

OBRAS HIDRÁULICAS I

CUARTO SEMESTRE

UNIDAD I

Diseño de Canales No revestidos

Docente: Jessica Brito Noboa

Período académico: 2023-2S



01

Ecuaciones del movimiento uniforme

02

Problemas de cálculo de flujo uniforme

03

Secciones de máxima eficiencia hidráulica

04

Conductos circulares libres parcialmente llenos

04

Diseño de canales no revestidos

Diseño de Canales No Revestidos

Diseño de Canales No revestidos

La mayor parte de los canales artificiales revestidos y construidos pueden resistir la erosión de manera satisfactoria y, por consiguiente, se consideran no erosionables.

El diseñador simplemente calcula las dimensiones del canal artificial mediante una ecuación de flujo uniforme y luego decide acerca de las dimensiones finales con base en la eficiencia hidráulica o reglas empíricas de sección óptima, aspectos prácticos constructivos y economía.

Diseño de Canales No revestidos

Los factores que se consideran en el diseño son:

- La clase del material que conforma el cuerpo del canal, la cual determina el coeficiente de rugosidad
- La velocidad mínima permisible, para evitar la deposición si el agua mueve limos o basuras
- La pendiente del fondo del canal y las pendientes laterales
- El borde libre
- La sección más eficiente, ya sea determinada hidráulica o empíricamente.

Diseño de Canales No revestidos

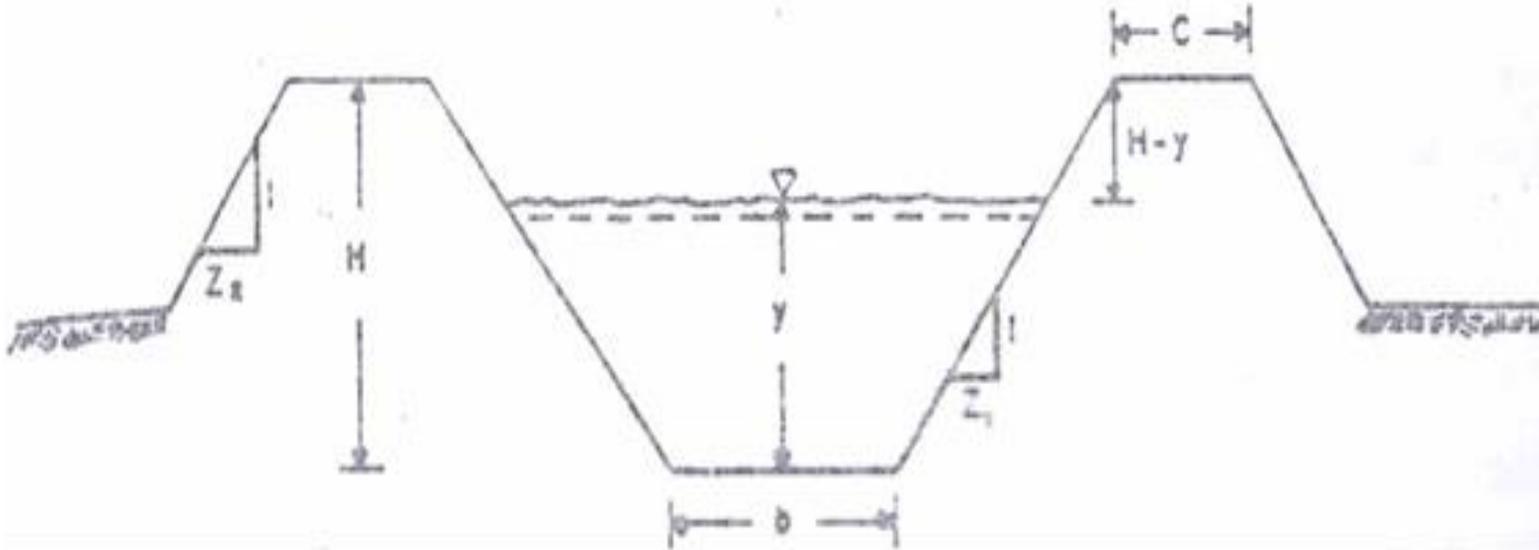
Los materiales no erosionables utilizados para formar el revestimiento de un canal incluyen: hormigón, mampostería, acero, hierro fundido, madera, vidrio, plástico, etc. La selección de material depende sobre todo de la disponibilidad y el costo de éste, el método de construcción y el propósito para el cual se utilizará el canal.



- La mayoría de los canales con recubrimiento pueden soportar la erosión y se pueden considerar como no erosionables.
- Los canales sin recubrimiento, por el contrario son erosionables; a excepción de aquellos que se excavan en fundación firme tal como la roca. Por lo tanto el diseño de canales debe hacerse considerando si el canal va a estar revestido o no revestido.
- Si el canal se va a revestir lo más aconsejable es diseñar el canal empleando el criterio de sección hidráulica eficiente (óptima); utilizando las fórmulas del flujo uniforme.

- Si el canal no se recubre, las fórmulas de flujo uniforme que son aptas para canales no erosionables (revestidos) proveen una condición insuficiente para el diseño de canales erosionables. Esto se debe a que la estabilidad de los canales erosionables depende principalmente de las propiedades del material que forma los contornos del canal antes que de las condiciones hidráulicas del flujo. Sólo después de que se obtenga una sección estable del canal erosionable se pueden aplicar las ecuaciones del flujo uniforme para el cálculo de la velocidad y del caudal.

Diseño de Canales No revestidos



El diseño de un canal implica darle valor numérico a las siguientes especificaciones técnicas:

- Caudal (Q)
- Velocidad media del agua (v)
- Pendiente longitudinal (S) en m/m ó %
- Coeficiente de rugosidad (n).
- Talud (z)
- Ancho de solera (b).
- Tirante o calado (y).
- Borde libre (BL).
- Profundidad total desde la corona al fondo del canal (H).
- Ancho de corona (C).

Para el diseño de un canal, el caudal tiene que ser un dato de partida.

- Riego \rightarrow l/s/ha (Dotación) \rightarrow (Tipo de suelo)
- A.P. \rightarrow l/hab/d (Dotación) \rightarrow Población, Clima
- G.H. \rightarrow l/s (Caida) \rightarrow KW, MW

- Se distinguen dos métodos para el cálculo de la sección estable:
 1. MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE.
 2. MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA



Diseño de Canales No revestidos

Método de Velocidad Permisible

- Consiste en limitar la velocidad media a un valor que no cause erosión en las paredes del canal. ***La máxima velocidad permisible o la velocidad no erosionable es la mayor velocidad que no causará sería erosión en los contornos del canal.***
- Esta velocidad es muy incierta y variable, depende principalmente del tamaño, clase de material de las paredes y del tirante del flujo, y solo puede estimarse con base a la experiencia y criterio.
- La velocidad mínima permisible se determina teniendo presente el material sólido transportado por el agua; se define como la velocidad por debajo de la cual el material sólido contenido en el agua decanta, produciendo depósito en el lecho del canal. La velocidad mínima para evitar el azolvamiento en los canales de tierra se recomienda sea de 0.40 m/s.

Diseño de Canales No revestidos

Las velocidades en los canales varían en un ámbito cuyos límites son: la velocidad mínima que no produzca depósitos de materiales sólidos en suspensión (sedimentación) y la máxima que no produzca erosión en las paredes y fondo del canal.

La velocidad mínima permisible o velocidad no sedimentante es la menor velocidad que no permite el inicio de la sedimentación y no induce el crecimiento de plantas acuáticas y de musgo.

En general puede adoptarse una velocidad media de 0.61 a 0.91 m/s.

CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS	VELOCIDADES MAXIMAS (m)
Canales en tierra franca	0.60
Canales en tierra arcillosa	0.90
Canales revestidos con piedras y mezcla simple	1.00
Canales con mampostería de piedra y hormigón	2.00
Canales revestidos con hormigón	3.00
Canales en roca: pizarra	1.25
Canales en roca: areniscas consolidadas	1.50
Canales en roca: rocas duras, granito, etc.	3.00 – 5.00

RESISTENCIA (kg/cm ²)	PROFUNDIDAD DEL TIRANTE (m)				
	0.50	1.00	3.00	5.00	10.00
50	9.60	10.60	12.30	13.00	14.10
75	11.20	12.40	14.30	15.20	16.40
100	12.70	13.80	16.00	17.00	18.30
150	14.00	15.60	18.00	19.10	20.60
200	15.60	17.30	20.00	21.20	22.90

Esta tabla da valores de velocidades admisibles altos, sin embargo la U.S. BUREAU OF RECLAMATION, recomienda que para el caso de revestimiento de canales de hormigón no armado, las velocidades no deben exceder de **2.5 m/seg**. Para evitar la posibilidad de que el revestimiento se levante.

Diseño de Canales No revestidos

- **Pendientes límites.**
- La velocidad se encuentra en función de la pendiente; a consecuencia de los límites establecidos para la velocidad, resultan límites para la pendiente, los valores que se presentan a continuación son solo indicativos:

TIPO DE CANAL	PENDIENTE LIMITE
Canales de navegación	Hasta 0.00025
Canales industriales	0.0004 a 0.0005
Canales para riego pequeños	0.0006 a 0.0008
Canales para riego grandes	0.0002 a 0.0005
Acueductos de agua potable	0.00015 a 0.001

Fuente: HIDRAULICA II, Pedro Rodríguez Ruiz

La pendiente máxima admisible para canales de tierra varía según la textura del suelo. En el cuadro siguiente se muestran las pendientes máximas recomendadas en función del tipo de suelo.

Tipo de suelo	Pendiente (S) (‰)
Suelos sueltos	0.5 – 1.0
Suelos francos	1.5 – 2.0
Suelos arcillosos	3.0 – 4.5

Diseño de Canales No revestidos

Procedimiento para resolución

- Usando la velocidad máxima permisible como criterio, el procedimiento de diseño para un canal con sección trapezoidal es el siguiente:

1.- Según el tipo de material en que está construido el canal, determinar el coeficiente de rugosidad “n” la inclinación del talud y la velocidad máxima permisible.

2.- Con los datos anteriores, con la pendiente “S” y con la ecuación de Manning, determinar el radio hidráulico.

$$v_{\max} = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2}$$

3.- Con la ecuación de continuidad y con los valores del gasto y la velocidad máxima Calcular el valor del Área hidráulica.

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

4.- Con el área hidráulica y el radio hidráulico calculamos el Perímetro mojado.

$$P = \frac{A}{R}$$

5.- Con la expresión para calcular el área hidráulica y el perímetro mojado según la geometría de la sección resolver simultáneamente para “y” y “b”.

6.- Añadir un borde libre apropiado y modificar la sección con el fin de que sea funcional desde el punto de vista práctico.

Diseño de Canales No revestidos

Método de la Fuerza Tractiva

Cuando el agua fluye en un canal, el esfuerzo cortante τ_0 , ó tractivo, que se genera en los contornos del mismo tiende a producir arrastre del material que lo compone. Esta fuerza actúa sobre el lecho del canal en la dirección del flujo. Esta fuerza es simplemente el empuje del agua sobre el área mojada.

En el flujo uniforme la fuerza tractiva es igual a la componente efectiva de la fuerza gravitacional que actúa sobre el cuerpo de agua, paralela al fondo del canal e igual a:

$$\tau = w * A * L * S$$

w = Peso unitario del agua.

