

Estudios en honor de
Francisco Javier Domínguez
AUCH, 5ª Serie, N° 8 (1985): 525-540

SEMEJANZA MECANICA EN EL MODELO HIDRAULICO DE UNA RED PRIMARIA DE ABASTECIMIENTO

M.I. GILBERTO SOTELO AVILA
Universidad Nacional Autónoma de México

ANTECEDENTES

La utilización de modelos físicos reducidos ha sido un medio auxiliar valioso en la observación e investigación de fenómenos de escurrimiento para el proyecto y operación de obras hidráulicas. Las pruebas en el modelo deben realizarse de manera que en los fenómenos observados las magnitudes por medir, tales como dimensiones, tiempos, velocidades, gastos, presiones, etc., puedan ser transformadas a valores del prototipo. Esto significa que las escalas correspondientes a dichas magnitudes deben ser cantidades conocidas, lo que permite que entre modelo y prototipo exista semejanza geométrica y dinámica.

SEMEJANZA GEOMÉTRICA

La semejanza geométrica implica que exista correspondencia, en principio sin distorsión, entre dimensiones homólogas de un modelo y su prototipo (Fig. 1). Cuando hay distorsión existen escalas distintas para las dimensiones, por ejemplo para la longitud del tubo, para su diámetro y también para los desniveles correspondientes en dimensiones verticales.

Considerando que el subíndice p corresponde a las características en el prototipo y m en el modelo, en caso de no existir distorsión la escala geométrica es

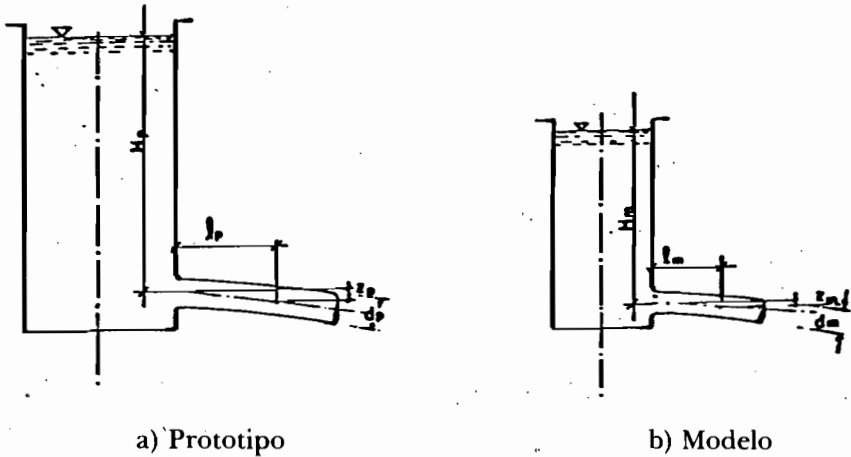


Fig. 1. Semejanza geométrica y dinámica

$$l_e = \frac{l_p}{l_m} = \frac{H_p}{H_m} = \frac{z_p}{z_m} = \frac{d_p}{d_m} = \dots$$

En rigor, la semejanza geométrica debe existir también para las rugosidades de la pared, esto es, las protuberancias debidas a la rugosidad quedan también definidas por la escala geométrica del modelo.

SEMEJANZA DINÁMICA

Para lograr semejanza dinámica entre los fenómenos hidráulicos en prototipo y modelo es necesario determinar la magnitud de otras escalas que relacionen características cinemáticas y dinámicas entre ambos. Existe así escalas de velocidad v_e , tiempo t_e , aceleración a_e , masa m_e , gasto Q_e . Por definición resulta también que

$$v_e = \frac{l_e}{t_e} \quad (1)$$

$$a_e = \frac{v_e}{t_e} = \frac{l_e}{t_e^2} \quad (2)$$

$$m_e = \rho_e l_e^3 \quad (3)$$

$$Q_e = l_e^2 v_e \quad (4)$$

La semejanza dinámica está basada en el principio de Kline: "si dos sistemas obedecen al mismo grupo de ecuaciones y condiciones gobernantes y los valores de todos los parámetros y condiciones son idénticos, los dos sistemas deben exhibir comportamientos semejantes con tal que exista una solución única para el grupo de ecuaciones y condiciones en ambos sistemas".

