

ARTÍCULO CIENTÍFICO / RESEARCH ARTICLE

Ensayo de abrasión de Darmstadt para tuberías de alcantarillado pluvial: revisión de condiciones experimentales

Darmstadt abrasion test for storm sewer pipes: review of experimental conditions

Andrés Eduardo Torres Abello*
Juan Dionisio Zambrano Ramírez**

*PhD, Institut National de Sciences Appliquées, Lyon (Francia), (INSA-Lyon). Profesor Asociado, Grupo de investigación Hidrociencias, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá (Colombia). andres.torres@javeriana.edu.co

Correspondencia: Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, calle 40 N° 5-50, edif. J.G. Maldonado S.J., Bogotá (Colombia). (57-1) 3208320, ext 5255.

** Especialista en sistemas de información, Universidad de los Andes. Auxiliar de investigación, Grupo de investigación Hidrociencias, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá (Colombia). jdzambra@yahoo.com

Subvenciones y apoyos: Pontificia Universidad Javeriana, TITAN - Manufacturas de Cemento S.A.

Resumen

El ensayo de abrasión de Darmstadt se ha utilizado principalmente para comparar la abrasión de diferentes tipos de tuberías. Sin embargo, no se han evidenciado claramente aún relaciones entre los resultados obtenidos mediante dicho ensayo y variables como la vida útil de los materiales o la composición del agua transportada. A partir de un montaje experimental, similar al de Darmstadt, se ensayaron tubos de concreto sin revestimiento, haciendo variar las condiciones experimentales. Se observó que el factor que más influencia tiene sobre los resultados obtenidos es la dureza del material abrasivo, seguido por la concentración en DBO_5 . Los resultados de abrasión obtenidos en laboratorio se compararon con estimaciones de abrasión sobre tubos de concreto en operación con el objetivo de observar una posible relación entre el tiempo del ensayo Darmstadt y el tiempo de servicio de las tuberías de alcantarillado.

Palabras clave: Abrasión de tuberías, alcantarillado pluvial, tiempo de servicio, diseño experimental, ensayo de Darmstadt, tubos de concreto.

Abstract

The Darmstadt abrasion test has been used mainly to compare abrasion of different types of pipes. However, there is no clear evidence yet for relations between results obtained by using Darmstadt test and variables like service life of materials or composition of the transported water. Based on an experimental device similar to the Darmstadt test, concrete pipes without liner were tested by varying the experimental conditions. It was observed that the variable with the most influence on abrasion results is the hardness of abrasive material followed by the BOD_5 concentration. Abrasion results obtained in laboratory were compared to abrasion assessments on in-service concrete pipes in order to observe a possible relation between Darmstadt test time and sewer pipes service life.

Keywords: Pipe abrasion, storm sewer system, service life, experimental design, Darmstadt test, concrete pipes.

Fecha de recepción: 7 de octubre de 2008
Fecha de aceptación: 10 de junio de 2009

1. INTRODUCCIÓN

La abrasión de tuberías de alcantarillado puede ser un problema importante en sistemas de saneamiento urbano con tiempos de operación prolongados. La abrasión se define como el desgaste de la superficie de un cuerpo provocado por las partículas de otro cuerpo generalmente más duro, llamado abrasivo [1]. Este desgaste dependerá *a priori* de características del material abrasivo como su granulometría o su composición química, del material constituyente de la

superficie, de la velocidad relativa entre la superficie y el material abrasivo y la frecuencia de la sollicitación, entre otros [2].

Para el caso específico de abrasión en tuberías se reportan en la literatura varios ensayos para su determinación [3]. Uno de estos ensayos es la prueba de volcamiento por el método de Darmstadt o ensayo de abrasión de Darmstadt [4]. Este ensayo se ha utilizado para comparar la abrasión de diferentes tipos de tuberías, construidas con materiales distintos, probadas de manera no exhaustiva bajo condiciones similares de funcionamiento [3], [5]. En el caso de diversos materiales empleados para tuberías de alcantarillado como el concreto, la resistencia a la abrasión se suele mejorar antes o después de su colocación en el terreno [2] usando revestimientos en poliéster, fibras de vidrio, materiales en polietileno y demás resinas epóxicas. Para el caso de las tuberías de concreto utilizadas para el drenaje urbano se ha comprobado que, además de las características físicas y químicas propias del material sólido transportado por las tuberías, como la granulometría o la composición mineral –siendo los materiales silíceos y cuarzosos los más recomendados para los ensayos de abrasión [6]–, los ácidos procedentes de los suelos, sulfuros y sulfatos de hidrógeno provenientes de la acción bacteriana son determinantes también para la durabilidad de las tuberías [7] - [9]. A pesar de lo anterior no se reportan en la literatura relaciones entre los resultados obtenidos mediante el ensayo de abrasión de Darmstadt y factores como la vida útil de los materiales o los efectos de los agentes propios de las condiciones extremas de operación de los alcantarillados urbanos. Sin embargo, para otros tipos de ensayos de abrasión se reportan en la literatura relaciones con otros parámetros como el pH [6].

