

FLUJO UNIFORME

Flujo en Superficie Libre



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E
HIDROLOGÍA**



2. FLUJO UNIFORME

Las condiciones de flujo uniforme no se presentan en canales naturales e incluso son muy raras en canales artificiales.

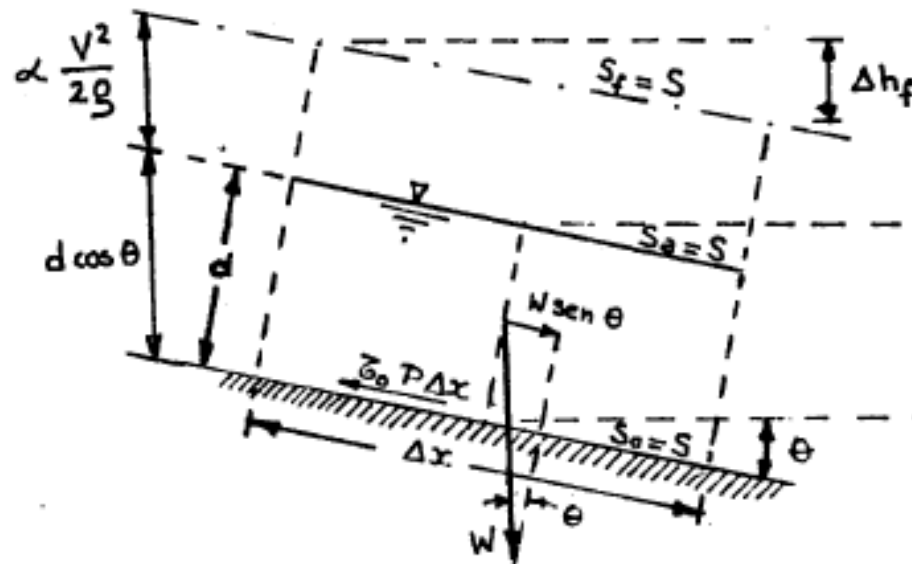
¿Por qué estudiarlo?

Porque representa las dimensiones mínimas de flujo para un caudal determinado.

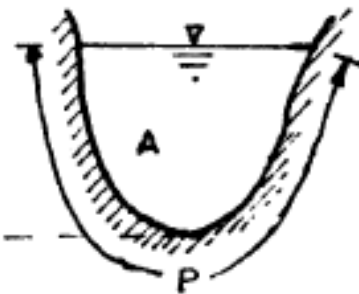
3. ECUACIÓN DE CHEZY (1)

Aplicable a canales con flujo uniforme.

Para el canal mostrado:



a) Elevación



b) Sección transversal

ya que es uniforme, la velocidad media es constante y **no hay aceleración**; es decir, la suma de fuerzas actuantes sobre el volumen de control es CERO.

3. ECUACIÓN DE CHEZY (1)



La ecuación de Chezy se basa en dos suposiciones:

1. El esfuerzo de corte es proporcional al cuadrado de la velocidad media.
2. En un flujo uniforme, la componente horizontal del peso es igual a la fuerza de corte total.

La primera asunción conduce a que:

$$F_{\text{corte}} = kV^2(P.dx)$$

La segunda asunción:

$$\cancel{\gamma.A.dx}.\text{Sen } \theta = kV^2(\cancel{P.dx})$$

Luego:

$$V^2 = \frac{\gamma R \text{Sen } \theta}{k} \quad \Rightarrow \quad \boxed{V = C \sqrt{RS}}$$



3. ECUACIÓN DE CHEZY (2)

Asimismo, despejando S:

$$S = \frac{V^2}{C^2 R}$$

En la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$S = f \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Igualando:

$$f = \frac{8g}{C^2}$$

3. ECUACIÓN DE CHEZY (3)

Para calcular el coeficiente de Chezy se puede usar la ecuación de Ganguillet y Kutter, que permite encontrar C en función de la pendiente, el radio hidráulico y el coeficiente de Kutter. En el sistema inglés, la ecuación es:

$$C = \frac{41.65 + \frac{0.00281}{S} + \frac{1.811}{n}}{1 + \left(41.65 + \frac{0.00281}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

En el sistema internacional:

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S_0}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{S_0}\right) \times \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

Tabla VII.1 Valores del coeficiente n para las expresiones de Kutter, Kutter – Ganguillet y Manning. Tomado de Azevedo, Acosta 1976.

Descripción	n
Mampostería de piedra bruta	0.020
Mampostería de piedras rectangulares	0.017
Mampostería de ladrillos, sin revestido	0.015
Mampostería de ladrillo, revestida	0.012
Canales de concreto, terminación ordinaria	0.014
Canales de concreto, con revestimiento liso	0.012
Canales con revestimiento muy liso	0.010
Canales de tierra en buenas condiciones	0.025
Canales de tierra con plantas acuáticas	0.035
Canales irregulares y muy mal conservados	0.040
Conductos de madera cepillada	0.011
Barro (vitrificado)	0.013
Tubos de acero soldado	0.011
Tubos de concreto	0.013
Tubos de hierro fundido	0.012
Tubos de asbesto cemento	0.011

3. ECUACIÓN DE CHEZY (4)

También puede usarse la ecuación de Bazin (sistema inglés):

$$C = \frac{157.6}{1 + m/\sqrt{R}}$$

Que muestra una dependencia del coeficiente de Chezy respecto al radio hidráulico y a un coeficiente “m” de Bazin.

Descripción del canal	<i>m</i> de Bazin
Cemento muy suave con formaleta de madera cepillada	0.11
Madera sin cepillar, concreto o ladrillo	0.21
Mampostería en bloques de piedra o de piedra y ladrillo mal acabado .	0.83
Canales en tierra en perfectas condiciones	1.54
Canales en tierra en condiciones normales	2.36
Canales en tierra en condiciones rugosas	3.17



3. ECUACIÓN DE CHEZY (4)

Esta ecuación en el sistema internacional puede escribirse como:

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\alpha}{\sqrt{R}}}$$

La ecuación de Bazin es menos precisa que la de G-K.

También podemos mencionar la ecuación de Powell:

$$C = -42 \log \left(\frac{C}{4R} + \frac{\epsilon}{R} \right)$$

Esta ecuación fue desarrollada a partir de ensayos en canales artificiales y al uso de distribuciones de velocidad teóricas.

La ecuación de G-K es más precisa.

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



Autor	Fórmula	Observaciones
Ganguillet y Kutter	$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + (23 + \frac{0.00155}{S}) \frac{n}{R_h}}$	Se aconseja para canales naturales para los cuales — usualmente conduce a resultados satisfactorios. Es — compleja y tiene la desventaja de que ocurren cambios grandes en C para cambios pequeños en n , donde n es un coeficiente que depende de la rugosidad del canal según tabla 2.3
Kutter	$C = \frac{100 \sqrt{R_h}}{m + \sqrt{R_h}}$	Es una simplificación de la de Ganguillet y Kutter y por tanto más sencilla. m es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Bazin	$C = \frac{87}{1 + \frac{B}{\sqrt{R_h}}}$	Está basada en una buena cantidad de experiencias y es relativamente sencilla. B es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.3.
Kozeny	$C = 20 \log Y + N_c$	es análoga a la de los tubos y fue obtenida con base — en los resultados experimentales de von Misses y Bazin. Y es el tirante hidráulico en m y N_c un coeficiente — de rugosidad según la tabla 2.3.
Martínez	$C = 17.7 \log \frac{R_h}{d} + 13.6$	Fue obtenida de muchas mediciones en ríos de la Unión Soviética. d es el diámetro del grano del material en el fondo del río en m y vale para $0.15 \leq R_h \leq 2.25$ m, $0.00004 \leq S \leq 0.0039$ y $0.004 \leq d \leq 0.25$ m (ref 12)
Manning - Strickler	$C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$	Fue obtenida a partir de siete fórmulas diferentes basadas en ensayos de Bazin y posteriormente verificada — por observaciones. Es una de las más utilizadas por su sencillez. n es un coeficiente de rugosidad según la — tabla 2.4.
Pavlovski	$C = \frac{R_h^z}{n}$ <i>n, mismo coeficiente de rugosidad de Manning</i>	Considera que el exponente en la fórmula de Manning no es una constante sino que varía con la forma del canal y la rugosidad como sigue $z = 1.5$ para $R_h = 1$ m y $z = 1.3\sqrt{n}$ para $R_h > 1$ m.

