

Determinación Experimental del Coeficiente de Pérdidas Menores k_m en Accesorios para Agua Potable de PVC

María Fernanda Acero

Ingeniera Civil.

Asistente Graduada – CIACUA, Universidad de los Andes, mf.acero47@uniandes.edu.co

Daniel Rodríguez

Ingeniero Civil, Máster en Recursos Hídricos

Asistente Graduado – CIACUA, Universidad de los Andes, d.rodriguez49@egresados.uniandes.edu.co

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología
Sociedad Colombiana de Ingenieros
Bogotá, D.C. 22, 23 y 24 de mayo de 2008

Resumen. El objetivo de ésta investigación consistió en la medición experimental de los coeficientes de pérdidas menores K_m en diferentes accesorios de PVC-P, teniendo en cuenta la importancia de contar con valores reales de dichos coeficientes para utilizarlos en los cálculos de futuros diseños de redes a presión. Se realizó con PVC por ser el material más utilizado en redes de agua potable. Para las pruebas se construyó un montaje conformado por 4 circuitos en los cuales se instalaron los accesorios distanciados adecuadamente, un tanque elevado que mantenía una cabeza de presión constante, y un equipo de presión para recircular el agua. Para cada accesorio se realizaron pruebas con 100 caudales diferentes y los resultados se depuraron con base en análisis estadísticos luego de lo cual se obtuvo un rango de valores de K_m para cada uno de los 27 accesorios ensayados cuyos diámetros variaban de 1.5 a 4”.

Palabras Clave. Coeficientes de pérdidas menores, accesorios, PVC-P

1 Introducción

Cuando se diseña un sistema de distribución de agua potable, se deben tener en cuenta diferentes aspectos como materiales, rugosidades, diámetros, cabeza de energía disponible, caudal de abastecimiento, entre otros aspectos técnicos. Uno de los principales aspectos que se debe tener en cuenta es la escogencia de los materiales de conducción y dentro de este ítem, las pérdidas de energía que cada material genera. Éstas pérdidas pueden ser de dos tipos: Pérdidas por fricción entre el fluido y el material de la tubería, y pérdidas menores o localizadas que ocurren en cada uno de los accesorios de la red (codos, uniones, expansiones, contracciones entre otros).

El objetivo que se busca en el diseño de una red de distribución de agua potable es tratar de suplir, al menor costo posible, la población con las condiciones hidráulicas y de calidad mínimas legales requeridas. Dentro de estas condiciones legales requeridas, se establecen unas pérdidas de energía máximas en distintos puntos de la red ya sea en la aducción, en la planta de tratamiento y/o en la distribución a la población.

Para generar el mínimo nivel de pérdidas, los fabricantes desarrollan continuamente materiales tratando de mejorarlos en aspectos como durabilidad, resistencia a la fatiga, a la tensión, a la corrosión, al impacto y a la transmisión de fracturas; para cumplir con requerimientos hidráulicos buscan proporcionar las paredes internas más lisas. Todo lo anterior se hace con el fin de aumentar su capacidad hidráulica y dificultar la formación de biopelícula.

Esta investigación tuvo como objetivo determinar los coeficientes de pérdidas menores k_m de diferentes accesorios fabricados y distribuidos por la empresa PAVCO S.A. Las pérdidas menores producidas en los accesorios se expresan en términos del coeficiente de pérdidas menores k_m , que es un valor adimensional. Estas pérdidas también dependen de la cabeza de velocidad del flujo.

2 Descripción del montaje físico

El montaje físico consta de dos tanques unidos por una serie de tuberías de PVC de diferentes diámetros. El sistema de recirculación funciona de la siguiente manera: el agua es succionada de un tanque subterráneo y llevada a un tanque de 5 metros de altura, ésto mediante el uso de una bomba de 12 Hp con tuberías de succión y descarga de 4 pulgadas. El segundo tanque está conformado por dos tubos de pared estructural NOVALOC, uno interior de 42 pulgadas de diámetro y de 4 metros de altura y uno exterior de 48 pulgadas de diámetro y 4.5 metros de altura; el tubo interior de cabeza constante rebosa al tubo exterior donde el agua es regresada al tanque subterráneo por medio de una tubería de 4 pulgadas. Un esquema general del montaje físico se muestra en la Figura 1.

