

IMPORTANCIA DE LA TENSION TRACTRIZ EN EL DISEÑO
DE COLECTORES DE ALCANTARILLADO

DR. ENRIQUE M. ALVAREZ HERNANDEZ (*)

ING. ALEJANDRO ARRIETA SANHUEZA (*)

RESUMEN

Se presenta un análisis en el cual se evalúa el criterio tradicional de diseño de colectores de alcantarillado a la luz de resultados de estudios recientes de terreno y laboratorio realizadas en diversas partes del mundo. El Proyecto de Norma NCH 1106.c74 establece los elementos básicos para el cálculo de la capacidad de los colectores, basándose en el criterio de la velocidad de autolavado de 0.6 m/s para aguas servidas.

Según estudios de laboratorio (Alvarez, 1991, May et Al., 1989, Nalluri et Al., 1989, Mayerle y Nalluri, 1989, Novac y Nalluri, 1984), la velocidad de autolavado depende de varios factores tales como la concentración, tamaño medio y densidad del sedimento en el escurrimiento, el diámetro del ducto y la tensión tractoriz del flujo. La velocidad de autolavado recomendada por el Proyecto de Norma NCH 1106, sin embargo, no incluye dichos factores, por lo que se tiene que los ductos pequeños resultan sobredimensionados y los ductos mayores (>300 mm) resultan subdimensionados, con los consiguientes problemas de operación y mantención.

Un enfoque más adecuado resulta al utilizar el criterio de la tensión tractoriz en el diseño de colectores de alcantarillado. A falta de información local sobre tamaños medios y concentraciones de sedimentos, se recomienda la utilización de una tensión tractoriz mínima de 1.5 N/m^2 (para caudal mínimo) para evitar la formación de depósitos.

(*) Profesor Depto. Ing. en Obras Civiles, Universidad de Santiago de Chile (USACH).

1.- INTRODUCCION

En este trabajo se plantea la necesidad de re-estudiar los métodos de diseño de colectores de alcantarillado en base a resultados de estudios experimentales recientemente publicados (Alvarez, 1991, May et Al., 1989, Nalluri et Al., 1989, Mayerle y Nalluri, 1989, Novac y Nalluri, 1984) en la literatura especializada.

El concepto de velocidades límites, tal como se presentó en los primeros estudios de transporte de sedimentos (Lane, 1952), ha evolucionado bastante en los últimos años, con la incorporación del concepto de tensión tractiva.

El inicio del movimiento y transporte de las partículas del lecho de un canal depende de las propiedades del sedimento: el tamaño medio y forma de las partículas y su densidad, como también de las características del escurrimiento, siendo la velocidad media sólo uno de los parámetros y no el de mayor importancia como lo es la tensión tractiva.

2. BASES DE CALCULO DEL PROYECTO DE NORMA NCH 1106.C74

Las recomendaciones más relevantes del proyecto de Norma, desde el punto de vista del presente trabajo, son las siguientes:

a) Caudales: Los gastos determinantes son:

Máximo: es el caudal calculado para el final del plazo de previsión, para el período más desfavorable del día de máximo consumo.

Mínimo: corresponde al 60% del gasto medio anual, de aguas servidas, al final del plazo de previsión.

b) Capacidad de la Tubería: El diámetro (D) de los colectores se calcula de modo tal que la altura (h) de aguas dentro de la tubería quede entre los siguientes límites:

- Para el caudal máximo, $h \leq 0.7 D$
- Para el caudal mínimo, $h \geq 0.3 D$

c) Velocidades: Las velocidades de escurrimiento en la tubería deben estar entre los siguientes valores:

- Máxima: 3 m/s (tuberías corrientes)
- Mínima:

}	0,6 m/s para aguas servidas	flujo a boca llena
	0.9 m/s para aguas lluvias	
	1.5 m/s para aguas combinadas	

d) Pendientes:

- Mínima: es aquella que produce la velocidad mínima que permita el autolavado y la altura máxima de la sección de escurrimiento.
- Máxima: es aquella que produce la velocidad máxima o bien la altura mínima de escurrimiento.

Observación:

En estos cálculos se supone escurrimiento uniforme y permanente, el que generalmente se calcula en base a la conocida ecuación de Manning, aplicada a cada tramo de colector.

