

# FLUJO UNIFORME (2)

Flujo en Superficie Libre



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



# 1. CANALES REVESTIDOS



# 1. DISEÑO DE CANALES REVESTIDOS(1)

- Para diseñar un canal, se asume un flujo uniforme.
- Esta asunción implica que se debe asegurar un flujo uniforme para que el canal funcione de manera adecuada.
- Para el dimensionamiento de un canal se suele usar la ecuación de Manning.
- Para el diseño, deben verificarse además condiciones de flujo subcríticas y velocidades bajas, de manera que se puede reducir la erosión.
- Asimismo se debe evitar velocidades muy bajas para evitar la sedimentación.

# 1. DISEÑO DE CANALES REVESTIDOS(2)

- Usualmente se diseñan canales trapezoidales para reducir costos.



- Los taludes dependen del tipo de material. Algunos valores recomendados son:

| MATERIAL                  | TALUD $z$ |
|---------------------------|-----------|
| Roca dura y sana          | 0         |
| Roca fisurada             | 0,5       |
| Suelos cementados, firmes | 1         |
| Tierra arcillosa          | 1,25      |
| Tierra arenosa            | 1,5       |
| Arena                     | 2 ó más   |



## 2. ECUACIÓN DE MANNING (1)

- Manning propone el uso de un coeficiente con sentido físico ( $n$ ), el cual representa la rugosidad de la superficie en contacto con el fluido. De esta manera propone la siguiente relación entre “ $n$ ” y el coeficiente de Chezy:

$$C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n}$$

- Sustituyendo esta expresión en la ecuación de Chezy, se obtiene:

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

donde:

R: Radio Hidráulico.

S: Pendiente de la Línea de Energía

n: Coeficiente de Manning



## 2. ECUACIÓN DE MANNING (2)

- El coeficiente de rugosidad de Manning tiene dimensiones  $TL^{-1/3}$ , por lo que la ecuación en el sistema inglés se escribe como:

$$V = \frac{1,486}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

- La fórmula de Manning es aceptable para valores medios de la rugosidad relativa pero su exactitud disminuye con números de Reynolds bajos

VALORES DEL COEFICIENTE DE MANNING  $n$ 

| SUPERFICIE                                        | $n$           |
|---------------------------------------------------|---------------|
| Superficie metálica, lisa, sin pintar             | 0,012         |
| Superficie metálica, lisa, pintada                | 0,013         |
| Superficie metálica, corrugada                    | 0,025         |
| Cemento liso                                      | 0,011         |
| Mortero de cemento                                | 0,013         |
| Madera cepillada                                  | 0,012         |
| Madera sin cepillar                               | 0,013         |
| Tablones sin cepillar                             | 0,014         |
| Concreto liso                                     | 0,013         |
| Concreto bien acabado, usado                      | 0,014         |
| Concreto frotachado                               | 0,015         |
| Concreto sin terminar                             | 0,017         |
| Gunita (sección bien terminada)                   | 0,019         |
| Gunita (sección ondulada)                         | 0,022         |
| Superficie asfáltica lisa                         | 0,013         |
| Superficie asfáltica rugosa                       | 0,016         |
| Tierra, limpia, sección nueva                     | 0,018         |
| Tierra, limpia, sección antigua                   | 0,022         |
| Tierra gravosa                                    | 0,025         |
| Tierra, con poca vegetación                       | 0,027         |
| Tierra, con vegetación                            | 0,035         |
| Tierra, con piedras                               | 0,035         |
| Tierra, con pedrones                              | 0,040         |
| Para secciones circulares (trabajando como canal) |               |
| Metal, liso                                       | 0,010         |
| Acero soldado                                     | 0,012         |
| Acero riveteado                                   | 0,016         |
| Fierro fundido                                    | 0,013 – 0,014 |
| Cemento                                           | 0,011 – 0,013 |
| Vidrio                                            | 0,010         |

VALORES DE LA RUGOSIDAD ABSOLUTA  $k$ 

| MATERIAL                                                                                        | $k$ (m)                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Tubos muy lisos sin costura (vidrio, cobre, acero nuevo con superficie pintada, plástico, etc.) | $1,5 \times 10^{-5}$                      |
| Fierro forjado                                                                                  | $4,5 \times 10^{-5}$                      |
| Acero rolado, nuevo                                                                             | $5 \times 10^{-5}$                        |
| Acero laminado, nuevo                                                                           | $4 \times 10^{-5} - 10^{-4}$              |
| Fierro fundido, nuevo                                                                           | $2,5 \times 10^{-4}$                      |
| Fierro galvanizado                                                                              | $1,5 \times 10^{-4}$                      |
| Fierro fundido, asfaltado                                                                       | $1,2 \times 10^{-4}$                      |
| Fierro fundido, oxidado                                                                         | $1 \times 10^{-3} - 1,5 \times 10^{-3}$   |
| Acero remachado                                                                                 | $0,9 \times 10^{-4} - 0,9 \times 10^{-3}$ |
| Cemento enlucido                                                                                | $4 \times 10^{-4}$                        |
| Asbesto cemento, nuevo                                                                          | $2,5 \times 10^{-5}$                      |
| Concreto centrifugado, nuevo                                                                    | $1,6 \times 10^{-4}$                      |
| Concreto muy bien terminado, a mano                                                             | $10^{-5}$                                 |
| Concreto liso                                                                                   | $2,5 \times 10^{-5}$                      |
| Concreto bien acabado, usado                                                                    | $2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$     |
| Concreto sin acabado especial                                                                   | $10^{-3} - 3 \times 10^{-3}$              |
| Concreto rugoso                                                                                 | $10^{-2}$                                 |
| Duelas de madera                                                                                | $1,8 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$   |
| Piedra asentada y bien lisa                                                                     | $5 \times 10^{-4}$                        |
| Revestimiento de piedra                                                                         | $2 \times 10^{-3}$                        |
| Grava                                                                                           | $10^{-2}$                                 |
| Piedra pequeña                                                                                  | $2 \times 10^{-2}$                        |
| Piedra grande                                                                                   | $5 \times 10^{-2}$                        |
| Roca                                                                                            | 0,1                                       |
| Tierra (lisa)                                                                                   | $3 \times 10^{-3}$                        |
| Fondo con transporte de arena                                                                   | $10^{-2} - 5 \times 10^{-2}$              |
| Acequia con vegetación                                                                          | 0,1                                       |



### 3. CASO A: b conocida

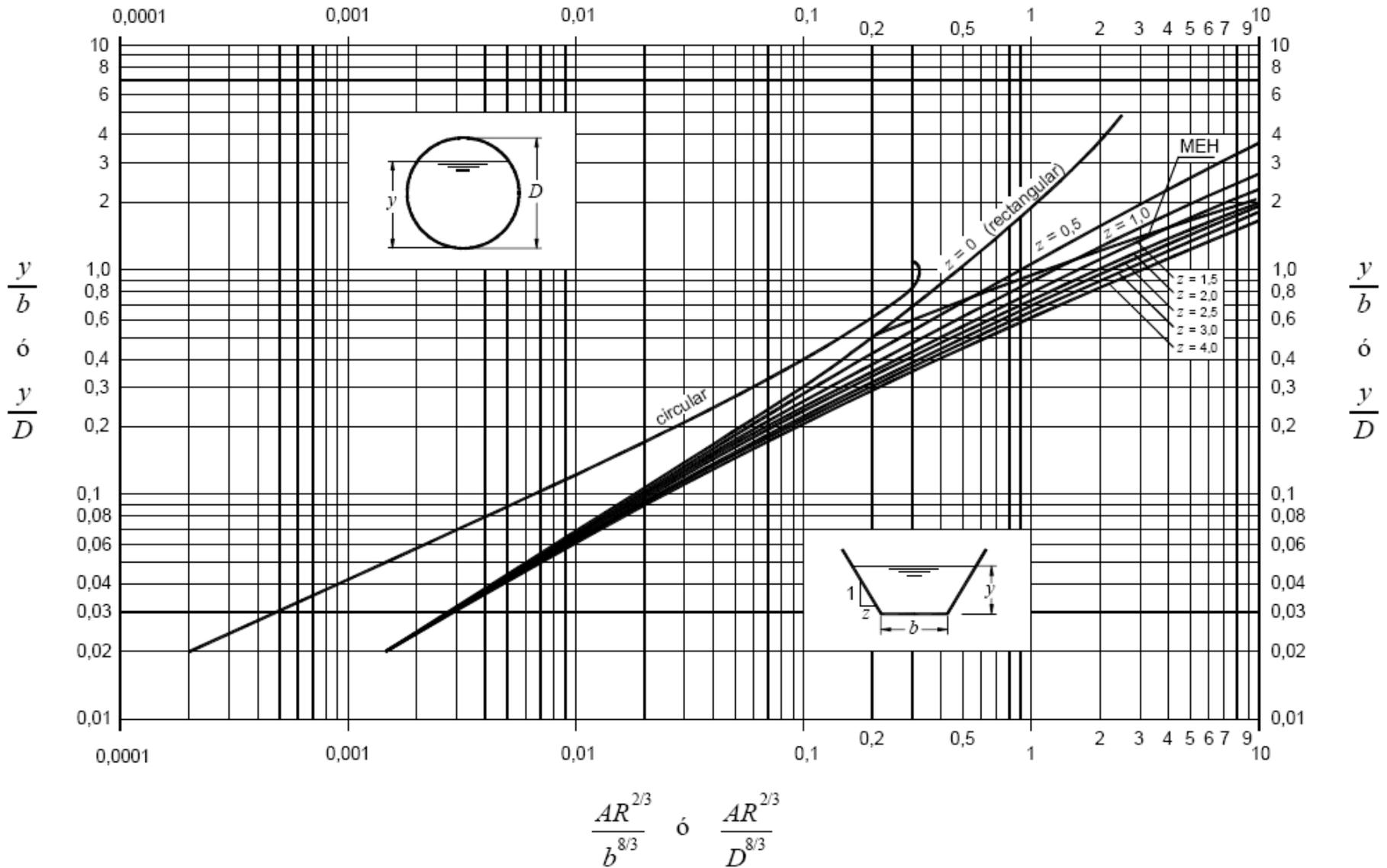
- Conociendo: b, Q, S, z, n; se calcula:

$$AR^{\frac{2}{3}} = \frac{Qn}{S^{\frac{1}{2}}}$$

- Con este valor conocido, se ingresa al gráfico y se encuentra y/b.
- También se puede hallar la solución por tanteos.

$$Q = (b + zy)y \frac{\left[ \frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}} \right]^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

### 3. CASO A: b conocida





### 3. CASO B: $y$ conocida

- Conociendo:  $Y$ ,  $Q$ ,  $S$ ,  $z$ ,  $n$ .
- Se procede a aplicar el método de tanteos para encontrar una gráfica  $b$  vs.  $Q$  y poder estimar el tirante requerido.

$$Q = (b + zy)y \frac{\left[ \frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}} \right]^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

- Se puede resolver por iteraciones sucesivas o métodos numéricos.



### 3. CASO C: b, y desconocidos

- Se usa el concepto de MEH
- De la ecuación de Manning

$$Q = \frac{AR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

- Ya que  $R=A/P$
- Se obtiene:

$$A = \left[ \frac{Qn}{S^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{3}{5}} P^{\frac{2}{5}}$$

### 3. CASO C: b, y desconocidos

- Como en un canal dado, Q, n y S son constantes

$$A = KP^{\frac{2}{5}}$$

- Se dice que **una sección es de máxima eficiencia hidráulica cuando para la misma área, pendiente calidad de paredes deja pasar un gasto máximo.** bien, es aquella que para el mismo gasto, pendiente calidad de paredes tiene un área mínima....

**SEMICIRCULAR.**



### 3. CASO C: $b$ , $y$ desconocidos

#### Sección trapezoidal

- Sea  $m$  a la relación entre ancho de base y tirante:

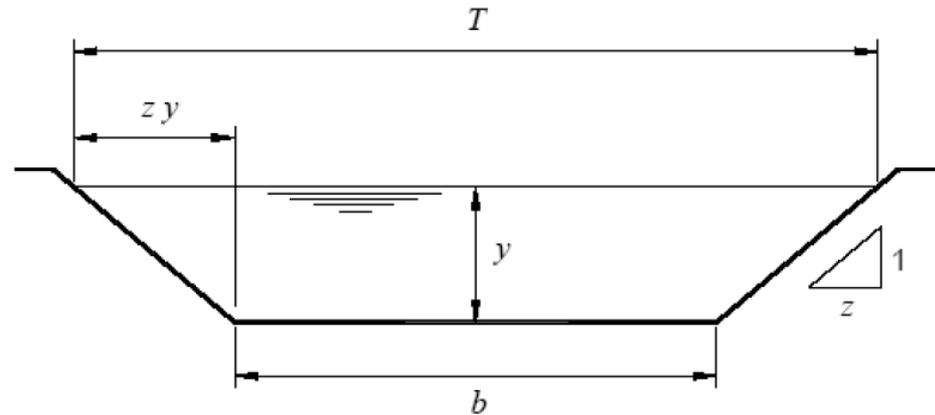
$$m = b/y$$

- De geometría se tiene:

$$A = (m + z)y^2 \quad \longrightarrow \quad y = \sqrt{\frac{A}{m + z}}$$

- El perímetro mojado es

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



### 3. CASO C: b, y desconocidos

- Mediante transformaciones sucesivas se obtiene

$$P^2 m + P^2 z = A(m^2 + 4m\sqrt{1+z^2} + 4 + 4z^2)$$

- Derivando el Perímetro P con respecto a m para hallar el mínimo:

$$\frac{dP}{dm} = \frac{2A(m + 2\sqrt{1+z^2}) - P^2}{2P(m+z)} = 0$$

- Donde,

$$m = 2(\sqrt{1+z^2} - z)$$

- Es decir, para cada talud hay una relación m que es la que da la máxima eficiencia hidráulica.

|          |   |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>z</i> | 0 | 0,25 | 0,5  | 1    | 1,5  | 2    | 2,5  | 3    | 4    |
| <i>m</i> | 2 | 1,56 | 1,24 | 0,83 | 0,61 | 0,47 | 0,39 | 0,32 | 0,25 |

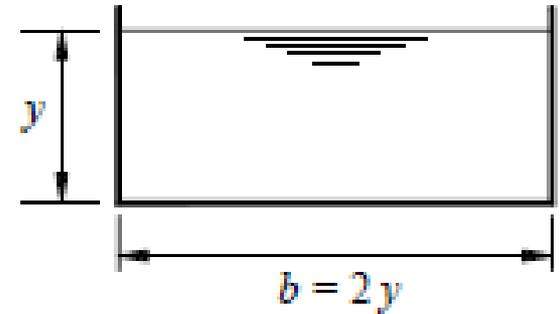


### 3. CASO C: b, y desconocidos

#### Sección rectangular

- En una sección rectangular,  $z=0$  y resulta que  $m=2$ .
- Reemplazando, el radio hidráulico será:

$$R = \frac{(m+z)y^2}{my + 2y\sqrt{1+z^2}}$$



- Reemplazando el valor los valores de  $z$  y  $m$ , se obtiene:

$$R = y/2$$

- “En una sección trapezoidal de MEH, el radio hidráulico es igual a la mitad del tirante”

## 4. TALUD MÁS EFICIENTE

- Reemplazando la expresión de  $m$ , en el perímetro:

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

$$P_{\min} = 4y\sqrt{1 + z^2} - 2yz$$

- Derivando respecto a  $z$ , se obtiene:

$$z = \frac{\sqrt{3}}{3}$$

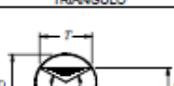
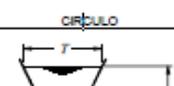
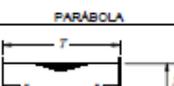
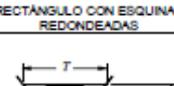
- “En una sección trapezoidal el talud más eficiente corresponde a un ángulo de  $60^\circ$  respecto a la horizontal”.