A = Área mojada

L = Longitud del tramo del canal

S = Pendiente

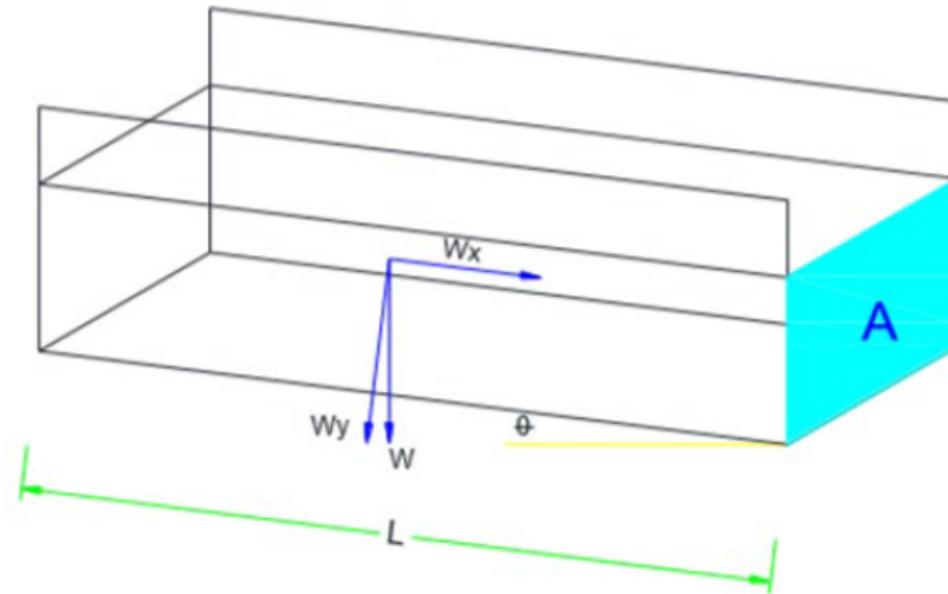
Luego el valor promedio de la fuerza tractiva por unidad de área mojada conocido como fuerza tractiva unitaria τ_o es igual a:

$$\tau_o = \frac{wALS}{PL}$$

P = Perímetro mojado

Si $R = \frac{A}{P}$; entonces

$$\tau_o = wRS$$



En un canal abierto ancho, el radio hidráulico es igual a la profundidad del flujo y ; por consiguiente:

$$\tau_o = wyS$$

La fuerza tractiva unitaria en canales abiertos no está distribuida uniformemente a lo largo del perímetro mojado (excepto en canales abiertos anchos)

En general en los canales trapezoidales, la fuerza tractiva máxima en el fondo es $0.970wyS$ y en lo lados $0.75wyS$.

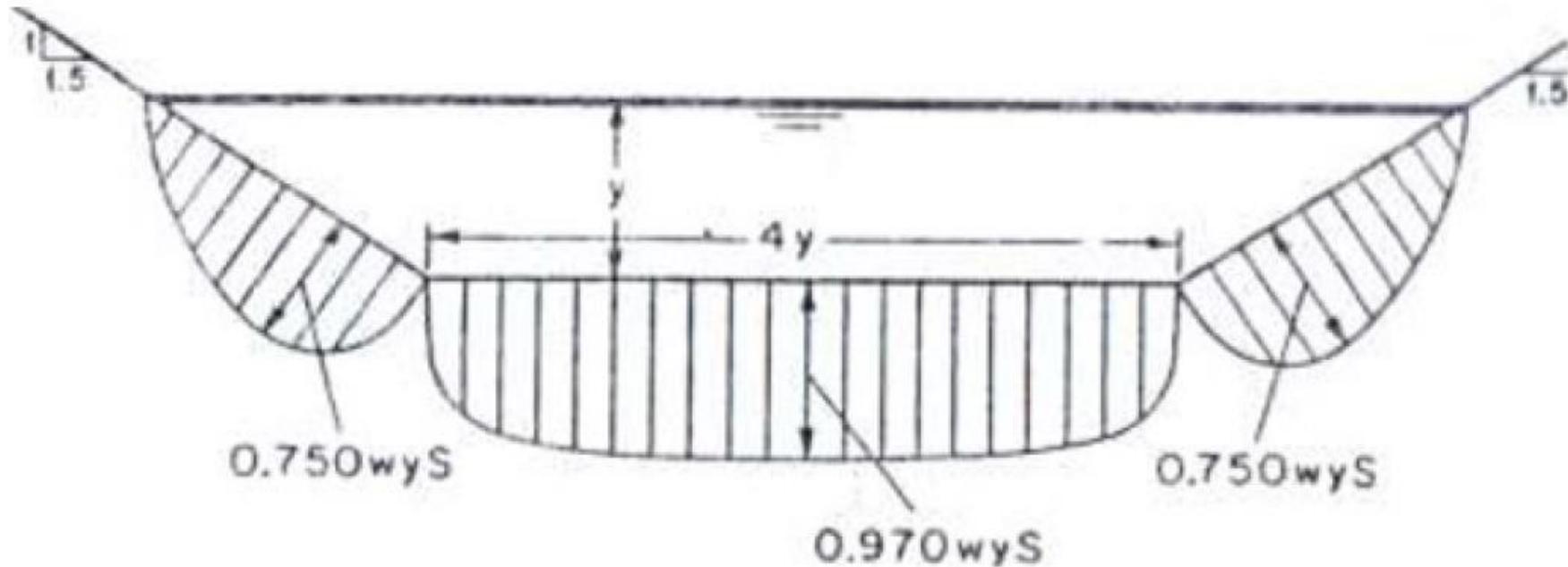
τ_o = Esfuerzo solicitante

τ_s = Esfuerzo en las paredes del canal

τ_r = Esfuerzo en el fondo del canal

Diseño de Canales No revestidos

En un canal abierto ancho, el radio hidráulico es igual a la profundidad del flujo y ; por consiguiente:



Sobre una partícula de suelo que descansa en la pendiente lateral de una sección del canal en la cual se encuentra fluyendo agua, actúan dos fuerzas: la fuerza tractiva $a * \tau_s$ y la componente de fuerza gravitacional $W_s \text{ Sen}\phi$ donde:

a = Área efectiva de la partícula.

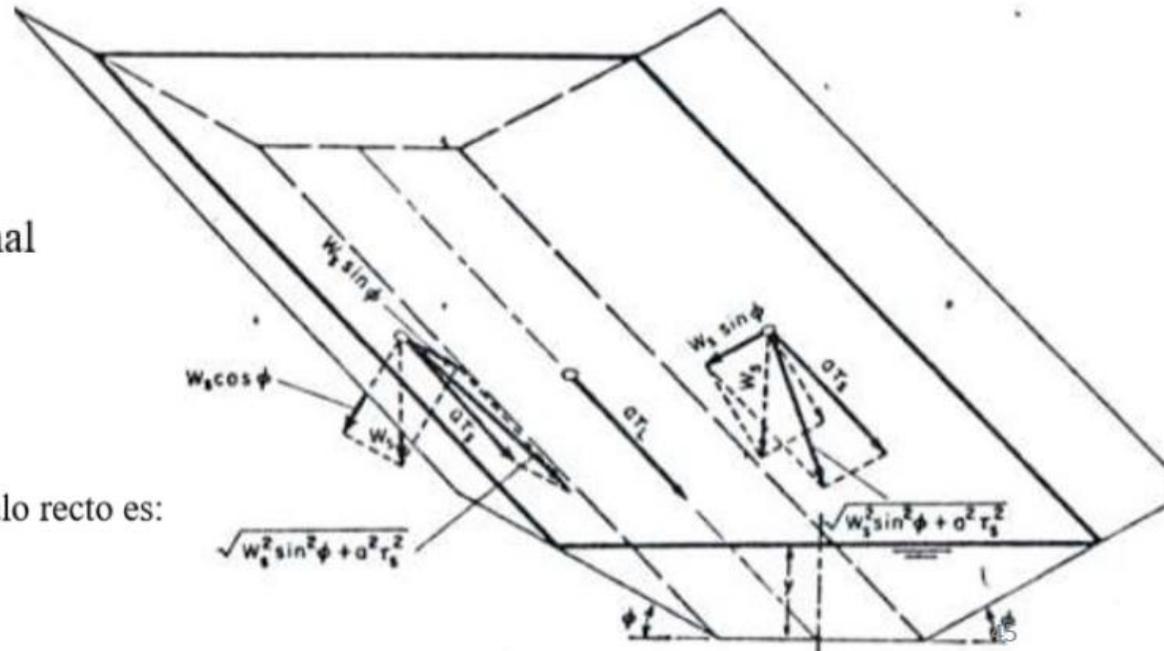
τ_s = Fuerza tractiva unitaria en la pendiente del canal

W_s = Peso sumergido de la partícula.

ϕ = Angulo de la pendiente lateral (talúd)

La resultante de estas dos fuerzas, las cuales forman un ángulo recto es:

$$R = \sqrt{W_s^2 \text{Sen}^2 \phi + a^2 \tau_s^2}$$



Diseño de Canales No revestidos

TALUD Z

La inclinación de las paredes laterales depende principalmente de la clase de terreno en donde están alojados. Mientras más inestable sea el material, menor será el ángulo de inclinación de los taludes.

MATERIAL	CANALES POCO PROFUNDOS	CANALES PROFUNDOS
Roca en buenas condiciones	Vertical	0.25 : 1
Arcillas compactas o conglomerados	0.5 : 1	1 : 1
Limos arcillosos	1 : 1	1.5 : 1
Limos arenosos	1.5 : 1	2 : 1
Arenas sueltas	2 : 1	3 : 1
Hormigón	1 : 1	1.5 : 1

Diseño de Canales No revestidos

Coeficiente de Rugosidad (n)

En forma práctica, los valores del coeficiente de rugosidad que se usan para el diseño de canales alojados en tierra están comprendidos entre 0.025 y 0.030, y para canales revestidos de hormigón se usan valores comprendidos entre 0.013 y 0.015.

MATERIAL DEL CAUCE	MIN.	MED.	MÁX.
Roca áspera		0.040	0.045
Roca igualada las asperezas	0.020	0.033	0.035
Canales grandes en buen estado	0.020	0.023	0.025
Canales grandes en estado regular	0.023	0.025	0.027
Canales grandes en mal estado	0.025	0.028	0.030
Canales malos semiderumbados	0.028	0.030	0.033
Canal irregular con vegetación	0.033	0.035	0.040
Madera cepillada	0.010	0.013	0.014
Madera sin cepillar	0.012	0.015	0.018
Hormigón sin alisado con buen encofrado	0.013	0.014	0.015
Hormigón con huellas de tablas	0.015	0.016	0.018
Hormigón alisado	0.011	0.012	0.013
Mampostería de piedra	0.017	0.023	0.030
Gabiones	0.025	0.027	0.032
Ladrillo enlucido	0.012	0.015	0.017

Diseño de Canales No revestidos

Ancho de Solera

Una forma práctica de fijar el ancho de solera se basa en el caudal. Para canales pequeños, el ancho de la solera estará en función de la pala de la maquinaria disponible para la construcción.

CAUDAL Q (m ³ /s)	Solera b (m)
Menor de 0.10	0.30
Entre 0.10 y 0.20	0.50
Entre 0.20 y 0.40	0.75
Mayor de 0.40	1.00

Diseño de Canales No revestidos

Tirante de canal (y)

Una regla empírica establece el valor máximo del tirante para canales de tierra:

$$y = 0.5\sqrt{A} \quad (\text{EEUU});$$

$$y = \sqrt{A/3} \quad (\text{India})$$

$$y = b/3 \quad (\text{Otros autores})$$

Diseño de Canales No revestidos

Borde Libre (BL)

Una práctica corriente para canales en tierra, es dejar un borde libre o resguardo igual a un tercio del tirante, es decir: $B.L. = y/3$.