3. CRITERIO DE LA TENSION TRACTRIZ MINIMA

3.1 Fundamentos Teóricos:

La tensión tractoriz se define como el valor medio de la tensión tangencial que actúa sobre el manto mojado de un prisma de canal en escurrimiento uniforme y permanente. Es decir la tensión tractoriz es la que permite el balance de la componente del peso de dicho prisma en la dirección del escurrimiento. Al efectuar un balance de fuerzas en plano del fondo del canal se obtiene:

$$\tau_0 = \rho g R I \quad (1)$$

donde: τ_0 es la tensión tractoriz, ρ es la densidad del fluido, g es la aceleración de gravedad, R es el radio hidráulico e I es la pendiente longitudinal del canal.

Cabe destacar que la distribución real de la tensión tractoriz varía a lo largo del perímetro del canal (Replogle, 1966), siendo mínima en la superficie libre y máxima en el lecho del canal. El autor principal (Alvarez, 1991) realizó estudios de distribución de tensión tractoriz en canales de sección circular con un fondo plano, encontrando un máximo en el eje central para alturas relativas (Y_0/D) mayores que 0,5; y en otros casos, dos máximos, uno a cada lado del eje del canal, para $Y_0/D < 0,5$. Los primeros alcanzaron valores de hasta dos veces la tensión tractoriz (valor medio).

La tensión tractoriz es proporcional a la pendiente (Ec. 1) del canal, en condiciones de escurrimiento uniforme (caudal constante). En la Fig. 1 se puede observar como varía la tensión tractoriz con la altura del escurrimiento y el valor máximo (mayor que el correspondiente a sección llena) se produce a una altura relativa de 0,8 D.

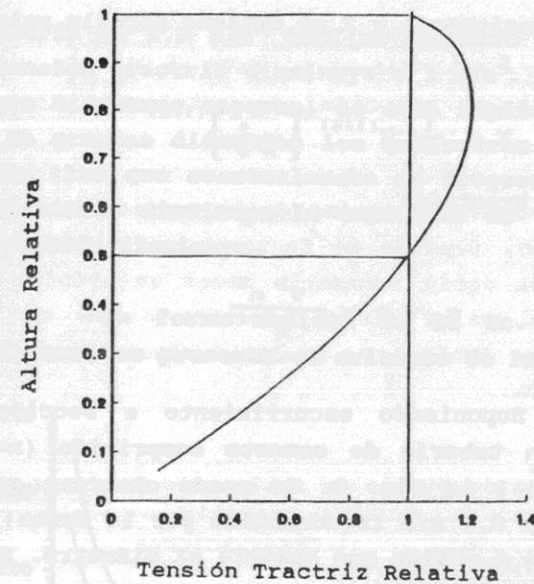


FIGURA 1: Relación Tensión Tractoriz Relativa vs. Altura Relativa

3.2 Comparación del Criterio de Velocidad de Autolavado y el Criterio de Tensión Tractoriz

El criterio de la velocidad de auto-lavado determina la pendiente mínima de un tramo dado, para caudal mínimo, suponiendo un escurrimiento uniforme y permanente. Para esto se utiliza la fórmula de Manning:

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

donde V es la velocidad media del escurrimiento, n es un coeficiente de rugosidad, R es el radio hidráulico del escurrimiento e I es la pendiente longitudinal del canal.

Combinando las ecuaciones 1 y 2 se obtiene para la velocidad:

$$V = \frac{1}{n} R^{(1/6)} \left[\frac{\tau_o}{\rho g} \right]^{(1/2)} \quad (3)$$

y para la tensión tractiva:

$$\tau_o = \rho g \frac{V^2 R^{(1/3)}}{n^2} \quad (4)$$

Suponiendo escurrimiento a sección llena (o media sección) en tubería de cemento comprimido ($n=0,013$), se obtiene de la Ec. 3 la Fig. 2. Se puede observar que para una velocidad media de 0,6 m/s (recomendada por la Norma) la tensión tractiva disminuye a medida que aumenta el diámetro. Se tiene una

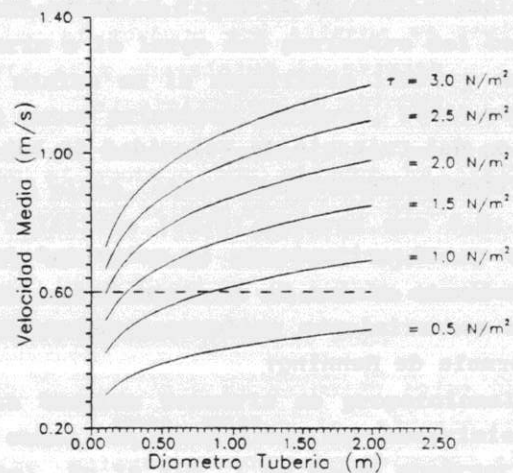


FIGURA 2: Diámetro Vs. Velocidad Media para distintos τ_o .
(Escurrecimiento uniforme $Y_o/D=1$, $n=0.013$)