La condición de Bertrand para la semejanza entre un modelo hidráulico y su prototipo establece que la segunda Ley de Newton gobierne ambas estructuras, esto es que

$$F_p = m_p a_p$$

$$F_m = m_m a_m$$

Dividiendo entre sí ambas ecuaciones resulta

$$F_e = m_e a_e \quad (5)$$

y tomando en cuenta las ecs. (2) y (3) resulta la llamada condición de Bertrand

$$F_e = \frac{\rho_e l_e^3 v_e}{t_e} = \frac{\rho_e l_e^4}{t_e^2} \quad (6)$$

Las ecs. (1) a (5) indican que para conocer las escalas de todas las variables que intervienen en el fenómeno por estudiar, es necesario prefijar por lo menos las escalas geométricas y la de fuerza. Ambas se eligen de acuerdo con el objeto del modelo y con la acción de la fuerza que sea la preponderante en el fenómeno por estudiar, logrando así semejanza en los efectos dinámicos de dicha fuerza. Esto implica que, en general, habrá semejanza imperfecta ya que ésta se podrá alcanzar sólo para la fuerza considerada.

LEYES DE SEMEJANZA

LEY DE REYNOLDS

Existen pocos casos en que la fuerza viscosa es la más importante en el

fenómeno por estudiar, pudiendo despreciarse el efecto de otras como la de peso o la de fricción.

De acuerdo con la ley de viscosidad de Newton $F = A \mu dv/dy$, la escala de fuerza para el caso de un modelo sin distorsión resulta

$$F_e = l_e^2 \mu_e \frac{v_e}{l_e} = l_e \mu_e v_e \quad (7)$$

Igualando esta ecuación con la (6), la escala de tiempo es

$$t_e = \frac{l_e^2}{\mu_e / \rho_e} \quad (8)$$

y de la ec. (1) resulta también

$$v_e = \frac{\mu_e / \rho_e}{l_e} \quad (9)$$

Con las ecs. (8) y (9), de las ecs. (2), (3), (4) y (7) se tiene que

$$a_e = \frac{(\mu_e / \rho_e)^2}{l_e^3} \quad (10)$$

$$m_e = \rho_e l_e^3 \quad (11)$$

$$Q_e = l_e \frac{\mu_e}{\rho_e} \quad (12)$$

$$F_e = \frac{\mu_e^2}{\rho_e} \quad (13)$$

Todavía más, la ec. (9) muestra que

$$\frac{v_e l_e}{\mu_e / \rho_e} = 1$$

o bien que

$$\frac{v_p l_p}{\mu_p / \rho_p} = \frac{v_m l_m}{\mu_m / \rho_m} \quad (14)$$

La ec. (14) indica que el parámetro que aparece a ambos lados es igual en modelo y prototipo para que exista semejanza en fenómenos donde la fuerza de viscosidad es preponderante sobre otras. Dicho parámetro es adimensional y se conoce con el nombre de número de Reynolds; cuando se utiliza como lo indica la ec. (14), la semejanza sigue la ley de Reynolds, siendo pocos los fenómenos en obras hidráulicas en que se aplica.

LEY DE FROUDE

Considerando que la fuerza de peso es ahora la preponderante sobre las demás, el peso del líquido juega el papel más importante. Este es el caso de la gran mayoría de problemas de ingeniería hidráulica.

Según esto se tiene que $g_e = a_e = 1$. Utilizando el mismo líquido en prototipo y modelo $\rho_e = \mu_e = 1$ y no habiendo distorsión $v_e = l_e/t_e$. Por tanto, las ecs. (2), (3), (4) y (5) resultan

$$v_e = t_e = l_e^{1/2} \quad (15)$$

$$m_e = l_e^3 \quad (16)$$

$$Q_e = l_e^{5/2} \quad (17)$$

$$F_e = l_e^3 \quad (18)$$

$$\frac{v_e}{\sqrt{g_e l_e}} = 1 \quad (19a)$$

$$\frac{v_p}{\sqrt{g_p l_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{g_m l_m}} \quad (19b)$$

El parámetro que aparece a ambos lados de la ec. (19b) debe ser igual en modelo y prototipo. Dicho parámetro es adimensional y se conoce con el nombre de número de Froude. Al utilizarlo de la manera que señala la ec. (19b) la semejanza sigue la ley de Froude.

