

## CAPITULO 2.- DISEÑO DE CANALES

### 2.1 Consideraciones Generales

Los canales en general pueden agruparse en no erosionables y erosionables.

Son canales no erosionables los canales revestidos y los canales sin revestir excavados en lecho rocoso. Todos los demás canales sin revestir son erosionables y se les llama también canales de tierra.

#### Clasificación

A) Canales no erosionables

B) Canales erosionables

- a) canales que socavan pero no sedimentan
- b) canales que sedimentan pero no socavan
- c) canales que socavan o sedimentan indistintamente

En los canales b) y c) el agua arrastra sedimento; estos casos corresponden a la Hidráulica de los Ríos por lo que no son tratados aquí. En este texto sólo consideramos los canales que conducen agua relativamente clara, es decir los canales A) y a).

Los canales se revisten con el doble propósito de prevenir la erosión y minimizar las pérdidas de agua por filtración. Cuando el propósito es este último los logros son importantes. En efecto, en los canales de conducción la experiencia indica que la pérdida de agua (incluyendo el agua que se evapora) es del orden del 5% en los canales revestidos y del 30% en los canales de tierra.

#### Pautas para el diseño

El diseño hidráulico de los canales se hace siguiendo las siguientes pautas.

- 1) Caudal (Q). Es dato del problema.
- 2) Coeficiente de rugosidad de Manning (n). Depende de la naturaleza de la superficie en contacto con el agua.

Valores medios del coeficiente de rugosidad  
de Manning (n) \*

#### A. Conductos cerrados fluyendo parcialmente llenos

##### A.1 Metal

Acero fundido sin forrar .....	0.014
Acero comercial negro .....	0.014
Acero comercial galvanizado .....	0.016

	Metal corrugado	
	Drenaje inferior .....	0.019
	Drenaje de tormenta .....	0.024
A.2	No metal	
	Cemento pulido .....	0.011
	Concreto	
	Alcantarilla recta .....	0.011
	Alcantarilla con codos .....	0.013
	Paleteado .....	0.012
	Con encofrado metálico .....	0.013
	Con encofrado de madera cepillada .....	0.014
	Con encofrado de madera no cepillada ...	0.017
	Cerámica	
	Dren inferior con juntas abiertas .....	0.016
	Mampostería de ladrillo .....	0.015
B.	Canales revestidos o fabricados	
B.1	Metal	
	Acero liso sin pintar .....	0.012
	Corrugado .....	0.025
B.2	No metal	
	Cemento pulido .....	0.011
	Concreto	
	Terminado .....	0.015
	Sin terminar .....	0.017
	Mampostería	
	Piedra asentada con mortero .....	0.015
	Asfalto	
	Liso .....	0.013
	Rugoso .....	0.016
C.	Canales sin revestir	
C.1	Tierra	
	Recto y uniforme, limpio .....	0.018
	Recto y uniforme, con poca hierba .....	0.027
	Sinuoso, limpio .....	0.025
	Sinuoso, con poca hierba .....	0.030
C.2	Roca	
	Lisa y uniforme .....	0.035
	Dentada o irregular .....	0.040
D.	Cursos naturales menores	
D.1	En planicie	
	Limpio, recto .....	0.030
	Limpio, sinuoso .....	0.040
D.2	En montaña	
	Fondo: cantos y algunas rocas .....	0.040
	Fondo: cantos con grandes rocas .....	0.050

Extraídos de la referencia 2.

3) Talud (t). Depende del material excavado.

Valores del talud (t)

Roca .....	casi vertical
Arcilla dura .....	1.5 a 1.0
Tierra, canales grandes .....	1.0
Tierra, canales pequeños .....	1.5
Tierra arenosa .....	2.0
Arena .....	3.0

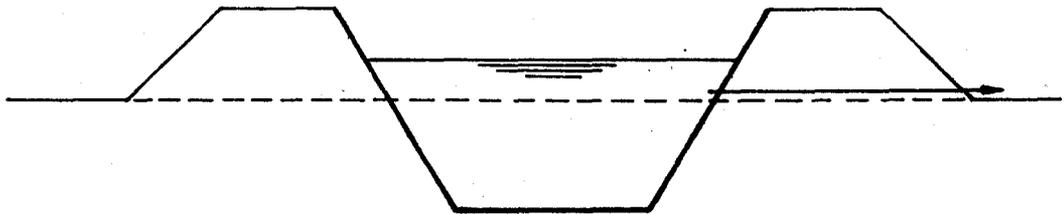
4) Relación fondo/tirante ( $\frac{b}{y}$ ). Es definido por el diseñador teniendo en cuenta factores como el método de excavación, la economía y la practicabilidad. El valor de la relación puede ser igual, mayor, o menor que el valor correspondiente a la sección más eficiente. Como referencia se indican las siguientes pautas.

- = valor SME ..... en canales revestidos en pampa
- > valor SME ..... en canales de riego
- < valor SME ..... en canales en media ladera

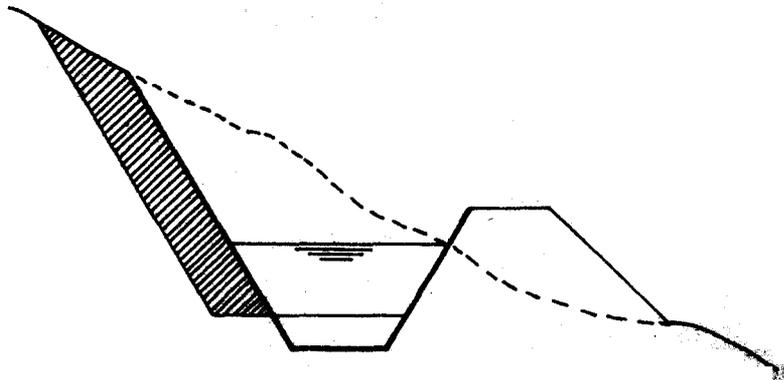
El valor igual se justifica porque siendo el perímetro mojado mínimo el costo del revestimiento será mínimo.



