



COEFICIENTES DE RESISTENCIA HIDRÁULICA EN TUBOS REVESTIDOS CON UN LÍNER.



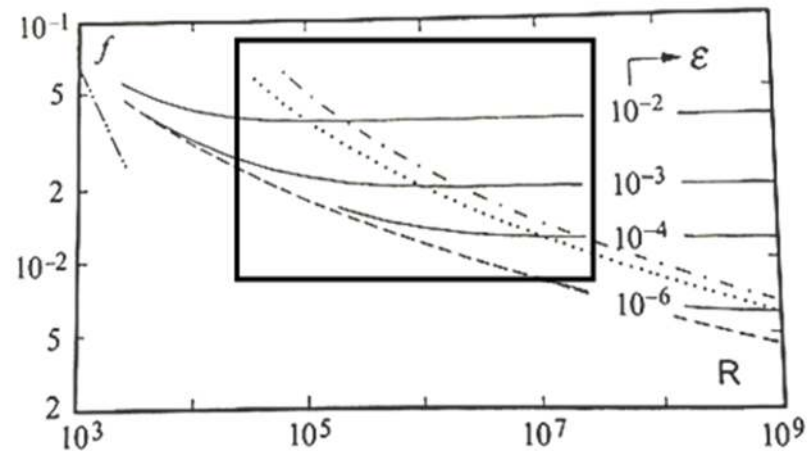
Los coeficientes de rugosidad o mejor de **“resistencia hidráulica”** para flujo de agua en tuberías, han sido un poco especulativos en términos de los **coeficientes de Manning**, pero sin embargo los autores sí recomiendan valores únicos para las **rugosidades absolutas K_s aplicables a la ecuación de Darcy-Weisbach**. El hecho de que en la ecuación de Manning el coeficiente de rugosidad se encuentre explícito, a diferencia de la ecuación de Colebrook -White, en la cual el factor de fricción presenta una variación implícita, ha hecho pensar por tiempos que no es posible encontrar una correspondencia directa entre el “ K_s ” y el “ n ”. Sin embargo, investigadores contemporáneos han hecho estudios detallados para resolver el problema de la relación implícita de los coeficientes de fricción en la formula de Colebrook - White, y han comprobado que las relaciones explícitas que encontraron son válidas para la mayoría de las aplicaciones comerciales en alcantarillados.

También se estudiará qué tan liso puede llegar a ser un tubo cuando es revestido con un liner para determinar los valores del coeficiente de resistencia hidráulica en términos del “ n ” de Manning. Este último valor dependerá en algunos casos del diámetro de la tubería y se espera que dependa del distanciamiento entre las juntas que se presentan entre cada lámina del liner, cuando este último se enrolla.

Investigaciones de Hager - Sinniger

El investigador Willi Hager encontró que para efectos del flujo de agua a superficie libre en la mayoría de aplicaciones comerciales, los números de Reynolds generalmente toman lugar entre 3×10^4 y 3×10^7 , y la rugosidad relativa ε entre 10^{-5} y 10^{-1} , como lo muestra la ilustración 1, dentro del diagrama de Moody.

Ilustración 1. diagrama de Moody.



Investigaciones de Hager - Sinniger

La ilustración 1 muestra cómo se relacionan las variables f y Re que, dependiendo de la rugosidad relativa, mayor es el valor del factor de fricción “ f ” cuando Re decrece por debajo de 10^5 y se desplaza hacia la zona de transición (cambio de régimen laminar a turbulento).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right), Re > 2300 \quad (\text{Ecuación. 1})$$

Ecuación de Colebrook – White.

Donde,

ε = Rugosidad relativa
 f = Factor de fricción
 Re = Numero de Reynolds

Investigaciones de Hager - Sinniger

Las siguientes aproximaciones explícitas encontradas por los investigadores Sinniger y Hager (1989) permiten relacionar el coeficiente de rugosidad absoluta K_s con parámetros hidráulicos normales de diseño.

Criterio #1:

$$D^* = \frac{K_s^{*0.03}}{1.853}, \text{ para } 10^{-8} < \varepsilon < 7 \times 10^{-4}, \quad (\text{Ecuación. 2})$$

Criterio #2:

$$D^* = \frac{K_s^{*1/16}}{1.422}, \text{ para } 7 \times 10^{-4} < \varepsilon < 7 \times 10^{-2} \quad (\text{Ecuación. 3})$$

Investigaciones de Hager - Sinniger

Donde la explicación de cada una de las variables normalizadas adimensionales empleadas en estas fórmulas es como sigue:

$$\begin{aligned}D^* &= D/D_0 \\Ks^* &= Ks/D_0 \\D_0 &= [Q^2/(gSf)]^{1/5} \\ \varepsilon &= \frac{Ks}{D}\end{aligned}$$