El objetivo de este artículo es probar el ensayo de abrasión de Darmstadt en tubos de concreto sin revestimiento para diferentes condiciones de funcionamiento, evaluar los efectos que estas condiciones generan sobre los resultados de abrasión y observar una posible relación entre los resultados de abrasión en laboratorio y el tiempo de operación de este tipo de tuberías en condiciones reales de operación al ser utilizadas como tuberías de alcantarillado urbano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Zona de muestreo

Dentro del marco de este estudio se realizó un muestreo del agua lluvia de escorrentía sobre las calzadas en una zona específica de la ciudad de Bogotá. La zona escogida corresponde a una zona residencial comprendida entre calles 77 y 79 y carreras 7 y 9. Para la toma de muestras se escogió el sumidero ubicado en la calle 78 con carrera 9, en la esquina suroriental. Las características de este sumidero son: (i) pendiente: 5.7 %; (ii) área aferente: 26 m²; (iii) longitud de la vía: 230 m.

La muestra se tomó abriendo el sumidero y recolectando el agua escurrida una vez ingresada a éste, controlando que todo el volumen cayera dentro del contenedor utilizado para este fin. Para controlar esta entrada se sellaron dos de las cuatro rejillas existentes para que el agua lluvia entrara por las restantes y fuera adecuada la recolección de la muestra.

2.2. Tubos de concreto ensayados

Los tubos ensayados fueron de marca Titán, fabricados por Manufacturas de Cemento S.A., con las características siguientes: tubos de concreto sin refuerzo clase 2 de 30 cm (12 pg) de diámetro nominal, una longitud útil de 1.25 m, un espesor de pared de 38 mm, un peso nominal de 143 kg y una carga de rotura de 33 kN/m [10].

Para poder observar una posible relación entre los ciclos correspondientes a una abrasión medida y el tiempo de servicio de las tuberías estudiadas, se determinó recolectar una muestra de tuberías del mismo tipo en obras de la ciudad de Bogotá D.C., donde se estuvieran adelantando trabajos de restitución de tuberías existentes. Los tubos hallados fueron los correspondientes a un alcantarillado combinado situado en la Avenida Quito -Calle 19, costado noroccidental-, los cuales habían tenido un tiempo estimado de servicio de 9 años, según los archivos de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá -EAAB-.

2.3. Ensayo de abrasión de Darmstadt

Este es un ensayo del tipo de volcamiento desarrollado por el Dr. Kirshmer en la Technische Hochschule de Darmstadt, Alemania (1966). Un tubo de 1000 mm de largo cortado a la mitad, del cual se toma una concha, se llena con una mezcla de abrasivo y agua y se tapa para que realice volcamiento en sentido perpendicular a su eje alcanzando un ángulo de ± 22.5 grados, a lo que se considera como un ciclo (figura 1). En el protocolo se especifica que el material abrasivo debe ser una mezcla de arena y grava con las siguientes características, siendo d_{20} , d_{50} y d_{80} los tamaños de partículas no excedidos por un 20, un 50 y un 80% del total de partículas respectivamente: (i) tamaño mediano de las partículas $d_{50} = 6$ mm; (ii) grado de uniformidad $U = d_{80}/d_{20} = 2$. Sin embargo, el protocolo no especifica la dureza del material abrasivo que se debe introducir [4].

La norma determina que el ensayo se debe realizar a una velocidad de 20 ciclos por minuto y con un nivel de agua en función del diámetro del tubo que se va a probar, durante mínimo 200 000 ciclos, tomando lecturas cada 25 000 o 50 000 ciclos, y en la sección comprendida en los 700 mm interiores. El resultado del ensayo de abrasión es el promedio de todas las mediciones superiores a 100 000 ciclos sin que se llegue a la falla de la tubería.

