

Comportamiento de biopelículas luego de lavados sucesivos en tuberías de agua a presión

Paula Reyes del Toro

Ingeniera Civil. Magíster en Ingeniería Civil en el área de Recursos Hídricos. Asistente Graduada CIACUA Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados. Universidad de los Andes

Juan Guillermo Saldarriaga

Ingeniero Civil, MSc Ingeniería Hidráulica. Profesor Titular Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA, Universidad de los Andes.

Recibido 5 de septiembre de 2005, aprobado 30 de Octubre de 2005

PALABRAS CLAVES: Lavado con agua a presión, biopelícula, mantenimiento de redes.

KEYWORDS: Flushing, biofilm, water distribution maintenance.

RESUMEN Se evalúa el comportamiento de las biopelículas en tuberías a presión a través de un montaje de recirculación compuesto por cuatro tuberías en paralelo: Tres en PVCu de 2.5", 3" y 4" y la cuarta en PVC Biaxial de 4". Se evaluó el crecimiento de las biopelículas, la eficiencia de remoción de los lavados y el comportamiento de las pérdidas de energía a través del tiempo. El resultado de la experimentación demuestra que los lavados son un medio efectivo para controlar el crecimiento de bacterias y reestablecer las pérdidas de energía en un sistema de tuberías a presión.

ABSTRACT Biofilm behavior was evaluated using a laboratory model made of three PVCu pipes (Diameters: 2.5", 3" y 4") and a Biaxial PVC pipe of 4" connected in parallel. The biofilm growth, the flushing removal efficiency and the behavior of the energy losses were evaluated. The modeling results show that flushing is an effective way of controlling biofilm growth, while the energy losses through the pipe are reestablished.

1. INTRODUCCIÓN

El lavado de las redes de distribución mediante el uso del agua a presión es un mantenimiento rutinario de las redes de distribución de agua potable, que se utiliza con el fin de controlar la calidad del agua y la hidráulica del flujo, entre otras características. La formación de biopelículas afecta estos dos parámetros porque al formarse una capa de biopelícula se alteran las características de la pared interna de las tuberías, modificándose su rugosidad y por consiguiente el régimen hidráulico. Por otro lado, la presencia de microorganismos en el agua deteriora su calidad, haciendo que presente mal olor, un color amarillento, un sabor extraño y hasta pueda llegar a ser perjudicial para la salud.

Durante el desarrollo del presente artículo, se pretende analizar el efecto hidráulico de las biopelículas y cómo éste cambia a través del tiempo, manteniendo controlada su formación. Este control se realiza mediante lavados sucesivos, con un aumento en la velocidad de flujo, que garantice el desprendimiento de la biomasa adherida. De esta forma, se pretende analizar si los lavados con agua a presión o *flushing*, son una herramienta efectiva para el mantenimiento rutinario de las redes de distribución, desde el punto de vista de la hidráulica.

2. GENERALIDADES DE LAS BIOPELÍCULAS

Las biopelículas son estructuras heterogéneas que crecen en ambientes acuosos y que se encuentran formadas por agrupaciones de células bacterianas, las cuales se mantienen unidas dentro de una matriz extracelular de polímeros y separadas mediante espacios y canales intersticiales (Beyenal et al., 2002).

1.1 PROCESO DE FORMACIÓN

El proceso de formación de las biopelículas se inicia con la adhesión de una pequeña cantidad de bacterias a la superficie de la tubería. Luego de que la bacteria identifica la superficie, se fija a ésta y comienza a secretar una sustancia polimérica extracelular (SPE), con el fin de progresar de un estado de fijación reversible a un estado de adhesión irreversible, en

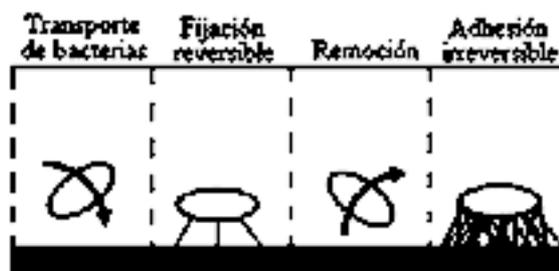


Figura 1 Proceso de adhesión de bacterias a la pared de la tubería.

