

UNIDAD Nº 6: Diseño de cunetas y canales medianos

Las cunetas y canales medianos son sistemas de canales abiertos que colectan y conducen el agua pluvial proveniente de calzadas, veredas y áreas adyacentes.

En cuencas urbanizadas pequeñas (menores de 8 – 20 ha) puede ser factible conducir los caudales del evento mayor dentro del sistema de conductos y calles. En algún punto del sistema, sin embargo, los caudales del evento mayor pueden exceder la capacidad combinada de conductos y calles y se hace necesario un canal abierto.

El tamaño de cuenca de referencia para prever un canal abierto (componente del sistema mayor) varía según la topografía, impermeabilidad, lluvia y otros factores. Por ejemplo, en Denver (Colorado, EUA) se reserva un canal abierto para todas las cuencas urbanas mayores a 50 ha.

Los sistemas de drenaje menor y mayor deben ser planificados y diseñados simultáneamente. Un sistema mayor bien diseñado puede reducir o eliminar el costo de un sistema de conductos subterráneos, mientras que uno mal concebido puede generar un sistema de conductos muy costoso.

Los canales abiertos tienen ventajas significativas sobre los conductos cerrados respecto a costo, capacidad, usos recreativos múltiples, aspectos estéticos, volumen para proveer almacenamiento temporario del flujo y otros propósitos. Las desventajas incluyen la necesidad de expropiación ó derecho de paso y la necesidad de cercos y/o barreras (“guardarrail”) para reducir el riesgo de personas y vehículos de sufrir accidentes en el canal.

El canal “ideal” es uno geométricamente natural y viejo. Los beneficios de este canal son:

- a) Las velocidades del flujo son usualmente bajas a normales, resultando mayores tiempos de concentración y menores caudales pico aguas abajo.
- b) El almacenamiento en el canal es importante, lo que atenúa los picos.
- c) Las necesidades de mantenimiento son usualmente bajas, debido a que el canal está estabilizado.
- d) El canal permite usos recreativos y paisajísticos.

Un canal artificial puede ser construido para asemejarse a un canal natural. Sin embargo, se debe reconocer que pocos canales naturales responden favorablemente a los impactos hidrológicos de la urbanización sin mejoramientos conducentes a estabilizar el curso.

Desde un punto de vista práctico, la elección básica que debe hacerse inicialmente es entre un canal revestido estructuralmente para permitir altas velocidades, o empastado para generar velocidades intermedias. La elección debe estar basada en factores tales como:

- a) Normas sobre regulación del uso del suelo, a nivel municipal o provincial.
- b) Hidráulicos: pendiente de fondo, capacidad de conducción necesaria, ancho de expropiación, aporte de sedimentos de la cuenca, topografía, facilidad para drenar terrenos adyacentes.
- c) Costos.
- d) Ambientales.
- e) Sociales: características de la población vecina, tránsito pedestre y requerimientos de espacios recreativos.

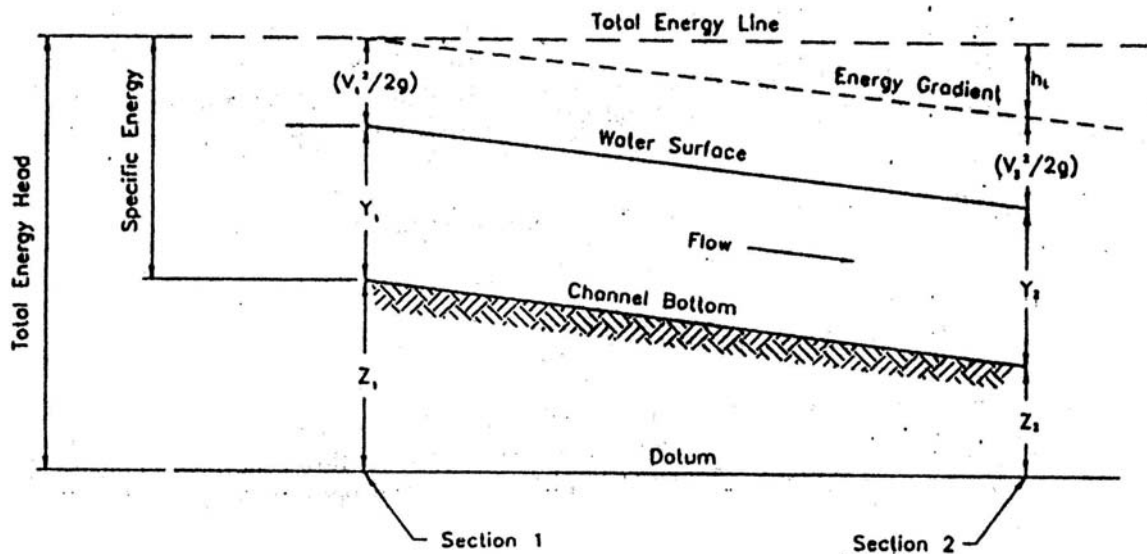
6.1 FLUJO EN CANALES ABIERTOS

El análisis y diseño de cunetas y canales medianos se basa en los principios de conservación de masa, de momento y de energía.

6.1.1 Principio de conservación de la energía

La conservación de la **energía** es un principio básico en el flujo de canales abiertos. Como se muestra en la Figura N° 6.1, la energía total en una sección dada de un canal abierto se expresa como la suma de la energía potencial (elevación), carga de presión y energía cinética.

Figura N° 6.1: Componentes de la energía del flujo en canales abiertos.



Como se ha visto en (5.4), la energía total en una sección dada del canal puede ser expresada:

$$E_t = Z + y + \frac{V^2}{2g} \quad (6.1)$$

E_t : energía total, Z : elevación por encima de un plano de referencia, y : tirante del flujo, V : velocidad media, g : aceleración de la gravedad, igual a 9.81 m/s^2 .

La conservación de energía entre dos secciones, 1 (aguas arriba) y 2 (aguas abajo) se expresa:

$$Z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L \quad (6.2)$$

h_L : pérdida de energía entre las secciones 1 y 2.

Los términos en la ecuación (6.2) se muestran en la Figura N° 6.1. La ecuación establece que la energía total en una sección aguas arriba es igual a la energía total en la sección de aguas abajo más la energía perdida entre las dos secciones.

La energía específica es la carga de energía relativa a la solera del canal. Es igual a la suma del tirante más la carga de velocidad:

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (6.3)$$

E: energía específica.

6.1.2 Clasificación del Flujo en Canales Abiertos

El flujo en canales abiertos se clasifica generalmente en:

- a) Permanente o impermanente.
- b) Uniforme o variado.
- c) Subcrítico o supercrítico.

Un flujo es *permanente* cuando el caudal en una sección transversal dada se mantiene constante en el tiempo. Cuando el caudal varía en el tiempo, el flujo es *impermanente*.

Un flujo es *uniforme* cuando el caudal y el tirante se mantienen constantes a lo largo de la longitud del canal. Cuando el caudal y/o el tirante varían a lo largo del canal, el flujo es *variado*.

La mayoría de los flujos naturales no son permanentes ni uniformes. Sin embargo, en algunos casos puede asumirse que el caudal varía gradualmente en el tiempo y en el espacio y puede ser descrito como permanente y uniforme en períodos y distancias cortas. Los flujos gradualmente variados son flujos no uniformes en los cuales el tirante y la velocidad cambian gradualmente en la dirección del flujo, tal que las aceleraciones verticales pueden ser despreciadas.

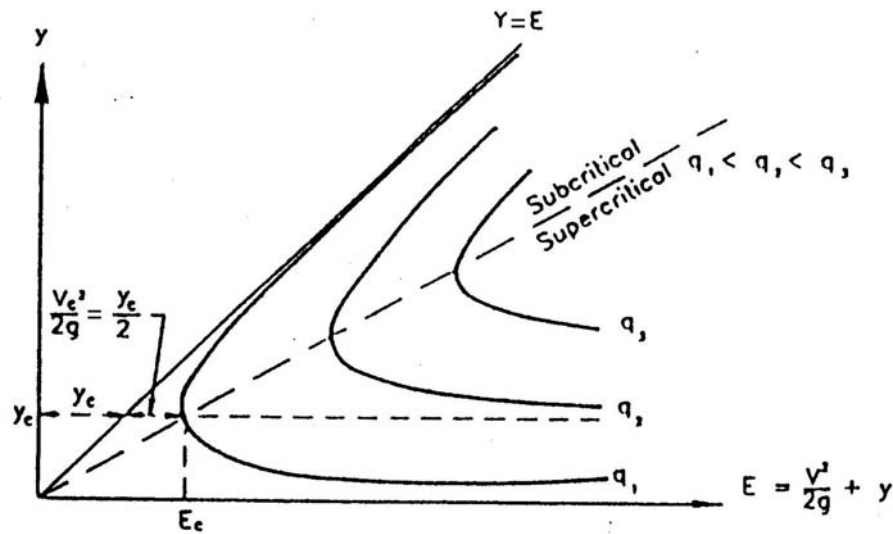
El flujo *subcrítico* es distinguido del supercrítico por el número de Froude (F), el cual representa la relación entre las fuerzas de inercia y gravitacionales y se define para un canal rectangular con la ecuación:

$$F = \frac{V}{(gy)^{0.5}} \quad (6.4)$$

V: velocidad media del flujo [m/s], g: aceleración de la gravedad (9.81 m/s²), y: tirante del flujo [m].