Tabla 2.3 Factores de rugosidad para las fórmulas de la tabla 2.2

I Secciones cerradas parcialmente llenas	Ganguillet y Kutter n	Kutter m	Bazín B	Kozeny N _c
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 - 0.35		
Tubos de alcantarillado	0.017 - 0.020	0.30 - 0.35		
Túneles de concreto pulido	0.011 - 0.013	0.20 - 0.25	0.22	
II Secciones abiertas				
Madera cepillada	0.010	0.15 - 0.20	0.06	
Madera de acabado rugoso		0.30 - 0.35		
Mampostería de ladrillo bien acabada	0.013	0.25	0.16	70 - 76
Cemento pulido		0.20 - 0.25	0.10 - 0.16	84 - 90
Concreto pulido	0.012	0.20	0.11 - 0.22	
Concreto rugoso	0.017	0.65	0.45	58 - 62
Piedra brasa bien acabada	0.017	0.65		60 - 70
En tierra arroyos y ríos	0.025	1.75	1.4 - 1.6	
En tierra con material grueso y plantas	0.035	2.0 - 2.5	1.75	
Con cantos rodados	0.04 - 0.05	3.5 - 5.0	hasta 3.5	
Con gran rugosidad de fondo y maleza tupida	hasta 0.09			
Roca comodada				36 - 50
Roca a volteo				28 - 36
Grava gruesa (10 a 15 cm)				32 - 38
Grava media (5 a 10 cm)				38 - 42
Grava fina (2 a 3 cm)				42 - 46
Cantos rodados (15 a 20 cm)				28 - 32

4. ECUACIÓN DE MANNING (1)



Planteada en 1889, es la mas usada.

$$V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n}$$

donde R es el radio hidraulico, S es la pendiente de energia y n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

El coeficiente de Manning se puede calcular usando el **método del SCS**, planteado por Cowan, quien plantea su dependencia de: rugosidad superficial, vegetacion, irregularidad del canal, alineamiento del canal, sedimentacion y socavacion, obstrucciones, tamaño y forma del canal, nivel y caudal, cambio estacional, material en suspencion y carga de fondo. Luego:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$$



4. ECUACIÓN DE MANNING (2)

donde:

- n_0 es un valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados,
- n_1 es un valor que debe agregarse al n_0 para corregir el efecto de las rugosidades superficiales,
- n_2 es un valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal,
- n_3 es un valor para considerar las obstrucciones,
- n_4 es un valor para considerar la vegetación y las condiciones de flujo; y
- m_s es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal.

Tabla 2.7. Factores correctivos de n (ecuación 2.26), según el *Soil Conservation Service* (referencia 17)

Condiciones del cauce o canal	Valor del coeficiente
1. Características del canal:	n_0
a) En tierra.	0.02
b) Cortados en roca.	0.025
c) En grava fina.	0.024
d) En grava gruesa.	0.028
2. Grado de irregularidad:	n_1
a) Fronteras lisas. Lo mejor que se obtiene para los materiales que se utilizan.	0
b) Irregularidades menores. Por ejemplo, canal bien dragado o excavado, o ligeramente socavado en las orillas, o canales de drenaje.	0.005
c) Irregularidades moderadas. Canal mal dragado o excavado. Ligera socavación en las márgenes.	0.01
d) Muy irregular. Salientes o entrantes continuas del mismo orden de magnitud que el tirante. Erosiones muy irregulares en las márgenes.	0.02
3. Variaciones de la sección transversal en forma y tamaño:	n_2
a) Graduales.	0
b) Secciones grandes y pequeñas alternadas ocasionalmente. Se alternan secciones amplias y estrechas por cambio de forma o del ancho de la plantilla, causando desviación ocasional desde el cauce principal a ambos lados.	0.005
c) Secciones grandes y pequeñas alternadas frecuentemente o bien cambios de forma que causan desviación ocasional desde el cauce principal a ambos lados.	0.01 a 0.015



Condiciones del cauce o canal

Valor del
coeficiente

4. Obstrucciones al área hidráulica debidas a grandes rocas troncos, depósitos de desperdicios o de rocas (conviene hacer mediciones directas en tramos representativos):

n_3

0

a) Sin obstrucción.

0.01 a 0.015

b) Menores.

0.02 a 0.03

c) Apreciables.

0.04 a 0.06

d) Severas.

5. Cantidad y tipo de vegetación (conviene hacer mediciones directas):

n_4

a) Poca densidad. Márgenes cubiertas de pasto o hierbas. Tirante 2 a 3 veces mayor que la altura de la vegetación.

0.005 a 0.1

b) Moderada. Matorral o pastos. El tirante de agua es de 2 a 3 veces mayor que la altura media de la vegetación. Troncos delgados sin hojas.

0.01 a 0.25

c) Densa. Igual a la anterior pero con tirantes similares a la altura de la vegetación. Arbustos.

0.025 a 0.05

d) Muy densa. Los tirantes son del orden de la mitad de la altura de la vegetación.

0.05 a 0.1

Condiciones del cauce o canal

Valor del coeficiente

6. Grado de sinuosidad. Se define como el cociente s de la distancia entre dos puntos siguiendo el eje del cauce y la distancia en la línea recta entre los mismos puntos. Puede ser:

m_s

a) Menor, si $s < 1.2$;

1.0

b) Apreciable, si $1.2 \leq s < 1.5$;

1.15

c) Severo, si $s \geq 1.5$.

1.3

James (referencia 18), en 1994, propuso que:

$$m_s = 0.43 s + 0.57, \text{ si } s < 1.7;$$

$$m_s = 1.3, \text{ si } s \geq 1.7;$$

a fin de eliminar las discontinuidades en los límites de los intervalos de s considerados por el SCS.



4. ECUACIÓN DE MANNING (3)

El método no considera el efecto del sedimento en suspensión ni la carga de fondo. Los valores mostrados en tabla se desarrollaron a partir de un estudio de 40 a 50 casos de canales pequeños y moderados. Por consiguiente, **el método es cuestionable cuando se aplica a canales grandes** cuyos radios hidráulicos exceden 15 pies (4.6m).

El método se aplica sólo a corrientes naturales sin revestimiento, canales de creciente y canales de drenaje, y muestra un valor mínimo de 0.02 para el valor de n en dichos canales; sin embargo, este valor mínimo, puede ser tan bajo como 0.012 en canales revestidos y 0.008 en canales artificiales de laboratorio.



4. ECUACIÓN DE MANNING (4)

Strickler propone en base a estudios experimentales:

$$n = 0.0122 k_s^{1/6}$$

donde k_s : rugosidad equivalente o rugosidad absoluta.

Reemplazando esta ecuación en la condición de rugosidad de un conducto, se obtiene:

$$n^6 \sqrt{R_h S} \geq 8 \times 10^{-14}$$

que es el límite de aplicación de la ecuación de Manning a temperaturas comunes de agua.

EJERCICIO



5-8. Demuestre que el factor de fricción en la ecuación de Darcy-Weisbach, ecuación (1-4), se relaciona con el n de Manning mediante $f = 116n^2/R^{1/3}$.



