

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA

CÁTEDRA DE "CONSTRUCCIONES HIDRÁULICAS"

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS
CONCEPTOS DE ESFUERZO
TRACTIVO Y VELOCIDAD DE
AUTOLIMPIEZA**

VERSIÓN AL 28/02/2002

Ing. Luis E. PÉREZ FARRÁS

INDICE

RESUMEN	1
1. OBJETIVO	2
2. ECUACIONES DE UTILIDAD PARA EL OBJETIVO BUSCADO	2
2.1. ECUACIONES BÁSICAS	2
2.2. ECUACIONES PARA SECCIÓN LLENA	4
2.3. ECUACIONES PARA SECCIÓN PARCIALMENTE LLENA	5
3. ANÁLISIS COMPARATIVO	7
3.1. CRITERIO ADOPTADO PARA LOS CAUDALES	7
3.2. CÁLCULO DE LOS CAUDALES	8
3.3. PENDIENTES RESULTANTES DE MANTENER IGUAL ESFUERZO TRACTIVO EN TODOS LOS DIAMETROS	9
3.4- PENDIENTES RESULTANTES DE MANTENER $\tau_0 = 0,1 \text{ KG/M}^2$ (IMPUESTO POR EL ENOHSA) PARA TODOS LOS "D".	11
4. CONCLUSIONES	12
CUADRO COMPARATIVO DE CAUDALES EROGADOS	14
CUADRO COMPARATIVO DE VALORES DE τ Y ϕ	15
GRÁFICOS	17

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS CONCEPTOS DE VELOCIDAD DE AUTOLIMPIEZA Y ESFUERZO TRACTIVO

RESUMEN

El presente trabajo pretende realizar la comparación en términos de remoción de partículas y económicos, de los conceptos derivados de las condiciones "Velocidad de Autolimpieza a sección llena de 0,6 m/s" y "Esfuerzo Tractivo". Para este último se analizan las condiciones que surgen de imponer el criterio del ENOHSA (ex CoFAPyS) y las que surgen de igualar ambas condiciones para el diámetro 150 mm, y hacerlas extensivas a todos los diámetros.

El primero de los criterios fue utilizado en nuestro país exitosamente por la ex- Obras Sanitarias de la Nación y el segundo es más utilizado en los dos últimos decenios, como consecuencia de una también exitosa aplicación en el Brasil.

La pretensión del presente trabajo es el de determinar en base a las comparaciones, las ventajas relativas en cuanto a la aplicación de uno u otro criterio.

Para lograr el objetivo pretendido, se pasa revista a la relación existente entre ambos, destacándose que constituyen en realidad una misma teoría, ya expuesta criteriosamente por Camps y Shields.

Para poder realizar comparaciones en función de caudales máximos y mínimos se establecen relaciones basadas en la normativa ENHOSA (ex CoFAPyS) usando los criterios de cálculo de Woodward y Posey (cálculo de canales), los que se revalorizan por su sencillez y practicidad para la realización de cálculos como los que motivan el presente trabajo.

Se brindan conclusiones que pueden ayudar a discernir sobre los campos de aplicación de una u otra metodología de cálculo.

LUIS E. PÉREZ FARRÁS
Ing. Civil y Sanitario

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS CONCEPTOS DE VELOCIDAD DE AUTOLIMPIEZA Y ESFUERZO TRACTIVO

1. OBJETIVO

Confeccionar cuadros y curvas que permitan comparar los parámetros fundamentales intervinientes y obtener conclusiones. En especial en lo referente a los tamaños de las partículas que teóricamente han de ser removidas para el esfuerzo tractivo correspondiente a la condición “velocidad de autolimpieza a sección llena de 0,6 m/s” (para $n=cte$) comparadas con las de la condición de "Esfuerzo Tractivo 0,1 kg/m²", impuesto por las normas del ENOHSA para el caudal Q_{L0} (máximo del día de menor consumo del año inicial).

2. ECUACIONES DE UTILIDAD PARA EL OBJETIVO BUSCADO

2.1. ECUACIONES BÁSICAS

El esfuerzo tractivo τ (dimensiones de fuerza dividida por superficie), surge de considerar la componente del peso del elemento de líquido rayado en la Figura 1, y distribuirla en la superficie lateral que el mismo ocupa.

La expresión resulta:

$$\tau = \gamma j R \quad (1)$$

En la que:

- " τ " es el “esfuerzo tractivo” en kg/m² o N/m.
- " γ " es el peso específico del agua.
- " R " es el “Radio medio hidráulico” (“Sección mojada” dividida por el “perímetro mojado”).
- " j " es la pendiente de la “solera del canal” (o “invertido” de la tubería si es una conducción cloacal).

La expresión de CHEZY es:

$$U = C \sqrt{R \cdot j} \quad (2)$$

En la que:

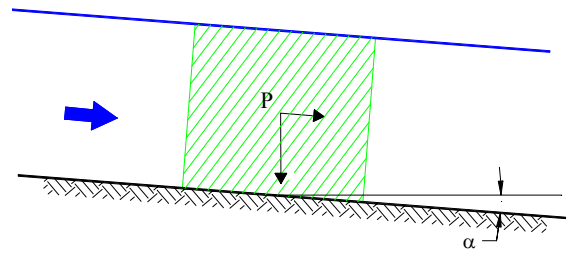
- U es la velocidad media en la sección en m/s.
- C es el coeficiente de CHEZY, dado por la expresión de Manning :

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

En la (3), n es un coeficiente que depende de la rugosidad de las paredes.