El *flujo crítico* ocurre cuando F es igual a 1. El tirante del flujo en esta condición se denomina *tirante crítico* y corresponde a la energía específica mínima para un determinado caudal (Figura N° 6.2).

Figura N° 6.2: Relación entre el tirante y la energía específica.



El *flujo subcrítico* ocurre cuando el F es menor que 1 ($F < 1$). En este estado de flujo, se producen tirantes mayores que el crítico, pequeñas perturbaciones en la superficie del agua viajan tanto hacia aguas arriba como aguas abajo y el control para el tirante del flujo está siempre ubicado aguas abajo.

El *flujo supercrítico* ocurre cuando F es mayor que 1 ($F > 1$). En este estado de flujo, ocurren tirantes menores que el tirante crítico, pequeñas perturbaciones de la superficie del agua viajan hacia aguas abajo y la ubicación del control del flujo está siempre aguas arriba.

El flujo subcrítico se caracteriza por velocidades relativamente bajas, tirantes profundos y pendientes suaves, mientras que el flujo supercrítico se caracteriza por mayores velocidades, tirantes menores y pendientes más pronunciadas.

La mayor parte de los flujos en canales abiertos naturales son subcríticos o próximos a críticos. Sin embargo, los flujos supercríticos no son infrecuentes para canales revestidos con pendientes pronunciadas.

Durante el diseño de un canal es importante evaluar el F del flujo, para determinar cuán próximo a la condición crítica se encuentra un flujo particular. Cuando F es próximo a 1, pequeñas perturbaciones del flujo pueden iniciar un cambio en el estado del flujo.

En una transición abrupta de flujo supercrítico a subcrítico puede ocurrir un *resalto* hidráulico, en cuyo caso se producen cambios significativos en el tirante y velocidad del flujo y se disipa energía. La posibilidad de un resalto debe ser considerada en todos los casos cuando el F es próximo a la unidad y/o cuando la pendiente del canal cambia abruptamente de fuerte a suave.

Como se ha visto en la Unidad 5, la determinación de la línea del gradiente de energía y de la línea del gradiente hidráulico se basa en el principio de conservación de la energía. El cálculo de la LGH es muy útil para el diseño hidráulico de canales abiertos.

Capacidad de conducción de un canal. Tirante y velocidad normal.

El concepto de flujo uniforme es muy importante para la solución de muchos problemas en la hidráulica de canales abiertos. Este flujo ocurre cuando:

- a) El tirante, el área mojada y la velocidad del flujo se mantienen constantes entre distintas secciones transversales del canal.
- b) La LGE, la LGH y el fondo del canal son paralelos ($S_f = S_w = S_o$; S_f : pendiente de la LGE, S_w : pendiente de la LGH y S_o : pendiente de fondo).

Bajo la hipótesis de este tipo de flujo, la capacidad de conducción de un canal puede calcularse a partir de la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} A \quad (6.5)$$

Q: caudal [m³/s], n: coeficiente de rugosidad para flujo en canal, R: radio hidráulico [m], S: pendiente de fondo del canal [m/m], A: área mojada [m²].

La adopción de un valor apropiado del coeficiente n se basa en la observación de las características geométricas y del material del lecho y márgenes. El valor del coeficiente n, además, disminuye con el aumento del tirante del flujo. Para coberturas de vegetación y otras, el valor del coeficiente puede variar significativamente de acuerdo al grado de sumergencia.

El tirante del flujo en un canal, para una geometría y pendiente longitudinal dadas, es principalmente una función del coeficiente de rugosidad del canal. Este tirante es denominado *tirante normal* y se determina a partir de (6.5).

No existe una solución analítica general de la ecuación de Manning para calcular el tirante correspondiente a un caudal Q dado, debido a que el área mojada y el radio hidráulico son funciones del mismo tirante.

El problema debe ser solucionado por medio de: a) tanteos, b) curvas adimensionales del factor de sección ($A R^{2/3} / b^{8/3}$) (b: ancho de fondo) como función del tirante normal (y_N / b) para secciones típicas o c) métodos numéricos.

Un método numérico es el de Newton Raphson, que aplica un procedimiento iterativo. Para ello, se define la función error:

$$f(y_j) = Q_j - Q \quad (6.6)$$

y_j : tirante calculado en la iteración j, Q_j : caudal correspondiente a y_j , Q: caudal para el cual se quiere calcular el tirante.

El método establece que la raíz y_j de la ecuación (6.6), para la cual se verifica $f(y_j) = 0$, se obtiene de:

$$y_{j+1} = y_j - \frac{f(y_j)}{f'(y_j)} \quad (6.7)$$

$f'(y_j)$: derivada primera de f con respecto a y evaluada en y_j .

De (6.6), como Q es constante se tiene:

$$\frac{df}{dy_j} = \frac{dQ_j}{dy_j} \quad (6.8)$$

Reemplazando (6.5) en (6.8) y derivando se obtiene:

$$\frac{df}{dy_j} = Q_j \left(\frac{2}{3R} \frac{dR}{dy} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dy} \right)_j \quad (6.9)$$

Reemplazando (6.9) en (6.7) y operando:

$$y_{j+1} = y_j - \frac{1 - \frac{Q}{Q_j}}{\left(\frac{2}{3R} \frac{dR}{dy} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dy} \right)_j} \quad (6.10)$$

Para un canal de sección rectangular:

$$A = B y \quad (6.11)$$

$$R = \frac{B y}{B + 2 y} \quad (6.12)$$

Reemplazando (6.11) y (6.12) en (6.10) y operando se obtiene:

$$y_{j+1} = y_j - \frac{1 - \frac{Q}{Q_j}}{\left(\frac{5B + 6y_j}{3y_j(B + 2y_j)} \right)} \quad (6.13)$$

La iteración finaliza cuando la diferencia entre 2 valores sucesivos de y es menor que una tolerancia prefijada. Una vez calculado el tirante, la velocidad se calcula con:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (6.14)$$

Ejemplo N° 6.1:

Calcular el tirante de un canal rectangular, para un caudal $Q = 5.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Las características del canal son: $n = 0.025$, $S_o = 0.001 \text{ m/m}$, $B = 3.0 \text{ m}$ (n : coeficiente de rugosidad de Manning, S_o : pendiente de fondo, B : ancho).

Aplicando (6.11), (6.12), (6.14), (6.5) y (6.13) se obtiene:

y_j [m]	A_j [m ²]	R_j [m]	V_j [m/s]	Q_j [m ³ /s]	y_{j+1} [m]
0.50	1.5	0.38	0.66	1.0	1.86
1.86	5.6	0.83	1.12	6.2	1.58
1.58	4.7	0.77	1.06	5.0	1.57
1.57	4.7	0.77	1.06	5.0	1.57

6.2 PARÁMETROS DE DISEÑO

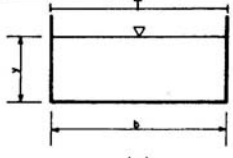
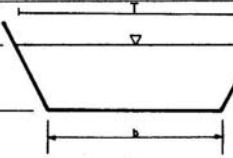
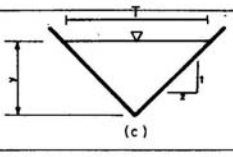
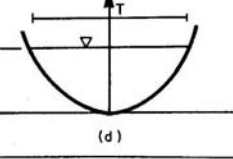
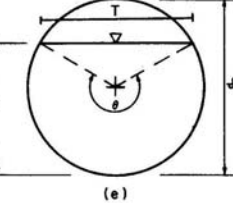
Caudal de diseño

Las cunetas laterales de caminos y canales medianos se diseñan, en general, para conducir caudales de diseño de entre 5 y 10 años de recurrencia. Los canales mayores se diseñan para recurrencias entre 25 y 100 años.