tensión tractiva de 1,5 N/m² para un diámetro de 250 mm y para 900 mm la tensión tractiva disminuye a 1 N/m². Esta tendencia se mantiene para diámetros mayores, lo cual explica porqué son los colectores de grandes diámetros los que sufren más problemas de sedimentación (los que eventualmente se bloquean). Debido a que la tensión tractiva disminuye la capacidad de transporte de los sedimentos también disminuye.

En forma análoga de la Ec. 4 se obtuvo la Fig. 3, en la cual se presenta el criterio de la tensión tractiva.

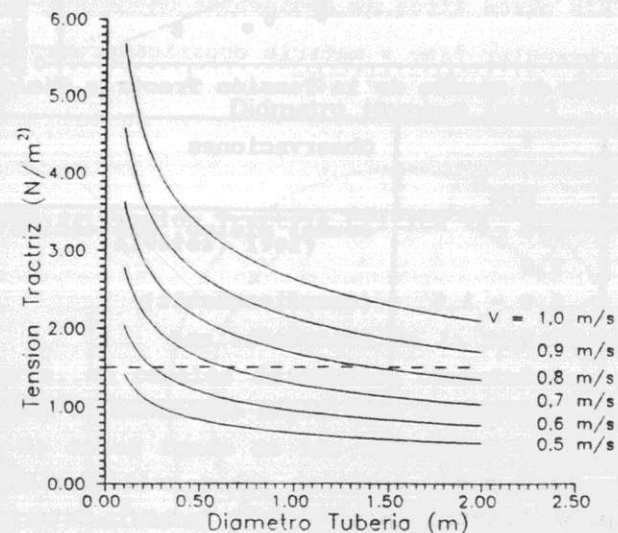


FIGURA 3: Diámetro Vs. Tensión Tractiva para distintas Veloc.
(Escurrecimiento uniforme $Y_o/D=1$, $n=0.013$)

Como se puede apreciar en la Fig. 3, para poder mantener una tensión tractiva dada, la velocidad debería aumentar con el diámetro. Sin embargo, en el Proyecto de Norma (NCH 1106.c74), en sus bases de cálculo, se tiene una tabla (subtítulo 2.4.1) de

valores de pendientes mínimas en la cual la pendiente disminuye a medida que se aumenta el diámetro. Esto se debe a que la Norma aplica el criterio de velocidad de autolavado (con velocidad mínima constante).

El valor mínimo de la tensión tractiva, a utilizar en el diseño, depende de factores difíciles de estimar a priori, por lo que sería necesario hacer un estudio en terreno para determinar el valor mínimo adecuado a las condiciones de nuestro país. En la Tabla 1 se muestran algunos valores utilizados en otros países.

TABLA 1: Valores de Diseño de la Tensión Tractiva Mínima

País	τ_c N/m ²	Observaciones
Holanda	0,5	caudal mínimo, mantención regular
Brasil	1,0	
Suecia	1,0 - 1,5	(Scandiaconsult)
Alemania	2,5	(Bischof)
Noruega	2,0 - 4,0	(Lysne)

Para poder comparar ambos criterios se eligió un valor de tensión tractiva mínima de 1,5 N/m². Este valor es capaz de mover partículas de hasta 2,0 mm según el diagrama de Shields para canales rectangulares (Shields, 1936). Pero según estudios recientes, en canales de sección circular con fondo plano, (Alvarez, 1991), dicho valor medio sería capaz de mover partículas de hasta 4,0 mm (Fig. 4).

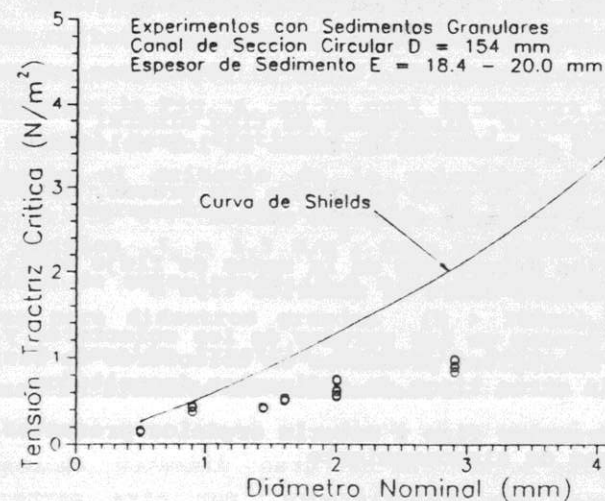


FIGURA 4: Tensión Tractiva Crítica Vs. Diámetro (Alvarez, 1991)