Para el segundo caso (criterio #2) se presenta que si se cumple la condición de flujo en la zona turbulenta totalmente desarrollada (lo cual no es difícil de encontrar en las aplicaciones prácticas de flujo con agua), se debe verificar la siguiente desigualdad:

$$Ks > 30v(g^2sf^2Q)^{-\frac{1}{5}} \quad \text{(Ecuación. 3A)}$$

Donde:

Ks = Rugosidad absoluta

g = Gravedad

v = Viscosidad cinemática

sf = Gradiente hidráulico

Q = Caudal

D = Diámetro

Desarrollo de los criterios

Si desarrollamos la ecuación 2 que corresponde al criterio # 1, reemplazando las variables K_S^* y D^* por sus valores explícitos, se tiene:

$$K_S^{*0.03} = 1.853 D^*; \rightarrow \frac{K_S^{0.03}}{D_0^{0.03}} = \frac{1.853 D}{D_0}$$

Introduciendo la equivalencia de la variable normalizada D_0 se tiene:

$$K_S^{0.03} = \frac{1.853 D}{D_0^{0.97}} = \frac{1.853 D}{\left(\frac{Q^2}{g s_f}\right)^{\frac{1}{5} \cdot 0.97}} \quad \text{(Ecuación. 4)}$$

Si ligamos esta ecuación con la de Manning (a tubo lleno)

$$Q = \frac{1}{n} \frac{\pi}{4^{\frac{1}{3}}} D^{\frac{8}{3}} s_f^{\frac{1}{2}} \quad \text{(Ecuación. 5)}$$

Desarrollo de los criterios

$$K_s = 3 \times 10^{15} g^{97/15} D^{-0.104/0.09} n^{194/15} \quad (\text{Ecuación. 6})$$

$$n = \frac{K_s^{15/194} D^{1.56/17.46}}{3^{15/194} 10^{225/194} \sqrt{g}} \quad (\text{Ecuación. 6A})$$

El coeficiente “n” se relaciona con el “Ks” y con el diámetro “D”, con rugosidades relativas bajas, *para* $10^{-8} < \varepsilon < 7 \times 10^{-4}$

Desarrollo de los criterios

Si desarrollamos la ecuación 3 que corresponde al **criterio # 2**, se tiene:

$$D^* = \frac{K_S^{*1/16}}{1.422} \rightarrow \frac{1.422 D}{D_0} = \frac{K_S^{1/16}}{D_0^{1/16}} \rightarrow K_S^{1/16} = \frac{1.422 D D_0^{1/16}}{D_0} = \frac{1.422 D}{D_0^{15/16}}$$

$$\text{Pero } D_0 = \left(\frac{Q^2}{gsf} \right)^{1/5} \rightarrow K_S^{1/16} = \frac{1.422 D}{\left[\left(\frac{Q^2}{gsf} \right)^{1/5} \right]^{15/16}}$$

$$K_S^{1/16} = \frac{1.422 D}{\left[\frac{Q^{2/5}}{(gsf)^{1/5}} \right]^{15/16}} \quad (\text{Ecuación. 7})$$

Desarrollo de los criterios

Que equivale a
$$K_S^{1/16} = \frac{1.422D}{\frac{Q^{3/8}}{(gsf)^{3/16}}} \quad (\text{Ecuación. 8})$$

Si ligamos esta ecuación con la de Manning (a tubo lleno)

$$Q = \frac{1}{n} \frac{\pi}{4^{5/3}} D^{8/3} sf^{1/2} \quad (\text{Ecuación. 5})$$

Se obtiene: $K_S = 304856 \ g^3 n^6$, lo cual es equivalente a:

$$n = \left(\frac{K_S}{304856 \ g^3} \right)^{1/6} = \frac{0.1219 \ K_S^{1/6}}{g^{1/2}} \quad (\text{Ecuación. 9})$$

La ecuación 9 del criterio # 2 permite una correspondencia directa entre el valor de n y los valores de K_S para caudales en el régimen turbulento completamente desarrollado.



Validación de la formulación

Para **validar** los resultados anteriormente obtenidos mediante las aproximaciones de Sinniger y Hager **podemos acudir a estudios de laboratorio realizados en el pasado y publicados internacionalmente, tales como el estudio practicado por el St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory de la universidad de Minnesota** para el departamento de carreteras del estado de Florida y la oficina de obras públicas. Dichos experimentos se realizaron sobre tuberías para medir las rugosidades en **Diciembre 1960, Resistance to flow in two type of concrete pipes**, en la cual se midieron los coeficientes de rugosidad de Manning y factores de fricción de Darcy-Weisbach para tuberías de concreto fundidas en sitio con un diámetro de 24" y 36" y tuberías prefabricadas de concreto con un diámetro de 36"; como resultado se obtuvieron diversos valores del coeficiente de fricción "f" para distintos números de Reynolds en cada condición, y los siguientes valores para los coeficientes de Manning:

- **Tuberías 24" y 36" fundidas en sitio** un coeficiente de rugosidad de Manning "**n**" de **0.011**
 - **Tuberías de 36" prefabricadas**, un "**n**" de Manning con valores de **0.00907 < n < 0.01029**
- (Lorenz G. Straub, 1960).