Adaptación de www.edstrom.com

Es posible distinguir cuatro fases en la evolución de las biopelículas a través del tiempo (Picioreanu et al. 2001): en la primera fase no existe limitación de sustrato debido a que la biopelícula es de poco espesor. Gracias a esto, el crecimiento de los microorganismos es exponencial. Luego, la biopelícula entra en una segunda fase, de retardo, en donde aumenta de espesor, pero comienza a existir limitación de sustrato en las capas más profundas. El crecimiento por lo tanto sólo es posible en aquellas capas cercanas a la interfaz biopelícula-agua en donde se produce el intercambio de los nutrientes necesarios. En la fase tercera, la tasa de crecimiento se reduce considerablemente pues, cuando la biopelícula aumenta de espesor, el intercambio de nutrientes en las capas internas es limitado.

Cuando se ha alcanzado un espesor determinado, el cual se estima igual al espesor de la subcapa laminar del flujo, la biopelícula entra en una cuarta fase: se encuentra expuesta al desprendimiento en masa o *sloughing*, en donde se producen desprendimientos de grandes "parches" de biopelícula.

1.2 PROCESO DE DESPRENDIMIENTO

El desprendimiento de biopelículas es el proceso mediante el cual una fracción de biomasa es desprendida de la matriz que la contiene y es transportada por el flujo de agua.

El desprendimiento de biopelículas puede llevarse a cabo mediante cuatro mecanismos: abrasión,

erosión, desprendimiento en masa o depredación (Kwok et al., 1998).

La abrasión y la erosión se refieren a la remoción de pequeños grupos de células provenientes de la superficie de las biopelículas, mientras que el desprendimiento en masa o *sloughing* se refiere a grandes fracciones éstas. La depredación también se considera un mecanismo de desprendimiento ya que, en ausencia de nutrientes y como parte de un proceso de selección natural, las bacterias más “fuertes” tendrán que encontrar su alimento en las más débiles, reduciendo una pequeña fracción del total de biomasa presente.

Un evento de desprendimiento ocurre cuando las fuerzas externas causadas por el fluido son mayores que la resistencia interna de la matriz que mantiene la biopelícula unida. Por lo tanto, existen dos mecanismos que conllevan al desprendimiento: un aumento en el esfuerzo cortante o una disminución en la resistencia interna de la biopelícula (Horn et al., 2003).

De acuerdo con Picioreanu et al. (2001)0, luego de un evento de desprendimiento ocasionado por ejemplo por un aumento en las fuerzas externas, la biopelícula continúa con su proceso de crecimiento pero no alcanza nuevamente la cantidad de biomasa acumulada antes de dicho evento.

1.3 CONTROL DE LAS BIOPELÍCULAS MEDIANTE LAVADO A PRESIÓN O “FLUSHING”

El lavado de tuberías o *Flushing* es la técnica mecánica más antigua y útil para resolver los problemas de calidad de agua en la red a bajo costo. Aproximadamente el 99% de los acueductos en Estados Unidos, que son lavados anualmente, utilizan esta metodología (Ellison, 2003). Existen tres tipos básicos de lavado con flujo a presión: el lavado convencional, el lavado unidireccional y el lavado con flujo continuo.

El lavado convencional consiste en abrir uno o más hidrantes y permitir que el agua fluya fuera del sistema, hasta que los sedimentos, biopelículas o la baja calidad del agua sean removidos. Este tipo de lavado

es utilizado, por ejemplo, luego de una reparación de la red, en donde es necesario permitir que el agua fluya hasta que la tubería se limpie y se alcancen los parámetros de calidad exigidos antes de reestablecer nuevamente el servicio.

El lavado unidireccional, por su parte, se lleva a cabo mediante el cierre y apertura progresivos de válvulas e hidrantes, con el fin de mantener circuitos cerrados de flujo. Esta metodología combina dos conceptos importantes. Primero, el flujo de agua viaja en una sola dirección; al lograr esto, se producen velocidades del agua mayores, lo que permite que el lavado sea más efectivo. Segundo, el lavado se realiza en una secuencia tal, que el agua del lavado proviene de sitios que ya han sido lavados previamente, lo que garantiza que la porción que ya se encuentra lavada no vuelve a recibir agua con una baja calidad. Una tercera opción de lavado con agua a presión se lleva a cabo cuando es necesario mantener un flujo continuo de agua, para evitar el estancamiento y mantener niveles de desinfectante aceptables. Las velocidades son generalmente menores a 0.3 m/seg (1 ft/seg).