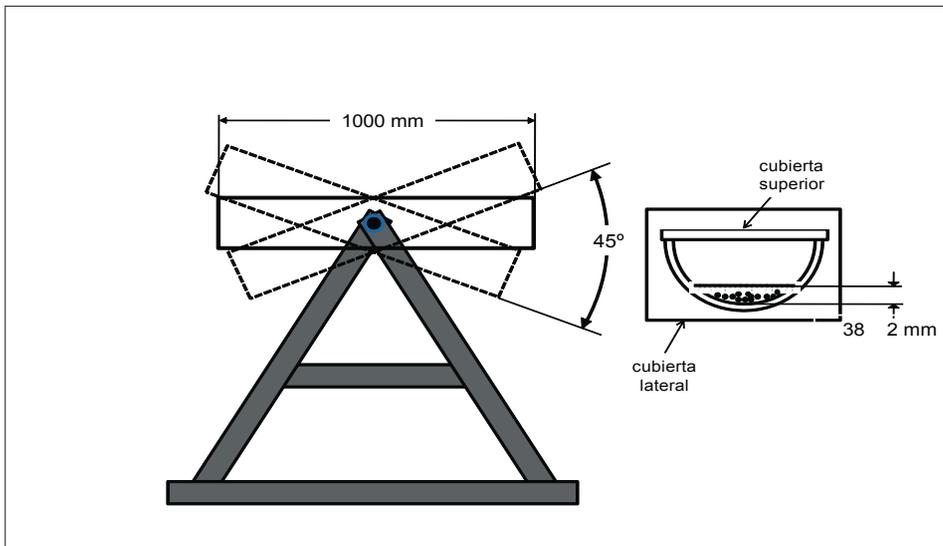


Figura 1. Esquema de la máquina de abrasión de Darmstadt

2.4. Ensayos de calidad de aguas

Los ensayos de calidad de aguas se realizaron según [11] e incluyen: (i) pH mediante el método potenciométrico electromagnético; (ii) Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO_5).

2.5. Diseño experimental

Debido a que los ensayos de abrasión en la máquina de Darmstadt son muy dispendiosos y de gran duración, se adoptó una metodología que permitiera, con base en algunos ensayos, es decir, teniendo en cuenta únicamente unas combinaciones de los factores definidos, poder predecir los resultados de abrasión para las otras combinaciones de factores. Uno de los objetivos del estudio era poder determinar cuál es la combinación de factores más crítica para la abrasión en tuberías de concreto. Se utilizó la Estrategia Plano Experimental (EPE) [12]. Este método permite caracterizar la abrasión y la combinación más desfavorable en la abrasión, pero sin realizar un estudio exhaustivo de todas las combinaciones de factores y niveles posibles.

Para este estudio se escogieron tres factores (pH, DBO_5 , Dureza) y 2 niveles posibles para cada factor: (i) pH: nivel 1 = 6.27, resultante del valor promedio obtenido para las muestras recolectadas; nivel 2 = 4.00, considerado altamente corrosivo y observado por Caro Hernández *et al.* [7]; (ii) DBO_5 : nivel 1 = 0 mg/L; nivel 2 = 49.96 mg/L, resultante del valor promedio obtenido para las muestras recolectadas; (iii) Dureza: nivel 1 = material de grava silíceo-cuarzosa de origen aluvial con alta dureza; nivel 2 = material cohesivo de origen lacustre de predominancia arcillosa con baja dureza.

En un estudio experimental clásico, sin tener en cuenta las interacciones, se tendrían que realizar 2^3 ensayos, es decir, 8 ensayos, arrojando cada uno una solución de abrasión Y . Si las interacciones entre factores se consideran insignificantes, se puede plantear un plano experimental fraccionario, el cual permite la realización de únicamente 4 ensayos, para posteriormente inferir los resultados de los 4 ensayos restantes a partir de un modelo matricial, respetando la condición de ortogonalidad [12]. Los ensayos seleccionados para su realización en laboratorio son los siguientes:

Tabla 1. Niveles escogidos de los factores para los ensayos realizados en laboratorio (1 a 4) y para los ensayos no realizados en laboratorio (5 a 8).

Ensayo N°	nivel de pH	nivel de DBO ₅	nivel de dureza
1	1	1	1
2	2	1	2
3	1	2	2
4	2	2	1
5	1	1	2
6	1	2	1
7	2	1	1
8	2	2	2

Los valores escogidos para los factores son: pH nivel 1 = 6.27; pH en nivel 2 = 4.00; DBO₅ en nivel 1 = 0 mg/L; DBO₅ en nivel 2 = 49.96 mg/L; Dureza en nivel 1 = material de grava silíceo-cuarzosa de origen aluvial con alta dureza; Dureza en nivel 2 = material cohesivo de origen lacustre de predominancia arcillosa con baja dureza.