A partir de los coeficientes "f" obtenidos en dicho ensayo, calculamos las rugosidades absolutas Ks.

“Fundidos en sitio 24” y 36”

*Resistance to flow in two types of concrete pipe. Uni
Tubos Fundidos en Sitio 24"

f	Reynolds	D (mm)	Ks (mm)
0,01800	807000	613,156	0,37401
0,01782	1260000	613,156	0,37474
0,01864	1533000	613,156	0,46783
0,01782	255000	613,156	0,24095
0,01827	817000	613,156	0,40308
0,01765	579000	613,156	0,31787
0,01791	259000	613,156	0,25292
0,01788	220000	613,156	0,22055
0,01746	222000	613,156	0,17944
0,01806	218000	613,156	0,23798
0,01745	485000	613,156	0,28403
0,01798	496000	613,156	0,33886
0,01802	460000	613,156	0,33631
0,01883	326000	613,156	0,38905
0,01848	321000	613,156	0,34655
0,01772	485000	613,156	0,31044
0,01791	374000	613,156	0,30357
0,01885	349000	613,156	0,39983
0,01803	212000	613,156	0,22922
0,01803	780000	613,156	0,37528
0,01799	789000	613,156	0,37177
0,01805	1311000	613,156	0,39943
0,01762	605000	613,156	0,31812
0,01755	606000	613,156	0,31143
0,01793	843000	613,156	0,36908
0,01814	855000	613,156	0,39155
0,01834	1478000	613,156	0,43372
0,01817	1480000	613,156	0,41564
0,01838	1431000	613,156	0,43711
0,01814	1423000	613,156	0,41135
0,01771	1170000	613,156	0,36123
0,01809	1156000	613,156	0,39924
0,01794	1476000	613,156	0,39179
0,01793	1479000	613,156	0,39083
0,01810	1310000	613,156	0,40460
0,01789	1038000	613,156	0,37452
0,01785	961000	613,156	0,36719
0,01803	736000	613,156	0,37202
0,01770	2,59E+05	613,156	0,23123
0,01798	5,73E+05	613,156	0,35040

Promedio tubos fundidos en sitio de 24" 0,34712

*Resistance to flow in two types of concrete pipe. Uni
Tubos Fundidos en Sitio 36"

f	Reynolds	D (mm)	Ks (mm)
0,01558	2,18E+06	916,178	0,30402
0,01594	2,17E+06	916,178	0,34136
0,01569	1,70E+06	916,178	0,30641
0,01610	1,49E+06	916,178	0,34473
0,01583	9,50E+05	916,178	0,28948
0,01641	5,15E+05	916,178	0,29549
0,01588	2,16E+05	916,178	0,05266
0,01557	5,05E+05	916,178	0,19903
0,01551	4,02E+05	916,178	0,15810
0,01594	3,70E+05	916,178	0,18982
0,01622	9,02E+05	916,178	0,32883
0,01596	7,87E+05	916,178	0,28878
0,01624	1,28E+06	916,178	0,35308
0,01591	1,94E+06	916,178	0,33437
0,01578	5,97E+05	916,178	0,24191
0,01602	4,35E+05	916,178	0,22609
0,01604	3,04E+05	916,178	0,16162
0,01650	2,22E+05	916,178	0,13619
0,01582	3,75E+05	916,178	0,17894
0,01705	1,34E+05	916,178	0,01608
0,01643	1,34E+06	916,178	0,37747
0,01553	1,88E+06	916,178	0,29406
0,01573	1,88E+06	916,178	0,31435
0,01606	1,30E+06	916,178	0,33360
0,01727	1,03E+05	916,178	
0,01837	1,38E+05	916,178	0,23936
0,01746	1,38E+05	916,178	0,09109
0,01669	1,12E+05	916,178	
0,01680	1,12E+05	916,178	
0,01809	1,12E+05	916,178	0,08506
0,01849	1,13E+05	916,178	0,15973
0,01742	1,44E+05	916,178	0,10451
0,01564	4,35E+06	916,178	0,32571
0,01569	4,13E+06	916,178	0,32994
0,01572	4,38E+06	916,178	0,33396
0,01567	3,92E+06	916,178	0,32703
0,01576	3,73E+06	916,178	0,33540

