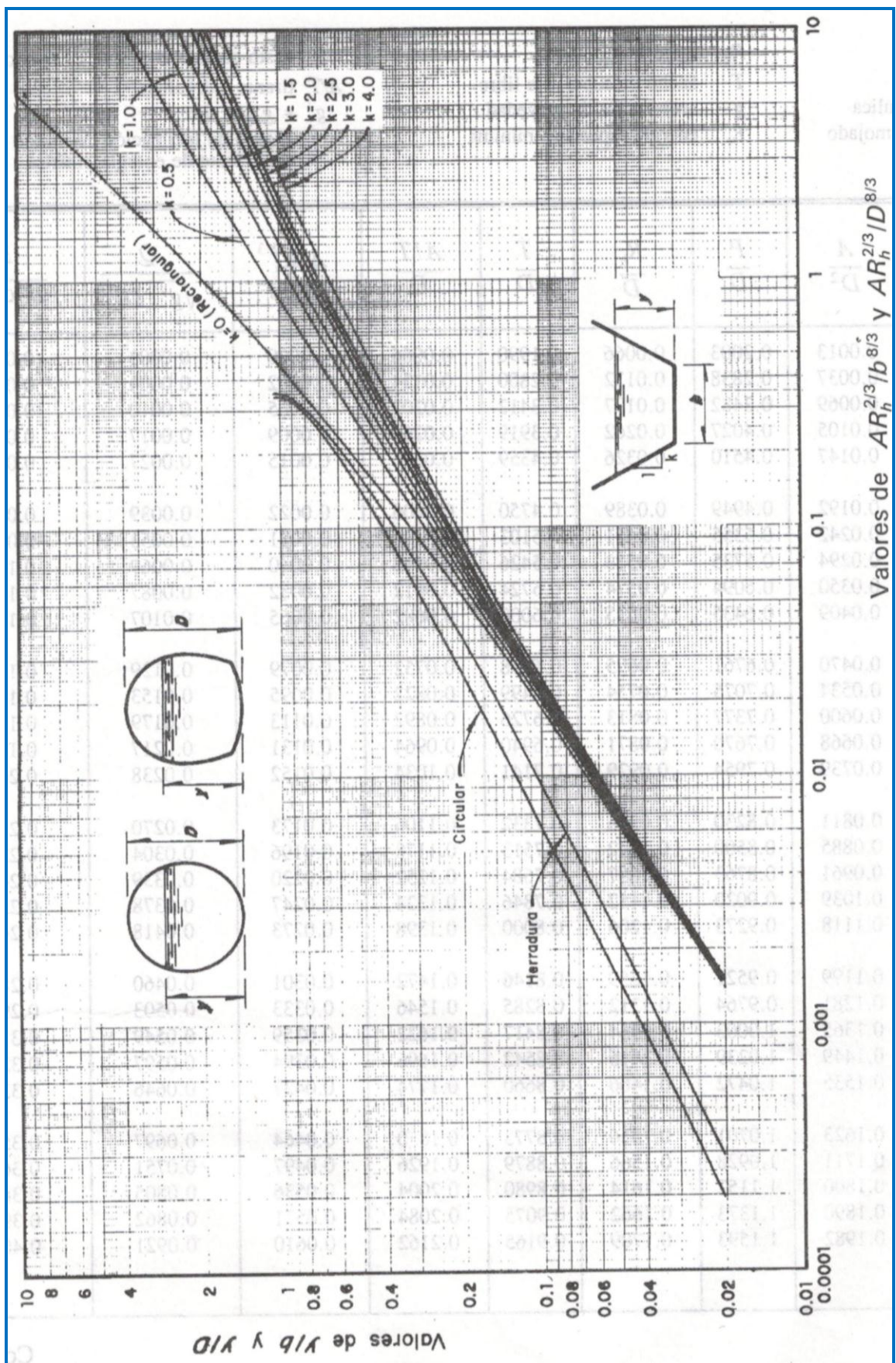


Figura 2.1 Curvas para determinar el tirante normal según Chow y Sotelo.

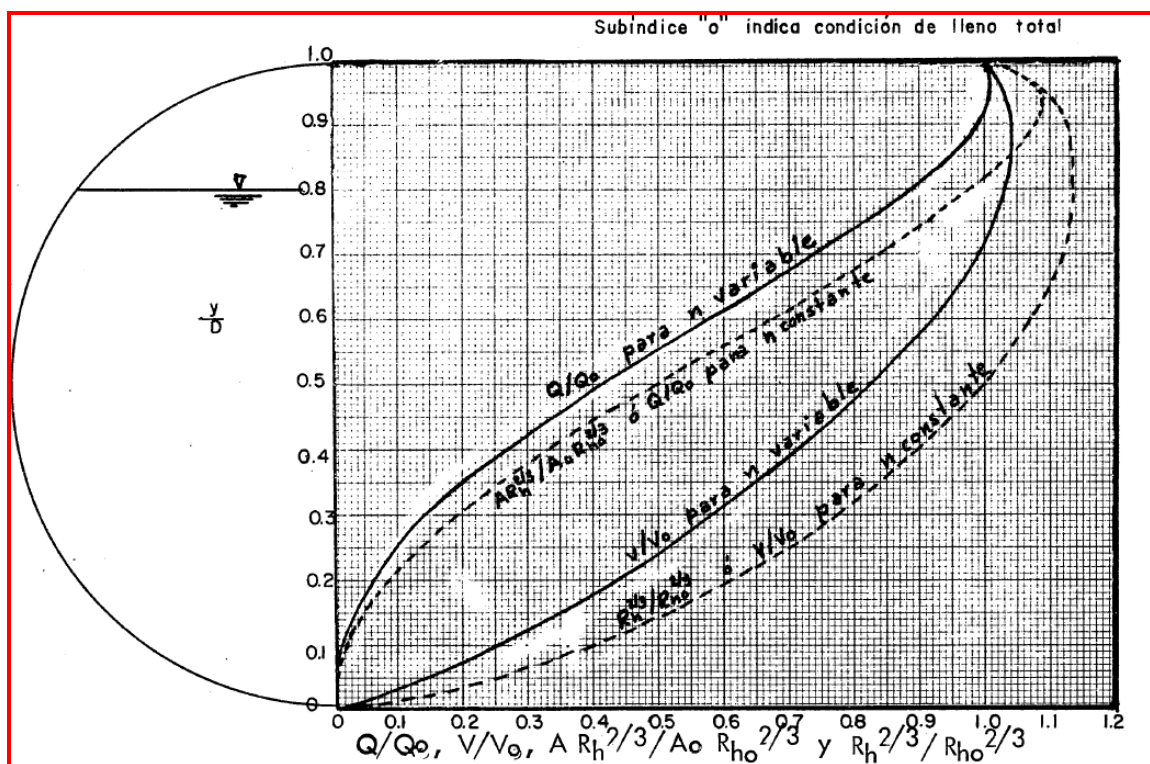


Figura 2.2. Características del flujo uniforme en un conducto circular.

Diseño de canales no revestidos (sin erosión)

Tabla 2.5. Taludes recomendables en canales construidos en varias clases de material

<u>Material</u>	<u>Talud</u>
Roca sana no estratificada	0 a 0.25
Roca estratificada ligeramente alterada	0.25 a 0.5
Rocas alteradas, tepetate duro	1
Grava angulosa	1
Arcilla densa o tierra con revestimiento de concreto	0.5 a 1
Suelo limo-arenoso con grava gruesa	1 a 1.5
Areniscas blandas	1.5 a 2
Limo arcilloso	0.75 a 1
Limo arenoso	1.5 a 2
Material poco estable, arena tierras arenosas, etc.	2
Arcilla saturada	3

Tabla 2.6. Velocidad y esfuerzo tangencial máximos permisibles por Fortier y Scobey para distintos materiales en canales rectos, de pendiente pequeña y después de años de uso.

Material	n	Agua limpia		Agua que transporta sedimento coloidal	
		V en m/s	τ en N/m^2 *	V en m/s	τ en N/m^2 *
Arena fina, coloidal.	0.020	0.46	1.295	0.76	3.597
Marga arenosa, no coloidal.	0.020	0.53	1.774	0.76	3.597
Sedimento margoso, no coloidal.	0.020	0.61	2.302	0.91	5.275
Sedimento aluvial, no coloidal	0.020	0.61	2.302	1.07	7.193
Tierra común, firme	0.020	0.76	3.597	1.07	7.193
Arena volcánica	0.020	0.76	3.597	1.07	7.193
Arcilla dura, muy coloidal	0.025	1.14	12.469	1.52	22.060
Limo aluvial, coloidal	0.025	1.14	12.469	1.52	22.060
Pizarras, arena cementada con fango o con roca volcánica	0.025	1.83	32.131	1.83	32.131
Grava fina	0.020	0.76	3.597	1.52	15.346
Tierra graduada de arcilla a guijarros, no coloidal	0.030	1.14	18.223	1.52	31.651
Limos graduados hasta piedrillas, coloidal	0.030	1.22	20.621	1.68	38.365
Grava gruesa, no coloidal	0.025	1.22	14.387	1.83	32.131
Piedrillas y guijarros	0.035	1.52	43.640	1.68	52.752

* Los valores de τ se multiplican por 0.10197 para convertirlos en kg/m^2 .

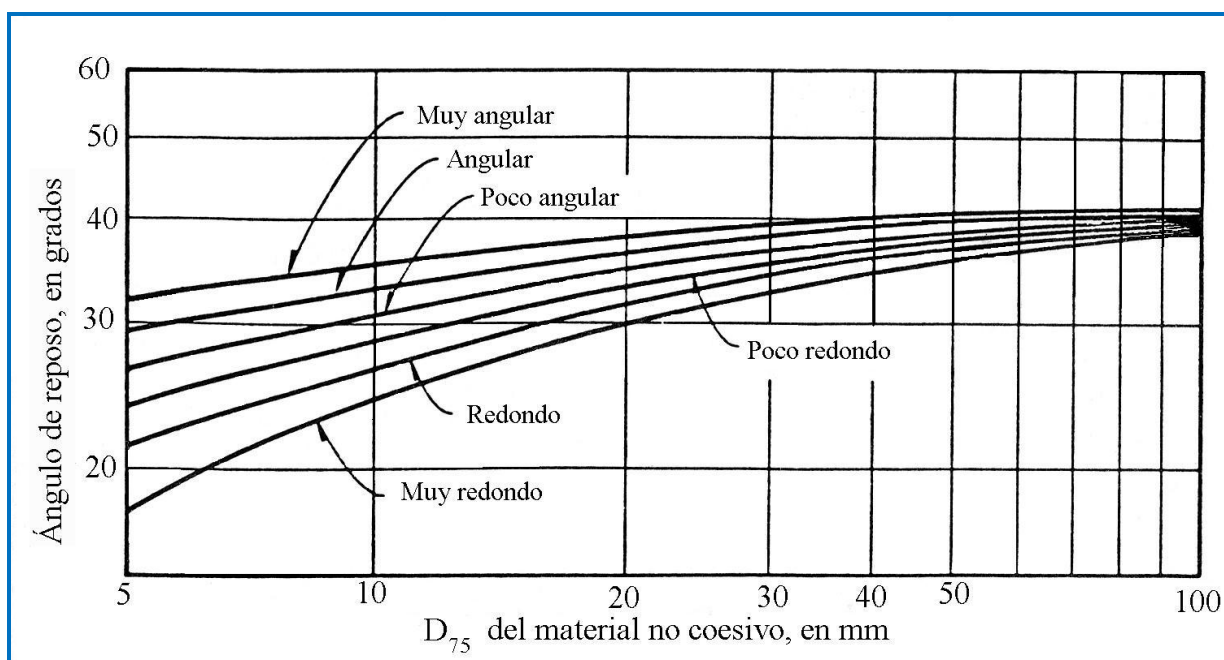


Figura 2.3. Ángulo de reposo ϕ de un suelo no cohesivo en función del diámetro de sus partículas.