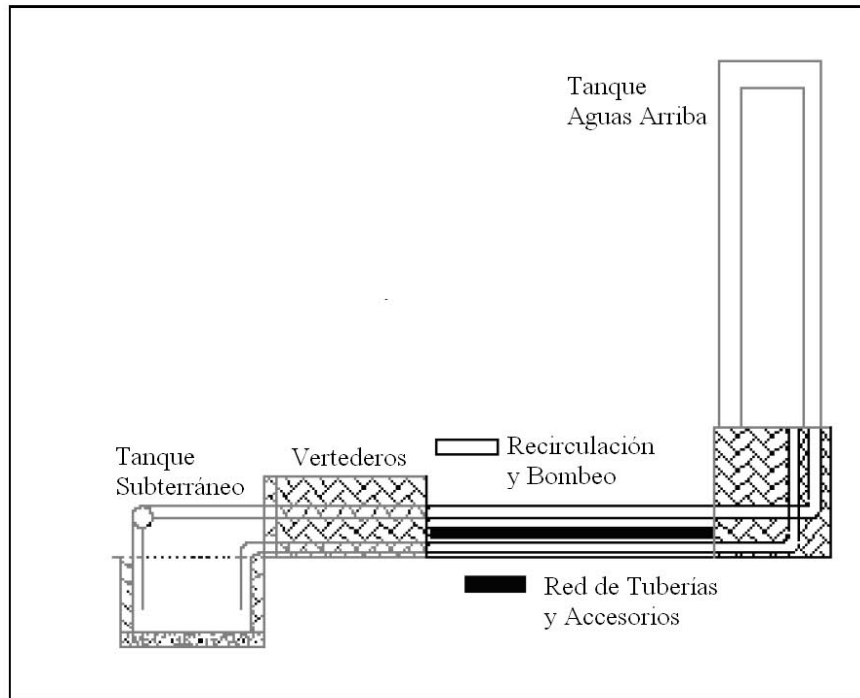


Figura 1. Esquema general del montaje físico.

El montaje fue construido en tuberías de PVC y utilizando los accesorios suministrados por PAVCO S.A. siguiendo con la configuración que se muestra en la Figura 2. En total se utilizaron 30 accesorios entre los que se encuentran ocho (8) Tee's, cinco (5) codos de 90°, dos (2) codos de 45°, ocho (8) reducciones, dos (2) uniones y cinco (5) tapones.

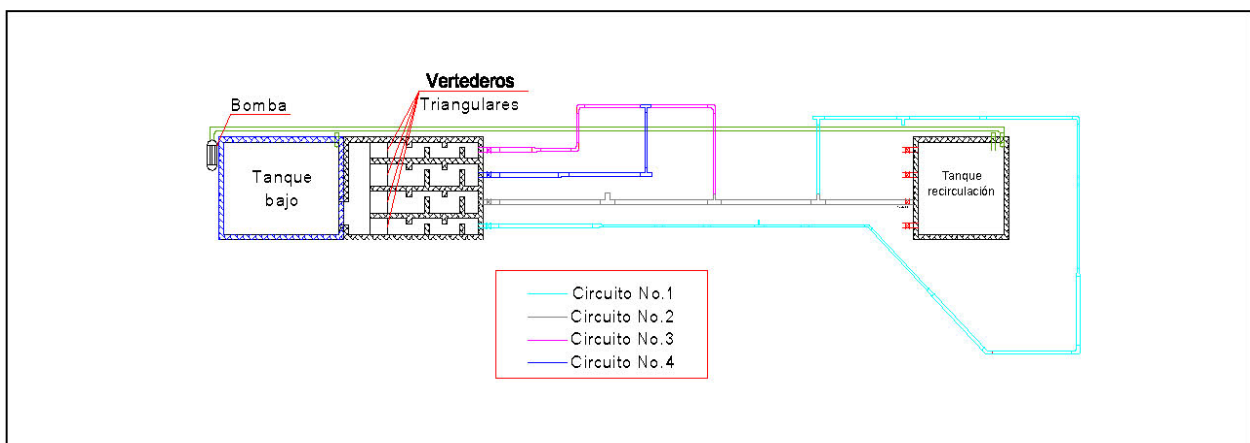


Figura 2. Esquema del Montaje.