Si se reemplaza R_j despejado de la (2) en la (1) se obtiene:

$$\tau = \frac{\gamma}{C^2} U^2 \quad (4)$$



La fuerza tractiva es: $F_t = \gamma \cdot \underbrace{\Omega \cdot L}_{P} \cdot \text{sen } \alpha$

Pero, cuando α es pequeño, $\text{sen } \alpha = \text{tg } \alpha = \alpha$.
En este caso, el esfuerzo tractivo es:

$$\tau = \frac{F_t}{\chi \cdot L} = \frac{\gamma \cdot \Omega \cdot L \cdot j}{\chi \cdot L} = \gamma \cdot R \cdot j$$

Figura 1
Fuerza Tractiva

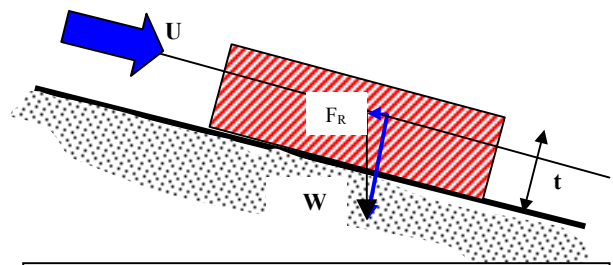
De la que se deduce un importante concepto: “El esfuerzo tractivo es proporcional al cuadrado de la velocidad media”.

Con estos conceptos finaliza el tratamiento, en forma escueta, de la teoría del “Esfuerzo Tractivo”. Para considerar la correspondiente a la velocidad de “auto-limpieza” se procede como sigue :

Se idealiza al material arrastrado o sedimentable (teoría de CAMP-SHIELDS) como una sucesión de esferas de diámetro ϕ y peso “específico de sólidos” γ_s , en contacto íntimo y dando lugar a una porosidad p, obviamente cubierta por el agua que brinda su “esfuerzo tractivo”.

El “esfuerzo resistente” se evalúa con la expresión:

$$\tau_R = (\gamma_s - \gamma) K \phi$$



La "Fuerza Resistente" es :
 $F_R = (\gamma_s - \gamma) \cdot (1-p) \cdot t \cdot \text{sen } \alpha$
Donde t es el volumen de superficie lateral unitaria; además, $t = \text{cte} \cdot \phi$. Haciendo : $(1-p) \cdot \text{cte} \cdot \phi \cdot \text{sen } \alpha = K$, se obtiene:
 $\tau_R = (\gamma_s - \gamma) \cdot K \cdot \phi$

Figura 2
Peso del Sedimento

En la que K es un coeficiente propio del líquido que puede variar entre 0,8 y 0,04.

Haciendo $\tau = \tau_R$ y despejando ϕ se obtiene:

$$\phi = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)k} \quad (5)$$

Se destaca que para un dado líquido el denominador es una constante numérica, por lo que a "un dado Esfuerzo Tractivo" le corresponde una partícula a ser efectivamente arrastrada.

Si en la (5) se reemplaza la (4), y se despeja U, se obtiene la expresión de la "velocidad de auto-limpieza".

$$U = C \sqrt{\frac{(\gamma_s - \gamma)k\phi}{\gamma}}$$

De la (2) j resulta:

$$j = \frac{U^2}{C^2 R}$$

La expresión de Darcy-Weisbach da:

$$j = \frac{f}{4 R} \frac{U^2}{2 g}$$

En la que "f" es el "coeficiente de fricción".

$$\therefore \frac{U^2}{C^2 R} = \frac{f}{4 R} \frac{U^2}{2 g}$$

De donde:

$$C = \sqrt{\frac{8 g}{f}}$$

Reemplazando en la expresión de la "velocidad de auto-limpieza", se obtiene la forma más conocida o difundida de la misma:

$$U = \sqrt{\frac{8g}{f} \frac{(\gamma_s - \gamma)}{\gamma} k \phi} \quad (6)$$

2.2. ECUACIONES PARA SECCIÓN LLENA

$$R_{II} = \frac{\Omega_{II}}{\chi_{II}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \pi \cdot D} = \frac{D}{4}$$

$$C = \frac{1}{n} \sqrt[6]{R} \quad \therefore \quad C^2 = \frac{1}{n^2} R^{0,333} = \frac{1}{n^2} \left(\frac{D}{4} \right)^{0,333}$$

Reemplazando en (4):

$$\tau_{II} = \frac{n^2 \gamma U^2}{(D/4)^{0,333}} \quad (7)$$

Se adoptan

$$\left\{ \begin{array}{l} n = 0,012 \\ \gamma \cong 1000 \text{ kg/m}^3 \\ U_{II} = 0,6 \text{ m/s (recomendación tradicional para autolimpieza)} \end{array} \right.$$

Reemplazando valores en la (7) resulta:

$$\therefore \tau_{II} = \frac{0,0822}{D^{0,333}} \quad (8)$$

2.3. ECUACIONES PARA SECCIÓN PARCIALMENTE LLENA

De reemplazar la (3) en la (2) surge:

$$\tau = \frac{\gamma U}{\left(\frac{6\sqrt{R}}{n} \right)^2} = \frac{n^2 \gamma U^2}{R^{0,333}} \quad (9)$$

Para el cálculo de la (9) se dispone de los gráficos:

- 1) Diagrama de Parámetros Geométricos
- 2) Diagrama de Elementos Hidráulicos.