Promedio tubos fundidos en sitio de 36" 0,24701

“Prefabricados 36”

*Resistance to flow in two types of concrete pipe. U
Tubos Prefabricados de 36"

f	Reynolds	D (mm)	Ks (mm)
0,01057	3506000	914,146	0,02284
0,01059	3467000	914,146	0,02309
0,01050	3432000	914,146	0,02055
0,01059	3358000	914,146	0,02232
0,01062	3568000	914,146	0,02455
0,01050	3328000	914,146	0,01980
0,01154	1594000	914,146	0,02544
0,01233	1188000	914,146	0,04201
0,01204	1188000	914,146	0,02880
0,01364	653000	914,146	0,06589
0,01375	653000	914,146	0,07349
0,01568	269000	914,146	0,09196
0,01563	270000	914,146	0,08746
0,01726	134000	914,146	0,04680
0,01685	134000	914,146	
0,01565	194000	914,146	
0,01592	187000	914,146	0,00872
0,01360	538000	914,146	0,03928
0,01409	526000	914,146	0,07170
0,01485	369000	914,146	0,07820
0,01332	925000	914,146	0,07806
0,01250	929000	914,146	0,03240
0,01222	1348000	914,146	0,04457
0,01758	129000	914,146	0,07689
0,01721	130000	914,146	0,02449
0,01596	199000	914,146	0,03515
0,01287	954000	914,146	0,05409
0,01294	946000	914,146	0,05734
0,01261	967000	914,146	0,04123

Promedio tubos prefabricados de 36" 0,04582

Promedio
“Ks”



Validación de la formulación

- Para tuberías de 24" fundidas en sitio de concreto

$D = 0.6132 \text{ m}$, $Ks_{lab} = 0.347 \text{ mm}$ (Calculado a partir de los factores de fricción obtenidos en el experimento utilizando la ecuación completa de Colebrook White)

$$\varepsilon = \frac{Ks}{D} = \frac{0.347 \times 10^{-3}}{0.6132} = 5.65 \times 10^{-4} < 7 \times 10^{-4}, \text{ Para lo cual sería aplicable el criterio \#1.}$$

Usando la ecuación 6A tenemos:

$$n_{\text{criterio\#1}} = 0.0105$$

$n_{Lab} = 0.011$ (Calculado experimentalmente por el estudio de la Universidad de Minnessota)

Para una aproximación a tres cifras significativas los resultados son equivalentes.

- Para tuberías de 36" fundidas en sitio de concreto, se tiene:

$D = 0.9162 \text{ m}$, $Ks_{lab} = 0.247 \text{ mm}$ (Calculado a partir de los factores de fricción obtenidos en el experimento utilizando la ecuación completa de Colebrook White)

$$\varepsilon = \frac{Ks}{D} = \frac{0.247 \times 10^{-3}}{0.9162} = 2.7 \times 10^{-4} < 7 \times 10^{-4} \text{ Para lo cual sería aplicable el criterio \#1.}$$

Usando la ecuación 6A tenemos:

$$n_{\text{criterio\#1}} = 0.0108$$

$n_{Lab} = 0.011$ (Calculado experimentalmente por el estudio de la Universidad de Minnessota)

Para una aproximación a tres cifras significativas los resultados son equivalentes.

Validación de la formulación

- Para tuberías de 36" prefabricadas de concreto

$$D = 0.914146 \text{ m}, K_{s_{lab}} = 0.04582 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = \frac{Ks}{D} = \frac{0.04582 \times 10^{-3}}{0.914146} = 5.01 \times 10^{-5} < 7 \times 10^{-4} \text{ Para lo cual sería aplicable el criterio \#1.}$$

Usando la ecuación 6A tenemos:

$$n_{\text{criterio\#1}} = 0.0093$$

$$n_{Lab} = 0.00907 < n < 0.01029$$

La variabilidad del “n” obtenido en el experimento de laboratorio llevado a cabo en la Universidad de Minnessota (aunque no es muy alta) para regímenes de flujo muy diferentes y con números de Reynolds entre 134000 y 3.5×10^6 , denota un comportamiento más parecido al de tubos lisos, pero con una media de 0.00968, según se extrae del estudio, que para una aproximación de cuatro cifras significativas variaría solo en 4 diez milésimas con respecto a lo obtenido teóricamente con la ecuación 6A, validando el uso de la misma. De todo lo dicho anteriormente podemos ver con sorpresa que la aplicabilidad del criterio #1 implica que el flujo en estas tuberías de concreto aún fundidas en sitio se emula como “hidráulicamente liso”, haciendo que el coeficiente de Manning sea variable con el diámetro.