4. ECUACIÓN DE MANNING (5)

La ecuación de Manning tiene un conjunto de limitaciones a mencionar:

- a) **El coeficiente n no es adimensional.** Cada valor es válido sólo para las dimensiones del canal en que se obtuvo.
- b) **No considera la influencia de la viscosidad** y por ello es válida sólo para números de Reynolds grandes ($Re > 10000$).
- c) **No sigue las leyes generales de fricción** y por ello es válida sólo para rugosidades relativas medias.
- d) **No considera la forma de la sección** y por ello un valor conocido de n es válido sólo para la forma de sección del canal en que se obtuvo.
- e) **No considera la influencia de distintas rugosidades en la misma sección** y la de su distribución de acuerdo con el nivel del agua.
- f) **No considera la influencia de la formación de ondas** y la inestabilidad que introducen cuando el régimen es supercrítico.
- g) **No considera la influencia del arrastre de aire** al interior del flujo cuando la velocidad es muy grande.
- J) **No considera la influencia del transporte de sedimentos** y de la forma variable de un lecho móvil.

4. ECUACIÓN DE MANNING (6)

Además de la tabla mostrada, para el caso de canales naturales, el coeficiente de rugosidad de Manning puede estimarse en función de la granulometría del lecho:

Table 4.13. Manning's coefficient n as a function of bed material size.

Bed material	Size of bed material (mm)	Manning's coefficient n ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$)
Medium gravel	6-20	0.0195-0.022
Course gravel	20-60	0.022-0.027
Cobbles	60-200	0.027-0.034



4. ECUACIÓN DE MANNING (7)

Debido a lo complicado que puede ser estimar un valor de n a simple vista, algunos ingenieros han desarrollado una ecuación para estimar n de Manning de los ríos de montaña lechos acorazados en función de la pendiente y el radio hidráulico (Jarret, 1984) :

$$n = 0.32 S^{0.38} \cdot R^{-0.16}$$

Esta ecuación empírica está definida para:

Pendiente : $0.002 < S < 0.030$

Radio hidráulico: $0.50 < R < 2\text{m}$

El error estandar oscila entre 25% y 30%



4. ECUACIÓN DE MANNING (8)

Asimismo, para lechos con grava, se puede usar las siguientes ecuaciones empíricas (d=metros):

Meyer-Peter-Muller (1948): $n = 0,0380 d_{90}^{1/6}$

Raudkivi (1976): $n = 0,0411 d_{65}^{1/6}$

Simons & Senturk (1976): $n = 0,0389 d_{50}^{1/6}$

Garde & Raju (1978): $n = 0,0470 d_{50}^{1/6}$

Bray (1979): $n = 0,0593 d_{50}^{0,179}$

Tabla 5-6. Valores del coeficiente de rugosidad n
(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos			
A-1. Metal			
a. Latón, liso	0.009	0.010	0.013
b. Acero			
1. Estriado y soldado	0.010	0.012	0.014
2. Riveteado y en espiral	0.013	0.016	0.017
c. Hierro fundido			
1. Recubierto	0.010	0.013	0.014
2. No recubierto	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. Subdrenaje	0.017	0.019	0.021
2. Drenaje de aguas lluvias	0.021	0.024	0.030
A-2. No metal			
a. Lucita	0.008	0.009	0.010
b. Vidrio	0.009	0.010	0.013
c. Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
d. Concreto			
1. Alcantarilla, recta y libre de basuras	0.010	0.011	0.013
2. Alcantarilla con curvas, conexiones y algo de basuras	0.011	0.013	0.014
3. Bien terminado	0.011	0.012	0.014
4. Alcantarillado de aguas residuales, con pozos de inspección, entradas, etc., recto	0.013	0.015	0.017
5. Sin pulir, formaleta o encofrado metálico	0.012	0.013	0.014
6. Sin pulir, formaleta o encofrado en madera lisa	0.012	0.014	0.016
7. Sin pulir, formaleta o encofrado en madera rugosa	0.015	0.017	0.020
e. Madera			
1. Machihembrada	0.010	0.012	0.014
2. Laminada, tratada	0.015	0.017	0.020
f. Arcilla			
1. Canaleta común de baldosas	0.011	0.013	0.017
2. Alcantarilla vitrificada	0.011	0.014	0.017
3. Alcantarilla vitrificada con pozos de inspección, entradas, etc.	0.013	0.015	0.017
4. Subdrenaje vitrificado con juntas abiertas	0.014	0.016	0.018
g. Mampostería en ladrillo			
1. Barnizada o lacada	0.011	0.013	0.015
2. Revestida con mortero de cemento	0.012	0.015	0.017
h. Alcantarillados sanitarios recubiertos con limos y babas de aguas residuales, con curvas y conexiones	0.012	0.013	0.016
i. Alcantarillado con batea pavimentada, fondo liso	0.016	0.019	0.020
j. Mampostería de piedra, cementada	0.018	0.025	0.030

Tabla 5-6. Valores del coeficiente de rugosidad n (continuación)
(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
B. Canales revestidos o desarmables			
B-1. Metal			
a. Superficie lisa de acero			
1. Sin pintar	0.011	0.012	0.014
2. Pintada	0.012	0.013	0.017
b. Corrugado	0.021	0.025	0.030
B-2. No metal			
a. Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
b. Madera			
1. Cepillada, sin tratar	0.010	0.012	0.014
2. Cepillada, creosotada	0.011	0.012	0.015
3. Sin cepillar	0.011	0.013	0.015
4. Láminas con listones	0.012	0.015	0.018
5. Forrada con papel impermeabilizante	0.010	0.014	0.017
c. Concreto			
1. Terminado con llana metálica (palustre)	0.011	0.013	0.015
2. Terminado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
3. Pulido, con gravas en el fondo	0.015	0.017	0.020
4. Sin pulir	0.014	0.017	0.020
5. Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023
6. Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7. Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
8. Sobre roca irregularmente excavada	0.022	0.027	
d. Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de			
1. Piedra labrada, en mortero	0.015	0.017	0.020
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.020	0.024
3. Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería de piedra cementada	0.020	0.025	0.030
5. Piedra suelta o <i>riprap</i>	0.020	0.030	0.035
e. Fondo de gravas con lados de			
1. Concreto encofrado	0.017	0.020	0.025
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3. Piedra suelta o <i>riprap</i>	0.023	0.033	0.036
f. Ladrillo			
1. Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
2. En mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g. Mampostería			
1. Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.030
2. Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h. Bloques de piedra labrados	0.013	0.015	0.017
i. Asfalto			
1. Liso	0.013	0.013	
2. Rugoso	0.016	0.016	
j. Revestimiento vegetal	0.030	-----	0.500

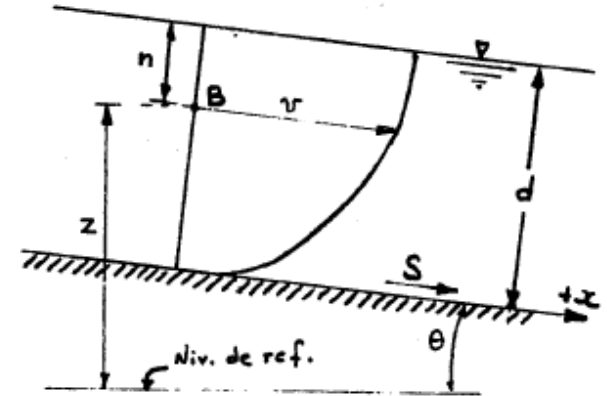
Tabla 5-6. Valores del coeficiente de rugosidad n (continuación)
(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
C. Excavado o dragado			
a. En tierra, recto y uniforme			
1. Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0.018	0.022	0.025
3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.030
4. Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
b. En tierra, serpenteante y lento			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
5. Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	0.035	0.040
6. Fondo en cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
c. Excavado con pala o dragado			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Matorrales ligeros en las bancas	0.035	0.050	0.060
d. Cortes en roca			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Afilados e irregulares	0.035	0.040	0.050
e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
3. Igual, nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
4. Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140
D. Corrientes naturales			
D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies)			
a. Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150

Tabla 5-6. Valores del coeficiente de rugosidad n (continuación)
(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025		0.060
b. Sección irregular y rugosa	0.035		0.100

5. FLUJO LAMINAR A SUPERFICIE LIBRE



Se presenta para $Re < 500$.