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO

El modelo físico que se utilizó fue construido en las instalaciones del laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes, y está compuesto por cuatro tuberías en paralelo: tres en PVCu de 2.5”, 3” y 4” y la cuarta en PVC Biaxial de 4”, formando un circuito como el que se muestra en la Figura 2. El agua parte de un tanque subterráneo hacia un segundo tanque de 2 m de altura, mediante el uso de una bomba de 12 Hp. Este segundo tanque cuenta con una tubería de recirculación localizada aproximadamente 20 cm por debajo del nivel máximo del tanque. De esta forma, el agua se mantiene a un nivel constante de aproximadamente 1.8 m y el agua sobrante regresa al tanque subterráneo para ser bombeada nuevamente. Del segundo tanque, de cabeza constante, parten las cuatro tuberías mencionadas de 10 m de longitud, que descargan en cuatro canales de aquietamiento independientes, con un vertedero

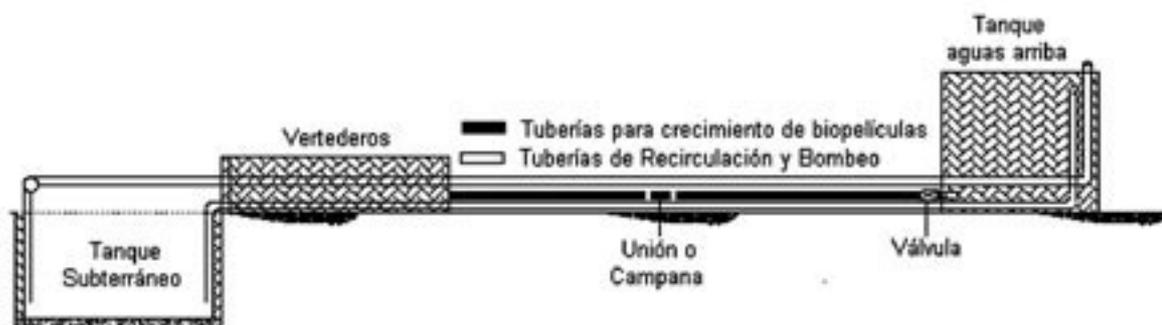


Figura 2 Esquema del montaje utilizado. Vista de perfil.

triangular al final de cada uno para medir el caudal individual. El agua retorna luego al tanque subterráneo, cerrando de esta forma el circuito del montaje.

3.1 MEDICIÓN DE LOS DIFERENTES PARÁMETROS

Cada tubería del montaje llega a un canal de quietamiento con un vertedero triangular al final de éste, como se dijo anteriormente. A través de la medición de la altura de la lámina de agua es posible conocer el caudal y por lo tanto la velocidad del agua dentro de cada tubería, dividiendo el caudal entre el área efectiva de cada una de ellas y utilizando la ecuación de calibración de cada vertedero.

Con el fin de evaluar el comportamiento de las pérdidas de energía en los diferentes tramos de tuberías, se utilizaron piezómetros en tres puntos

diferentes: uno inmediatamente aguas abajo de la válvula; otro aproximadamente 5 metros aguas abajo de éste, localizado antes de la unión o la campana, en el caso de la tubería de bi axial; y el tercero luego de esta unión. De esta forma, en cada una de las tuberías se pueden medir las pérdidas por fricción mediante el uso de los dos primeros piezómetros, y las pérdidas menores que se producen en la unión, mediante el uso de los dos últimos.

Por su parte, para evaluar el crecimiento de las biopelículas se utilizaron testigos del mismo material y diámetro de cada una de las tuberías, ubicados en unos soportes de 1.2 m de largo dentro de los canales de quietamiento (Figura 3a). El primero de ellos (Figura 3b) fue llamado un testigo de borde que, como su