Para la determinación de los valores de τ correspondientes a cada relación h/D , se establece la siguiente metodología.

Con $R_{II} = D/4$ se tabulan los valores para cada D (3° columna).

Para cada diámetro se procede así:

1. Para $h/D : 0,94; 0,7; 0,5$ y $0,39$ se obtienen de los gráficos los correspondientes valores de R/R_{II} y U/U_{II} (con la hipótesis de $n=cte$).
2. Con R_{II} y los valores obtenidos de las curvas se calculan R y U para cada caso.
3. Con la (9) (con sus constantes calculadas) se determina τ :

$$\tau = \frac{0,144}{R^{0,333}} U^2 \tag{10}$$

4. Con los valores de la (10) para cada diámetro y cada relación h/D , se calcula la (5), en la que:

- $k = 0,4$; remoción completa de arena pegajosa en condiciones medias (promedio aproximado entre 0,8 y 0,04).
- $\gamma_s = 2650 \text{ kg/m}^3$; Peso específico de la arena
- $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$; Peso específico del agua.

Por lo que la (5) queda:

$$\phi = 0,001515 \cdot \tau \tag{11}$$

5. Con los valores de la (11) se completan todas las columnas del cuadro comparativo.

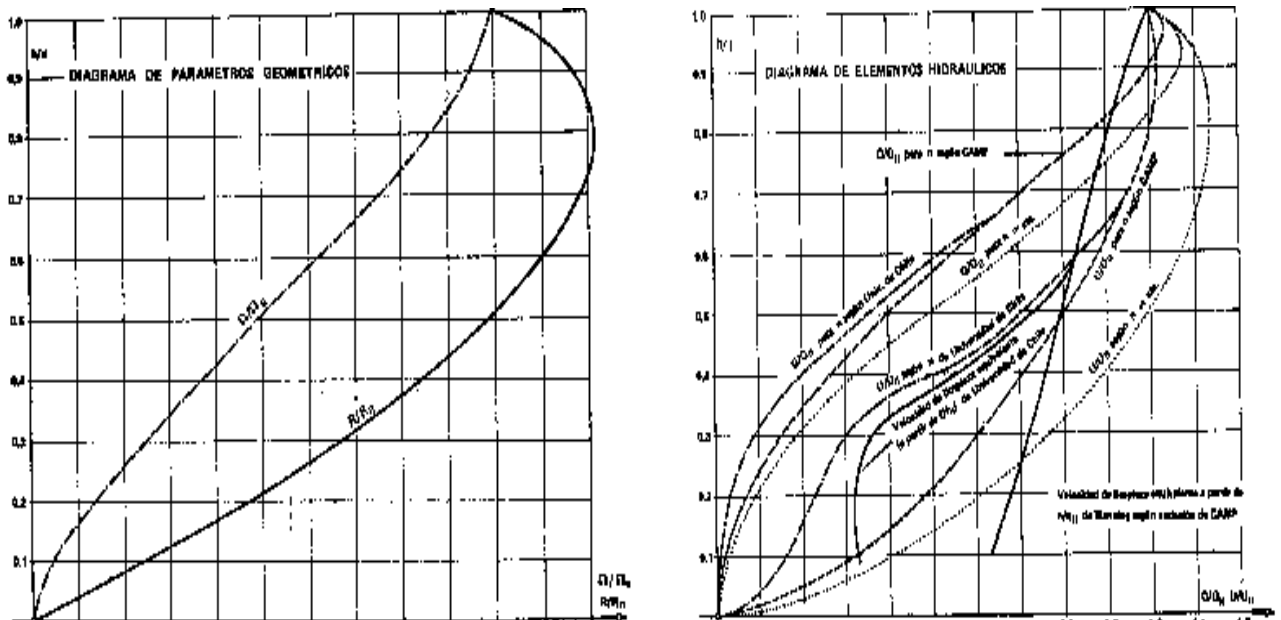


Figura 3
Relación entre Parámetros Geométricos e Hidráulicos

3. ANÁLISIS COMPARATIVO

3.1. CRITERIO ADOPTADO PARA LOS CAUDALES

Para posibilitar la comparación se adoptan las normas del ENOHSA y sus respectivos fundamentos, de reciente publicación. Se utilizan estos criterios porque, además de ser los únicos vigentes en el país, están fundamentados en los más recientes avances teórico-experimentales en el tema.