Validación de la formulación

En otros **experimentos de laboratorios** documentados, tales como el **Study of Manning's Roughness Coefficient for Commercial Concrete and Plastic Pipe** elaborado en enero de 1986 por el T. Blench Hydraulics Laboratory de la University of Alberta en Edmonton Canadá, se encontró que el coeficiente de Manning **para tuberías comerciales de concreto fue de 0.010, y para tuberías comerciales de plástico fue de 0.009**. Este experimento se realizó con tuberías de diámetros pequeños (entre 8" y 18").

Normalmente, se conocen algunos experimentos de medición de coeficientes de Manning realizados en laboratorios de renombre, y los valores más bajos reportados son del orden de 0.009. Si aplicamos los desarrollos de las aproximaciones explícitas para un coeficiente de Manning de " n " = 0.009, como si fuera un valor constante, obtenido en laboratorio para algún tipo de tubería comercial, se tendría, para diferentes diámetros:

D(m)	ks (m)	ks (mm)	$\epsilon = k_s / D$	criterio a aplicar
0.2	1.525×10^{-4}	0.153	$7.62 \times 10^{-4} > 7 \times 10^{-4}$	criterio #2
0.6	4.84×10^{-5}	0.0484	$8.07 \times 10^{-5} < 7 \times 10^{-4}$	criterio #1
1.2	2.173×10^{-5}	0.0217	$1.81 \times 10^{-5} < 7 \times 10^{-4}$	criterio #1
2.0	1.204×10^{-5}	0.0120	$6.02 \times 10^{-6} < 7 \times 10^{-4}$	criterio #1

Como el K_s debe ser una constante para el material, la conclusión es que el " n " debe ser variable.



Validación de la formulación

De acuerdo con los resultados anteriores, si se tomase como cierto un coeficiente “n” de Manning de 0.009, se evidencia que aún para un diámetro tan grande como 2.0 m el valor de la rugosidad absoluta no va a ser menor de 0.012 mm. Este resultado contrasta con publicaciones que relacionan un coeficiente de Manning de 0.009 con una rugosidad absoluta de 0.00135 mm. Esto es un imposible matemático, que hemos validado con las formulas anteriores, y las formulas se validaron con experimentos documentados.

Es posible que, al realizar alguna medida interna de la rugosidad con métodos sofisticados auxiliados por tecnologías láser o nanotecnologías, se encuentre este rango de rugosidades tan bajas; sin embargo, **cuando se hace circular agua por el conducto, en la practica la rugosidad “altura de grano equivalente de arena” es del orden de diez veces mayor, conforme resultados de laboratorio de hidráulica en pruebas documentadas.** En la realidad, la existencia de la sub capa limite laminar para que se desarrolle el flujo turbulento es un factor altamente condicionante en la resistencia hidráulica, de tal manera que los ensayos hidráulicos son irremplazables para su medida. De hecho, el criterio #1 emula flujo hidráulicamente liso mientras que el criterio #2 emula flujo hidráulicamente rugoso.

Validación de la formulación

En esta tabla se presenta el “Ks” calculado en función del coeficiente “n” de Manning para el criterio #2 y los coeficientes “n” obtenidos a partir del Ks máximo (límite de los dos criterios) utilizando el criterio # 1.

EQUIVALENCIAS ENTRE RUGOSIDAD DE "GRANO EQUIVALENTE DE ARENA" Y COEFICIENTE DE MANNING												
Gravedad (m/s ²)	9.8	Diámetro min (mm)		1	Diámetro máx (mm)		20000					
CRITERIO #2		Rango de aplicación para ϵ		Rango de aplicación para ϵ		CRITERIO #1: Flujo hidráulicamente Liso						
	Rugosidad absoluta	0.07	0.0007	0.0007	0.00000001							
	Ks (mm)	Válido si	Válido si	Válido si	Válido si	Ks max (mm)	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)
n (medio)	Criterio 2	D>= xxx mm	D<= xxx mm	D>= xxx mm	D<= xxx mm	Criterio 1						
							200	400	600	1000	2000	2500
0.007	0.03376	N/A	N/A	49	8624	0.03413	0.0079	0.0084	0.0088	0.0092	0.0098	0.0100
0.0075	0.05107	N/A	N/A	74	13046	0.05163	0.0082	0.0087	0.0090	0.0095	0.0101	0.0103
0.008	0.07522	1	107	109	19216	0.07604	0.0084	0.0090	0.0093	0.0098	0.0104	0.0106
0.009	0.15249	2	218	220	20000	0.15415	N/A	0.0095	0.0098	0.0103	0.0110	0.0112
0.010	0.28693	4	410	414	20000	0.29007	N/A	N/A	0.0103	0.0108	0.0115	0.0117
0.011	0.50831	7	726	734	20000	0.51387	N/A	N/A	N/A	0.0113	0.0120	0.0123
0.012	0.85676	12	1224	1237	20000	0.86614	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0125	0.0128
0.013	1.38495	20	1978	2000	20000	1.40010	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0133
0.014	2.16043	31	3086	3120	20000	2.18407	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.015	3.26829	47	4669	4720	20000	3.30404	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.016	4.81385	69	6877	6952	20000	4.86652	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A



De acuerdo con la exposición anterior ¿**Qué pasa con el valor de la resistencia hidráulica cuando un tubo es revestido con un liner?** ¿El coeficiente de Manning deberá disminuir a 0.010 ó 0.009 como podría suponerse según los criterios que comúnmente se aplican?