El montaje está conformado principalmente por tramos de tubería rectos y por seis tipos de accesorios diferentes (Tee's, codos de 90°, codos de 45°, reducciones, uniones y tapones), correspondientes a diámetros de 4, 3, 2.5, 2 y 1.5 pulgadas (ver figura 3).



Figura 3. Accesorios Típicos ensayados.

Cada accesorio contaba con dos piezómetros de entrada y dos de salida; esto se hizo con el fin de incrementar la precisión de los resultados. Las lecturas eran finalmente registradas en tableros ubicados estratégicamente al lado del montaje.

3 Descripción de las Pruebas

Para determinar los coeficientes de pérdidas menores de los nuevos accesorios, se realizaron pruebas durante aproximadamente dos meses, en el período comprendido entre el 12 de Febrero y 9 de Abril de 2007.

En cada una de las 10 pruebas se analizaron 10 caudales diferentes que cubrieran el rango posible de caudales de manera uniforme. Los caudales que fue posible analizar, oscilaban entre 1 y 20 L/s, que corresponde a números de Reynolds para esta red entre $Re = 10.000$ y $Re = 244.000$.

4 Metodología General

Cada una de las pruebas de laboratorio se llevó a cabo mediante la siguiente metodología:

1. Inicialmente se pone en marcha el modelo con el caudal máximo, desplazando el aire que se encuentra atrapado tanto en la red, como en las mangueras de los piezómetros. Para esto, se desconectan las mangueras del tablero de medición y se dejan purgando durante algunos minutos hasta que la totalidad del aire haya salido. Luego se conectan nuevamente.
2. Teniendo ya la red presurizada (sin aire), se realiza la medición del caudal en el vertedero mediante la lectura de la aguja limnimétrica.
3. Luego se lee, en los tableros, la altura de cada uno de los piezómetros.
4. Antes de cambiar el caudal, se lee nuevamente el nivel de la aguja limnimétrica para comprobar que la red estuvo en estado estable durante la medición.
5. Para cada prueba también se debe tomar la temperatura del agua, esto con el fin de calcular la viscosidad cinemática del agua en el momento que se tomaron los datos.
6. Se cierra una cierta cantidad de vueltas la válvula de ingreso al sistema de tal forma que el caudal que pasa por la red disminuya, y se repiten los pasos descritos.
7. Este procedimiento se repite para 10 caudales diferentes, para cada prueba.

5 Determinación del Coeficiente de Pérdidas Menores

Metodología de Cálculo

Las pérdidas de energía en los accesorios son proporcionales a la cabeza de velocidad del flujo. La constante que relaciona estos dos términos es el coeficiente de pérdidas menores. Esto es:

$$h_m = k_m \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 6-1

Utilizando esta ecuación se puede asociar un coeficiente de pérdidas menores k_m para cada accesorio, conociendo la velocidad del flujo y las pérdidas de energía asociadas con éste.

$$k_m = h_m \frac{2g}{v^2}$$

Ecuación 6-2

Las pérdidas de energía por su parte, son calculadas a partir de la ecuación de Bernoulli, según la cual:

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_m$$

Ecuación 6-3

Los dos primeros términos se pueden agrupar en uno sólo, dando lugar a la presión piezométrica que es la que se lee en los tableros de medición. De esta forma:

$$p_1^* + \frac{v_1^2}{2g} = p_2^* + \frac{v_2^2}{2g} + h_m$$

Ecuación 6-4

La velocidad media del flujo se calcula como el caudal dividido entre el área interna de la tubería, medida en el laboratorio.

$$v = \frac{Q}{\pi \cdot d^2 / 4}$$

Ecuación 6-5

Cuando se tiene un accesorio en donde no hay cambio de diámetro ni de caudal, como en los codos y las uniones, las velocidades antes y después del accesorio son iguales. Por lo tanto, los términos de cabeza de velocidad se cancelan y las pérdidas de energía se calculan como la diferencia entre las lecturas de los piezómetros antes y después del accesorio.