Método de Newton-Raphson.

Cálculo de:	Función F	Sección	Derivada F'	Método
Tirante Normal Flujo uniforme (ec. De Manning) Datos: Q, n, S_0, b, k ó D Incógnita: y	$F = AR_h^{2/3} - \frac{Qn}{S_0^{1/2}}$	Trapecial Rectangular ($k=0$) Triangular ($b=0$)	$F' = \frac{R_h^{2/3}}{3} \left(5T - 4R_h \sqrt{1+k^2} \right)$	y_i A_i T_i P_i R_{hi} F F' y_{i+1} $y_{i+1} = y_i - \left(\frac{F}{F'} \right)$
		Circular	$F' = \frac{R_h^{2/3}}{3} \left(5T - \frac{2R_h}{\sqrt{\frac{y}{D} \left(1 - \frac{y}{D} \right)}} \right)$	y_i θ_i A_i T_i P_i R_{hi} F F' y_{i+1} $y_{i+1} = y_i - \left(\frac{F}{F'} \right)$
Ancho o ampliaciones b Flujo uniforme (ec. De Manning) Datos: Q, n, S_0, k, y Incógnita: b		Trapecial Rectangular ($k=0$)	$F' = \frac{R_h^{2/3}}{3} (5y - 2R_h)$	b_i A_i P_i R_{hi} F F' b_{i+1} $b_{i+1} = b_i - \left(\frac{F}{F'} \right)$
Diámetro D Flujo uniforme (ec. De Manning) Datos: Q, n, S_0, y Incógnita: D		Circular	$F' = \frac{R_h^{2/3}}{3} \left[5 \left(2 \frac{A}{D} - y \sin \theta \right) - 2R_h \left(\theta - \frac{2}{\sin \theta} \frac{y}{D} \right) \right]$ donde: $\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2y}{D} \right)$	D_i θ_i A_i P_i R_{hi} F F' D_{i+1} $D_{i+1} = D_i - \left(\frac{F}{F'} \right)$

3. Energía específica y régimen crítico

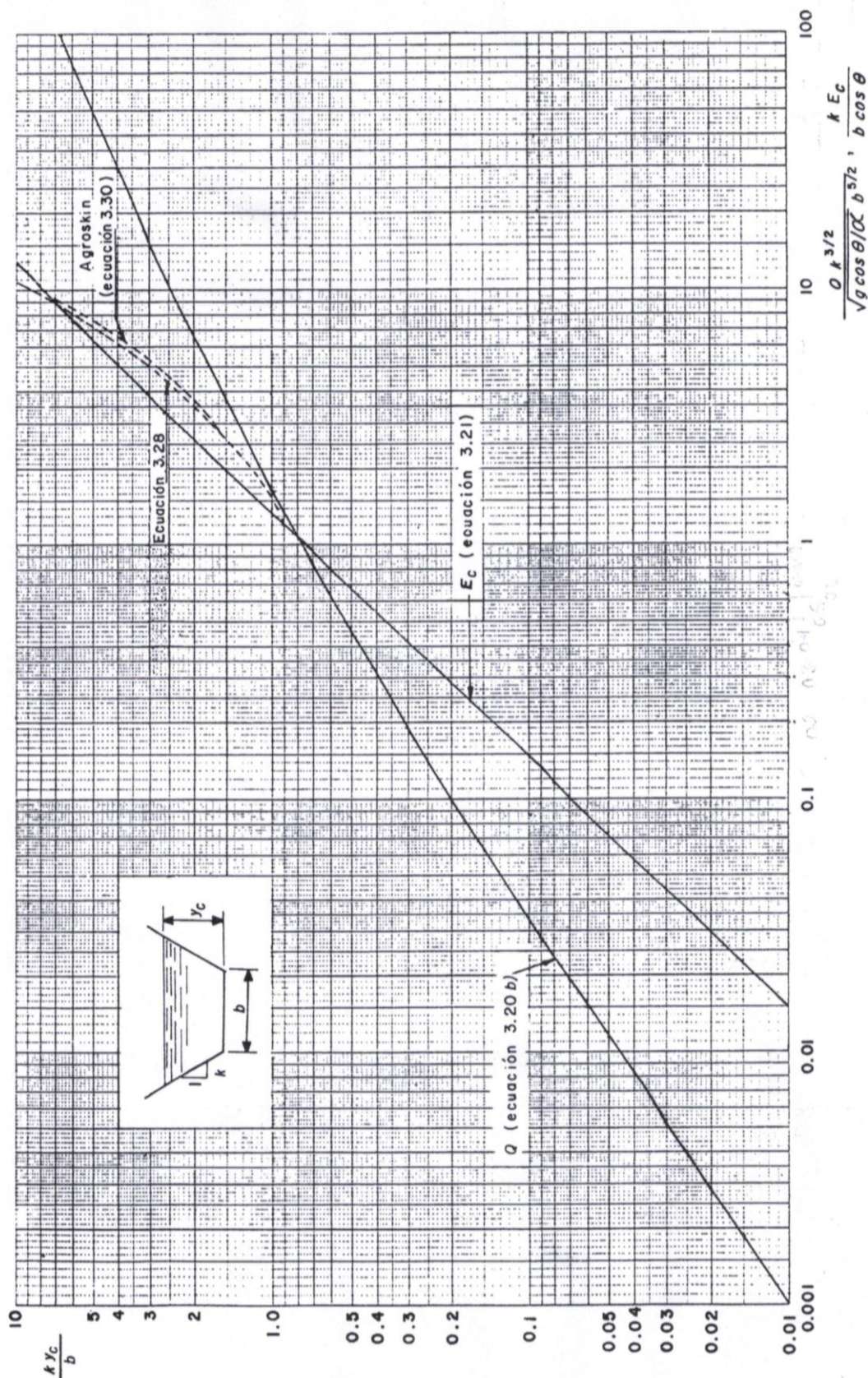


Figura 3.11. Curvas para determinar el tirante crítico y la energía específica mínima en secciones trapeciales

Figura 3.1 Curvas para determinar el tirante crítico y la energía específica mínima en secciones trapeciales

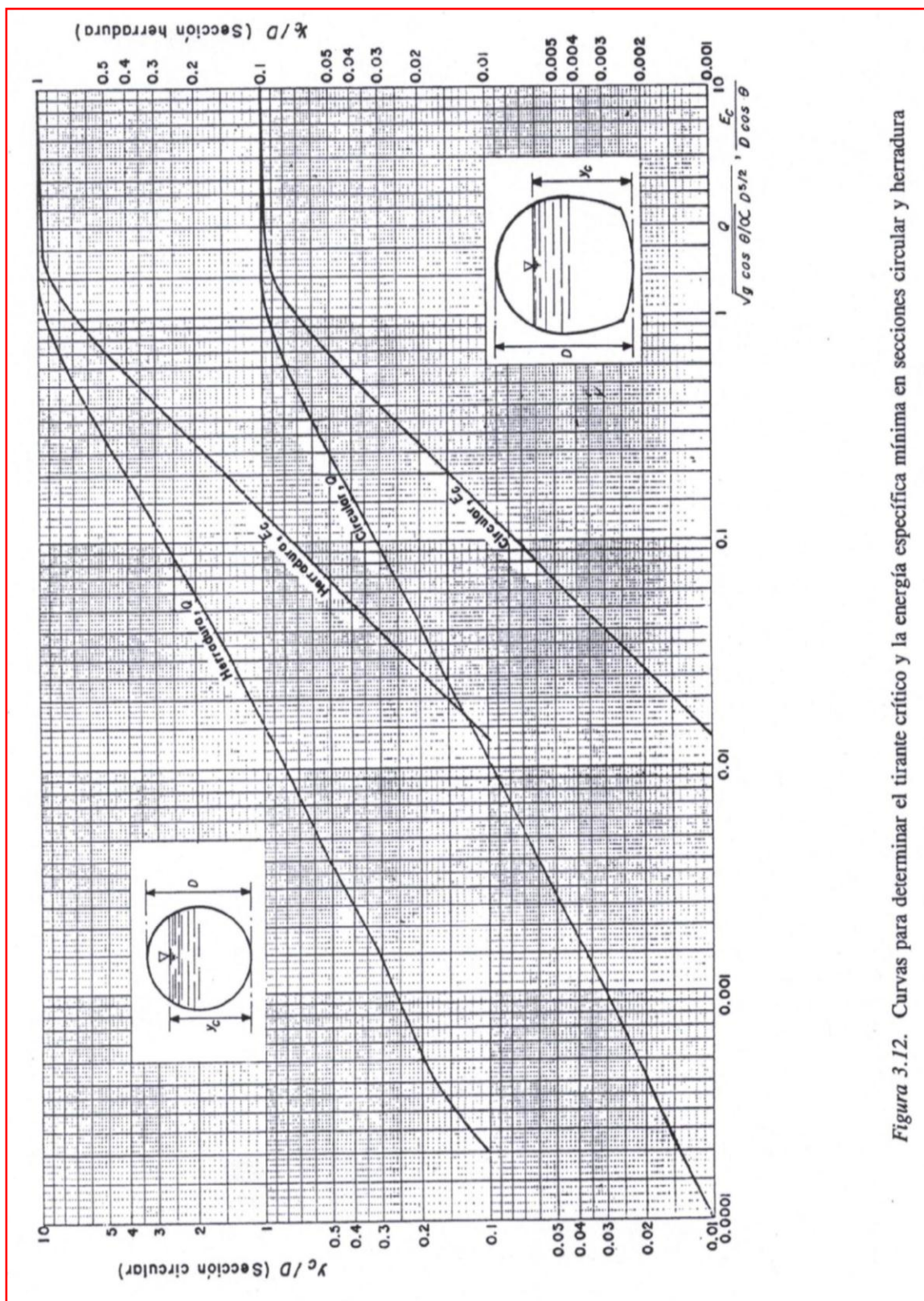


Figura 3.12. Curvas para determinar el tirante crítico y la energía específica mínima en secciones circular y herradura

Figura 3.2. Curvas para determinar el tirante crítico y la energía específica mínima en secciones circulares

Método de Newton-Raphson.