El valor mayor se debe a que al adoptar una sección ancha como ésta se facilita la extracción del agua de riego.



El valor menor se justifica porque con una sección honda como ésta se reduce el volumen de la excavación.



5) Velocidad mínima permitida ( $V_{mín}$ ). Los valores normalmente sugeridos son:

- \* en canales revestidos, para evitar la sedimentación del escaso limo del agua 0.60 - 0.90 m/s
- \* en canales de tierra, para evitar el crecimiento de plantas 0.70 - 0.75 m/s

6) Velocidad máxima permitida ( $V_{máx}$ ). Para los canales revestidos este parámetro podría ser pasado por alto, pero hay que tener presente que las velocidades muy altas (del orden de los 6 m/s) pueden levantar las piedras o los bloques del revestimiento. Para los canales del tipo a) sí es necesario tener en cuenta la velocidad máxima permitida, cosa que se explica en el apartado 2.3.1.

7) Pendiente ( $S_0$ ). Su valor viene gobernado sobre todo por la topografía, pero lo deseable es usar una pendiente pequeña a fin de no perder mucha altura y llegar al punto de entrega del agua con una cota alta.

8) Margen libre o freeboard ( $f$ ). Depende de varios factores, como tamaño del canal, magnitud de las lluvias, variaciones del nivel del agua por operación de compuertas, etc. Como guía pueden usarse las recomendaciones del U.S. Bureau of Reclamation.

Para canales no revestidos:

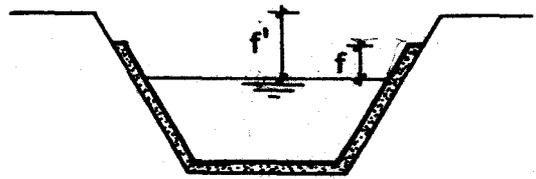
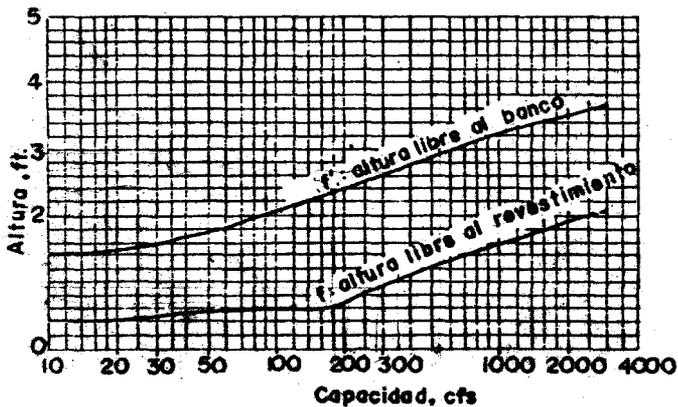
$$f = \sqrt{C y} \quad (2.1)$$

$f$  ... margen libre en pies

$y$  ... profundidad del agua en pies

$C$  ... coeficiente que varía según la capacidad del canal, desde 1.5 para canales de 20 pie<sup>3</sup>/s hasta 2.5 para canales de 3,000 pie<sup>3</sup>/s o más.

Para canales revestidos ver gráfica.



$f$  ... altura libre al revestimiento

$f'$  ... altura libre al banco

- 9) Banquetas ( $B_e, B_i$ ), ver geometría en el apartado 1.1.4. Estos valores dependen del tamaño del canal, pues de acuerdo a este tamaño se establece el sistema para la operación y el mantenimiento del canal. En los pequeños, las banquetas sirven sólo para el tránsito de operarios pero en los grandes deben permitir el tránsito de vehículos.
- 10) Dimensiones finales. El diseño culmina con un ajuste de cifras, sobre todo redondeando el valor obtenido del ancho de fondo  $b$  y recalculando el resto.

## 2.2 Diseño de canales no erosionables

Los casos que usualmente se presentan son:

- \* velocidad media conocida
- \* pendiente conocida
- \* velocidad media y pendiente conocidas
- \* ancho de fondo conocido
- \* tirante conocido

### Velocidad media conocida

Datos	Incógnitas
$Q$	$b$
$V$	$y$
$\frac{Q}{Sb} = k$	$S$
$t$	
$n$	

$$\frac{Q}{V} = A = by + ty^2 = ky^2 + ty^2 = y^2 (k + t)$$

$$y = \frac{1}{\sqrt{k + t}} \sqrt{A} \quad (2.2)$$

$$b = k y$$

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

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

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

$$S = \left( \frac{V n}{R^{2/3}} \right)^2$$

Pendiente conocida

Datos	Incógnitas
Q	b
S	y
$\frac{b}{y} = k$	V
t	
n	

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

$$\frac{Qn}{S^{1/2}} = A R^{2/3} = A \cdot \frac{A^{2/3}}{p^{2/3}} = \frac{A^{5/3}}{p^{2/3}}$$

$$\frac{Qn}{S^{1/2}} = \frac{(by + ty^2)^{5/3}}{(b + 2y \sqrt{1+t^2})^{2/3}} = \frac{(ky^2 + ty^2)^{5/3}}{(ky + 2y \sqrt{1+t^2})^{2/3}}$$

$$= \frac{y^{10/3} (k+t)^{5/3}}{y^{2/3} (k + 2 \sqrt{1+t^2})^{2/3}}$$

$$= y^{8/3} \cdot \frac{(k+t)^{5/3}}{(k + 2 \sqrt{1+t^2})^{2/3}}$$

$$y = \left| \frac{Qn (k + 2 \sqrt{1+t^2})^{2/3}}{S^{1/2} (k+t)^{5/3}} \right|^{3/8} \quad (2.3)$$