$$h_m = p_i^* - p_{i+1}^*$$

Ecuación 6-6

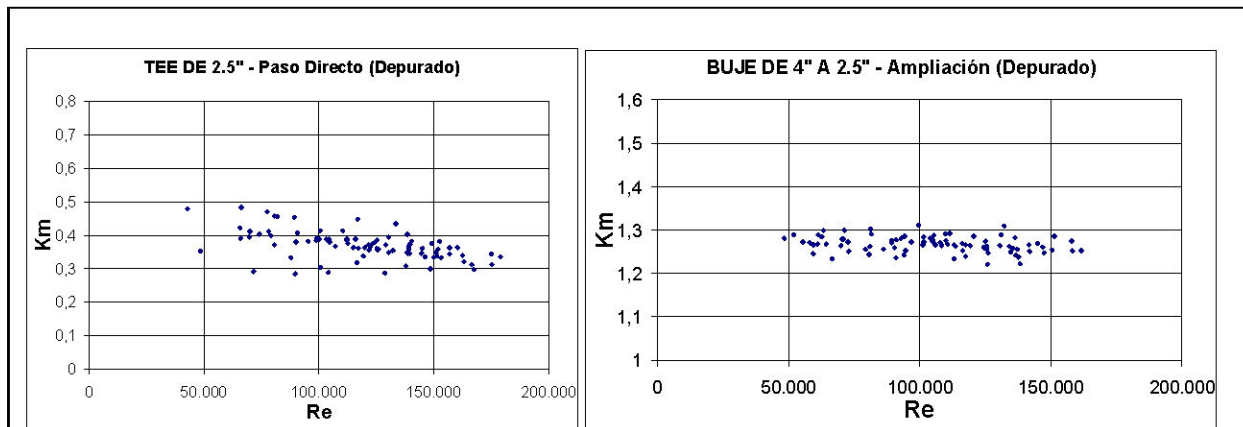
Cuando se está analizando un accesorio donde ocurre un cambio de velocidad o de diámetro (tees reducidas y bujes) la simplificación de la ecuación 6.6 deja de ser válida, ya que las cabezas de velocidad dejan de ser iguales. Por tanto para éste último caso se utiliza la ecuación 6-4.

Luego de calcular las pérdidas de energía en un accesorio, se procede a calcular el coeficiente de pérdidas menores asociados a estos con la ecuación 6.2. En los casos especiales mencionados anteriormente, se utiliza el promedio de las velocidades antes y después del accesorio para realizar los cálculos.

6 Resultados Experimentales

Para cada accesorio se graficó el Km contra el número de Reynolds, en la figura 3 se muestran los resultados de algunos de los accesorios probados.

Con base a los resultados se describió la tendencia de variación del coeficiente de pérdidas y se eliminaron los datos atípicos, los cuales eran resultado de errores experimentales. Una vez hecho esto se analizaron estadísticamente los datos para obtener un valor de Km representativo.



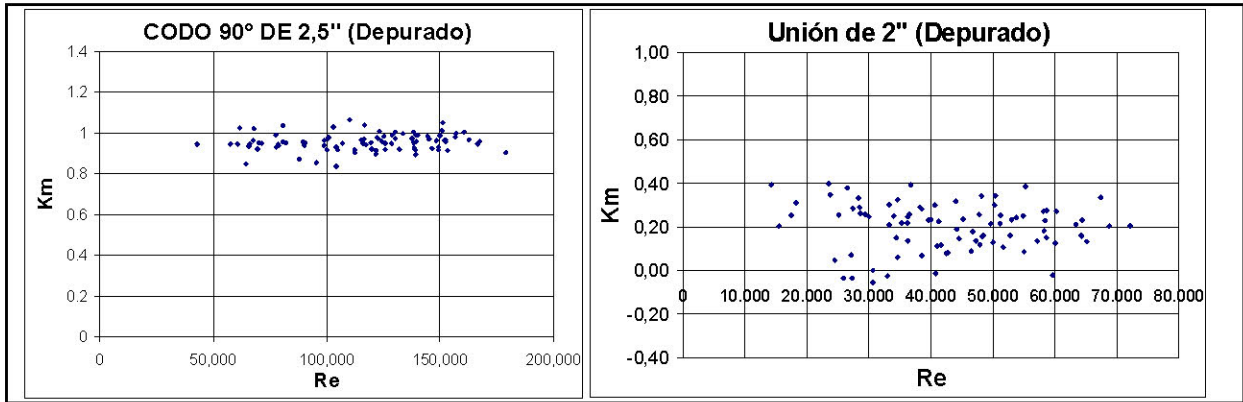


Figura 3. Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds – Tee de 2.5" Paso Directo.