Las normas establecen que para el “Caudal Máximo del día de menor consumo del 1º año de la instalación” (Q_{L0}), el esfuerzo tractivo debe ser $\tau_0 = 0,10 \text{ kg/m}^2$.

El ENOHSA establece que Q_{L0} debe cumplir con:

$$Q_{L0} = \alpha_2 \alpha_1 Q_{c0} \quad (12)$$

En la que:

- α_2 es el coeficiente máximo diario.
- α_1 es el coeficiente mínimo diario.
- Q_{c0} es el “Caudal Medio para el Año Inicial”.

Valores de los Coeficientes del ENOHSA

Población Servida	α_1	α_2	α	β_1	β_2	β
$500 \text{ h} \leq P_s \leq 3000 \text{ h}$	1,40	1,90	2,66	0,60	0,50	0,30
$3000 \text{ h} < P_s \leq 15000 \text{ h}$	1,40	1,70	2,38	0,70	0,50	0,35
$15000 \text{ h} < P_s \leq 30000 \text{ h}$	1,30	1,50	1,95	0,70	0,60	0,42

Nota: Estos coeficientes no incluyen infiltración ni aportes de grandes usuarios.

Por otra parte se cumple, para un proyecto dado, la relación:

$$Q_{C20} = h Q_{C0} \Rightarrow Q_{C0} = Q_{C20}/h \quad (13)$$

En la que Q_{C20} es el “Caudal Medio para el Año 20” (fin del período de amortización). Reemplazando la (12) en la (11) se obtiene :

$$Q_{L0} = \alpha_2 \cdot \alpha_1 \cdot Q_{C20} / h \quad (14)$$

Para poblaciones entre 15000 y 30000 habitantes se establece que :

$$\alpha_2 = 1,50 ; \alpha_1 = 0,7$$

$$\Rightarrow \alpha_2 \alpha_1 / h = 1,05/h$$

Por lo que la (14) queda:

$$Q_{L0} = 1,05 Q_{C20} / h \quad (15)$$

Pero además y siempre siguiendo los fundamentos y normas del ENOHSA:

$$Q_{E20} = \alpha \cdot Q_{C20} = 1,95 Q_{C20}$$

Despejando de la anterior y reemplazando se obtiene:

$$Q_{L0} = \frac{1,05}{1,95 \eta} Q_{E20} = \frac{0,538}{\eta} Q_{E20} \quad (16)$$

En las dos últimas, Q_{E20} es el "Caudal Máximo del Año 20" (fin del plazo de amortización de la red de colectoras, y para la que se fija $h/D=0,94$ lo que coincide con la "Máxima Capacidad de Transporte de la Conducción").

3.2. CÁLCULO DE LOS CAUDALES

Para el cálculo de los caudales es sumamente práctico utilizar las tablas de Woodward y Posey las que brindan para cada relación h/D ; los valores principales a_{sc} y a_{sc}' , que vinculan a todas las variables puestas en juego y mediante las siguientes ecuaciones :

$$\frac{Q_n}{D^{2,666} \sqrt{j}} = a_{sc} \quad (17)$$

$$\frac{Q_n}{h^{2,666} \sqrt{j}} = a_{sc}' \quad (18)$$

Para calcular la capacidad de transporte (que debe coincidir con Q_{E20} que corresponde a la condición $h/D = 0,94$) se procede como sigue:

- a) Se determina a_{sc} (coeficiente para la sección "segmento de círculo") para cada h/D .

b) De la (16) se obtiene la expresión:

$$Q = \frac{a_{sc} D^{2,666} \sqrt{j}}{n} \quad (19)$$

La (19), para un dado j , se convierte para cada relación h/D en:

$$Q = cte D^{2,666} \quad (20)$$

c) Se destaca que los conceptos establecidos por el ENOHSA y la nomenclatura correspondiente implican considerar:

c_1) El caudal máximo del día de mayor consumo en el año final del plazo de amortización Q_{E20} . Con este caudal se diseñan las tuberías con la condición de $h/D = 0,94$.

c_2) El caudal máximo del día de menor consumo en el año inicial (Q_{L0}).

d) Con la (19) se pueden calcular los caudales en general y Q_{E20} (para $h/D=0,94$) en particular.

e) Q_{L0} se determina multiplicando Q_{E20} por $0,538/h$

f) La relación h/D para Q_{L0} queda fijada de antemano al fijar Q_{E20} para la relación $h/D=0,94$. En efecto, de la tabla surge que:

$$a_{sq} = \frac{Q_{E20} n}{D^{2,666} \sqrt{j}} = 0,335:$$

Escribiendo la condición para Q_{L0} , se obtiene:

$$a_{sq} = \frac{Q_{L0} n}{D^{2,666} \sqrt{j}} = \frac{0,538 Q_{E20} n}{\eta D^{2,666} \sqrt{j}} = \frac{0,538}{\eta} 0,3352 = \frac{0,18}{\eta} \quad (21)$$

Como para cada proyecto el valor de h es una constante fácilmente calculable, el valor a_{sq} es inmediato y queda determinado automáticamente al ser fijado h/D para Q_{E20} .