Velocidad media y pendiente conocidas

Datos	Incógnitas
Q	b
V	y
S	
t	
n	

$$\frac{Q}{V} = A = by + ty^2 \quad \dots (a)$$

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

$$R = \left( \frac{Vn}{S^{1/2}} \right)^{3/2}$$

$$\frac{A}{R} = P = b + 2y\sqrt{1+t^2} \quad \dots (b)$$

Las ecuaciones (a) y (b) conforman un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas. Resolviéndolo se obtienen los valores de las incógnitas.

Ancho de fondo conocido

Datos	Incógnitas
Q	y
S	
b	
n	
t	

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

$$\frac{Qn}{S^{1/2}} = A \cdot \frac{A^{2/3}}{P^{2/3}} = \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}}$$

$$A = by + ty^2 = b^2 \left( \frac{y}{b} + \frac{y^2}{b^2} t \right)$$

$$P = b + 2y\sqrt{1+t^2} = b \left( 1 + \frac{y}{b} 2\sqrt{1+t^2} \right)$$

$$\frac{Qn}{S^{1/2}} = \frac{b^{10/3} \left( \frac{y}{b} + \frac{y^2}{b^2} t \right)^{5/3}}{b^{2/3} \left( 1 + \frac{y}{b} 2\sqrt{1+t^2} \right)^{2/3}}$$

$$\frac{Qn}{S^{1/2} b^{8/3}} = \frac{\left( \frac{y}{b} + \frac{y^2}{b^2} t \right)^{5/3}}{\left( 1 + \frac{y}{b} 2\sqrt{1+t^2} \right)^{2/3}} = K' \quad (2.4)$$

El primer miembro es conocido de modo que por tanteos se puede obtener el valor y/b; sin embargo para facilitar los cálculos han sido confeccionadas tablas como la adjunta.

Valores de K' (ecuación 2.4)

y/b	t	0	1/4	1/2	3/4	1	1 1/2	2	2 1/2
0,01	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046
0,02	0,00143	0,00145	0,00145	0,00146	0,00147	0,00148	0,00149	0,00149	0,00149
0,03	0,00279	0,00282	0,00285	0,00287	0,00288	0,00291	0,00293	0,00295	0,00295
0,04	0,00444	0,00451	0,00457	0,00461	0,00465	0,00471	0,00476	0,00482	0,00482
0,05	0,00637	0,00649	0,00659	0,00667	0,00674	0,00686	0,00695	0,00705	0,00705
0,06	0,00855	0,00875	0,00888	0,00902	0,00915	0,00929	0,00949	0,00962	0,00962
0,07	0,01090	0,01117	0,01144	0,01164	0,01178	0,01211	0,01231	0,01258	0,01258
0,08	0,01346	0,0139	0,0142	0,0145	0,0147	0,0151	0,0155	0,0159	0,0159
0,09	0,0162	0,0168	0,0172	0,0176	0,0180	0,0185	0,0190	0,0194	0,0194
0,10	0,0191	0,0198	0,0205	0,0209	0,0214	0,0221	0,0228	0,0234	0,0234
0,11	0,0221	0,0231	0,0238	0,0245	0,0251	0,0260	0,0269	0,0278	0,0278
0,12	0,0253	0,0264	0,0275	0,0283	0,0290	0,0303	0,0314	0,0324	0,0324
0,13	0,0286	0,0300	0,0312	0,0323	0,0332	0,0347	0,0361	0,0374	0,0374
0,14	0,0320	0,0338	0,0353	0,0365	0,0376	0,0395	0,0412	0,0428	0,0428
0,15	0,0355	0,0376	0,0394	0,0409	0,0422	0,0445	0,0466	0,0485	0,0485
0,16	0,0392	0,0417	0,0437	0,0455	0,0471	0,0498	0,0523	0,0546	0,0546
0,17	0,0429	0,0458	0,0482	0,0503	0,0522	0,0554	0,0583	0,0610	0,0610
0,18	0,0468	0,0501	0,0529	0,0553	0,0575	0,0612	0,0646	0,0678	0,0678
0,19	0,0507	0,0544	0,0577	0,0605	0,0630	0,0764	0,0713	0,0750	0,0750
0,20	0,0546	0,0590	0,0627	0,0659	0,0687	0,0738	0,0783	0,0826	0,0826
0,22	0,0629	0,0683	0,0734	0,0774	0,0808	0,0875	0,0935	0,0989	0,0989
0,24	0,0714	0,0781	0,0841	0,0895	0,0942	0,1023	0,1097	0,1164	0,1164
0,26	0,0801	0,0882	0,0956	0,1023	0,1077	0,1178	0,1272	0,1359	0,1359
0,28	0,0888	0,0989	0,108	0,116	0,122	0,135	0,146	0,157	0,157
0,30	0,0983	0,1097	0,120	0,130	0,138	0,153	0,167	0,180	0,180
0,32	0,1077	0,1211	0,134	0,145	0,155	0,172	0,189	0,205	0,205
0,34	0,1171	0,133	0,147	0,160	0,172	0,193	0,213	0,231	0,231
0,36	0,1272	0,145	0,162	0,177	0,190	0,215	0,238	0,259	0,259
0,38	0,137	0,157	0,177	0,194	0,210	0,238	0,264	0,289	0,289
0,40	0,147	0,170	0,192	0,212	0,229	0,262	0,292	0,320	0,320
0,42	0,157	0,184	0,208	0,230	0,251	0,287	0,322	0,354	0,354
0,44	0,167	0,197	0,225	0,250	0,273	0,314	0,353	0,390	0,390
0,46	0,178	0,211	0,242	0,270	0,295	0,343	0,386	0,428	0,428
0,48	0,188	0,225	0,259	0,291	0,319	0,372	0,421	0,468	0,468
0,50	0,199	0,239	0,277	0,312	0,344	0,402	0,457	0,509	0,509
0,55	0,225	0,276	0,324	0,369	0,410	0,486	0,556	0,623	0,623
0,60	0,252	0,315	0,375	0,431	0,483	0,577	0,666	0,752	0,752
0,70	0,308	0,398	0,485	0,568	0,645	0,787	0,922	1,050	1,050
0,80	0,365	0,488	0,610	0,725	0,834	1,036	1,231	1,413	1,413
0,90	0,423	0,585	0,747	0,902	1,050	1,332	1,588	1,844	1,844
1,00	0,480	0,688	0,895	1,104	1,299	1,662	2,012	2,342	2,342
1,20	0,600	0,915	1,245	1,568	1,878	2,470	3,035	3,580	3,580
1,40	0,720	1,171	1,649	2,127	2,591	3,479	4,320	5,141	5,141
1,60	0,841	1,454	2,113	2,786	3,445	4,704	5,908	7,079	7,079
1,80	0,962	1,763	2,645	3,553	4,441	6,157	7,806	9,421	9,421
2,00	1,083	2,100	3,244	4,428	5,599	7,873	10,027	12,180	12,180
2,25	1,238	2,564	4,098	5,693	7,268	10,363	13,324	16,218	16,218