Para determinar un valor o rango de valores dentro del cual se encontrara el coeficiente de pérdidas menores de los diferentes accesorios, se utilizaron histogramas de frecuencia, algunos ejemplos se muestran en la Figura 4.

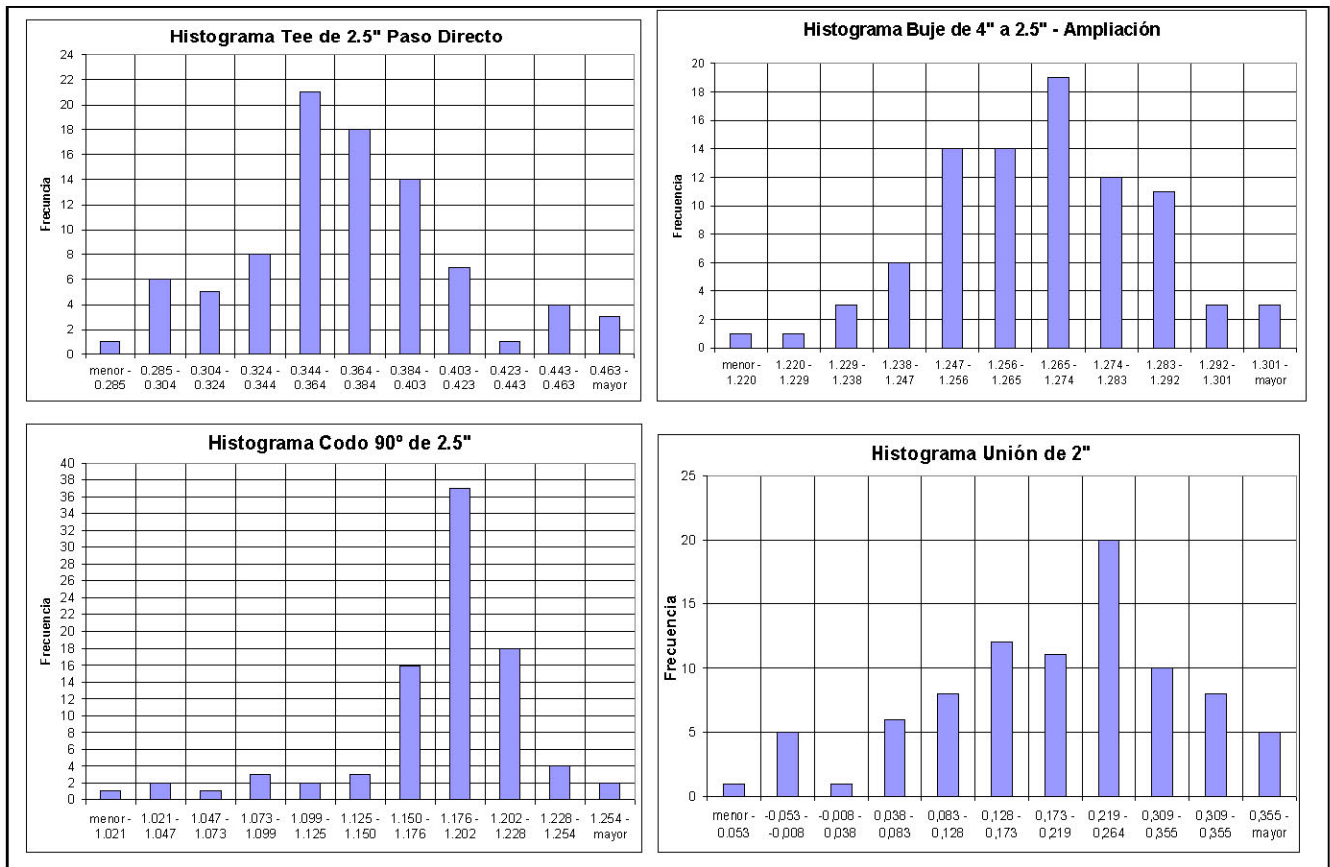


Figura 4. Histogramas de Frecuencia de km en accesorios

En la Tabla 1 se muestra el resumen de los resultados encontrados para los coeficientes de pérdidas menores en lo diferentes accesorios.