3.3. PENDIENTES RESULTANTES DE MANTENER IGUAL ESFUERZO TRACTIVO EN TODOS LOS DIAMETROS

Previo al cálculo de los caudales resulta conveniente completar el "cuadro comparativo de valores de t y f, con dos columnas relativas a las "pendientes necesarias".

De la (1) se deduce que:

$$j = \frac{\tau}{\gamma R} \quad (22)$$

El propósito ahora es el de confeccionar una columna que brinde las pendientes necesarias para que sea removida una dada partícula en todos los diámetros y para los caudales Q_{L0} .

Se adopta la condición resultante para $D=150$ mm, lo que implica adoptar $\tau_0=0,128\text{Kg/m}^2$, con lo que la partícula de $f \cong 0,2$ mm será efectivamente removida en todos los diámetros (condiciones del diámetro 150 mm en los análisis anteriores para $U=0,6$ m/s).

Para el cálculo se procede utilizando nuevamente las tablas de Woodward y Posey, pero ahora además teniendo en cuenta la columna que brinda la relación R/D en función de h/D .

Reemplazando en la (21) τ y γ , se obtiene la expresión de cálculo:

$$j = \frac{0,000128}{R} \quad (23)$$

Para el cálculo de $a_{s\varphi}$, de la (21), es preciso determinar la constante h propia de cada proyecto.

A título de posibilitar el ejemplo numérico, se adopta el criterio de cálculo de la Población Futura por el método de la tasa de crecimiento media anual constante. Por lo que el "caudal medio a 20 años" resulta :

$$Q_{C20} = P_0 (1+i)^n \delta \quad (24)$$

En la que:

- P_0 es la población al año cero
- i es la tasa de crecimiento
- d es la dotación
- n es el plazo de amortización ($n = 20$ años)

El caudal medio en el inicio es:

$$Q_{C0} = P_0 \delta \quad (25)$$

Dividiendo la (24) por la (25) y recordando la (13):

$$\frac{Q_{C20}}{Q_{C0}} = (1+i)^n = \eta$$

Suponiendo $i = 3 \% = 0,03$, h resulta : $h = 1,81$

Por lo que:

$$Q_{C0} = \frac{Q_{C20}}{1,81}$$

En esta caso, a_{sQ} de la (20) resulta:

$$a_{sQ} = 0,09944$$

De la tabla de Woodward y Posey surge que la relación "tirante - diámetro", para Q_{L0} , es:

$$h/D = 0,39$$

Condición para la cual la relación "Radio Hidráulico - Diámetro" resulta:

$$R/D = 0,2102$$

Reemplazando en la (23), se obtiene:

$$j = \frac{0,000608}{D} \quad (26)$$

Dando valores a D se completan las columnas buscadas.

Se estima oportuno brindar una columna precedente en la que se destaquen las pendientes correspondientes a la partícula que se remueve con el criterio de "velocidad de autolimpieza de 0,6 m/s".

Para ello, se utiliza nuevamente la (22) pero usando el valor del esfuerzo tractivo correspondiente a cada diámetro, con lo que resulta la expresión:

$$j = \frac{\tau}{210,2 D} \quad (27)$$

Se hace notar que, al considerar en los cálculos el valor n de la fórmula de Manning como constante, los valores del diámetro f de la partícula a remover para la condición $h/D=0,39$ resultan pesimistas ($U/U_{II}=0,88$), al tomar la variación de CAMP resultarían removidas partículas menores ($U/U_{II}=0,69$) y, de acuerdo a experiencias de la Universidad de Chile, menores aún ($U/U_{II}=0,39$).

3.4- PENDIENTES RESULTANTES DE MANTENER $\tau_0 = 0,1 \text{ kg/m}^2$ (IMPUESTO POR EL ENOHS) PARA TODOS LOS "D".

Considerando que la imposición del ENOHSA está fundada en buenos rendimientos comprobados por la experiencia, resulta interesante para las comparaciones a ser realizadas, la confección de una tercera columna, que brinde las pendientes necesarias para que se cumplimente en todos los diámetros de tuberías, un esfuerzo tractivo de $0,1 \text{ kg/m}^2$, lo que implica la remoción de partículas de $0,15 \text{ mm}$ y mayores.

Reemplazando el valor anterior en la (21) se obtiene:

$$j = \frac{0,0001}{R} \quad (28)$$

Como para $h/D = 0.39$, resulta $R/D = 0,2102$, reemplazando en la (28) se obtiene:

$$j = \frac{0,0004757}{D} \quad (29)$$

Dando valores a "D", se obtiene una tercera columna de pendientes, que son las necesarias para que sea removida en todos los diámetros de tuberías, la partícula que surge de la condición impuesta por el ENOHSA ($\tau_0 = 0,10 \text{ kg/m}^2$; $\phi = 0,15 \text{ mm}$).

Nótese que la condición impuesta conduce a instalaciones más económicas (menor pendiente a igualdad de diámetro) que la correspondiente a la condición de $U = 0,6 \text{ m/s}$ y hasta el diámetro 300 mm . A partir del diámetro 350 mm , resulta más económica la condición de "Velocidad de Autolimpieza".