- ☐ El liner es una capa delgada de material, generalmente hecha de poliuretanos, resinas, GRP, PVC o HDPE y es utilizado para rehabilitar una tubería en su interior mejorando sus propiedades estructurales, su resistencia, eliminando grietas, corrosión o fugas, con el fin de no remplazar la tubería existente y en algunos casos se especifica para mejorar la resistencia hidráulica de una tubería.

- ☐ Si revestimos un tubo de ladrillo o gres con un **líner**, el valor del n de Manning **dependerá del diámetro** de la tubería según el criterio #1 ya citado, para flujos hidráulicamente lisos, o no dependerá del mismo si cae en el rango de tubos hidráulicamente rugosos.



Conclusiones

- ❑ Recordemos que los “liners” tienen diferentes texturas internas, y los que provienen de enrollados helicoidales presentan juntas internas frecuentes así como también superficies un tanto alabeadas provenientes del mismo proceso helicoidal. Esto sugiere que los experimentos de laboratorio para medir los “Ks” deberían ser llevados a cabo por los fabricantes, para retroalimentar a los diseñadores y obtener valores más reales de la resistencia hidráulica. Aún, en el caso de que la variación no fuera demasiado grande por los elementos que acabamos de mencionar, sí lo será en el coeficiente de Manning por el tema de los diámetros, ya que dicha afectación se da precisamente al desarrollarse el flujo “hidráulicamente liso”, característico de los liners modernos.
- ❑ En los experimentos desarrollados por la universidad de Minnesota también se analizaron los efectos que causaban las juntas entre las tuberías; en ese caso, se tenían juntas cada tubo (cada 2.5m) y se analizaron tanto juntas en buen estado como juntas en mal estado, encontrándose una ligera influencia en los resultados del orden del 2.5% de mas en los coeficientes encontrados. Para el caso de algunos liners cuya metodología constructiva implica generar espirales y juntas frecuentes (distanciadas entre 15 y 30cm), valdría mucho la pena que cada fabricante analizara en laboratorio de hidráulica la influencia de estos factores en la rugosidad absoluta “ks”, y publicara los resultados para retroalimentar a los diseñadores, ya que hasta el momento no hay publicaciones.



Conclusiones

- ❑ Curiosamente, los experimentos documentados que se tomaron como ejemplo para validar la pertinencia de las aproximaciones explícitas entre el “n” y el “Ks”, no obstante haber sido desarrollados con tuberías de concreto incluso fundidas en sitio, mostraron obedecer al **criterio #1**, o sea a una rugosidad relativa entre 1×10^{-8} y 7×10^{-4} . Este criterio corresponde al de un flujo en el cual las fuerzas de rugosidad de la pared del conducto no son predominantes, y el efecto de la viscosidad del fluido es importante.
- ❑ Los tubos en el rango de la experimentación se comportaron como tubos “hidráulicamente lisos”, en vez de “hidráulicamente rugosos”. Sin embargo, si hubieran sido de otros diámetros un poco más bajos habrían calificado como tubos “hidráulicamente rugosos”, y la relación entre sus coeficientes “n” y “Ks” sería directa, sin depender del diámetro, bajo la condición de flujo turbulento desarrollado. Posiblemente tubos con rugosidades de “grano de arena equivalente” menores que las del concreto del experimento relacionado rara vez obedezcan al **criterio #2** para aplicaciones de alcantarillado, y en consecuencia su coeficiente de Manning va a aumentar con el diámetro.
- ❑ Es posible relacionar los coeficientes de fricción de Manning con las rugosidades absolutas “de altura de grano de arena equivalente” para las tuberías que transportan agua. Los experimentos en laboratorios reconocidos comprueban la congruencia satisfactoria con las ecuaciones y resultados sustentados.