En flujo laminar se cumple que la distribución de velocidades es parabolica:

$$v = \frac{\gamma}{2\mu} S (d^2 - n^2)$$

Asimismo:

$$V = \frac{\gamma S d^2}{3\mu} = \frac{2}{3} v_{\text{máx}}$$

$$f = \frac{8g}{C^2} = \frac{24}{Re}$$



6. FLUJO TURBULENTO A SUPERFICIE LIBRE (1)

Keulegan propone ecuaciones para evaluar la velocidad media en canales anchos en flujo turbulento:

$$\text{Canales lisos} \quad V = v_* \left(A_l + 5.75 \log \frac{v_* R_h}{\nu} \right)$$

$$\text{Canales rugosos} \quad V = v_* \left(A_r + 5.75 \log \frac{v_* R_h}{\nu} \right)$$

donde:

$$\text{canales lisos} \quad A_l = 3.25$$

$$\text{canales de rugosidad ondulada} \quad A_r = 1.3$$

$$\text{canales de madera} \quad A_r = -3$$

$$\text{canales rugosos} \quad A_r = 3.23 \text{ a } 16.92 \text{ (medio } 6.25)$$



6. FLUJO TURBULENTO A SUPERFICIE LIBRE (2)

Diferentes investigaciones apuntan a que los coeficientes C y f pueden estimarse utilizando las ecuaciones empleadas en tuberías, pero reemplazando $D=R_H$.

En general, se verifica que:

1. En flujo laminar, para canales lisos se cumple que:

$$f = \frac{8g}{C^2} = \frac{k}{R_e}$$

donde $k=24$ para canales muy anchos y $k=14$ para canales triangulares. En canales rugosos, la ecuación se mantiene pero los valores de k se incrementan (usualmente varían entre 33 y 60).

6. FLUJO TURBULENTO A SUPERFICIE LIBRE (3)

2. En la zona de transición, el límite inferior varía entre 500 y 600, y el superior alcanza 2500.
3. En la zona turbulenta, la forma de la ecuación cambia ligeramente:

$$f = \frac{8g}{C^2} = \frac{0.223}{Re^{1/4}}$$

válida para $Re < 2.5 \times 10^4$.

La ecuación de Prandtl-Von Karman también es válida para el mismo rango de valores:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \log (Re \sqrt{f}) + 0.4$$

6. FLUJO TURBULENTO A SUPERFICIE LIBRE (4)

Muchas otras ecuaciones han sido planteadas para estimar los coeficientes C y f :

- Koulegan (canales muy anchos)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2.03 \log (Re \sqrt{f}) + 0.14$$

- Colebrook y White (zona de transición)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \log \left(\frac{12 R_h}{K} + \frac{Re \sqrt{f}}{0.6375} \right)$$

- Colebrook y White (turbulencia desarrollada)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \log \left(\frac{12 R_h}{K} \right)$$



Tabla 2.1. Valores de K en mm para superficies de mampostería y concreto

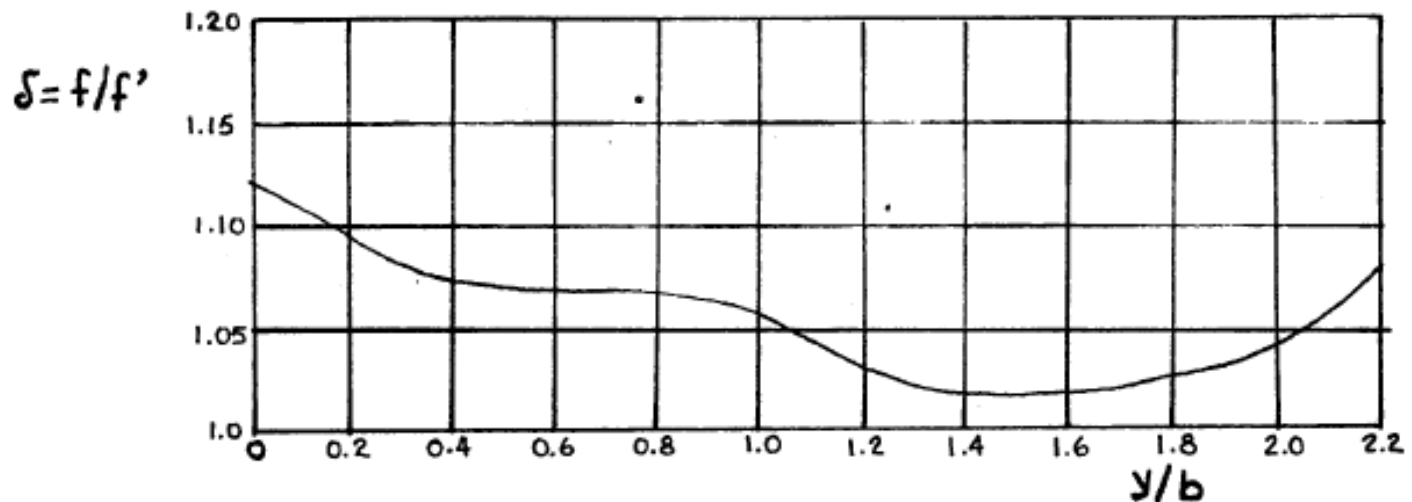
Concreto en construcción monolítica, colado sobre moldes metálicos impregnados de aceite, sin irregularidades superficiales	0.15
Superficies de cemento muy liso con juntas terminadas a mano	0.3
Concreto colado en moldes metálicos aceitados, con juntas cuidadosamente terminadas	0.48
Acueductos y tubos de madera o de concreto colado en formas de acero o precolados. Superficies alisadas. Tubos de barro vitrificado	0.6
Concreto en construcción monolítica colado en formas rugosas o superficies terminadas con gunita	1.5
Longitudes cortas de tubos de concreto de pequeña diámetro sin acabado especial en las juntas	2.4
Concreto en tubos precolados con mortero en las juntas. Canales rectos - en tierra	3.0
Conductos de concreto rugoso	4.2
Mampostería mal acabada	6.0
Gunita no tratada	0.3

6. FLUJO TURBULENTO A SUPERFICIE LIBRE (6)

Narayama (1970) encontró que la forma del canal se refleja mejor utilizando un nuevo parámetro P/Rh . Para, canales lisos plantea la expresion:

$$\frac{1}{\sqrt{f'}} = \frac{C'}{\sqrt{8g}} = 2 \log R_e \sqrt{f'} + 0.4$$

Donde f' es el parámetro de fricción modificado por Narayama.





6.FLUJO TURBULENTO A SUPERFICIE LIBRE (7)

Blau (1969) plantea que el esfuerzo de corte en una canal puede expresarse en función de un esfuerzo “invariable” que se encuentra en los bordes y no depende de la forma del canal. Así:

$$\tau_o' = \delta \tau_o$$

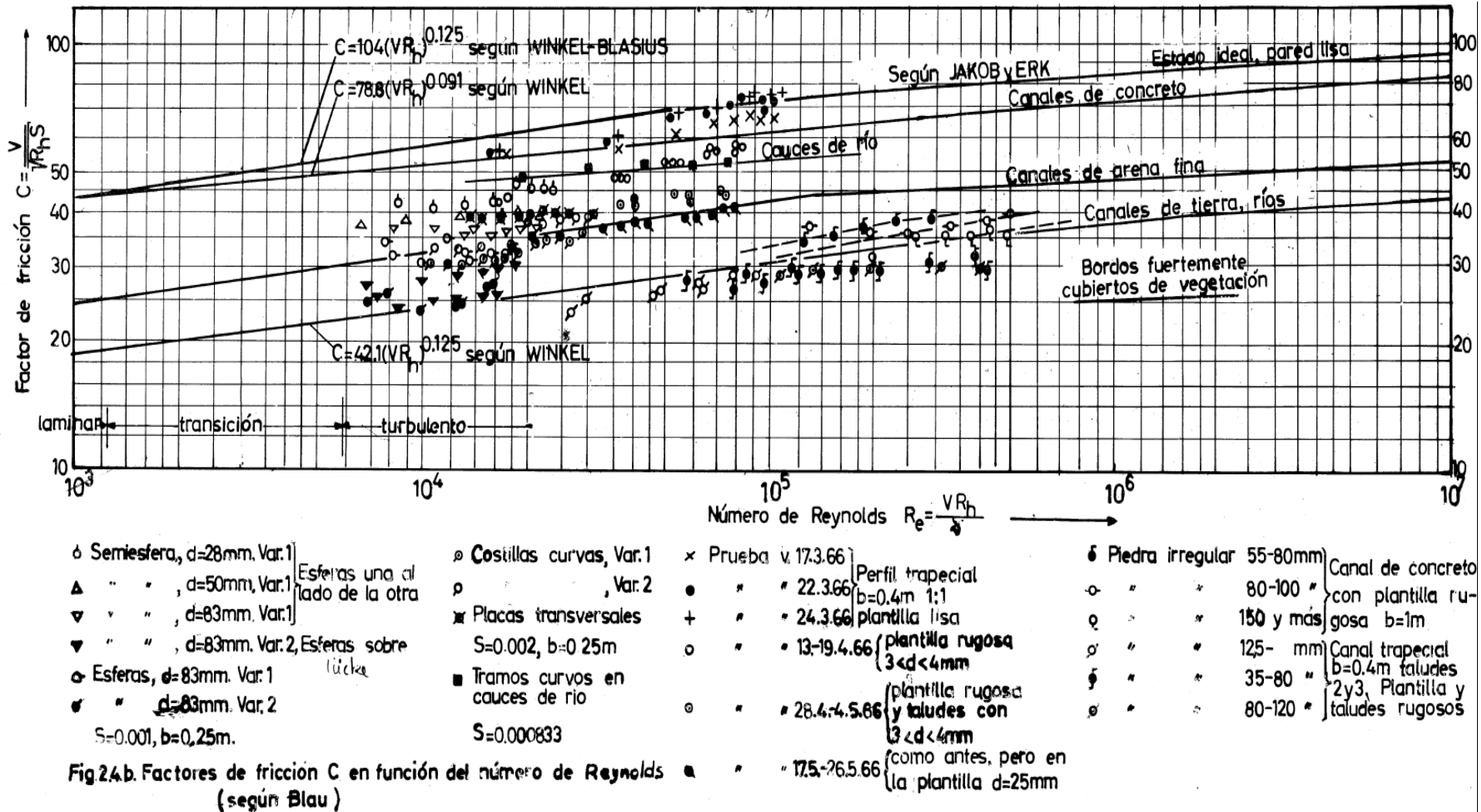
Esto implica que la ecuación de Chezy debe ser corregida:

$$V = C \sqrt{\delta R_h S} = C' \sqrt{R_h S}$$

y de donde se concluye que:

$$\delta = \left(\frac{C'}{C} \right)^2 = \frac{f}{f'}$$

que concuerda con Narayama.



6.FLUJO TURBULENTO A SUPERFICIE LIBRE (8)

Blau estima el factor de corrección en canales rectangulares en función del cociente y/b . Los valores obtenidos varían hasta un 12% respecto a los encontrados por Narayama.

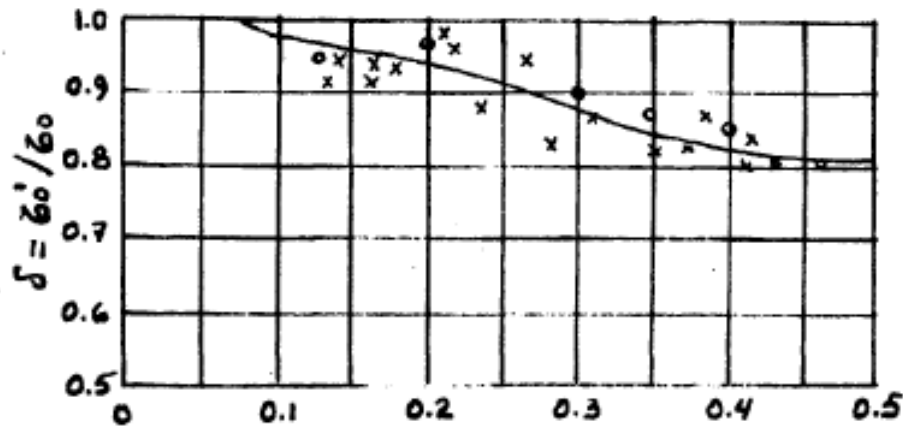


Fig 2.5a $\delta = f(y/b)$ para canales rectangulares de cemento liso, $b = 1 \text{ m}$

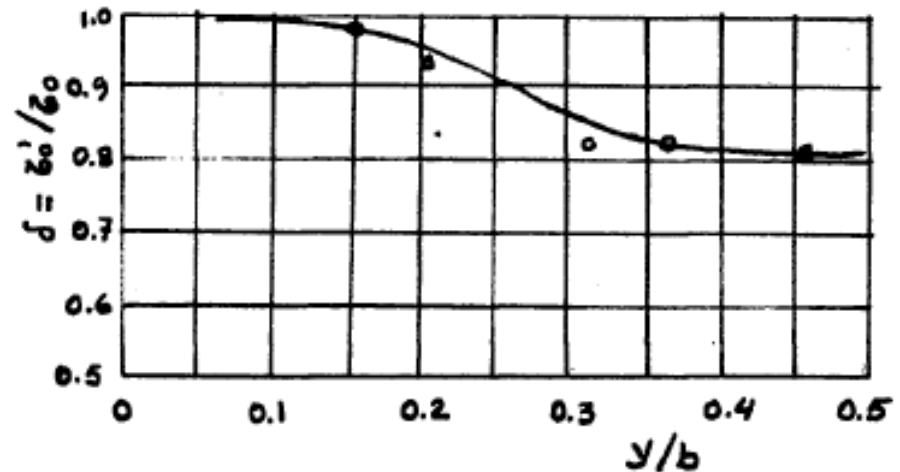


Fig 2.5b $\delta = f(y/b)$ para canales rectangulares de concreto, $b = 1 \text{ m}$, rugosidad $1 < \epsilon < 4 \text{ mm}$.

EJEMPLO



Determinar el gasto que transporta en flujo uniforme un canal rectangular de concreto de 6m de ancho, tirante de 3 m, pendiente de fondo $S = 0.001$, con agua a la temperatura de 13° C .

7.CANALES CON 2 O MAS RUGOSIDADES (1)

Se aplica la ecuación de Horton-Einstein:

$$n = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3}$$

Esta ecuación asume que la velocidad media de toda la sección es igual a la velocidad media de cada sección parcial.

Pavlosvki, Mühlhofer y Banks suponen que la fuerza total resistente al flujo es igual a la suma de las mismas fuerzas desarrolladas sobre cada porción del perímetro

$$n = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i n_i)^2 \right]^{1/2}}{P^{1/2}}$$



7. CANALES CON 2 O MAS RUGOSIDADES (2)

Lotter supone que el gasto total del flujo es igual a la suma de los gastos de las porciones de área y que :

$$n = \frac{P R_h^{5/3}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i R_{hi}^{5/3}}{n_i} \right)}$$

Ninguna de las ecuaciones ha mostrado ser superior a las demás.

8. CALCULO DEL FLUJO UNIFORME (1)

Cualquiera que sea el tipo de problema, son dos las ecuaciones que permiten el diseño del canal: la ecuación de continuidad

$$Q = A V \quad (2.29)$$

y la fórmula de Chezy para la fricción

$$V = C R_h^{1/2} S^{1/2} \quad (2.30)$$

El gasto se expresa entonces en la forma

$$Q = A V = C A R_h^{1/2} S^{1/2} = K S^{1/2} \quad (2.31)$$

donde el término

$$K = C A R_h^{1/2} \quad (2.32)$$

se conoce como "factor de conducción" de la sección del canal y es una medida de la capacidad de transporte al depender directamente del gasto.