4. CONCLUSIONES

- 1- Dado que el denominador de la (5) es cte para un dado líquido cloacal, surge que para un dado esfuerzo tractivo τ_0 una partícula ϕ_0 será la de mayor tamaño a ser removida (consecuentemente serán removidas las de menor tamaño y sedimentarán las de mayor tamaño).
- 2- De la (8) se desprende que al imponer "velocidad de autolimpieza de $0,6 \text{ m/s}$ ", para todos los casos el esfuerzo tractivo resulta función del diámetro, por lo que se remueven partículas distintas al variar éste (ver 2° columna del cuadro comparativo).
- 3- Al fijar condición de "autolimpieza" de $U=0,6 \text{ m/s}$ para todos los diámetros, la capacidad tractiva decrece con la raíz cúbica de la inversa del diámetro. Es decir que decrece el poder removedor de partículas con el aumento del mismo.
- 4- Consecuentemente, a medida que aumenta el diámetro, es menor la partícula que puede ser efectivamente removida por el escurrimiento.
- 5- Para el caso particular del diámetro 150 mm , en términos de primera aproximación tecnológica, pueden ser considerados equivalentes ambos criterios.

- 6- La difícil evaluación del k para cada líquido cloacal hace difícil precisar la dimensión de la partícula a remover. Desde que, fijar un valor de τ que da buenos resultados, es válido para todos los diámetros, surge como más conveniente el diseño en base al esfuerzo tractivo, puesto que así será removida la misma partícula en todos los diámetros independientemente de cual sea el valor real de las dimensiones de la misma.
- 7- El concepto de “velocidad de autolimpieza”, si bien es más racional que el de Esfuerzo tractivo (dado que en realidad es un perfeccionamiento del análisis del mismo) es más idealizado, puesto que se fundamenta en conceptos teóricos demasiado limitantes (partícula discreta esférica, dispersión homogénea de partículas discretas de idéntico tamaño y peso específico, etc.).
- 8- El cálculo, basado en un valor de Esfuerzo Tractivo prefijado para el valor de Q_{\min} (Q_{L0}), presupone un criterio idéntico para todos los diámetros.
- 9- La condición impuesta por el ENOHSA de $\tau = 0,1 \text{ Kg/m}^2$ para Q_{L0} , **resulta superada para diámetros inferiores a 300 mm por la condición de $U = 0,6 \text{ m/s}$ en lo relativo a su eficiencia como removedor de partículas de $f \cong 0,15$ o menores** (lo que se logra incluso con pendientes relativamente bajas). En cambio, resulta menos eficiente como removedor, para diámetros mayores.
- 10- Considerando que; la condición impuesta por el ENOHSA (basada en la experiencia) brinda excelentes resultados en la práctica en lo relativo a la remoción de partículas (aunque inferiores, en cuanto a la remoción de partículas, a los que se obtendrían aplicando el concepto de $U = 0,6 \text{ m/s}$ y siempre para tuberías de "D" inferior a 300 mm) surge claramente que la misma redundante en un beneficio económico, dado que implica menor pendiente a igualdad de diámetro (siempre en el rango que llega hasta $D = 0 \text{ 300 mm}$). En cambio, para diámetros superiores a 300 mm, la condición de $U = 0,6 \text{ m/s}$ resulta más económica pero ahora con menor eficiencia como removedor de partículas.
- 11- Nótese que las pendientes que aseguran el esfuerzo tractivo necesario para remover determinada partícula de diámetro f para la condición Q_{L0} son independientes de los valores numéricos de los caudales y varían con la relación h/D , la que es prefijada en cada caso al fijarse la relación $h/D = 0,94$ como condición de diseño para el caudal máximo.
- 12- En los prediseños de redes, se pueden determinar en función de los diámetros tentativos (previo al cálculo de los caudales), las pendientes mínimas que aseguren remoción eficiente de partículas para un Esfuerzo Tractivo preestablecido.

CUADRO COMPARATIVO DE CAUDALES EROGADOS

D (mm)	Caudales para j necesario (condición U = 0,6 m/s)			Caudales para j necesario (condición remoción $\phi = 0,2$ mm)		
	j (m/Km)	$Q_{h/D=0,94}$ (m ³ /s)	$Q_{h/D=0,355}$ (m ³ /s)	j (m/Km)	$Q_{h/D=0,94}$ (m ³ /s)	$Q_{h/D=0,355}$ (m ³ /s)
150	4,49	0,0118	0,00298	4,49	0,0118	0,00298
200	3,03	0,0209	0,00528	3,37	0,0220	0,00556
250	2,26	0,0327	0,00826	2,69	0,0357	0,00901
300	1,77	0,0471	0,01189	2,24	0,0530	0,01337
350	1,44	0,0641	0,01017	1,92	0,0740	0,01867
400	1,21	0,0839	0,02116	1,68	0,0988	0,02494
500	0,89	0,1304	0,03290	1,35	0,1606	0,04052
600	0,71	0,1895	0,04778	1,12	0,2379	0,0600
700	0,57	0,2560	0,06457	0,961	0,3324	0,0838
800	0,48	0,3354	0,08461	0,84	0,4437	0,1119
900	0,41	0,4244	0,1070	0,75	0,5739	0,1447
1000	0,36	0,5266	0,1330	0,67	0,7184	0,1812
1100	0,31	0,6301	0,1559	0,61	0,8838	0,2229