El modelo experimental específico para la serie de ensayos propuesta, ignorando las interacciones entre factores, se puede representar mediante el sistema matricial de la ecuación (1) [12]:

$$Y = MG + [E_{A1} \ E_{A2}][A] + [E_{B1} + E_{B2}][B] + [E_{C1} \ E_{C2}][C] \quad (1)$$

$$E_{A1} = M_{A1} - MG \quad (2)$$

donde \bar{Y} es el resultado de abrasión predicho a partir de las observaciones, MG es el promedio, teniendo en cuenta todos los resultados de abrasión obtenidos experimentalmente, E_{Ai} es el efecto medio del factor A cuando se encuentra en el nivel i calculado según la ecuación (2), M_{Ai} es el promedio de los resultados de abrasión para los ensayos realizados en los que el factor A se encuentra en el nivel i y $[A]$ es la matriz que define el nivel evaluado del factor A y puede tomar las formas especificadas en las ecuaciones (3) y (4):

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ si } A \text{ se encuentra en el nivel } 1 \quad (3)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ si } A \text{ se encuentra en el nivel 2} \quad (4)$$

Para medir el valor de la abrasión en cada tubo se utilizó un calibrador marca Mitutoyo de 0.01 mm de precisión, el cual toma lecturas de profundidad sobre la batea de cada tubo. Para cada tubo se instaló un montaje de guías para que la medición fuera lo más precisa posible y se tuviera buenas condiciones de repetitividad: cada tubo fue provisto con guías de madera en las cuales estaban grabadas 11 ranuras fijando los puntos de medición dentro de los 70 cm interiores de la longitud del tubo. De cada punto de medición se tomaron tres medidas de abrasión para poder estimar las incertidumbres asociadas (ver figura 2).

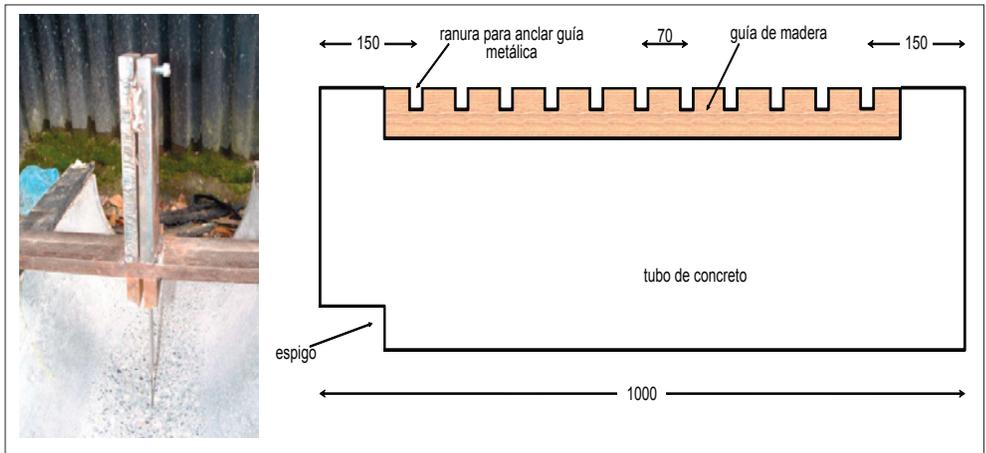


Figura 2. Instrumento de medición de la abrasión (dimensiones en mm)

Para cada tubo se realizó la medición de abrasión antes de empezar el ensayo y al cabo de 100 000, 150 000 y 200 000 ciclos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de las muestras

La tabla 2 muestra los valores promedio de las características de pH y DBO₅ de las muestras estudiadas. Cada muestra corresponde a un evento lluvioso particular del mes de marzo de 2004 sobre la zona de estudio.

Tabla 2. Consolidado de muestras de caracterización de aguas

	pH	DBO ₅ (mg/L)
Muestra 1	6.50	48.89
Muestra 2	6.31	60.89
Muestra 3	6.09	41.17
Muestra 4	6.17	48.89
PROMEDIO	6.27	49.96

3.2. Resultados de ensayos de abrasión

Como ya se precisó, la abrasión se midió en 11 puntos dentro de los 70 cm interiores en la longitud del tubo. Para cada punto se realizaron tres mediciones de profundidad sobre la batea de cada tubo antes del comienzo del ensayo y tres mediciones de profundidad una vez alcanzados 100 000, 150 000 y 200 000 ciclos.

La figura 3 muestra los resultados de pérdidas de espesor promedio en cada punto de medición para todos los ensayos realizados (ver descripción en la tabla 2). En esta figura se observa que la superficie de la batea no se desgasta uniformemente y que los valores máximos de abrasión no se encuentran en la parte media del tubo. Adicionalmente, se pone en evidencia las incertidumbres experimentales, las cuales pueden ser elevadas, al observar en algunos puntos pérdidas de espesor promedio negativas (ver, por ejemplo, punto 11, ensayo 2, 100 000 ciclos) o pérdidas de espesor promedio mayores para un número menor de ciclos (ver, por ejemplo, punto 4, ensayo 2: la pérdida de espesor para 150 000 ciclos es mayor a la obtenida para 200 000).