Cálculo de:	Función F	Sección	Derivada F'	Método
Tirante crítico Datos: $Q, b, k, \text{ ó } D$ Incógnita: y_C	$F = \frac{A_C^3}{T_C} - \frac{Q^2}{g}$	Trapezoidal	$F' = 3A^2 - \frac{A^3}{T^2} (2k)$	y_{Ci} A_{Ci} T_{Ci} F F' y_{Ci+1} $y_{Ci+1} = y_{Ci} - \left(\frac{F}{F'} \right)$
		Rectangular	-	$y_C = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}}$
		Triangular	-	$y_C = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{k^2 g}}$
		Circular	$F' = 3A^2 - \frac{A^3}{T^2} \left(\frac{1 - \frac{2y}{D}}{\sqrt{\frac{y}{D} \left(1 - \frac{y}{D} \right)}} \right)$	y_{Ci} θ_i A_{Ci} T_{Ci} F F' y_{Ci+1} $y_{Ci+1} = y_{Ci} - \left(\frac{F}{F'} \right)$
Tirante alterno Datos: Q, E_0 y geometría. E_0 es la energía del tirante conocido con la geometría y gasto dados, Incógnita: y	$F = \left(y + \frac{Q^2}{A^2 2g} \right) - E_0$	Trapezoidal Rectangular Triangular Circular	$F' = (1 - F_r^2)$ donde F_r y es el número de Froude	y_i A_i T_i F_{ri} F F' y_{i+1} $y_{i+1} = y_i - \left(\frac{F}{F'} \right)$

Bibliografía:

Sotelo Ávila. G. Hidráulica de canales. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2001.

Sotelo Ávila. G. Apuntes de Hidráulica II. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 1997.

4. Salto Hidráulico y función Momentum.

CÁLCULO DE CONJUGADOS EN UN SALTO HIDRÁULICO

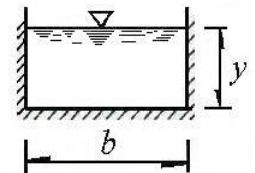
GEOMETRÍA	ÁREA A	Profundidad del centroide z_G	Momentum $M = Az_G + \frac{Q^2}{gA}$
Trapezoidal	$(b + ky)y$	$\frac{y}{6} \left[\frac{3b + 2ky}{b + ky} \right]$	$[(b + ky)y] \frac{y}{6} \left[\frac{3b + 2ky}{b + ky} \right] + \frac{Q^2}{g(b + ky)y}$
Rectangular ($k = 0$ en la trapezoidal)	by	$\frac{y}{2}$	$\frac{by^2}{2} + \frac{Q^2}{gby}$
Triangular ($b = 0$ en la trapezoidal)	ky^2	$\frac{y}{3}$	$\frac{ky^3}{3} + \frac{Q^2}{gky^2}$
Circular	$(\theta - \sin \theta \cos \theta) \frac{D^2}{4}$	$\frac{D^3}{12} \frac{\sin^3 \theta}{A} - \frac{D}{2} \cos \theta$	$\frac{D^3}{24} (3 \sin \theta - \sin^3 \theta - 3 \theta \cos \theta) + \frac{Q^2}{g(\theta - \sin \theta \cos \theta) \frac{D^2}{4}}$
	$\left(\theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) \frac{D^2}{4}$		

Formas alternativas para calcular el conjugado. Datos: Q , geometría y un tirante conjugado

SECCIÓN RECTANGULAR:

Conocido el tirante conjugado menor (y_1) se calcula el número de Froude

$$F_{r1} = \frac{Q}{A_1 \sqrt{g A_1 / T_1}}$$



Y el tirante conjugado mayor se obtiene de forma directa:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_{r1}^2} - 1 \right)$$

Conocido el tirante conjugado mayor (y_2) se calcula el número de Froude

$$F_{r2} = \frac{Q}{A_2 \sqrt{g A_2 / T_2}}$$

Y el tirante conjugado menor se obtiene de forma directa:

$$y_1 = \frac{y_2}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_{r2}^2} - 1 \right)$$

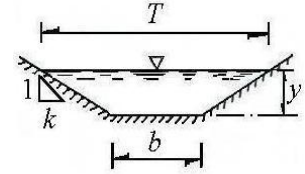
SECCIÓN TRAPEZIAL:

Conocido el tirante conjugado menor (y_1) se calculan los parámetros t_1 y F_{M1} :

$$t_1 = \frac{b}{k y_1}; \quad F_{M1} = \frac{Q}{\sqrt{g} k y_1^{5/2}}$$

Estos parámetros se sustituyen en el polinomio de cuarto grado:

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^4 + \left(\frac{5}{2}t_1 + 1\right)\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 + \left(\frac{3}{2}t_1^2 + \frac{5}{2}t_1 + 1\right)\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{3}{2}t_1^2 + t_1 - \frac{3F_{M1}^2}{t_1 + 1}\right)\left(\frac{y_2}{y_1}\right) - 3F_{M1}^2 = 0$$



La solución de este polinomio tiene una sola raíz positiva $\left(\frac{y_2}{y_1}\right) \Rightarrow$ raíz positiva, de donde se obtiene el tirante conjugado mayor y_2 .

Conocido el tirante conjugado mayor (y_2) se calculan los parámetros t_2 y F_{M2} : $t_2 = \frac{b}{k y_2}$; $F_{M2} = \frac{Q}{\sqrt{g} k y_2^{5/2}}$

Estos parámetros se sustituyen en el polinomio de cuarto grado:

$$\left(\frac{y_1}{y_2}\right)^4 + \left(\frac{5}{2}t_2 + 1\right)\left(\frac{y_1}{y_2}\right)^3 + \left(\frac{3}{2}t_2^2 + \frac{5}{2}t_2 + 1\right)\left(\frac{y_1}{y_2}\right)^2 + \left(\frac{3}{2}t_2^2 + t_2 - \frac{3F_{M2}^2}{t_2 + 1}\right)\left(\frac{y_1}{y_2}\right) - 3F_{M2}^2 = 0$$

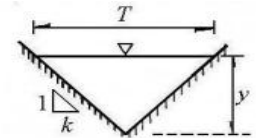
La solución de este polinomio tiene una sola raíz positiva $\left(\frac{y_1}{y_2}\right) \Rightarrow$ raíz positiva, de donde se obtiene el tirante conjugado mayor y_2 .

SECCIÓN TRIANGULAR:

Conocido el tirante conjugado menor (y_1) el parámetro $t = 0$ y $F_{M1} = \frac{Q}{\sqrt{g} k y_1^{5/2}}$

Estos parámetros se sustituyen en el polinomio de cuarto grado:

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^4 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 - 3F_{M1}^2\left(\frac{y_2}{y_1}\right) - 3F_{M1}^2 = 0$$



La solución de este polinomio tiene una sola raíz positiva $\left(\frac{y_2}{y_1}\right) \Rightarrow$ raíz positiva, de donde se obtiene el tirante conjugado mayor y_2 .

Conocido el tirante conjugado mayor (y_2) se calcula $F_{M2} = \frac{Q}{\sqrt{g} k y_2^{5/2}}$

Estos parámetros se sustituyen en el polinomio de cuarto grado:

$$\left(\frac{y_1}{y_2}\right)^4 + \left(\frac{y_1}{y_2}\right)^3 + \left(\frac{y_1}{y_2}\right)^2 - 3F_{M2}^2\left(\frac{y_1}{y_2}\right) - 3F_{M2}^2 = 0$$

La solución de este polinomio tiene una sola raíz positiva $\left(\frac{y_1}{y_2}\right) \Rightarrow$ raíz positiva, de donde se obtiene el tirante conjugado mayor y_2 .

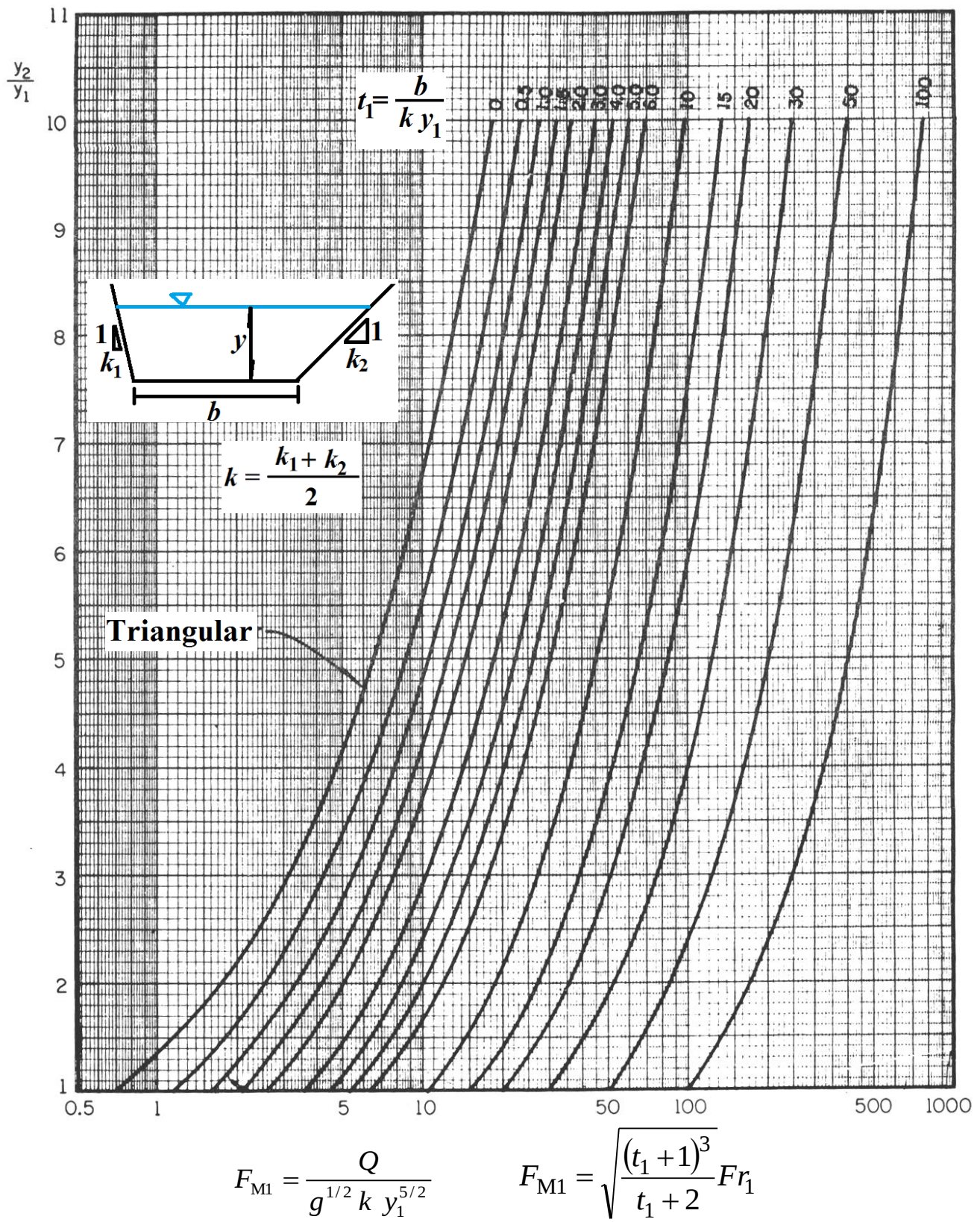


Figura 4.1. CANALES DE SECCIÓN TRAPEZIAL (TRIANGULAR INCLUIDA)
Gráfica para determinar el tirante subcrítico, conocido el régimen supercrítico

