

ARTÍCULOS

Velocidades máximas por abrasión en tuberías PRFV

Maximum speeds due to abrasion in GRP pipes

Luis Alejandro Torres-Ramírez¹



latorres@uce.edu.ec

¹ Escuela Politécnica Nacional.
Hidráulica/Ing. Civil.
Quito, Pichincha, Ecuador.

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 18, núm. 2, 2024

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: : 05 abril 2024

Aprobación: 27 junio 2024

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v18i2.6671>

Agradecimientos:

Agradecimiento a la empresa privada
Plásticos Rival.

Autor de correspondencia:

latorres@plasticosrival.com



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Cómo citar: Torres-Ramírez, L. A. (2024). Velocidades máximas por abrasión en tuberías PRFV. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 18(2), 35-41.

<https://doi.org/10.29166/revfig.v18i2.6671>

RESUMEN

Ha sido la permanente preocupación de los ingenieros de empresas municipales en el país, respecto a la determinación de las velocidades máximas y los problemas relacionados por abrasión en las tuberías plásticas, parámetros que pueden ocasionar la pérdida de espesor de pared en las tuberías de alcantarillado sanitario y pluvial. Este artículo establece sobre la investigación obtenida en ensayos de laboratorio en tuberías de PRFV (poliéster reforzado en fibra de vidrio) que con nuevas innovaciones y formulaciones químicas (carburo de silicio), es actualmente, más resistente al fenómeno de la abrasión y por ende a la velocidad del fluido. Muestra que, aunque los métodos de las pruebas de abrasión pueden variar, los resultados obtenidos en los ensayos realizados son consistentes en laboratorio y constatados en campo.

Palabras claves: : PRFV; plástico; abrasión; velocidad

ABSTRACT

It has been the permanent concern of Municipal Company engineers in the country, regarding the determination of maximum speeds and the problems related to abrasion in plastic pipes. Parameters that can cause the loss of wall thickness in sanitary and storm sewer pipes. This article establishes the research obtained in laboratory tests on GRP pipes (fiberglass reinforced polyester) that with new innovations and chemical formulations (silicon carbide), is currently more resistant to the phenomenon of abrasion and therefore to the velocity of the fluid. It shows that, although abrasion test methods may vary, the results obtained in the tests carried out are consistent in the laboratory and verified in the field.

KEYWORDS: GRP; plastic; abrasion; velocity

INTRODUCCIÓN

La estimación de la vida útil de un conducto, independientemente del material del que esté hecho, es un desafío puramente estimativo. Calcular cuánto tiempo puede funcionar satisfactoriamente una tubería de agua mediante fórmulas exactas o procedimientos precisos para evaluar el desgaste por abrasión es extremadamente difícil. En los últimos años, las industrias petroquímicas han experimentado un rápido desarrollo, con notables avances en los métodos y ensayos de laboratorio destinados a este sector, así como en las normativas técnicas correspondientes.

Hay pocos ensayos de laboratorio documentados sobre abrasión en comparación con otros tipos de pruebas realizadas en tuberías de PRFV (Poliéster Reforzado en Fibra de Vidrio) o GRP (Fiberglass Reinforced Polyester). Replicar las condiciones típicas de campo de una zona geográfica e hidrológica específica en un entorno de laboratorio es muy complicado.

En nuestros estudios de laboratorio, hemos medido la resistencia relativa al efecto de la abrasión causada por soluciones de agua con materiales abrasivos como arena sílice, que se aplica cíclicamente a una misma muestra de tubo durante un periodo determinado. Esto nos permite obtener datos clave sobre el desgaste promedio de estos materiales bajo condiciones específicas, considerando el tiempo y otras variables relevantes.

La velocidad del agua y el tamaño y tipo de partículas que transporta son las principales causas del fenómeno de abrasión en tuberías. Sin embargo, garantizar mediante un documento la velocidad de desgaste que puede experimentar una tubería sigue siendo un desafío, ya que no se pueden controlar todas las variables que podrían afectarlo.

A pesar de estas dificultades, este artículo propone una metodología para estimar la vida útil de tuberías de PRFV utilizando nuevos compuestos químicos descubiertos para el revestimiento interior, basándose en resultados de laboratorio y nuestra experiencia en el campo. Esta propuesta busca proporcionar a los usuarios suficiente información técnico-económica para tomar decisiones informadas sobre la viabilidad de utilizar tuberías semirrígidas de PRFV en sus proyectos.