## Profundidad de agua conocida

Datos	Incógnitas
Q	b
S	
y	
n	
t	

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

$$\frac{Qn}{S^{1/2}} = A \cdot \frac{A^{2/3}}{P^{2/3}} = \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}}$$

$$A = by + ty^2 = y^2 \left( \frac{b}{y} + t \right)$$

$$P = b + 2y \sqrt{1 + t^2} = y \left( \frac{b}{y} + 2 \sqrt{1 + t^2} \right)$$

$$\frac{Qn}{S^{1/2}} = \frac{y^{10/3} \left( \frac{b}{y} + t \right)^{5/3}}{y^{2/3} \left( \frac{b}{y} + 2 \sqrt{1 + t^2} \right)^{2/3}}$$

$$\frac{Qn}{S^{1/2} y^{8/3}} = \frac{\left( \frac{b}{y} + t \right)^{5/3}}{\left( \frac{b}{y} + 2 \sqrt{1 + t^2} \right)^{2/3}} = K \quad (2.5)$$

### 2.3 Diseño de canales erosionables

#### 2.3.1 Método de la velocidad máxima permitida

Consiste en establecer a priori un valor de la velocidad media, para proseguir luego con el diseño según los pasos indicados en el apartado 2.2. El valor establecido debe ser tal que no se produzca erosión en el canal. En general, los canales viejos y bien asentados soportan velocidades medias más altas que los nuevos, debido a que los canales viejos tienen el lecho mejor estabilizado por el depósito con el tiempo del material coloidal del agua.

De las diversas propuestas sugeridas para determinar el valor de la velocidad máxima permitida en un canal, la tabla de valores de Fortier-Scobey es la que ha mostrado ser más eficaz. Los valores de esta tabla son para canales bien conformados, de pequeña pendiente, y con profundidades de agua de hasta 0.90 m. La tabla incluye para cada material el valor del

Valores de K (ecuación 2.5)