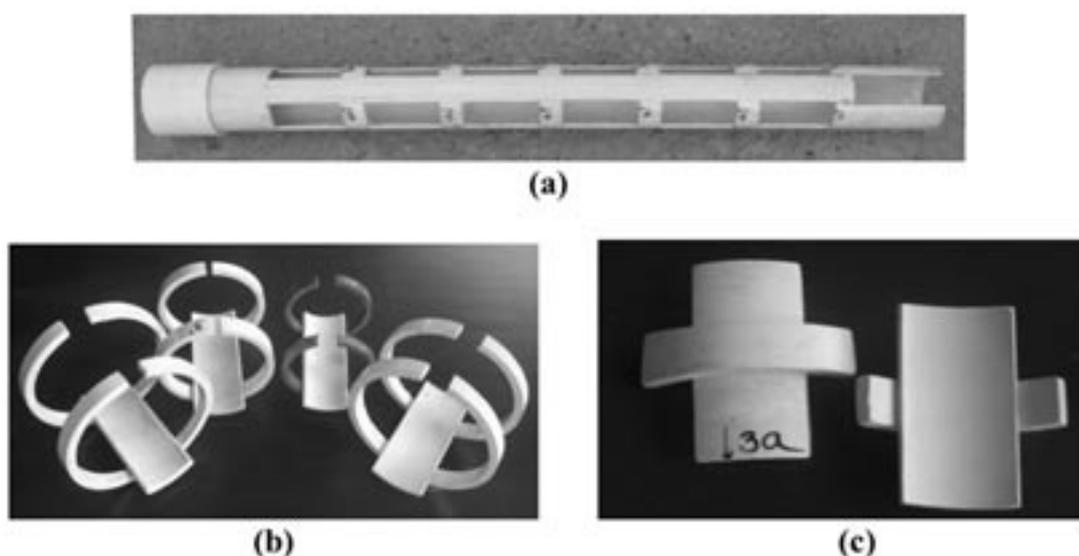


Figura 3 Testigos para evaluar el crecimiento de biopelículas

nombre lo indica, se encuentra localizado en el borde del soporte. Estos testigos fueron diseñados para que su extracción y posterior colocación fueran muy fáciles de realizar sin alterar la biopelícula adherida.

El segundo tipo de testigos son los testigos desechables (Figura 3c), pues su objetivo es utilizarlos una vez durante el período de pruebas. Estos testigos se utilizan para evaluar la efectividad de los lavados: se extrae uno de los testigos antes del lavado para evaluar las condiciones previas y el otro luego de realizado el lavado, para efecto de comparación entre las condiciones pre y post lavado.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

Para el desarrollo experimental, se diseñó un período de pruebas de 120 días, cuya fecha de inicio fue el 11 de Marzo de 2005. Durante este período se pueden diferenciar dos fases: la primera corresponde a la adaptación inicial y crecimiento de la biopelícula bajo unas mismas condiciones hidrodinámicas. Esta fase tiene una duración de 50 días, durante los cuales se mantiene una velocidad de recirculación de 0.5 m/s, se agregan nutrientes cada tres días y se registra el crecimiento progresivo de las biopelículas, utilizando los testigos del borde.

Los nutrientes utilizados fueron panela (sacarosa), como fuente de carbono, y fosfato di-amónico (DAP), como fuente de nitrógeno y fósforo, siendo éstos los nutrientes más importantes para el desarrollo de las biopelículas. Las proporciones de C / N / P fueron 10 / 5 / 5 respectivamente.

Para evaluar el crecimiento de las biopelículas en el tiempo, se registraron los pesos de los testigos del borde en diferentes días del periodo de experimentación, y éstos fueron luego normalizados a espesores con el fin de comparar el crecimiento en los diferentes diámetros. Para esto, es necesario suponer que la densidad de las biopelículas es de 1 g/cm³. Esta suposición se encuentra fundamentada en que el 99% de la composición de las bacterias es agua y, por lo tanto, la densidad de la biopelícula se asemeja a la densidad de este compuesto. Al hacer esta su-

posición, el cálculo del espesor de la biopelícula se calcula como:

$$\rho = 1 = \frac{m}{V} \Rightarrow m = V = A \cdot e$$

$$e = \frac{m}{A}$$

donde ρ = densidad de la biopelícula = 1; m = masa de la biopelícula, equivalente al peso registrado en la balanza, menos el peso del testigo sin biopelícula; A = área de cada uno de los testigos, calculado como la longitud del arco de circunferencia que tiene el testigo, multiplicado por la longitud de éste; y e = espesor de la biopelícula, en μm .

La segunda fase es llamada fase de lavados y tiene una duración de 70 días. En esta fase se realizan los mismos procedimientos anteriores y, adicionalmente, cada 20 días se realiza un lavado durante 20 minutos a una velocidad de 2.5 m/s. Antes y después de cada lavado se utilizan los testigos desechables para registrar la cantidad de biomasa adherida, y luego evaluar los espesores antes y después del lavado mediante el mismo procedimiento descrito anteriormente para los testigos del borde.