De manera similar puede obtenerse la ley de Euler cuando la fuerza debida a cambios de presión es la preponderante y la ley de Weber cuando lo es la fuerza debida a la tensión superficial.

Semejanza con la fuerza de fricción

La pérdida por fricción en una tubería a presión de diámetro d , longitud l , velocidad v del agua y factor de fricción $f = f(R_e, \epsilon/d)$ (Fig. 2), se calcula con la fórmula de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (20)$$

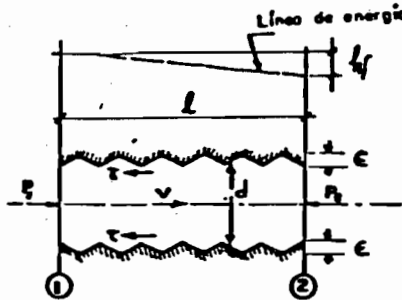


Fig. 2. Pérdida por fricción en una tubería

La Fig. 3 presenta un esquema de diagrama universal de Moody para la determinación del factor de fricción f . Esta figura indica que para una rugosidad relativa ϵ/d especificada, el factor de fricción en la zona rugosa —para números de Reynolds— grandes —depende solamente de ϵ/d .

Por el contrario, en la zona de transición f depende de ϵ/d y de R_e , mientras que en la zona de tubo liso sólo de R_e . Es claro que de acuerdo con el valor del número de Reynolds, el mismo tubo puede comportarse dentro de la zona rugosa o de la de tubo liso.

A fin de tener mayor generalidad en los desarrollos, se acepta que en principio haya distorsión en tres dimensiones entre modelo y prototipo y que existan tres escalas geométricas que según la Fig. 1 son $l_e = l_p/l_m$, $z_e = z_p/z_m = H_p/H_m$, $d_e = d_p/d_m$

La fuerza de fricción para modelo o prototipo puede determinarse de la ec. (20) como sigue

$$F_f = \gamma A f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

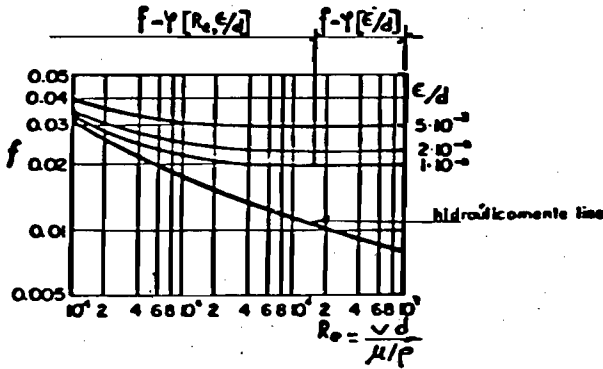


Fig. 3. Relación entre factor de fricción, número de Reynolds y rugosidad relativa.

donde A área del tubo y γ peso específico del agua.

La escala de fuerza sería entonces

$$F_e = \frac{A_p}{A_m} \frac{f_p}{f_m} \frac{l_p}{l_m} \frac{d_m}{d_p} \left(\frac{v_p}{v_m}\right)^2 = \frac{f_p}{f_m} \left(\frac{d_p}{d_m}\right)^2 \frac{l_p}{l_m} \frac{d_m}{d_p} \left(\frac{v_p}{v_m}\right)^2$$

o bien

$$F_e = \frac{f_p}{f_m} d_e l_e v_e^2 \tag{21}$$

La condición de Bertrand (ec. 6) se convierte en este caso en $F_e = d_e^2 l_e v_e/t_e$, que al igualar con la ec. (21) resulta

$$\frac{d_e^2 l_e}{t_e} = \frac{f_p}{f_m} d_e l_e v_e$$

y recordando que $v_e = l_e/t_e$ se obtiene

$$\frac{f_p}{f_m} \frac{l_e}{d_e} = 1 \tag{22a}$$

$$\frac{f_p (Re_e, \epsilon/d)}{f_m (Re_e, \epsilon/d)} = \frac{d_e}{l_e} \tag{22b}$$