Existen relaciones explícitas entre el “n” y el “Ks”

Conclusiones

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE MANNING EN FUNCIÓN DE LA RUGOSIDAD DE "GRANO EQUIVALENTE DE ARENA", Ks										
Gravedad (m/s ²)	9.8	Diámetro min (mm)		0.1	Diámetro máx (mm)		20000			
CRITERIO #2		Rango de aplicación para ϵ		Rango de aplicación para ϵ		CRITERIO #1: Flujo hidráulicamente Liso				
Rugosidad absoluta		0.07	0.0007	0.0007	0.00000001					
Ks (mm)	n Manning	Válido si D >= xxx mm	Válido si D <= xxx mm	Válido si D >= xxx mm	Válido si D <= xxx mm	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)
	Criterio 2					200	400	600	2000	3000
0.03	0.00686	0	43	43	20000	0.00786	0.0084	0.0087	0.0097	0.0100
0.04	0.00720	1	57	57	20000	0.00804	0.0086	0.0089	0.0099	0.0102
0.05	0.00747	1	71	71	20000	0.00818	0.0087	0.0090	0.0100	0.0104
0.06	0.00770	1	86	86	20000	0.00830	0.0088	0.0092	0.0102	0.0106
0.07	0.00791	1	100	100	20000	0.00839	0.0089	0.0093	0.0103	0.0107
0.08	0.00808	1	114	114	20000	0.00848	0.0090	0.0094	0.0104	0.0108
0.09	0.00824	1	129	129	20000	0.00856	0.0091	0.0094	0.0105	0.0109
0.1	0.00839	1	143	143	20000	0.00863	0.0092	0.0095	0.0106	0.0110
0.14	0.00887	2	200	200	20000	0.00886	0.0094	0.0098	0.0109	0.0113
0.2	0.00942	3	286	286	20000	N/A	0.0097	0.0100	0.0112	0.0116
0.3	0.01007	4	429	429	20000	N/A	N/A	0.0104	0.0115	0.0120
0.5	0.01097	7	714	714	20000	N/A	N/A	N/A	0.0120	0.0124
0.7	0.01160	10	1000	1000	20000	N/A	N/A	N/A	0.0123	0.0128
0.8	0.01186	11	1143	1143	20000	N/A	N/A	N/A	0.0124	0.0129
1	0.01231	14	1429	1429	20000	N/A	N/A	N/A	0.0127	0.0131
1.5	0.01317	21	2143	2143	20000	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0136
2	0.01382	29	2857	2857	20000	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0139
3	0.01479	43	4286	4286	20000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Hidráulicamente liso $\phi > 200\text{mm}$

Coeficiente de Manning aumentará gradualmente hasta alcanzar un valor de 0.011 para un diámetro de 2000 mm.



Validación de la formulación

Hidráulicamente rugoso
 $\emptyset \leq 200\text{mm}$
 “grano equivalente de arena” será de 0.15 mm



CALCULO DEL COEFICIENTE DE MANNING EN FUNCIÓN DE LA RUGOSIDAD DE "GRANO EQUIVALENTE DE ARENA", Ks										
Gravedad (m/s ²)	9.8	Diámetro min (mm)		0.1	Diámetro máx (mm)		20000			
CRITERIO #2		Rango de aplicación para ϵ		Rango de aplicación para ϵ		CRITERIO #1: Flujo hidráulicamente Liso				
Rugosidad absoluta		0.07	0.0007	0.0007	0.00000001					
Ks (mm)	n Manning	Válido si	Válido si	Válido si	Válido si	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)	n calculado para diám de (mm)
	Criterio 2	D >= xxx mm	D <= xxx mm	D >= xxx mm	D <= xxx mm					
						200	400	600	2000	3000
0.03	0.00686	0	43	43	20000	0.00786	0.0084	0.0087	0.0097	0.0100
0.04	0.00720	1	57	57	20000	0.00804	0.0086	0.0089	0.0099	0.0102
0.05	0.00747	1	71	71	20000	0.00818	0.0087	0.0090	0.0100	0.0104
0.06	0.00770	1	86	86	20000	0.00830	0.0088	0.0092	0.0102	0.0106
0.07	0.00791	1	100	100	20000	0.00839	0.0089	0.0093	0.0103	0.0107
0.08	0.00808	1	114	114	20000	0.00848	0.0090	0.0094	0.0104	0.0108
0.09	0.00824	1	129	129	20000	0.00856	0.0091	0.0094	0.0105	0.0109
0.1	0.00839	1	143	143	20000	0.00863	0.0092	0.0095	0.0106	0.0110
0.14	0.00887	2	200	200	20000	0.00886	0.0094	0.0098	0.0109	0.0113
0.2	0.00942	3	286	286	20000	N/A	0.0097	0.0100	0.0112	0.0116
0.3	0.01007	4	429	429	20000	N/A	N/A	0.0104	0.0115	0.0120
0.5	0.01097	7	714	714	20000	N/A	N/A	N/A	0.0120	0.0124
0.7	0.01160	10	1000	1000	20000	N/A	N/A	N/A	0.0123	0.0128
0.8	0.01186	11	1143	1143	20000	N/A	N/A	N/A	0.0124	0.0129
1	0.01231	14	1429	1429	20000	N/A	N/A	N/A	0.0127	0.0131
1.5	0.01317	21	2143	2143	20000	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0136
2	0.01382	29	2857	2857	20000	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0139
3	0.01479	43	4286	4286	20000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A