Con el fin de evaluar las pérdidas de energía y su evolución bajo diferentes condiciones hidrodinámicas, tanto en la fase 1 como en la fase 2 se realizaron pruebas para medir el nivel de los piezómetros con diferentes caudales, y de esta forma evaluar las pérdidas por fricción producidas en los tramos y las pérdidas menores localizadas en las uniones.

4. RESULTADOS

4.1 EVOLUCIÓN DE LA BIOPELÍCULA EN EL TIEMPO

En la Figura 5 se observa el crecimiento progresivo de las biopelículas para las cuatro tuberías del montaje durante los 120 días de experimentación. El análisis de la tubería de 4" en Biaxial se detuvo en el día 90 debido a una falla en la válvula de esta tubería.

Aparentemente, la velocidad de crecimiento y regeneración de las biopelículas es directamente proporcional al diámetro de las tuberías; es decir, a mayor

diámetro mayor crecimiento para las tuberías de un mismo material. Esta afirmación se fundamenta en el hecho de que para una misma velocidad de flujo, entre mayor sea el diámetro es menor el esfuerzo cortante y, por lo tanto, las bacterias pueden adherirse con mayor facilidad a la pared interna de la tubería.

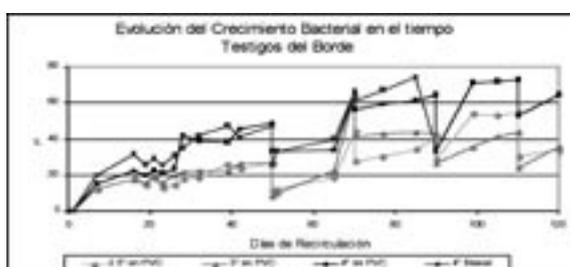


Figura 5 Evolución de la biopelícula en el tiempo. Testigos del Borde

4.2 EFECTIVIDAD DE LOS LAVADOS

Para analizar la efectividad de los lavados se utilizaron los testigos desechables. En la Figura 6 se observan las gráficas de espesor de biopelícula vs. el tiempo de recirculación para este tipo de testigos, y cada una de las tuberías analizadas. Cada punto de las gráficas corresponde al peso normalizado de un testigo desechable. La tendencia de crecimiento entre lavados se supone exponencial.

La hipótesis que se genera mediante los resultados de la Figura 6, comparando las dos tuberías de igual diámetro pero de diferente material, es que la tubería de Biaxial parece ser más lisa que la de PVCu, evitando que se forme una capa considerable de biopelícula a pesar de que el esfuerzo cortante es muy similar.

Por otro lado, utilizando los resultados de los dos primeros lavados, es decir en el día 50 y el día 70, se ratifica lo enunciado por Picioreanu et al. (2001), según el cual, luego de un evento de desprendimiento, la biopelícula continúa aumentando su espesor pero no alcanza nuevamente la cantidad de biomasa acumulada antes de dicho evento. Este resultado se evidencia en las cuatro tuberías, siendo más notorio el cambio en la tubería de PVCu de 3” y en la tubería de 4” Biaxial.

4.3 COMPORTAMIENTO DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Durante el período de experimentación, se monitorearon constantemente las pérdidas de energía mediante las lecturas de los diferentes piezómetros. El análisis de los resultados de dichas pruebas fue separado en las dos fases: inicialmente en la fase de crecimiento y luego en la fase de lavados.