Nota 1: Se recuerda que:

$$Q_{h/D=0,94} = Q_{E20}$$

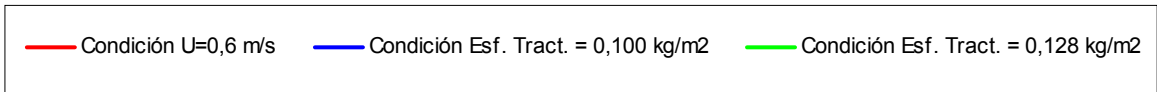
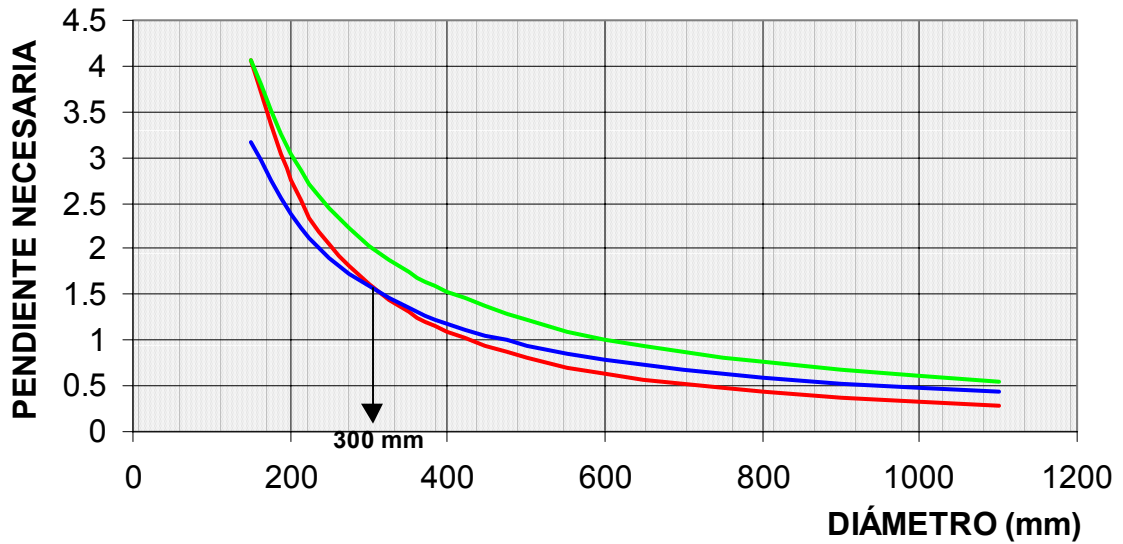
$$Q_{h/D=0,355} = Q_{L0} = 0,2522 Q_{E20}$$