Mientras que para canales revestidos, el borde libre puede ser la quinta parte del tirante: $B.L. = y/5$

- En relación al caudal se tiene:

CAUDAL (m ³ /s)	BORDE LIBRE (m)
≤ 0.50	0.30
> 0.50	0.40

Diseño de Canales No revestidos

Borde Libre (BL)

- En relación al ancho de solera se tiene:

ANCHO DE SOLERA (m)	BORDE LIBRE (m)
≤ 0.80	0.30
0.81 – 1.50	0.50
1.51 – 3.00	0.60
3.01 – 20.00	1.00

- En función al caudal, se recomienda:

CAUDAL (m ³ /s)	BORDE LIBRE (m)	
	CANAL REVESTIDO	CANAL SIN REVESTIR
≤ 0.05	0.075	0.10
0.051 – 0.25	0.10	0.20
0.26 – 0.50	0.20	0.40
0.51 – 1.00	0.25	0.50
> 1.00	0.30	0.60

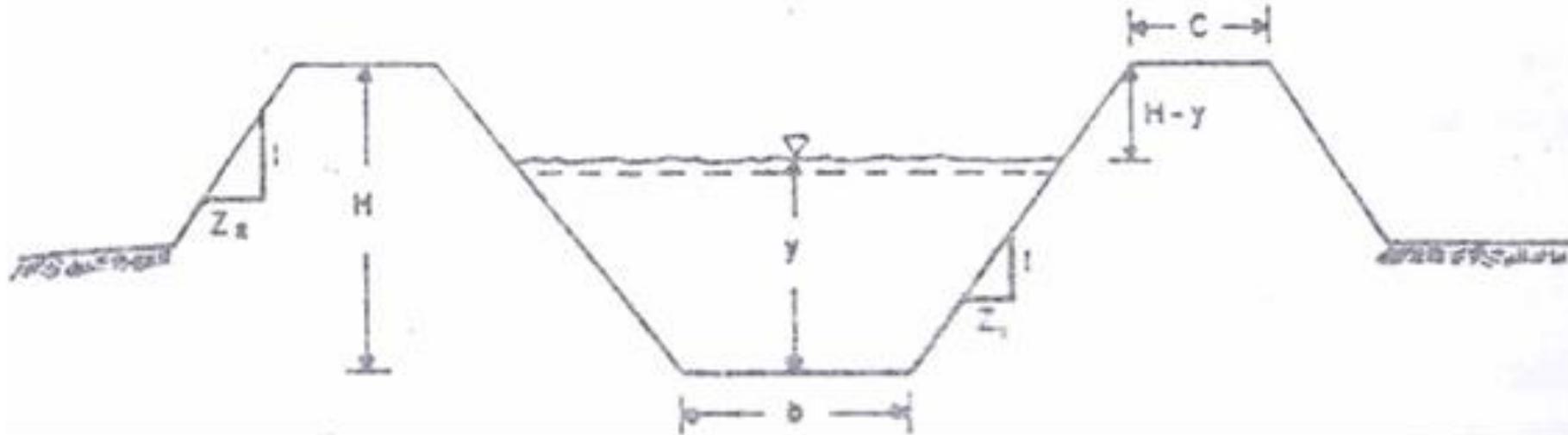
Diseño de Canales No revestidos

Profundidad total desde la corona al fondo del canal

La profundidad total del canal se encuentra una vez conocido el tirante de agua y el borde libre, es decir:

$$H = y + BL.$$

En forma práctica, para su construcción esta profundidad total se suele redondear, asumiendo su variación con el valor del borde libre.



Diseño de Canales No revestidos

Ancho de corona (c)

- El ancho de la corona de los bordes de los canales en su parte superior depende esencialmente del servicio que estos van a prestar. En canales grandes se hacen suficientemente anchos 6.50 m como mínimo para permitir el tránsito de vehículos y equipos de operación y mantenimiento a fin de facilitar los trabajos de inspección y distribución del agua.
- En canales más pequeños el ancho superior de la corona puede diseñarse aproximadamente igual al tirante del canal. En función del caudal se puede considerar un ancho de corona de 0.60 m para caudales menores de 0.50 m³/s y 1.00 m para caudales mayores.

EJERCICIO: Calcular el ancho de la base y la profundidad de flujo para un canal trapezoidal que tiene una pendiente de 0.0016 y que conduce un caudal de diseño de $6\text{m}^3/\text{s}$. El canal se excava en tierra que contiene gravas gruesas no coloidales.

DATOS:

- $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$
- $S = 0.0016$
- Gravas gruesas no coloidales.

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE

1.- Con el tipo de suelo (gravas gruesas no coloidales – agua limpia), vamos a las tablas y obtenemos los valores de la velocidad máxima permisible, coeficiente de rugosidad y talud z.

Material	n	Agua limpia		Agua con limos coloidales	
		v (m/s)	τ_0 (N/m ²)	v (m/s)	τ_0 (N/m ²)
Arenas finas no colídales	0.020	0.457	1.20	0.762	3.59
Franco arenosos, no coloidal	0.020	0.533	1.77	0.762	2.59
Tierra firme común	0.020	0.762	3.59	1.070	7.18
Arcilla dura muy coloidal	0.025	1.140	12.40	1.520	22.00
Grava fina	0.020	0.762	3.59	1.520	15.30
Tierra negra graduada a piedritas cuando no es coloidal	0.030	1.140	18.20	1.520	31.60
Limos graduados a piedritas cuando no es coloidal	0.030	1.220	20.60	1.680	38.30
Grava gruesa no coloidal	0.025	1.220	14.40	1.830	32.10
Piedra y ripio	0.035	1.520	43.60	1.680	52.70

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE

1.- Con el tipo de suelo (gravas gruesas no coloidales – agua limpia), vamos a las tablas y obtenemos los valores de la velocidad máxima permisible, coeficiente de rugosidad y talud z.

MATERIAL	CANALES POCO PROFUNDOS	CANALES PROFUNDOS
Roca en buenas condiciones	Vertical	0.25 : 1
Arcillas compactas o conglomerados	0.5 : 1	1 : 1
Limos arcillosos	1 : 1	1.5 : 1
Limos arenosos	1.5 : 1	2 : 1
Arenas sueltas	2 : 1	3 : 1
Hormigón	1 : 1	1.5 : 1

Valores obtenidos

n = 0,020; **vmáx = 1,22 m/s: z = 2**

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE

2.- Con los valores de la velocidad máxima y el coeficiente de rugosidad y utilizando la ecuación de la velocidad de Manning, calculamos el Radio hidráulico:

$$v_{\max} = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2}$$

$$R = \left[\frac{v_{\max} * n}{S^{1/2}} \right]^{3/2} = \left[\frac{1.22 * 0.025}{(0.0016)^{1/2}} \right]^{3/2}$$

$$R = 0.666m$$

3.- Con los valores del caudal y de la velocidad máxima, utilizando la ecuación de continuidad, calculamos el Área mojada.

$$A = \frac{Q}{v_{\max}} = \frac{6.00}{1.22}$$

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE

4.- Con los valores del radio hidráulico y del área mojada, calculamos el Perímetro mojado:

$$P = \frac{A}{R} = \frac{4.92}{0.666} \qquad P = 7.39m$$

5.- Con los valores del área y perímetro mojado, utilizando las expresiones de los elementos geométricos según la geometría de la sección, calculamos “b” e “y”.

$$\begin{aligned} A &= (b + zy)y = (b + 2y)y \\ 4.92 &= by + 2y^2 \end{aligned} \qquad (1)$$

$$b = \frac{4.92 - 2y^2}{y}$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2} = b + 2y\sqrt{5}$$

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE

Reemplazando b de la ecuación (1) en (2) tenemos:

$$7.39 = \frac{4.92 - 2y^2}{y} + 2\sqrt{5}y$$

$$7.39y = 4.92 - 2y^2 + 2\sqrt{5}y^2$$

$$2.47y^2 - 7.39y + 4.92 = 0$$

Resolviendo la ecuación tenemos:

$$y = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$y = \frac{7.39 \pm \sqrt{7.39^2 - 4 \cdot 2.47 \cdot 4.92}}{2 \cdot 2.47}$$

$$y = \frac{7.39 \pm 2.45}{4.94}$$

$$y_1 = 2.00 \text{ m};$$

$$b_1 = \frac{4.92 - 2 \cdot 2^2}{2}$$

$$b_1 = -1.54 \text{ m}$$

$$y_2 = 1.00 \text{ m};$$

$$b_2 = \frac{4.92 - 2 \cdot 1^2}{1}$$

$$b_2 = 2.92 \text{ m}$$

Se descarta por
ser negativo

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE

Por lo tanto, los resultados serán:

$$y = 1.00 \text{ m}$$

$$b = 2.92 \text{ m}$$

6.- Finalmente añadimos un borde libre apropiado y modificamos la sección con el fin de que sea funcional desde el punto de vista práctico.

CAUDAL (m ³ /s)	BORDE LIBRE (m)	
	CANAL REVESTIDO	CANAL SIN REVESTIR
≤ 0.05	0.075	0.10
0.051 – 0.25	0.10	0.20
0.26 – 0.50	0.20	0.40
0.51 – 1.00	0.25	0.50
> 1.00	0.30	0.60

Borde libre

$$Q = 6 \text{ m}^3/\text{s} > 1 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (no revestido)}$$



Tabla Pág. 25 → **B.L. = 0.60 m**

$$h = y + \text{B.L.}$$

$$h = 1.00 + 0.60$$

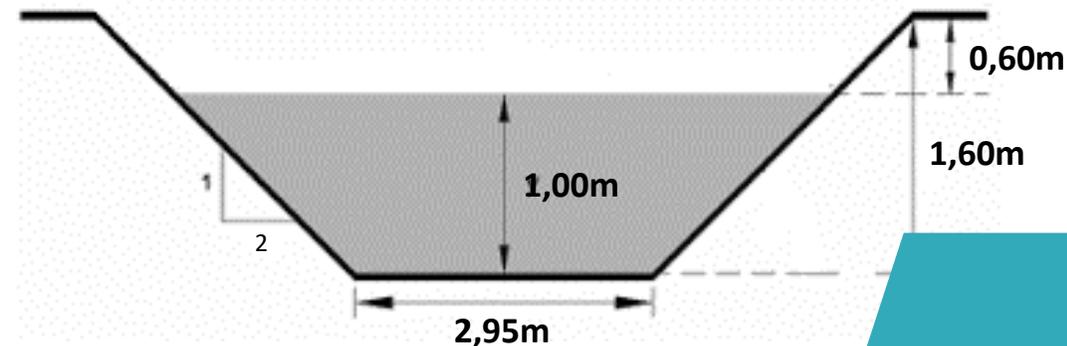
$$h = 1.60 \text{ m}$$

RESULTADOS FINALES:

$$y = 1.00 \text{ m}$$

$$b = 2.95 \text{ m}$$

$$h = 1.60 \text{ m}$$



1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE RUGOSIDAD COMPUESTA

Flujo en una sección de canal con rugosidad compuesta.- En canales simples, la rugosidad a lo largo del perímetro mojado puede ser muy diferente en distintas partes del perímetro, pero la velocidad media aún puede calcularse a partir de una ecuación de flujo uniforme sin subdividir la sección. **Para aplicar la ecuación de Manning se necesita calcular un valor equivalente de “n” para el perímetro completo y utilizar este valor equivalente para el cálculo de flujo en toda la sección.**

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE RUGOSIDAD COMPUESTA

Para determinar la rugosidad equivalente, el área mojada se divide imaginariamente en N partes para cada una de las cuales se conocen los perímetros mojados (P_1, P_2, \dots, P_N) y los coeficientes de rugosidad (n_1, n_2, \dots, n_N). Suponiendo que para cada parte del área tiene la misma velocidad media y las cuales a su vez son iguales a la velocidad media en la sección completa ($v_1 = v_2, \dots, = v_N$); el coeficiente de rugosidad equivalente puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE RUGOSIDAD COMPUESTA

FÓRMULAS DE “n” PONDERADO

- Horton – Einstein

$$\bar{n} = \left[\sum_{i=1}^N \frac{P_i * n_i^{3/2}}{P_i} \right]^{2/3}$$

- Forchheimer

$$\bar{n} = \sqrt{\frac{P_1 * n_1^2 + P_2 * n_2^2 + \dots + P_N * n_N^2}{P_1 + P_2 + \dots + P_N}}$$

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE RUGOSIDAD COMPUESTA

Calcular el ancho de la base y la profundidad de flujo para un canal trapezoidal que tiene una pendiente de 0.0002 y que conduce un caudal de diseño de $5\text{m}^3/\text{s}$. El canal se excava en un terreno que tiene 3 estratos de suelo: el primer estrato de profundidad 0.40m contiene tierra firme común; el segundo estrato de profundidad 0.70m contiene suelo franco arenoso no coloidal y el tercer estrato de profundidad indefinida contiene piedras y ripio.