MATERIALES Y ANÁLISIS DEL MÉTODO DARMSTADT

La figura 1 sobre el desgaste en tubos de PRFV fue construida y ajustada después de analizar los resultados tabulados obtenidos en el Instituto de Hidromecánica y Estructuras Hidráulicas de la Universidad Técnica de Darmstadt, Alemania descrito en PVC Pipe Association (2012, pp. 3-42). Conocido como el Método de Darmstadt, la prueba está ahora definida en varios estándares. Consiste en colocar tuberías de sección semicircular conteniendo una mezcla específica de arena de río y grava con agua sobre una mecedora, que cíclicamente se ladea hacia arriba y abajo, simulando las características del flujo.

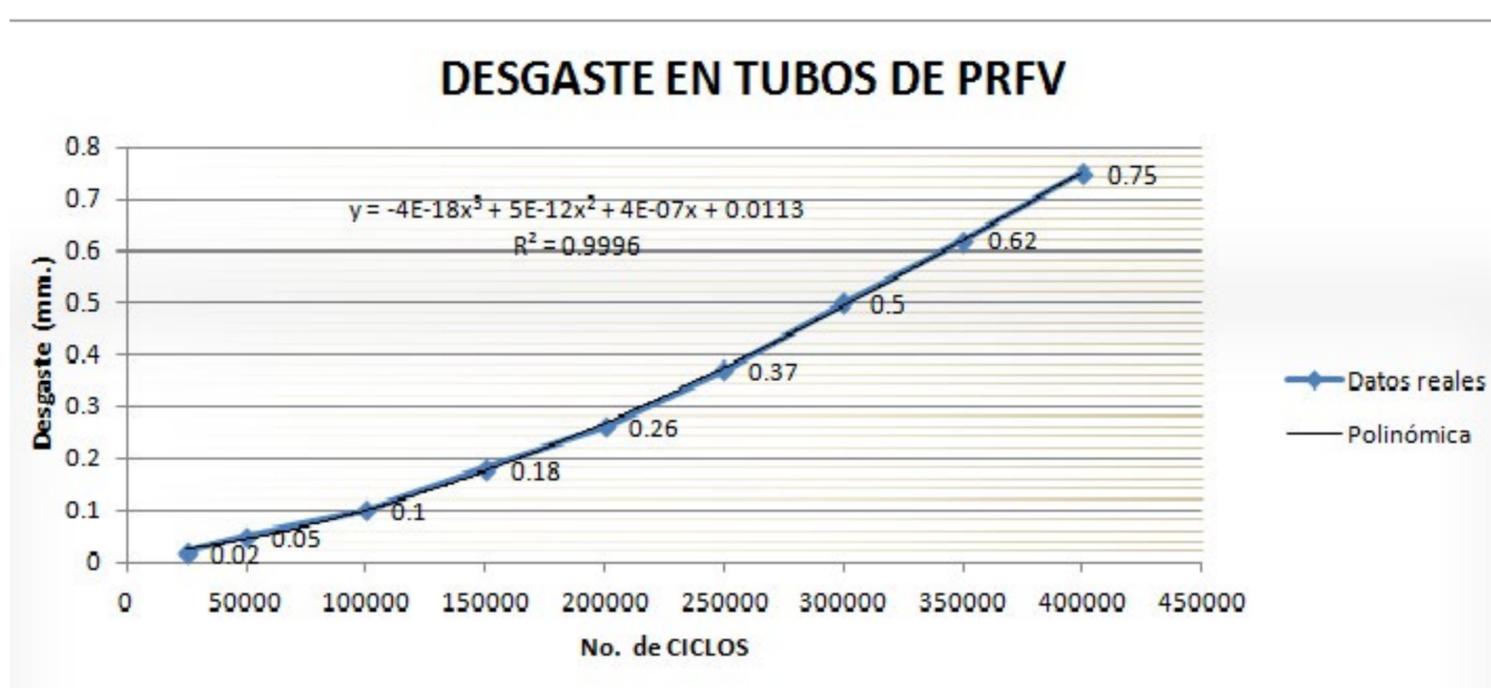


FIGURA 1
Ajuste desgaste PRFV a una ecuación de tercer grado.