Los resultados de la Fig.4 fueron obtenidos en Inglaterra, en canales de sección circular con fondo plano, que representa el sedimento depositado (sedimento tipo A, ver Tabla 1 y Fig. 5) en el fondo de los colectores de alcantarillado. Las observaciones de terreno (Crabtree, 1988), en varias partes de Inglaterra indicaron que principalmente son los ductos de gran diámetro (D > 1 m) los que presentan lecho sedimentado como el de la Fig. 5. En Chile también se han observado casos similares. Por ejemplo en las recientes obras de entubación del Zanjón de La Aguada (Canal A-H), se encontró que el colector (sección de cajón de 3x3m) que toma las aguas servidas del área Santiago Central, tenía hasta 1m de espesor de sedimentos muy consolidados.

TABLA 2: Clasificación de Sedimentos de Alcantarillado (Según Crabtree, 1988)

- Tipo A material granular, disgregado de tipo mineral generalmente presente en el fondo de los colectores
- Tipo B Similar al Tipo A, pero cementado con grasas, bitumen, etc. y forma una masa compacta sólida
- Tipo C material fino depositado en la zonas de flujo debil ya sea aislado o sobre el material Tipo A
- Tipo D lamas que crecen en las paredes de los colectores y películas biológicas presentes en colectores de flujo rápido, sin otros tipos de sedimentos depositados
- Tipo E material granular fino y materia orgánica presentes en estanques de almacenamiento

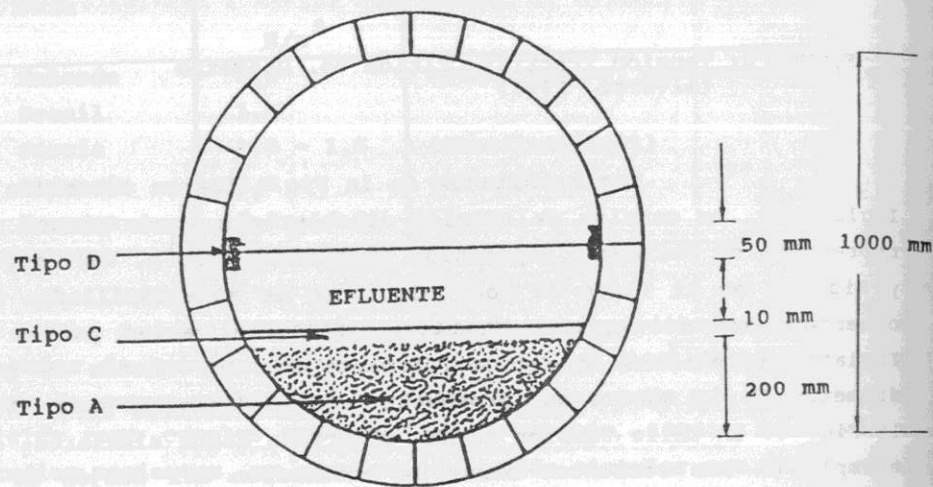


FIGURA 5: Clasificación de Sedimentos de Alcantarillado (Crabtree, 1988)

Para mostrar gráficamente la diferencia entre los citados criterios de diseño, se supone un ducto de alcantarillado de cemento comprimido ($n=0.013$) con escurrimiento a sección llena y se prepara la Fig. 6, en la cual se muestra la pendiente mínima y el caudal para distintos diámetros de tubería. La línea A representa el criterio de la velocidad de auto-lavado y la línea B representa el criterio de la tensión traxtriz con valor crítico $\tau_c = 1,5 \text{ N/m}^2$. Como se puede ver el criterio de velocidad de auto-lavado (0,6 m/s) entrega valores de pendiente menores para diámetros grandes ($D > 300\text{mm}$), los cuales al no tener la tensión traxtriz necesaria para mover las partículas sólidas, se llenarán de sedimentos.