Esto indica que para que exista el mismo escurrimiento turbulento en

prototipo y modelo, la relación entre los factores de fricción en ambos queda en función de las escalas de longitud y diámetro que se elijan y que la relación f_p/f_m resultante puede alcanzarse con valores distintos del número de Reynolds y de la rugosidad relativa, dentro o no de la zona de transición (Fig. 3). Esto significa que puede lograrse semejanza dinámica en los fenómenos de fricción sin tener semejanza geométrica en las rugosidades de la pared y que la condición de Bertrand sólo puede contener fuerzas de fricción en flujo laminar o en flujo turbulento, pero nunca un modelo con flujo laminar puede ser semejante a un prototipo con flujo turbulento.

Este hecho puede ser también contemplado desde otro punto de vista. De la ec. (20) resulta

$$1 = \frac{f}{2} \frac{l}{d} \frac{v^2}{gh_f}$$

Considerando al número de Froude $F_r^2 = v^2/gh_f$ resulta también que

$$1 = \frac{f}{2} \frac{l}{d} F_r^2$$

y para modelo y prototipo

$$1 = \frac{f_p}{f_m} \frac{l_e}{d_e} \frac{F_{r_p}^2}{F_{r_m}^2}$$

Tomando en cuenta a la ec. (22 a) se tiene que

$$F_{r_e} = \frac{F_{r_p}}{F_{r_m}} = \frac{v_e}{\sqrt{g_e h_{f_e}}} = 1 \quad (23)$$

Esto indica que para obtener semejanza dinámica en fenómenos de fricción, el número de Froude (calculado con la pérdida de fricción como dimensión 1 característica) debe ser igual en modelo y prototipo y no el número de Reynolds como a menudo se afirma, si bien la fuerza de fricción no está condicionada por la fuerza de gravedad.

En virtud de que en el modelo se van a manejar tubos de menor diámetro que en prototipo de la Fig. 3, esto implica $f_m \leq f_p$, o bien que $f_p/f_m \geq 1$ y a su vez, de la ec. (22 a) que $d_e \geq l_e$. Esto haría impracticable la distorsión, resultando más conveniente que $d_e = l_e$. Lo anterior indica que

para lograr semejanza en la fuerza de fricción es casi imposible distorsionar el modelo por lo que se refiere a las dimensiones de longitud y diámetro de los tubos.

De la ec. (20) la escala de pérdida de fricción debe ser congruente con la escala geométrica de dimensiones verticales, esto es $h_{fc} = z_e$ y por tanto

$$v_e = \sqrt{z_e} \quad (24)$$

También de las ecs. (21), (22) y (24) se tiene que

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{f_p}{f_m} d_e l_e z_e = \frac{f_p}{f_m} \frac{l_e}{d_e} d_e^2 z_e \\ F_e &= d_e^2 z_e \end{aligned} \quad (25)$$

Igualando este resultado con la condición de Bertrand, es

$$\begin{aligned} \frac{d_e^2 l_e \sqrt{z_e}}{t_e} &= d_e^2 z_e \\ t_e &= \frac{l_e}{\sqrt{z_e}} \end{aligned} \quad (26)$$

Así mismo se tiene que

$$a_e = \frac{z_e}{l_e} \quad (27)$$

$$m_e = d_e^2 l_e \quad (28)$$

$$Q_e = \sqrt{z_e} d_e^2 \quad (29)$$

Semejanza con la fuerza por pérdidas locales

Cuando se desea semejanza en fenómenos producidos por cambios de presión en zonas donde hay cambios de energía, la pérdida correspondiente se calcula con una fórmula del tipo

$$h = K \frac{v^2}{2g}$$

Donde K coeficiente de pérdida local que depende de los cambios

geométricos locales de la conducción. La escala correspondiente entre modelo y prototipo sería

$$h_e = K_e v_e^2$$

Existiendo similitud geométrica K_e debe ser igual a 1, de manera que si h_e es congruente con la escala geométrica de dimensiones verticales, resulta

$$v_e = \sqrt{z_e}$$

Ello equivale a utilizar la ley de Froude de manera idéntica que en el caso de fuerzas de fricción y que si se desea semejanza en una o ambas fuerzas es suficiente con utilizar los resultados obtenidos para la similitud con fuerzas de fricción.