8. CALCULO DEL FLUJO UNIFORME (2)

Si se usa la fórmula de Manning, $C = R_h^{1/4} / n$, y

$$K = \frac{A R_h^{2/3}}{n} \quad (2.33.a)$$

La expresión

$$Z_n = A R_h^{2/3} = n K \quad (2.33.b)$$

se conoce como el módulo de sección para el cálculo de flujo uniforme y de la ec (2.32) - también se expresa como sigue:

$$A R_h^{2/3} = \frac{n Q}{\sqrt{S}} \quad (2.34)$$

¡Es único!

8. CALCULO DEL FLUJO UNIFORME (3)

Para generalizar la expresión anterior, buscamos un factor que convierta la ecuación en adimensional (eliminamos el efecto de geometría). Para ello debemos dividir la expresión entre $L^{8/3}$, donde L es una longitud característica.

Para canales trapezoidales, $L=b$ mientras que en canales circulares (o de herradura) $L=D$; de esta manera:

$$\frac{A R_h^{2/3}}{b^{8/3}} = \frac{n Q}{b^{8/3} s^{1/2}}$$

$$\frac{A R_h^{2/3}}{D^{8/3}} = \frac{n Q}{D^{8/3} s^{1/2}}$$

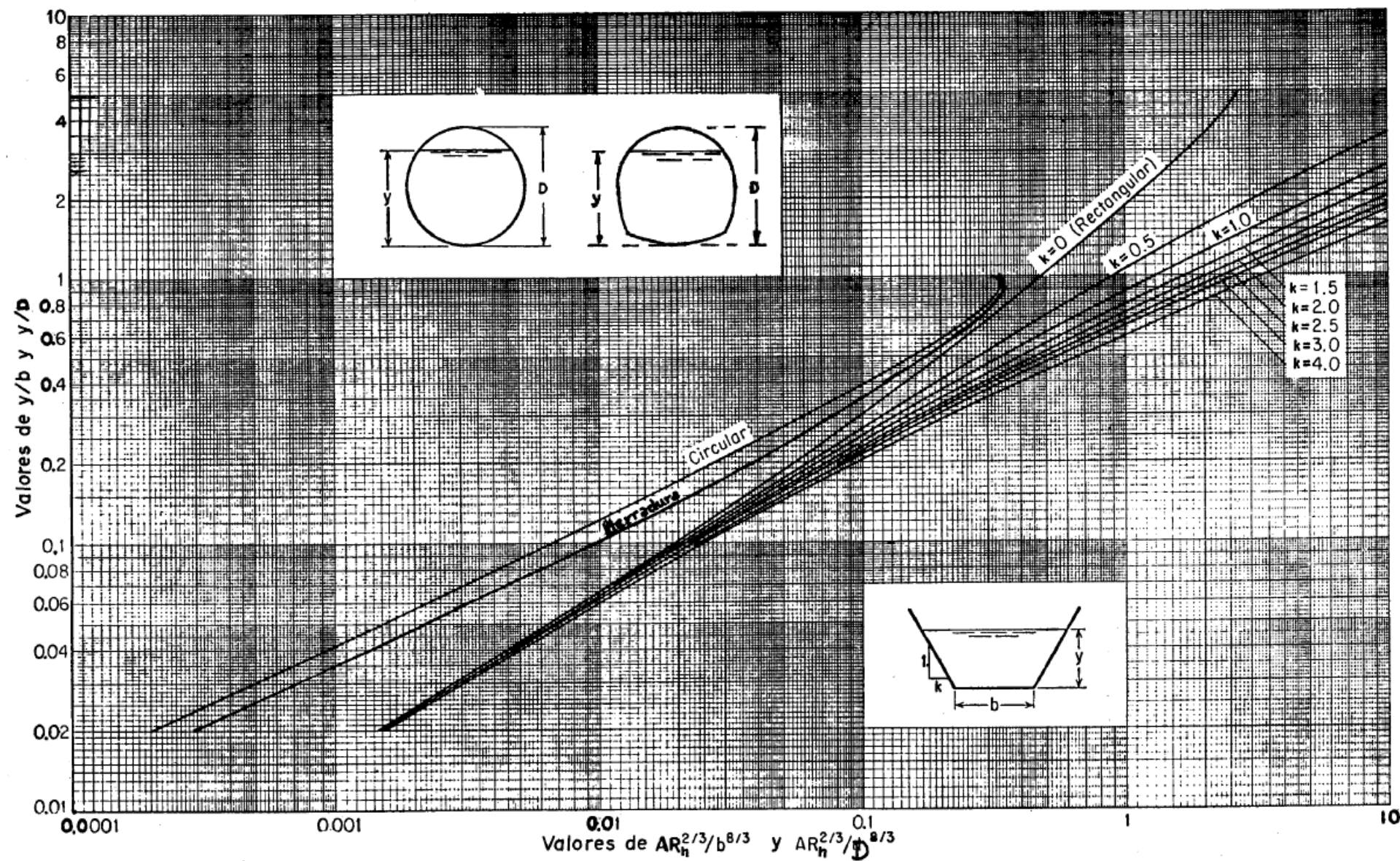
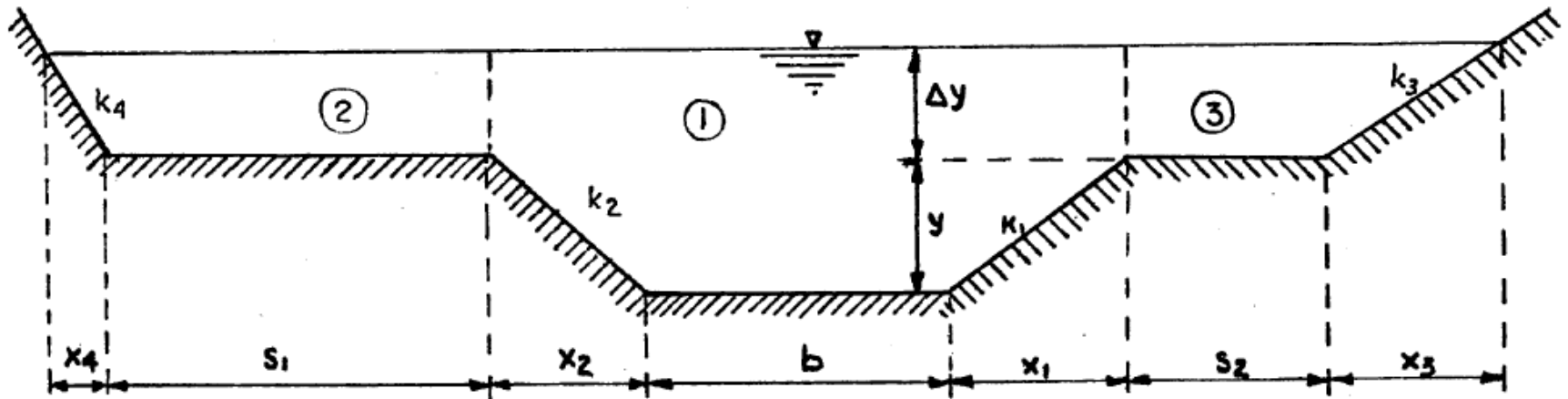


Fig.2.7.—Curvas para determinar el tirante normal

9. CANALES DE SECCIÓN COMPUESTA (1)

El cálculo de una sección compuesta se realiza aplicando separadamente la fórmula de Manning para cada subsección y obteniendo la velocidad media de la misma y el gasto correspondiente. La suma de estos gastos proporciona el total.



$$v_1 = \frac{K_1}{A_1} s^{1/2}, v_2 = \frac{K_2}{A_2} s^{1/2} \dots, v_n = \frac{K_n}{A_n} s^{1/2}$$