y/b	t	0	1/4	1/2	3/4	1	1 1/2	2	2 1/2	3
0,01	98,7	99,1	99,3	99,6	99,8	100,1	100,4	100,6	100,9	
0,02	48,7	49,1	49,4	49,6	49,8	50,1	50,4	50,7	50,9	
0,03	32,0	32,4	32,7	33,0	33,2	33,5	33,8	34,1	34,3	
0,04	23,8	24,1	24,4	24,6	24,8	25,2	25,4	25,7	26,0	
0,05	18,8	19,1	19,4	19,7	19,9	20,2	20,5	20,8	21,0	
0,06	15,5	15,8	16,1	16,4	16,6	16,9	17,2	17,5	17,7	
0,07	13,12	13,46	13,73	14,0	14,2	14,5	14,8	15,1	15,3	
0,08	11,31	11,64	11,98	12,18	12,38	12,72	13,06	13,33	13,59	
0,09	9,96	10,30	10,57	10,83	11,04	11,37	11,71	11,98	12,25	
0,10	8,88	9,22	9,49	9,69	9,96	10,30	10,57	10,90	11,17	
0,11	7,96	8,30	8,59	8,82	9,03	9,35	9,69	10,03	10,30	
0,12	7,22	7,56	7,84	8,08	8,28	8,61	8,95	9,29	9,56	
0,13	6,60	6,92	7,21	7,44	7,65	8,01	8,34	8,61	8,95	
0,14	6,06	6,39	6,67	6,90	7,11	7,47	7,81	8,08	8,41	
0,15	5,60	5,92	6,20	6,44	6,65	7,00	7,34	7,67	7,94	
0,16	5,20	5,52	5,79	6,03	6,24	6,60	6,92	7,23	7,54	
0,17	4,84	5,16	5,44	5,67	5,88	6,25	6,58	6,88	7,19	
0,18	4,53	4,85	5,12	5,36	5,57	5,93	6,26	6,57	6,87	
0,19	4,25	4,56	4,84	5,07	5,28	5,65	5,98	6,29	6,60	
0,20	4,00	4,31	4,58	4,82	5,03	5,39	5,72	6,04	6,35	
0,22	3,57	3,88	4,15	4,38	4,59	4,95	5,29	5,61	5,92	
0,24	3,21	3,51	3,78	4,01	4,22	4,59	4,93	5,24	5,56	
0,26	2,91	3,21	3,47	3,71	3,92	4,29	4,62	4,95	5,26	
0,28	2,66	2,95	3,21	3,45	3,65	4,02	4,36	4,68	5,00	
0,30	2,44	2,73	2,99	3,22	3,43	3,80	4,14	4,46	4,78	
0,32	2,25	2,54	2,79	3,02	3,23	3,60	3,94	4,27	4,59	
0,34	2,08	2,36	2,62	2,85	3,06	3,43	3,77	4,10	4,41	
0,36	1,94	2,21	2,47	2,70	2,90	3,28	3,62	3,94	4,27	
0,38	1,80	2,08	2,34	2,56	2,77	3,14	3,48	3,81	4,13	
0,40	1,69	1,97	2,21	2,44	2,64	3,01	3,36	3,69	4,01	
0,42	1,59	1,86	2,11	2,33	2,54	2,91	3,25	3,58	3,90	
0,44	1,49	1,76	2,01	2,23	2,44	2,81	3,15	3,48	3,81	
0,46	1,41	1,67	1,92	2,14	2,34	2,72	3,06	3,39	3,71	
0,48	1,33	1,59	1,83	2,06	2,26	2,63	2,98	3,31	3,63	
0,50	1,26	1,52	1,76	1,98	2,19	2,56	2,90	3,24	3,56	
0,55	1,11	1,36	1,59	1,82	2,02	2,39	2,74	3,07	3,40	
0,60	0,983	1,23	1,46	1,68	1,88	2,25	2,60	2,93	3,26	
0,70	0,794	1,03	1,26	1,47	1,67	2,04	2,39	2,72	3,05	
0,80	0,661	0,882	1,10	1,31	1,51	1,88	2,23	2,56	2,89	
0,90	0,559	0,774	0,989	1,20	1,39	1,76	2,11	2,44	2,77	
1,00	0,481	0,686	0,895	1,10	1,30	1,66	2,01	2,34	2,67	
1,20	0,369	0,563	0,767	0,962	1,16	1,52	1,86	2,20	2,53	
1,40	0,293	0,476	0,672	0,868	1,06	1,42	1,76	2,10	2,42	
1,60	0,240	0,415	0,604	0,794	0,983	1,35	1,69	2,02	2,35	
1,80	0,201	0,367	0,552	0,740	0,929	1,29	1,63	1,96	2,29	
2,00	0,171	0,330	0,511	0,700	0,882	1,24	1,58	1,91	2,24	
2,25	0,143	0,295	0,471	0,655	0,834	1,19	1,53	1,86	2,19	

coeficiente de rugosidad ( $n$ ) y para cada velocidad el correspondiente valor de la fuerza tractiva unitaria permitida ( $\tau$ ), concepto que es explicado en el apartado siguiente.

Las velocidades máximas permitidas de la tabla se refieren a canales rectos. Para canales sinuosos las velocidades a considerar son algo menores, según los siguientes porcentajes de reducción sugeridos por Lane:

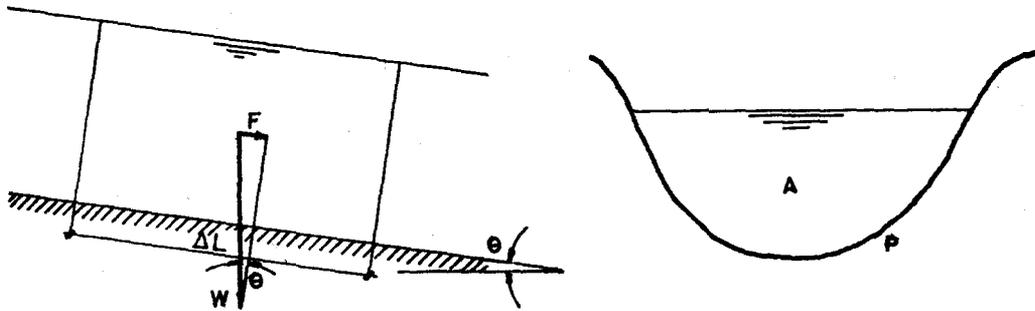
- 5% para canales ligeramente sinuosos
- 13% para canales moderadamente sinuosos
- 20% para canales muy sinuosos