## SECCIONES DE MAXIMA EFICIENCIA HIDRAULICA

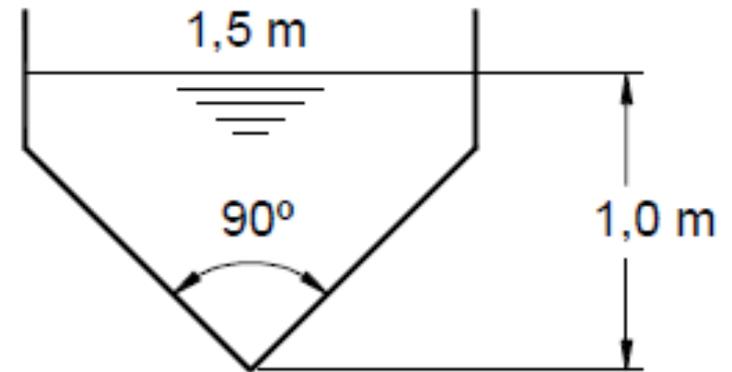
| SECCION                              | AREA<br>$A$              | PERIMETRO MOJADO<br>$P$ | RADIO HIDRAULICO<br>$R$ | ANCHO SUPERFICIAL<br>$T$ | TIRANTE HIDRAULICO<br>$d$ | FACTOR HIDRAULICO<br>$Z$             |
|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| TRAPECIO<br>(Mitad de un hexágono)   | $\sqrt{3}y^2$            | $2\sqrt{3}y$            | $\frac{y}{2}$           | $\frac{4}{3}\sqrt{3}y$   | $\frac{3}{4}y$            | $\frac{3}{2}y^{\frac{5}{2}}$         |
| RECTANGULO<br>(mitad de un cuadrado) | $2y^2$                   | $4y$                    | $\frac{y}{2}$           | $2y$                     | $y$                       | $2y^{\frac{5}{2}}$                   |
| TRIANGULO<br>(Mitad de un cuadrado)  | $y^2$                    | $2\sqrt{2}y$            | $\frac{1}{4}\sqrt{2}y$  | $2y$                     | $\frac{y}{2}$             | $\frac{\sqrt{2}}{2}y^{\frac{5}{2}}$  |
| SEMICIRCULO                          | $\frac{\pi}{2}y^2$       | $\pi y$                 | $\frac{1}{2}y$          | $2y$                     | $\frac{\pi}{4}y$          | $\frac{\pi}{4}y^{\frac{5}{2}}$       |
| PARABOLA<br>$T = 2\sqrt{2}y$         | $\frac{4}{3}\sqrt{2}y^2$ | $\frac{8}{3}\sqrt{2}y$  | $\frac{1}{2}y$          | $2\sqrt{2}y$             | $\frac{2}{3}y$            | $\frac{8}{9}\sqrt{3}y^{\frac{5}{2}}$ |
| CATENARIA                            | $1,39586y^2$             | $2,9836y$               | $0,46784y$              | $1,917532y$              | $0,72795y$                | $1,19093y^{\frac{5}{2}}$             |

## ELEMENTOS GEOMETRICOS DE DIVERSAS SECCIONES

| SECCION                                                                                                                   | AREA<br>$A$                                         | PERIMETRO MOJADO<br>$P$                                       | RADIO HIDRAULICO<br>$R$                                                     | ANCHO SUPERFICIAL<br>$T$                                             | TIRANTE HIDRAULICO<br>$d$                                                               | FACTOR HIDRAULICO<br>$Z$                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>RECTÁNGULO                            | $by$                                                | $b + 2y$                                                      | $\frac{by}{b + 2y}$                                                         | $b$                                                                  | $y$                                                                                     | $by^{\frac{5}{3}}$                                                                                                         |
| <br>TRAPECIO                              | $(b + zy)y$                                         | $b + 2y\sqrt{1 + z^2}$                                        | $\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$                                    | $b + 2zy$                                                            | $\frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$                                                             | $\frac{[(b + zy)y]^{\frac{5}{2}}}{\sqrt{b + 2zy}}$                                                                         |
| <br>TRIANGULO                             | $zy^2$                                              | $2y\sqrt{1 + z^2}$                                            | $\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$                                                | $2zy$                                                                | $\frac{y}{2}$                                                                           | $\frac{\sqrt{2}}{2} zy^{\frac{5}{2}}$                                                                                      |
| <br>CIRCULO                               | $\frac{1}{8}(\theta - \text{sen}\theta)D^2$         | $\frac{1}{2}\theta D$                                         | $\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right)D$              | $\left(\frac{\text{sen}\theta}{2}\right)D$ , ó<br>$2\sqrt{y(D - y)}$ | $\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \text{sen}\theta}{\text{sen}\frac{\theta}{2}}\right)D$ | $\frac{\sqrt{2}(\theta - \text{sen}\theta)^{\frac{5}{2}}}{32\left(\text{sen}\frac{\theta}{2}\right)^{0.5}}D^{\frac{5}{2}}$ |
| <br>PARABOLA                              | $\frac{2}{3}Ty$                                     | $T + \frac{8y^2}{3T}$ *                                       | $\frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2}$                                                 | $\frac{3A}{2y}$                                                      | $\frac{2}{3y}$                                                                          | $\frac{2}{9}\sqrt{6Ty}^{1.5}$                                                                                              |
| <br>RECTANGULO CON ESQUINAS REDONDEADAS | $\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2 + (b + 2r)y$     | $(\pi - 2)r + b + 2y$                                         | $\frac{\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2 + (b + 2r)y}{(\pi - 2)r + b + 2y}$ | $b + 2r$                                                             | $\frac{\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2}{b + 2r} + y$                                  | $\frac{\left[\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2 + (b + 2r)y\right]^{1.5}}{\sqrt{b + 2r}}$                                   |
| <br>TRIANGULO CON FONDO REDONDEADO      | $\frac{T^2}{4z} - \frac{r^2}{z}(1 - z \cot^{-1} z)$ | $\frac{T}{z}\sqrt{1 + z^2} - \frac{2r}{z}(1 - z \cot^{-1} z)$ | $\frac{A}{P}$                                                               | $2[z(y - r) + r\sqrt{1 + z^2}]$                                      | $\frac{A}{T}$                                                                           | $A\sqrt{\frac{A}{T}}$                                                                                                      |

## EJERCICIO 1

El canal mostrado en la figura tiene una pendiente de  $0,0009$ . El coeficiente  $n$  de Manning es  $0,013$ . Calcular el gasto. ¿En cuánto aumentará el gasto si la pendiente fuera el doble?





## EJERCICIO 2

- Un canal trapezoidal tiene 24 ft de ancho superficial, un talud de  $45^\circ$  y un ancho en la base de 8 ft. El canal es de concreto frotachado. La pendiente es 0,0006. Calcular el gasto. Usar la fórmula de Manning (en unidades inglesas).



## EJERCICIO 3

- Demostrar que en una sección trapecial de máxima eficiencia hidráulica se cumple que

$$\frac{1}{2}(b + 2zy) = y\sqrt{1 + z^2}$$



## EJERCICIO 4

- Demostrar que en un canal trapecial de máxima eficiencia hidráulica, cuyo talud es de  $45^\circ$ , se cumple que

$$\frac{AR^{\frac{2}{3}}}{b^{\frac{8}{3}}} = 1,90$$



## EJERCICIO 5

Determinar el diámetro que debe tener un túnel de sección circular ( $n = 0,030$ ) para conducir un gasto de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  de modo que sea la mínima sección posible. La pendiente es  $0,0008$ . Calcular también el tirante y velocidad respectivos.

Ancho de plantilla y tirante en m.

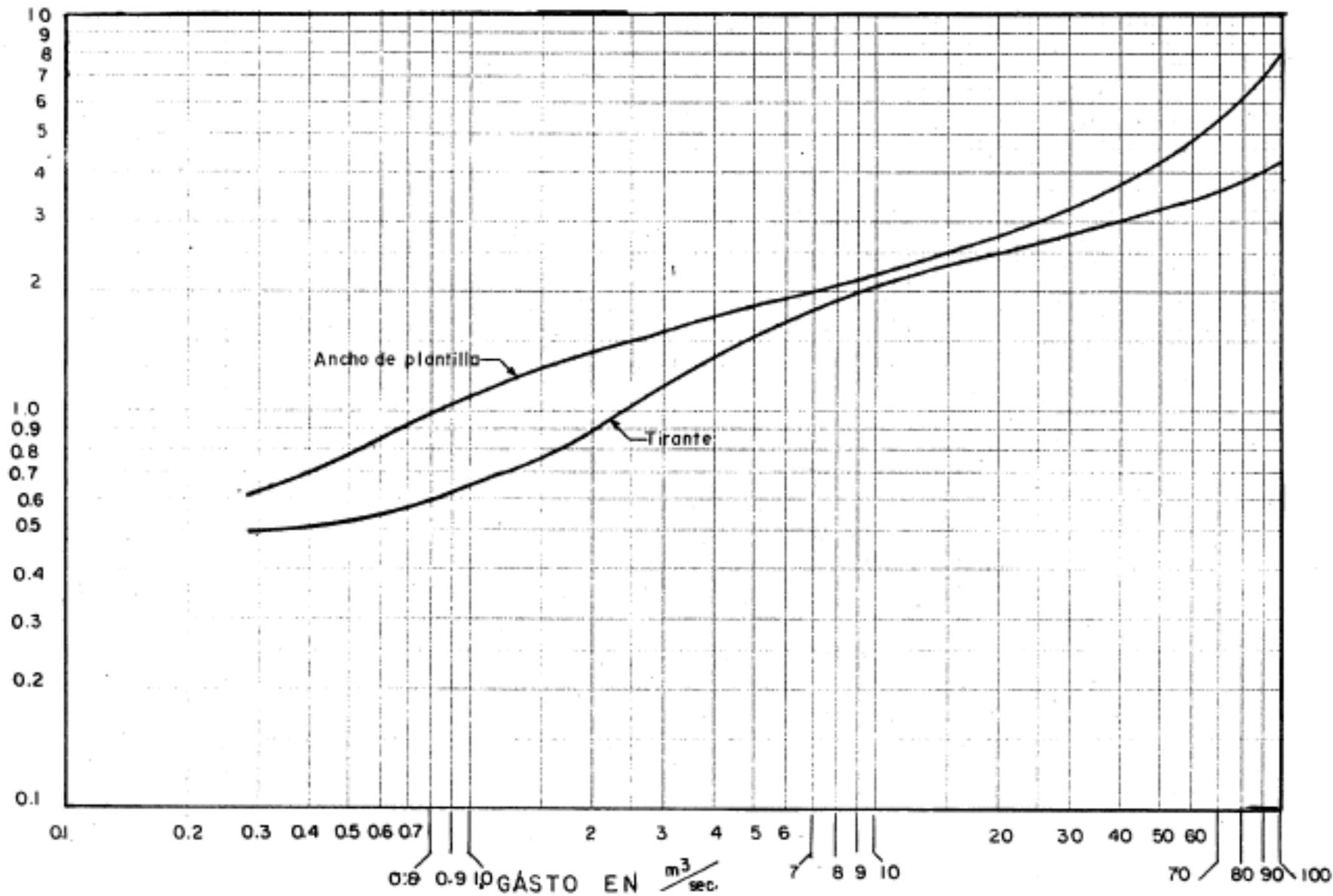
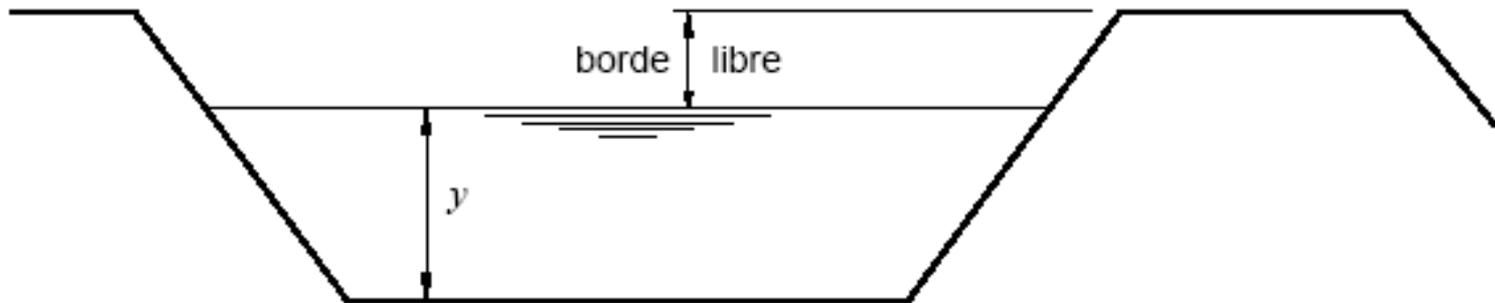


Fig. 2 .15 Ancho de plantilla y tirante recomendados para canales revestidos (U.S. Bureau of Reclamation.)

## 5. BORDE LIBRE (1)

- Se denomina borde libre a la altura adicional que se da a fin de absorber los niveles extraordinarios que puedan presentarse por encima del caudal de diseño de un canal.



- Para canales en tierra, el Bureau of Reclamation señala que el borde libre varía entre 1 ft (0,30 m) para canales pequeños y poco profundos, hasta 4 ft (1,20 m) para canales grandes, profundos y con caudales de 85 m<sup>3</sup>/s ó más.



## 5. BORDE LIBRE (2)

- Para cálculos preliminares recomienda:

$$b.l. = \sqrt{cy}$$

donde

b.l. : es el borde libre en metros

y: es el tirante en metros

c: es un coeficiente que varia de 0.46 para  $Q=0.60 \text{ m}^3/\text{s}$  a 0.76 para  $Q=85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

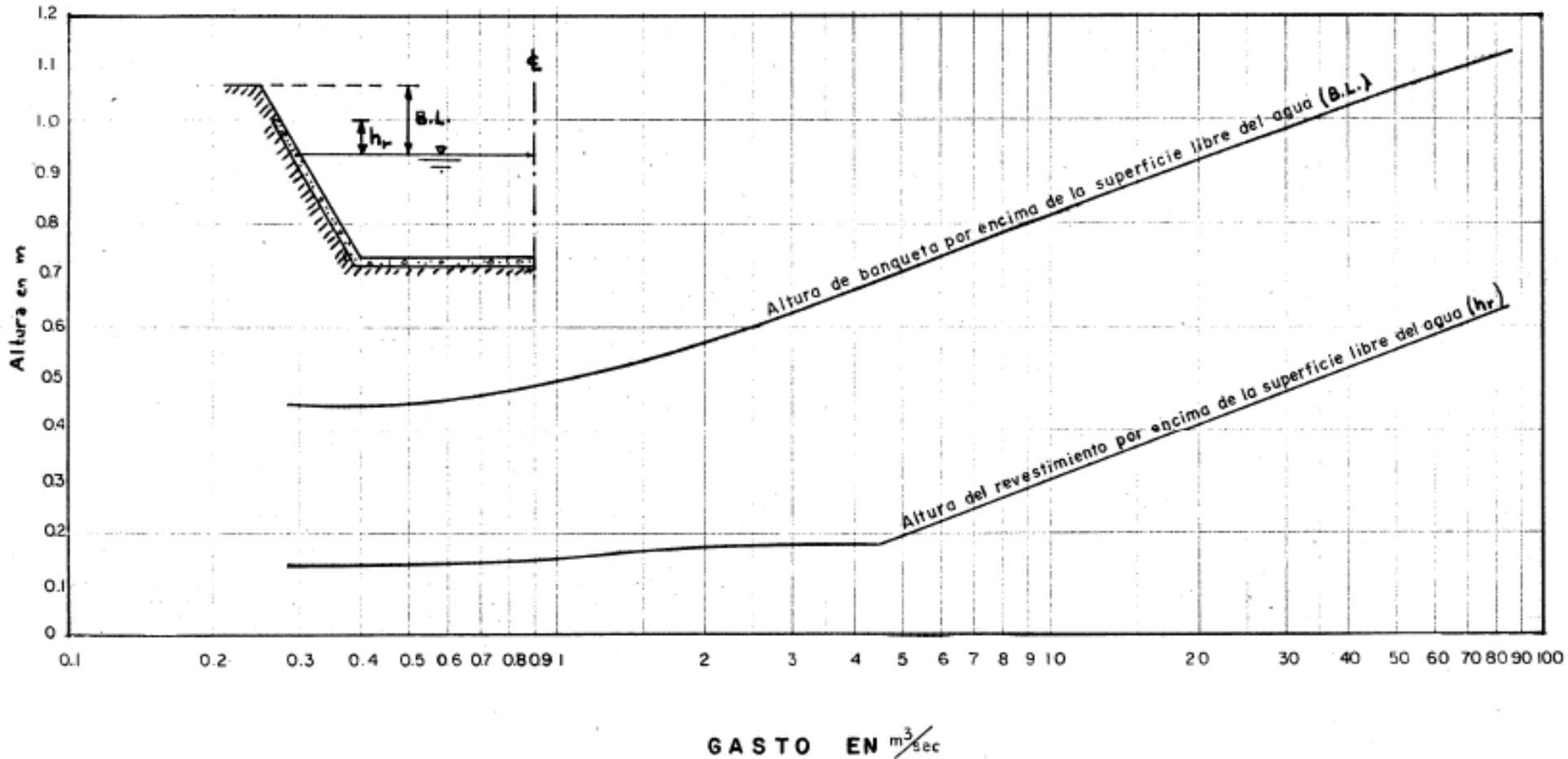


Fig. 2.16 Borde y altura de banqueta recomendados para canales revestidos.



## EJERCICIO 1

Un canal trapecial de concreto frotachado tiene una capacidad de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ . La pendiente es  $0,006$ . El talud es  $0,5$ . Si el ancho en el fondo es de  $1 \text{ m}$  ¿Cuáles son las dimensiones de la sección transversal y la velocidad media?. Si el borde libre fuera de  $30 \text{ cm}$  ¿Qué caudal adicional podría ser absorbido? (en porcentaje).



## EJERCICIO 2

- Un canal trapezoidal cuyo ancho en la base es de 3.8 m tiene un talud igual a 0.75. La pendiente es de 1/1000. Si el canal estuviera completamente revestido de albañilería de piedra, entonces para un gasto de 45 m<sup>3</sup>/s el tirante es 3.06 m. Si el mismo canal estuviera revestido con concreto se tendría un gasto de 40 m<sup>3</sup>/s un tirante de 2.60 m.
  - a) ¿Cuál será el gasto, si el fondo es de concreto y las paredes de albañilería de piedra, siendo el tirante de 3 m?
  - b) ¿Cuál será el gasto si el fondo es de albañilería y las paredes de concreto para un tirante de 3 m?



## 6. RECOMENDACIONES GENERALES (1)

### Taludes laterales

- Depende del material de construcción

*Taludes apropiados para distintos tipos de material*

| <b>MATERIAL</b>                                                | <b>TALUD (h : v)</b>   |
|----------------------------------------------------------------|------------------------|
| Roca                                                           | Prácticamente vertical |
| Suelos de turba y detritos                                     | 0.25 : 1               |
| Arcilla compacta o tierra con recubrimiento de concreto        | 0.5 : 1 hasta 1:1      |
| Tierra con recubrimiento de piedra o tierra en grandes canales | 1:1                    |
| Arcilla firme o tierra en canales pequeños                     | 1.5 : 1                |
| Tierra arenosa suelta                                          | 2:1                    |
| Greda arenosa o arcilla porosa                                 | 3:1                    |

**Fuente: Aguirre Pe, Julián, "Hidráulica de canales", Dentro Interamericano de Desarrollo de Aguas y Tierras – CIDIAT, Merida, Venezuela, 1974**

- Para canales revestidos, la USBR (United States Bureau of Reclamation) recomienda un talud estándar de 1.5:1, sin embargo, el talud práctico en estos casos es 0.8:1 a 1:1.



## 6. RECOMENDACIONES GENERALES (2)

### Pendiente admisible

- La pendiente, en general, debe ser la mínima que permita dominar la mayor superficie posible de tierra y que, a la vez no causen erosión del material en que esta alojado el canal, ni depósito de sedimentos.
- La pendiente máxima admisible para canales varia según la textura. A continuación se muestran las pendientes máximas recomendable

| <b>Tipo de suelos</b>  | <b>Pendiente S (0/00)</b> |
|------------------------|---------------------------|
| <b>Suelo suelto</b>    | <b>0.5 - 1.0</b>          |
| <b>Suelo francos</b>   | <b>1.5 - 2.5</b>          |
| <b>Suelo arcilloso</b> | <b>3.0 - 4.5</b>          |

- *Valores de 1/1000, 2/1000, 3/1000, 5/1000, 0.8/1000 ó 0.2/1000 son usuales en la costa del Perú.*



## 6. RECOMENDACIONES GENERALES (3)

### Ancho de plantilla/solera

- Una recomendación práctica de fijar el ancho de solera, es en función del caudal.

| <b>Caudal <math>Q</math> ( <math>m^3 / s</math> )</b> | <b>Solera <math>b</math> ( m )</b> |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Menor de 0.100</b>                                 | <b>0.30</b>                        |
| <b>Entre 0.100 y 1.200</b>                            | <b>0.50</b>                        |
| <b>Entre 2.00 y 4.00</b>                              | <b>0.75</b>                        |
| <b>mayor de 4.00</b>                                  | <b>1.00</b>                        |

- Para caudales pequeños, el ancho se puede definir en función al ancho de la pala de la excavadora.