DATOS:

$$Q = 5\text{m}^3/\text{s}$$

$$S = 0.0002$$

$$z = 2$$

(Agua limpia)

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE RUGOSIDAD COMPUESTA

Calcular el ancho de la base y la profundidad de flujo para un canal trapezoidal que tiene una pendiente de 0.0002 y que conduce un caudal de diseño de $5\text{m}^3/\text{s}$. El canal se excava en un terreno que tiene 3 estratos de suelo: el primer estrato de profundidad 0.40m contiene tierra firme común; el segundo estrato de profundidad 0.70m contiene suelo franco arenoso no coloidal y el tercer estrato de profundidad indefinida contiene piedras y ripio.

DATOS:

$$Q = 5\text{m}^3/\text{s}$$

$$S = 0.0002$$

$$z = 2$$

(Agua limpia)



1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE RUGOSIDAD COMPUESTA

1.- Utilizando la tabla de Fortier y Escobey, determinamos los valores de n y v para los diferentes estratos:

Material	n	Agua limpia		Agua con limos coloidales	
		v (m/s)	τ_o (N/m ²)	v (m/s)	τ_o (N/m ²)
Arenas finas no coloidales	0.020	0.457	1.20	0.762	3.59
Franco arenosos, no coloidal	0.020	0.533	1.77	0.762	2.59
Tierra firme común	0.020	0.762	3.59	1.070	7.18
Arcilla dura muy coloidal	0.025	1.140	12.40	1.520	22.00
Grava fina	0.020	0.762	3.59	1.520	15.30
Tierra negra graduada a piedritas cuando no es coloidal	0.030	1.140	18.20	1.520	31.60
Limos graduados a piedritas cuando no es coloidal	0.030	1.220	20.60	1.680	38.30
Grava gruesa no coloidal	0.025	1.220	14.40	1.830	32.10
Piedra y ripio	0.035	1.520	43.60	1.680	52.70

MATERIAL	n	v (m/s) Agua limpia
Tierra firme común	0.020	0.762
Franco arenoso no coloidal	0.020	0.533
Piedras y ripio	0.035	1.520

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE RUGOSIDAD COMPUESTA

Con los valores de rugosidad de cada estrato, calculamos un valor promedio \bar{n} :

$$\bar{n} = \frac{0.020 + 0.020 + 0.035}{3} = 0.025$$

2.- Calculamos el Radio hidráulico.

$$v_{\max} = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2}$$

$$R = \left[\frac{v_{\max} * n}{S^{1/2}} \right]^{3/2} = \left[\frac{0.533 * 0.025}{(0.0002)^{1/2}} \right]^{3/2}$$

3.- Calculamos el Área mojada.

$$A = \frac{Q}{v_{\max}} = \frac{5.00}{0.533}$$

$$A = 9.38m^2$$

4.- Calculamos el Perímetro mojado.

$$P = \frac{A}{R} = \frac{9.38}{0.915}$$

$$P = 10.25m$$

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE RUGOSIDAD COMPUESTA

5.- Calculamos “b” e “y”.

$$A = (b + zy)y = (b + 2y)y$$

$$9.38 = by + 2y^2$$

$$b = \frac{9.38 - 2y^2}{y} \quad (1)$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2} = b + 2y\sqrt{5}$$

$$10.25 = b + 2\sqrt{5}y \quad (2)$$

Reemplazando b de la ecuación (1)
en (2) tenemos:

$$10.25 = \frac{9.38 - 2y^2}{y} + 2\sqrt{5}y$$

$$10.25y = 9.38 - 2y^2 + 2\sqrt{5}y^2$$

$$2.47y^2 - 10.25y + 9.38 = 0$$

Resolviendo la ecuación tenemos
que:

$$y = 1.36 \text{ m}$$

Reemplazando “y” en la ecuación (1)
tenemos:

$$b = \frac{9.38 - 2(1.36)^2}{1.36}$$

$$b = 4.18 \text{ m}$$

1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE RUGOSIDAD COMPUESTA

Resultados iniciales:

Con BL. = 0.25 m.

$b = 4,18$ m

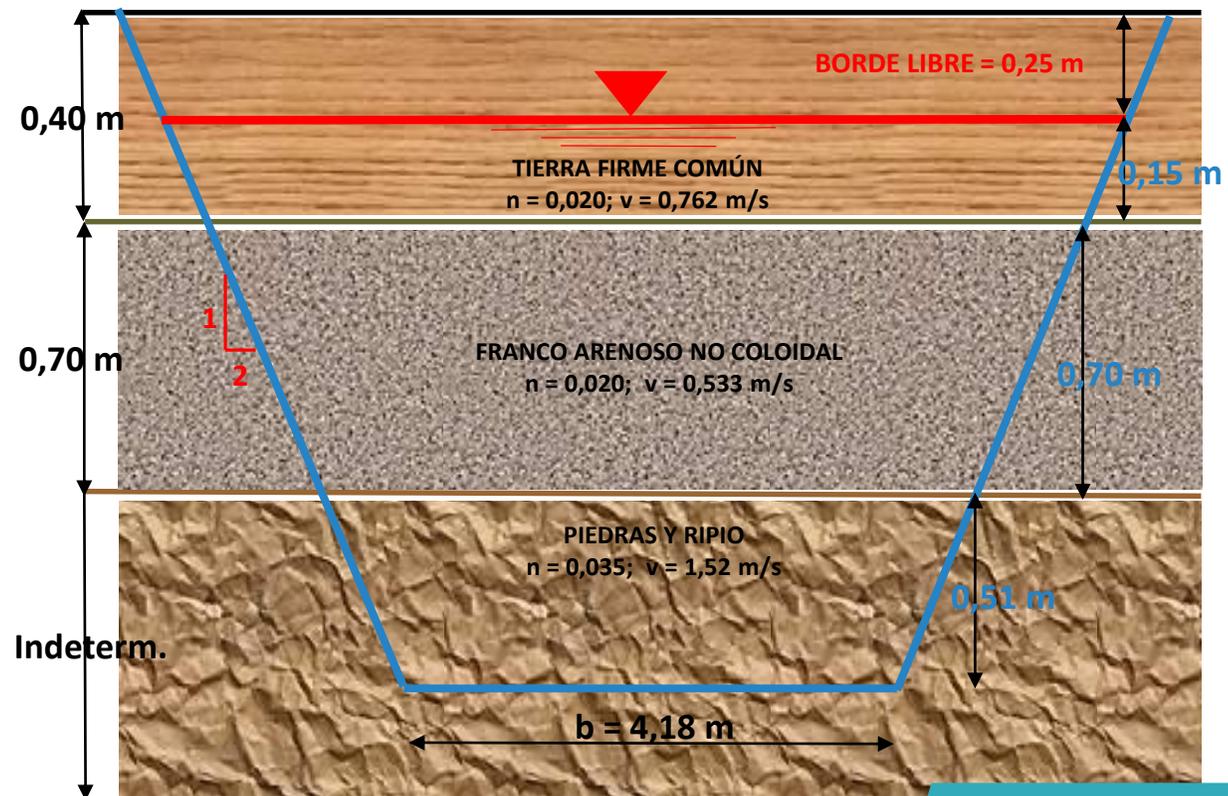
$y = 1.36$ m distribuido de la siguiente manera:

ESTRATO 1: $y_1 = 0.15$ m

ESTRATO 2: $y_2 = 0.70$ m

ESTRATO 3: $y_3 = 0.51$ m

TOTAL = 1.36 m



1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE RUGOSIDAD COMPUESTA

Resultados iniciales:

Con BL. = 0.25 m.

$b = 4,18$ m

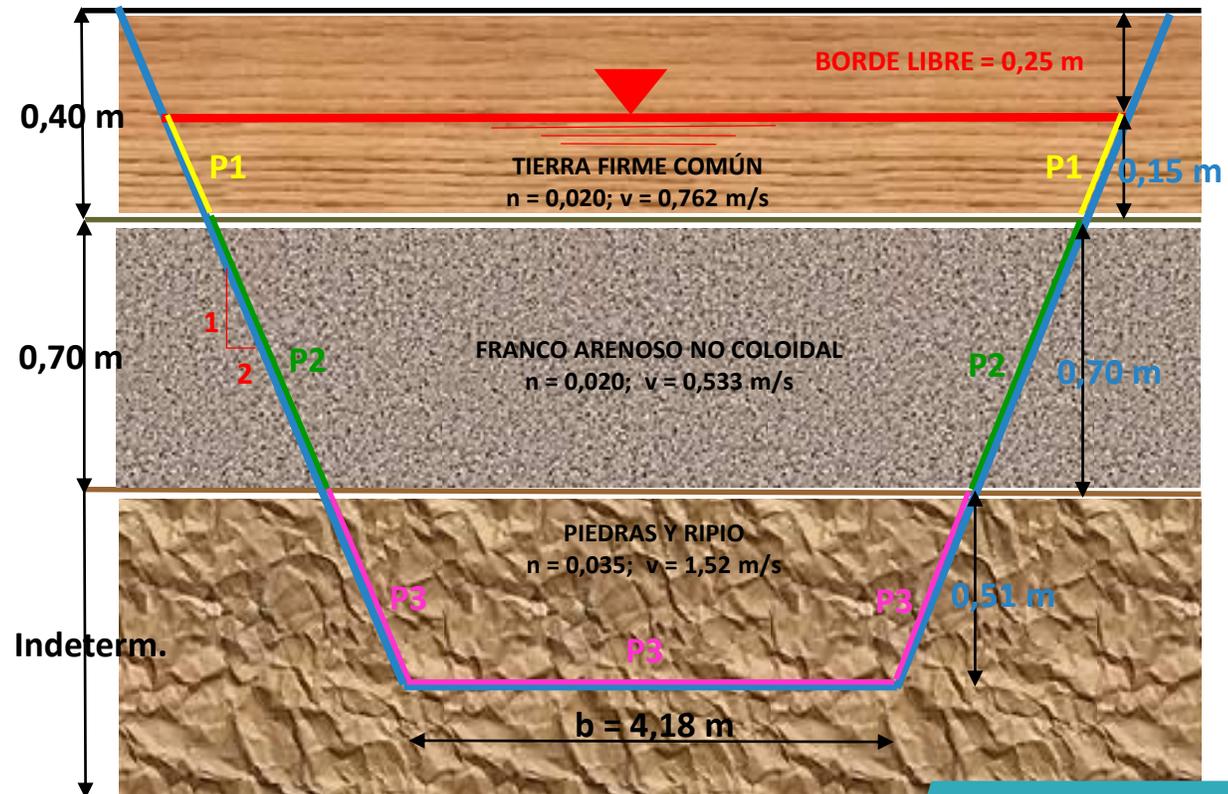
$y = 1.36$ m distribuido de la siguiente manera:

ESTRATO 1: $y_1 = 0.15$ m

ESTRATO 2: $y_2 = 0.70$ m

ESTRATO 3: $y_3 = 0.51$ m

TOTAL = 1.36 m



1.- MÉTODO DE LA VELOCIDAD PERMISIBLE RUGOSIDAD COMPUESTA

Verificamos los resultados con la fórmula de rugosidad equivalente; para lo cual calculamos los perímetros mojados.

$$P1 = 2\sqrt{0.15^2 + 0.30^2} = 0.67m$$

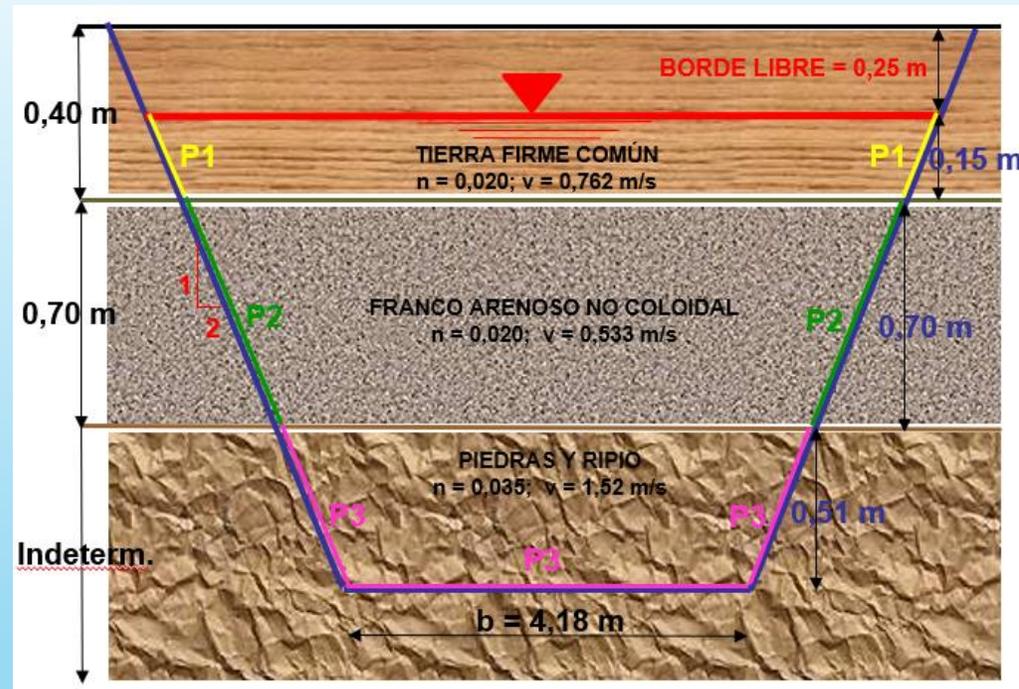
$$P2 = 2\sqrt{0.70^2 + 1.40^2} = 3.13m$$

$$P3 = 2\sqrt{0.51^2 + 1.02^2} + 4.18 = 6.46m$$

$$\bar{n} = \left[\frac{P1 \cdot n1^{3/2} + P2 \cdot n2^{3/2} + P3 \cdot n3^{3/2}}{P1 + P2 + P3} \right]^{2/3}$$

$$\bar{n} = \left[\frac{0.67 \cdot 0.02^{3/2} + 3.13 \cdot 0.02^{3/2} + 6.46 \cdot 0.035^{3/2}}{0.67 + 3.13 + 6.46} \right]^{2/3}$$

$$\bar{n} = 0.030$$

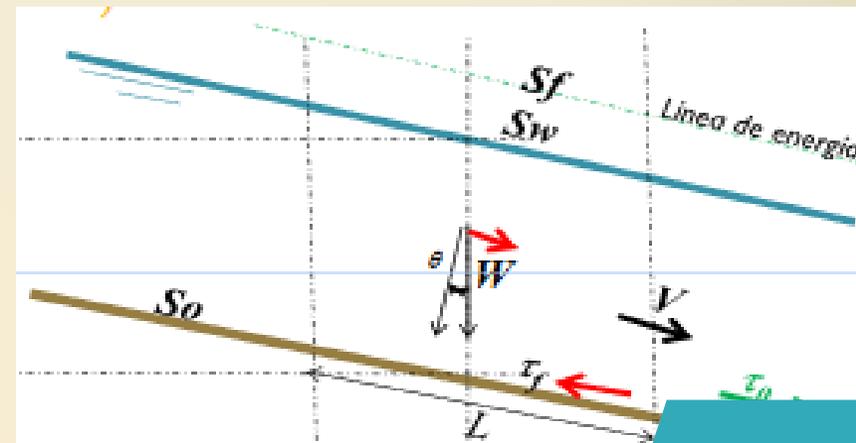
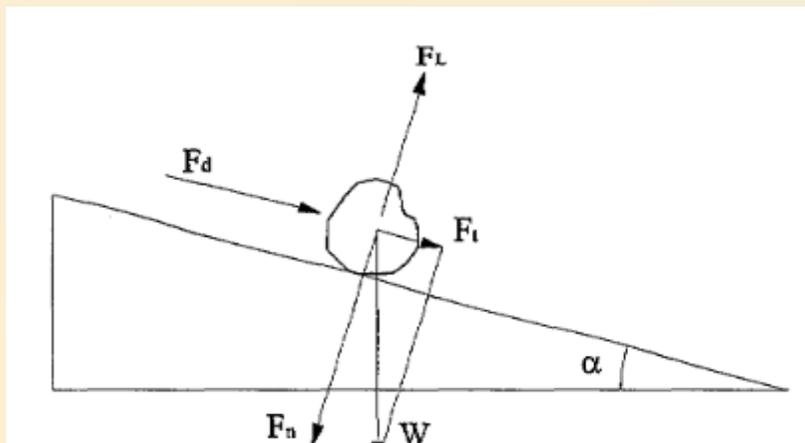


Calculamos nuevamente con $n = 0.030$, siguiendo todo el procedimiento.

2.- MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA

Cuando el agua fluye en un canal, el esfuerzo cortante, ó tractivo, que se genera en los contornos del mismo tiende a producir arrastre del material que lo compone.

Esta fuerza actúa sobre el lecho del canal en la dirección del flujo. Esta fuerza es simplemente el empuje del agua sobre el área mojada.



2.- MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA

En el flujo uniforme la fuerza tractiva es igual a la componente efectiva de la fuerza gravitacional que actúa sobre el cuerpo de agua, paralela al fondo del canal e igual a:

$$\tau = wALS$$

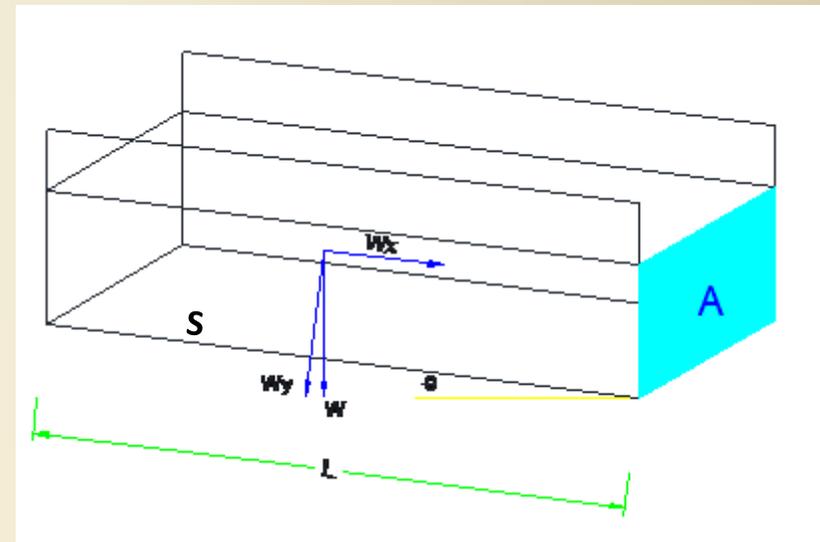
w = Peso unitario del agua.

A = Área mojada

L = Longitud del tramo del canal

S = Pendiente

$$\begin{aligned} T &= \dot{w} * V \\ T &= \dot{w} * A * L * S \end{aligned}$$



2.- MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA

Luego el valor promedio de la fuerza tractiva por unidad de área mojada conocido como fuerza tractiva unitaria es igual a:

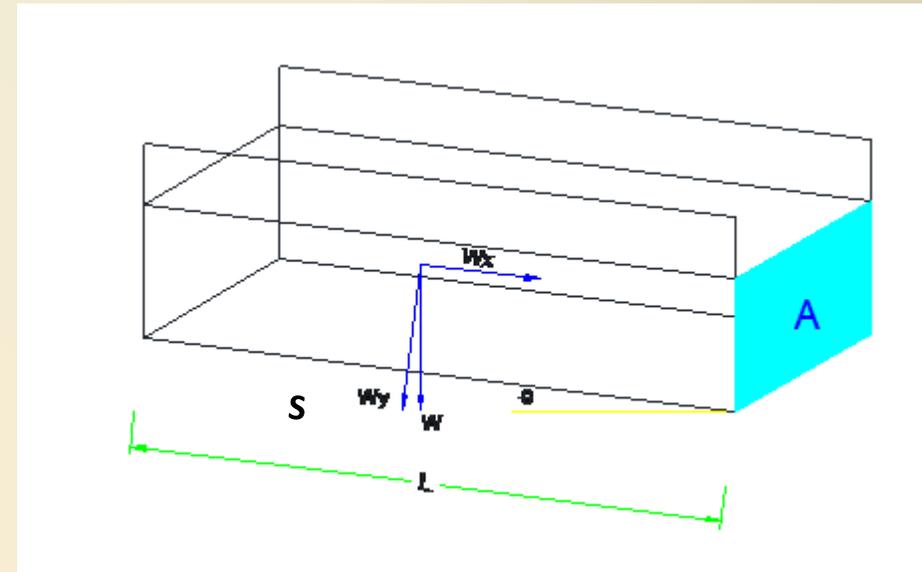
$$\tau_o = \frac{wALS}{PL}$$

P = Perímetro mojado

Si ; entonces

$$R = \frac{A}{P}$$

$$\tau_o = wRS$$



2.- MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA

En un canal abierto ancho, el radio hidráulico es igual a la profundidad del flujo y ; por consiguiente:

$$\tau_o = \gamma y S$$

La fuerza tractiva unitaria en canales abiertos no está distribuida uniformemente a lo largo del perímetro mojado (excepto en canales abiertos anchos).

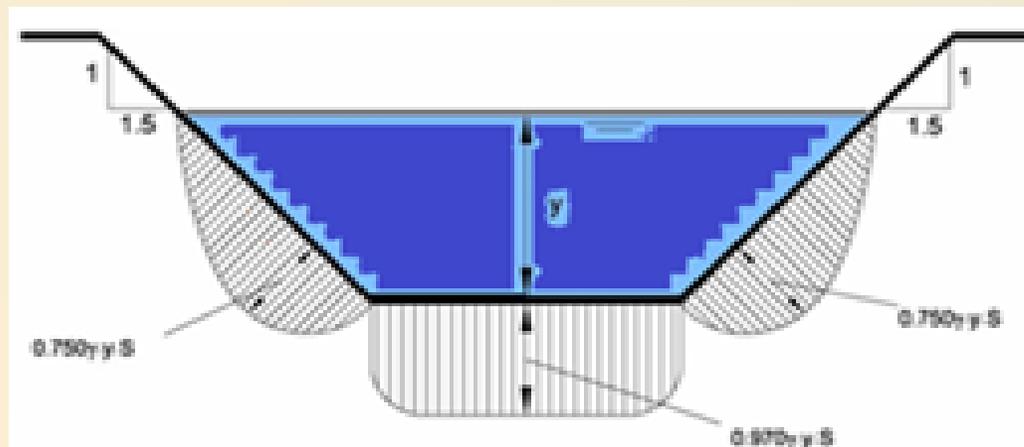
2.- MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA

En general en los canales trapezoidales, la fuerza tractiva máxima en el fondo es $0.970wyS$ y en lo lados $0.75wyS$.