Conclusiones

- ❑ Se sugiere para lo que sigue que se ponga especial cuidado en medir los coeficientes “Ks” en laboratorio, calculando su valor a partir de la fórmula de Colebrook White, como lo hicimos a partir de los experimentos de Minnesota, y después utilizar las relaciones expresadas en las aproximaciones explícitas para calcular los respectivos coeficientes de Manning, para que así haya correspondencia entre estas dos magnitudes y no se manejen en forma dispersa e incoherente, como hasta el momento se ha hecho.
- ❑ Podría parecer contradictorio que el coeficiente de Manning aumente en la medida en que aumenta el diámetro para tubos “hidráulicamente lisos”, pero del hecho de que a mayor turbulencia es más importante el efecto de la viscosidad del agua que la rugosidad del conducto (sin llegar a la zona de flujo turbulento totalmente desarrollado), no importa lo liso que sea el tubo porque predomina el efecto de la viscosidad.

Ejemplo

Como ejemplo de aplicación practica, presentaremos el siguiente ejercicio para calcular el coeficiente de Manning en tuberías de diferentes diámetros (200mm,400mm,600mm,1000mm y 3000mm), a ser rehabilitadas con liners cuyos valores de rugosidad ks varían entre 0.03 y 0.07mm.

Lo primero es definir qué criterio aplicar (Flujo hidráulicamente liso o rugoso)

CALCULO DE RUGOSIDADES RELATIVAS PARA DEFINIR EL CRITERIO A APLICAR					
Dimetro de Tubo sin rehabilitar (mm)	200	400	600	1000	3000
Espesor liner (mm)	5	5	6	10	30
Diametro rehabilitado	190	390	588	980	2940
Rugosidad absoluta (mm)	Calculo de Rugosidades Relativas				
0.03	0.0001579	0.0000769	0.0000510	0.0000306	0.0000102
0.04	0.0002105	0.0001026	0.0000680	0.0000408	0.0000136
0.05	0.0002632	0.0001282	0.0000850	0.0000510	0.0000170
0.06	0.0003158	0.0001538	0.0001020	0.0000612	0.0000204
0.07	0.0003684	0.0001795	0.0001190	0.0000714	0.0000238

Como todas las rugosidades relativas son menores de 7×10^{-4} , el criterio a aplicar es el #1 (que equivale a flujo hidráulicamente liso)



Ejemplo

Se transcribe la ecuación 6A para el calculo del coeficiente de Manning en el caso de flujo hidráulicamente liso.

$$n = \frac{K_S^{15/194} D^{1.56/17.46}}{3^{15/194} 10^{225/194} \sqrt{g}} \quad (\text{Ecuación. 6A})$$

Los espesores de los liners se han colocado a manera de ejemplo como un centésimo del diámetro del tubo huésped pero mínimo 5mm

Ejemplo

Para los valores de ejemplo presentados, los resultados se muestran a continuación:

CALCULO DEL COEFICIENTE DE MANNING EN FUNCIÓN DE LA RUGOSIDAD DE "GRANO EQUIVALENTE DE ARENA", Ks					
CRITERIO #1					
	Diametro rehabilitado				
	190	390	588	980	2940
Ks (mm)	n Manning				
0.03	0.00783	0.00835	0.00866	0.00906	0.0100
0.04	0.00800	0.00853	0.00885	0.00927	0.0102
0.05	0.00814	0.00868	0.00901	0.00943	0.0104
0.06	0.00826	0.00881	0.00913	0.00956	0.0105
0.07	0.00836	0.00891	0.00924	0.00968	0.0107



Ejemplo

Al analizar los resultados presentados en la tabla anterior, se puede observar que se utilizaron diámetros de tuberías comerciales que al revestirlas con distintos liners hipotéticos generan coeficientes de Manning con valores entre 0.00779 y 0.0108.

- ☐ La variación del **Coeficiente de Manning depende en este caso del diámetro de la tubería** y del coeficiente hidráulico de rugosidad absoluta interior de la tubería.
- ☐ **El coeficiente de Manning puede ser determinado matemáticamente mediante una fórmula** que considera las variables anteriormente mencionadas.



Muchas gracias !!

Ing. SANTIAGO VILLANUEVA VALENCIA

Email: saviva1961@gmail.com

