

APROXIMACIÓN EXPERIMENTAL A LA PRESURIZACIÓN EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

David Camargo¹, Flor Sanchez², David Celeita³ y Juan Saldarriaga⁴

^{1,2}Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes, Colombia.

³ Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de Los Andes, Colombia.

⁴ Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Colombia.

E-mail: da.camargo10@uniandes.edu.co, fe.sanchez10@uniandes.edu.co, da.celeita10@uniandes.edu.co, jsaldarr@uniandes.edu.co

Introducción

El propósito de los sistemas de alcantarillado de aguas lluvias es drenar el agua que llega a las calles y caminos, provocada por eventos de precipitación y escorrentía, de tal manera que se prevengan posibles inundaciones. En los eventos donde se presentan eventos de lluvia de intensidad alta, estos sistemas de drenaje pasarán de una condición a flujo libre con relaciones de llenado entre el 70 y el 80% a un flujo presurizado. En países en vías de desarrollo esta situación se puede convertir en un problema de salud pública, especialmente en sistemas de alcantarillado combinados (Pozos-Estrada et al. 2015).

Existen dos formas en las cuales se puede presentar la presurización de un sistema: (1) de aguas abajo hacia aguas arriba, lo que reduce drásticamente el caudal de salida, o (2) desde aguas arriba hacia aguas abajo, lo que incrementa el caudal. El fenómeno de presurización ocurre en varias etapas; por ejemplo, Li y McCorquodale (1999) clasificaron la presurización en cinco etapas. (1) Flujo por gravedad: en la tubería se encuentran agua y aire en la dirección de flujo, se presenta un flujo estacionario. (2) Formación oleaje: se bloquea el flujo hacia aguas abajo, surge debido a un resalto hidráulico que se mueve hacia aguas arriba. (3) Formación de interfaz inestable: las olas de agua tienden a la inestabilidad, encontrándose cerca de la corona de la tubería. (4) Transición a flujo de sobrecarga: un paquete de aire comprimido viaja aguas arriba, la condición de sobrecarga ya es visible en toda la red. (5) Liberación de aire atrapado: el aire atrapado es liberado de la tubería a presión.

Cuando la superficie libre y la zona presurizada se presentan simultáneamente, el sistema se encuentra sometido a presiones positivas y negativas. Bajo esta condición inestable es usual suponer que el aire atrapado sufre un proceso de expansión y compresión pseudo-adiabática (Li y McCorquodale, 2001). Se destaca que la generación de aire atrapado produce fluctuaciones en la superficie de agua, que pueden ser responsables de ocasionar daños estructurales en el sistema (Ferrerí et al. 2014).

Respecto al campo de la modelación matemática, existen tres aproximaciones propuestas para tratar el fenómeno de presurización en redes de alcantarillado: el método Priesman Slot, el método Shock Fitting y el método de columna rígida. Cada uno de estos tiene un fundamento hidráulico y una manera de tratar el aire atrapado distinta.

Igualmente, algunos autores han trabajado en modelos físicos experimentales para probar los modelos matemáticos (Li y McCorquodale, 2001). Por ejemplo, de la comparación entre los resultados experimentales y los modelos formales se ha encontrado que las presiones al ocurrir el fenómeno de golpe de ariete pueden ser subestimadas por el modelo matemático. Por el contrario, se encontró que las predicciones en las presiones negativas típicamente son menores que las observadas.

Respecto al desarrollo de estos montajes experimentales, se ha encontrado que estos se realizan típicamente para profundidades relativas de flujo de entre el 40 y el 85%. En estas pruebas se ha encontrado que, si una compuerta de control aguas abajo se cierra repentinamente, el caudal tiene a disminuir, el nivel del agua se eleva abruptamente e incluso es posible generar entrapamiento de aire que se mueve hacia aguas arriba. Estas bolsas de aire son las que causarán fluctuaciones en la medición de presiones.

Como se mencionó previamente, existen dos formas de generar la transición de un flujo a superficie libre a un flujo presurizado, el caso que ha sido más estudiado experimentalmente es en el que la sobrecarga se genera desde aguas abajo hacia aguas arriba. Por lo tanto, el objetivo de este artículo es analizar el fenómeno de sobrecarga desde aguas arriba hacia aguas abajo, esto por medio del desarrollo de perfiles de velocidad y presión en un montaje físico experimental de alcantarillado. Se evaluarán tres escenarios: el primero inicia desde una relación de llenado baja hasta el límite de flujo presurizado; el segundo y tercer escenarios se diseñan para condiciones presurizadas, iniciando con una relación de llenado cercana al 80%.