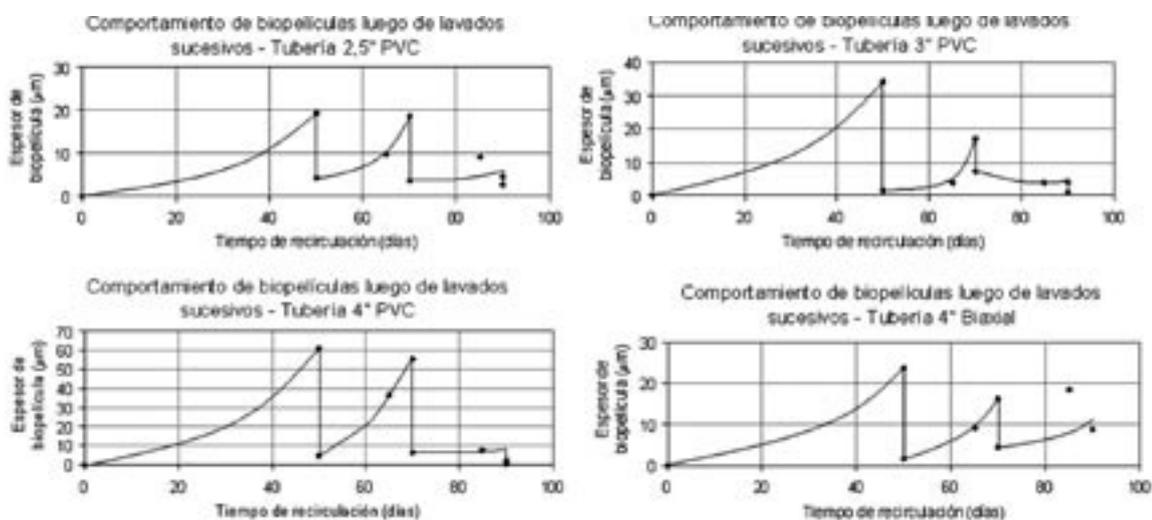


Figura 6 Comportamiento de las biopelículas luego de los primeros tres lavados

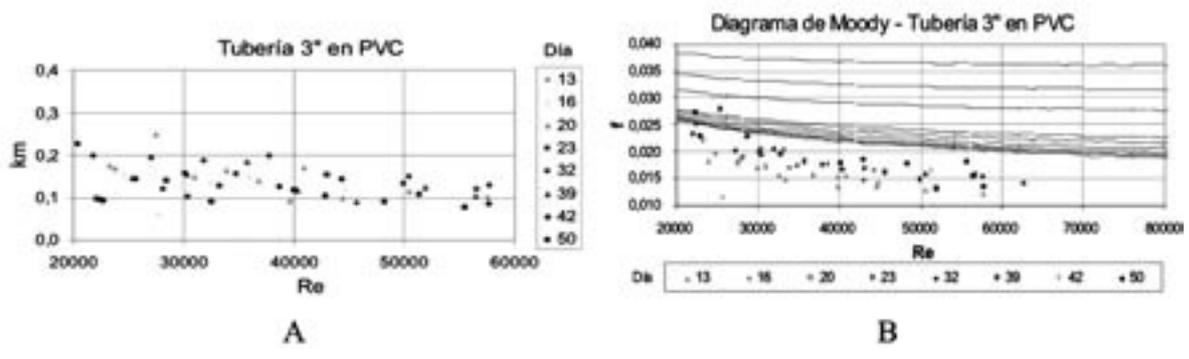


Figura 7 Pérdidas de energía en el accesorio y en el tramo de tubería de 3" en PVC

Fase 1: crecimiento inicial de la biopelícula

En la primera fase de experimentación, es decir, durante los primeros 50 días de recirculación, se evidenció un cambio en las pérdidas de energía, siendo éste más notorio en las pérdidas por fricción que en las pérdidas menores.

En la Figura 6A se puede observar que a medida que pasa el tiempo, el coeficiente de pérdidas menores k_m tiende a disminuir. Los puntos más oscuros corresponden a los últimos días de la primera fase y consistentemente se encuentran en la parte inferior de toda la dispersión de puntos. Así mismo, los datos más claros corresponden a los primeros días de pruebas y se encuentran por encima del resto de puntos. Sin embargo, la tendencia de disminución del coeficiente de pérdidas menores k_m no es muy marcada. Esto comprueba la hipótesis de que a medida que crece la biopelícula se suavizan las líneas de flujo a través de los accesorios, reduciendo el efecto que éstos producen sobre la energía total y minimizando la pérdida localizada de energía.

En el caso de las pérdidas por fricción ocurre el fenómeno contrario: a medida que crece la biopelícula aumenta el factor de fricción, aumentando de esta forma las pérdidas de energía. La razón de este comportamiento inverso radica en que las biopelículas aumentan la rugosidad de la pared interna de la tubería, generando un obstáculo extra que debe ser vencido por el flujo de agua, lo que se traduce en un aumento del factor de fricción.

En la Figura 6B se presentan los resultados de las pérdidas de energía por fricción superpuestos en un diagrama de Moody. En este caso, los datos oscuros son los que se encuentran en la parte superior del diagrama mientras que los más claros, correspondientes a los primeros días de prueba, se encuentran en la parte inferior.