Fuente: University of Darmstadt (2012)

Con estos valores se obtiene la figura 1 y se genera la ecuación 1, que relaciona el desgaste en milímetros con respecto al número de ciclos para la tubería de PRFV. la ecuación fue ajustada en base a los valores encontrados en un polinomio de tercer grado con coeficiente de regresión $R= 0.9995$, es decir, una buena aproximación.

$$y = -4E-18x^3 + 5E-12x^2 + 4E-07x + 0.0113 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

y = desgaste de la pared del tubo de PRFV en mm

X = número de ciclos, es una variable reducida.

Ej. 100.000 ciclos (evento de lluvia) es $x=1$, 200000 ciclos es $X=2$

Reemplazando esta variable reducida obtenemos la ecuación 2:

$$y \text{ (mm/año)} = -4E-13x^3 + 0.05x^2 + 0.04x + 0.0113 \quad \text{Ec. (2)}$$

Para determinar el desgaste que ocasionarían 100.000 ciclos de lluvia, y producir, por ejemplo, un desgaste de \square (mm), se puede calcular esta variable utilizando la ecuación 1 o la figura 1. De este modo, para $X = 100.000$ ciclos o eventos de lluvia, se obtiene un desgaste de $y = 0.1$ mm. El tiempo requerido para que estos 100.000 eventos de lluvia produzcan un desgaste de 0.1 mm equivaldría, en el peor de los casos, a suponer 6 aguaceros diarios durante 360 días, resultando en:

$$\text{Tiempo} = 100.000 \text{ ciclos} / (360 \cdot 6) \text{ ciclos/año} = 46 \text{ años.}$$

Esta prueba demostró que la tubería vitrificada de PRFV presenta un mejor comportamiento frente a la abrasión en comparación con otros tipos de material de tubería probados: hormigón simple, hormigón armado y PVC (Torres, 1997, p. 322). Este rendimiento superior se mantuvo hasta los 400.000 ciclos, a partir de los cuales el desgaste se vuelve exponencial una vez que se pierde el revestimiento interno (liner) en la tubería de PRFV.

RESULTADOS

Método DIN 19595 o Darmstadt

El experimento de laboratorio realizado en 2011 por el grupo Petroplast en el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM, 2020) determinó la resistencia al desgaste por abrasión en tuberías de PRFV con nuevos liners endurecidos consistentes en anti-abrasivos de carburo de silicio, diseñados para proteger la pared interna del tubo de GRP. Para evaluar la resistencia del denominado liner endurecido, que es la primera capa de resina en contacto con el agua y el material abrasivo, se utilizaron dos muestras de tubería de 600 mm de diámetro y un metro de longitud, fabricadas con esta nueva formulación de liner anti-abrasivo, según el método del Test de Resistencia de la DIN 19595 (1989).

Las muestras fueron sometidas a la abrasión producida por un material granular especificado, compuesto de grava mezclada con agua (2,45 mm a 8,43 mm), durante un número definido de ciclos, con el objetivo de medir la pérdida de espesor de la pared del tubo durante el ensayo. El proceso consistió en cortar las muestras paralelamente al tubo para formar una canaleta, en la cual se vertió la mezcla abrasiva estandarizada. Los extremos de la canaleta se sellaron con gomas para evitar filtraciones de agua y se colocaron en un dispositivo especialmente diseñado para este ensayo, conforme a la norma mencionada.

El dispositivo ensayo resistencia abrasión (figura 2) desarrolla un movimiento alternativo en sentido angular de $\pm 22.5^\circ$, de modo que la carga abrasiva, se desliza desde un extremo del tubo al otro, generando un desgaste en la superficie interna de la canaleta, el cual depende del tipo de liner sometido a esta acción.

Para la investigación las variables de entrada fueron los componentes del gas natural, en este caso 11 componentes: CO₂, N₂, Metano (C1), Etano (C2), Propano (C3), Iso-Butano (I-C4), N-Butano (N-C4), Iso-Pentano (I-C5), N-Pentano (N-C5), Hexano y más pesados (C6+) y H₂S, además se incluyeron la Presión del sistema (P) y la Temperatura del sistema (T), para un total de 13 variables de entrada. Los componentes del gas se expresaron en porcentaje molar con excepción del H₂S expresado en partes por millón (ppm), la presión del sistema en libras por pulgada cuadrada absolutas (Lpca) y la temperatura en °F. Se introdujeron 46 muestras de gas natural lo que representó un conjunto de entrenamiento con el mismo número de componentes y un total de datos procesados de 598, con probabilidades de ocurrencia proporcionales a los datos introducidos. El parámetro de espaciado usado fue obtenido por el método Jackknifing aplicado al entrenamiento de la red, este método estima el espaciado por un re-cálculo sistemático del valor estadístico por omisión de una observación por vez del conjunto de datos introducido y crea un conjunto nuevo de observaciones estadísticas con las que se estima el sesgo y la varianza, siendo especialmente aplicable a datos con diferentes pesos de muestreo (Wu *et al.*, 2023).