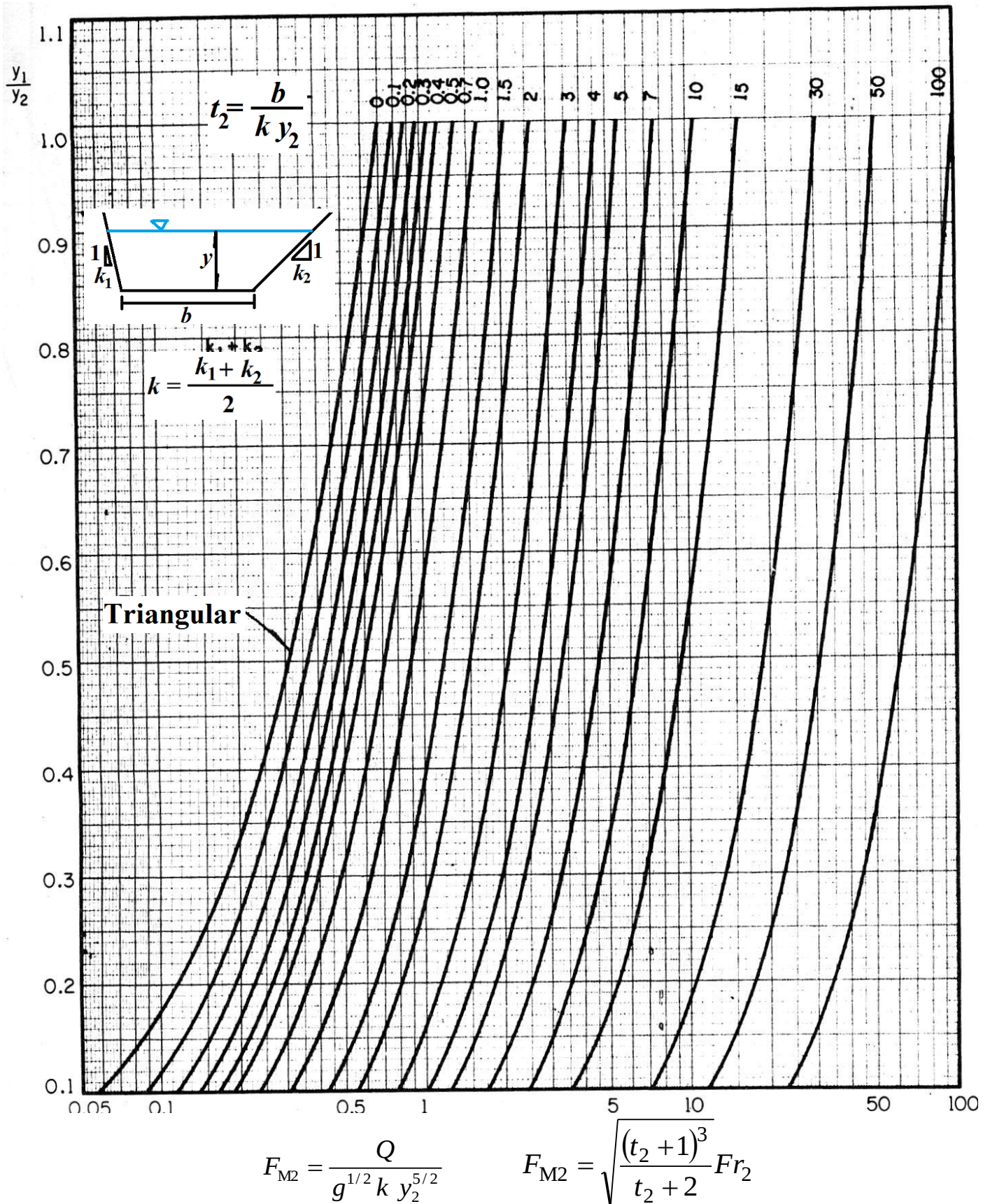
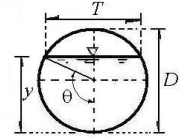


Figura 4.2. CANALES DE SECCIÓN TRAPEZIAL (TRIANGULAR INCLUIDA)
Gráfica para determinar el tirante supercrítico, conocido el régimen subcrítico

SECCIÓN CIRCULAR

Conocido el tirante conjugado menor (y_1) se calculan los parámetros



$$\theta_1 ; m_1 ; k'_1 : \quad \theta_1 = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2y_1}{D} \right); \quad m_1 = \frac{A_1}{D^2}; \quad k'_1 = 1 - \frac{1}{2} \frac{D}{y_1} + \frac{2 \left(1 - \frac{y_1}{D} \right)^{3/2} \left(\frac{y_1}{D} \right)^{1/2}}{3m_1}$$

Se calcula el parámetro $\frac{Q}{\sqrt{g} y_1^{5/2}}$; y con $\frac{y_1}{D}$ se verifica en la gráfica de la figura 3 si el conjugado mayor llena la sección circular.

- Si la sección no se llena, entonces el salto hidráulico ocurre dentro de del canal y el conjugado mayor es menor al diámetro. Se debe calcular el tirante y_2 que satisfaga la siguiente igualdad

$$\frac{Q^2}{g y_1^5} = \frac{m_1 m_2 k'_2 \left(\frac{y_2}{y_1} \right) - m_1^2 k'_1}{\left(\frac{y_1}{D} \right)^4 \left(1 - \frac{m_1}{m_2} \right)} \quad \text{Ecuación I}$$

Se sugiere utilizar la gráfica de la figura 4.4 para obtener una primera aproximación del tirante y_2 con el cual se calculará

θ_2 , m_2 , k'_2 , que serán utilizados en la ecuación I. Si no se satisface esta ecuación, se deberá ajustar el valor de y_2 hasta lograr una aproximación del 95% en la igualdad.

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2y_2}{D} \right); \quad m_2 = \frac{A_2}{D^2}; \quad k'_2 = 1 - \frac{1}{2} \frac{D}{y_2} + \frac{2 \left(1 - \frac{y_2}{D} \right)^{3/2} \left(\frac{y_2}{D} \right)^{1/2}}{3m_2}$$

- Si la sección 2 se llena, entonces el conjugado mayor rebasa el diámetro, por lo que la función momentum es:

$$k'_1 y_1 A_1 + \frac{Q^2}{g A_1} = H A_0 + \frac{Q^2}{g A_0}$$

donde A_0 es el área de la sección llena, para el caso circular: $A_0 = \frac{\pi D^2}{4}$

Y la única incógnita es H , por lo que $y_2 = H + D/2$

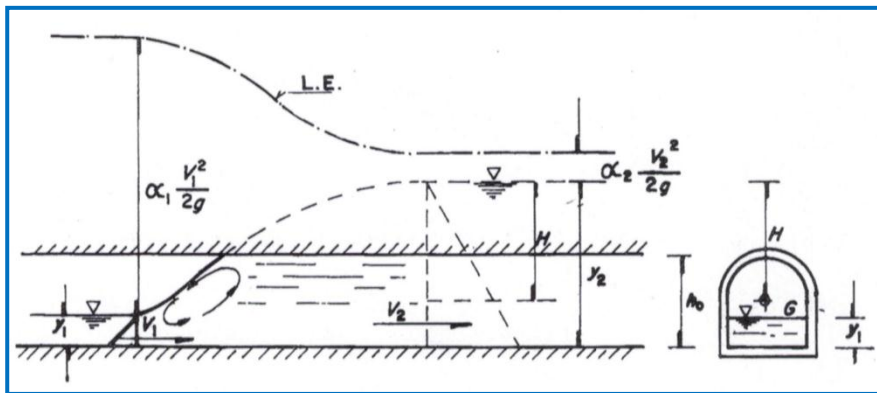


Figura 4.3. Salto Hidráulico incompleto en un conducto abovedado.

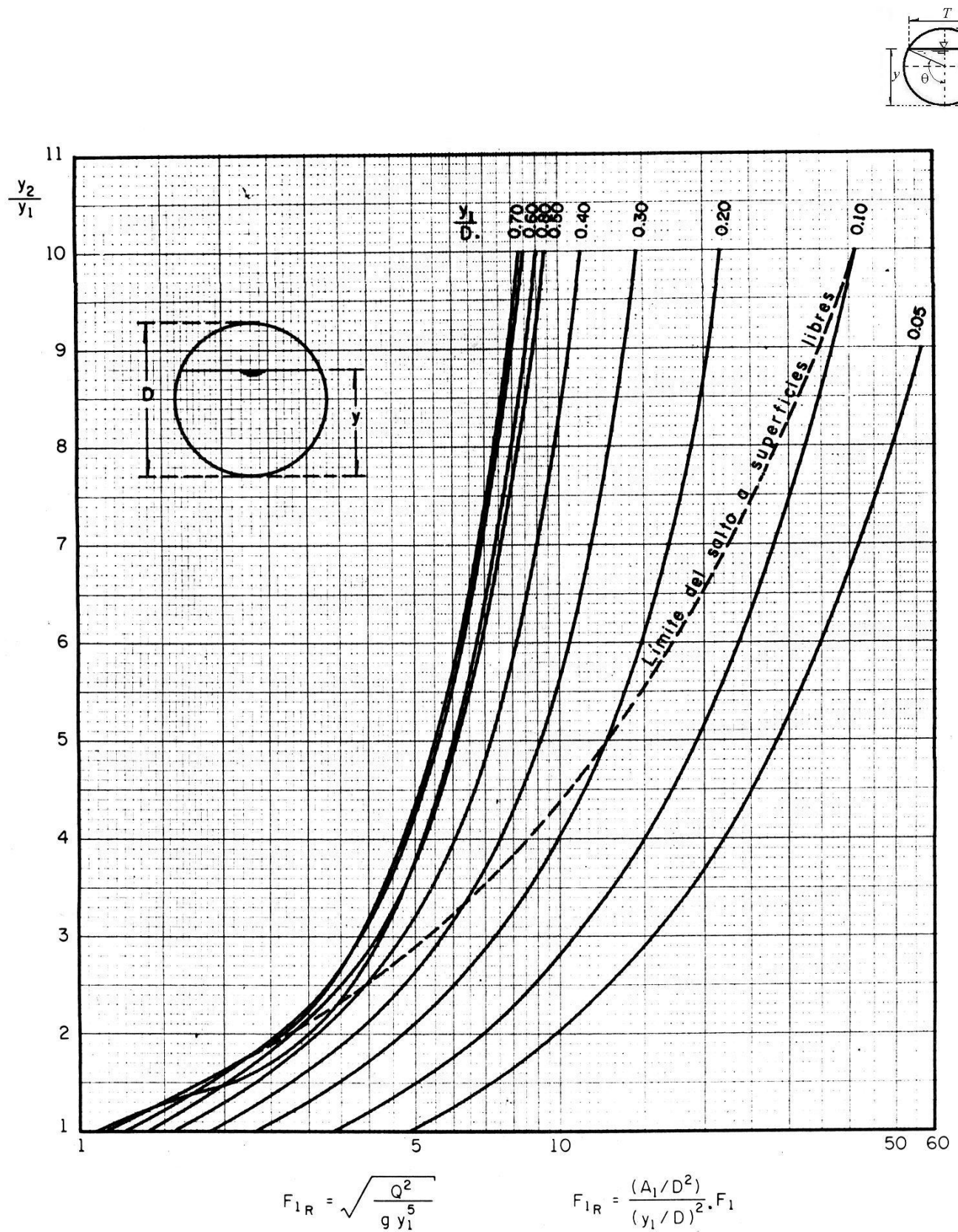
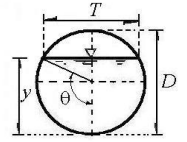