Geometría de la sección transversal

La Tabla N° 6.1 muestra las expresiones utilizadas para calcular el área mojada, perímetro mojado, radio hidráulico y ancho superficial para algunas secciones transversales típicas.

Tabla N° 6.1: Parámetros geométricos de distintas secciones transversales.

Canal tipo	Área A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Ancho superficial T
 (a)	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b
 (b)	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$
 (c)	zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$
 (d)	$\frac{1}{2}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$
 (e)	$\frac{1}{8}(\theta - \text{sen } \theta) d_0^2$	$\frac{1}{2}\theta d_0$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta}\right) d_0$	$2\sqrt{y(d_0 - y)}$

* Aproximación satisfactoria cuando $0 < 4y/T \leq 1$.

$$\text{Para } 4y/T > 1 \quad P = \frac{T}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{4y}{T}\right)^2} + \frac{T}{4y} \ln \left(\frac{4y}{T} + \sqrt{1 + \left(\frac{4y}{T}\right)^2} \right) \right]$$

y: profundidad del flujo (distancia vertical del punto más bajo de la sección de un canal a la superficie libre), T: ancho superficial (ancho de la sección del canal en la superficie libre), P: perímetro mojado (longitud de la línea de intersección de la superficie mojada del canal con el plano de la sección transversal normal a la dirección del flujo), R: radio hidráulico (cociente entre el área mojada y el perímetro mojado).

La mayoría de las cunetas y canales de drenaje son de forma trapecial.

Taludes

Los taludes de un canal no revestido dependen principalmente de las propiedades mecánicas del suelo a excavar, ya que no deben exceder el ángulo de reposo del suelo o del material de revestimiento (Tabla N° 6.2). Otros factores a ser considerados para determinar las pendientes laterales son los métodos constructivos y el tamaño del canal.

El diseño de cunetas debe estar integrado con el diseño geométrico de la calzada, contemplando criterios de seguridad y un adecuado drenaje de la calzada. En canales laterales a rutas (sin guardarrail), la seguridad del tránsito debe ser considerada y las pendientes de los taludes deben ser de 4:1 (horizontal : vertical) o más bajas.

Para canales revestidos, U.S. Bureau of Reclamation ha sugerido la estandarización de una pendiente de 1.5:1.0 para los tamaños usuales. Una ventaja de esta pendiente es que es suficientemente plana para permitir el uso de todo tipo de revestimiento y tratamientos de terminación.

Tabla N° 6.2: Taludes (H:V) recomendados en función del material del lecho (fuente: French, 1988).

Material	Talud
Roca	casi vertical
Suelos orgánicos	¼:1
Arcilla dura o tierra con revestimiento de concreto	¼:1 to 1:1
Tierra con revestimiento de piedra o tierra para grandes canales	1:1
Arcilla firme o tierra para pequeñas zanjás	1¼:1
Tierra arenosa suelta	2:1
Limos arenosos o arcilla porosa	3:1

Pendiente longitudinal

La pendiente de fondo de un canal generalmente está determinada por el perfil longitudinal del terreno natural a lo largo de su traza (salvo terrenos muy llanos), requerimientos de diseño y por restricciones, como la cota de fondo del cuerpo de agua receptor.

En la medida que sea posible, se deben evitar las pendientes muy bajas, menores a 0.1% = 0.00100 m/m), con el objeto de prevenir procesos de sedimentación y crecimiento de la vegetación. En cuencas muy llanas, muchas veces no es posible satisfacer este criterio y se adoptan pendientes del orden de 0.00010 m/m, lo que implica un mayor costo de mantenimiento de los canales.

En caso de canales no revestidos erosionables, también se deben evitar las pendientes muy elevadas, mayores al 2%, con el fin de prevenir procesos de erosión. Canales con pendientes mayores al 2% pueden requerir el uso de revestimiento flexible para mantener la estabilidad. La mayoría de los materiales de revestimiento flexibles son adecuados para proteger canales con pendientes de hasta el 10%, con excepción de algunos pastos. Revestimientos como el rip-rap o gaviones de piedra partida son más adecuados para la protección de canales muy empinados, con pendientes mayores al 10%. Los revestimientos rígidos, como losas de concreto, son altamente susceptibles a tener fallas de inestabilidad

estructural, debido a desbordes del canal, congelamiento del agua, deformaciones del terreno y problemas de subpresión.

Altura libre

La altura libre de un canal es la distancia vertical entre el terreno natural y la superficie de agua libre, cuando el canal conduce el caudal de diseño. Su propósito es prevenir el desborde del canal producido por oleaje por viento, resaltos hidráulicos, sobre elevación del agua en curvas, efectos de obstrucciones o sedimentación o un aumento del coeficiente de rugosidad. La importancia de este parámetro depende de las consecuencias del desborde.

Una estimación preliminar de la altura libre (Chow, 1959) puede hacerse con la expresión:

$$F = 0.3048 \sqrt{3.28 C y} \quad (6.15)$$

F: altura libre [m], C: coeficiente empírico que varía entre 1.5 (para una capacidad de conducción del canal de 0.6 m³/s) a 2.5 (para capacidades de 85 m³/s o mayores), y: tirante [m].

En cunetas o canales medianos con flujo permanente, una altura libre de aproximadamente 0.15 m es generalmente considerada adecuada. En cunetas o canales medianos temporarios, no es necesario considerar altura libre (HEC22, FHWA, 2001). En canales mayores, la altura libre mínima generalmente adoptada es de 0.30 m (1 pie).

Sobreelevación en curvas

En la proximidad de una curva, el flujo en un canal abierto induce fuerzas centrífugas originadas por el cambio de dirección del flujo. Esto resulta en una sobreelevación de la superficie del agua sobre la margen externa de la curva y puede causar que el flujo supere la margen si no se prevé una revancha adecuada. Para flujo subcrítico, la sobreelevación puede ser estimada por:

$$\Delta d = \frac{V^2 T}{g R_c} \quad (6.16)$$

Δd : diferencia de elevación de la superficie del agua entre las márgenes del canal en una curva [m], V: velocidad media [m/s], T: ancho superficial del canal [m], g: aceleración de la gravedad, 9.81 m/s² y R_c : radio de curvatura al eje del canal [m].

La elevación de la superficie del agua en la margen externa del canal será $\Delta d/2$ más alta que el nivel del agua en el eje del canal y la elevación en la margen interna será $\Delta d/2$ más baja.

6.3 DISEÑO DE CANALES EROSIONABLES

Se denominan de este modo a aquellos canales no revestidos cuya solera y taludes son de material suelto erosionable.

La *estabilidad* de un canal se alcanza cuando el material que forma la solera y taludes resiste efectivamente las fuerzas erosivas del flujo y la velocidad de éste es suficiente para evitar procesos generalizados de sedimentación.

La *velocidad máxima permitida* o *velocidad no erosionante* es la mayor velocidad media que no causa erosión en el cuerpo del canal. Depende del tipo de material que constituye el lecho y del contenido de sedimentos del agua transportada. Fortier et al (1925) publicaron valores recomendados de velocidades permitidas del canal, para canales rectos bien estacionados, de pequeña pendiente y para tirantes menores a 0.9 m (Tabla N° 6.3).

Tabla N° 6.3: Velocidades permitidas del canal V [m/s] y esfuerzos tractivos admisibles τ_0 [N/m²] para distintas texturas de suelo (fuente: Fortier et al., 1925).

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 coloidales	0.020	0.457	1.29	0.762	3.59
Franco arenoso, no coloidal	0.020	0.533	1.77	0.762	3.59
Franco limoso, no coloidal	0.020	0.610	2.30	0.914	5.27
Limos aluviales, no coloidales	0.020	0.610	2.30	1.07	7.18
Tierra negra firme común	0.020	0.762	3.59	1.07	7.18
Ceniza volcánica	0.020	0.762	3.59	1.07	7.18
Arcilla dura, muy coloidal	0.025	1.14	12.4	1.52	22.0
Limos aluviales, coloidales	0.025	1.14	12.4	1.52	22.0
Pizarra y tepetate	0.025	1.83	32.1	1.83	32.1
Grava fina	0.020	0.762	3.59	1.52	15.3
Tierra negra graduada a piedritas cuando no es coloidal	0.030	1.14	18.2	1.52	31.6
Limos graduados a piedritas cuando es coloidal	0.030	1.22	20.6	1.68	38.3
Grava gruesa no coloidal	0.025	1.22	14.4	1.83	32.1
Piedritas y ripio	0.035	1.52	43.6	1.68	52.7

Nota: la denominación “pizarra y tepetate” corresponde a arcilla esquistosa ó capas duras.