Se utilizó una función de activación de tipo sigmoidea. La función de activación representa el núcleo de una estructura de RNA y se utiliza para aumentar la capacidad de expresión del modelo de red neuronal, con base en el trazado por una función no lineal (Wang *et al.*, 2020). La expresión de la función sigmoidea se muestra en la ecuación 3 y su forma en la figura 2.

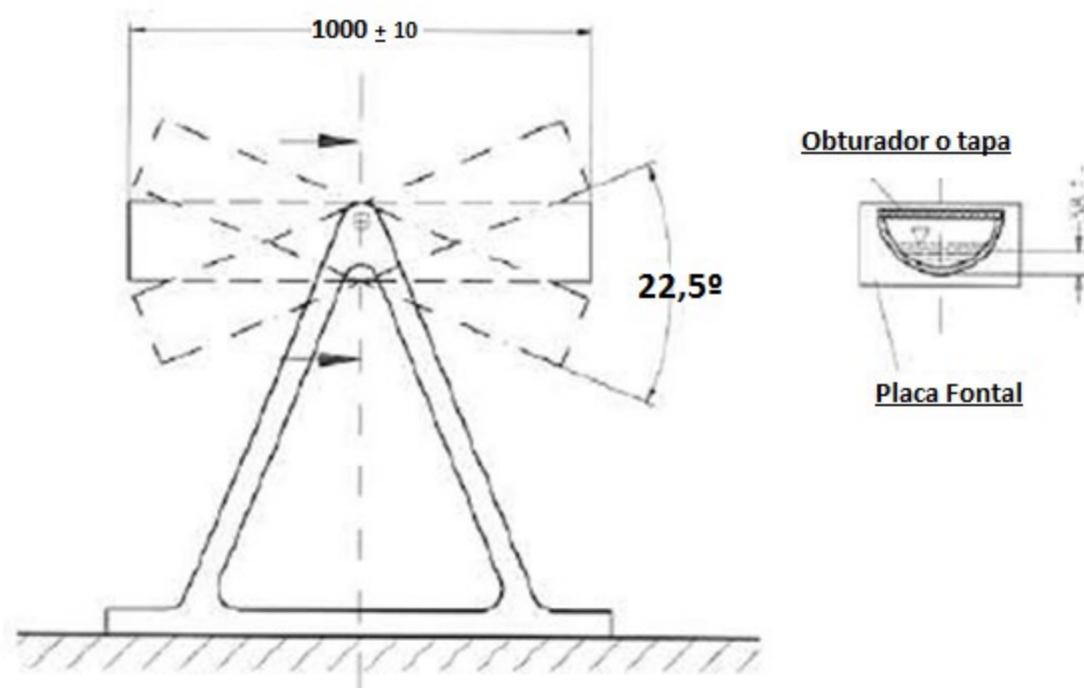


FIGURA 2
Dispositivo ensayo resistencia abrasión

Fuente: DIN 19595 (1989)

El desgaste se midió utilizando un comparador o micrómetro con una precisión de 0,001 mm en 20 puntos diferentes. Las mediciones se realizaron a intervalos de 50.000, 100.000, 150.000 y 200.000 ciclos de trabajo. El valor promedio de los 20 puntos, medido después de los 100.000 ciclos, se utilizó como el resultado de este ensayo. A continuación, se describen los resultados obtenidos después de completar los 100.000 ciclos:

Valor promedio de desgaste muestra 1: 0,097 mm

Valor promedio de desgaste muestra 2: 0,087 mm

Desgaste promedio de las dos muestras = 0,092 mm

El ensayo de Darmstadt se centra en simular las condiciones mecánicas de abrasión, específicamente aquellas generadas por el desgaste en la cara interior de un tubo. Aunque es importante considerar que las condiciones de abrasión causadas por agentes químicos pueden ser significativas, este estudio no abordó exhaustivamente dichos aspectos. Dado que el material es inerte a la mayoría de los ataques químicos, esta área debería ser objeto de investigaciones futuras.