Fase 2: Lavados

El efecto de los lavados sobre las pérdidas por fricción fue notorio: luego de cada lavado, el factor de fricción disminuyó por causa del desprendimiento de las biopelículas. En el período entre lavados, las pérdidas volvían a aumentar siendo controladas nuevamente por el siguiente lavado, como se observa en la secuencia de la Figura 8.

A pesar de que se observa un aumento en las pérdidas de energía por fricción a medida que aumenta el espesor de la biopelícula, no es posible cuantificar el coeficiente de rugosidad absoluta debido a que los resultados se encuentran por debajo del diagrama de Moody o sobre el límite del flujo hidráulicamente liso.

5. CONCLUSIONES

5.1 CRECIMIENTO DE LA BIOPELÍCULA EN EL TIEMPO

La tendencia de crecimiento sobre los testigos del borde fue diferente a la encontrada en los testigos desechables. En los primeros, la tendencia fue creciente todo el tiempo, mientras que en los testigos desechables si se observa una reducción en el espesor ponderado de la biopelícula. La ubicación de los tes-

tigos del borde puede ser la causa de esta divergencia ya que, durante un lavado, las líneas de flujo en la salida de la tubería son muy diferentes a las que se presentan sobre la pared interna de ésta aguas arriba y, por lo tanto, esto pudo afectar la eficiencia de remoción en este sector.

5.2 COMPORTAMIENTO DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Las pérdidas menores en las uniones fueron disminuyendo a medida que la biopelícula crecía, siendo éstas reestablecidas luego de cada uno de los lavados. Las pérdidas por fricción, por el contrario, fueron aumentando con el crecimiento bacterial, disminuyendo nuevamente luego de los lavados.

No fue posible cuantificar el aumento en la rugosidad de las tuberías debido al crecimiento de las biopelículas, ya que durante todo el período de experimentación la biopelícula estuvo por debajo de la subcapa laminar viscosa, siendo incluso menor que el límite para entrar al flujo turbulento transicional.

Al estar dentro de la zona de flujo turbulento hidráulicamente liso, la rugosidad del material no afecta a las pérdidas de energía siendo éstas ocasionadas únicamente por el régimen de flujo (Re); por lo tanto, mediante el uso de las ecuaciones tradicionales para el cálculo del factor de fricción no es posible determinar un valor de rugosidad absoluta.