SEMEJANZA PARA UN MODELO HIDRÁULICO DE RED PRIMARIA DE ABASTECIMIENTO

En el modelo hidráulico de una red primaria de abastecimiento tienen que imponerse varias condiciones para que su ejecución y operación resulte práctica y económica. Las más importantes son:

- a) Utilizar agua en su operación.
- b) Utilizar tubos con el menor diámetro posible, que sean comerciales, eliminen la presencia de flujo laminar y permitan semejanza en pérdidas locales, en pérdidas de fricción o en ambas.
- c) La escala de dimensiones horizontales tendrá que ser muy parecida o igual que la de diámetros, lo que obligará a espacios destinados al modelo muy grandes o bien a abandonar la semejanza en fuerzas de fricción.
- d) La escala de dimensiones verticales seguramente tendrá que ser distinta de la de diámetros y dimensiones horizontales, a fin de reproducir con más precisión los desniveles geométricos, tanques de distribución, plantas de bombeo, pérdidas de carga en válvulas, etc.
- e) Lo anterior implica que, probablemente, sea necesaria la distorsión geométrica en tres direcciones, pero con seguridad sólo en dos la de dimensiones geométricas de los tubos y la de dimensiones verticales.

La tabla 1 presenta el cálculo de diámetros necesarios en un modelo hidráulico de acuerdo a tamaños comerciales en tubo de cobre, para los diámetros de 20 a 72 pulgadas que tendría una red primaria como la de la

TABLA I
DIÁMETROS EN MODELO, CON TUBERÍA DE COBRE, DE ACUERDO CON LOS
DIFERENTES DIÁMETROS QUE TIENE LA RED PRIMARIA

Proto- tipo	Pulgadas	20	24	30	32	36	42	48	72
	Centímetros	51	61	76	81	91	107	122	183
61.54	d _m Pulg.	1/4	≅ 3/8	≅ 1/2	≅ 5/8	≅ 3/4			
	Int. Pulg.	0.325	0.39	0.488	0.52	0.585	0.683	0.78	1.17
44.44	d _m Pulg.	3/8	≅ 1/2	≅ 5/8	3/4	≅ 1			1 1/2
	Int. Pulg.	0.450	0.54	0.675	0.72	0.81	0.945	1.08	1.62
35.15	d _m nom.	1/2	≅ 5/8	≅ 3/4	≅ 1	≅ 2			
	Pulg.	0.569	0.683	0.854	0.910	1.024	1.195	1.366	2.048
28.99	d _m nom.	5/8	≅ 3/4	≅ 1	≅ 1 1/4	≅ 2 1/2			
	Pulg.	0.690	0.828	1.035	1.104	1.242	1.449	1.656	2.484
24.66	d _m nom.	3/4	≅ 1 1/4						≅ 3
	Pulg.	0.811	0.973	1.217	1.298	1.460	1.703	1.946	2.920

Modelo: escala de y diámetros

Proto-tipo	Pulgadas		20	24	30	32	36	42	48	72
	Centímetros		51	61	76	81	91	107	122	183
18.96	d_m nom.	1	$\cong 1 \frac{1}{4}$				$\cong 2$			$\cong 2 \frac{1}{2}$
	Pulg.	1.055	1.2660	1.583	1.688	1.899	2.216	2.532	3.798	
15.49	d_m nom.	$1 \frac{1}{4}$	$\cong 1 \frac{1}{2}$			$\cong 2$				
	Pulg.	1.291	1.549	1.937	2.066	2.324	2.711	3.098	4.648	
13.10	d_m nom.	$1 \frac{1}{2}$			$\cong 2 \frac{1}{2}$					
	Pulg.	1.527	1.832	2.291	2.443	2.749	3.207	3.665	5.497	
9.955	d_m nom.	2		$\cong 3$					$\cong 5$	
	Pulg.	2.009	2.411	3.014	3.214	3.616	4.219	4.822	7.232	

Cd. de México. Debido a que la tubería de 5/8 pulg. es de fabricación especial conviene que no se utilice demasiado en el modelo, esto es que no corresponda a tubos de 20, 36 y 48 pulgadas que son los que cubren la mayor longitud de red.