En las dos muestras de tubería, el espesor del liner endurecido fue de 0,1 mm, lo que indica un desgaste aproximado del 8,3 % tras 100.000 ciclos. Aunque los resultados fueron ligeramente inferiores a los proyectados por la Universidad de Darmstadt, se mantuvieron bastante consistentes. Por lo tanto, se puede prever que la extrapolación del desgaste en función del tiempo también será menor.

RESULTADOS Y DISCUSION PARA VELOCIDADES MAXIMAS EN TUBOS PRFV

Con estos antecedentes, se puede abordar otro aspecto crucial en el diseño de tuberías, especialmente para flujos que transportan sedimentos suspendidos y material granular. Se sabe que la velocidad máxima del agua depende del material de la tubería; a medida que aumenta la granulometría del material abrasivo, es recomendable reducir las velocidades máximas para mitigar la abrasión potencial.

Para las tuberías de PRFV, la empresa austríaca HOBAS (2024), la colombiana OTEK (2021), y la ecuatoriana Plásticos RIVAL (2023), fabricantes de tubos PRFV, sugieren en sus publicaciones y manuales trabajar con velocidades máximas de hasta 4 m/s para flujos con sedimentos suspendidos y 3 m/s para flujos con material granular. Estos valores de velocidad se derivan de las evaluaciones realizadas mediante el método de Darmstadt, cuyos resultados en la prueba de abrasión indican un promedio de desgaste de hasta 0,34 mm, verificado a los 100.000 ciclos.

Ninguna de estas tuberías utilizó el "liner endurecido". El desgaste obtenido es casi tres veces mayor en comparación con las tuberías fabricadas con la nueva formulación química patentada por Petroplast, conocida como "liner endurecido". Para el mismo número de ciclos o eventos de lluvia, el desgaste promedio medido fue de 0.091 mm. Este nuevo material endurecido, gracias en parte a su estructura, posee una dureza casi comparable a la del diamante, alcanzando valores de 9 a 9,5 en la escala de Mohs.

Otro estudio, realizado en el Saskatchewan Research Council de Canadá sobre tuberías de GRP y otros materiales (Haas y Smith, 1995), verificó una prueba de laboratorio con velocidades máximas de desgaste. La figura 3, construida a partir del análisis de los resultados tabulados, muestra estos datos. Las ecuaciones obtenidas por regresión proporcionan una referencia relativa sobre la vida útil de una tubería semirrígida de PRFV cuando transporta agua con contenido específico de sedimentos. El experimento evaluó el fenómeno con dos niveles de velocidad (2.1 m/s y 4.6 m/s) y dos tamaños de partículas.