## 6. RECOMENDACIONES GENERALES (4)

- La velocidad en los canales, varían en un rango cuyo limite son las velocidades mínima que no produzca deposito de materiales sólidos en suspensión (sedimentación), y la máxima que no produzca erosión en las paredes y el fondo del canal.

Tabla N° -10 -. Velocidades máximas en hormigón en función de su resistencia.

| RESISTENCIA,<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | PROFUNDIDAD DEL TIRANTE (m) |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|
|                                       | 0.5                         | 1    | 3    | 5    | 10   |
| 50                                    | 9.6                         | 10.6 | 12.3 | 13.0 | 14.1 |
| 75                                    | 11.2                        | 12.4 | 14.3 | 15.2 | 16.4 |
| 100                                   | 12.7                        | 13.8 | 16.0 | 17.0 | 18.3 |
| 150                                   | 14.0                        | 15.6 | 18.0 | 19.1 | 20.6 |
| 200                                   | 15.6                        | 17.3 | 20.0 | 21.2 | 22.9 |

Fuente: Krochin Sviatoslav. "Diseño Hidráulico", Ed. MIR, Moscú, 1978



## 6. RECOMENDACIONES GENERALES (5)

Tabla N° - 9. Máxima velocidad permitida en canales no recubiertos de vegetación

| MATERIAL DE LA CAJA DEL CANAL        | "n"<br>Manning | Velocidad (m/s) |                                |                                              |
|--------------------------------------|----------------|-----------------|--------------------------------|----------------------------------------------|
|                                      |                | Agua limpia     | Agua con partículas coloidales | Agua transportando arena, grava o fragmentos |
| Arena fina coloidal                  | 0.020          | 1.45            | 0.75                           | 0.45                                         |
| Franco arenoso no coloidal           | 0.020          | 0.53            | 0.75                           | 0.60                                         |
| Franco limoso no coloidal            | 0.020          | 0.60            | 0.90                           | 0.60                                         |
| Limos aluviales no coloidales        | 0.020          | 0.60            | 1.05                           | 0.60                                         |
| Franco consistente normal            | 0.020          | 0.75            | 1.05                           | 0.68                                         |
| Ceniza volcánica                     | 0.020          | 0.75            | 1.05                           | 0.60                                         |
| Arcilla consistente muy coloidal     | 0.025          | 1.13            | 1.50                           | 0.90                                         |
| Limo aluvial coloidal                | 0.025          | 1.13            | 1.50                           | 0.90                                         |
| Pizarra y capas duras                | 0.025          | 1.80            | 1.80                           | 1.50                                         |
| Grava fina                           | 0.020          | 0.75            | 1.50                           | 1.13                                         |
| Suelo franco clasificado no coloidal | 0.030          | 1.13            | 1.50                           | 0.90                                         |
| Suelo franco clasificado coloidal    | 0.030          | 1.20            | 1.65                           | 1.50                                         |
| Grava gruesa no coloidal             | 0.025          | 1.20            | 1.80                           | 1.95                                         |
| Gravas y guijarros                   | 0.035          | 1.80            | 1.80                           | 1.50                                         |

Fuente: Krochin Sviatoslav. "Diseño Hidráulico". Ed. MIR, Moscú, 1978



## 6. RECOMENDACIONES GENERALES (6)

Al elegir la sección transversal de un canal, se deberá verificar que la velocidad no sea inferior a un valor mínimo que evite la sedimentación del material que pudiera transportarse en suspensión. Si el agua es completamente limpia, se acepta que el valor de la velocidad mínima permisible sea entre 0.10 y 0.20 m/seg, con el fin de evitar el crecimiento de plantas. Si el agua lleva material en suspensión, se acepta un valor entre 0.60 y 0.90 m/seg.

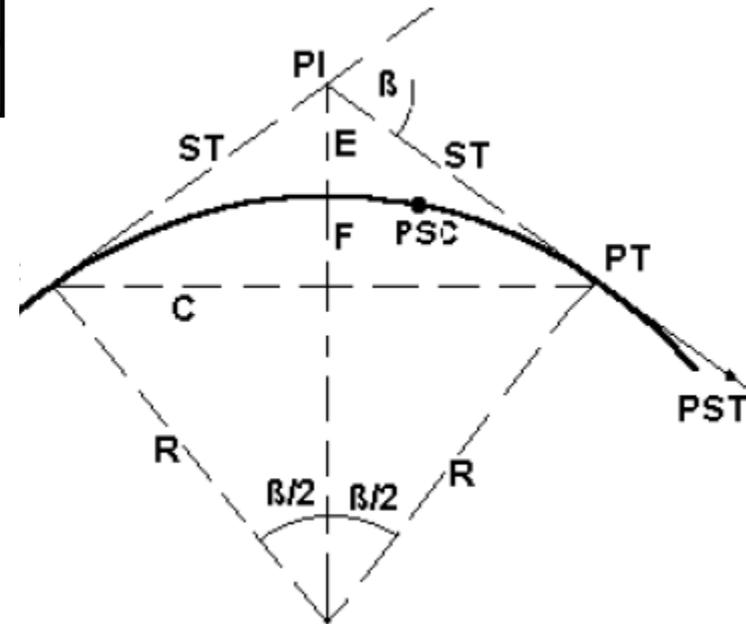
# 7. TRAZO GEOMÉTRICO

Tabla N° 01 - Radio mínimo en función al caudal

| Capacidad del canal                                                      | Radio mínimo         |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Hasta 10 m <sup>3</sup> /s                                               | 3 * ancho de la base |
| De 10 a 14 m <sup>3</sup> /s                                             | 4 * ancho de la base |
| De 14 a 17 m <sup>3</sup> /s                                             | 5 * ancho de la base |
| De 17 a 20 m <sup>3</sup> /s                                             | 6 * ancho de la base |
| De 20 m <sup>3</sup> /s a mayor                                          | 7 * ancho de la base |
| Los radios mínimos deben ser redondeados hasta el próximo metro superior |                      |

Tabla N° 02 - Radio mínimo en canales abiertos para Q < 20 m<sup>3</sup>/s

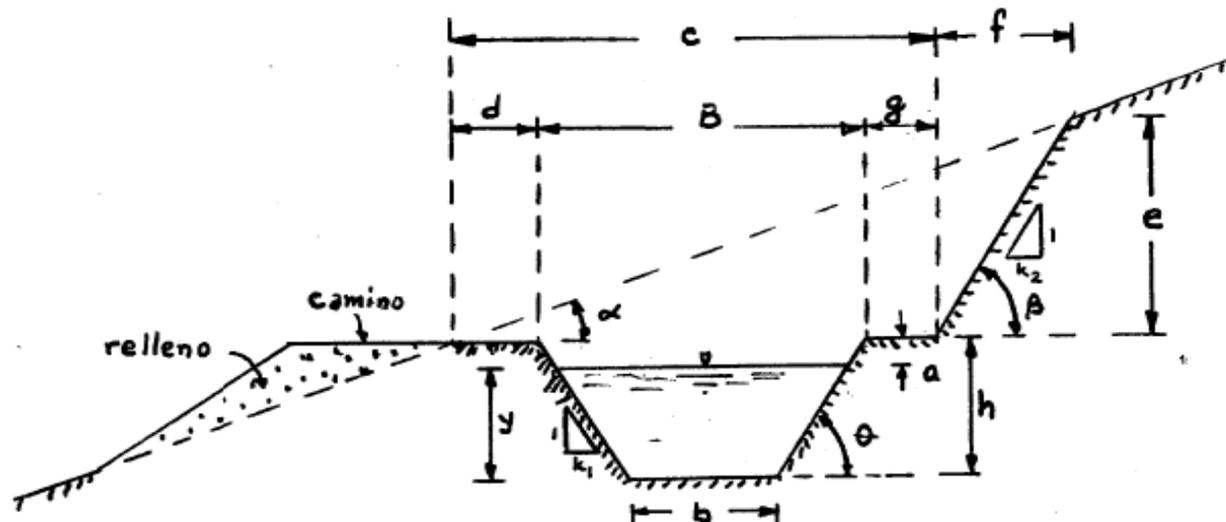
| Capacidad del canal   | Radio mínimo |
|-----------------------|--------------|
| 20 m <sup>3</sup> /s  | 100 m        |
| 15 m <sup>3</sup> /s  | 80 m         |
| 10 m <sup>3</sup> /s  | 60 m         |
| 5 m <sup>3</sup> /s   | 20 m         |
| 1 m <sup>3</sup> /s   | 10 m         |
| 0,5 m <sup>3</sup> /s | 5 m          |



Fuente: Ministerio de Agricultura y Alimentación, Boletín Técnico N° 7 "Consideraciones Generales sobre Canales Trapezoidales" Lima 1978.

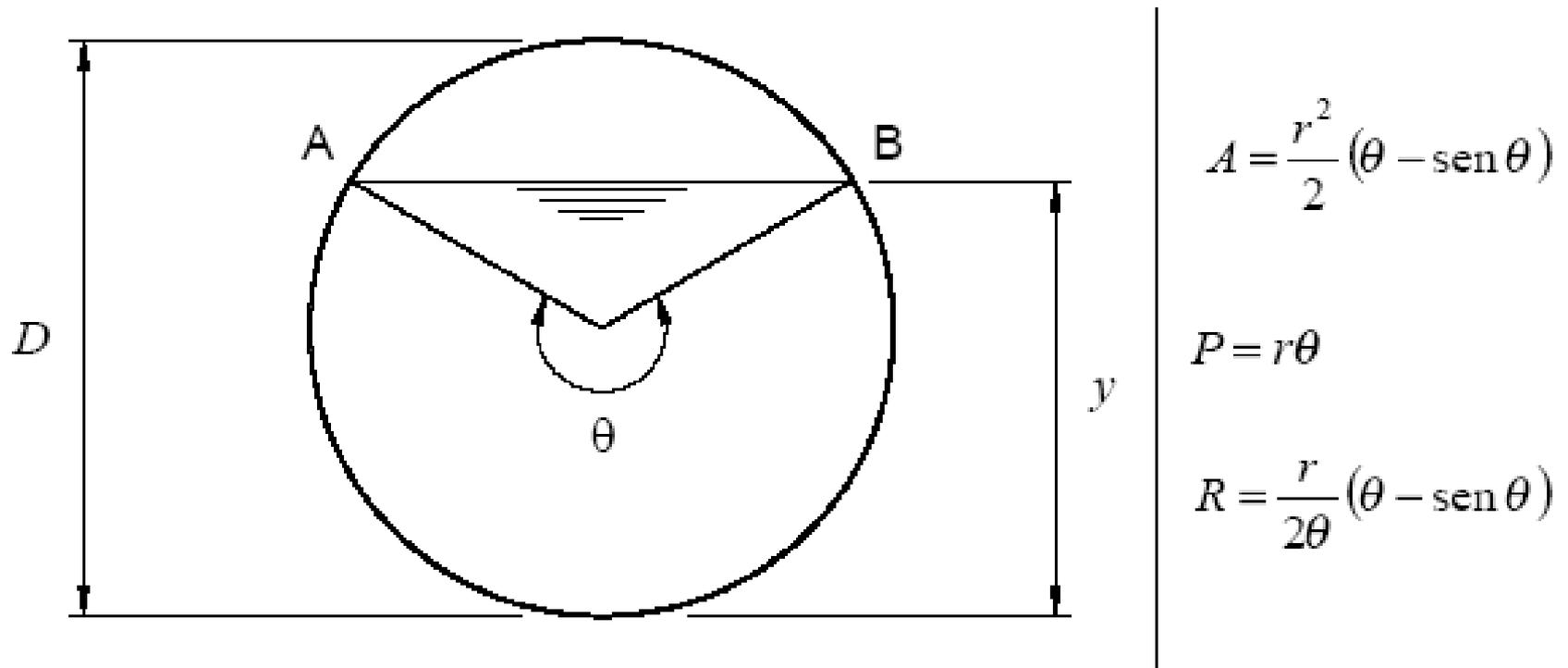
## EJERCICIO 3

- Se desea diseñar la sección de un canal trapezoidal no revestido ( $n=0.03$ ) para un gasto  $Q=32 \text{ m}^3/\text{s}$ , pendiente longitudinal  $S=0.0004$ . El talud del canal es  $k=0.5$ , y el borde libre será  $0.2y$ . El canal se va a excavar en la ladera de una montaña que tiene una inclinación  $\alpha=10^\circ$  efectuando cortes con  $k_2=0.5$  de manera de formar primero una plataforma y después excavar la sección del canal propiamente dicha. La berma existente entre la sección del canal y la sirve para recoger las aguas de lluvia con una cuneta y también para evitar que cualquier derrumbe que se produzca no caiga directamente al canal. La berma del lado opuesto permite formar la sección y ayuda a evitar las infiltraciones. Puede permitirse que por cualquiera de los lados pase un camino que se usa tanto para la construcción como para el mantenimiento del canal. Diseñar la sección del canal de manera que el volumen de excavación sea el mínimo, haciendo que  $c=B+2\text{m}$ ; esto es,  $g+d=2\text{m}$ .



## 9. TUBO PARCIALMENTE LLENO (1)

- Las características geométricas para un tubo parcialmente lleno:





## 9. TUBO PARCIALMENTE LLENO (2)

- La ecuación de Chezy y de Manning dependen directamente del radio hidráulico; por tanto, **la velocidad será máxima para un radio hidráulico máximo.**

$$\frac{dR}{d\theta} = 0$$

$$\frac{r \operatorname{sen} \theta - \theta \cos \theta}{2 \theta^2} = 0$$

- Despejando se encuentra que:

$$\theta = \operatorname{tg} \theta$$

$$\theta = 4,4934 \text{ rad}$$



## 9. TUBO PARCIALMENTE LLENO (3)

- Ya que el tirante es:

$$y = r \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right)$$

- Reemplazando el valor de  $\theta$ :

$$\frac{y}{D} = 0,8128 \approx 0,81$$

relación válida para la **velocidad máxima**.

- Si se quiere encontrar la sección para el **caudal máximo**, debemos considerar el efecto combinado del radio hidráulico y del área (ambos dependen del tirante).

## 9. TUBO PARCIALMENTE LLENO (4)

- Si usamos la ecuación de Manning, debemos verificar que:

$$\frac{d\left(AR^{\frac{2}{3}}\right)}{d\theta} = 0$$

$$\frac{2}{3}AR^{-\frac{1}{3}}\frac{dR}{d\theta} + R^{\frac{2}{3}}\frac{dA}{d\theta} = 0$$

- Resolviendo se obtiene que:

$$\theta = 5,278 \text{ rad}$$



## 9. TUBO PARCIALMENTE LLENO (5)

- Ya que el tirante es:

$$y = r \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right)$$

- Reemplazando el valor de  $\theta$ :

$$\frac{y}{D} = 0,938 \approx 0,94$$

relación válida para el caudal máximo.

## SECCIONES CIRCULARES PARCIALMENTE LLENAS

| CONDICION      |                                                    | TUBO LLENO         | GASTO MAXIMO<br>(Manning) | GASTO MAXIMO<br>(Chezy)    | VELOCIDAD<br>MAXIMA            |
|----------------|----------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| VARIABLES      |                                                    |                    |                           |                            |                                |
| $A$            | $A = \frac{r^2}{2}(\theta - \text{sen}\theta)$     | $0,785 D^2$        | $0,765 D^2$               | $0,771 D^2$                | $0,684 D^2$                    |
| $P$            | $P = r\theta$                                      | $3,142 D$          | $2,639 D$                 | $2,689 D$                  | $2,247 D$                      |
| $R$            | $R = \frac{r}{2\theta}(\theta - \text{sen}\theta)$ | $0,25 D$           | $0,29 D$                  | $0,287 D$                  | $0,304 D$                      |
| $y/D$          | -                                                  | 1                  | 0,94                      | 0,95                       | 0,813                          |
| $\theta$       | -                                                  | $2\pi$ rad<br>360° | 5,278 rad<br>308° 24' 26" | 5,3784 rad<br>308° 09' 36" | 4,4934 rad<br>257° 27' 10"     |
| $Q_{\max}/Q_0$ | -                                                  | 1                  | 1,07                      | 1,05                       | -                              |
| $V_{\max}/V_0$ | -                                                  | 1                  | -                         | -                          | 1,14 (Manning)<br>1,10 (Chezy) |
| $A/A_0$        | -                                                  | 1                  | 0,97                      | 0,98                       | 0,87                           |
| $P/P_0$        | -                                                  | 1                  | 0,84                      | 0,86                       | 0,72                           |
| $R/R_0$        | -                                                  | 1                  | 1,15                      | 1,14                       | 1,22                           |

$$d = \frac{A}{T}$$

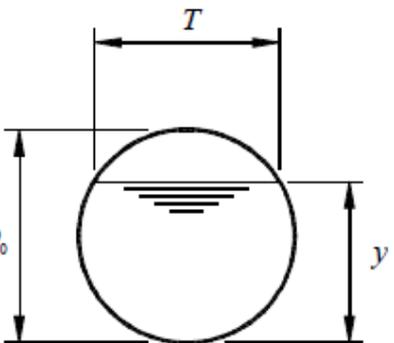
$$Z = A\sqrt{d} = A\sqrt{\frac{A}{T}}$$

$$A_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4}$$

$$P_0 = \pi \cdot D_0$$

$$R_0 = \frac{D_0}{4}$$

$$\frac{y}{D_0}$$



El subíndice "0" corresponde a tubo lleno

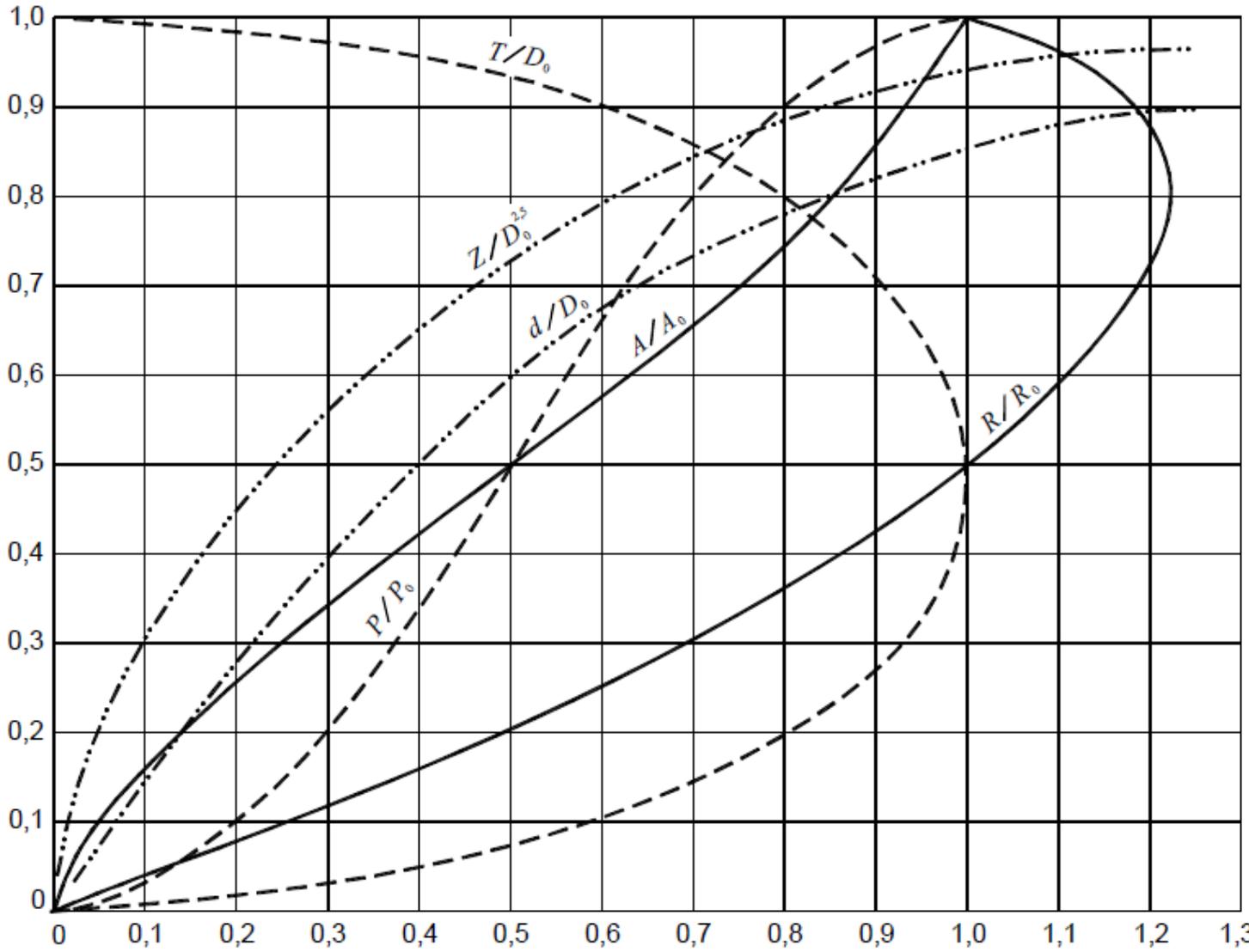


Figura 6.6 Características geométricas en una sección circular  $\frac{A}{A_0}$ ,  $\frac{P}{P_0}$ ,  $\frac{d}{D_0}$ , etc.