Los resultados de las abrasiones promedio y de las incertidumbres para 200 000 ciclos se presentan en la figura 4 a). En esta figura se puede observar que en ningún caso se superó una abrasión de 3 mm, lo que representa una pérdida de espesor de tubería inferior al 10 % (espesor = 38 mm).

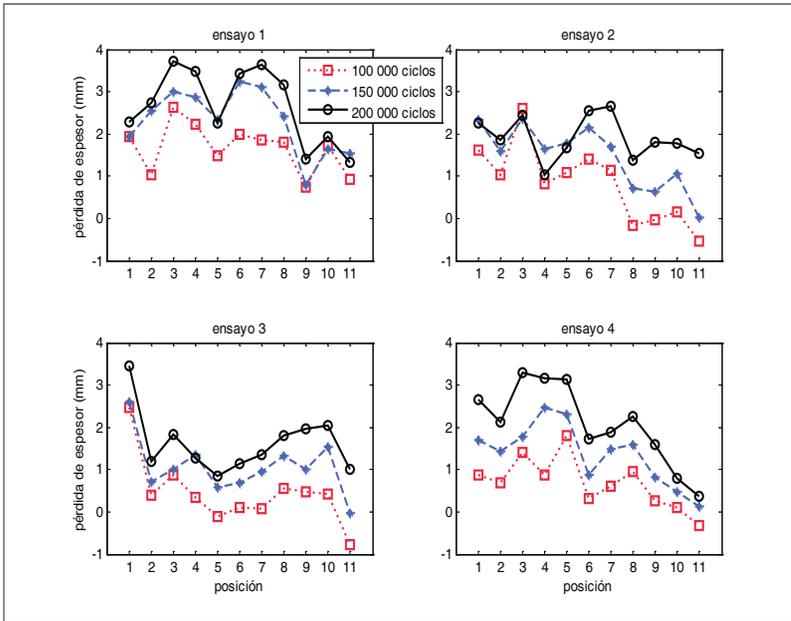


Figura 3. Resultados de abrasión promedio al cabo de 100 000, 150 000 y 200 000 ciclos para los ensayos 1 a 4 (ver descripción tabla 2)

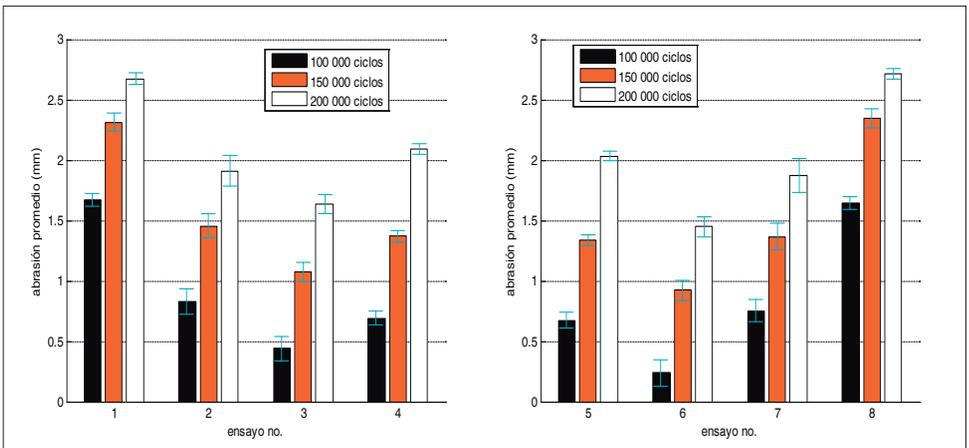


Figura 4. Resultados de los ensayos de abrasión realizados a) y estimados por medio del modelo matricial del plano experimental b). (Intervalos de confianza al 95%: representados por barras de incertidumbre grises)

Durante los ensayos se observó que el material cementante se desgasta rápidamente y deja los agregados expuestos al material abrasivo. En la figura 5 se muestra, a manera de ejemplo, fotografías de la batea del tubo correspondiente al ensayo 1 luego de 100 000 y 200 000 ciclos. Una situación similar a la presentada en estas fotografías se observó para todos los ensayos.

a) 100 000 ciclos

b) 200 000 ciclos



Figura 5. Superficies expuestas al material abrasivo luego de 100 000 y 200 000 ciclos, para el ensayo 1 (ver descripción tabla 2)

El diseño experimental utilizado permitió estimar el orden de magnitud de los resultados de abrasión para los ensayos no realizados. Esto ayudó a estimar las condiciones experimentales que más abrasión causaban en los tubos de concreto. Por otra parte, dicho diseño experimental permitió estimar qué factor (DBO_5 , pH o Dureza) tenía mayor influencia en la abrasión.