τ_o = Esfuerzo solicitante

τ_L = Esfuerzo en el fondo del canal

τ_S = Esfuerzo en las paredes del canal



2.- MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA

TIPOS DE SUELOS

TIPO DE SUELO	PARAMETROS
Cohesivos	Relación de vacíos
No cohesivos	Tamaño de partículas Angulo de reposo

Ángulo de reposo: Es el ángulo que forma el material antes de iniciar el movimiento en un talud. Es un parámetro importante para el diseño de cauces estables en tierra. Sus valores más normales están comprendidos entre 29° y 42° , presentando un mínimo para los tamaños entre 1 y 2 mm. Un parámetro que influye bastante en el valor del ángulo de reposo es la redondez, así los sedimentos más angulosos presentan un mayor valor del ángulo de reposo, y los más redondeados menor.

Cohesivos → Fuerza tractiva

No cohesivos → Relación de la fuerza tractiva

2.- MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA

EJERCICIO: Calcular las dimensiones de un canal trapezoidal que debe conducir un caudal de $1250 \text{ pies}^3/\text{s}$, que será trazado con una pendiente de 0.0003 en un terreno constituido por arcilla pesada que tiene una Relación de vacíos de 1.0 . El canal tendrá una relación de inclinación de paredes $2:1$ y el coeficiente de rugosidad es de 0.025 .

DATOS:

$$Q = 1250 \text{ pies}^3/\text{s}$$

$$S = 0.0003$$

$$\text{Arcilla pesada: R.V.} = 1.0$$

$$z = 2$$

$$n = 0.025$$

2.- MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA

En primer lugar tenemos que el mismo material hay en el fondo y en las paredes del canal.

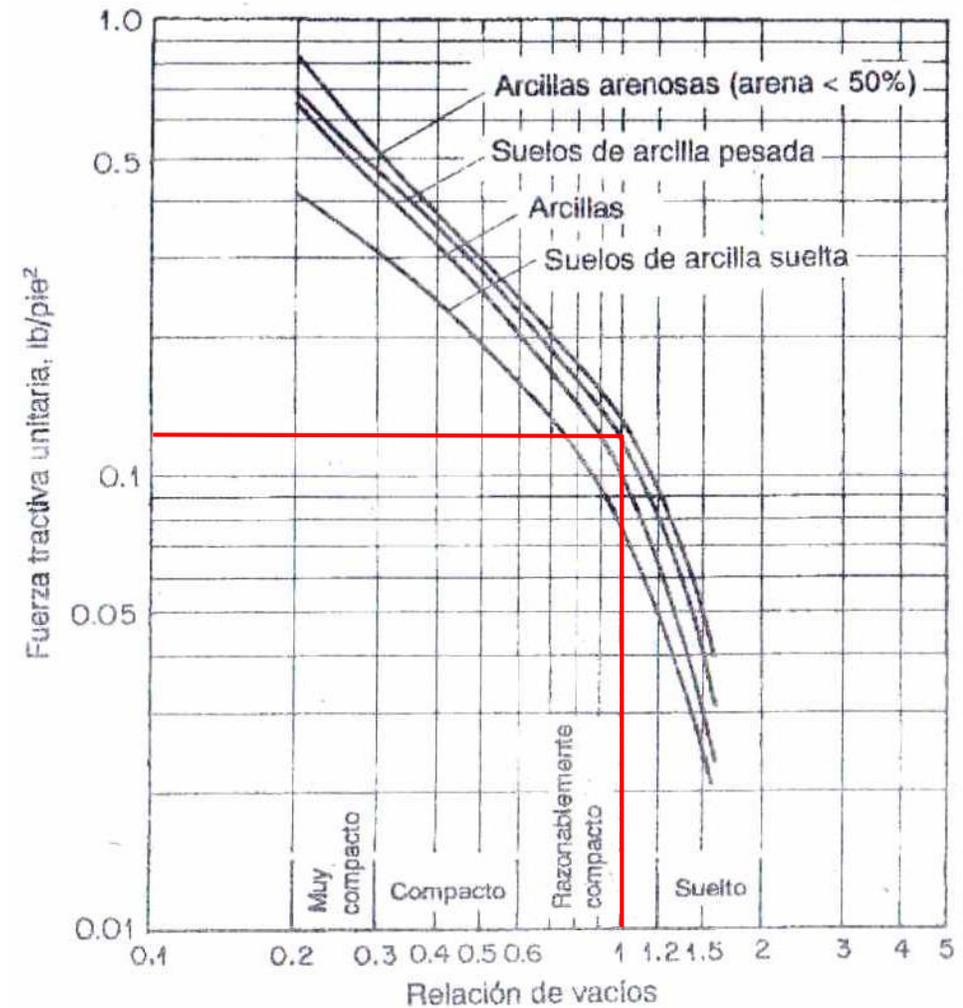
Para resolver el ejercicio vamos a la figura 7.11 (Pág. 46) que nos permite determinar las fuerza tractivas unitarias permisibles para materiales cohesivos sobre velocidades permisibles.

Con R.V. = 1.0 en el eje de las abscisas intersecamos con la curva de arcilla pesada y obtenemos la fuerza tractiva unitaria permisible.

$$\tau_{admissible} = 0.13 \text{ lb/pie}^2.$$

7.11. Fuerzas tractivas unitarias permisibles para canales en materiales cohesivos convertidas de los datos de la URSS sobre velocidades permisibles

0,13



2.- MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA

Con el valor de la fuerza tractiva unitaria permisible calculamos el tirante del canal.

$$0.97 \tau_o = 0.13$$

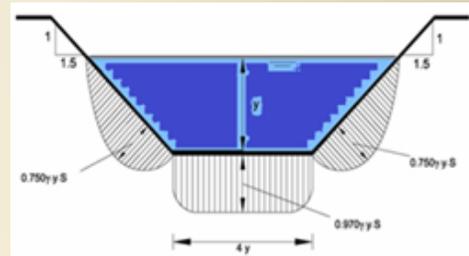
$$0.97 \omega y S = 0.13$$

$$\omega = 62.4 \text{ lb} / \text{pie}^3 \text{ (Peso específico del agua)}$$

$$0.97(62.4)(y)(0.0003) = 0.13$$

$$y = 7.16 \text{ pies}$$

Una vez determinado el valor de “y”, calculamos el valor del ancho de canal “b”:



$$Q = \frac{1.49}{n} A * R^{2/3} * S^{1/2}$$

$$A = (b + zy)y = (b + 2 * 7.16)7.16 = (b + 14.32)7.16$$

$$P = b + 2y\sqrt{1+z^2} = b + 2 * 7.16 * \sqrt{1+2^2} = b + 14.32\sqrt{5}$$

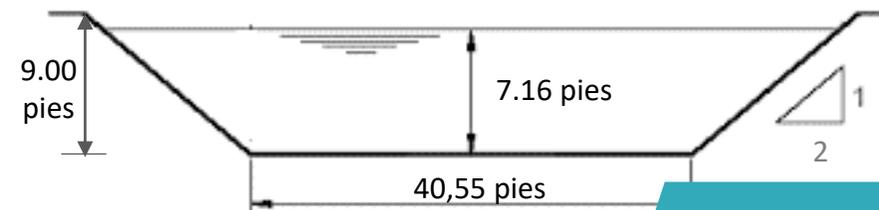
$$R = \frac{A}{P} = \frac{(b + 14.32)7.16}{b + 14.32\sqrt{5}}$$

$$Q = \frac{1.49}{0.025} (b + 14.32)7.16 \left(\frac{(b + 14.32)7.16}{b + 14.32\sqrt{5}} \right)^{2/3} * (0.0003)^{1/2}$$

$$b = 40.55 \text{ pies}$$

Dimensiones finales: y = 7.16 pies; b = 40.55 pies

B.L. = 1.84 pies; h = 9,00 pies



RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

Sobre una partícula de suelo que descansa en la pendiente lateral de una sección del canal en la cual se encuentra fluyendo agua, actúan dos fuerzas: la fuerza tractiva $a\zeta_s$ y la componente de fuerza gravitacional $W_s \text{Sen}\phi$; donde:

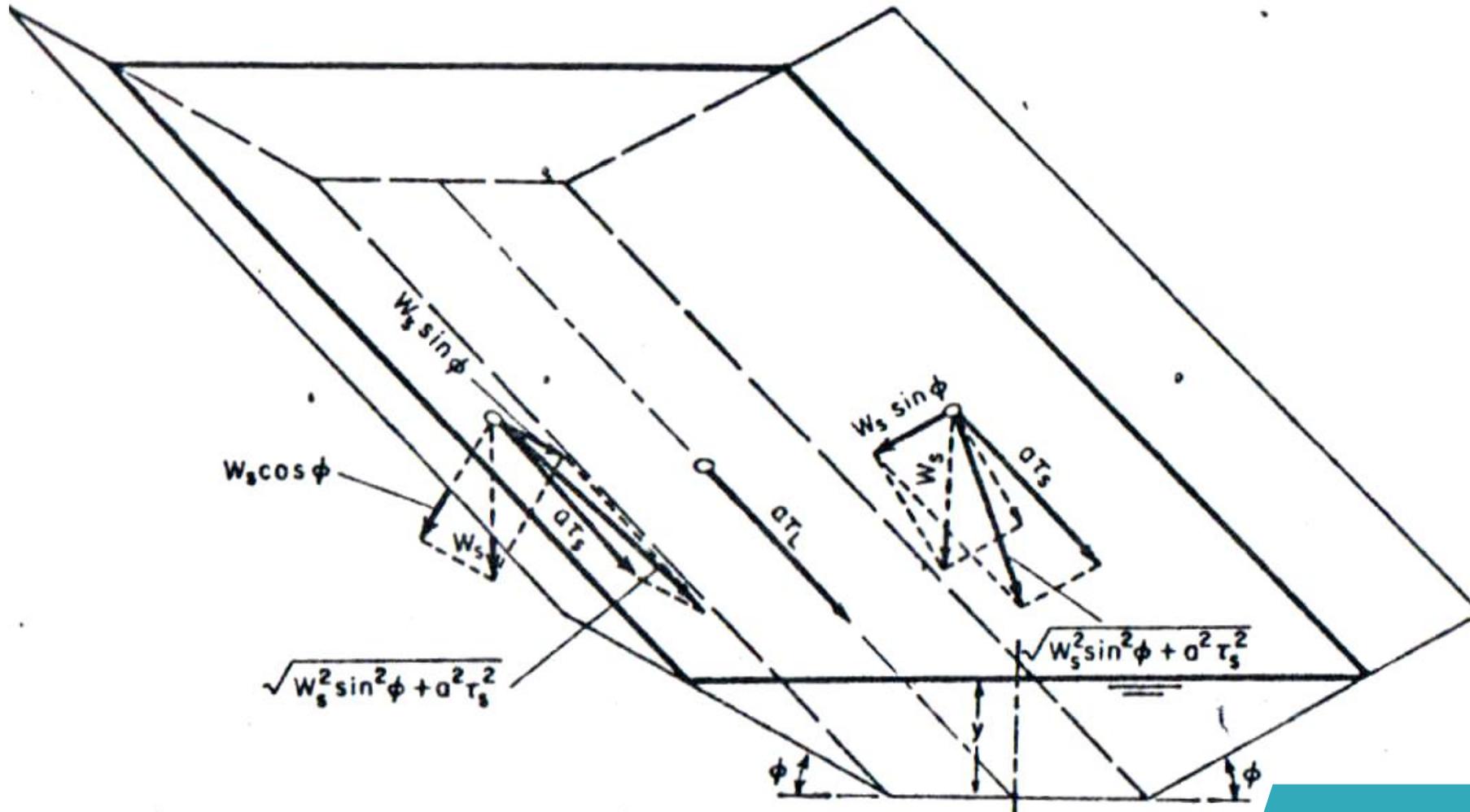
a = Área efectiva de la partícula.