Figura 4.4 CANALES DE SECCIÓN CIRCULAR.
 Gráfica para determinar el tirante subcrítico, conocido el régimen supercrítico

Conocido el tirante conjugado mayor (y_2) se calculan los parámetros θ_2 ; m_2 ; k'_2 :

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2y_2}{D}\right); \quad m_2 = \frac{A_2}{D^2}; \quad k'_2 = 1 - \frac{1}{2} \frac{D}{y_2} + \frac{2\left(1 - \frac{y_2}{D}\right)^{3/2} \left(\frac{y_2}{D}\right)^{1/2}}{3m_2}$$



Se debe calcular el tirante y_1 que satisfaga la siguiente igualdad

$$\frac{Q^2}{g y_2^5} = \frac{m_2^2 k'_2 - m_1 m_2 k'_1 \left(\frac{y_1}{y_2}\right)}{\left(\frac{y_2}{D}\right)^4 \left(\frac{m_2}{m_1} - 1\right)} \quad \text{Ecuación II}$$

Se sugiere utilizar la gráfica de la figura 4.5 para obtener una primera aproximación del tirante y_1 ; para ello se utiliza el

parámetro $\frac{Q}{\sqrt{g} y_2^{5/2}}$

Con el valor de y_1 obtenido de la gráfica de la figura 4.5 se calculará θ_1 , m_1 , k'_1 , que serán utilizados en la ecuación II. Si no se satisface esta ecuación, se deberá ajustar el valor de y_1 hasta lograr una aproximación del 95% en la igualdad.

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2y_1}{D}\right); \quad m_1 = \frac{A_1}{D^2}; \quad k'_1 = 1 - \frac{1}{2} \frac{D}{y_1} + \frac{2\left(1 - \frac{y_1}{D}\right)^{3/2} \left(\frac{y_1}{D}\right)^{1/2}}{3m_1}$$

Otra forma de expresar la función Momentum en términos del θ es

$$M = \frac{D^3}{24} (3\sin\theta - \sin^3\theta - 3\theta\cos\theta) + \frac{Q^2}{g(\theta - \sin\theta\cos\theta)\frac{D^2}{4}}$$

donde: $\theta = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2y}{D}\right)$

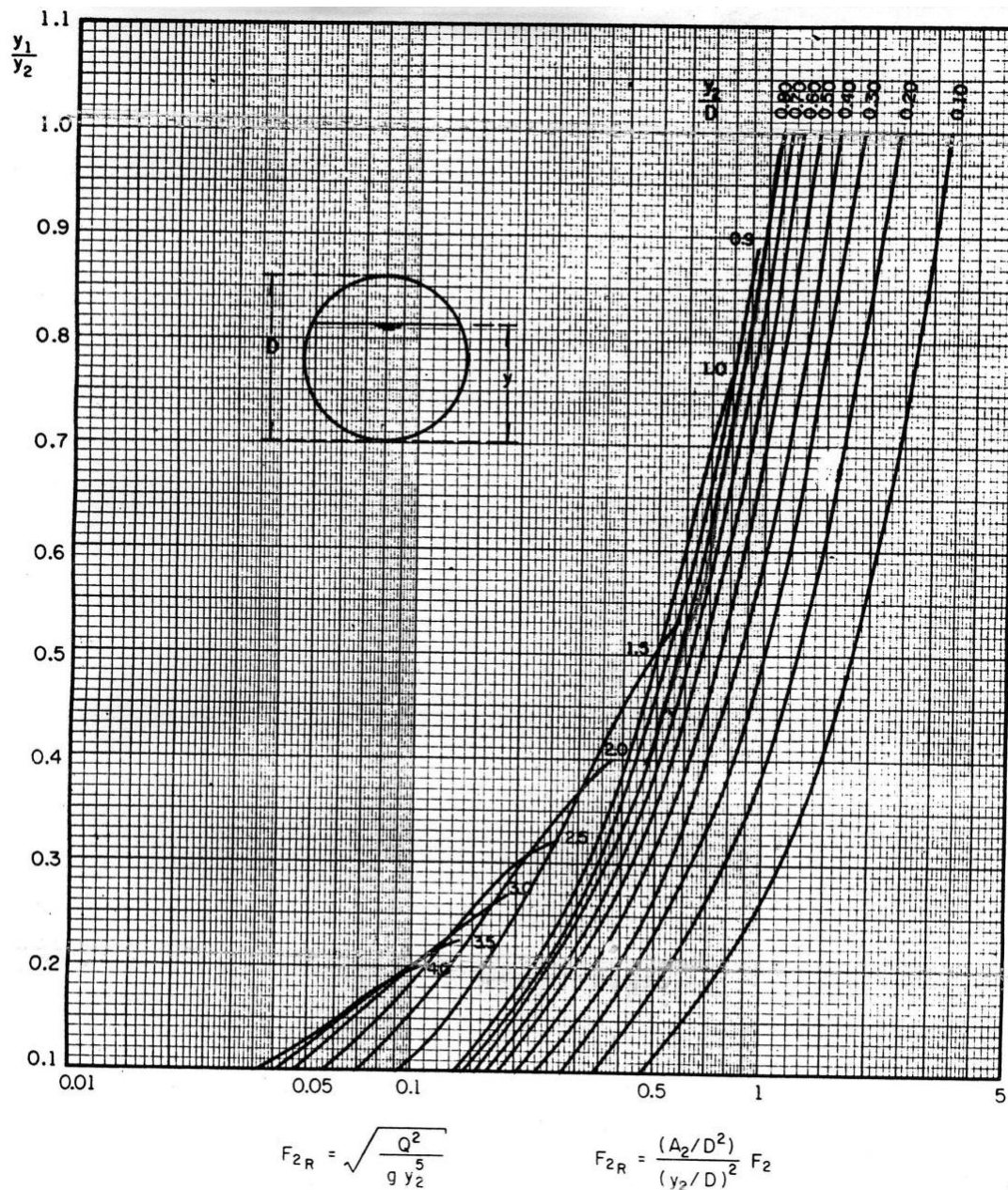
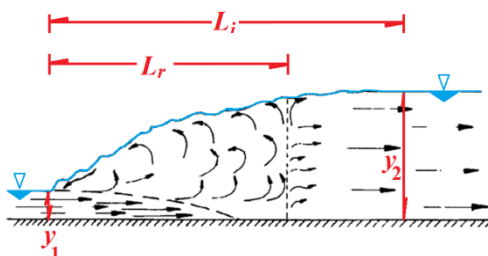


Figura 4.5 CANALES DE SECCIÓN CIRCULAR.
Gráfica para determinar el tirante supercrítico, conocido el régimen subcrítico

LONGITUD DEL SATLO HIDRÁULICO



LONGITUD DEL SATLO HIDRÁULICO

Tabla 4.1 Ecuaciones experimentales para el cálculo de la longitud del salto hidráulico en canales rectangulares horizontales

Autor	Ecuación	Observaciones
Fawer	$l = \frac{1.2 (2 \pi) y_2}{\sqrt{2.5 [(y_2/y_1)^3 - 1]}}$	Longitud de la onda en un salto ondular, según figura 4.21a, referencia 10.
Silvester	$L_j / y_1 = 9.75 (F_1 - 1)^{1.01}$	Ecuación original (referencia 8).
Peterka	$L_j / y_2 = 3.491 + 0.73 F_1 - 0.06 F_1^2 + 0.001441 F_1^3$	Ecuación aproximada (referencia 6).
Woyciki	$L_j / (y_2 - y_1) = 8 - 0.05 (y_2/y_1)$ $L_j / y_1 = 4.05 \sqrt{1 + 8 F_1^2} - 0.1 F_1^2 - 12.05$	Ecuación original (referencia 11). Ecuación deducida de la original.
Smetana y Tizon	$L_j / y_1 = 6 [(y_2/y_1) - 1]$ $L_j / y_1 = 3 [\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 3]$	Ecuación original (referencia 12). Ecuación deducida de la original.
Pavlovsky	$L_r / y_1 = 2.5 [1.9 (y_2/y_1) - 1]$ $L_r / y_1 = 2.375 \sqrt{1 + 8 F_1^2} - 4.875$	Ecuación original (referencia 13). Ecuación deducida de la original.
Ludin	$(y_2 - y_1)/L_r = [1/4.5] - [1/(6F_1)]$ $L_r / y_1 = [13.5 F_1 / (6F_1 - 4.5)] [\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 3]$	Ecuación original (referencia 12). Ecuación deducida de la original.
Safranez	$L_r / y_1 = 6 F_1$	Ecuación original (1929) para $1.72 < F_1 < 19.1$ (referencia 14).
Pietrkowsky	$L_r / y_1 = 5.9 F_1$	Ecuación original (1932) para $5.5 < F_1 < 19.8$ (referencia 15).
Rajaratnam	$L_j / y_2 = 6.2 \tanh (F_1/3)$ $L_j / y_2 \approx 6$ $L_j / y_1 \approx 3 [\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1]$	Ecuación original, para $2 < F_1 < 12$. Ecuación aproximada, para $4 < F_1 < 16$. Ecuación deducida, para $4 < F_1 < 16$. Referencia 18 (1967).
Sarma y Newnham	$L_r / y_1 = 6.73 (F_1 - 1)$ $L_j / L_r = 1.3$	Ecuaciones originales, para $1.21 < F_1 < 3.79$. Referencia 19 (1973).
Malik	$L_r / y_1 = 6.2 F_1 - 10.4$ $+ [5 F_1 - 7.5 + 0.17 (F_1 - 3)^4] \frac{y_1}{b}$	Ecuación deducida a partir de observaciones, para $3 \leq F_1 \leq 6$, (referencia 20) (1972).
Bretz	$L_r / y_1 = 6.29 F_1 - 3.59$	Ecuación original, para $3.3 < F_1 < 15.3$. Referencia 7 (1987).
Hager, Bremen y Kawagoshi	$L_r / y_1 = 160 \tanh (F_1/20) - 12$ $L_r / y_1 = 100 \tanh (F_1/12.5) - 12$ $L_r / y_1 \approx 8 (F_1 - 1.5)$ $L_r = 6 y_2$	Para $2 < F_1 < 16$, y $y_1/b < 0.10$. Para $2 < F_1 < 12$, y $0.10 < y_1/b < 0.7$. Para $2.5 < F_1 < 8$. Para $4 < F_1 < 12$. Ecuaciones originales (referencia 20) (1990).
Leutheusser, Kartha	$L_r / y_2 \approx 15.7$ después de una rápida $L_r / y_2 \approx 12$ después de una compuerta	Para $3 < F_1 < 14$. L. distancia hasta la sección en que termina la influencia del salto en la distribución de la velocidad. ASCE, JHD, vol. 98, HY8 (1972).