A fin de tener en cuenta las incertidumbres observadas en los ensayos de abrasión realizados se desarrolló un programa que acopla un procedimiento de Monte Carlo con modelos matriciales para cada punto de medición. Dichos modelos matriciales responden al diseño experimental y a los resultados de los ensayos realizados, y son de la forma mostrada en la ecuación (1). Con este programa se logró realizar 10 000 simulaciones de los resultados de abrasión correspondientes a los ensayos 1 a 4, considerando las incertidumbres observadas. Esto permitió estimar las abrasiones promedio

y las incertidumbres asociadas a los ensayos que no se realizaron, es decir, los ensayos 5 a 8. Los resultados se muestran en la figura 4b.

Las gráficas de la figura 4 muestran que probablemente las combinaciones correspondientes a los ensayos 1 y 8 son las que más presentan abrasión al cabo de 200 000 ciclos. Esta abrasión es muy similar para los dos tipos de ensayo y es del orden de 2.67 mm.

El modelo matricial escogido permitió estimar la importancia de los efectos de los factores considerados (pH, DBO_5 y Dureza) sobre la abrasión. Para los resultados de abrasión obtenidos al cabo de 200 000 ciclos, el factor más influyente es la Dureza (con una importancia relativa de 58 %), seguido por la DBO_5 (con una importancia relativa de 41 %), y el menos importante es el pH (con una importancia relativa de 1%). Se realizó un análisis de varianza en el que se comprobaron los resultados anteriores, aunque la importancia relativa de cada factor fue sensiblemente diferente: según el análisis de varianza, la variabilidad de los resultados de abrasión depende en un 62 % de la variabilidad de la dureza, en un 30 % de la variabilidad en la DBO_5 , en un 4 % de la variabilidad en el pH y en un 4 % de los errores aleatorios. Adicionalmente, según el análisis de varianza, únicamente la variabilidad de los factores Dureza y DBO_5 influyen de manera significativa ($p\text{-value} < 0.001$) en la variabilidad de los valores de abrasión, con un 95 % de confiabilidad.

3.3. Comparación con tubos de campo

Los tres tubos colectados en campo no mostraban una considerable abrasión a simple vista, y dicha abrasión se mostraba bastante uniforme. Una particularidad adicional que causó varias dificultades en la estimación de la abrasión media sobre los tubos recolectados en campo fue que no se pudo determinar con certeza los lugares correspondientes a la batea y a la clave de cada tubería, y adicionalmente, el lugar que se estimó como aquel correspondiente a la clave también presentaba abrasión.

Se decidió entonces realizar varias mediciones de espesor de tuberías alrededor de la circunferencia del tubo y sobre varios tubos, además en la parte central y cerca de las uniones de cada uno. Esta operación se realizó sin diferenciar entre abrasiones mecánicas o químicas. La abrasión sobre

los tubos extraídos en campo se estimó como la diferencia entre el espesor máximo medido y el promedio de los espesores medidos en dichos tubos, y se obtuvo un valor de abrasión estimado de 1.78 mm.

La figura 6 muestra la comparación de los resultados obtenidos de los ensayos de abrasión realizados en laboratorio y el resultado de abrasión estimado sobre los tubos de concreto en operación. Esta figura muestra que para un ensayo realizado bajo condiciones similares a aquellas empleadas en el ensayo 1 (pH en nivel 1, DBO₅ en nivel 1 y Dureza en nivel 1), y que además corresponde al ensayo de abrasión de Darmstadt sin ninguna modificación, se estaría simulando un tiempo de servicio de 9 años al cabo de 108 000 ciclos. Para los ensayos 2 (pH en nivel 2, DBO₅ en nivel 1 y Dureza en nivel 2), 3 (pH en nivel 1, DBO₅ en nivel 2 y Dureza en nivel 2) y 4 (pH en nivel 2, DBO₅ en nivel 2 y Dureza en nivel 1), un tiempo de servicio de 9 años se estaría alcanzando al cabo de 182 000, 220 000 y 178 000 ciclos respectivamente. Esto demuestra que el procedimiento original de Darmstadt es el más eficiente, ya que es el que permite alcanzar mayores valores de abrasión en menor tiempo de ensayo. Sin embargo, la figura 6 muestra que la dinámica de los resultados de abrasión para el ensayo 1 (cóncava hacia abajo) es diferente de aquella observada para los otros tres ensayos (cóncava hacia arriba), y no es posible determinar a partir de los resultados de esta investigación cuál de las dos formas representa mejor la realidad. Esto indica además que para ensayos con número de ciclos mayores, representando mayores tiempos de servicio de los tubos, el ensayo original de Darmstadt podría eventualmente alcanzar el valor requerido de abrasión en un tiempo de ensayo mayor que los otros tres ensayos, lo que podría representar una limitación para la evaluación de valores de abrasión elevados. Por ejemplo, en general, los ensayos que incluyen DBO₅ altos, es decir, aguas lluvias, y pH de 4.0 son curvas de carácter creciente, lo que daría a pensar que con el tiempo estos factores serán importantes, sin embargo, esto debe ser comprobado en un estudio posterior.