Máximas velocidades medias permitidas  
según Fortier y Scobey

M a t e r i a l	n	Agua clara		Agua con limo coloidal	
		V m/sg	$\tau_0$ N/m <sup>2</sup>	V m/sg	$\tau_0$ N/m <sup>2</sup>
Arena fina, coloidal	0.020	0.46	1.30	0.76	3.60
Greda arenosa, no coloidal	0.020	0.53	1.77	0.76	3.60
Greda limosa, no coloidal	0.020	0.61	2.30	0.91	5.28
Limo aluvial, no coloidal	0.020	0.61	2.30	1.07	7.20
Greda común firme	0.020	0.76	3.60	1.07	7.20
Ceniza volcánica	0.020	0.76	3.60	1.07	7.20
Arcilla dura muy coloidal	0.025	1.14	12.47	1.52	22.07
Limo aluvial, coloidal	0.025	1.14	12.47	1.52	22.07
Arcilla esquistosa o capas duras	0.025	1.83	32.14	1.83	32.14
Grava fina	0.020	0.76	3.60	1.52	15.35
Greda graduada a cantos rodados	0.030	1.14	18.23	1.52	31.66
Limo graduado a cantos rodados	0.030	1.22	20.63	1.68	38.38
Grava gruesa	0.025	1.22	14.39	1.83	32.14
Cantos rodados y ripios	0.035	1.52	43.65	1.68	52.77

### 2.3.2 Método de la fuerza tractiva

#### La fuerza tractiva



En el flujo permanente uniforme en un canal el peso del cuerpo de agua correspondiente a una longitud  $\Delta L$  es:

$$W = \gamma V_0 = \gamma A \cdot \Delta L$$

cuya componente en el sentido del flujo,

$$F = \gamma A \cdot \Delta L \sin \theta \approx \gamma A \cdot \Delta L \cdot S$$

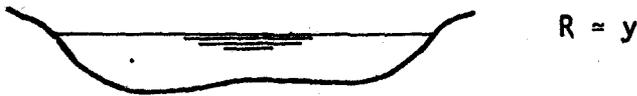
recibe el nombre de fuerza de corte, fuerza de arrastre o fuerza tractiva.

A la fuerza tractiva media por unidad de superficie:

$$\tau_0 = \frac{F}{A_s} = \frac{\gamma A \cdot \Delta L \cdot S}{P \cdot \Delta L} = \gamma R S$$

se conoce como fuerza tractiva unitaria.

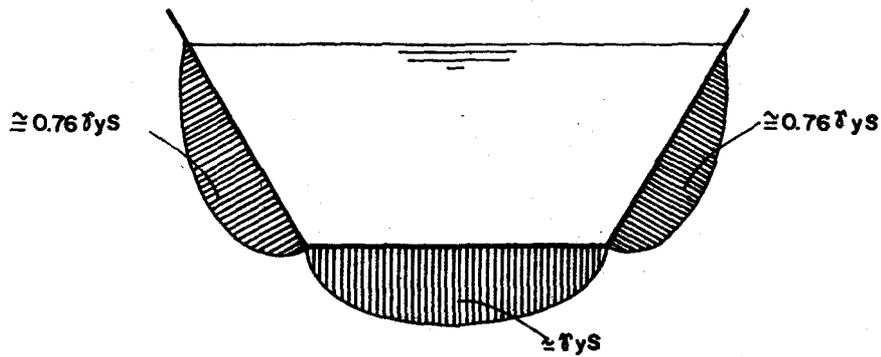
En un canal ancho:



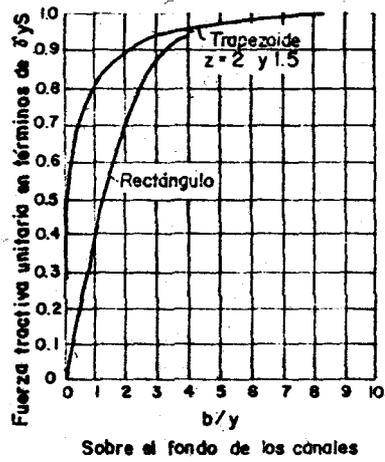
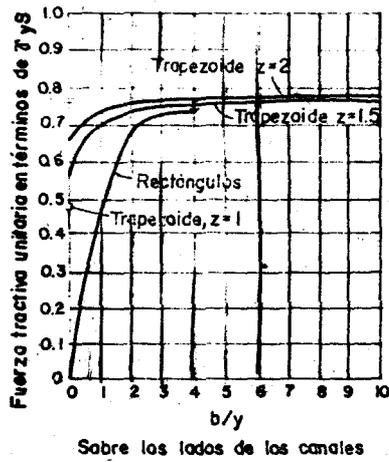
de modo que,  $\tau_0 = \gamma y S$

#### Distribución de la fuerza tractiva

Estudios minuciosos que se han realizado en torno de la fuerza tractiva unitaria revelan que ésta no se desarrolla de modo uniforme en toda la sección; así para una sección trapezoidal su distribución es más o menos como sigue:

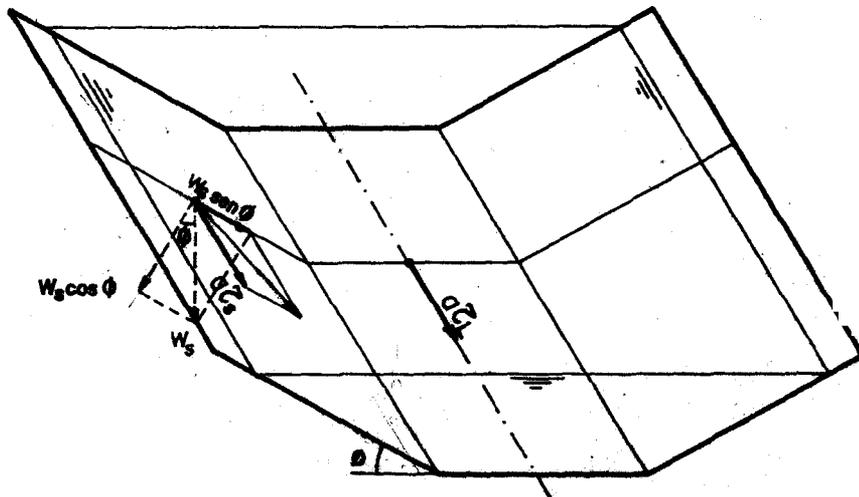


En base a los estudios realizados se han confeccionado gráficas de las máximas fuerzas tractivas unitarias desarrolladas en las paredes y en el fondo de canales rectangulares y trapezoidales.