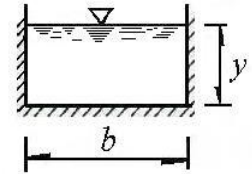


Tabla 4.2. Ecuaciones experimentales más comunes para el cálculo de la longitud del salto hidráulico en canales trapeciales horizontales

Autor	Ecuación	Observaciones
Posey y Hsing (1938)	$\frac{L_j}{y_2} = 5 \left[1 + 4 \left(\frac{2 y_2/y_1 + b/ky_1}{2 + b/ky_1} - 1 \right)^{1/2} \right]$	Representa la media con variaciones de $\pm 5\%$. Conduce a valores de L_j mayores que en un canal rectangular (referencia 23).
Sieñichin (1958)	$\frac{L_j}{y_1} = A \left(\frac{y_2}{y_1} - 1 \right)$	A depende del talud como se indica en la tabla 4.3a. Conduce a valores exagerados de L_j (referencia 24).
Press (1961)	$\frac{L_j}{y_1} = a (F_1 - 1)^c$	a y c dependen del talud como se indica en la tabla 4.3b (referencia 25).
Silvester (1964)	$\frac{L_j}{y_2 - y_1} = 7.1 \left[1 + \frac{10}{b/ky_1} \right]$	Vale para $b/ky_1 > 4$. Produce valores de L_j mayores que la ecuación de Posey y Hsing, $4 < F_1 < 8$ (referencia 8).
Ohtsu (1976)	$\log \left(\frac{L_0}{h_s} \right) = 1.71 \eta + 0.315 k + 1.58$	L_0 longitud definida hasta la sección en que se ha producido toda la pérdida de energía h_s del resalto, η eficiencia del mismo. Vale para $2 < F_1 < 8$. (referencia 26).

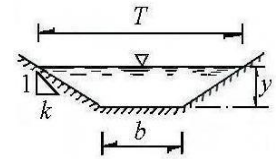


Tabla 4.3. Coeficientes y exponentes en las ecuaciones de la tabla 4.2.

a. Coeficiente A en la ecuación de Sieñichin.

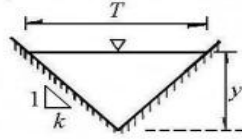
Talud	0	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5
A	5	7.9	9.2	10.6	12.6	15.0

b. Valores de a y c en la ecuación de Press.

Talud	0.5	1.0	2.0
b/ky_1	4.0	8.0	16.0
a	35.0	23.0	17.6
c	0.836	0.885	0.905

LONGITUD DEL SATLO HIDRÁULICO

Longitud del salto hidráulico en canales Triangulares



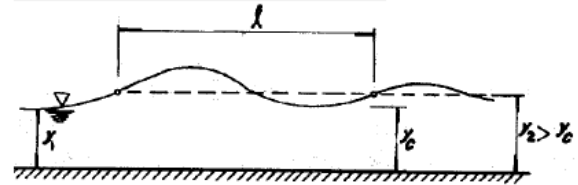
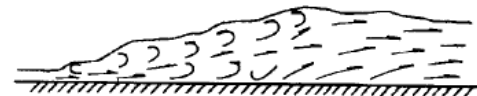
Silvester:

$$L_j = y_1 (4.26) [F_1 - 1]^{0.695}$$

Hager:

$$L_j = 2.4 y_2 \sqrt{k} F_1^{0.4/k}$$

para talud k : $0.4 < k < 1$

TIPOS DE SALTO HIDRÁULICOde acuerdo al número de Froude Fr_1 del conjugado menor.a) Fr_1 entre 1 y 1.7. Salto ondular.b) Fr_1 entre 1.7 y 2.5. Salto débil.c) Fr_1 entre 2.5 y 4.5. Salto oscilante.d) Fr_1 entre 4.5 y 9.0. Salto estable.e) $Fr_1 > 9.0$ Salto fuerte.**NEWTON-RAPHSON**

Cálculo de:	Función F	Sección	Derivada F'	Método							
Tirante conjugado Datos: Q, M_0 y geometría. M_0 es el momentum del tirante conocido con la geometría y gasto dados, Incógnita: y	$F = \left(A z_G + \frac{Q^2}{A g} \right) - M_0$	Trapecial Rectangular Triangular Circular	$F' = A - \frac{Q^2 T}{g A^2}$	<table><tr><td>y_i</td><td>A_i</td><td>z_{Gi}</td><td>T_i</td><td>F</td><td>F'</td><td>y_{i+1}</td></tr></table> $y_{i+1} = y_i - \left(\frac{F}{F'} \right)$	y_i	A_i	z_{Gi}	T_i	F	F'	y_{i+1}
y_i	A_i	z_{Gi}	T_i	F	F'	y_{i+1}					

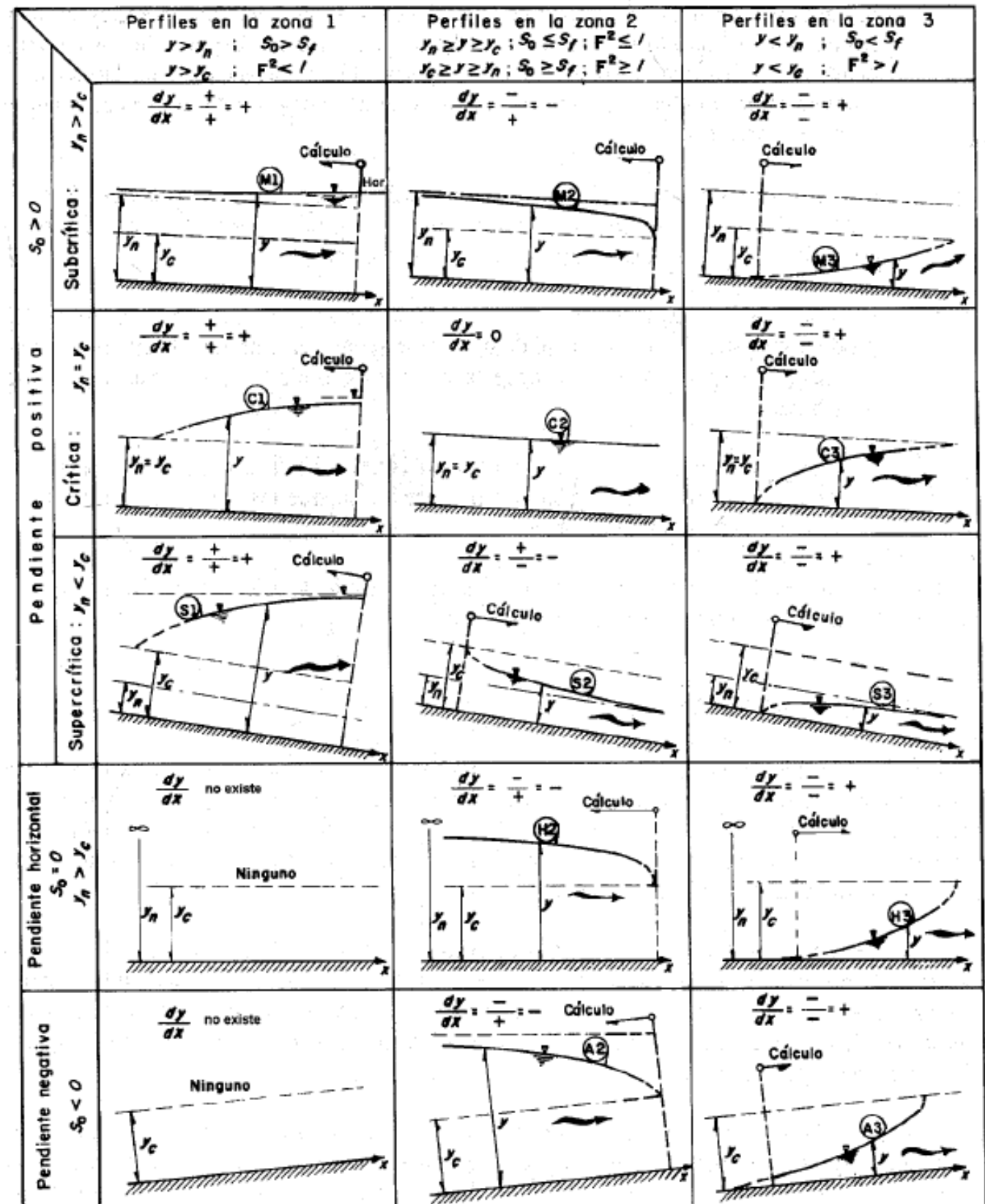


Figura 5.1 Clasificación de los perfiles del flujo gradualmente variado.

Bibliografía:

Sotelo Ávila. G. Hidráulica de canales. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2001.

Sotelo Ávila. G. Apuntes de Hidráulica II. México, UNAM, México, Facultad de Ingeniería, 1997.

Transiciones en régimen subcrítico.

EXPANSIONES Bruscas

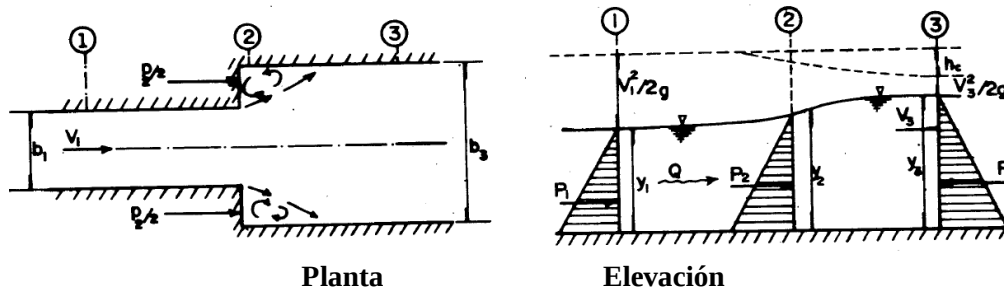


Figura 6.1 Transición brusca en el ancho (expansión)