## EJERCICIO 1

Determinar el diámetro que debe tener un túnel de sección circular ( $n = 0,030$ ) para conducir un gasto de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  de modo que sea la mínima sección posible. La pendiente es  $0,0008$ . Calcular también el tirante y velocidad respectivos.



## 2. CANALES NO REVESTIDOS



# 1. CANALES NO REVESTIDOS

- El diseño de canales no revestidos no es tan simple como el de los revestidos ya que tiene muchos parámetros involucrados, la mayor parte de los cuales no son cuantificables en forma precisa.
- El diseño depende no solo de parámetros hidráulicos sino también de las propiedades de los materiales que forman el fondo y los taludes del canal y se busca que no ocurra ni sedimentación ni erosión.

| Ancho del fondo<br>(m) | Altura del agua<br>(m) | Capacidad (m <sup>3</sup> /s) |              |
|------------------------|------------------------|-------------------------------|--------------|
|                        |                        | Revestido en concreto         | Sin revestir |
| 0.30                   | 0.45                   | 0.40                          | 0.23         |
| 0.90                   | 0.60                   | 1.27                          | 0.71         |
| 1.20                   | 0.75                   | 2.40                          | 1.33         |
| 1.50                   | 0.90                   | 4.00                          | 2.24         |

- Existen varios métodos de diseño pero los principales son: método de la velocidad máxima permitida, método de la fuerza tractiva y canales revestidos con pasto.



## 2. MÉTODO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE (1)

- Busca eliminar la erosión en los canales.
- La velocidad máxima permisible o velocidad no erosionante, es la velocidad media más grande que no causará erosión del cuerpo del canal.

$$A = \frac{Q}{V_{\max}}$$

- Esta velocidad es muy incierta y variable, y se puede estimar solamente con experiencia y buen juicio.
- Los canales viejos y bien asentados soportarán velocidades mucho más altas que los nuevos, debido a que el viejo lecho del canal está usualmente mejor estabilizado, particularmente con el depósito de materia coloidal.



## 2. MÉTODO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE (2)

### Velocidad crítica media para materiales no cohesivos

#### a) Diagrama de Hjülstrom (1935)

- Delimita zonas donde las condiciones pueden significar transporte, erosión o sedimentación de partículas de tamaño uniforme. La línea que separa las zonas de transporte y sedimentación representa a la condición de velocidad crítica de arrastre.
- Los resultados son válidos para tirantes sin mucha variación.

## 2. MÉTODO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE (3)

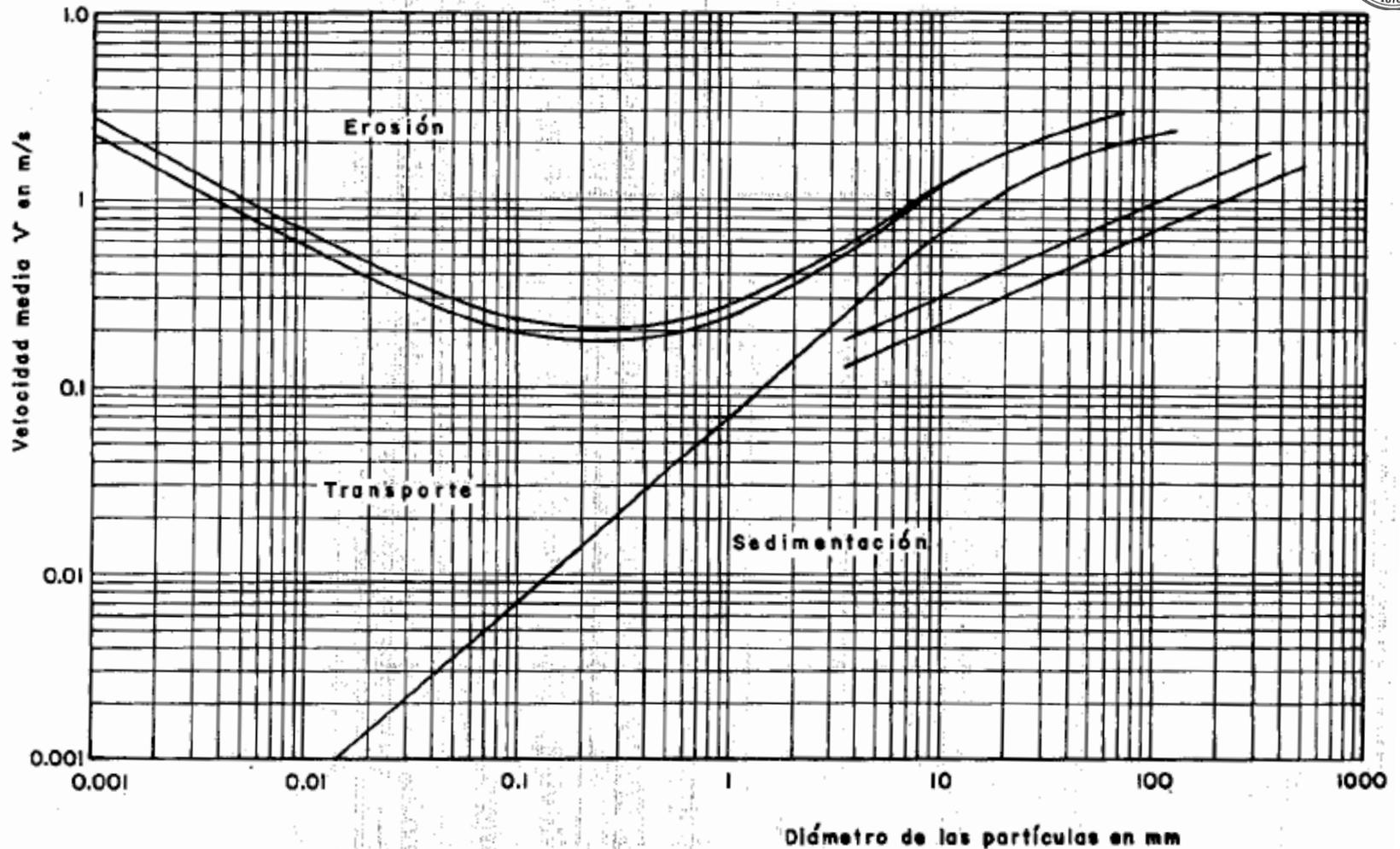


Figura 7.41. Criterio de Hjulström para el transporte de partículas de tamaño uniforme



## 2. MÉTODO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE (4)

### b) Criterio de Lischvan-Levediev

- Para suelos no cohesivos
- Resume sus resultados en un gráfico.



## 2. MÉTODO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE (5)

Tabla 7.25 Velocidad media permisible (no erosiva) en m/s para suelos cohesivos en canales rectos, según Lischvan-Levediev (1959, referencia 21)

| Denominación de los suelos           | Diámetro medio (en mm) y porcentaje del contenido de partículas |          | Suelos poco compactos, con densidad relativa del material seco hasta 1.2, relación de vacíos mayor de 1.2 |                   |      |      | Suelos medianamente compactos, con densidad relativa del material seco de 1.2 a 1.66, relación de vacíos de 1.2 a 0.6 |           |      |      | Suelos compactos, con densidad relativa del material seco de 1.66 a 2.04, relación de vacíos de 0.6 a 0.3 |           |     |     | Suelos muy compactos, con densidad relativa del material seco de 2.04 a 2.14, relación de vacíos de 0.3 a 0.2 |           |     |     |     |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----|-----|-----|
|                                      |                                                                 |          | Tirante en m                                                                                              |                   |      |      |                                                                                                                       |           |      |      |                                                                                                           |           |     |     |                                                                                                               |           |     |     |     |
|                                      |                                                                 |          | <0.005 (mm)                                                                                               | 0.005 a 0.05 (mm) | 0.4  | 1.0  | 2.0                                                                                                                   | 3.0 o más | 0.4  | 1.0  | 2.0                                                                                                       | 3.0 o más | 0.4 | 1.0 | 2.0                                                                                                           | 3.0 o más | 0.4 | 1.0 | 2.0 |
| Arcillas                             | 30 a 50%                                                        | 50 a 70% |                                                                                                           |                   |      |      |                                                                                                                       |           |      |      |                                                                                                           |           |     |     |                                                                                                               |           |     |     |     |
| Suelos muy arcillosos                | 20 a 30%                                                        | 70 a 80% | 0.35                                                                                                      | 0.4               | 0.46 | 0.50 | 0.7                                                                                                                   | 0.85      | 0.95 | 1.1  | 1.0                                                                                                       | 1.2       | 1.4 | 1.5 | 1.4                                                                                                           | 1.7       | 1.9 | 2.1 |     |
| Suelos poco arcillosos               | 10 a 20%                                                        | 80 a 90% |                                                                                                           |                   |      |      |                                                                                                                       |           |      |      |                                                                                                           |           |     |     |                                                                                                               |           |     |     |     |
| Suelos de aluvión, arcillas margosas |                                                                 |          | 0.27                                                                                                      | 0.32              | 0.37 | 0.40 | 0.6                                                                                                                   | 0.7       | 0.8  | 0.85 | 0.8                                                                                                       | 1.0       | 1.2 | 1.3 | 1.1                                                                                                           | 1.3       | 1.5 | 1.7 |     |
| Suelos arenosos                      | 5 a 10%                                                         | 20 a 40% | Según la figura 7.44, de acuerdo con el tamaño de las fracciones arenosas                                 |                   |      |      |                                                                                                                       |           |      |      |                                                                                                           |           |     |     |                                                                                                               |           |     |     |     |

La densidad relativa óptima del material es de 2.65

## 2. MÉTODO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE (6)

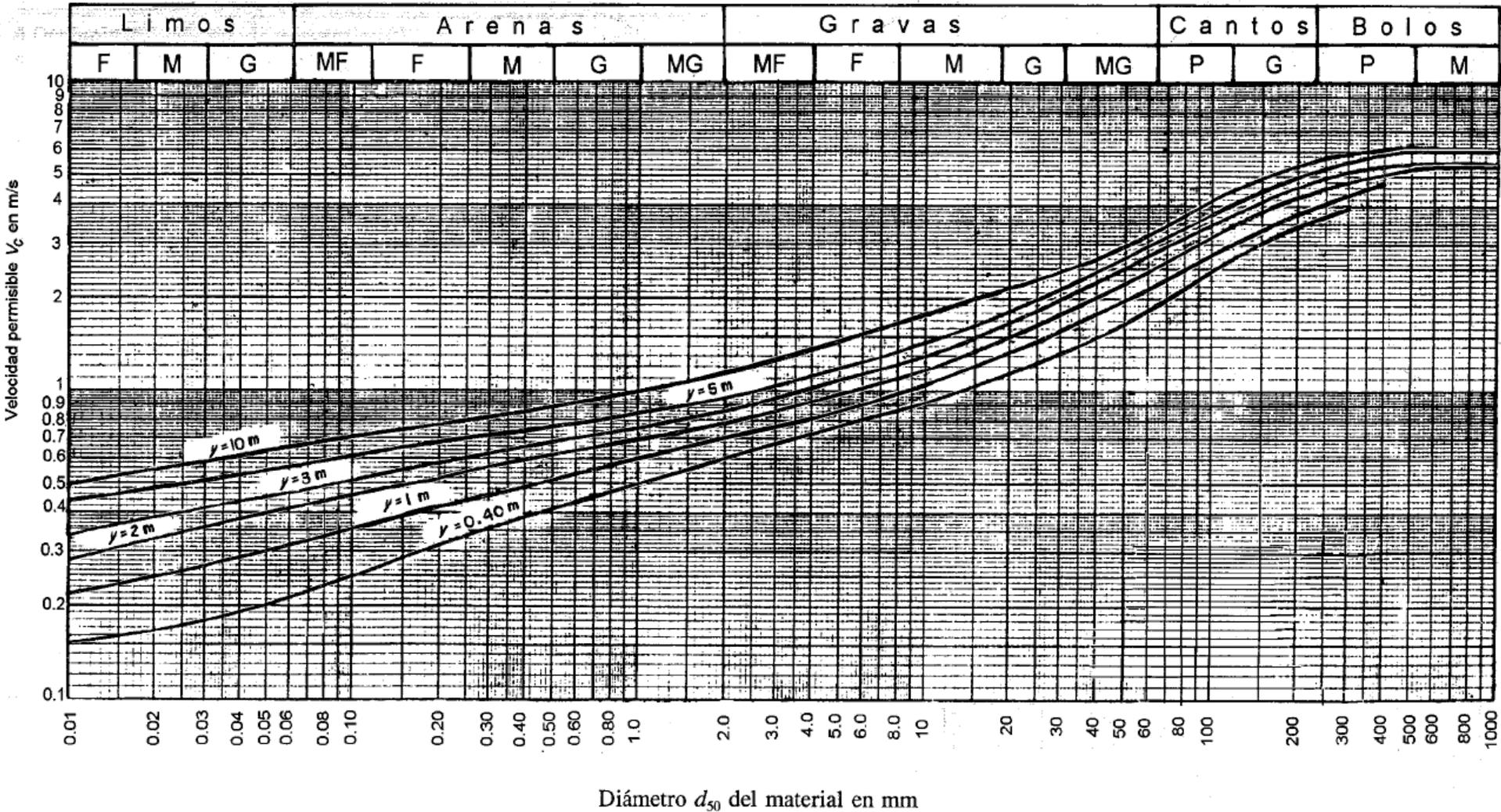


Figura 7.44. Velocidad máxima permisible para suelos no cohesivos, según Lischtan-Levediev (1959)

**Tábla 7.23.** Velocidad máxima permisible  $V_c$  (no erosiva) en canales con suelos no cohesivos, según distintos autores (García Flores y Maza, 1996)

| Autor                                      | Ecuación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Comentarios                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lischtvan - Levediev (1959)(referencia 22) | $\frac{V_c}{\sqrt{(S_s - 1) g d}} = 1.63 \left( \frac{y}{d} \right)^{0.1283} \quad \text{Para } \frac{y}{d} \leq 744.19$ $\frac{V_c}{\sqrt{(S_s - 1) g d}} = 0.4527 \left( \frac{y}{d} \right)^{0.3221} \quad \text{Para } \frac{y}{d} > 744.19$                                                                                        | <p><math>d</math> diámetro medio de las partículas en m,<br/> <math>y</math> tirante en m,<br/> <math>S_s</math> densidad relativa del material.<br/>                     (Ecuaciones de ajuste según García Flores) (referencia 17).</p>                                                                                   |
| Goncharov (1964) (referencia 22)           | $\frac{V_s}{\sqrt{(S_s - 1) g d}} = 1.069 \log \left[ 8.8 \frac{y}{d} \right]$ $\frac{V_c}{\sqrt{(S_s - 1) g d}} = 0.75593 \log \left[ 8.8 \frac{y}{d} \right]$                                                                                                                                                                         | <p><math>V_s</math> velocidad de separación;<br/> <math>V_c</math> velocidad permisible (sin separación).<br/>                     Se relacionan mediante la expresión<br/> <math display="block">V_s = 1.41421 V_p</math><br/> <math>d</math> diámetro medio de las partículas cuando la granulometría no es uniforme.</p> |
| Maza-García (1978) (referencia 23)         | $\frac{V_c}{\sqrt{(S_s - 1) g d}} = 1.504 \left( \frac{y}{d} \right)^{0.15}$                                                                                                                                                                                                                                                            | <p><math>V_c</math> velocidad crítica media, <math>d</math> el diámetro <math>d_m</math> cuando la granulometría no es uniforme.<br/>                     Pared hidráulicamente rugosa.</p>                                                                                                                                 |
| Neill (1968) (referencia 24)               | $\frac{V_c}{\sqrt{(S_s - 1) g d}} = 1.414 \left( \frac{y}{d} \right)^{1/6}$                                                                                                                                                                                                                                                             | <p><math>V_c</math> velocidad crítica media.<br/>                     Pared hidráulicamente rugosa.<br/> <math>d</math> diámetro medio de las partículas.</p>                                                                                                                                                               |
| Garde (1970) (referencia 25)               | $\frac{V_c}{\sqrt{(S_s - 1) g d}} = 0.5 \log \left( \frac{y}{d} \right) + 1.63$                                                                                                                                                                                                                                                         | <p><math>V_c</math> velocidad crítica media.<br/>                     Pared hidráulicamente rugosa.<br/> <math>d</math> diámetro medio.</p>                                                                                                                                                                                 |
| Levi (referencia 26)                       | $\frac{V_c}{\sqrt{g d_m}} = 1.4 \left[ 1 + \ln \left[ \frac{y}{7 d_m} \right]^{1/2} \right] \left[ \frac{d_{m\max}}{d_m} \right]^{1/7} \quad \text{Para } 10 < \frac{y}{d_m} < 60$ $\frac{V_c}{\sqrt{g d_m}} = 1.4 \left[ \frac{d_{m\max}}{d_m} \right]^{1/7} \ln \left[ \frac{y}{7 d_m} \right] \quad \text{Para } \frac{y}{d_m} > 60$ | <p><math>d_m</math> y <math>d_{50}</math> son diámetros característicos del material. Cuando es uniforme, <math>d_{m\max} = d_m</math>.<br/> <math>V_c</math> velocidad crítica media.<br/>                     Pared hidráulicamente rugosa.</p>                                                                           |



## 2. MÉTODO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE (8)

### **Velocidad crítica media para materiales cohesivos**

- Las experiencias en este caso son escasas y muy limitadas y se presentan en función de la compacidad del suelo o de su relación de vacíos.
- Lischtvan y Levediev presentaron sus resultados para suelos arcillosos, en función del tirante medio del flujo, de la compacidad del suelo o de la densidad relativa del material seco y del porcentaje de su contenido de partículas finas.