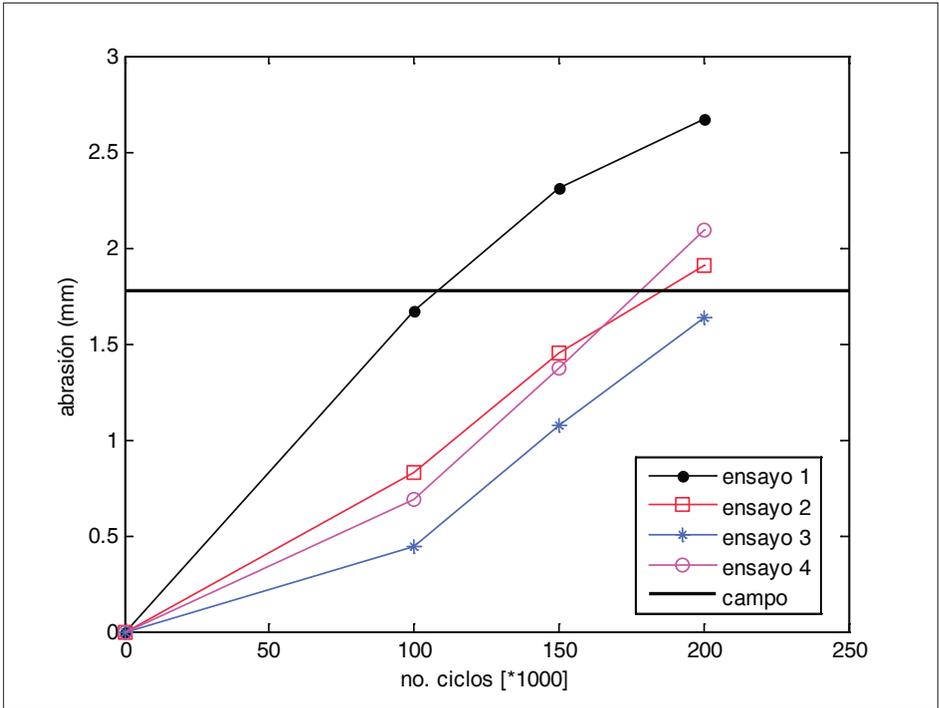


Figura 6. Comparación de los resultados obtenidos de los ensayos de abrasión realizados en laboratorio y el resultado de abrasión estimada en campo

4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

A partir de un montaje experimental similar al preconizado por la norma DIN 19565 [4], llamado ensayo de Darmstadt, se realizaron varios ensayos haciendo variar las condiciones de cada ensayo en términos de dureza del material abrasivo utilizado, pH y DBO_5 del agua. Los rangos utilizados para dichas variables se escogieron con base en: (i) muestreos puntuales de aguas de escorrentía correspondientes a una zona de la ciudad de Bogotá y (ii) valores obtenidos en la literatura para situaciones similares.

Un diseño experimental específico permitió: (i) optimizar los tiempos de obtención de resultados, estimando los resultados de los ensayos no realizados a partir de los resultados obtenidos al realizar tan sólo una parte de los ensayos posibles y (ii) estimar los efectos que cada variable

aporta a la variación de la abrasión. El objetivo de dicho procedimiento era estimar, por un lado, las condiciones experimentales más críticas para dicho protocolo y, por otro, las variables que mayor influencia tienen sobre los valores de abrasión.

Se logró estimar que las condiciones experimentales que más abrasión generan (del orden de 2.67 mm) al cabo de 200 000 ciclos son las siguientes: (i) ensayo con pH en nivel 1 (del orden de 6.27), DBO_5 en nivel 1 (del orden de 0 mg/L) y Dureza en nivel 1 (material de grava silíceo-cuarzosa de origen aluvial con alta dureza) y (ii) ensayo con pH en nivel 2 (del orden de 4.00), DBO_5 en nivel 2 (del orden de 50 mg/L) y Dureza en nivel 2 (material cohesivo de origen lacustre de predominancia arcillosa con baja dureza).