La tabla también muestra valores recomendados para el coeficiente de rugosidad n para varios materiales y valores de las fuerzas tractivas permitidas.

Las velocidades permitidas para canales sinuosos *deben ser menores* que las correspondientes a canales rectos, para prevenir efectos erosivos. Los porcentajes de reducción sugeridos son: 5% para canales ligeramente sinuosos, 13% para canales moderadamente sinuosos y 22% para canales muy sinuosos (Lane, 1955).

La *velocidad mínima admisible* o *velocidad no depositante* es la menor velocidad media que no permite la sedimentación y el crecimiento vegetal. Generalmente, una velocidad de 0.6 a 0.9 m/s previene la sedimentación cuando la concentración de finos es pequeña. Una velocidad de 0.8 m/s es, por lo general, suficiente para prevenir el crecimiento de vegetación que podría afectar en forma significativa el flujo en el canal.

Para el diseño de canales erosionables se aplican dos *métodos*: a) *método de la velocidad permitida* y b) *método de la fuerza tractiva*

El primero es de naturaleza empírica y ha sido aplicado al diseño de numerosos canales en todo el mundo. Sin embargo, el segundo tiene una base conceptual más sólida, ya que está basado en los procesos físicos actuantes sobre el lecho.

Método de la velocidad permitida

Conocidos el caudal de diseño Q_d y la pendiente del tramo de canal, para diseñar la sección transversal del canal se aplican los siguientes pasos:

- Se adopta la forma de la sección transversal (Tabla N° 6.1), el talud de las márgenes (Z) (Tabla N° 6.2), el coeficiente de rugosidad (n) y la velocidad máxima permitida (V) (Tabla N° 6.3).
- Se calcula el radio hidráulico, R, despejando de la ecuación de Manning (se aplica la velocidad máxima permitida):

$$R = \left(\frac{n V}{S^{1/2}} \right)^{3/2} \quad (6.17)$$

- Se calcula el área mojada como cociente entre el caudal de diseño y la velocidad máxima permitida:

$$A = \frac{Q_d}{V} \quad (6.18)$$

- Se calcula el perímetro mojado:

$$P = \frac{A}{R} \quad (6.19)$$

- Se calculan b e y resolviendo simultáneamente las ecuaciones de A y P (Tabla N° 6.1). La solución puede obtenerse utilizando ábacos en función de A y R.

Alternativamente, para una sección trapezoidal, de la expresión de P se despeja b:

$$b = P - 2 y \sqrt{1 + z^2} \quad (6.20)$$

Reemplazando (6.20) en la expresión de A:

$$A = \left(P - 2 y \sqrt{1 + z^2} \right) y + z y^2 \quad (6.21)$$

Operando y aplicando la resolvente:

$$y = \frac{-P + \sqrt{P^2 + 4 \left(z - 2 \sqrt{1 + z^2} \right) A}}{2 \left(z - 2 \sqrt{1 + z^2} \right)} \quad (6.22)$$

Nota: La aplicación de (6.22) puede dar resultados inconsistentes para pendientes bajas.

Ejemplo N° 6.2:

Calcular el ancho del fondo y la profundidad del flujo de un canal trapecial que tiene una pendiente de 0.0015 y conduce un caudal de diseño de 5.0 m³/s. El canal es excavado en tierra, el material del lecho es limo aluvial coloidal y conducirá agua con escaso sedimento.

Para las condiciones dadas, se adopta: $n = 0.025$, $z = 1.5$ y $V = 1.14$ m/s.

$Q_d =$	5.0 m ³ /s
$V =$	1.14 m/s
$n =$	0.025
$S =$	0.0015 m/m
$z =$	1.5
$R =$	0.63 m
$A =$	4.39 m ²
$P =$	6.95 m
$y =$	0.85 m
$b =$	3.88 m
$F =$	0.30 m

Método de la fuerza tractiva

El método de la fuerza tractiva es el procedimiento recomendado para el diseño de canales no revestidos erosionables (French, 1988).

La erosión perimetral del canal ocurre cuando las partículas del perímetro son sometidas a fuerzas con magnitud suficiente para producir el movimiento de las partículas.

La *fuerza tractiva* es la fuerza producida por el flujo de agua sobre las partículas que componen el perímetro del canal.

Para flujo uniforme, la fuerza tractiva se aproxima a la componente de la fuerza gravitacional, que actúa sobre el agua dentro del volumen de control, paralela al fondo del canal y dirigida hacia aguas abajo:

$$F_T = \gamma A L S \quad (6.23)$$

F_T : fuerza tractiva, γ : peso específico del agua, A : área mojada, L : longitud del volumen de control, S : pendiente del canal.

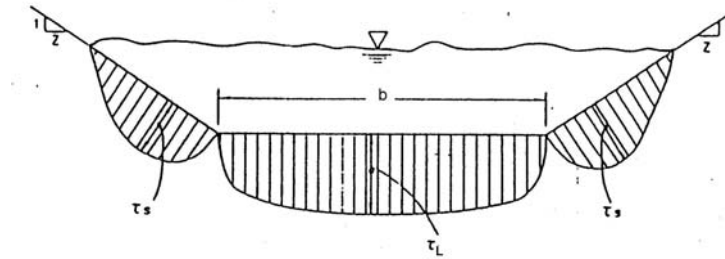
La fuerza tractiva por unidad de superficie es:

$$\tau_0 = \frac{\gamma A L S}{P L} = \gamma R S \cong \gamma y_N S \quad (6.24)$$

τ_0 : esfuerzo tractivo sobre el perímetro mojado (valor medio de la fuerza tractiva por unidad de área),
 P : perímetro mojado. En un canal ancho, $R \cong y_N$.

El esfuerzo de corte en canales no es uniformemente distribuido a lo largo del perímetro mojado del canal, por lo que se definen 2 esfuerzos tractivos, uno sobre el fondo (τ_L) y otro sobre los taludes (τ_s). Una distribución típica del esfuerzo de corte en un canal trapecial se muestra en la Figura N° 6.3. El esfuerzo tiende a cero en las esquinas, con un máximo en el lecho (en el eje del canal) y un máximo en cada margen (cerca del tercio inferior del talud).

Figura N° 6.3: Distribución de esfuerzos de corte en los taludes y fondo.



τ_L : esfuerzo tractivo sobre el fondo, τ_s : esfuerzo tractivo sobre los taludes, b: ancho de fondo.

El *esfuerzo tractivo admisible*, τ_b , es el máximo esfuerzo que no causa erosión en el fondo del canal.

A partir de una recopilación de información de canales reales, Lane (1955) determinó relaciones de τ_b en función del tamaño de las partículas del lecho (material no cohesivo) y distintas cargas de sedimentos en el agua (Figura N° 6.4.a, $\tau_b [N/m^2] = 47.88 \tau_b [lb/ft^2]$).

Para canales construidos con material cohesivo, Chow (1959) presentó los valores de esfuerzo tractivo admisible en función de la relación de vacíos (grado de compactación) (Figura N° 6.4.b).