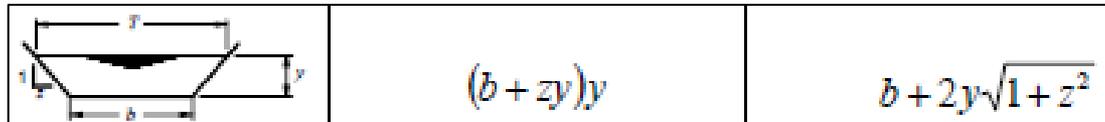
## 2. MÉTODO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE (9)

TABLA 2.8 VELOCIDADES MEDIAS PERMISIBLES (NO EROSIVAS) PARA SUELOS COHESIVOS, en m/seg

| Denominación de los suelos            | Porcentaje del contenido de partículas $\bar{m}$ |           | Suelos poco compactos, peso volumétrico del material seco hasta 1.66 $\bar{m}$ ton/m <sup>3</sup> |     |      |     | Suelos medianamente compactados, peso volumétrico del material seco, 1.20 a 1.76 ton/m <sup>3</sup> |      |      |      | Suelos compactos, peso volumétrico del material seco de 1.66-2.04 $\bar{m}$ ton/m <sup>3</sup> |     |     |     | Suelos muy compactos, el peso volumétrico del material seco de 2.04-2.14 ton/m <sup>3</sup> |     |     |     |  |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|--|
|                                       |                                                  |           | Tirantes medios, en m                                                                             |     |      |     |                                                                                                     |      |      |      |                                                                                                |     |     |     |                                                                                             |     |     |     |  |
|                                       | <0.005                                           | 0.005-005 | 0.4                                                                                               | 1.0 | 2.0  | 3.0 | 0.4                                                                                                 | 1.0  | 2.0  | 3.0  | 0.4                                                                                            | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 0.4                                                                                         | 1.0 | 2.0 | 3.0 |  |
| Arcillas y tierras muy arcillosas     | 30-50                                            | 70-50     |                                                                                                   |     |      |     |                                                                                                     |      |      |      |                                                                                                |     |     |     |                                                                                             |     |     |     |  |
|                                       | 20-30                                            | 80-70     | 0.35                                                                                              | 0.4 | 0.45 | 0.5 | 0.7                                                                                                 | 0.85 | 0.95 | 1.1  | 1.0                                                                                            | 1.2 | 1.4 | 1.5 | 1.4                                                                                         | 1.7 | 1.9 | 2.1 |  |
|                                       |                                                  |           |                                                                                                   |     |      |     |                                                                                                     |      |      |      |                                                                                                |     |     |     |                                                                                             |     |     |     |  |
| Tierras ligeramente arcillosas        | 10-20                                            | 90-80     | 0.35                                                                                              | 0.4 | 0.45 | 0.5 | 0.65                                                                                                | 0.8  | 0.9  | 1.0  | 0.95                                                                                           | 1.2 | 1.4 | 1.5 | 1.4                                                                                         | 1.7 | 1.9 | 2.1 |  |
| Suelos de aluvión y arcillas margosas |                                                  |           |                                                                                                   |     |      |     | 0.6                                                                                                 | 0.7  | 0.8  | 0.85 | 0.8                                                                                            | 1.0 | 1.2 | 1.3 | 1.1                                                                                         | 1.3 | 1.5 | 1.7 |  |
| Tierras arenosas                      | 5-10                                             | 20-40     | Según la fig. 2.18 de acuerdo con el tamaño de las fracciones arenosas                            |     |      |     |                                                                                                     |      |      |      |                                                                                                |     |     |     |                                                                                             |     |     |     |  |

## 2. MÉTODO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE (10)

- El procedimiento de diseño para la sección de un canal, suponiendo que sea trapezoidal, consiste en:
  1. Para el material formando el cuerpo del canal, estimar el coeficiente de rugosidad  $n$ , la pendiente lateral  $z$ , y la velocidad máxima permitida  $V$ .
  2. Determinar la pendiente del canal de la información topográfica.
  3. Calcular el radio hidráulico  $R$  por la fórmula de Manning.
  4. Computar el área mojada requerida para la descarga y la velocidad permitida dadas  **$A = Q/V_{max}$** .
  5. Computar el perímetro mojado, o  **$P = A/R$** .
  6. Usando las expresiones para  $A$  y  $P$  resolver simultáneamente para  **$b$**  y  **$y$** .



7. Agregar un borde libre adecuado y modificar las dimensiones para que resulten prácticas.

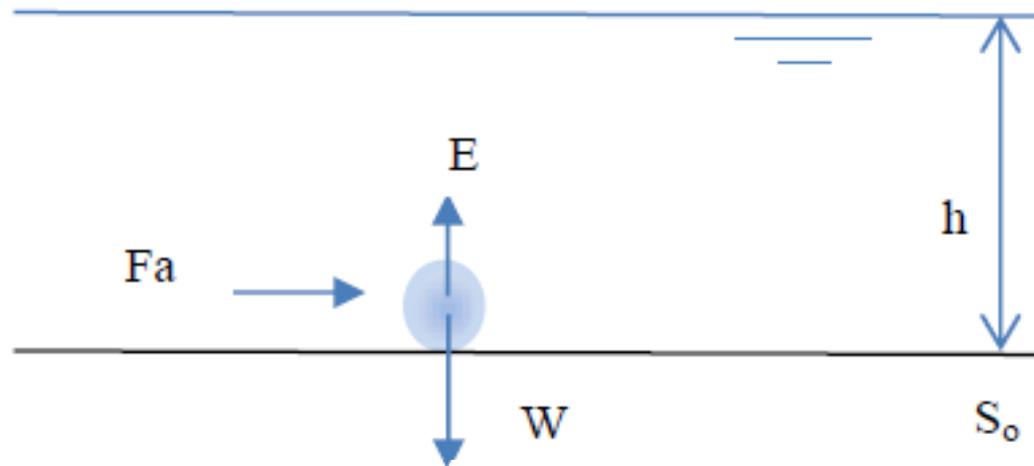


## 2. MÉTODO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE (11)

- Respecto a las tablas y gráficos utilizados, se recomienda:
  - a) Las cifras dadas son para canales con tangentes largas recomendándose una reducción del 25% en la velocidad máxima permisible para canales con un alineamiento sinuoso.
  - b) Las cifras son para tirantes menores de 3 ft. (0.91m). Para tirantes mayores, la velocidad máxima permisible debe aumentarse por 0.5 ft/s (0.15 m/s).
  - c) La velocidad de flujo en canales que acarrear abrasivos (como pedazos de basalto), debe reducirse en 0.5 ft/s (0.15m/s).
  - d) Los canales de derivación de ríos con alta carga de arcillas deben diseñarse para velocidades medias de 1 a 2 ft/s (0.30 a 0.61 m/s) mayores a las permitidas para el mismo material perimetral si el agua no transportara sedimento.

### 3. INICIO DEL MOVIMIENTO (1)

Para que las partículas de fondo de un canal sean arrastradas, la fuerza de arrastre del agua debe igualar a la fricción de fondo:



*Fa: Fuerza de arrastre*

*E: Empuje*

*W: peso del sedimento de diámetro “ $d_s$ ”*

$$F_a = \tau_o \cdot A = \tau_o \cdot d_s^2$$

*Fuerza Desestabilizadora*

$$W - E = \gamma_s \cdot d_s^3 - \gamma_w \cdot d_s^3 = (\gamma_s - \gamma_w) d_s^3$$

*Fuerza Estabilizadora*



### 3. INICIO DEL MOVIMIENTO (2)

Para que haya movimiento, la fuerza desestabilizadora debe ser mayor a la fuerza estabilizadora. Shields propone:

$$\tau_* = \frac{\text{Fuerza Desestabilizadora}}{\text{Fuerza Estabilizadora}} \quad \tau_* = \frac{\tau_o \cdot d_s^2}{(\gamma_s - \gamma_w) d_s^3} \quad \tau_* = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma_w) d_s}$$

$\tau_*$ : *Parámetro de Shields (adimensional)*

$\tau_* > 1 \rightarrow \tau_o > \tau_*$ , *hay movimiento de las partículas (produce arrastre de sedimentos)*

$\tau_* < 1 \rightarrow \tau_o < \tau_*$ , *no hay movimiento de las partículas (no produce arrastre de sedimentos)*

$\tau_* = 1 \rightarrow \tau_o = \tau_{crf}$ : *partícula está en el umbral del movimiento*

*El esfuerzo cortante crítico de fondo ( $\tau_{crf}$ ) se halla por medio del Diagrama de Shields.*

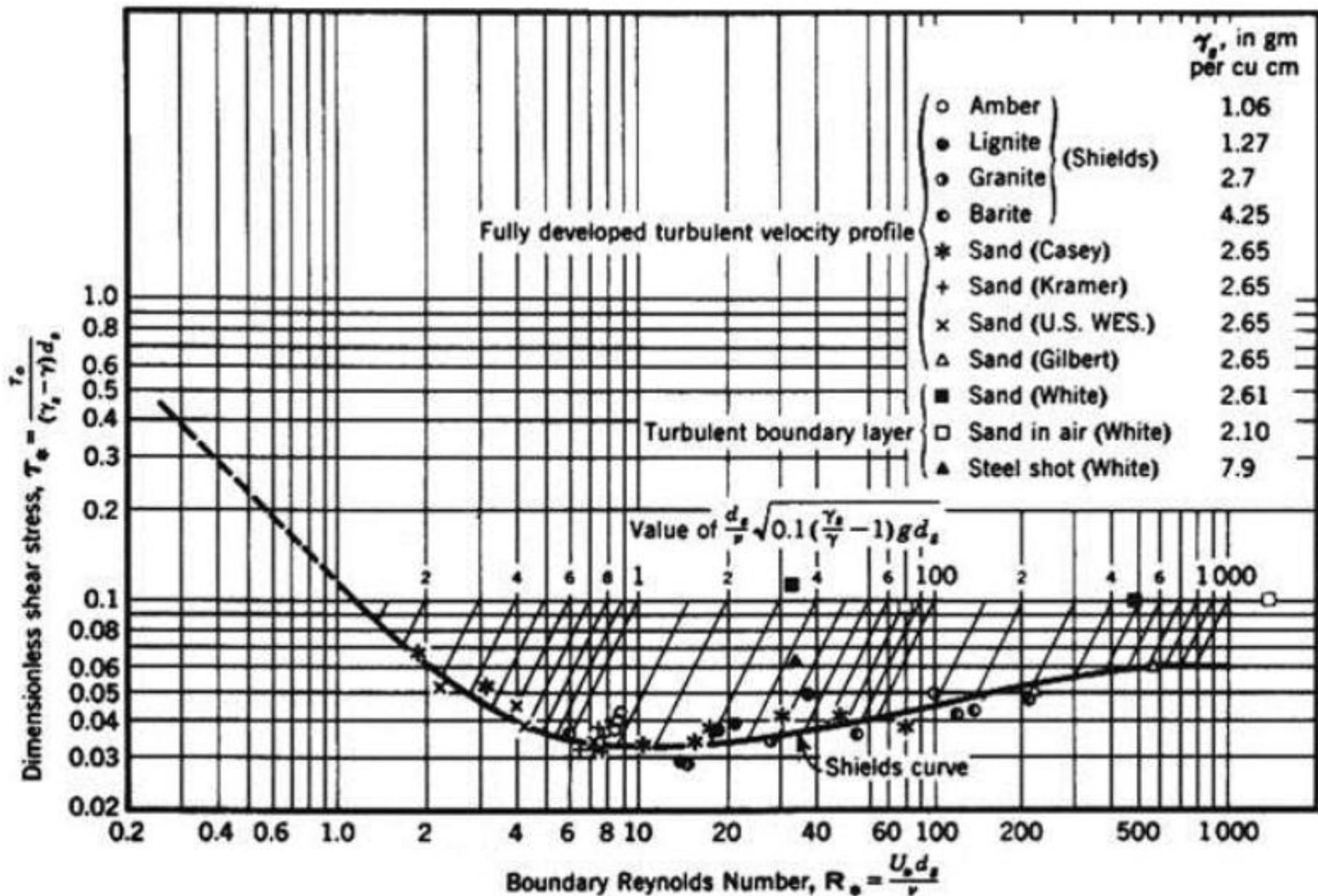


Fig 1.15 Diagrama de Shields para inicio de movimiento (American Society of Civil Engineers, 1975)



### 3. INICIO DEL MOVIMIENTO (4)

Otra cantidades importantes a evaluar:

$$Re_* = \frac{U_* d_s}{\nu} \quad Ec \ 1.25 \qquad U_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad Ec \ 1.26$$

$Re_*$ : Reynolds granular

$U_*$ : velocidad de corte (m/s)

$d_s$ : diámetro del sedimento (m)

$\nu$ : viscosidad cinemática del agua ( $m^2/s$ )

$\tau_*$ : Esfuerzo cortante adimensional

$\tau_o$ : Esfuerzo cortante de fondo ( $N/m^2$ ,  $Kgf/m^2$ )

$\rho$ : densidad del agua ( $Kg/m^3$ )



## EJEMPLO

Un canal de tierra está conformado por partículas de 0.5mm de diámetro. Si el tirante en el canal es de 2.5m y la pendiente es de 0.005, indique si existirá erosión.



### 3. INICIO DEL MOVIMIENTO (5)

El esfuerzo cortante crítico de fondo ( $\tau_{crf}$ ), también se puede aproximar mediante ecuaciones de Zanke, si el diámetro medio de la partícula es conocido.

$$D^* = \left( \frac{\Delta g}{\nu^2} \right)^{1/3} d_s \quad \text{Ec 1.27}$$

$$\Delta = \left( \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right) \quad \text{Ec 1.28}$$

$D^*$ : Parámetro adimensional de la partícula

$\Delta$ : densidad relativa de la partícula

$\gamma_s$ : peso específico del sedimento

$\gamma_s \approx 2650 \text{ kgf/m}^3$ , valor promedio a usar cuando no se tenga dato exacto, para este caso  $\Delta=1.65$

$$D^* \leq 6: \quad \tau_* = 0.109 D^{*-0.5}$$

$$6 < D^* \leq 10: \quad \tau_* = 0.14 D^{*-0.64}$$

$$10 < D^* \leq 20: \quad \tau_* = 0.04 D^{*-0.10}$$

$$20 < D^* \leq 150: \quad \tau_* = 0.013 D^{*0.29}$$

$$D^* \geq 150: \quad \tau_* = 0.055$$

$$\tau_{crf} = \tau_* (\gamma_s - \gamma_w) d \quad \text{Ec 1.29}$$

**Tabla 1.9**

**Máxima velocidad permisible correspondiente a valores de fuerza tractiva unitaria  
(para canales rectos y nuevos)**

| <i>Material</i>                                                     | <i>n</i>     | <i>Agua limpia</i> |                                            | <i>Agua con limos coloidales</i> |                                            |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|
|                                                                     |              | <i>V (m/s)</i>     | <i><math>\tau</math> (N/m<sup>2</sup>)</i> | <i>V (m/s)</i>                   | <i><math>\tau</math> (N/m<sup>2</sup>)</i> |
| <i>Arena fina, coloidal</i>                                         | <i>0.020</i> | <i>0.457</i>       | <i>1.295</i>                               | <i>0.762</i>                     | <i>3.597</i>                               |
| <i>Franco arenosos, no coloidal</i>                                 | <i>0.020</i> | <i>0.533</i>       | <i>1.774</i>                               | <i>0.762</i>                     | <i>3.597</i>                               |
| <i>Tierra firme común</i>                                           | <i>0.020</i> | <i>0.762</i>       | <i>3.597</i>                               | <i>1.07</i>                      | <i>7.193</i>                               |
| <i>Arcilla dura, muy coloidal</i>                                   | <i>0.025</i> | <i>1.14</i>        | <i>12.469</i>                              | <i>1.52</i>                      | <i>22.06</i>                               |
| <i>Grava fina</i>                                                   | <i>0.020</i> | <i>0.762</i>       | <i>3.597</i>                               | <i>1.52</i>                      | <i>15.346</i>                              |
| <i>Tierra negra graduada a cantos rodados cuando no es coloidal</i> | <i>0.030</i> | <i>1.14</i>        | <i>18.223</i>                              | <i>1.52</i>                      | <i>31.651</i>                              |
| <i>Limos graduados a cantos rodados, no coloidal</i>                | <i>0.030</i> | <i>1.22</i>        | <i>20.621</i>                              | <i>1.68</i>                      | <i>38.365</i>                              |
| <i>Grava gruesa no coloidal</i>                                     | <i>0.025</i> | <i>1.22</i>        | <i>14.387</i>                              | <i>1.83</i>                      | <i>32.131</i>                              |
| <i>cantos rodados y ripio</i>                                       | <i>0.035</i> | <i>1.52</i>        | <i>43.64</i>                               | <i>1.68</i>                      | <i>52.752</i>                              |

Fuente: Fortier y Scobey

**Tabla 1.10**  
**Velocidad Máxima de Erosión**

| <i>Revestimiento</i>                                   | <i>Variación de<br/>Velocidad Máxima<br/>(m/s)</i> |             |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------|
| <i>Arena suelta muy ligera</i>                         | <i>0.30</i>                                        | <i>0.45</i> |
| <i>Suelo arenoso</i>                                   | <i>0.45</i>                                        | <i>0.60</i> |
| <i>Suelo arenoso grueso</i>                            | <i>0.60</i>                                        | <i>0.75</i> |
| <i>Tierra vegetal, suelo aluvial</i>                   | <i>0.75</i>                                        | <i>0.85</i> |
| <i>Tierra vegetal arcillosa</i>                        | <i>0.90</i>                                        | <i>1.15</i> |
| <i>Suelo arcilloso duro</i>                            | <i>1.30</i>                                        | <i>1.50</i> |
| <i>Suelo con grava</i>                                 | <i>1.50</i>                                        | <i>1.80</i> |
| <i>Conglomerado</i>                                    | <i>1.80</i>                                        | <i>2.40</i> |
| <i>Roca sedimentaria suave</i>                         | <i>2.40</i>                                        |             |
| <i>Roca dura</i>                                       | <i>3.00</i>                                        | <i>4.50</i> |
| <i>Concreto <math>f'c</math> 140 kg/cm<sup>2</sup></i> | <i>3.80</i>                                        | <i>4.40</i> |
| <i>Concreto <math>f'c</math> 210 kg/cm<sup>2</sup></i> | <i>6.60</i>                                        | <i>7.40</i> |



## 4. MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA (1)

- La erosión perimetral del canal ocurre cuando las partículas del perímetro son sometidas a fuerzas con magnitud suficiente para producir el movimiento de la partícula.
- Si la partícula descansa en el fondo del canal, la fuerza actuante que causa su movimiento es el resultado del flujo de agua sobre la partícula.
- Si la partícula descansa sobre el talud del canal no solo actúa la fuerza generada por el flujo, sino también la componente de gravedad que tiende a hacer que la partícula ruede o deslice por el talud. Si la resultante es mayor que las fuerzas que resisten el movimiento (fricción y cohesión), entonces se presenta la erosión perimetral del canal.
- Cuando el agua fluye en un canal, se desarrolla una fuerza que actúa en la dirección del flujo sobre el lecho del canal. Esta fuerza es conocida como **la fuerza tractiva**.