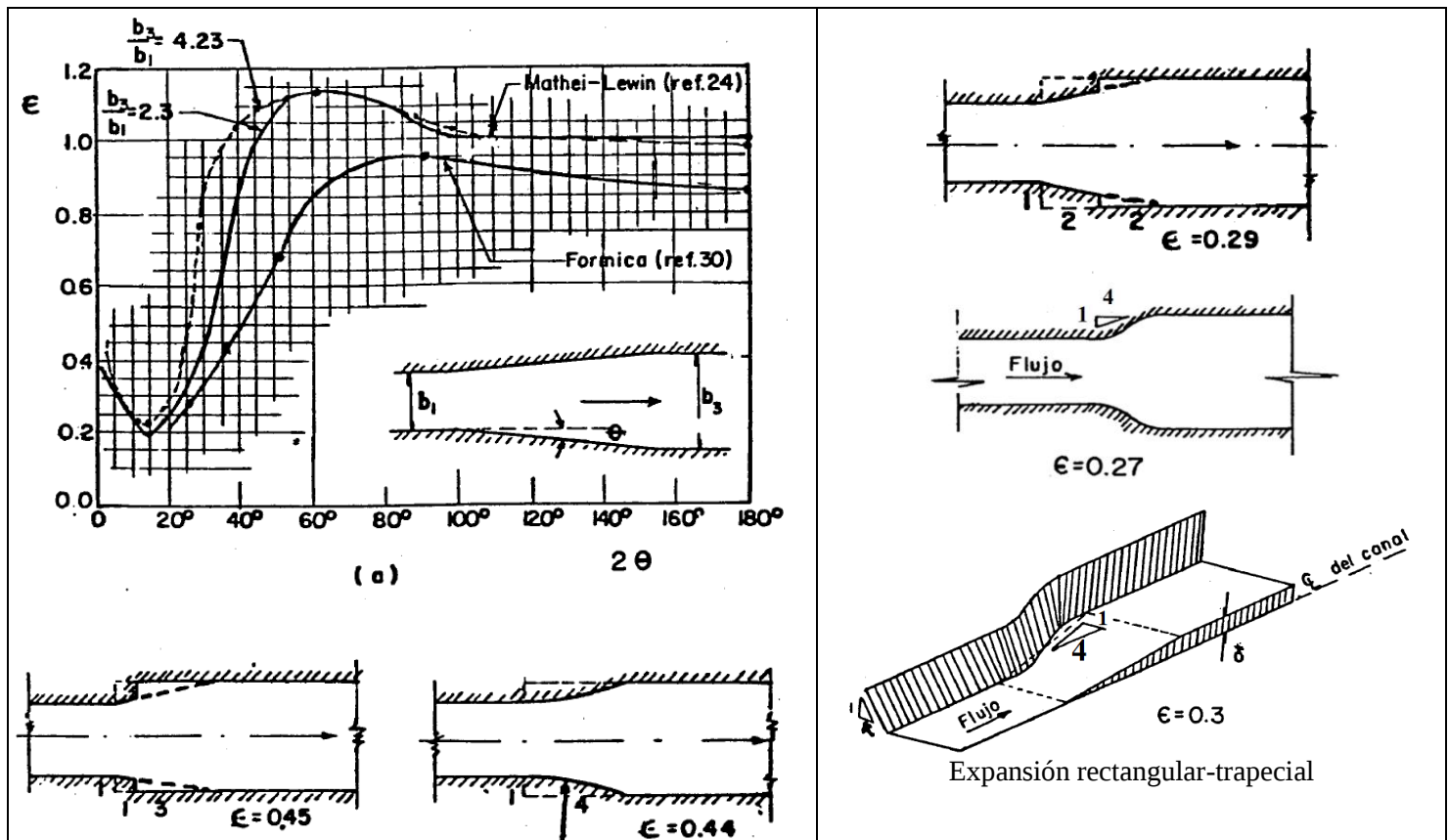
Los experimentos de Formica, indican una pérdida dada por la ecuación

$$h_{\text{local}} = \varepsilon \frac{(V_1 - V_3)^2}{2g}$$

ecuación 6.1

Donde $\varepsilon=0.82$ para expansión brusca de la figura 6.1

Valores de ε para otros tipos expansiones en régimen subcrítico

Figura 6.2 Coeficientes de Pérdida ε en expansiones aplicables a la ecuación 6.1.

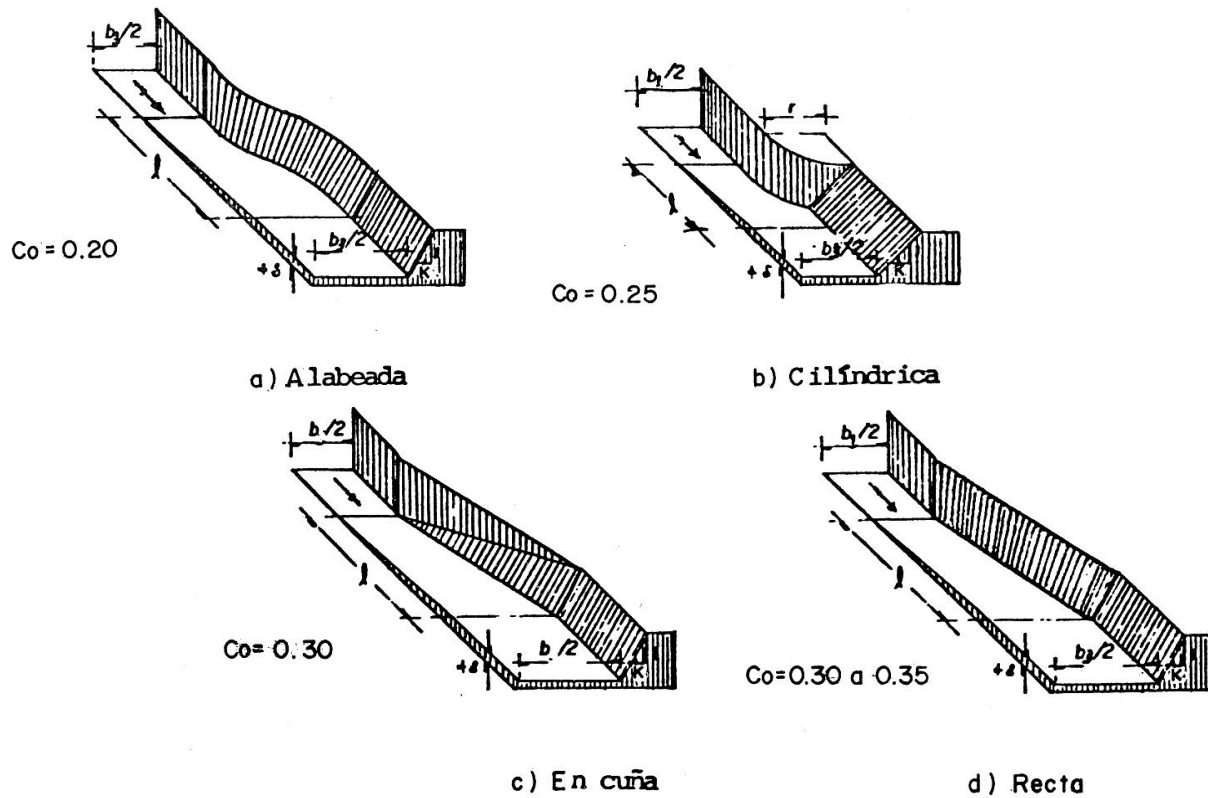
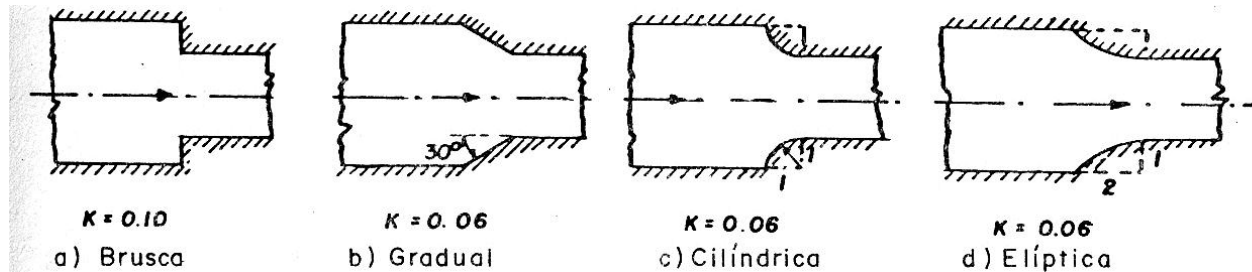
EXPANSIONES GRADUALES

Figura 6.3 Expansiones graduales y coeficientes de pérdida aplicables a la ecuación 6.2

$$h_{\text{expansión}} = C_0 \left(\frac{V_1^2 - V_3^2}{2g} \right) = C_0 \left[\left(\frac{A_3}{A_1} \right)^2 - 1 \right] \frac{V_3^2}{2g} \quad \text{ecuación 6.2}$$

CONTRACCIONES BRUSCASFigura 6.4 Coeficiente de pérdida K en contracciones bruscas de canal rectangular, aplicables a la ecuación 6.3

$$h_{\text{contracción}} = K \frac{V_3^2}{2g} \quad \text{ecuación 6.3}$$

CONTRACCIONES GRADUALES

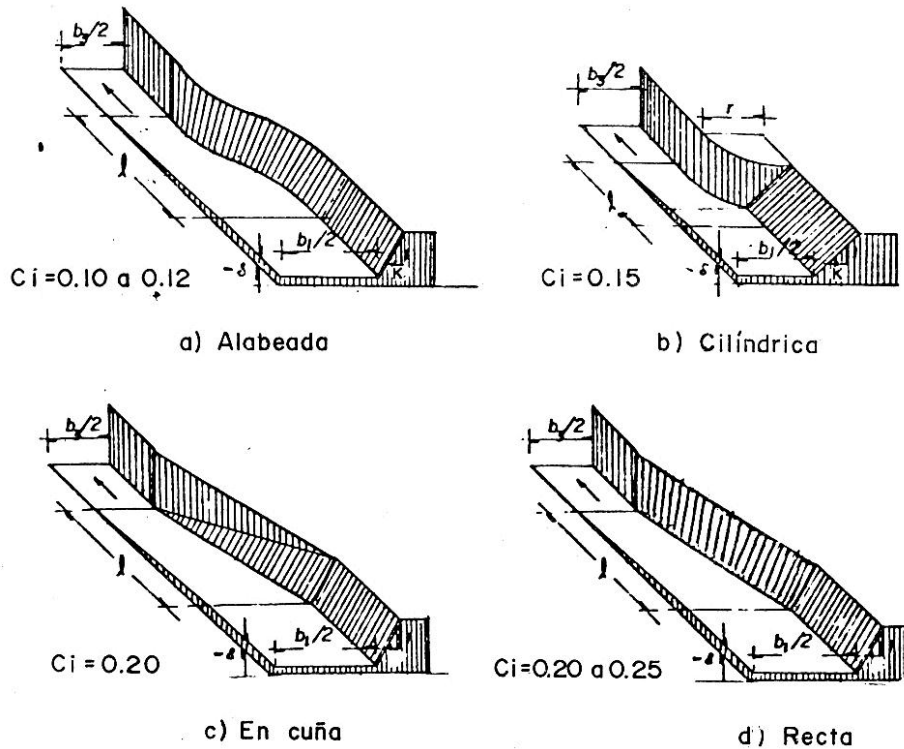


Figura 6.5 Contracciones graduales y coeficientes de pérdida aplicables a la ecuación 6.4

$$h_{\text{contracción}} = C_i \left(\frac{V_3^2 - V_1^2}{2g} \right) = C_i \left[1 - \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^2 \right] \frac{V_3^2}{2g} = K \frac{V_3^2}{2g} \quad \text{ecuación 6.4}$$