Tabla 1. Resumen de los resultados encontrados para los k_m en los diferentes accesorios.

	Accesorio	Valores Depurados			Promedio Ponderado con las Frecuencias de los Histogramas
		Valor Mínimo	Valor Máximo	Promedio	
	BUJE DE 3" a 2" - Reducción	-0.652	0.938	0.284	0.290
	BUJE DE 3" a 2" - Ampliación	0.602	1.317	0.911	0.910
	BUJE DE 3" a 2" - Reducción	-0.460	0.836	0.312	0.307
	BUJE DE 2" a 1 1/2" - Reducción	0.277	1.206	0.764	0.771
	BUJE DE 2" a 1 1/2" - Ampliación	0.551	1.127	0.698	0.696
	BUJE DE 2" a 4" - Ampliación	1.484	2.362	1.844	1.840
	BUJE DE 4" a 2.5" - Ampliación	1.220	1.310	1.267	1.271
	BUJE DE 4" a 3" - Ampliación	-0.464	1.419	0.449	0.534
	CODO 90° de 2"	0.705	1.982	1.377	1.379
	CODO 90° de 3"	0.175	1.758	1.131	1.119
	CODO 90° de 2.5"	0.838	1.065	0.956	0.955
	CODO 90° de 2.5"	1.021	1.280	1.181	1.180
	CODO 45° de 3"	0.053	0.806	0.381	0.380
	CODO 45° de 2"	0.310	0.791	0.519	0.520
	TEE DE 3" - Salida Lateral	0.053	1.866	1.072	1.079
	TEE DE 3" a 2" - Paso Directo	-0.202	0.995	0.251	0.247
	TEE DE 1.5" - Paso Directo	0.161	0.467	0.338	0.337
	TEE DE 4" a 3" - Paso Directo	0.204	0.396	0.303	0.302
	TEE DE 4" a 2.5" - Paso Directo	0.204	0.302	0.236	0.232
	TEE DE 4" Paso Directo	0.086	0.151	0.123	0.123
	TEE DE 4" a 2.5" - Salida Lateral	0.900	1.586	1.256	1.253
	TEE DE 2.5" - Paso Directo	0.285	0.482	0.370	0.369
	TEE DE 2.5" - Salida Lateral	1.191	1.502	1.319	1.331
	TEE DE 2.5" a 3" - Salida Lateral	1.351	1.666	1.466	1.480
	UNION DE 2"	-0.053	0.400	0.201	0.198
	UNION DE 1.5"	0.138	0.301	0.257	0.257

En la Tabla 1 la primera columna corresponde a la descripción de cada accesorio y la dirección de flujo correspondiente. La segunda columna corresponde al valor mínimo, la tercera columna al valor máximo y la cuarta columna al promedio encontrado en la lista total de pruebas de los datos sin depurar. Las siguientes tres columnas corresponden a los valores mínimo, máximo y promedio de los datos una vez depurados y la última columna presenta el promedio ponderado con las frecuencias de los histogramas para los datos depurados.

Como se observa en la Tabla 1, existen valores mínimos negativos los cuales se pueden explicar a partir de su relación con números de Reynolds más bajos; ya que para estos las pérdidas no eran fácilmente detectables por los medidores piezométricos colocados y, por consiguiente, las columnas de agua leídas posterior a los accesorios eran superiores a las alturas anteriores lo que generaba unas "pérdidas negativas" que no tienen ninguna lógica.

La depuración consistió en eliminar los puntos notablemente defectuosos donde es posible pensar en defectos o errores de los instrumentos de medición, las lecturas de una prueba determinado o condiciones muy alejadas a la operación más representativa del sistema.

Luego de realizar el proceso de depuración de los datos experimentales, se procedió a separar los resultados filtrados en intervalos de frecuencia iguales para los datos de todos los accesorios de la misma clase y determinar una media general. Anteriormente también se había determinado una media particular para cada accesorio independiente con los datos ya depurados (ver la Tabla 1).

7 Conclusiones

Dentro del montaje fue necesario utilizar válvulas a las salidas de las Tees con el fin de generar los diferentes circuitos de flujo y para poder tomar los datos para el cálculo del coeficiente de pérdidas menores en sentido directo y con salida lateral. Estas válvulas generaron problemas de operación ya que, aun estando completamente abiertas, generaron pérdidas de energía considerables.