Máxima fuerza tractiva unitaria desarrollada en términos de  $\gamma$  y  $S$

Relación de las fuerzas tractivas en la pared y el fondo



$$\frac{\tau_s}{\tau_b} = ?$$

Sobre una partícula de suelo de la pared del canal actúan dos fuerzas, la fuerza tractiva ( $a \tau_s$ ) y la componente del peso ( $W_s \sin \phi$ ), siendo:

- $a$  ... área efectiva de la partícula
- $\tau_s$  ... fuerza tractiva unitaria en la pared
- $W_s$  ... peso sumergido de la partícula
- $\phi$  ... ángulo que forma la pared con el fondo

y cuya resultante es  $\sqrt{W_s^2 \sin^2 \phi + a^2 \tau_s^2}$

La fuerza que se opone al movimiento es el producto de la fuerza normal por el coeficiente de fricción,

$$N \mu = W_s \cos \phi \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad \text{siendo}$$

$\theta$  ... ángulo de reposo del material.

En el equilibrio

$$W_s \cos \phi \cdot \operatorname{tg} \theta = \sqrt{W_s^2 \sin^2 \phi + a^2 \tau_s^2} \quad (2.6)$$

de donde:

$$\tau_s = \frac{W_s}{a} \cos \phi \cdot \operatorname{tg} \theta \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi}{\operatorname{tg}^2 \theta}} \quad (2.7)$$

Análogamente, en el fondo del canal ( $\phi = 0$ ), la 2.6 resulta

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

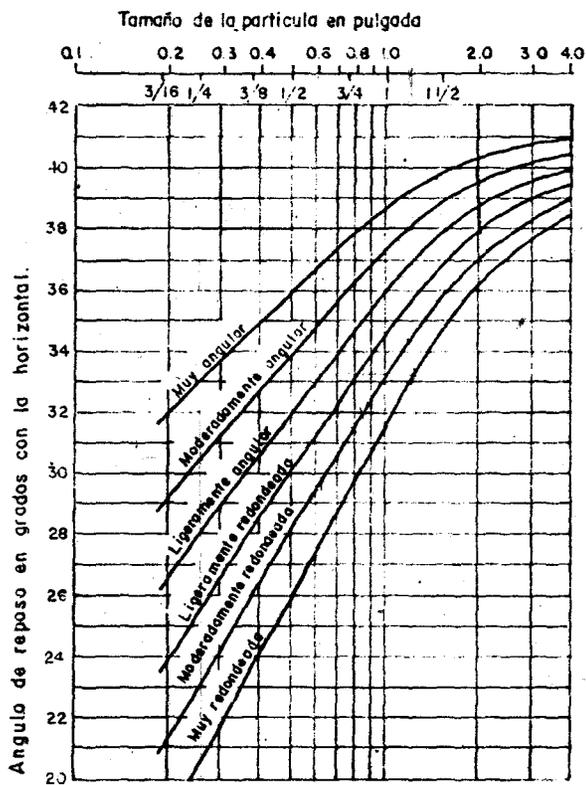
de donde:

$$\tau_L = \frac{W_s}{a} \operatorname{tg} \theta \quad (2.8)$$

Dividiendo 2.7 entre 2.8

$$K = \frac{\tau_s}{\tau_L} = \cos \phi \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi}{\operatorname{tg}^2 \theta}} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \phi}{\operatorname{sen}^2 \theta}} \quad (2.9)$$

Para obtener el ángulo de reposo ( $\theta$ ) de suelos no cohesivos se puede usar la gráfica del U.S. Bureau of Reclamation, en la que el tamaño de la partícula se refiere a  $d_{75}$ , es decir el tamaño de la malla que deja pasar el 75% de granos (en peso).



Ángulos de reposo de material no cohesivo

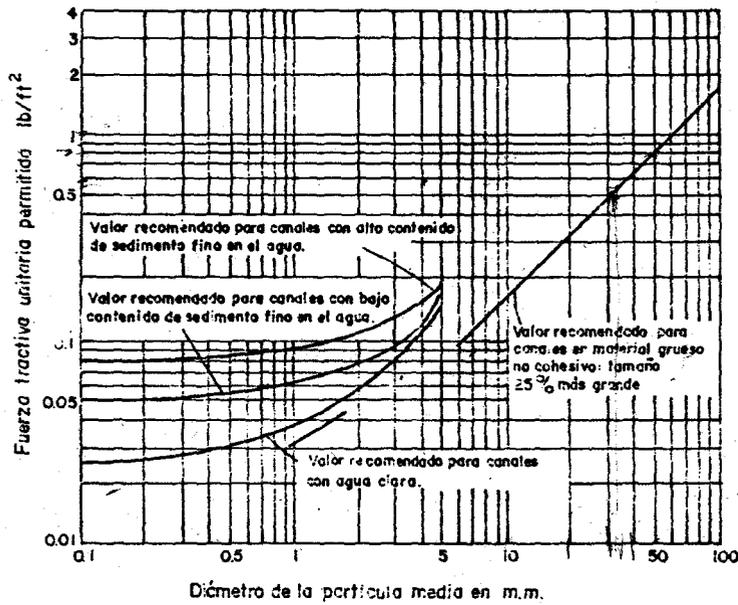
### Fuerza tractiva permitida

La fuerza tractiva unitaria permitida es la máxima  $f.t.u.$  que no causará erosión del material que forma el lecho del canal.