Entrada a un canal

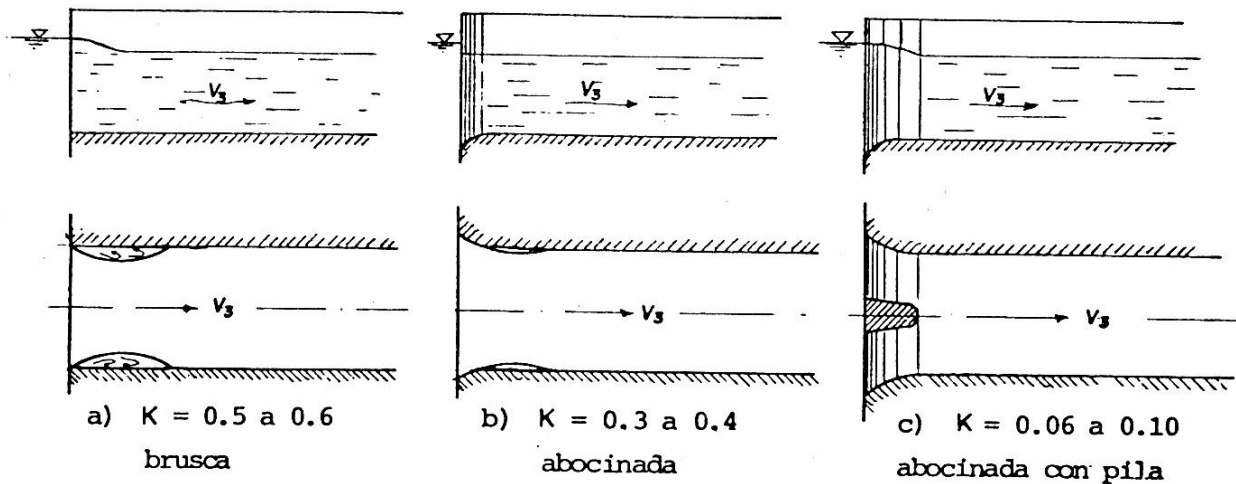


Figura 6.6 Coeficientes de pérdida por entrada a un canal, aplicables a la ecuación 6.5

$$h_{\text{entrada}} = K \frac{V_3^2}{2g} \quad \text{ecuación 6.5}$$

CANAL PARSHALL

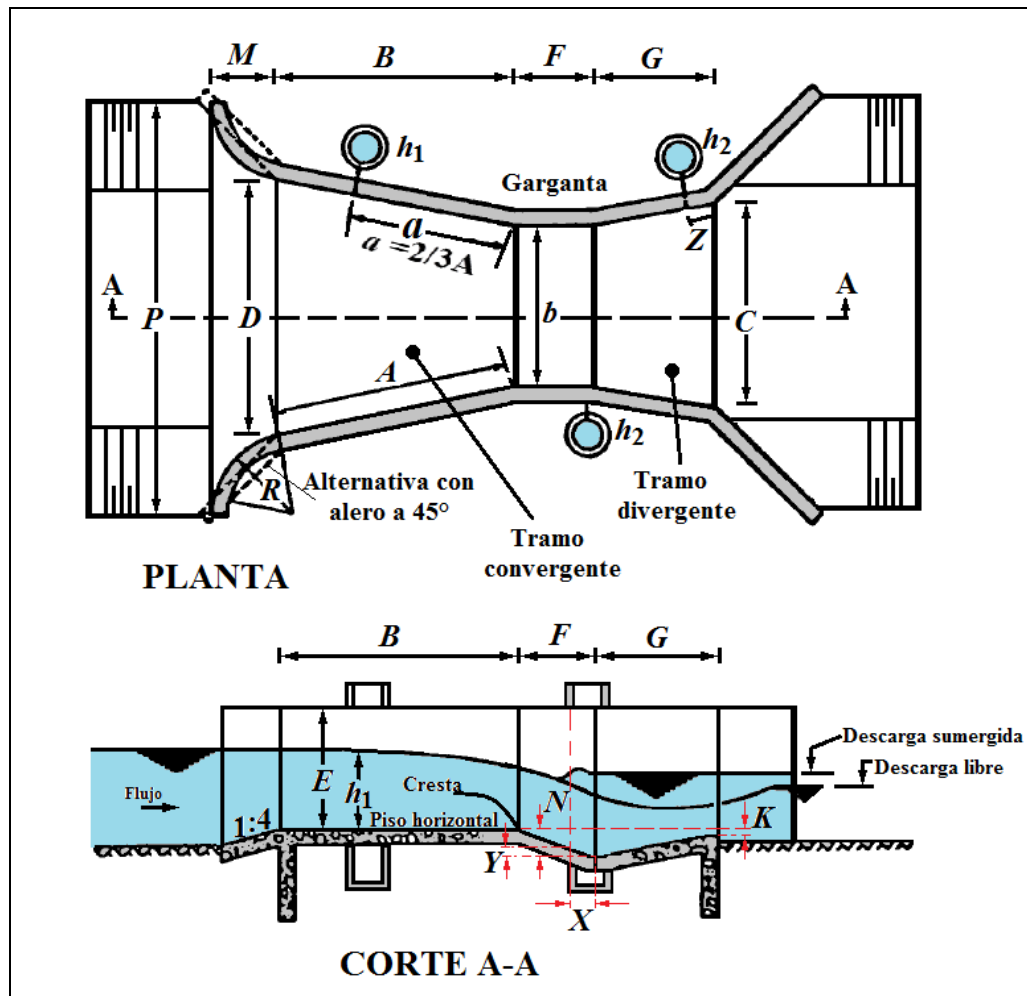


Figura 6.1 Dimensiones de medidores Parshall, de diseño estándar, según su ancho de garganta.

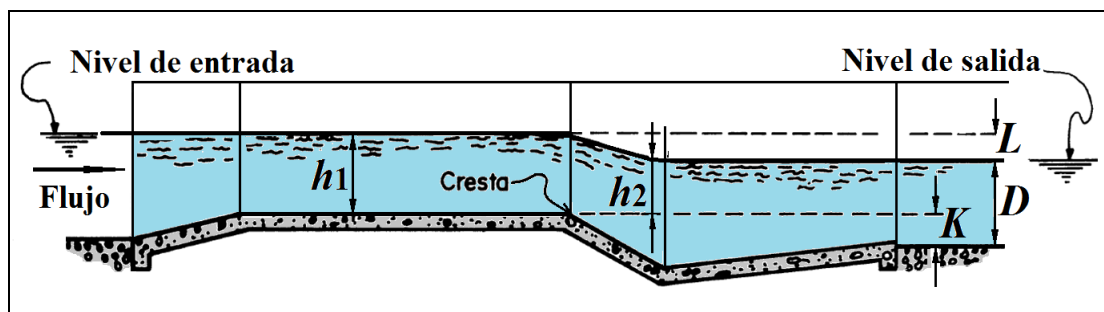


Figura 6.2. Magnitud de las cargas h_1 y h_2 respecto a la elevación de la cresta del medidor Parshall.

Tabla 6.1 Dimensiones de medidores Parshall como se indica en las figuras 6.1 y 6.2

Garganta		Tabla 6-1 Dimensiones de alcantarillas y arquetas como se indica en el artículo 6-1.1 y 6-1.2																	Intervalo de cargas h_1 Mín., en m Máx., en m		Ecuación $Q = k h_1^n$	Intervalo de gastos Mín. Máx.		Libre h_1/h_2	
		A	a	B	C	E	F	G	H	K	M	N	P	R	X	Y	Z								
1 in	25.4 mm	363	242	356	93	229	76	203	206	19	-	29	-	-	0.8	13	3	0.09	1/s	5.40	0.015	0.21	0.5		
2 in	50.8 mm	414	276	406	135	254	114	254	257	22	-	43	-	-	16	25	6	0.18		13.20	0.015	0.24	0.5		
3 in	76.2 mm	467	311	457	178	457	152	305	309	25	-	57	-	-	25	38	13	0.77		32.10	0.03	0.33	0.5		
6 in	152.4 mm	621	414	610	394	610	305	610	-	76	305	114	902	406	51	76	-	1.50		111	0.03	0.45	0.6		
9 in	228.6 mm	879	586	864	381	762	305	457	-	76	308	114	1080	406	51	76	-	2.50		251	0.03	0.61	0.6		
1 in	304.8 mm	1272	848	1343	610	914	610	914	-	76	381	229	1492	508	51	76	-	3.32		457	0.03	0.76	0.7		
1 ft	457.2 mm	1448	965	1419	762	914	610	914	-	76	381	229	1676	508	51	76	-	4.80		695	0.03	0.76	0.7		
2 ft	609.6 mm	1524	1016	1495	914	914	610	914	-	76	381	229	1854	508	51	76	-	12.10		937	0.046	0.76	0.7		
3 ft	914.4 mm	1676	1117	1645	1219	914	610	914	-	76	381	229	2222	508	51	76	-	17.60		1427	0.046	0.76	0.7		
4 ft	1219.2 mm	1829	1219	1794	1524	914	610	914	-	76	457	229	2711	610	51	76	-	35.80		1923	0.06	0.76	0.7		
5 ft	1524.0 mm	1981	1321	1943	1829	914	610	914	-	76	457	229	3080	610	51	76	-	44.10		2424	0.06	0.76	0.7		
6 ft	1828.8 mm	2134	1423	2092	2134	914	610	914	-	76	457	229	3442	610	51	76	-	74.10		2929	0.076	0.76	0.7		
7 ft	2133.6 mm	2286	1524	2242	2438	914	610	914	-	76	457	229	3810	610	51	76	-	85.80		3438	0.076	0.76	0.7		
8 ft	2438.4 mm	2438	1625	2391	2743	914	610	914	-	76	457	229	4172	610	51	76	-	97.20		3949	0.076	0.76	0.7		
10 ft	3048.0 mm	-	1829	4267	3658	1219	914	1829	-	152	-	343	-	-	305	229	-	0.16	m ³ /s	8.28	0.09	1.07	0.8		
12 ft	3657.6 mm	-	2032	4877	4470	1524	914	2438	-	152	-	343	-	-	305	229	-	0.19		14.68	0.09	1.37	0.8		
15 ft	4572.0 mm	-	2337	7620	5588	1829	1219	3048	-	229	-	457	-	-	305	229	-	0.23		25.04	0.09	1.67	0.8		
20 ft	6096.0 mm	-	2845	7620	7315	2134	1829	3658	-	305	-	686	-	-	305	229	-	0.31		37.97	0.09	1.83	0.8		
25 ft	7620.0 mm	-	3353	7620	8941	2134	1829	3962	-	305	-	686	-	-	305	229	-	0.38		47.14	0.09	1.83	0.8		
30 ft	9144.0 mm	-	3861	7925	10566	2134	1829	4267	-	305	-	686	-	-	305	229	-	0.46		56.33	0.09	1.83	0.8		
40 ft	12192.0 mm	-	4877	8230	13818	2134	1829	4877	-	305	-	686	-	-	305	229	-	0.60		74.70	0.09	1.83	0.8		
50 ft	15240.0 mm	-	5893	8230	17272	2134	1829	6096	-	305	-	686	-	-	305	229	-	0.75		93.40	0.09	1.83	0.8		

Bibliografía:

- Sotelo Ávila. G. *Apuntes de Hidráulica II*. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 1997.
- Ocampo Guerrero N. *Transiciones a superficie libre en régimen subcrítico*. Tesis de Maestría en Ingeniería, UNAM, Facultad de Ingeniería, México, 2005.