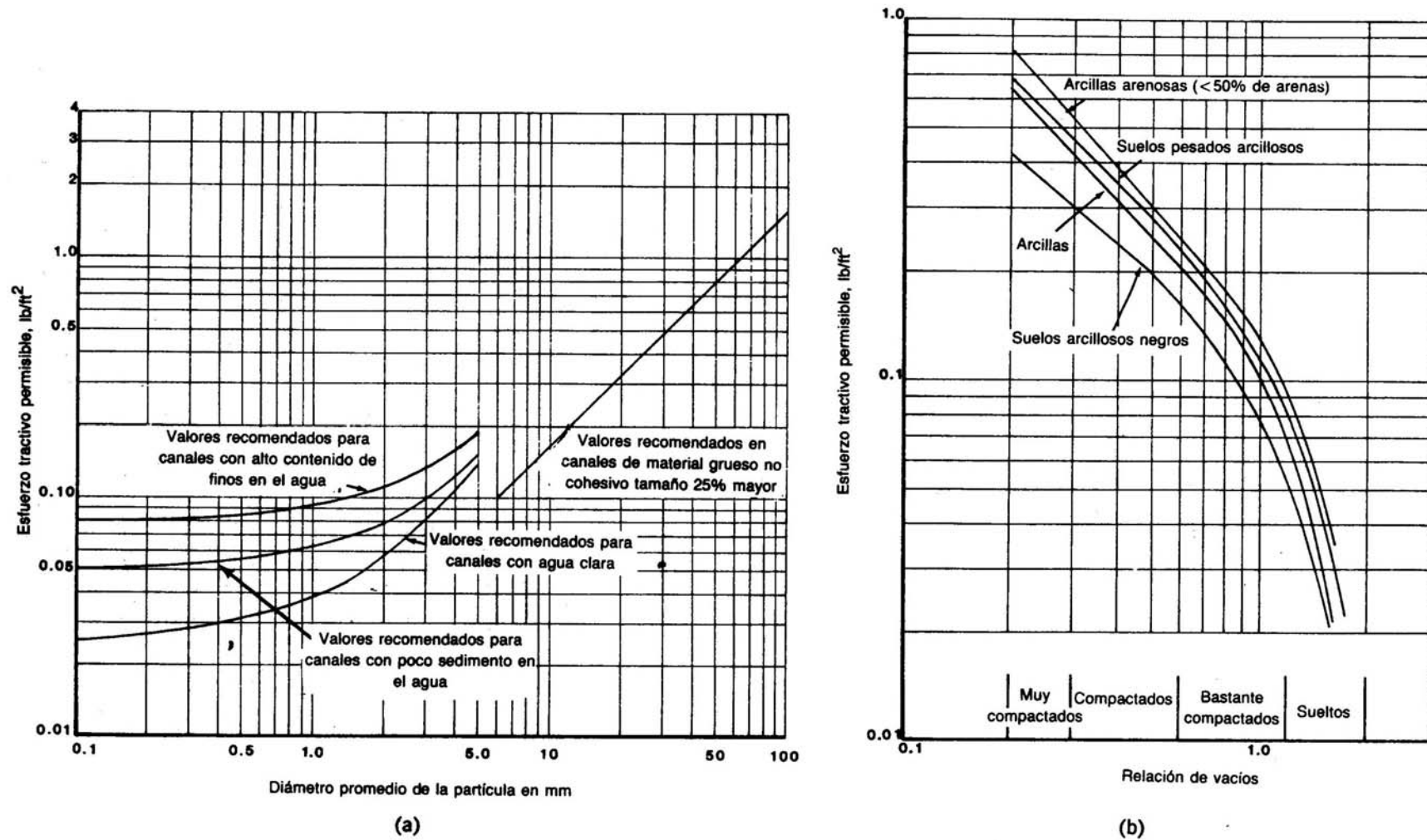
Como los canales sinuosos socavan más fácilmente que los rectos, Lane (1955) propone reducir el esfuerzo tractivo admisible en casos de sinuosidad del canal, afectando τ_b por un coeficiente reductor C_s (Tabla N° 6.4):

Tabla N° 6.4: Coeficientes de corrección por sinuosidad.

Grado de sinuosidad	C_s
Recto	1.00
Poco sinuoso	0.90
Moderadamente sinuoso	0.75
Muy sinuoso	0.60

Recto: canal con alineación recta o ligeramente curva, construido en general en planicies horizontales. Poco sinuoso: tiene un grado de curvatura típico de una topografía suavemente ondulada. Moderadamente sinuoso: tiene un grado de curvatura típico de terrenos ondulados. Muy sinuoso: tiene un grado de curvatura típico de pie de monte o montañas (Lane, 1955).

Figura Nº 6.4: Valores de τ_b recomendados para canales construidos en material no cohesivo (Lane, 1955) (a) y cohesivo (b) (Chow, 1959).



Los valores típicos de tamaño de sedimento para distintos tipos de suelo se muestran en la Tabla N° 6.5 (Schulz, 1973).

Tabla N° 6.5: Tamaños típicos de sedimentos según su textura.

Suelo	Tamaño [mm]
Limo	0.05 – 0.02
Limo grueso	0.10 – 0.05
Arena fina	0.20 – 0.10
Arena mediana	0.50 – 0.20
Arena gruesa	1.00 – 0.50
Arena muy gruesa	2.00 – 1.00
Grava fina	5.00 – 2.00

Para el diseño del canal se pueden presentar 2 casos, de acuerdo a si el fondo o los taludes son factores limitantes para el diseño.

Caso A: la estabilidad del fondo es un factor limitante (caso más común: suelos finos no cohesivos o suelos cohesivos).

Reemplazando τ_b por τ_0 en (6.24), se despeja el tirante normal:

$$y_N = \frac{\tau_b}{\gamma S} \quad (6.25)$$

y_N : tirante normal [m], τ_b : esfuerzo tractivo admisible en el fondo del canal (corregido por sinuosidad) [N/m²], γ : peso específico del agua ($\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$ a 15.6 °C), S : pendiente de fondo [m/m].

Una vez conocido y_N , se calcula el ancho de fondo b por aproximación, de manera que el caudal conducido por el canal (con y_N y b) sea igual al caudal de diseño.

Procedimiento:

Conocidos el caudal de diseño Q_d y la pendiente del tramo de canal, para diseñar la sección transversal se aplican los siguientes pasos:

- Se adoptan el coeficiente de rugosidad n y el talud Z (Tabla N° 6.2).
- Se estima el coeficiente de corrección por sinuosidad C_s (Tabla N° 6.4).
- Se determina el esfuerzo tractivo de fondo admisible τ_b (Tabla N° 6.3 ó Figura N° 6.4) y se lo corrige por una eventual sinuosidad del canal.
- Se calcula el tirante normal y_N con (6.25).
- Se calcula el ancho de fondo b por aproximación, de manera que el caudal Q (conducido con y_N y b) sea $Q \cong Q_d$.
- Se verifica la velocidad del flujo (6.14).
- Se adopta una altura libre (6.15).

Ejemplo N° 6.3:

Se excavará un canal recto en un terreno limo-arcilloso, para conducir un caudal de diseño de 5 m³/s, con una pendiente de 0.001 m/m. El canal será de sección trapezoidal, sin revestimiento y transportará agua con escaso sedimento. Se pide dimensionar la sección transversal del canal.

Datos:

Suelo limo-arcilloso (limo coloidal)

$S = 0.001$ m/m

$Q_d = 5.0$ m³/s

$\gamma = 9810$ N/m³

$n = 0.025$ (coeficiente de rugosidad, tabla)

$Z = 1.5$ (talud, Tabla N° 6.2)

$C_s = 1.0$ (coeficiente de corrección por sinuosidad, Tabla N° 6.4)

$\tau_b = 12.4$ N/m² (esfuerzo tractivo de fondo admisible, Tabla N° 6.3)

$y_N = 1.26$ m (tirante normal, ec. 6.25)

Procedimiento de aproximación

$b =$	1.00	1.50	2.00 m	(ancho de fondo propuesto)
$B =$	4.79	5.29	5.79 m	(ancho superficial, ec. Tabla N° 6.1)
$A =$	3.66	4.29	4.92 m ²	(área mojada, ec. Tabla N° 6.1)
$P =$	5.56	6.06	6.56 m	(perímetro mojado, ec. Tabla N° 6.1)
$R =$	0.66	0.71	0.75 m	(radio hidráulico, ec. Tabla N° 6.1)
$Q =$	3.51	4.32	5.15 m ³ /s	(caudal, ec. 6.5)

$V = 0.96$ 1.01 1.05 m/s (velocidad del flujo, ec. 6.14)

$F = 0.30$ 0.30 0.30 m (altura libre adoptada)

Caso B: la estabilidad de los taludes es un factor limitante.

Para canales excavados en suelos no cohesivos gruesos o revestidos con grava o rip-rap, con pendientes laterales más empinadas que 3:1, la estabilidad de los taludes puede ser un factor limitante para el diseño.