Para los resultados de abrasión al cabo de 200 000 ciclos se logró estimar que el factor que más influye en los resultados de abrasión es la dureza, seguido por la DBO_5 . El pH no presentó una importancia elevada en cuanto a los resultados de abrasión. Un análisis de varianza ayudó a corroborar estos resultados, y se obtuvo que únicamente la variabilidad de los valores de Dureza y DBO_5 influyen de manera significativa ($p\text{-value} < 0.001$) en la variabilidad de los valores de abrasión, con un 95 % de confiabilidad.

Se estimó la abrasión presentada en 3 tubos extraídos en campo y se comparó con los resultados de abrasión medidos en laboratorio. Se observó que el valor de abrasión promedio presentada en estos tubos—los cuales tenían un tiempo aproximado de servicio de 9 años—era similar al valor de abrasión promedio obtenido en laboratorio mediante el ensayo original de Darmstadt al cabo de 108 000 ciclos. Estos resultados son preliminares, y se recomienda que para lograr una estimación de la vida útil de las tuberías, en lo que concierne la abrasión con respecto al número de ciclos Darmstadt, se debe realizar un número mayor de muestreos en campo, y eventualmente refinar la técnica de estimación de la abrasión en tuberías en operación.

El ensayo de Darmstadt simula condiciones mecánicas de abrasión, es decir, sólo las producidas por el desgaste que genera un material sobre la cara interior del tubo. Si bien las condiciones de abrasión producidas por agentes químicos pueden llegar a ser preponderantes, éstas no se evaluaron de manera exhaustiva en este estudio. Se recomienda modificar las condiciones de operación del protocolo de Darmstadt (número de ciclos,

tiempos prolongados de contacto entre el agua y la pared interior del tubo, aceleración de los efectos químicos, etc.) con la finalidad de tener en cuenta este tipo de desgaste en tuberías.

Un factor decisivo para la estimación de la abrasión en tuberías tanto en campo como en laboratorio es el instrumento de medición utilizado. Se recomienda la utilización de aparatos de medición con tecnologías más avanzadas, como por ejemplo, aquellas que utilizan rayos láser, ultrasonido o sistemas de radiografía, entre otros. Este tipo de tecnologías se podría aprovechar además para disminuir los tiempos de realización de cada ensayo al evitar o aligerar actividades engorrosas como montaje/desmontaje de las tuberías, montaje de aparatos de medición en lugares específicos (ranuras), etc. Este tipo de tecnologías podría adicionalmente tender a una medición en continuo del desgaste de las tuberías y/o a un mapeo de la pared interior de éstas durante los ensayos.

Referencias

- [1] A. Celis Caldas, *Nociones geológicas básicas de rocas para ingenieros*, Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia, Unidad de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, 1994.
- [2] D. McNiece, K. Harries, *Physical characteristics of deteriorated reinforced concrete pipe repaired with epoxy materials*. Columbia, S.C.: University of South Carolina, 2002.
- [3] O.E. Hernández y J.G. Saldarriaga, *Abrasión en tuberías de alcantarillado, Memos de investigación*, N° 297. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes, 1996.
- [4] DIN 19565-1, *Rohre und Formstücke aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen; geschleudert, gefüllt – Teil 1: Maße*. Technische Lieferbedingungen, 1989.
- [5] J.B. Goddard, "Abrasion resistance of piping systems". Manukau City, Technical note 2.116, ADS, 1994. Available: www.ads-pipe.com
- [6] CPPA (Corrugated Polyethylene Pipe Association), *Chemical & Abrasion Resistance of corrugated polyethylene pipe*. Toledo: Corrugated Polyethylene Pipe Association [CPPA], USA, 1997.
- [7] P.A. Caro Hernández, A.M. Contreras Revollo, P. Martínez Nieto, M.S. Ospina y J. Rodríguez, "Aislamiento e Identificación de bacterias causantes de corrosión dentro del sistema de acueducto de Bogotá". Tesis (Microbiología Industrial), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 1999.

- [8] Hobas Pipe USA, *Channeline sewer systems, A comprehensive range of GRP pipe and Culvert renovation systems*. Houston: Hobas Pipe USA, 2002.
- [9] Marley DWV Ltd., *Technical design manual 0800 Marley*, 2^a. ed., del AS/NZS 1260 PVC, Auckland, 2003.
- [10] Manufacturas de Cemento S.A. Titán, *Estudio del diseño para instalación de tuberías rígidas de concreto en condición de zanja y condición de terraplén / Catálogo de productos*. Bogotá D.C.: Titán, 2004.
- [11] APHA (American Public Health Association), *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21st ed. Washington D.C.: American Public Health Association, 2005.
- [12] M. Pillet, *Les plans d'expériences par la méthode Taguchi*. París: Les éditions d'organisation, 2001.