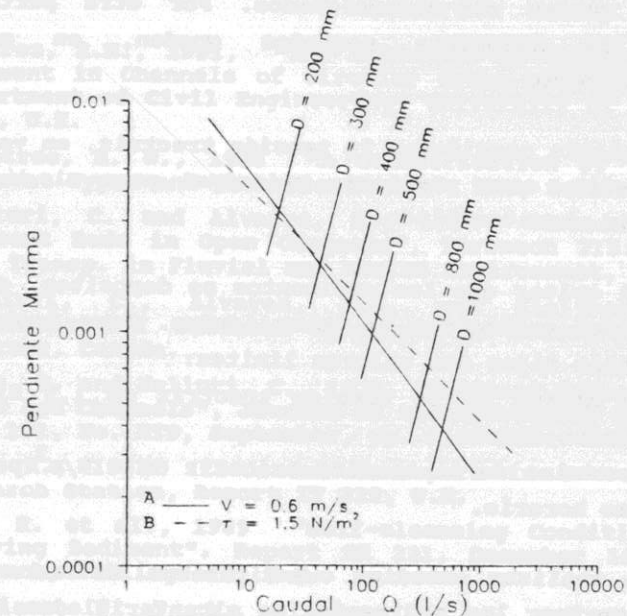


FIGURA 6: Pendiente Mínima Vs. Caudal para distintos Diámetros

En general se puede afirmar que los colectores de alcantarillado de gran diámetro diseñados con el criterio de la velocidad de auto-lavado de la Norma estarían sub-dimensionados y aquellos colectores de pequeño diámetro ($D < 300$ mm) estarían sobre-dimensionados.

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del estudio se pueden enumerar como:

- 1) Con el criterio de velocidad de auto-lavado, tal como está presentado en el Proyecto de Norma, no se obtiene la condición de auto-lavado para colectores de gran diámetro ($D > 0,5$ m), pues éstos quedan sub-dimensionados. Por otra parte, los colectores de diámetros pequeños quedan, en general, sobre-dimensionados.
- 2) Sería conveniente considerar la tensión tractoriz, en vez de la velocidad media, como parámetro principal para el diseño de colectores de alcantarillado.
- 3) Es más fácil evitar que los sedimentos se depositen, que tratar de remover sedimentos ya consolidados. Para lograr esto sería necesario fijar dos valores límites:
 - a) un valor mínimo de la tensión tractoriz de $1,5 \text{ N/m}^2$ para caudal mínimo diario.
 - b) un valor mínimo de la tensión tractoriz de 4 N/m^2 para caudal máximo horario.
- 4) Se requiere realizar estudios cuantitativos de terreno, para poder caracterizar los sedimentos de alcantarillados de nuestro país, y así poder establecer con más precisión los dos límites del punto anterior.

- 5) Es aconsejable llevar a cabo estudios de laboratorio (transporte de sedimentos cohesivos y no cohesivos) para identificar los parámetros principales responsables del movimiento de sedimentos en alcantarillados.
- 6) Un estudio a nivel de operación de los sistemas existentes permitiría evaluar el costo asociado al sub-dimensionamiento de los colectores de gran diámetro.

REFERENCIAS

- 1) Alvarez, E.M., 1991, "The Influence of Cohesion on Sediment Movement in Channels of Circular Cross-section", PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne, U.K.
- 2) Crabtree, R. W., 1988 "A Classification of Combined Sewer Sediment Types and Characteristics", WRC, Swindon, U.K.
- 3) Nalluri, C. and Alvarez, E., 1987 "Erosion of Cohesive Sediment Beds in Open Channels", Euromech 215: Mechanics of Sed. Transp. in Fluvial and Marine Environment, Genoa, Italy.
- 4) Nalluri, C., Alvarez, E.M. and Kleijwegt, R., 1989 "Initiation of Sediment Movement in Sewers", IAHR XXIII Congress, Canada.
- 5) Novak, P. and Nalluri, C., 1975 "Sediment Transport in Smooth Fixed Bed Channels", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 101, No. HY9, September, pp. 1139-1154.
- 6) May, R., 1982 "Sediment Transport in Sewers". Hydraulic Research Station, Report IT 222, U.K.
- 7) May, R. et al., 1989 "Self-cleansing Conditions for Sewer Carrying Sediment". Report SR 221, December 1989, Hydraulic Research, Wallingford, U.K.
- 8) Williams, D. J. A., Williams, P. R. and Crabtree R. W. 1989, "Preliminary Investigation Into the Rheological Properties of Sewer Sediment Deposits and the Development of a Synthetic Sewer Sediment Material for Laboratory Studies". FR 0016, Foundation for Water Research, Medmeham U.K..