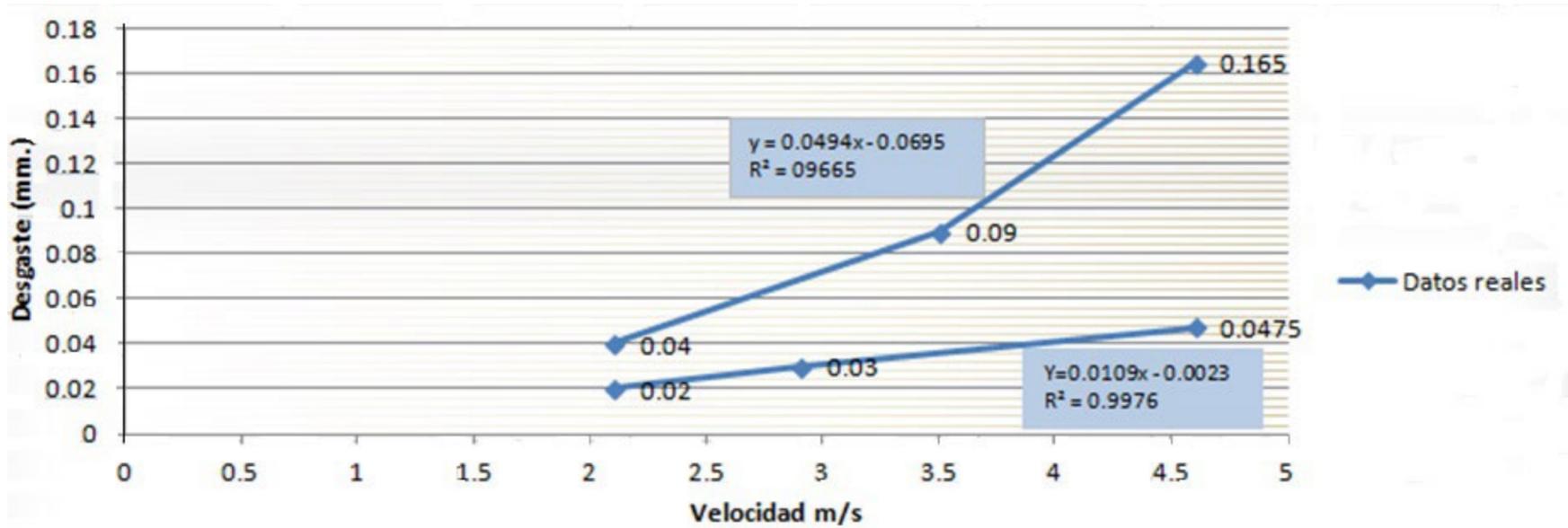


FIGURA 3
Prueba de abrasión

Fuente: Haas and Smith (1995)

Las ecuaciones resultantes de predicción del desgaste son (ecuación 3 y ecuación 4):

$$Y, t(\text{mm} / \text{año}) = 0.0109(v) - 0.0023 \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

v es la velocidad en m/s.

La ecuación 3 es válida para partículas de arena con D10=2.95mm (3mm)

$$Y, t(\text{mm} / \text{año}) = 0.0494(v) - 0.0695 \quad \text{Ec. (4)}$$

La ecuación 4 válida para partículas de arena con $D_{80} = 8.43\text{mm}$ (8 mm).

A continuación, presentamos dos ejemplos de aplicación en tuberías de PRFV, utilizando partículas de entre 3 y 8 mm. Proyectamos el desgaste no solo en función de la abrasión, sino también de la velocidad del flujo en el conducto.

Ejemplo 1

Tubería PRFV de 1,20 m de diámetro interno; fabricada con liner endurecido; con espesor de pared liner $w_t = 3,0$ mm; velocidad del agua $v = 5,0$ m/s; partículas de tamaño 3 mm.

Solución aplicando la ecuación 3:

$$Y, t(\text{mm} / \text{año}) = 0.0109(5) - 0.0023 = 0.053(\text{mm} / \text{año})$$

$$\text{Vida útil según método: } VU = 3.0/0.053 = 56 \text{ años}$$

Ejemplo 2

Tubería PRFV de 1,20 m de diámetro interno; fabricada con liner endurecido; con espesor de pared liner $w_t = 3,0$ mm; velocidad del agua $v = 5,0$ m/s; partículas de tamaño 3 mm.

Solución aplicando la ecuación 3:

$$Y, t(\text{mm} / \text{año}) = 0.0494(5) - 0.0695 = 0.18(\text{mm} / \text{año})$$

$$\text{Vida útil según método: } VU = 3.0/0.18 = 17 \text{ años.}$$

CONCLUSIONES

La innovación del producto mediante el uso del liner endurecido permite alcanzar velocidades de hasta 5 m/s para aguas residuales con material granular moderado. Para fluidos con cantidades no significativas de sedimentos suspendidos (coloides), las velocidades pueden llegar hasta 10 m/s, según las proyecciones realizadas con ecuaciones para partículas de material granular fino. Los resultados muestran que, además de mejorar y aumentar el espesor de la primera capa del tubo (denominado liner), el compuesto químico utilizado, carburo de silicio, hace que el liner endurecido sea mucho más resistente a la abrasión a nivel molecular. Esto representa una nueva contribución para los usuarios de tuberías, que han estado utilizando este producto en nuestro país desde 2010, con resultados positivos.

Del análisis de resultados se espera una velocidad de diseño de 5,0 m/s si el agua llevara partículas abrasivas cuyo tamaño estén entre 3 mm y 8 mm, la vida útil esperada para una tubería de PRFV que tenga el liner endurecido o anti abrasivo objeto de este artículo, esta disminuye a medida que aumenta la granulometría de las partículas, valores proyectados para el caso particular bajo con una operación exigente y continua a través del método indicado, situación que en la realidad no ocurre y las descargas no son tan recurrentes.