ζ_s = Fuerza tractiva unitaria en la pendiente del canal

W_s = Peso sumergido de la partícula.

ϕ = Angulo de la pendiente lateral (talúd)

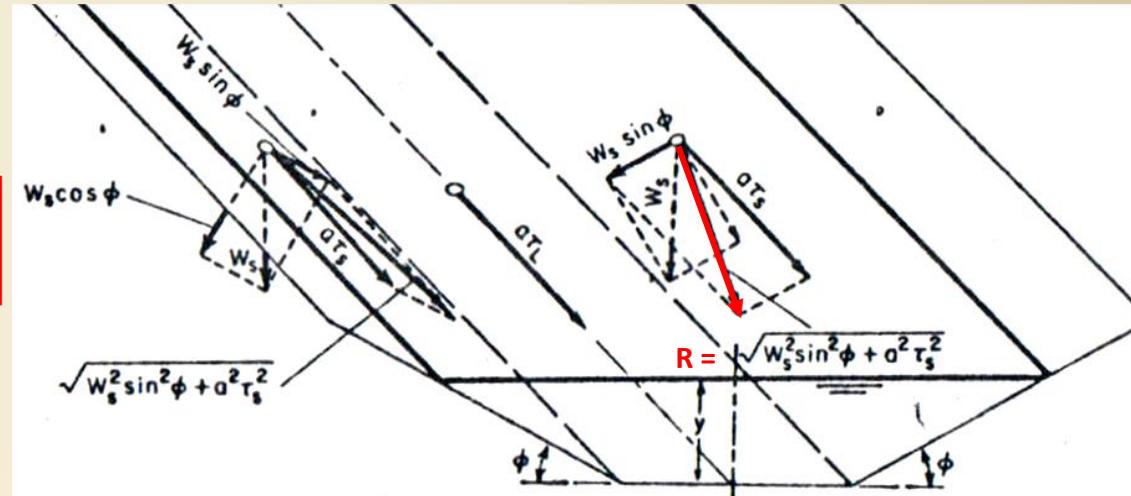
RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA



RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

La resultante de estas dos fuerzas, las cuales forman un ángulo recto es:

$$R = \sqrt{W_s^2 \text{Sen}^2 \phi + a^2 \tau_s^2}$$



Cuando esta fuerza R es lo suficientemente grande, la partícula se moverá.

A partir del principio de movimiento de fricción en mecánica puede suponerse que cuando el movimiento es inminente, la resistencia al movimiento de la partícula es igual a la fuerza que tiende a causar el movimiento.

RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

La resistencia al movimiento de la partícula es igual a la fuerza normal multiplicada por el coeficiente de fricción:

$$F = W_s \cos \phi * f$$

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

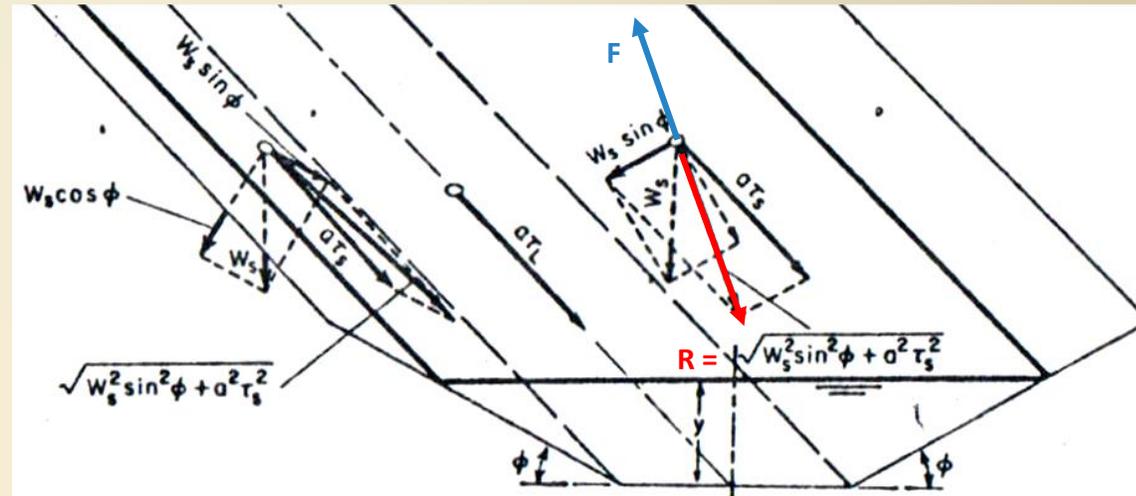
donde θ es el ángulo de reposo

$$F = W_s \cos \phi * \operatorname{tg} \theta$$

Como $F = R$

$$W_s \cos \phi * \operatorname{tg} \theta = \sqrt{W_s^2 \operatorname{Sen}^2 \phi + a^2 \tau_s^2}$$

$$W_s^2 \cos^2 \phi * \operatorname{tg}^2 \theta = W_s^2 \operatorname{Sen}^2 \phi + a^2 \tau_s^2$$



RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

$$a^2 \tau_s^2 = W_s^2 \text{Cos}^2 \phi * \text{tg}^2 \theta - W_s^2 \text{Sen}^2 \phi$$

$$a^2 \tau_s^2 = W_s^2 (\text{Cos}^2 \phi * \text{tg}^2 \theta - \text{Sen}^2 \phi)$$

$$\tau_s = \frac{W_s}{a} \sqrt{\text{Cos}^2 \phi * \text{tg}^2 \theta - \text{Sen}^2 \phi}$$

Si sacamos factor común: $\text{Cos}^2 \phi * \text{tg}^2 \theta$

$$\tau_s = \frac{W_s}{a} \text{Cos} \phi * \text{tg} \theta \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \phi}{\text{tg}^2 \theta}}$$

τ_s es la fuerza tractiva unitaria que causa el movimiento inminente en una superficie inclinada.

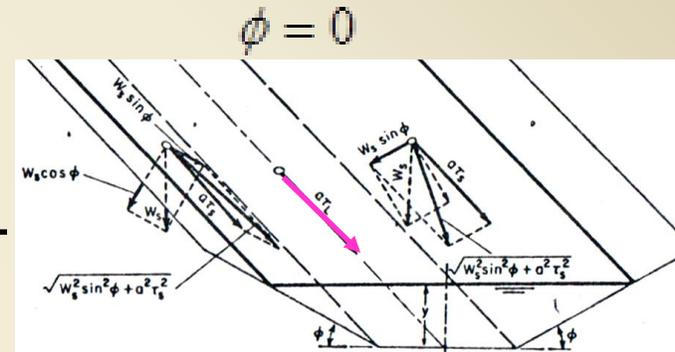
RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

De igual modo, cuando el movimiento de una partícula sobre una superficie plana es inminente debido a la fuerza tractiva a ; esto es cuando; , entonces:

$$\tau_L = \frac{W_s}{a} \operatorname{tg} \theta$$

$$\tau_s = \frac{W_s}{a} \operatorname{Cos} \phi * \operatorname{tg} \theta \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi}{\operatorname{tg}^2 \theta}}$$

$$\tau_L = \frac{W_s}{a} \operatorname{tg} \theta$$



La relación entre las fuerzas tractivas en los lados y el fondo, se conoce como relación de fuerza tractiva; la misma que es muy importante para propósitos de diseño.

$$K = \frac{\tau_s}{\tau_L}$$

RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

$$K = \text{Cos } \phi \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \phi}{\text{tg}^2 \theta}}$$

(Bureau of Reclamation)

$$K = \sqrt{1 - \frac{\text{Sen}^2 \phi}{\text{Sen}^2 \theta}}$$

(Fan)

NOTA: Para canales trapezoidales, la fuerza tractiva unitaria máxima en los lados inclinados a menudo es menor que la de fondo, luego la fuerza lateral es el valor de control. Por consiguiente el diseño del canal debería incluir: a) la proporción de las dimensiones de la sección para la fuerza tractiva unitaria máxima en los lados, y b) la verificación de las dimensiones proporcionadas para la fuerza tractiva unitaria máxima en el fondo.

RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

EJERCICIO: Diseñar un canal trapezoidal colocado sobre una pendiente de 0.0016 y que conduce un caudal de 400 pies³/s. El canal va a ser excavado en tierra que contiene gravas gruesas no coloidales y cantos rodados, 25% de los cuales tienen un diámetro de 1.25 pulg o mayor. El coeficiente de Manning es $n=0.025$.

RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

1,- Considerando un material con partículas muy redondeadas con un TMP = 1,25 pulg, vamos a la Figura 7-9 (Pág. 43) y determinamos el valor del ángulo de reposo del material (θ).

MATERIAL	Tamaño de la partícula	Angulo de reposo (θ)
Muy redondeadas	1.25 pulg.	33.5°

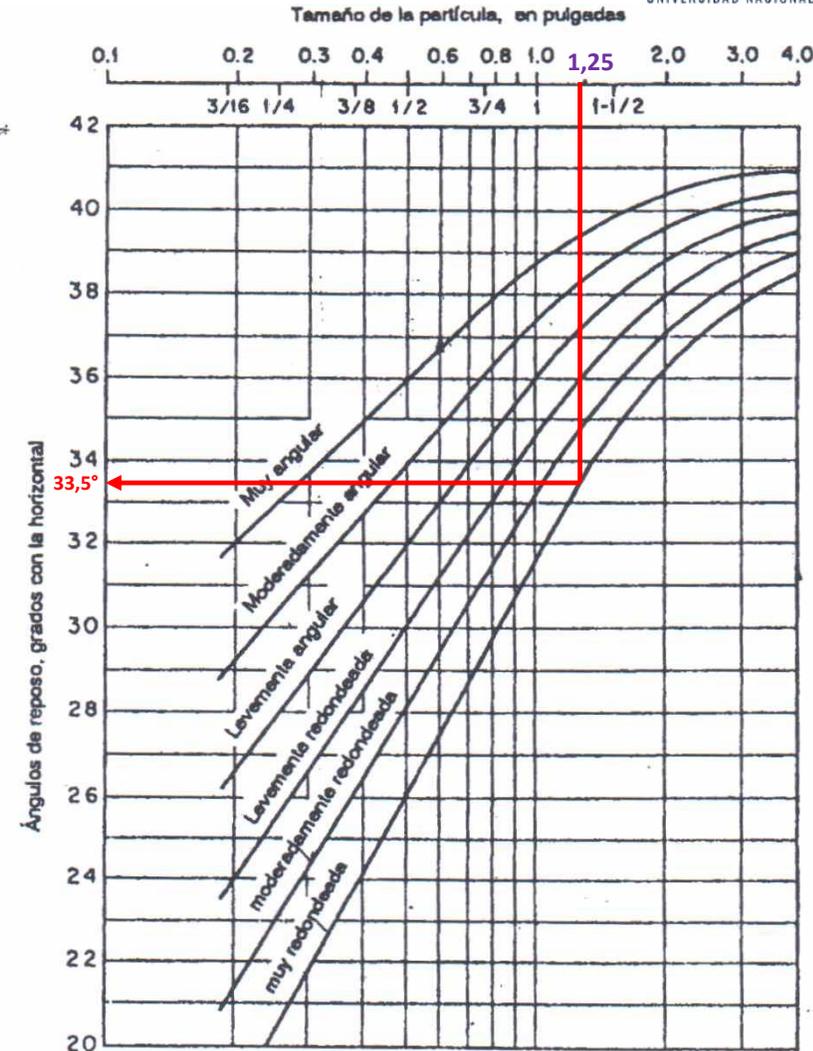


Figura 7-9. Ángulos de reposo para materiales no cohesivos (U. S. Bureau of Reclamation).

RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

2,- Con el valor de $z = 2$, calculamos el ángulo de inclinación de las paredes del canal (ϕ).

$$\operatorname{ctg}\phi = z$$

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{1}{z} = \frac{1}{2} = 0.5$$

$$\phi = 26.56^\circ$$

3,- Establecemos la proporción de las dimensiones del canal “ b/y ”.

Asumimos $b/y = 5$

RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

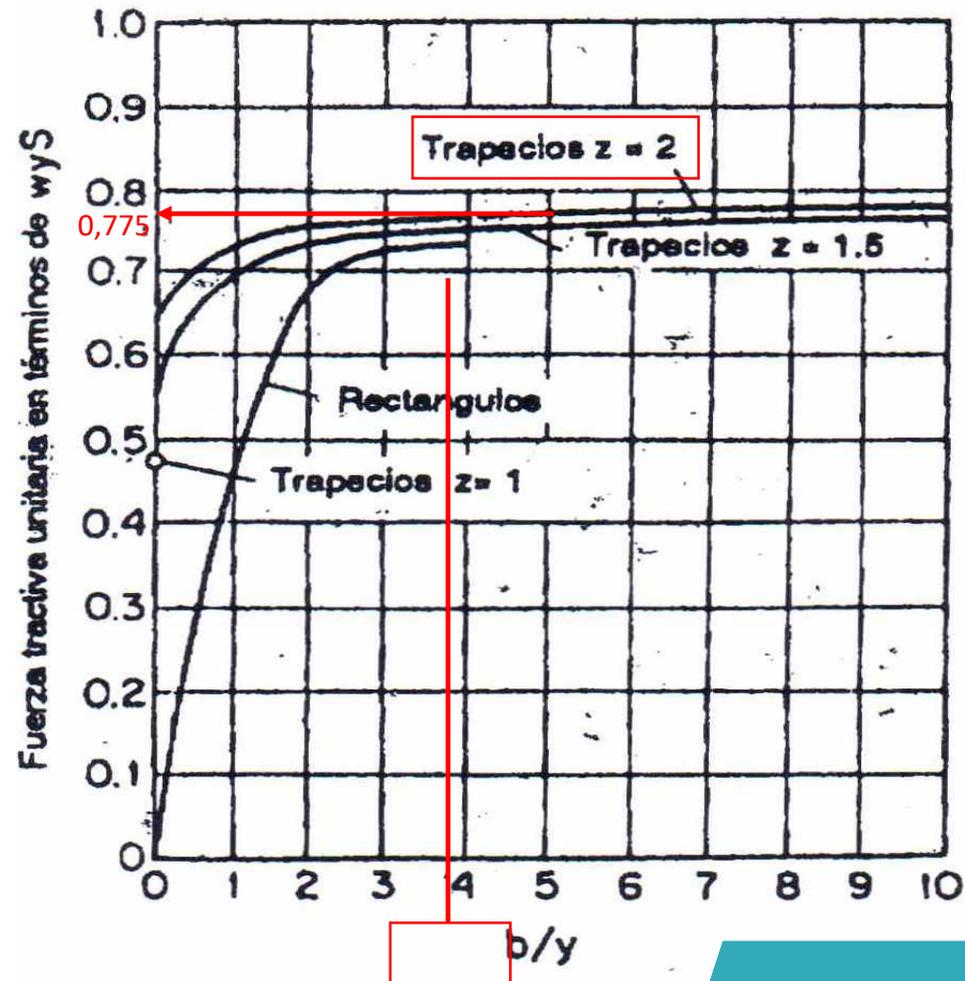
7.7. Fuerzas tractivas unitarias máximas en términos de $\omega y S$

Con los valores de la proporción $b/y = 5$ y $z = 2$, utilizando la figura 7-7 (Pág. 45) (diagrama en los lados del canal) obtenemos la fuerza tractiva unitaria en los lados en términos de $\omega y S$.

$$b/y = 5$$

$$z = 2$$

$$\rightarrow \tau_s = 0.775 \omega y S$$



RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

En la expresión de T_s reemplazamos los valores de w y S , y obtenemos una expresión de T_s en función de y .

$$\tau_s = 0.775wyS = 0.775*62.4*y*0.0016$$

$$\tau_s = 0.775*62.4*y*0.0016$$

$$\tau_s = 0.077y$$

**Fuerza tractiva unitaria
permisible en los lados**

4.- Con los ángulos de reposo (θ) y de inclinación de las paredes (ϕ), calculamos la relación de la fuerza tractiva (K)

$$K = \sqrt{1 - \frac{\text{Sen}^2 \phi}{\text{Sen}^2 \theta}} = \sqrt{1 - \frac{\text{Sen}^2(26.56^\circ)}{\text{Sen}^2(33.5^\circ)}}$$

$$K = 0.586$$

RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

5,- Con el diámetro de la partícula en mm, utilizando la Figura 7-10 (Pág. 44), obtenemos el valor de la fuerza tractiva unitaria permisible sobre un fondo plano.

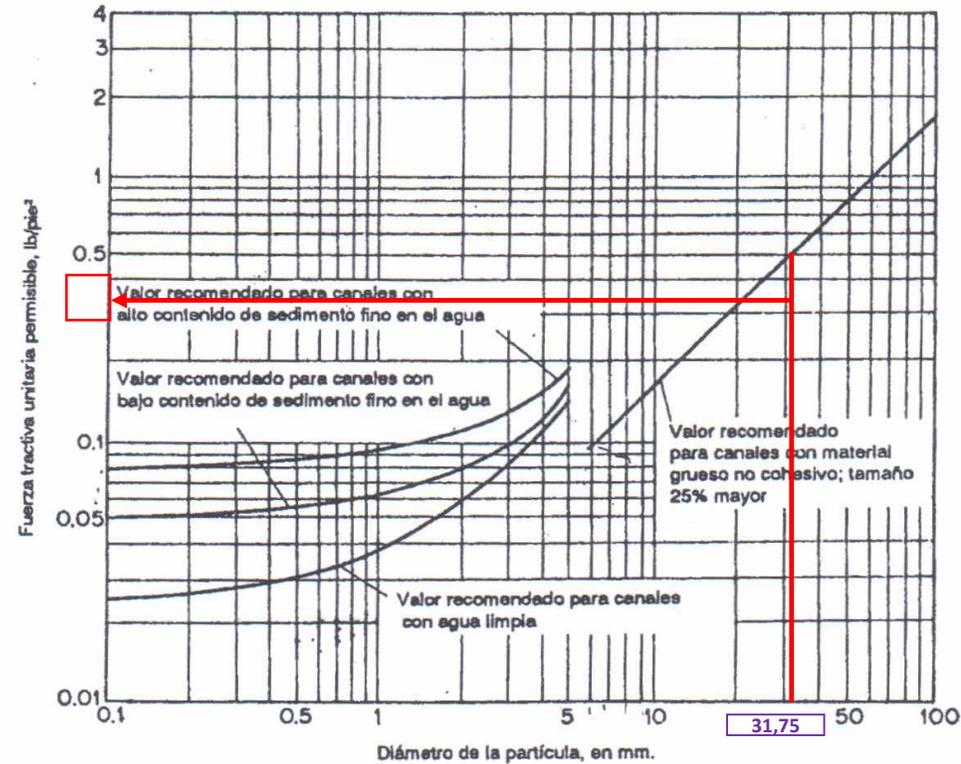
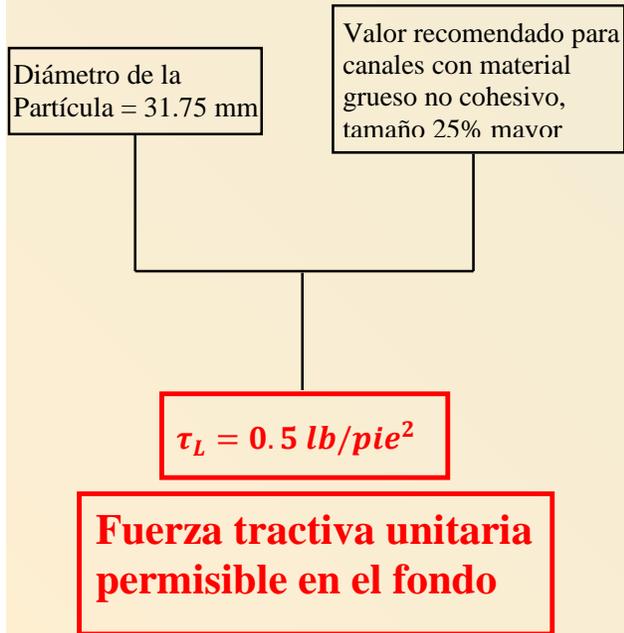


Figura 7-10. Fuerzas tractivas unitarias permisibles recomendadas para canales en materiales no cohesivos (U. S. Bureau of Reclamation).

RELACIÓN DE LA FUERZA TRACTIVA

6,- Con los valores de la relación de la fuerza tractiva (K) y de la fuerza tractiva unitaria permisible en el fondo (τ_L), utilizando la expresión general de la relación de la fuerza tractiva, calculamos la fuerza tractiva permisible en los lados (τ_s).

$$K = \frac{\tau_s}{\tau_L}$$

$$\tau_s = \tau_L * K = 0.5 * 0.586$$

$$\tau_s = 0.293 \text{ lb/pie}^2$$

**Fuerza tractiva unitaria
permisible en los lados**

7,- El valor de fuerza tractiva permisible en los lados (τ_s) reemplazamos en la expresión del item 3 y calculamos el tirante del canal.

$$\tau_s = 0.077y ; \quad \tau_s = 0.293 \text{ lb/pie}^2$$

$$0.077y = 0.293$$

$$y = 3.80 \text{ pies}$$

8,- Con el valor de y , reemplazando en la proporción b/y asumida en el item 3, calculamos el ancho del canal.

$$\frac{b}{y} = 5$$

$$b = 5y = 5 * 3.80 \text{ pies}$$

$$b = 19 \text{ pies}$$

9,- Finalmente verificamos las dimensiones obtenidas con el caudal de diseño.

$$Q = \frac{1.49}{n} A * R^{2/3} * S^{1/2}$$

$$A = (b + zy)y = (19 + 2*3.80)3.80$$

$$A = \underline{101.08 \text{ pies}^3}$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2} = 19 + 2*3.80*\sqrt{1 + 2^2}$$

$$P = \underline{35.99 \text{ pies}}$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{101.08}{35.99}$$

$$R = \underline{2.81 \text{ pies}}$$

$$Q = \frac{1.49}{0.025} 101.08*(2.81)^{2/3}*(0.0016)^{1/2}$$

Como el caudal calculado es mayor que el de diseño recalculamos para una relación b/y= 4.1; para lo cual obtenemos valores de y = 3.82 pies y b = 15.66 pies, y un caudal de 415 pies³/s, que es bastante cercano al caudal de diseño.