9. CANALES DE SECCIÓN COMPUESTA (2)

El gasto total será:

$$Q = VA = \sum_{i=1}^n V_i A_i = \sum_{i=1}^n K_i S^{1/2}$$

$$Q = \left(\sum_{i=1}^n K_i \right) S^{1/2}$$

Y la velocidad media:

$$V = \frac{\left[\sum_{i=1}^n K_i \right] S^{1/2}}{A}$$

9. CANALES DE SECCIÓN COMPUESTA (3)

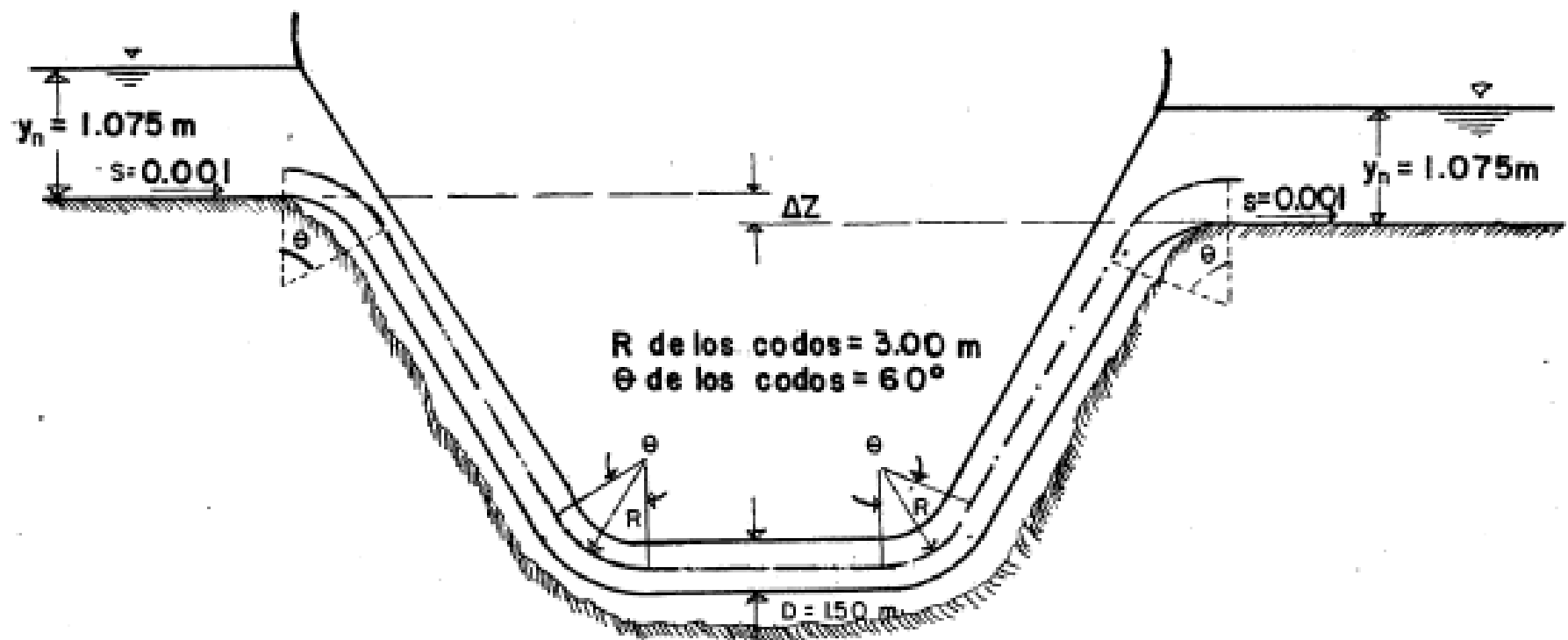
Los coeficientes de corrección por energía y cantidad de movimiento (Coriolis y Bousinesq):

$$\alpha = \frac{1}{A} \iint_A \left(\frac{v}{V}\right)^3 dA \approx \frac{1}{A} \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i K_i^3 / A_i^2)}{(\sum_{i=1}^n K_i)^3 / A^3}$$

$$\alpha \approx A^2 \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i K_i^3 / A_i^2)}{(\sum_{i=1}^n K_i)^3} \right]$$

$$\beta \approx A \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\beta_i K_i^2 / A_i)}{(\sum_{i=1}^n K_i)^2} \right]$$

Problema 2.5 En el canal mostrado en la fig 2.10 se desea salvar la barranca mediante un sifón invertido cuya geometría se muestra. Determinar el desnivel Δz necesario para que el gasto circule en la tubería sin producir remanso hacia aguas arriba. La sección del canal es rectangular de 3.00 m de plantilla, su tirante normal $y_n = 1.075$ m y su pendiente $S = 0.001$. El coeficiente de fricción de Manning en el canal es $n = 0.0135$. La longitud total del tubo es de 200 m y este es de concreto bien acabado, siendo $n = 0.012$.





10. CONDUCTOS CERRADOS PARCIALMENTE LLENOS (1)

Kozeny, para conductos circulares

$$V = (8.86 \log y + N) \left(\frac{y}{D}\right)^{1/6} \sqrt{SD}$$

Las figuras 2.11 y 2.12 muestran los gráficos correspondientes a canales circulares y de herradura.

Si el conducto es de asbesto-cemento y trabaja parcialmente lleno, se recomienda el uso de la formula de Ludin