## 4. MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA (2)

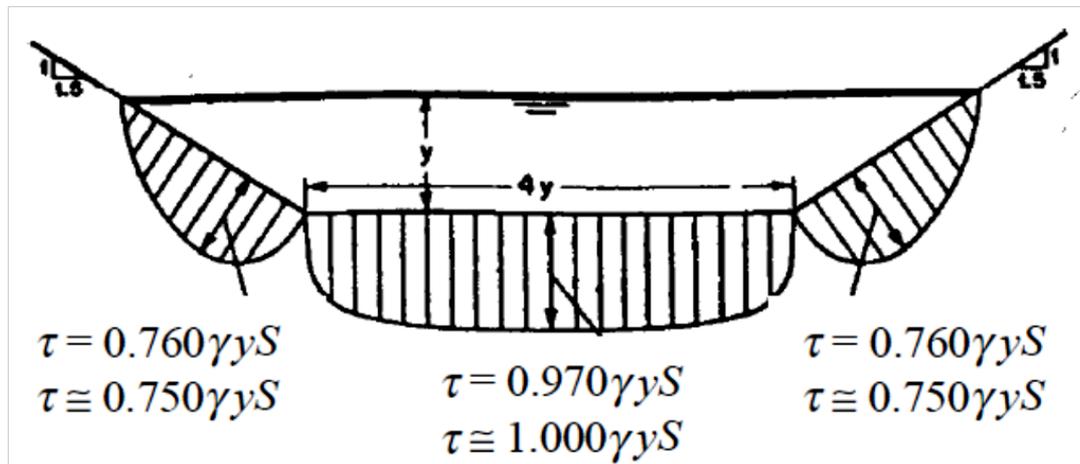
- Por definición, la fuerza tractiva, también llamada fuerza cortante o de arrastre o tangencial, es la **fuerza que actúa sobre las partículas que componen el perímetro del canal y es producida por el flujo del agua sobre estas partículas.**
- En un flujo uniforme la fuerza tractiva es aparentemente igual a la componente efectiva de la fuerza de gravedad actuando sobre el cuerpo de agua, paralela al fondo del canal e igual a  $\gamma ALS$  . Así, el valor medio de la **fuerza tractiva por unidad de área mojada**, o la llamada **fuerza tractiva unitaria**, es igual a  $\gamma ALS / PL = \gamma RS$  , donde P es el perímetro mojado y R es el radio hidráulico; es decir:

$$\tau = \gamma ALS$$

$$\tau_0 = \gamma RS$$

## 4. MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA (3)

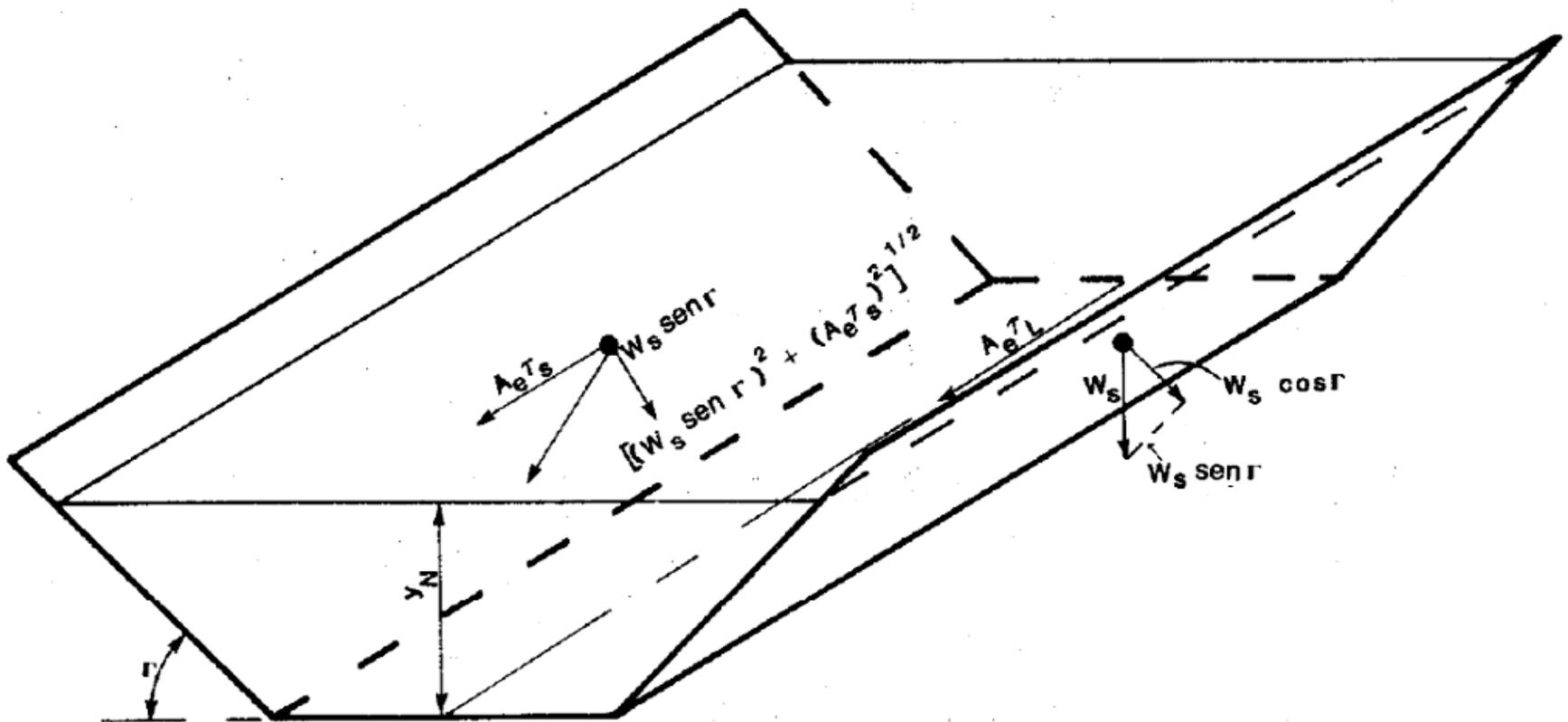
- Una distribución típica de los esfuerzos es:



- Cuando una partícula en el perímetro del canal está a punto de moverse, las fuerzas que producen el movimiento están en equilibrio con las que resisten el movimiento. Una partícula en el fondo del canal está sujeta a la fuerza tractiva  $A_e\tau_L$ , donde  $\tau_L$  es el esfuerzo tractivo sobre la superficie nivelada y  $A_e$  es el área efectiva.

## 4. MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA (4)

- El movimiento es resistido por la fuerza gravitacional  $W_s$  multiplicada por un coeficiente de fricción ( $\tan \alpha$ ), donde  $W_s$  es el peso de la partícula sumergida y  $\alpha$  es el ángulo de reposo de la partícula.





## 4. MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA (5)

- Cuando el movimiento está a punto de iniciarse, se tiene:

$$A_e \tau_L = W_s \tan \alpha$$

- Una partícula que se encuentra en el talud del canal está sujeta a una fuerza tractiva y a una componente del peso. La resultante de estas es:

$$\sqrt{(W_s \sen \Gamma)^2 + (\tau_s A_e)^2}$$

- Luego, al inicio del movimiento:

$$W_s \cos \Gamma \tan \alpha = \sqrt{(W_s \sen \Gamma)^2 + (A_e \tau_s)^2}$$

- Despejando:

$$\tau_s = \frac{W_s}{A_e} \cos \Gamma \tan \alpha \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \Gamma}{\tan^2 \alpha}}$$



## 4. MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA (6)

- En base a los resultados se define la razón de fuerza tractiva como:

$$K = \frac{\tau_s}{\tau_L} = \cos \Gamma \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \Gamma}{\tan^2 \alpha}} = \sqrt{1 - \frac{\text{sen}^2 \Gamma}{\text{sen}^2 \alpha}}$$

- French (1988) propone el siguiente procedimiento de diseño:
  - Estime  $n$  o  $C$  para el material perimetral dado.
  - Estime el ángulo de reposo para el material perimetral (ver figura).
  - Estime la sinuosidad del canal según la topografía que debe atravesar y determine el factor de corrección de la fuerza tractiva usando:

**Tabla 8.3. Factor de corrección de las fuerzas tractivas máximas para canales con diversos grados de sinuosidad. French. R. H. 1988.**

| Grado de sinuosidad            | Fuerza tractiva limitante relativa |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Canales rectos                 | 1.00                               |
| Canales poco sinuosos          | 0.90                               |
| Canales moderadamente sinuosos | 0.75                               |
| Canales muy sinuosos           | 0.60                               |

## 4. MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA (7)

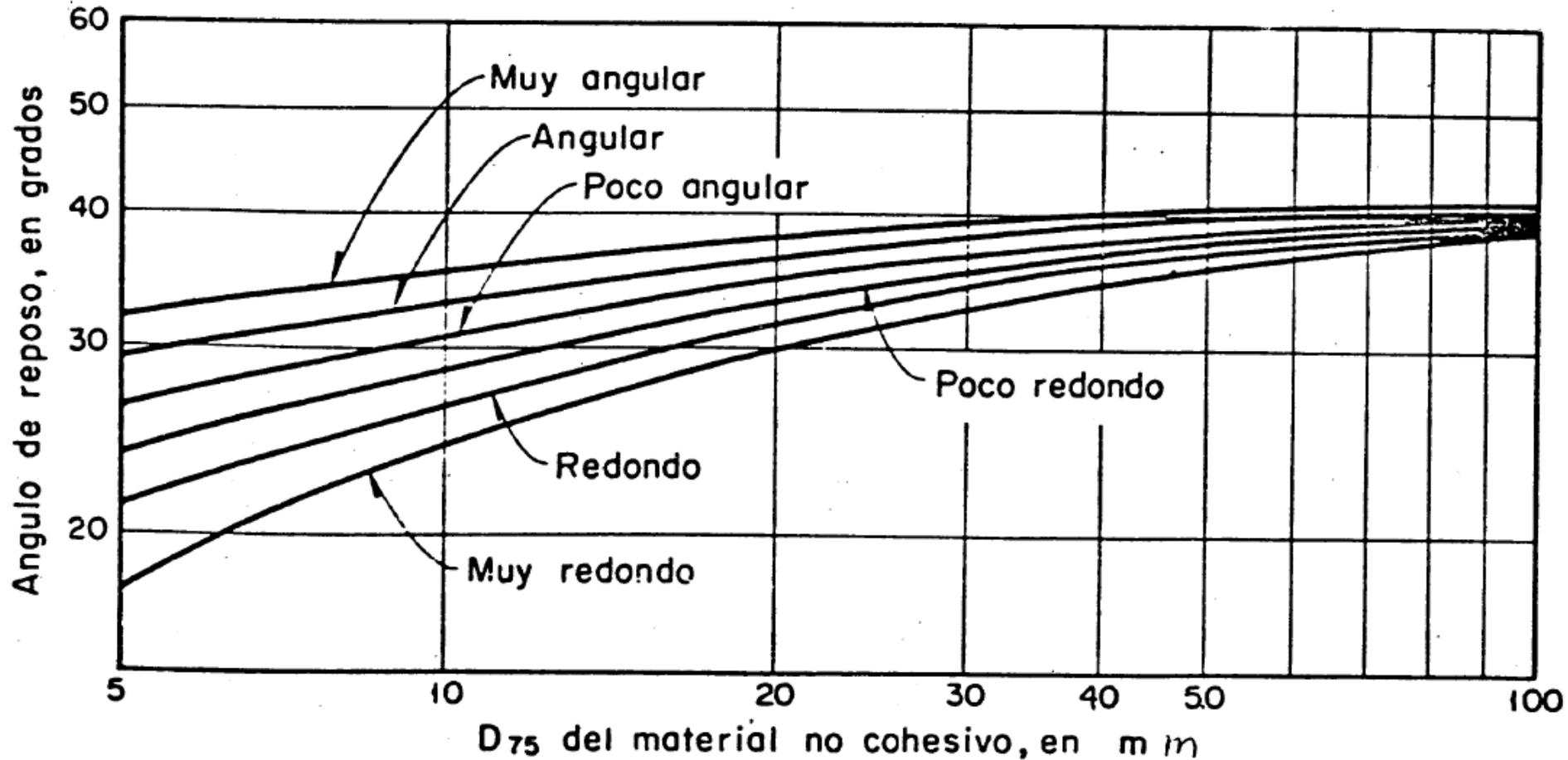


Fig 2.22 Angulo de reposo de un suelo no cohesivo en función del diámetro de sus partículas



## 4. MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA (8)

4. Suponga un valor del ángulo de los taludes y ancho de fondo/tirante de agua.
5. Suponga que los taludes son lo que limita el ancho del canal.
6. Calcúlese la fuerza tractiva máxima permisible en los taludes en función del esfuerzo cortante. Aplique el factor de corrección de la Figura 8.9a y el factor de corrección de sinuosidad del paso 3.
7. Estímese la razón de fuerzas tractivas.
8. Estímese la fuerza tractiva permisible en el fondo con la Figura 8.10 y corríjase por sinuosidad según paso 3.
9. Combínense los resultados del paso 6 y 8 para determinar el tirante normal  $y = y_n$ .
10. Determínese el ancho del fondo con los resultados de los pasos 4 y 9.
11. Calcúlese el caudal  $Q$  y compárese con el caudal de diseño  $Q_D$ , retrocédase al paso 4 y repítase el procedimiento de diseño tanteando la razón  $b/y$  hasta que  $Q = Q_D$ .

## 4. MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA (9)

### FACTORES DE CORRECCION

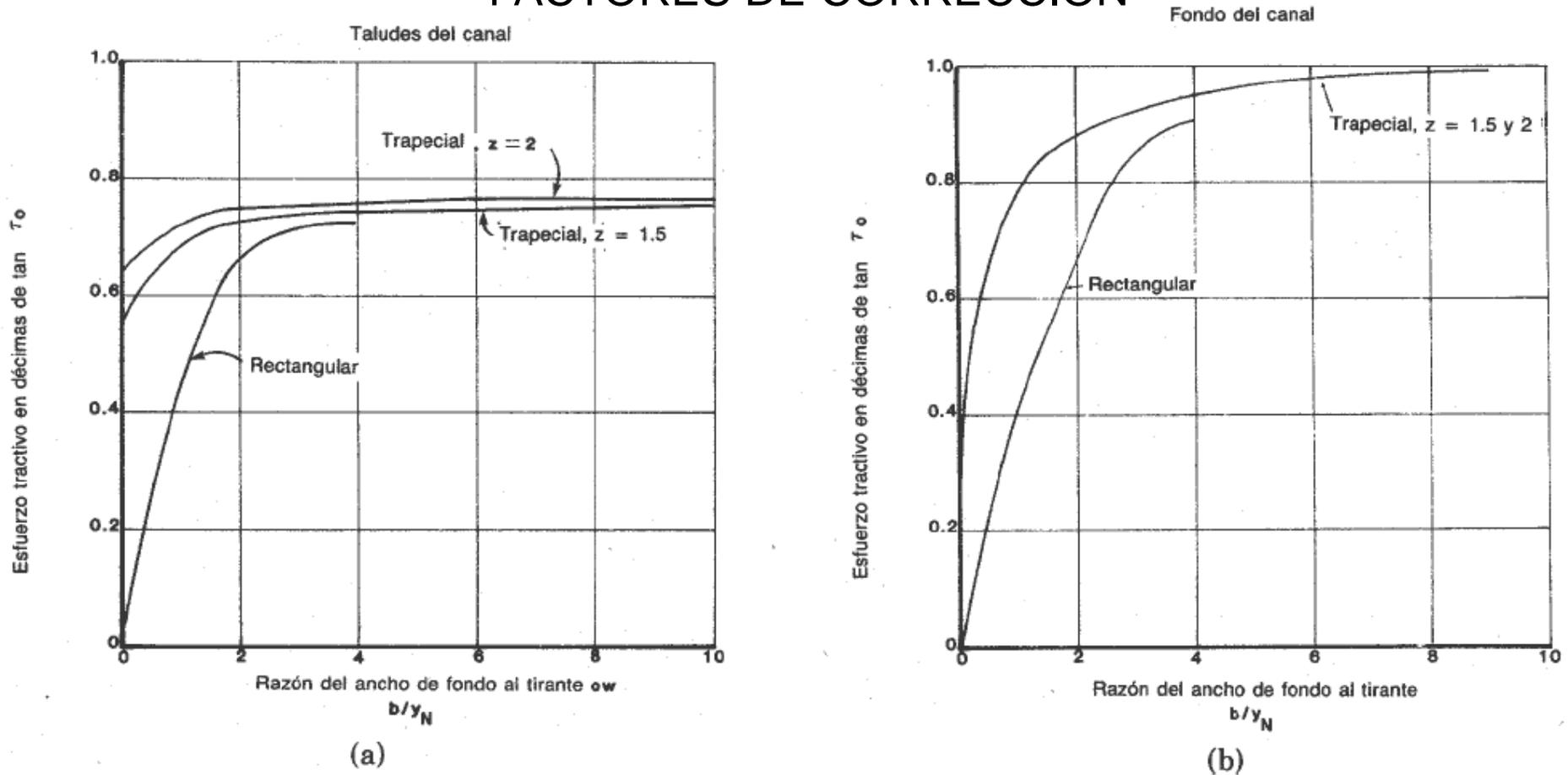


Figura 8.9. Esfuerzo cortante tractivo máximo en función de  $\gamma S$ . a) para los taludes y b) para el fondo del canal. French. R. H. 1988.