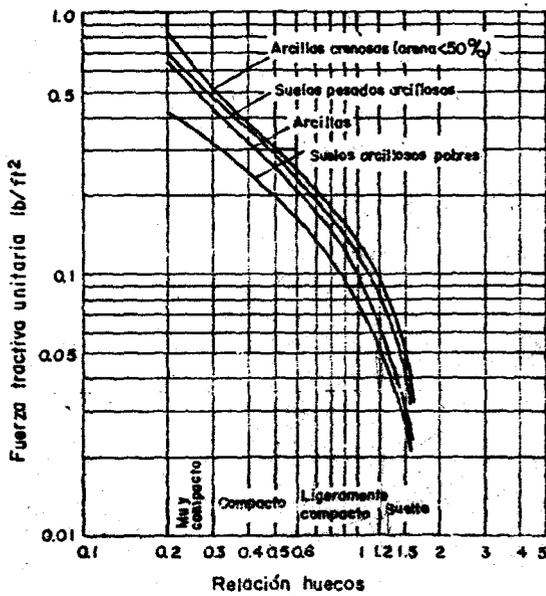
Esta fuerza ha sido determinada en laboratorio para diferentes tipos de suelos no cohesivos y cohesivos y se conoce como  $f.t.u.$  crítica. Las gráficas adjuntas proporcionan los valores de la  $f.t.u.$  crítica en  $lb/ft^2$ . Para material no cohesivo grueso el diámetro a considerar es el  $d_{75}$ . Para material no cohesivo fino el  $d_{50}$  y además se sugieren tres curvas para el diseño según la calidad del agua transportada.

Las  $f.t.u.$  permitidas obtenidas de las gráficas se refieren a canales rectos. Para canales sinuosos deben considerarse porcentajes de reducción como los sugeridos por Lane:

- 10% para canales ligeramente sinuosos
- 25% para canales moderadamente sinuosos
- 40% para canales muy sinuosos



Fuerza tractiva unitaria permitida en el fondo ( $\tau_L$ ) para canales en material no cohesivo



Fuerza tractiva unitaria permitida en el fondo ( $\tau_L$ ) para canales en material cohesivo.

## Metodología

El diseño de canales erosionables por el método de la fuerza tractiva consiste en:

- dimensionar el canal de modo que la f.t.u. desarrollada en la pared sea igual a la f.t.u. crítica.
- verificar que en el fondo la f.t.u. desarrollada sea menor que la crítica.

## Ejemplo

Se trata del diseño de un canal trapezoidal con pendiente  $S = 0.0016$  para conducir un caudal de  $Q = 400 \text{ pie}^3/\text{sg}$ . El canal será excavado en tierra que contiene grava gruesa y guijarros, 25% de los cuales son de 1.25 pulg o más de diámetro. El  $n$  de Manning es 0.025.

- Considerando un material muy redondeado de diámetro  $d_{75} = 1.25 \text{ pulg}$  el ángulo de reposo es  $\theta = 33.5^\circ$ .

Se escoge un talud  $t = 2$ , es decir  $\phi = 26.5^\circ$ , y con la ecuación 2.9 se obtiene  $K = 0.587$

Para un  $d_{75} = 1.25 \text{ pulg}$  la f.t.u. crítica en el fondo es  $\tau_L = 0.5 \text{ lb/pie}^2$  y en las paredes  $\tau_S = K \tau_L = 0.294 \text{ lb/pie}^2$ .

Se asume  $\frac{b}{y} = 5$ , con lo que la f.t.u. desarrollada en la pared es:

$$0.775 \gamma y S = 0.775 \times 62.4 \times 0.0016 y = 0.078 \gamma \text{ lb/pie}^2$$

Para el estado de equilibrio son iguales los dos valores obtenidos de  $\tau_S$ :

$$0.078 \gamma = 0.294$$

$$y = 3.77'$$

luego,  $b = 5 y = 18.85'$

$$A = b y + t y^2 = 99.5 \text{ pie}^2$$

$$P = b + 2 y \sqrt{1 + t^2} = 35.41'$$

$$R = \frac{A}{P} = 2.81'$$

$$Q = A \frac{S^{1/2} R^{2/3}}{n} = 470 \text{ pie}^3/\text{sg} > 400 \text{ pie}^3/\text{sg}$$

Después de probar otros valores de la relación fondo/tirante,

$$\frac{b}{y} = 4.1$$

$$t = 2$$

$$y = 3.82', b = 15.66', Q = 414 \text{ pie}^3/\text{sg} \dots \text{BIEN}$$

b) Hay que verificar que en el fondo la f.t.u. desarrollada sea menor que la permitida.

$$\frac{b}{y} = 4.1$$

$$t = 2$$

$$0.97 \gamma y S = 0.37 \text{ lb/pie}^2 < 0.5 \text{ lb/pie}^2 \quad \dots \quad \text{BIEN}$$