Considerando que en principio se eligen las escalas $d_e = 61.54$ y 44.44 que proporcionan los diámetros más pequeños, la tabla 2 muestra los factores de fricción f correspondientes a modelo y prototipo para flujo turbulento, así como la escala l_e calculada de la ec. (22a) para los dos valores asignados a d_e .

La tabla 2 muestra que la escala de longitudes l_e tendría que ser muy pequeña, lo que ocasionaría un modelo de muy grandes dimensiones, imposible de ejecutar. Otra solución sería elegir un material en modelo

TABLA 2
FACTORES DE FRICCIÓN EN MODELO Y PROTOTIPO Y MAGNITUD
DE LA ESCALA l_e NECESARIA PARA ESCALAS $d_e = 61.54$ y 44.44

diám. pulg.	20	24	30	32	36	42	48	72
diám. cm.	51	61	76	81	91	107	122	183
f_p	0.023	0.022	0.021	0.02	0.0195	0.019	0.0185	0.017
diám. pulg.	0.325	0.39	0.488	0.52	0.585	0.683	0.78	1.17
diám. cm.	0.83	0.99	1.24	1.32	1.49	1.73	1.98	2.97
f_m	0.014	1.013	0.0125	0.0123	0.012	0.0118	0.0113	0.0108
f_p/f_m	1.64	1.69	1.68	1.63	1.63	1.61	1.61	1.57
l_e	37.52	36.41	36.63	37.75	37.75	38.22	38.22	39.19
diám. pulg.	0.45	0.54	0.675	0.72	0.81	0.945	1.08	1.62
diám. cm.	1.14	1.37	1.71	1.83	2.06	2.40	2.74	4.11
f_m	0.013	0.0122	0.0117	0.0115	0.0113	0.011	0.0109	0.01
f_p/f_m	1.77	1.80	1.795	1.74	1.73	1.73	1.70	1.70
l_e	25.1	24.7	24.76	25.5	25.7	25.7	26.1	26.1

que fuese muy rugoso. Por ejemplo, manteniendo $d_e = 61.54$ y haciendo $l_e = 500$ que proporcionaría dimensiones razonables, de la ec. (22 a) para $d_p = 20$ pulgadas, se tiene

$$f_m = f_p \frac{l_e}{d_e} = 0.023 \frac{500}{61.54} = 0.187$$

y de la Fig. 3 esto implica una rugosidad enorme en modelo imposible de proporcionar.

La única solución consiste en eliminar la semejanza en pérdida de fricción y lograrla sólo en pérdida local, no existiendo entonces restricción en cuanto a la selección de las escalas geométricas pudiendo tener las tres distorsiones. Sin embargo, esto haría que un modelo de esta naturaleza fuese impracticable, a menos que la pérdida de fricción se substituyera mediante elementos que produjeran pérdidas concentradas equivalentes. Esto dificulta enormemente su calibración.

La tabla 3 indica el espacio físico aproximado que se destinaría al modelo según el área del D.F. en que se extiende la red y que es de aproximadamente: 40×32 km.

TABLA 3
ESPACIO DESTINADO AL MODELO SEGÚN LA ESCALA HORIZONTAL

l_e	100	750	500	250	100
Espacio aprox. en m.	40×32	53×43	80×64	160×128	400×320

Además de las ecs. (24) y (29), en la tabla 4 se calculan las escalas de velocidad y de gasto para diferentes combinaciones de d_e y z_e . Así mismo, considerando que actualmente el abastecimiento total a la ciudad es de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, se incluyen también los gastos que tendría el modelo en m^3/s , los cuales son siempre muy pequeños.