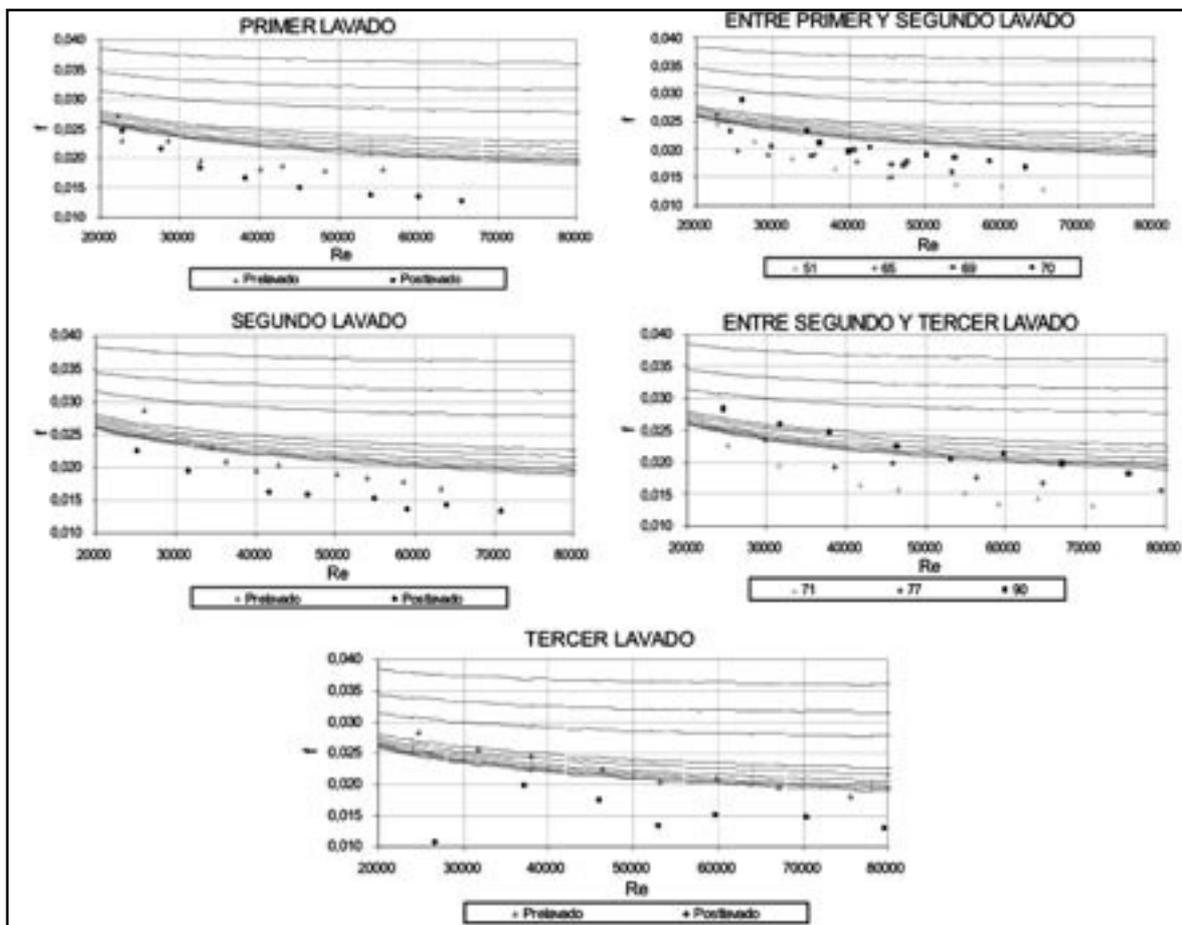


Figura 8 Evolución de las pérdidas por fricción en la tubería de 3" en PVC



5.3 INFLUENCIA DEL DIÁMETRO Y MATERIAL DE LAS TUBERÍAS EN LOS RESULTADOS OBTENIDOS

La tasa de crecimiento de las biopelículas durante la primera fase de experimentación fue mayor en las tuberías de mayor diámetro, debido a que, bajo una misma velocidad de crecimiento, el esfuerzo cortante en las paredes es menor y por lo tanto se facilita el crecimiento de las biopelículas. No se evidenció mucha diferencia entre la tasa de crecimiento entre el PVCu y el PVC Biaxial.

Aparentemente, se adhiere menos biopelícula en el PVC Biaxial que en PVCu; sin embargo, es necesario realizar más investigaciones en este aspecto para contar con herramientas de comparación.

5.4 EL LAVADO COMO CONTROL DE LA BIOPELÍCULA

De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible concluir que los lavados sucesivos son una herramienta efectiva para controlar el crecimiento de las biopelículas en las paredes internas de las tuberías, y de esta forma mantener no sólo la capacidad hidráulica de éstas, sino prevenir eventos de coloración del agua por causa de un desprendimiento en masa de las biopelículas.

Los resultados presentados corresponden a tuberías presurizadas, no de agua potable, por lo que es necesario evaluar la pertinencia de extrapolar las conclusiones presentadas al caso de las redes de distribución de agua potable. Sin embargo, la eficiencia de los lavados y el control de las biopelículas a través de lavados sucesivos expuestos, demuestran que el lavado con agua a presión o “flushing” es una herramienta efectiva para realizar un mantenimiento rutinario de las redes de distribución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beyenal, H, Lewandowski, Z. 2002.
 “Internal and External Mass Transfer in Biofilms Grown at Various Flow Velocities”.
 En *Biotechnology Progress*. 18, pp. 55-61.
- Ellison D. 2003.
 “Investigation of Pipe Cleaning Method”.
 AWWA Research Foundation and American Water Works Association. 2P-2C-90938-9/03-CM
- Horn H, Reiff H, Morgenroth E. 2003.
 “Simulation of Growth and Detachment in Biofilm Systems Under Defined Hydrodynamic Conditions”.
 En *Biotechnology and Bioengineering*. 81(5), pp. 607-617.
- Kwok W.K, Picioreanu C, Ong S.L, Van Loosdrecht M & Heijnen J.J. 1998.
 “Influence of Biomass Production and Detachment Forces on Biofilm Structures in a Biofilm Airlift Suspension Reactor”
 En *Biotechnology and Bioengineering*. 58(4), pp. 401-407.
- Picioreanu C, Van Loosdrecht M, Heijnen J.J. 2001.
 “Two-Dimensional Model of Biofilm Detachment Caused by Internal Stress from Liquid Flow”.
 En *Biotechnology and Bioengineering*. 72(2), pp. 205-218.