Esfuerzo tangencial crítico en la  
plantilla ( $\tau$ ) en Kg/m<sup>2</sup>

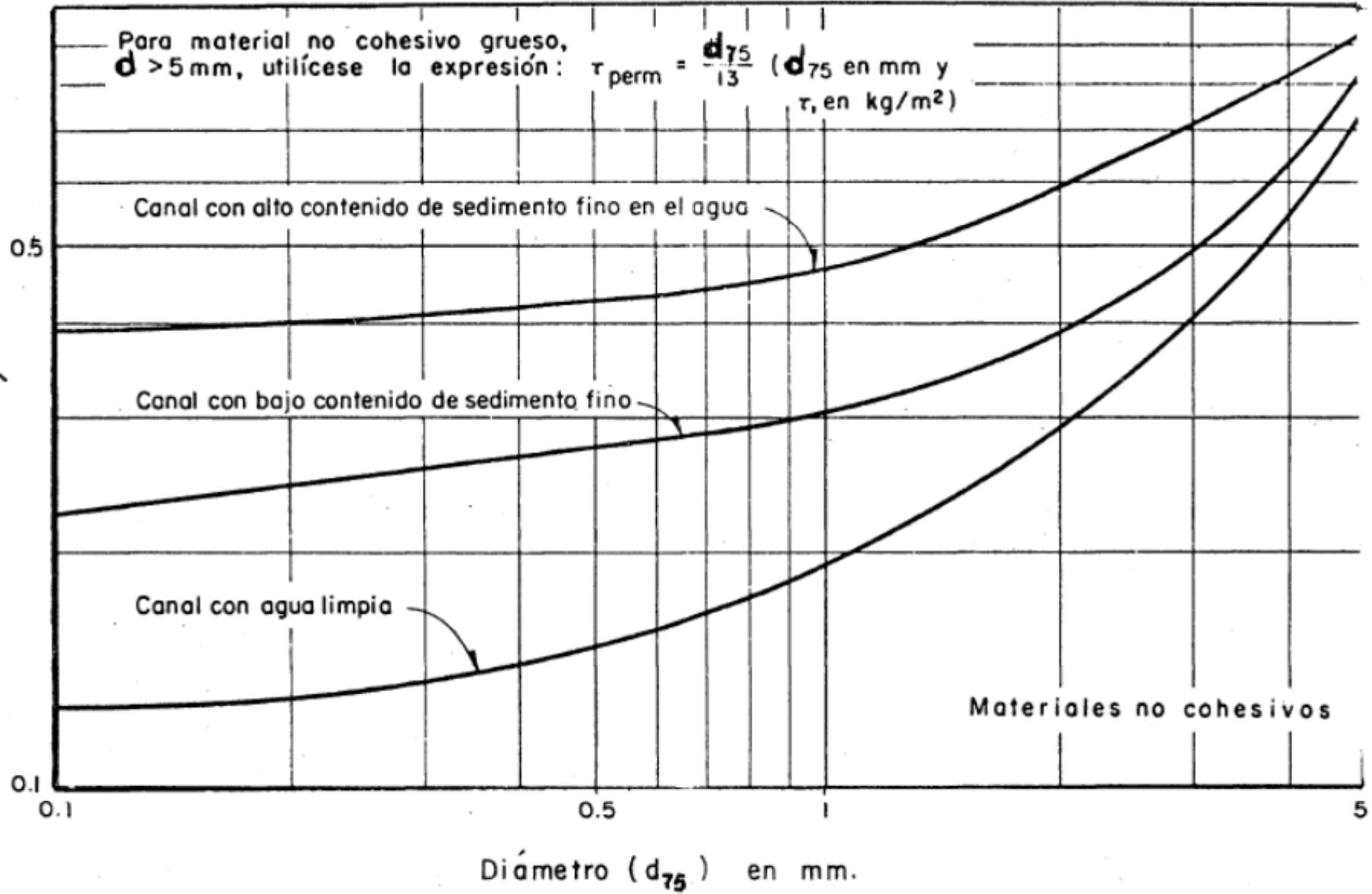


Fig. 8.10 a) Esfuerzo tangencial crítico necesario para mover las partículas de un suelo no cohesivo, que se encuentran en un fondo plano

## 4. MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA (11)

12. Compárese la fuerza tractiva permisible en el fondo (paso 8) con la actuante dada por  $\gamma y S$  y corríjase por forma (Figura 8.9a del paso 6).
13. Verifíquese: a) La velocidad mínima permisible para agua que lleve finos y para vegetación. b) El número de Froude.
14. Estímese el borde libre requerido,
15. Resúmase los resultados sobre un bosquejo dimensionado.

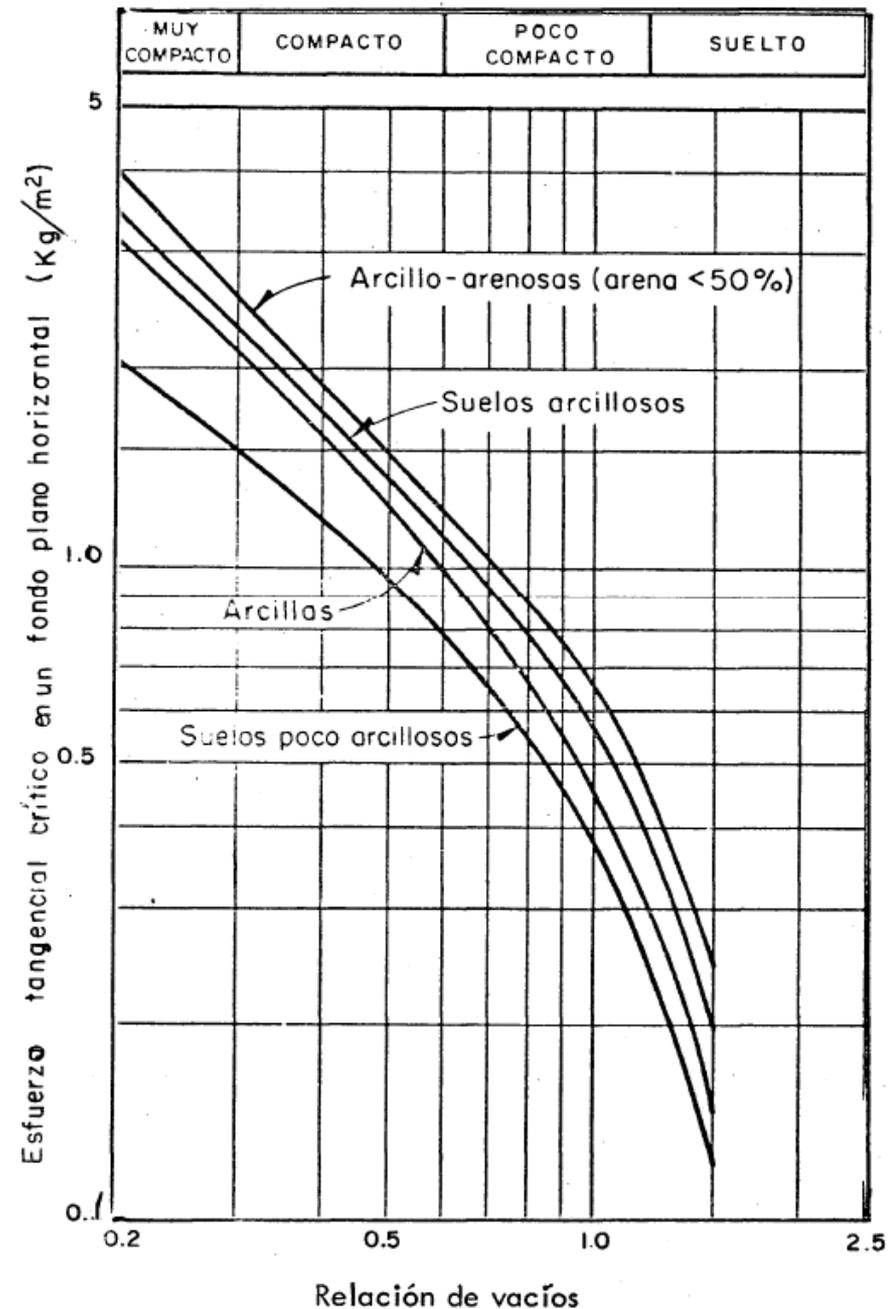


Fig. 8.10.b) Esfuerzo tangencial crítico necesario para erosionar un suelo cohesivo



## EJEMPLO

Diseñar un canal de sección trapezoidal sin revestimiento que conduzca un caudal de  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  sin que erosione la sección. El canal será excavado en material aluvial grueso poco angular, de tal manera que el 25% tenga un diámetro mayor a  $40 \text{ mm}$ . La pendiente de la base es  $S=0.001$ .



## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (1)

- El revestimiento de un canal con pasto es un método común empleado para conducir flujos intermitentes de irrigación y controlar la erosión en áreas agrícolas.
- El pasto estabiliza el cuerpo del canal, consolida el suelo que compone el perímetro del canal, y restringe el movimiento de partículas de suelo en el lecho de éste.
- La presencia de hierba o vegetación en los canales, resultará en una turbulencia considerable, lo cual significa pérdida de energía y retardo del flujo.
- Los canales revestidos con pasto no pueden por lo general aguantar inundaciones prolongadas y humedad, y su diseño presenta un número de problemas que no presenta otro tipo de canales, como la variación estacional del coeficiente de fricción debido a la condición del revestimiento.



## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (2)

1. Debe evitarse la vegetación de crecimiento rápido y de gran altura; por ejemplo, el de árboles, arbustos, etcétera.
2. Evitar la vegetación leñosa dura y poco flexible.
3. Evitar áreas expuestas dentro de la cubierta de vegetación. En dichas áreas, la erosión se propaga de manera más rápida que en un canal completamente expuesto.
4. Los pastos forman una protección fuerte y tersa, crecen altos pero debido a su flexibilidad se doblan por efecto del flujo.
5. Hierbas densas y bajas forman una buena protección. Sus raíces proporcionan un buen refuerzo del suelo. La mayoría progresa a través de los tallos que, por si mismos, llenan las áreas expuestas.
6. La cubierta vegetativa no se debe usar en la parte del canal donde el flujo ocurra de modo permanente o continuo, sino sólo en aquellas partes sumergidas de modo intermitente.
7. La vegetación que se seleccione en regiones semiáridas debe ser la que alcance su condición más fuerte en la estación de mínimo caudal. Además, la vegetación seleccionada no debe requerir de riego en la estación de estiaje, o cuando mucho, en el primer año.

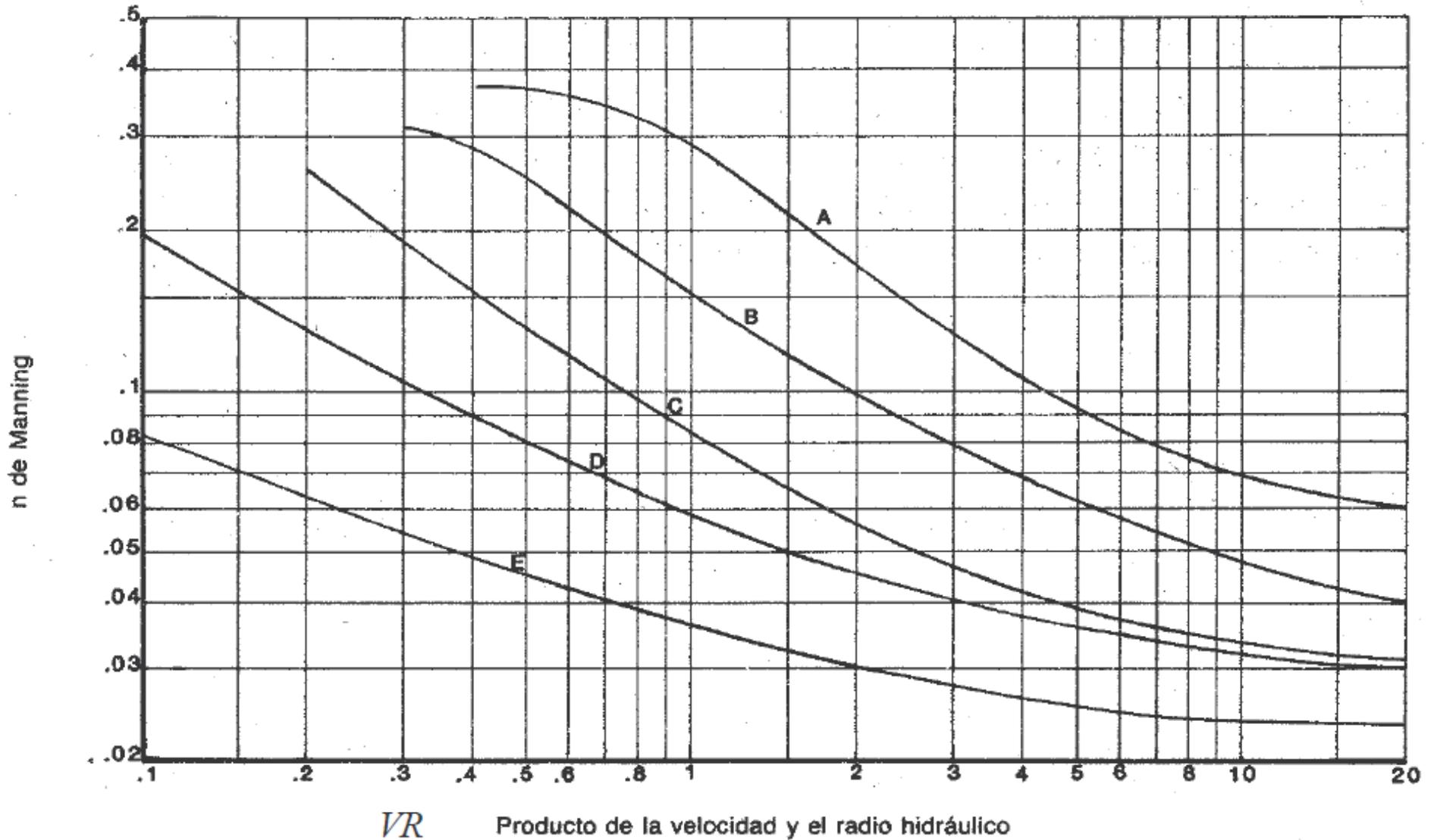


## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (3)

- Algunos parámetros básicos de diseño son:
- **El coeficiente de retardo.** Es el coeficiente de rugosidad de Manning para canales con hierba. Varía con la velocidad media y el radio hidráulico de la siguiente forma:

$$n = f (V R_h)$$

Esta relación es típica para cada clase de vegetación y es casi independiente de la forma del canal y de su pendiente longitudinal. Coyle plantea un grupo de curvas empíricas para esta relación en concordancia con el grado de retardo.



**Figura 8.11.  $n$  de Manning en función de la velocidad, radio hidráulico y retardo vegetal. French. R. H. 1988.**

Tabla 8.4. Clasificación de grados de retardo para varios tipos de pastos (Coley, 1975. Adaptado de French. R. H. 1988).

## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (5)

| Grado | Retardación |
|-------|-------------|
| A     | Muy alta    |
| B     | Alta        |
| C     | Media       |
| D     | Baja        |
| E     | Muy baja    |

|   | Retraso | Cubierta                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Condición                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A |         | Pasto<br><br><i>Phalaris arundinacea</i> "alpiste"                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Parado excelente, alto (promedio de 36" = 90 cm)<br>Parado excelente, alto (promedio de 36" = 90 cm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| B |         | <i>Bromus inermis</i> "bramo suave"<br><br><i>Cyrodon dactylen</i> "Zacate bermuda, pata de gallo"<br><i>Schizachysium scoparium</i> "Popotillo azul", <i>Bontelona gracilis</i> "navajita azul"<br><i>Festuca arundinacea</i> "Festuca alta"<br><br><i>Lespedeza sericea</i><br><br><i>Pheleum prateuse</i> "timothy"<br><br><i>Festuca arundinacea</i><br><br>Blue grama | Parado bueno, podado (promedio 12" a 15", 30 a 37.5 cm.)<br>Parado bueno, alto (promedio de 12", 30 cm)<br>Parado bueno, sin podar<br>Parado bueno, sin podar (promedio 18", 47.5 cm)<br>Parado bueno, no maderoso alto (promedio 19", 47.5 cm)<br>Parado bueno, sin cortar (promedio 20", 50 cm)<br>Parado bueno, sin cortar (promedio 18", 45 cm)<br>Parado bueno, sin cortar (promedio 13", 32.5 cm) |
| C |         | <i>Paspalum notatum</i> "zacate bahia"<br><br>Zacate bermuda, pata de gallo<br><br><i>Agrostis alba</i><br><br>Mezcla de pastos, de verano (zacate orchard, <i>Agrostis alba</i> , ballico italiano y lespedeza común)<br><i>Centipede grass</i><br><br><i>Poa pratensis</i> zacate azul de Kentucky                                                                       | Parado bueno, sin cortar (6 a 8", 15 a 20 cm)<br>Parado bueno, podado (promedio 6", 15 cm)<br>Parado bueno, cabeceado sin cortar (15 a 20", 37.5 a 50 cm)<br>Parado bueno, sin cortar (6 a 8", 15 a 20 cm)<br>Cubierta muy densa (promedio 6", 15 cm)<br>Parado bueno, cabeceado (6 a 12", 15 a 30 cm)                                                                                                  |
| D |         | Zacate bermuda, pata de gallo<br><br>Festuca rubra, "festuca roja"<br><br>Zacate búfalo, zacate chino<br><br>Mezcla de pastos de primavera (zacate orchard, ballico italiano, <i>Agrostis alba</i> y lespedeza común)<br><i>Lespedeza sericea</i>                                                                                                                          | Parado bueno, cortado a 25", 62.5 cm.<br>Parado bueno, cabeceado (12 a 18", 30 a 45 cm)<br>Parado bueno, sin cortar (3 a 6", 7.5 a 15 cm)<br>Parado bueno, sin cortar (4 a 5", 10 a 12.5 cm)<br>Después de cortar 2", 5 cm;                                                                                                                                                                             |
| E |         | Zacate bermuda, pata de gallo<br>Zacate bermuda, pata de gallo                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Parado bueno antes de cortar<br>Parado bueno, cortado a 1.5", 3.7. rastrojo quemado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |



## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (6)

- **La velocidad permisible.** Es la velocidad que prevendrá la erosión severa en el canal durante una longitud razonable de tiempo. Se debe tener en cuenta:
  1. Para cubierta vegetal escasa, las velocidades no deben exceder los 0.91 m/s.
  2. Si la vegetación debe sembrarse, se permiten velocidades del orden de 0.91 a 1.2 m/s.
  3. Cuando el césped puede desarrollarse rápidamente o cuando el flujo normal del canal se puede desviar hasta que se establezca una capa vegetal, se pueden tener velocidades de 1.2 a 1.5 m/s.
  4. En césped bien establecido de buena calidad, se permiten velocidades entre 1.5 a 1.8 m/s.
  5. En condiciones especiales, se permiten velocidades hasta de 1.8 a 2.1 m/s.