Para estos casos, se definen las relaciones:

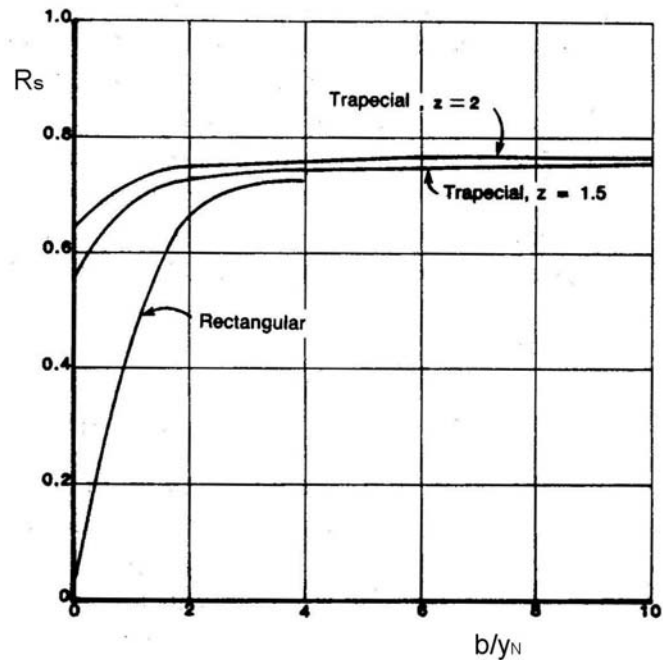
$$R_s = \tau_s / \tau_0 \quad (6.26)$$

$$R_L = \tau_L / \tau_0 \quad (6.27)$$

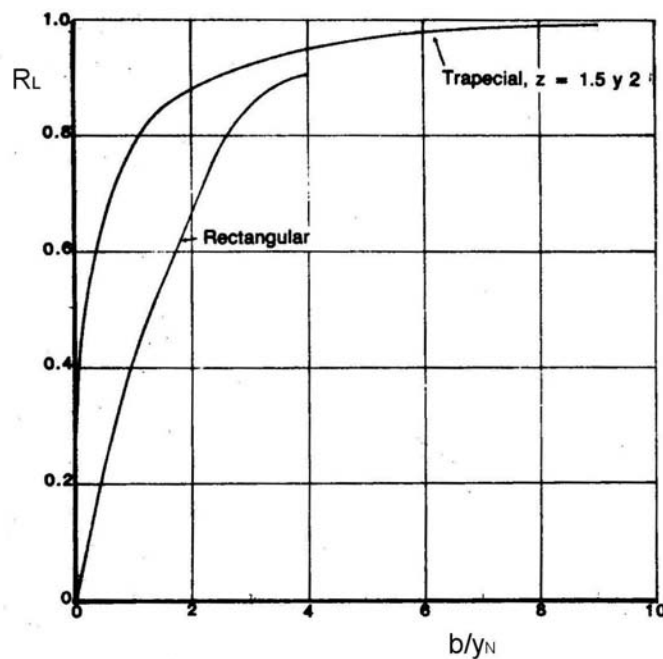
R_s : razón de esfuerzo tractivo en taludes, τ_s : esfuerzo tractivo en taludes, R_L : razón de esfuerzo tractivo en el fondo, τ_L : esfuerzo tractivo en fondo.

Las Figuras N° 6.5.a y N° 6.5.b muestran la variación de las relaciones R_s y R_L con el parámetro b/y_N .

Figura N° 6.5: Variación de R_s (a) y de R_L (b) con el parámetro b/y_N .



(a)



(b)

Se observa que para canales trapeciales anchos, el esfuerzo tractivo en el fondo es aproximadamente igual a τ_0 ($R_L \cong 1.00$) y en los taludes es igual a $0.76 \tau_0$ ($R_s = 0.76$).

Cuando una partícula del perímetro está a punto de moverse, las fuerzas que producen el movimiento están en equilibrio con las fuerzas que resisten el movimiento.

Para una partícula del fondo, la igualdad de fuerzas se expresa:

$$A_e \tau_L = W_s \tan \alpha \quad (6.28)$$

A_e : área efectiva, τ_L : esfuerzo tractivo sobre el fondo, W_s : peso de la partícula sumergida, α : ángulo de reposo de la partícula (máximo ángulo de talud en el que materiales sueltos tales como tierras o rocas fragmentadas permanecen estables).

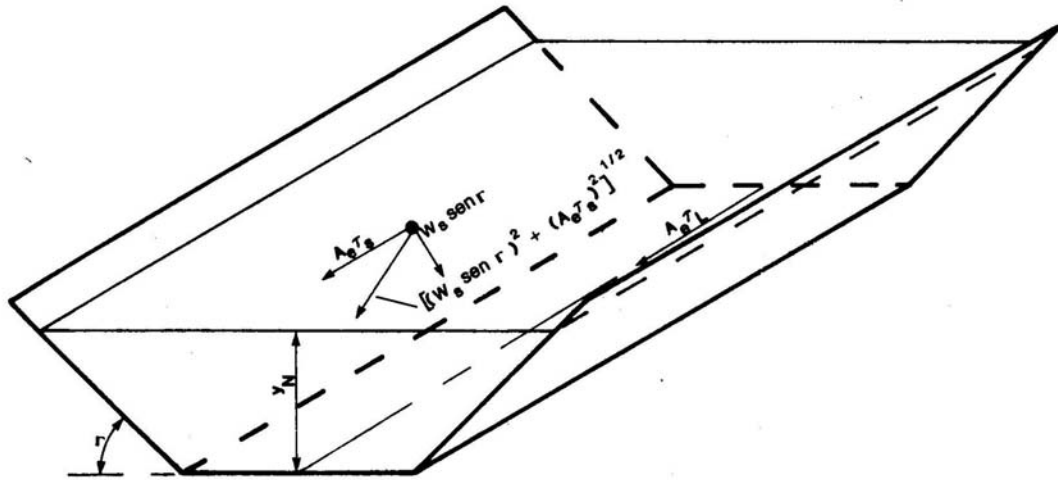
El primer miembro representa la fuerza tractiva sobre el fondo y el segundo miembro representa la fuerza que resiste el movimiento, igual al producto de la fuerza gravitacional por un coeficiente de fricción que se aproxima por $\tan \alpha$.

De donde:

$$\tau_L = \frac{W_s}{A_e} \tan \alpha \quad (6.29)$$

Una partícula del talud está sujeta a una fuerza tractiva $\tau_s A_e$ y a una componente hacia aguas abajo del talud $W_s \sin \Gamma$. Estas fuerzas y su resultante se muestran en la Figura N°6.6.

Figura N° 6.6: Análisis de las fuerzas que actúan sobre una partícula que se resiste al movimiento en el perímetro del canal (French, 1988).



Para una partícula en el talud, la igualdad de fuerzas se expresa:

$$\sqrt{(W_s \sin \Gamma)^2 + (A_e \tau_s)^2} = W_s \cos \Gamma \tan \alpha \quad (6.30)$$

τ_s : esfuerzo cortante sobre el talud, Γ : ángulo del talud: $\Gamma[^\circ] = a \tan(1/Z)(180/\pi)$.

El primer miembro representa la resultante de la fuerza sobre el talud que tiende a poner en movimiento a la partícula. El segundo miembro representa la fuerza que resiste el movimiento, que es la componente gravitacional $W_s \cos \Gamma$ multiplicada por el coeficiente de fricción $\tan \alpha$.

De (6.30):

$$\tau_s = \frac{W_s}{A_e} \cos \Gamma \tan \alpha \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \Gamma}{\tan^2 \alpha}} \quad (6.31)$$

Se define como razón de esfuerzo tractivo al cociente entre τ_s y τ_L . De (6.29) y (6.31), se obtiene:

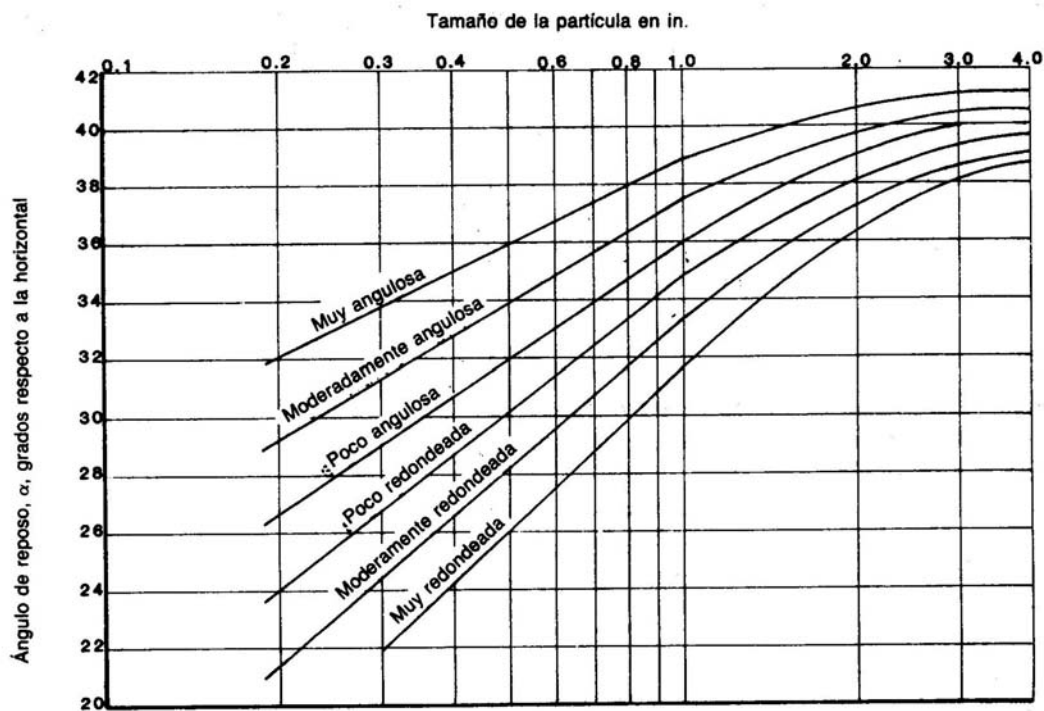
$$K = \frac{\tau_s}{\tau_L} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \Gamma}{\sin^2 \alpha}} \quad (6.32)$$

K: razón de esfuerzos tractivos.