$$V = K_L R_h^{0.65} S^{0.54}$$

en que K_L varía de 134 para $V \geq 0.8$ m/seg y 122 para $V \leq 0.3$ m/seg

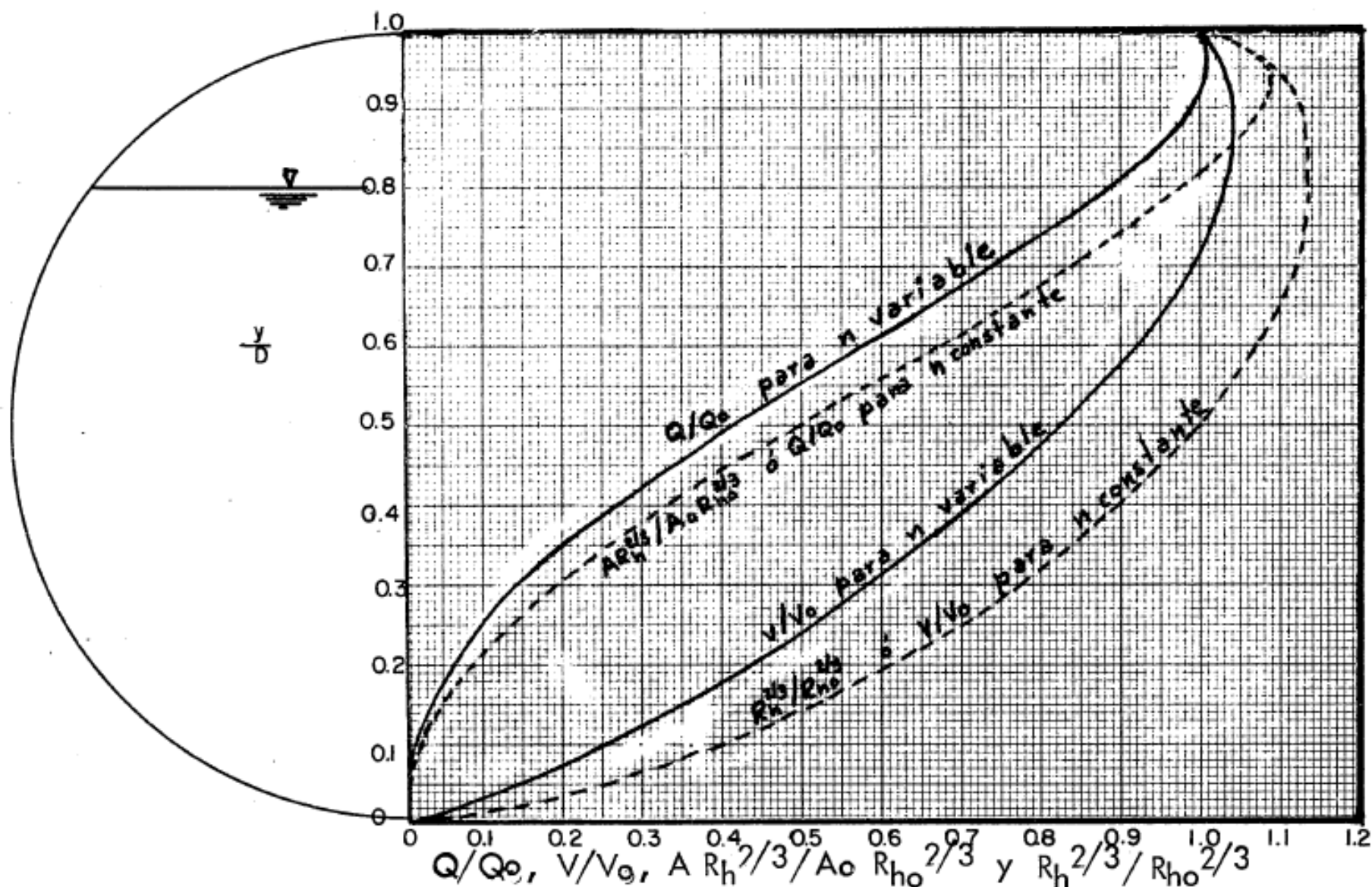
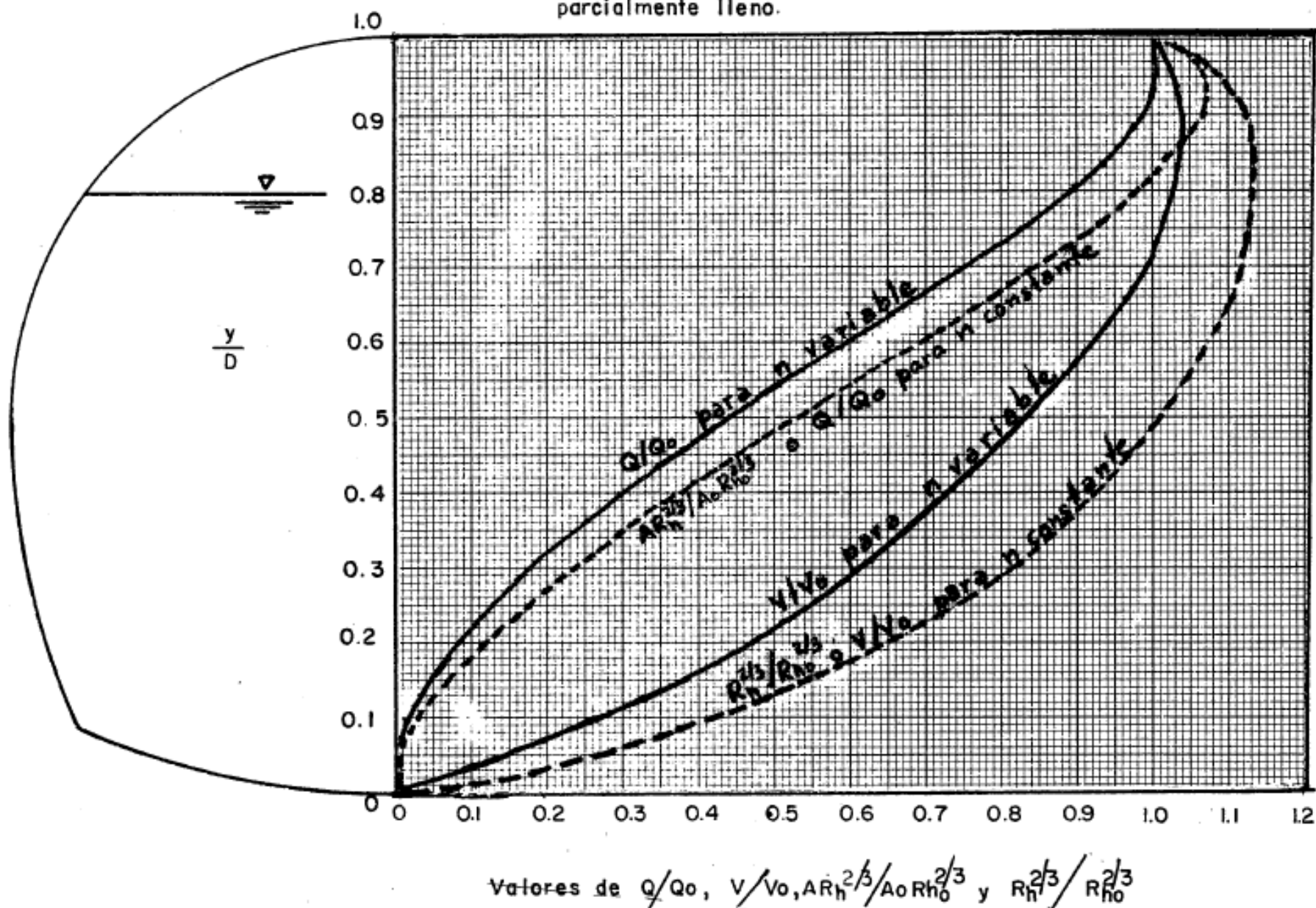


Fig. 2.11 Características del flujo en un conducto circular

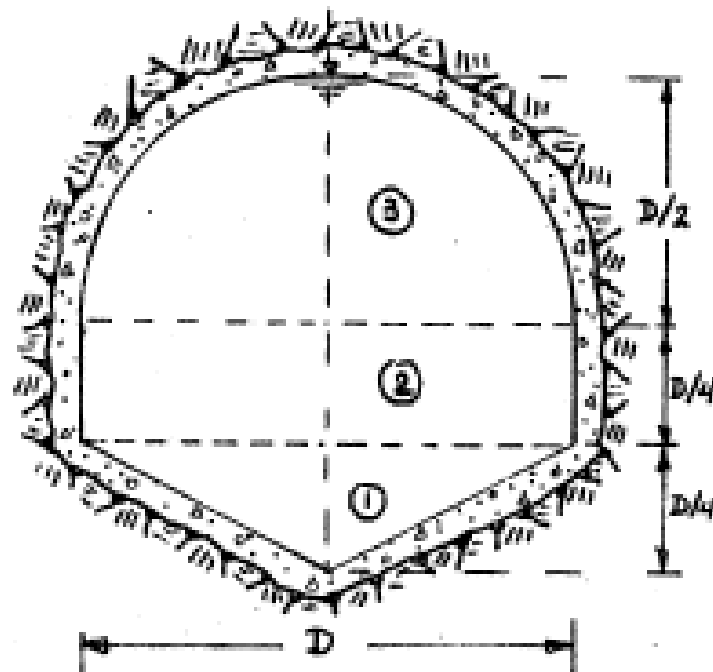
parcialmente lleno, según Kozeny (ref 15)

Fig. 2.12 Características del flujo en un conducto herradura parcialmente lleno.



Problema 2.9 Una alcantarilla de concreto de sección circular debe conducir un gasto-
 $Q = 450 \text{ lt/seg}$ con una pendiente $S = 0.001125$. Calcular el diámetro necesario de tal -
manera que el tirante sea $y = 0.8 D$.

Problema 2.10 Un túnel revestido de concreto bien acabado tiene la forma mostrada en



en la fig 2.13, con pendiente $S = 0.0004$ y diámetro $D = 1.60$ m. a) Calcular la velocidad media y el gasto que transporta ^{a. tubo lleno.} b) Determinar el tirante que se establecería si el túnel fuese de sección herradura de diámetro $D = 1.60$ m, para el mismo gasto y pendiente.