Tabla 7.37. Velocidad permisible en canales cubiertos con vegetación, según U.S. Conservation Service



| Vegetación                                                                                                                      | Pendiente longitudinal del canal en por ciento        | V permisible en m/s                |                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
|                                                                                                                                 |                                                       | En suelos resistentes a la erosión | En suelos fácilmente erosionables |
| Pasto bermuda.                                                                                                                  | 0 a 5                                                 | 2.40                               | 1.80                              |
|                                                                                                                                 | 5 a 10                                                | 2.10                               | 1.50                              |
|                                                                                                                                 | mayor de 10                                           | 1.80                               | 1.20                              |
| Pasto búfalo, pasto bahía y pasto azul kentucky.<br>Pasto de hierba mala de hoja plana y espina.<br>Gramma azul y cañuela alta. | 0 a 5                                                 | 2.10                               | 1.50                              |
|                                                                                                                                 | 5 a 10                                                | 1.80                               | 1.20                              |
|                                                                                                                                 | mayor de 10                                           | 1.50                               | 0.90                              |
| Mezclas de pasto.<br>Pasto tipo cañuela.                                                                                        | 0 a 5                                                 | 1.50                               | 1.20                              |
|                                                                                                                                 | 5 a 10                                                | 1.20                               | 0.90                              |
| no adecuados para pendientes mayores del 10 por ciento                                                                          |                                                       |                                    |                                   |
| <i>Lespedeza sericea</i> ,<br>pasto azul-amarillo,<br>pasto de forraje y alfalfa.                                               | 0 a 5                                                 | 1.10                               | 0.80                              |
|                                                                                                                                 | no adecuados para pendientes mayores del 5 por ciento |                                    |                                   |
| <i>Lespedeza</i> común.<br>Pasto sudán y pastos anuales.                                                                        | 0 a 5                                                 | 1.10                               | 0.80                              |
|                                                                                                                                 | no adecuados en pendientes mayores del 5 por ciento   |                                    |                                   |



## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (8)

### SEGÚN FRENCH (1988)

- **Se debe proceder en dos etapas.** En la **primera** se diseña el canal para la estabilidad, dimensionando el canal para las condiciones de grado de retardo mas bajo, correspondiente tanto a estaciones con vegetación en estado latente, como al período en que la misma llegue a desarrollarse. Para ello:

1. Se supone un valor de  $n$  y se determina  $V.R_h$  (de la figura anterior).
2. Se elige la velocidad permisible en la tabla 7.37, y se calcula  $R_h$  dividiendo el resultado del paso 1 entre la velocidad permisible.
3. Con el “ $n$ ” supuesto y el  $R_h$  encontrado. se recalcula  $V.R_h$  usando Manning:

$$V R_h = \frac{R_h^{5/3} \sqrt{S}}{n}$$

Si el valor estimado es diferente al encontrado en el paso 1, se asume un nuevo  $n$  y se repite el procedimiento.

4. Se calcula el área  $A$  usando el caudal de diseño y la velocidad permisibles.
5. Se dimensiona el canal usando  $A$  y  $R_h$ .



## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (9)

- En la **segunda etapa** se revisa el diseño para la máxima capacidad, es decir, para determinar el incremento en la profundidad del flujo necesario para mantener una capacidad máxima bajo la condición de un grado de retardo más alto. Para ello:
  1. Se asume el tirante determinado en la primera etapa y se calcula  $A$  y  $R_h$ .
  2. Calcula la velocidad media  $V=Q/A$ , con el valor de  $A$  determinado en el paso 1.
  3. Calcula  $V.R_h$  usando los resultados de los pasos 1 y 2, y calcule “ $n$ ” a partir de gráfico.
  4. Se calcula  $V$  usando la ecuación de Manning.
  5. Se comparan los valores medios de la velocidad en los pasos 2 y 4. Si no son iguales, se asume un nuevo tirante y se repite el procedimiento.
  6. Se añade el borde libre apropiado y se verifica el número de Froude.



## EJEMPLO

Un canal trapecial tiene taludes 2:1 y pendiente del 0.1 por ciento. La cubierta vegetal es una mezcla de pastos que tiene un grado de retardación  $C$  y admite una velocidad máxima de 1.5 m/s. Determinar las dimensiones de la sección para conducir un gasto de  $51 \text{ m}^3/\text{s}$ .



## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (10)

### SEGÚN AKAN Y HAGER (2001)

- Se basa en los resultados de Chen y Cotton (1988), quienes plantean una ecuación para el coeficiente de Manning:

$$n = \frac{(K R_h)^{1/6}}{C + 19.97 \log (K^{1.4} R_h^{1.4} S^{0.4})}$$

donde  $K=3.28\text{m}^{-1}$  y  $C$  es un factor adimensional de retardo que depende del tipo de pasto.

- Reemplazando en la ecuación de Manning, se obtiene:

$$Q = \frac{k_0 \left[ C + 19.97 \log (K^{1.4} R_h^{1.4} S^{0.4}) \right]}{(K R_h)^{1/6}} A R_h^{2/3} S^{1/2}$$



## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (11)

donde  $k_0=1.0\text{m}^{-1/3}/\text{s}$  para el S.I.

- Para facilitar el dimensionamiento, se escribe la ecuación de forma adimensional. Para ello se multiplica por

$$\frac{K^{1/6}}{S^{1/2} k y^{5/2}}$$

- de donde resulta:

$$\frac{Q K^{1/6}}{S^{1/2} k y^{5/2}} = \left[ C + 19.97 \log \left( K^{1.4} S^{0.4} y^{1.4} \left( \frac{R_h}{y} \right)^{1.4} \right) \right] \frac{A}{k y^2} \sqrt{\frac{R_h}{y}}$$

- donde  $b$ =ancho de base,  $k$ =talud; o, en forma simplificada:

$$Q_b = \left[ \beta + 19.97 \log R_{hb}^{1.4} \right] A_b R_{hb}^{1/2}$$



## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (12)

donde los parámetros indicados se pueden estimar con:

$$Q_b = \frac{1.2189 Q}{S^{1/2} k y^{5/2}}$$

$$\beta = C + 19.97 \log (5.275 S^{0.4} y^{1.4})$$

$$A_b = \frac{A}{k y^2} = 1 + \frac{b}{k y}$$

$$R_{hb} = \frac{R_h}{y} = \frac{1 + b/ky}{(b/ky) + 2 \sqrt{(1 + k^2)/k^2}}$$



## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (13)

- La relación entre  $Q_b$ ,  $\beta$  y  $b/ky$  se resume en el gráfico 7.69, para un canal trapezoidal de  $k=2$ . A pesar que es un caso articular, la aproximación es suficiente para otros taludes como  $k=3$  y  $k=4$ .
- De igual manera, la Figura 7.70 puede utilizarse para encontrar el tirante “y” si se conoce el ancho de base “b”. Para ello, se utilizan los siguientes parámetros:

$$Q_y = \frac{1.2189 k^{3/2} Q}{S^{1/2} b^{5/2}}$$

$$\alpha = C + 19.97 \log (5.275 S^{0.4} b^{1.4} / k^{1.4})$$



## 5. CANALES REVESTIDOS CON PASTO (14)

- Para estimar el “y” inicial, Akan y Hager asumen las condiciones de fuerza crítica tractiva:

$$\tau_{m\acute{a}x} = g \rho y S$$

- Este  $y_{inicial}$  representa el tirante máximo permisible para condiciones de bajo retardo; es decir, se puede usar éste o cualquier tirante menor en el diseño.

Tabla 7.38. Clases de retardación para cubiertas vegetativas



| Clase de retardación | Cubierta                                     | Condición<br>(intensidad de crecimiento)                                | C    | $\tau$ máx.<br>en<br>N/m <sup>2</sup> |
|----------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------|
| A                    | Pasto alpiste tipo cañuela                   | Excelente densidad, alto (76 cm en promedio)                            | 15.8 | 177.2                                 |
| A                    | Pasto amarillo tallo azul, <i>Ischaemum</i>  | Excelente densidad, alto (91 cm en promedio)                            | 15.8 | 177.2                                 |
| B                    | Pasto bermuda                                | Buena densidad, alto (30 cm en promedio)                                | 23.0 | 100.5                                 |
| B                    | <i>Lespedeza sericea</i> , mezclas gramíneas | Buena densidad, no leñoso, alto (48 cm en promedio)                     | 23.0 | 100.5                                 |
| B                    | Pasto alpiste tipo cañuela, gama azul        | Buena densidad, sin segar, (33 cm en promedio)                          | 23.0 | 100.5                                 |
| C                    | Agróstida, planta gramínea de cultivo        | Densidad mediana, sin segar, (38 a 50 cm)                               | 30.2 | 47.9                                  |
| C                    | Pasto bermuda, pasto cienpies                | Buena densidad, segados (15 cm en promedio)                             | 30.2 | 47.9                                  |
| C                    | <i>Lespedeza común</i>                       | Buena densidad, sin segar, (28 cm en promedio)                          | 30.2 | 47.9                                  |
| D                    | Pasto bermuda                                | Buena densidad, segado a 6 cm de altura                                 | 34.6 | 28.7                                  |
| D                    | <i>Lespedeza común</i>                       | Excelente densidad, sin segar (11 cm en promedio)                       | 34.6 | 28.7                                  |
| D                    | <i>Lespedeza sericea</i>                     | Después de cortar a 5 cm de altura; muy buena densidad antes de segarlo | 34.6 | 28.7                                  |
| E                    | Pasto bermuda                                | Buena densidad, segado a 4 cm de altura                                 | 37.7 | 16.7                                  |

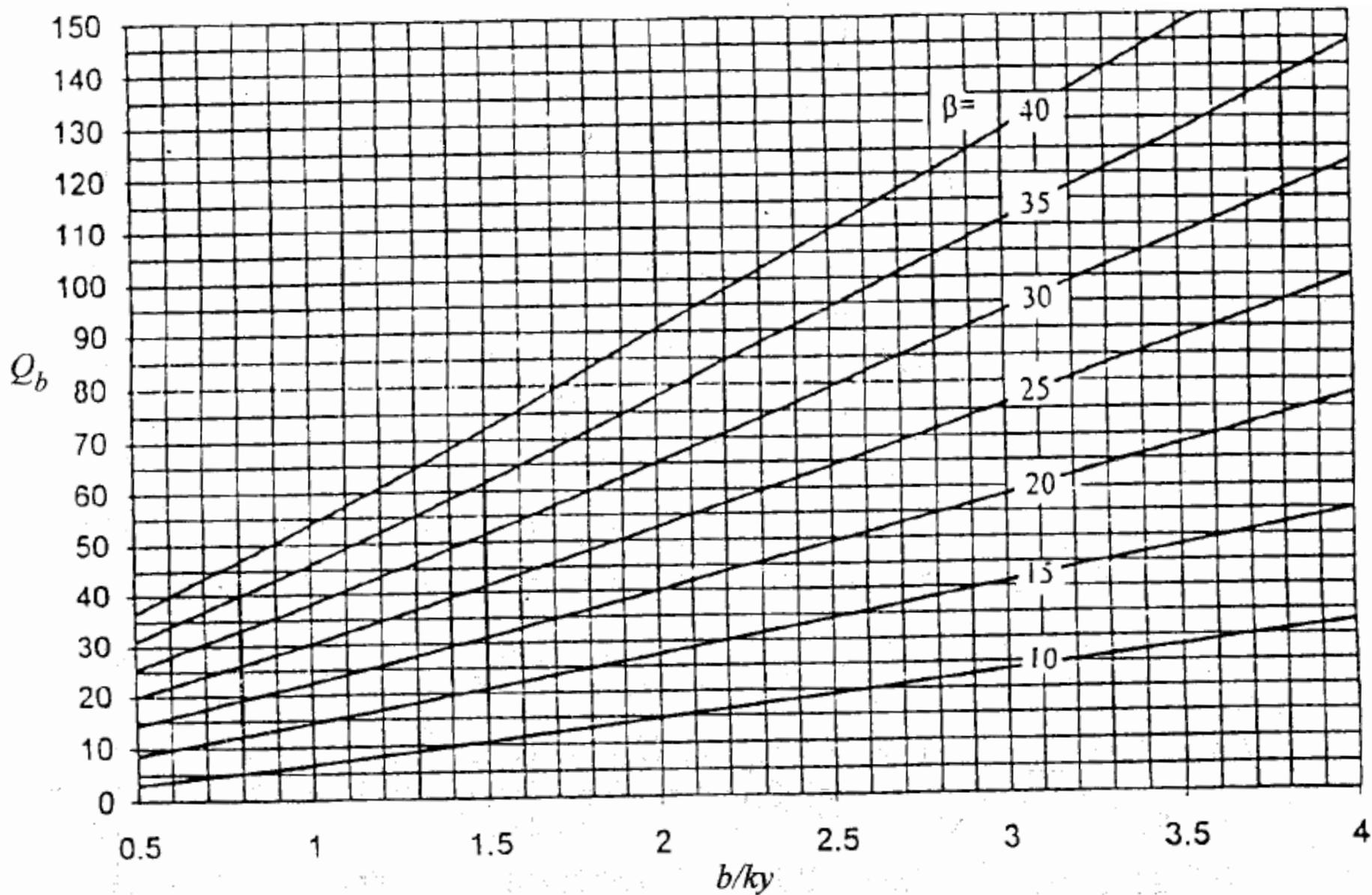


Figura 7.69. Curvas para determinar el ancho del canal

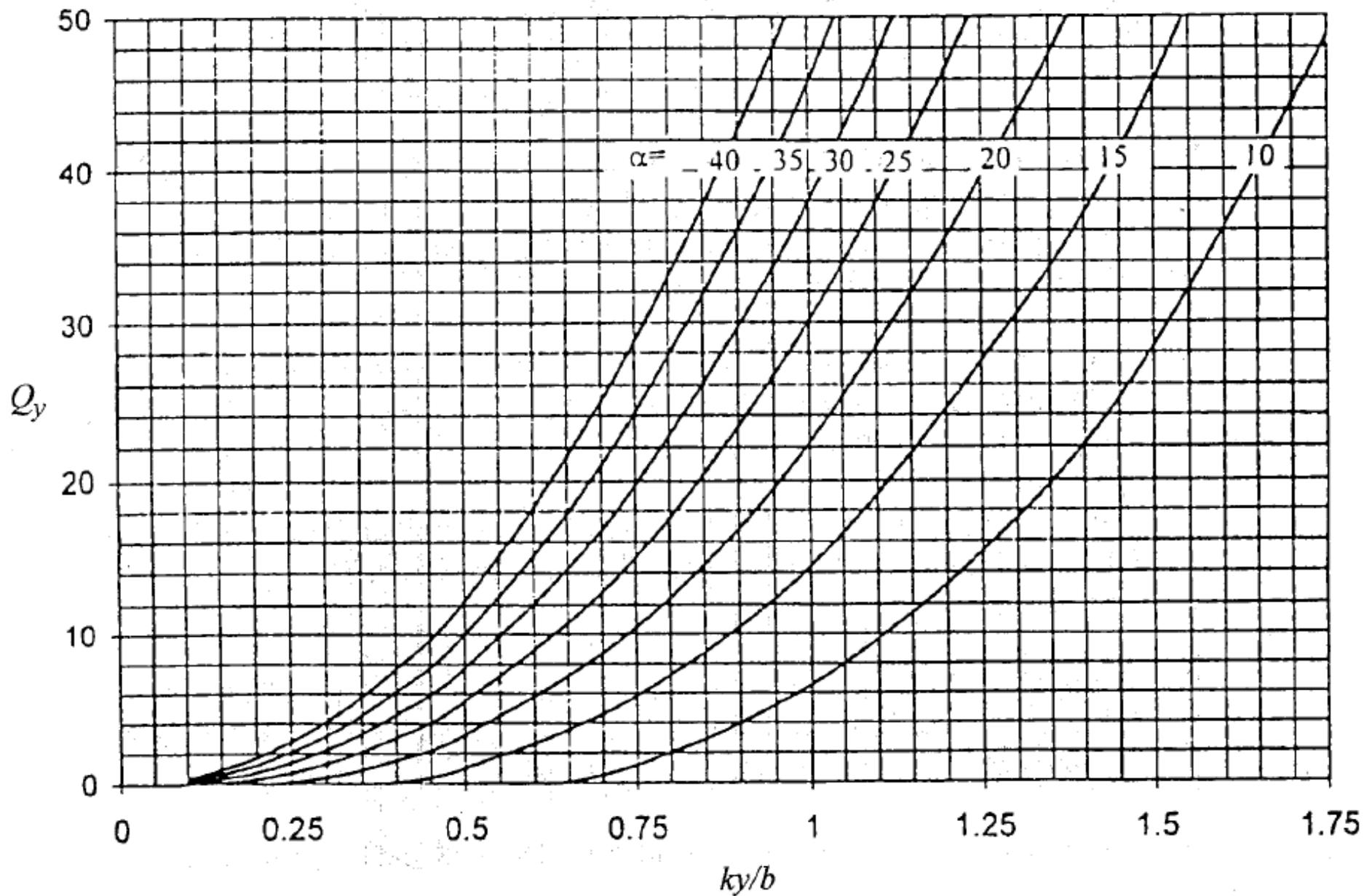


Figura 7.70. Curvas para determinar el tirante en el canal



## EJEMPLO

Se desea diseñar un canal trapecial con pasto bermuda para conducir  $Q = 0.7 \text{ m}^3/\text{s}$  con una pendiente  $S = 0.004$  y taludes  $k = 3$ .