Montaje experimental y metodología

El montaje se desarrolló en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes, Colombia. El montaje de la tubería de alcantarillado a trabajar consiste en 6 secciones de tuberías de plexiglás de 209 mm de diámetro interno, conectadas por medio de bridas con pernos y tuercas. Igualmente, el modelo se encuentra debidamente instrumentado, contando con una electroválvula de tipo mariposa a la entrada de la tubería que permite al operador manejar electrónicamente el porcentaje de apertura, así como el tiempo que tarda en abrir el flujo. Con el interés de estudiar variaciones de presión, se instalaron 4 transductores de acero con una precisión del 0.075%, distribuidos a lo largo de la tubería. Igualmente, en el centro del montaje se instaló un sensor para obtener los perfiles de velocidad en la tubería. Finalmente, a la salida de la tubería, se instaló una compuerta manual que permite regular la profundidad de flujo.

Tabla 1.- Escenarios probados en los ciclos de presurización.

# Ciclo	Apertura inicial válvula (%)	Apertura válvula en presurización (%)	Tiempos de apertura y cierre (s)
1	10	40	5
2	10	40	10
3	10	40	15
4	10	40	20
5	10	40	25

El procedimiento de cada ensayo dependerá del escenario a trabajar. El primer caso, en el que no se presenta presurización, consiste en 60 segundos de mediciones a flujo libre, 30 segundos de apertura de la electroválvula y 210 segundos para tomar datos de un estado casi presurizado en la tubería. Los otros dos escenarios consisten básicamente en la generación de ciclos de sobrecarga. Es decir, se parte de un flujo a superficie libre, luego se realiza la presurización, y finalmente se regresa al estado inicial. La duración de cada ciclo de presurización es de 300 segundos.

Discusión de resultados

Li y McCorquodale (1999) estudiaron los efectos de fallas de bombas y concluyeron que los paquetes de aire se movían en sentido opuesto a la dirección de flujo, principalmente debido a

que la presurización iba de aguas abajo hacia aguas arriba. Por lo tanto, no sorprende que en esta investigación se encontró que estos paquetes de aire se movían en la misma dirección del flujo a medida que el nivel de agua subía de aguas arriba hacia aguas abajo. Las bolsas de aire que se iban formando en la tubería migraban rápidamente al extremo de la tubería. Se destaca que aun cuando se intentó mantener la tubería con una pendiente de 0.0000, esto no era posible debido a condiciones en el montaje. Por lo tanto, semanalmente se hacían reajustes en la pendiente de la tubería, lo que puede influir en la toma de datos.

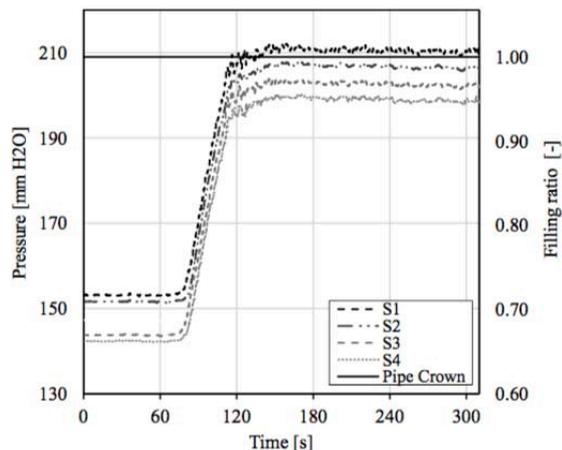


Figura 1.- Mediciones de presión para el primer escenario.

En la Figura 1 se presentan los resultados de las mediciones para el primer escenario en el cual se tienen condiciones muy cercanas a la presurización. Debido a los errores mencionados en la pendiente, es posible identificar que existen algunas variaciones de presión en esta figura, gracias a la comparación entre sensores.

La compuerta manual a la salida de la tubería permitió la manipulación de la profundidad de flujo en casi toda la tubería. Luego de realizar las pruebas se encontró que la apertura inicial de esta compuerta determinaba el caudal máximo registrado por el sensor de nivel. Es decir, se obtenían presiones más altas para niveles de apertura inicial más bajos, y viceversa.

Simulación Inundación no Presurizada: Elevación

Cuando el nivel de apertura es alcanzado, las diferencias entre las mediciones de los cuatro sensores tienden a ser similares, pero con un desfase de 5 mm aproximadamente. En la Figura 1 se presentó la forma en que el nivel de agua (y/D) se elevaba desde la condición inicial de ~ 0.7 hasta alcanzar ~ 0.99 (exceptuando el sensor 1). Este escenario describe un incremento gradual cuando la electroválvula se abre en 30 segundos, iniciando desde una apertura del 30% y llegando hasta un 60%. La altura de la compuerta manual se fijó de tal manera que se consiguiera el nivel de agua presentado. Se resalta que los perfiles de caudal y velocidad tienen un comportamiento similar. Estos resultados permiten sugerir que el proceso de presurización desde aguas arriba hacia aguas abajo sigue un incremento gradual en el nivel de la superficie del agua. En cambio, para un proceso de aguas abajo hacia aguas arriba se encontraron cambios forzados en las mediciones de presión.