La aparición de diferencias negativas en la lectura de los piezómetros puede corresponder a la a errores de apreciación en la medición de los datos, variaciones de niveles en el tablero de piezómetros y por las diferencias tan bajas entre ellos.

Al depurar los datos y realizar el promedio individual de cada accesorio los promedios se mantienen muy parecidos al promedio sin depurar, lo que demuestra que la cantidad de datos medidos equilibrio adecuadamente la incertidumbre arrojando medias que definitivamente representaban los coeficientes medidos para ese tipo de accesorios dentro del montaje.

Los errores experimentales se pudieron deber a errores constructivos en el montaje, desniveles en la colocación de las tuberías, exceso de soldadura en las uniones, o taponamientos en la entrada de los piezómetros.

En cuanto a la variación del coeficiente k_m con respecto al número de Reynolds, se obtuvieron varias y diferentes tendencias por lo tanto no se puede afirmar que el valor de este coeficiente tienda a aumentar o disminuir con la variación de dicho número. Sin embargo, si se observó que cuando aumenta el número de Reynolds los datos tienden a ser menos dispersos.

Un segundo gran factor que se relaciona con los resultados negativos o la gran dispersión de resultados presentada en algunos de los accesorios, es la variabilidad en cabeza de suministro del tanque elevado hacia el sistema de tuberías. Este era fácilmente afectado por factores climáticos como el viento, presentando oscilaciones en su nivel trasladando esas afecciones al montaje y dificultando la lectura de los piezómetros.

A pesar de que en casi todos los casos se tenía sólo un accesorio de cada tipo en el circuito, los resultados obtenidos fueron muy buenos. La mayoría de los resultados no son tan dispersos; los datos atípicos son fácilmente detectables y se pueden eliminar para no afectar las estadísticas. Los resultados experimentales permiten dar un rango confiable para el valor del k_m de cada accesorio en la mayoría de los casos.

Los accesorios que se repitieron en el montaje bajo la misma dirección de flujo fueron la reducción de 3" a 2" y el codo 90° de 2.5". En las gráficas de k_m vs. Número de Reynolds los resultados son muy parecidos, lo cual da confiabilidad a los valores obtenidos en éste experimento.

Los valores más altos de k_m se obtuvieron para las tees de salida lateral y los codos de 90° y las menores para las uniones y los bujes en los cuales la reducción o ampliación es pequeña. Esto concuerda con la teoría ya que las pérdidas en los accesorios dependen de la relación entre áreas y son proporcionales al cambio que se le da a la dirección del flujo.

En la comparación de los k_m experimentales hallados para los bujes con los teóricos se encontró que éste valor depende solamente de la relación entre los diámetros sin importar el sentido de flujo (ampliación o

reducción); sin embargo en los resultados que se obtuvieron en éste experimento si se tienen diferencias notables en éstos dos casos.

8 Bibliografía

CHOW, Ven Te (1956). "Open Channel Hydraulics". Mc Graw Hill.

Giles, Ronald (1996). "Mecánica de los fluidos e hidráulica". Mc Graw Hill.

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (2006). "Determinación Experimental de la Rugosidad Absoluta k_s y el Coeficiente de Pérdidas menores k_m en Tuberías de Agua Potable de PVC Biorientado Dúctil (Biaxial) de 4 pulgadas", Universidad de los Andes.

Jara J, Valenzuela A, Crisóstomo C. (1998). "Hidráulica de Tuberías" http://www.chileriego.cl/opensite/frm_opensite.asp?glb_cod_sistema=20020129172812&glb_parametro=hidraulica%20de%20tuberias&glb_buscar=S.

Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (2000). Sección II. Título B. "Sistemas de Acueducto".

Saldarriaga, Juan G. (2000). "Hidráulica de Tuberías". Mc Graw Hill.

Street R, Watters G, Vennard J. (1996). "Elementary Fluid Mechanics". John Wiley & Sons. Séptima Edición.

Universidad Católica de la Santísima Concepción (1999). "Hidráulica en Contornos Cerrados". Capítulo II: Flujo Permanente en Contornos Cerrados.