CUADRO COMPARATIVO DE VALORES DE τ Y ϕ

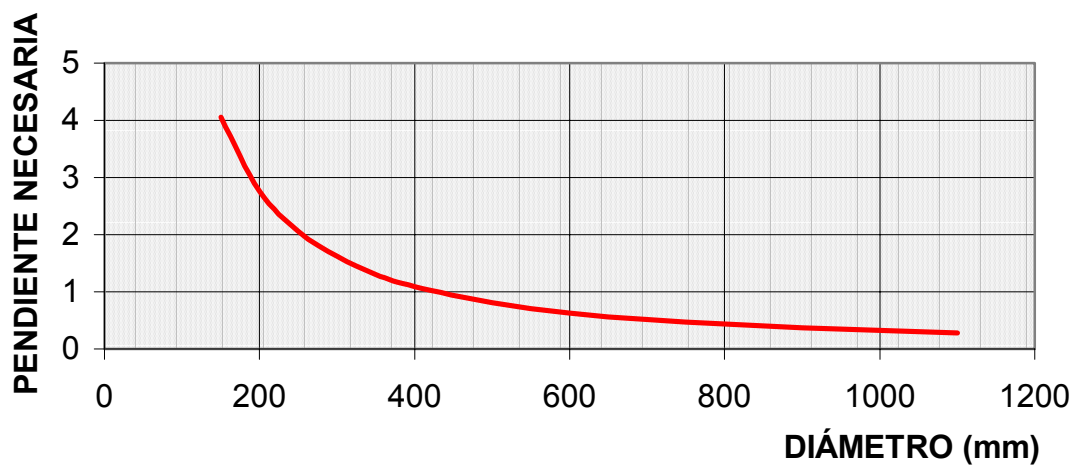
D (mm)	$R_{II} = D/4$ (m)	SECCIÓN LLENA		h/D = 0,94		h/D = 0,7		h/D = 0,5		h/D = 0,39		Pendiente necesaria (m/km)	Pendiente necesaria para remover $f \cong 0,2$ mm (m/Km)	Pendiente necesaria para remover $f \cong 0,15$ mm (m/Km)
		τ (kg/m ²)	ϕ (mm)	τ (kg/m ²)	ϕ (mm)	τ (kg/m ²)	ϕ (mm)	τ (kg/m ²)	ϕ (mm)	τ (kg/m ²)	ϕ (mm)			
150	0,0375	0,154	0,233	0,178	0,270	0,183	0,277	0,150	0,227	0,128	0,194	4,06	4,06	3,17
200	0,050	0,140	0,212	0,163	0,247	0,167	0,253	0,140	0,212	0,116	0,176	2,76	3,04	2,38
250	0,0625	0,130	0,197	0,152	0,230	0,155	0,235	0,130	0,197	0,108	0,164	2,06	2,44	1,90
300	0,075	0,122	0,185	0,142	0,215	0,146	0,221	0,120	0,182	0,102	0,154	1,65	2,03	1,59
350	0,0875	0,116	0,176	0,135	0,205	0,138	0,209	0,115	0,174	0,096	0,145	1,30	1,74	1,36
400	0,100	0,111	0,168	0,129	0,195	0,132	0,200	0,110	0,167	0,092	0,139	1,09	1,52	1,19
500	0,125	0,103	0,156	0,120	0,182	0,123	0,186	0,103	0,156	0,085	0,129	0,81	1,22	0,95
600	0,150	0,097	0,147	0,113	0,171	0,116	0,176	0,096	0,145	0,080	0,121	0,63	1,01	0,79
700	0,175	0,093	0,141	0,107	0,162	0,110	0,167	0,092	0,139	0,076	0,115	0,51	0,87	0,68
800	0,200	0,088	0,133	0,103	0,156	0,105	0,159	0,088	0,133	0,073	0,111	0,43	0,76	0,59
900	0,225	0,085	0,129	0,099	0,149	0,101	0,153	0,085	0,129	0,070	0,106	0,37	0,68	0,53
1000	0,250	0,082	0,124	0,095	0,144	0,098	0,148	0,082	0,124	0,068	0,103	0,32	0,61	0,47
1100	0,275	0,079	0,120	0,0925	0,140	0,095	0,144	0,079	0,120	0,066	0,100	0,29	0,55	0,43

GRÁFICOS

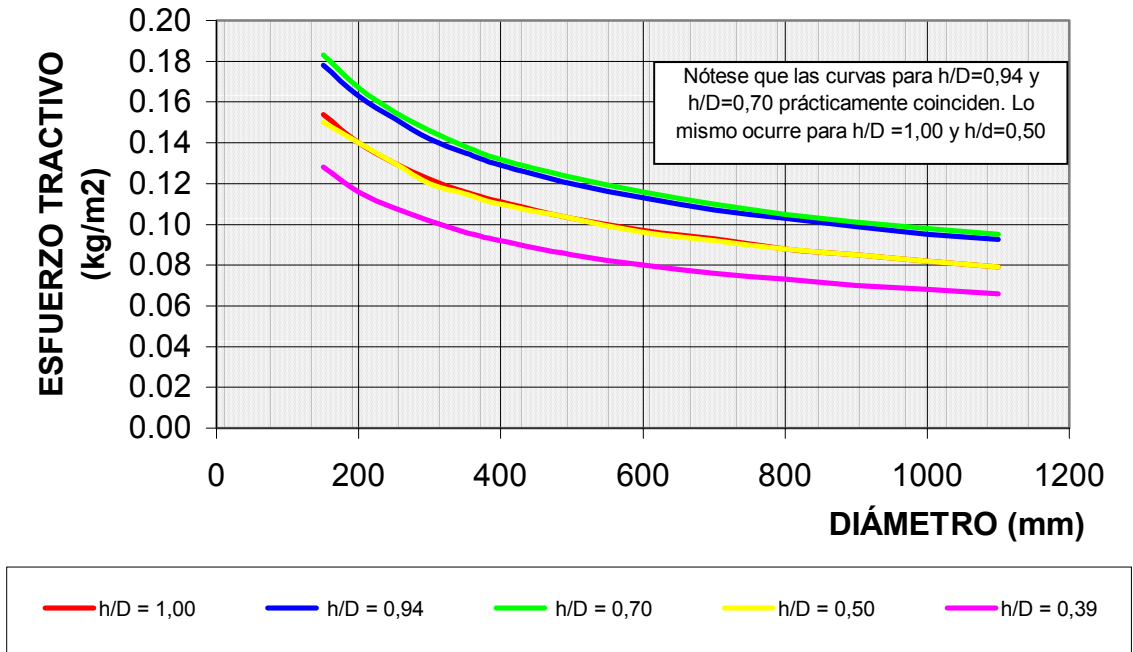
RELACIÓN ENTRE LA PENDIENTE NECESARIA PARA LA REMOCIÓN Y EL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA



RELACIÓN ENTRE LA PENDIENTE NECESARIA PARA REMOVER PARTÍCULAS CON $\phi = 0,2$ mm Y EL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA



RELACIÓN ENTRE EL ESFUERZO TRACTIVO Y EL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA



RELACIÓN ENTRE EL DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS REMOVIDAS Y EL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA

(Condición $U=0,6$ m/s - Sección Llena)