Simulación Inundación: Evaluación del Tiempo

Para los ciclos presentados en la Tabla 1 las presiones alcanzadas por los ciclos de presurización fueron de más del doble del diámetro de la tubería, es decir, se trata de un escenario de simulación de alcantarillado presurizado. Entre la información observada se evidenció una tendencia general en los transductores de presión: el nivel de llenado inicial en 60 segundos se ve sucedido por un estado de presurización rápido, así como igualmente se presenta una caída rápida de la profundidad hasta alcanzar las condiciones iniciales luego del intervalo estipulado de 120 segundos. Se encontró que la

presión máxima luego de la etapa de presurización depende del tiempo especificado de apertura de la electroválvula. Básicamente se presenta una relación inversa entre el tiempo y la presión. A medida que el tiempo de sobrecarga es menor, la presión alcanzada es mayor.

Simulación Inundación: Evaluación del Caudal

La regulación de la apertura inicial de la electroválvula implica directamente un mayor caudal, que eventualmente elevará los valores en el perfil de velocidad, lo que tendrá como consecuencia que el sistema tendrá mayores presiones. Se encontró que para las aperturas del 30 y 40% se obtenían los mayores incrementos en la presurización, independientemente de la apertura inicial.

Los otros tres escenarios probados no presentaron incrementos significativos en la presión, como si sucedió en los dos primeros. Sin embargo, la mayor preocupación radica en que aun cuando la electroválvula permite que pase la misma cantidad de agua, igual se detectan diferencias en las velocidades durante el intervalo de presurización. Esto significa que el 50% de los incrementos en la apertura inicial no representa un incremento significativo ni en la velocidad ni en la presión. Es decir, la presión y la velocidad no siguen una relación directa 1 a 1 con la presurización final.

Conclusiones

Se construyó un modelo físico experimental para un sistema de drenaje para analizar el flujo presurizado y el flujo a superficie libre en distintos escenarios. El objetivo del modelo era entender el proceso de presurización en alcantarillados desde aguas arriba hacia aguas abajo, simulando así el proceso de drenaje de un evento de inundación en un sistema urbano. Se probaron tres escenarios variando las condiciones de apertura de la válvula inicial: variación en la apertura inicial, tiempo de apertura y caudal.

En el primer escenario se encontró que cuando inicia el drenaje de la inundación el incremento en el nivel del agua desde aguas arriba hacia aguas abajo es gradual, incluso en el escenario en donde la tubería se presuriza con cambios en el tiempo o las condiciones de entrada. Igualmente, el tiempo empleado en alcanzar la presión máxima de drenaje fue una variable a considerar, esto debido a la importancia que tiene la velocidad a la que ocurre el fenómeno. Esto fue simulado por medio del tiempo que toma la electroválvula en el proceso de apertura desde un estado inicial hasta uno final. Los resultados muestran que la presión tiende a disminuir a medida que el tiempo de presurización aumenta.

Igualmente es importante considerar la magnitud de inundación debido al efecto que tiene el caudal sobre la presión y la velocidad es directa. Se encontró que la relación entre presión y caudal no es lineal. El trabajo futuro busca incluir el efecto de la pendiente sobre los ciclos de sobrecarga en el sistema.

Referencias

- Giovanni B. Ferreri, Giuseppe Ciralo & Carlo Lo Re (2014) Storm sewer pressurization transient – an experimental investigation, *Journal of Hydraulic Research*, 52:5, 666-675.
- Li, J., McCorquodale, J.A. (1999). Modelling mixed flow in storm sewers. *J. Hydraulic Eng.* 125(11), 1170-1180.
- Li, J., McCorquodale, J.A. (2001). Modelling the transition from gravity to pressurized flows in sewers. *Specialty Symposium on Urban Drainage Modeling at the World Water and Environmental Resources Congress 2001*, Orlando, Florida, United States, 134-145.
- Oscar Pozos-Estrada, Ivo Pothof, Oscar A. Fuentes-Mariles, Ramon Domínguez-Mora, Adrian PedrozoAcuña, Roberto Meli & Fernando Peña (2015): Failure of a drainage tunnel caused by an entrapped air pocket, *Urban Water Journal*, 12 (6) 446-454.