Se observa que K depende del ángulo del talud (Γ) y del ángulo de reposo del material perimetral (α). Debe ser $\Gamma \leq \alpha$ (si no se cumple esta condición, el material rueda por el talud hacia el lecho).

En caso de suelos cohesivos o finos no cohesivos, α es muy pequeño y no es aplicable (6.32). En estos casos, las fuerzas cohesivas predominan sobre la componente de la fuerza de gravedad que tiende a hacer rodar la partícula por el talud y no es aplicable el Caso B (se aplica el Caso A). Para suelos no cohesivos gruesos, α es directamente proporcional al tamaño y angulosidad de la partícula (Figura N° 6.7).

Figura N° 6.7: Ángulos de reposo para materiales no cohesivos (Lane, 1955) (1 in = 25.4mm).



Si se reemplaza $\tau_L = \tau_b$ en (6.32), se tiene:

$$\tau_s = K \tau_b \quad (6.33)$$

Por otra parte:

$$\tau_s = R_s \tau_0 = R_s \gamma y_N S \quad (6.34)$$

Igualando miembro a miembro (6.33) y (6.34), se obtiene:

$$y_N = \frac{K \tau_b}{R_s \gamma S} \quad (6.35)$$

y_N : tirante normal [m], K : razón de esfuerzos tractivos [ad], τ_b : esfuerzo tractivo admisible en el fondo del canal (corregido por sinuosidad) [N/m^2], R_s : razón de esfuerzo tractivo en taludes [ad], γ : peso específico del agua ($\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$ a 15.6°C), S : pendiente de fondo [m/m].

Una vez conocido y_N , se calcula el ancho de fondo necesario para que el canal conduzca el caudal de diseño con dicho tirante. Para ello se prueba con distintas relaciones b/y_N y el ancho se calcula:

$$b = \left(\frac{b}{y_n} \right) y_n \quad (6.36)$$

El esfuerzo de corte en el fondo se calcula:

$$\tau_L = R_L \tau_0 = R_L \gamma y_N S \quad (6.37)$$

Se debe verificar que este esfuerzo sea menor o igual al esfuerzo de corte admisible en el fondo: $\tau_L \leq \tau_b$.

Procedimiento:

Conocidos el caudal de diseño Q_d y la pendiente del tramo de canal, para diseñar la sección transversal se aplican los siguientes pasos:

- i) Se adoptan el coeficiente de rugosidad n y el talud Z (Tabla N° 6.2).
- ii) Se estima el ángulo de reposo α en función del tamaño del material perimetral (Figura N° 6.7).
- iii) Se estima el coeficiente de corrección por sinuosidad C_s (Tabla N° 6.4).
- iv) Se calcula la razón de esfuerzos tractivos K (6.32).
- v) Se determina el esfuerzo tractivo de fondo admisible τ_b (Figura N° 6.4.a) y se lo corrige por una eventual sinuosidad del canal.
- vi) Se adopta un valor para la relación b/y_N y se determina R_s (Figura N° 6.5.a).
- vii) Se calcula el tirante normal y_N con (6.35).
- viii) Se calcula el ancho de fondo b con (6.36).
- ix) Se calculan el área mojada A , el perímetro mojado P y el radio hidráulico R , a partir de y_N y b , con las expresiones de la Tabla N° 6.1.
- x) Se calcula el caudal Q con (6.5).
- xi) Si $Q < Q_d$, se aumenta b/y_N y se vuelve al paso vi). Si $Q > Q_d$, se reduce b/y_N y se vuelve al mismo paso. El proceso continúa hasta que $Q \cong Q_d$ y se adopta el b que cumple esta condición.

xii) Se obtiene R_L (Figura N° 6.5.b), se calcula τ_L (6.37) y se verifica $\tau_L \leq \tau_b$.

xiii) Se verifica la velocidad del flujo (6.14).

xiv) Se adopta la altura libre.

Ejemplo N° 6.4:

Se excavará un canal en un terreno aluvial grueso, con 25% de las partículas con diámetros iguales o mayores a 30 mm, para conducir un caudal de diseño de 10 m³/s, con una pendiente de 0.0016 m/m. La topografía de la zona es moderadamente ondulada y el material del perímetro del canal es moderadamente redondeado. El canal será de sección trapecial, sin revestimiento. Se pide dimensionar la sección transversal del canal.

Datos:

d ₂₅ =	30 mm	(25% del material con diámetro ≥ 30 mm)
S =	0.0016 m/m	(pendiente del canal)
Q _d =	10.0 m ³ /s	(caudal de diseño)
γ =	9810 N/m ³	(peso específico del agua)
n =	0.025	(coeficiente de rugosidad, tabla)
Z =	2.0	(talud, Tabla N° 6.2)
Γ =	26.6 °	0.46 rad (ángulo del talud) $\Gamma [^\circ] = a \tan (1/Z)(180/\pi)$
α =	34 °	0.59 rad (ángulo de reposo, Figura N° 6.7)
C _s =	0.75	(coeficiente de corrección por sinuosidad, Tabla N° 6.4)
τ_b =	0.47 lb/ft ²	22.5 N/m ² (esfuerzo tractivo de fondo admisible, Figura N° 6.4.a)
C _s τ_b =	16.9 N/m ²	
K =	0.60	(razón de esfuerzos tractivos, ec. 6.32)

Procedimiento de aproximación

b/y _N =	4.00	6.00	8.00	10.00	9.00	8.75	
R _s =	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	(Figura N° 6.5.a)
y _N =	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86 m	(ec. 6.35)
b =	3.44	5.16	6.89	8.61	7.75	7.53 m	(ec. 6.36)
B =	6.89	8.61	10.33	12.05	11.19	10.97 m	(ec. Tabla N° 6.1)
A =	4.44	5.93	7.41	8.89	8.15	7.96 m ²	(ec. Tabla N° 6.1)
P =	7.29	9.01	10.73	12.46	11.60	11.38 m	(ec. Tabla N° 6.1)
R =	0.61	0.66	0.69	0.71	0.70	0.70 m	(ec. Tabla N° 6.1)
Q =	5.11	7.17	9.26	11.36	10.31	10.04 m ³ /s	(ec. 6.5)

R _L =	0.99	(Figura N° 6.5.b)
τ_L =	13.37 N/m ²	(ec. 6.37) $\tau_L \leq \tau_b$
V =	1.3 m/s	(velocidad del flujo, ec. 6.14)
F =	0.30 m	(altura libre adoptada)

Esfuerzo tractivo en curvas

El flujo en proximidades de curvas crea corrientes secundarias que generan un esfuerzo de corte mayor sobre los taludes y fondo del canal, comparado con tramos rectos, lo cual requiere consideraciones de diseño adicionales dentro y aguas abajo de la curva.

Las áreas de alto esfuerzo tractivo en curvas se muestran en la Figura N° 6.8.

El esfuerzo de corte en una curva es una función de la razón entre la curvatura del canal y el ancho de fondo y se estima con la relación:

$$\tau_c = K_b \tau_0 = K_b \gamma y_N S \quad (6.38)$$

τ_c : esfuerzo tractivo en curvas [N/m²], K_b : coeficiente de curva, función de R_c/b (Figura N° 6.9), R_c : radio de curvatura al eje del canal [m], b : ancho de fondo [m], y_N : tirante normal [m], γ : peso específico del agua ($\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$ a $15.6 \text{ }^\circ\text{C}$), S : pendiente de fondo [m/m].

Figura N° 6.8: Zonas de altos esfuerzos de corte en curvas.