CONCLUSIONES

1. Las escalas más recomendables para dimensiones horizontales 1:500 ó 1:250, para dimensiones verticales: 1:50 ó 1:25 y para los diámetros la que proporcione mayor gasto en el modelo que sería: 1:15.49 ó bien 1:18.96.
2. El modelo tendría semejanza en el efecto de pérdidas locales. Las

TABLA 4
 ESCALA DE VELOCIDAD Y GASTO TOTAL EN EL MODELO
 PARA DIFERENTES VALORES DE d_c , z_c

		z_c	100	75	50	25	10
		v_c	10	8.66	7.07	5	3.16
d_c	61.54	Q_c	37872	32798	26779	18936	11976
		Q_m m ³ /s	0.0012	0.0012	0.0015	0.0021	0.0033
	44.44	Q_c	19749	17103	13965	9875	6245
		Q_m m ³ /s	0.002	0.0023	0.0029	0.0041	0.0064
	35.15	Q_c	12355	10700	8736	6178	3907
		Q_m m ³ /s	0.0032	0.0037	0.0046	0.0066	0.0102
	28.99	Q_c	8404	7278	5943	4202	2658
		Q_m m ³ /s	0.0048	0.0055	0.0067	0.0095	0.0151
	24.66	Q_c	6081	5266	4300	3041	1923
		Q_m m ³ /s	0.0066	0.0076	0.0093	0.0132	0.0208
	18.96	Q_c	3595	3113	2542	1797	1137
		Q_m m ³ /s	0.0111	0.0128	0.0157	0.0223	0.0352
	15.49	Q_c	2399	2078	1697	1200	759
		Q_m m ³ /s	0.0167	0.0192	0.0236	0.0333	0.0527
	13.10	Q_c	1716	1486	1213	858	543
		Q_m m ³ /s	0.0233	0.0269	0.033	0.0466	0.0737
9.96	Q_c	992	859	701	496	314	
	Q_m m ³ /s	0.0403	0.0466	0.057	0.0806	0.1275	

pérdidas por fricción se podrían reproducir a base de diafragmas distribuidos a lo largo de los tubos, concentrando las pérdidas de fricción en cada punto de ubicación del diafragma. Esto permitiría a su vez efectuar con ellos algunos aforos.

3. Debido a esta última situación, las válvulas y demás dispositivos de operación de la red pueden ser reproducidos sin distorsión alguna, lo que facilita su elaboración. Esto mismo ocurriría con los tubos ya que sus diámetros serían comerciales.
4. Los puntos en que haya tanques o plantas de bombeo se reproducirían también con recipientes de elevación variable en atención a la escala de dimensiones verticales.
5. El gasto que requiere el modelo para su operación es realmente muy pequeño, lo que facilitaría encontrar el sitio de ubicación.
6. Debido a que los diámetros de los tubos en modelo pueden ser realmente grandes, esto facilitaría utilizar pequeños dispositivos de aforo directo en los más grandes, y en otros se utilizarían los propios diafragmas.
7. El instrumental necesario puede ser tan sofisticado como se desee, según se estudien efectos más complicados.
8. Debido a que es posible tener escala de tiempo, masa y aceleración, es factible estudiar efectos dinámicos en los cambios de un flujo permanente a otro permanente, considerando solamente efectos de masa.
9. El tiempo de construcción del modelo depende de diferentes factores, como la especialización de los técnicos y de la mano de obra, disponibilidad de fondos, de materiales, del terreno, instalaciones existentes, etc. Sin embargo, se estima un período aproximado entre uno o dos años.
10. La calibración del modelo requiere un lapso grande, por las dificultades inherentes a la pérdida por fricción, siendo absolutamente indispensable capacitar personal técnico que se dedique a esta actividad.
11. El costo de construcción del modelo depende de la escala horizontal que se elija, del sitio y del momento en que se inicie su construcción.
12. El modelo puede irse ampliando en la medida que se desee y realmente puede constituir una herramienta extraordinaria en las políticas de operación y ampliación tanto para el futuro inmediato como el mediano. Además de constituir una herencia valiosa para los futuros operadores de las redes hidráulicas en las grandes ciudades.