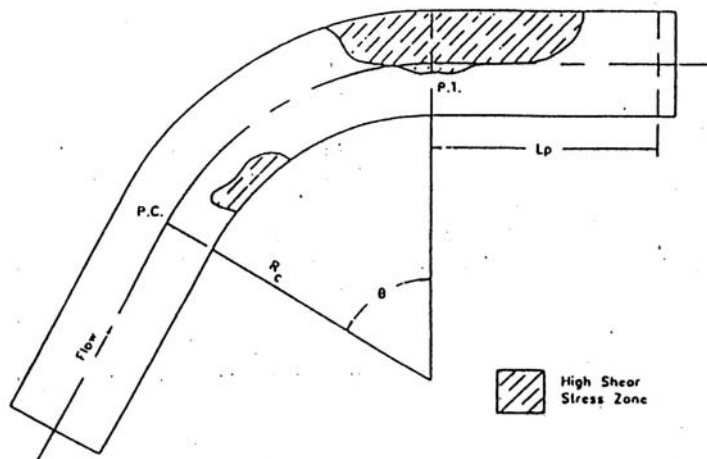
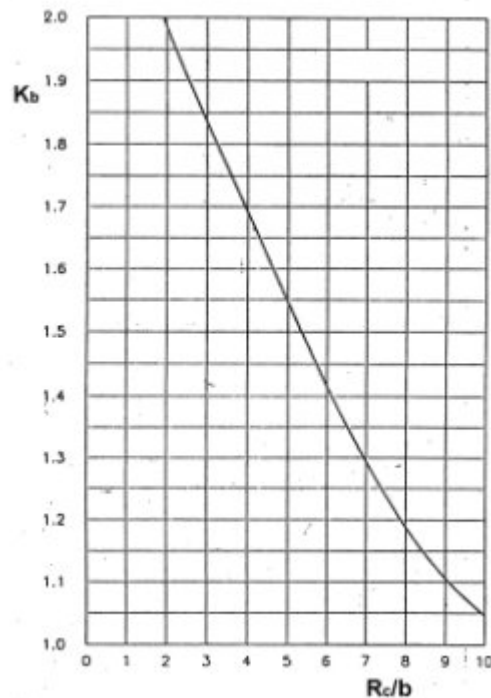


Figura N° 6.9:



Se observa que para un ancho dado, a medida que la curva es más cerrada aumenta el esfuerzo tractivo en la curva. Para un radio de curvatura igual al 10 veces el ancho de fondo, prácticamente no existe aumento del esfuerzo de corte en la curva.

El esfuerzo de corte aumentado producido por la curva persiste aguas abajo de la curva a una distancia L_p , como se muestra en la Figura N° 6.8. Esta distancia puede ser calculada usando la siguiente relación:

$$L_p = \frac{0.736 R^{7/6}}{n_b} \quad (6.39)$$

L_p : longitud de protección (longitud del esfuerzo tractivo aumentado debido a la curva) aguas abajo del punto de tangencia [m], n_b : coeficiente de rugosidad del canal en la curva, R : radio hidráulico [m].

6.4 PROCEDIMIENTO GENERAL DE DISEÑO

El procedimiento general para diseño de cunetas y canales medianos incluye los siguientes pasos.

A. *Diseño hidráulico preliminar.*

i) *Se determina la traza de la cuneta o canal sobre un mapa de la cuenca.*

Las trazas de los canales en general son coincidentes con las calles colectoras (zona urbana) y con las líneas naturales de escurrimiento (zonas suburbana y rural). En ocasiones, para evitar el ingreso de escorrentía desde el área rural al área urbana, suelen construirse canales perimetrales en la zona suburbana, con una traza normal al sentido general del escurrimiento.

Se identifican las secciones de control, donde se determinarán los caudales de diseño, todas las restricciones impuestas por la infraestructura existente (cruce de caminos o ferrocarriles, cruce de otros servicios, alcantarillas, etc.) y las secciones de salida.

ii) *Se establecen los parámetros preliminares de la sección transversal.*

Los taludes se adoptan en base a las características mecánicas del suelo y contemplando criterios de seguridad, económicos y estéticos.

Se adopta el coeficiente de rugosidad en base a las características del material a excavar o del revestimiento.

iii) *Se adopta un perfil longitudinal preliminar para el fondo del canal.*

Las pendientes se adoptan, en general, similares a la de la superficie del terreno, salvo terrenos muy llanos, con el fin de conectarlos con niveles compatibles a los cursos de descarga naturales de aguas abajo.

Se grafica el perfil longitudinal del fondo del canal (FC) superpuesto con los perfiles longitudinales del terreno natural (TN) y del eje del calzada, ubicando todas las interferencias por su progresiva, con su cota de fondo (en caso de alcantarillas existentes).

El perfil longitudinal del fondo se traza por medio de tramos de pendiente uniforme (tan largos como sea posible).

Las profundidades del canal están en relación con el caudal a conducir y debe ser suficiente para drenar las zonas bajas próximas.

iv) Se calculan la profundidad y el ancho de fondo necesarios para conducir el caudal de diseño en cada tramo. Si es necesario, se ajustan la sección transversal y/o la pendiente.

Para cada tramo de pendiente uniforme se realizan los cálculos que se describen a continuación.

Se calcula el caudal de diseño en la sección de control.

Se calculan el tirante normal y el ancho de fondo, aplicando el método de la velocidad permitida o de la fuerza tractiva.

Se calcula o adopta una altura libre y se determina la profundidad mínima necesaria del canal en el tramo como suma del tirante normal más la altura libre.

Se identifica la sección transversal del canal con menor profundidad en el tramo y se calcula dicha profundidad (TN-FC). Esta sección es la que condiciona la capacidad de conducción del canal en el tramo.

Se verifica que la menor profundidad en el tramo satisfaga y sea próxima a la profundidad necesaria del canal. Si es necesario, se ajusta la sección transversal y/o la pendiente del tramo.

Se verifica que la velocidad normal se encuentre entre las velocidades máxima y mínima admisibles. Se calcula el número de Froude y se identifica el régimen del flujo.

En caso de terrenos con pendiente pronunciada puede ser necesario: a) adoptar un revestimiento para aumentar el esfuerzo de corte admisible, b) disminuir la pendiente del canal con estructuras de caída, c) aumentar el ancho del canal y/o tender más los taludes.

Si el tramo presenta una o más curvas, evaluar la necesidad de protección local para aumentar el esfuerzo tractivo admisible.

v) Evaluar las transiciones de los parámetros geométricos entre tramos.

Se identifican las secciones donde cambian significativamente los parámetros geométricos entre tramos, a efectos de proveer una transición gradual de los mismos para minimizar la posibilidad de cambios bruscos en las condiciones hidráulicas del canal.

vi) Analizar las secciones de salida y los efectos hacia aguas abajo.

El punto de descarga puede ser un curso de agua natural o artificial (con una dada capacidad de conducción) o una depresión superficial temporal o permanentemente anegada.

La consideración de las condiciones de la descarga es una parte importante en el diseño. Se debe tener en cuenta:

- a) la cota de fondo del canal a la salida, en relación al nivel de agua del cuerpo receptor,
- b) eventuales efectos de remanso,
- c) la eventual necesidad de obras para disipación de energía y

d) la orientación (en planta) del conducto de salida.

La cota de fondo del canal debe ser igual o mayor que la cota de fondo del cuerpo receptor.

El nivel de agua del cuerpo receptor (TW) debe ser considerado cuidadosamente. En algunos casos, un elevado nivel de agua del cuerpo receptor puede originar un remanso en el canal creando condiciones indeseables.

Se debe evaluar la necesidad de proteger el lecho y márgenes del curso receptor a la salida del canal para prevenir efectos erosivos. Si son esperables altas velocidades de flujo a la salida, pueden usarse colchonetas de geotextil, rip-rap o estructuras disipadoras de energía.

La orientación del tramo final del canal debe ser posicionada tal que esté apuntada en la dirección de aguas abajo del curso receptor. Esto reducirá la turbulencia y posibles procesos erosivos. Si el canal no puede orientarse en la dirección de aguas abajo del curso receptor y se orienta por ejemplo perpendicular a éste, se debe tener cuidado en evitar la erosión de la margen opuesta del canal.

B. Diseño hidráulico final.

Una vez finalizado el diseño hidráulico preliminar, se debe ajustar el mismo con la ayuda del cálculo de la LGH, hasta alcanzar la LGH y las velocidades de flujo deseadas para los eventos de diseño y verificación.

Para el cálculo de la LGH se aplican las consideraciones vistas para conductos a gravedad (Unidad 5). Estos cálculos se realizan con programas desarrollados al efecto (ej. Hec-Ras, WinStorm) en los que se ingresa la geometría obtenida del diseño preliminar.