En los últimos 7 años, las tuberías de PRFV con liner endurecido han demostrado mínimos desgastes operando a velocidades de flujo superiores a 5 m/s. Estas tuberías son fabricadas en el país por la empresa P Rival, cumpliendo con la normativa AWWA C-950-20 (AWWA, 2020). A pesar de que la normativa establece un rango de velocidad entre 0,5 y 3 m/s para el liner normal, las tuberías con liner endurecido han sido utilizadas con velocidades superiores, y la mayoría de las observaciones de campo indican que no han sufrido el desgaste proyectado. Esto sugiere que en el futuro cercano podrían desarrollarse compuestos y materiales que permitan recomendar velocidades aún mayores.

Actualmente, fabricantes de otros materiales como el PVC recomiendan velocidades de hasta 10 m/s para alcantarillado pluvial, basándose en información recopilada de la literatura técnica existente y en pruebas con agua que contiene fragmentos de arena y grava.

Los antecedentes y pruebas expuestos pueden ser considerados para tomar decisiones técnico-económicas sobre la viabilidad de utilizar tuberías semirrígidas de PRFV en proyectos de alcantarillado sanitario y pluvial. Con esta metodología

y las conclusiones expuestas, esperamos que los diseñadores puedan contar con una herramienta adicional para evaluar la vida útil de sus proyectos en función del fenómeno de la abrasión. Finalmente, es importante señalar que siempre es recomendable introducir un factor de seguridad en las estimaciones.

REFERENCIAS

- AWWA (2020) *Fiberglass Pressure Pipe. Norma AWWA C950-20*. Primera edición. USA: American Water Works Association. Doi: 10.12999/AWWA.C950.20
- DIN 19595-1 (1989) *Centrifugally cast and filled polyester resin glass fibre reinforced (UP-GF) pipes and fittings for buried drains and sewers; dimensions and technical delivery conditions*.
- EMAAP-Q (2009) *Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado para la EMAAP-Q*. Primera edición. Ecuador: V&M Gráficas. Disponible en: [https://www.aguaquito.gob.ec/Alojamientos/PROYECTO%20LA%20MERCED/ANEXO%202%20NORMAS ALCANTARILLADO EMAAP.pdf](https://www.aguaquito.gob.ec/Alojamientos/PROYECTO%20LA%20MERCED/ANEXO%202%20NORMAS%20ALCANTARILLADO%20EMAAP.pdf) [Consultado 08, 03, 2024]
- Haas, D.B., & Smith, L.G. (1995) *Erosion Studies- A Report to DuPont of Canada, Ltd*. Canadá: Saskatchewan Research Council.
- PVC Pipe Association (2012) *Handbook of PVC Pipe Design and Construction*. First Industrial Press Edition. USA: Uni-Bell PVC Pipe Association.
- HOBAS (2024) *Manual Tuberías PRFV*. Disponible en: <https://www.hobas.com/es/about-us/>. [Consultado 29, 02, 2024].
- INEN-ISO 23856:2021 (2021) *Tubería termoestable reforzada con fibra de vidrio (PRFV) para suministro de agua, evacuación y saneamiento con y sin presión*.
- IRAM (2020) *Informe de ensayos Nº 16.36(Q) Rev.1*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- López, R. (2004) *Elementos de Diseño para acueductos y alcantarillados*. 2ª edición, p. 440
- Mexichem (2024) *Manual Técnico GRP Pavco – Poliester Reforzado de Fibra de Vidrio*. Disponible en: https://neufert-cdn.archdaily.net/uploads/product_file/file/49973/Manual_tecnico_grp.pdf. [Consultado 08, 03, 2024]
- OTEK (2021) *Manuales Técnicos Guías de Productos*. Disponible en: <https://o-tek.com/wp-content/uploads/2021/12/guia-producto-otek-6.pdf> [Consultado 04, 02, 2024].
- RIVAL (2023) *Manual de Tuberías PRFV*. Disponible en: https://www.plasticosrival.com/files/products/prfv/tecnicamanual/PR_PRFV_ManualTecnico.pdf. [Consultado 08, 03, 2024].
- Torres Abello, A. E. & Zambrano Ramírez, J. D. (2009) "Ensayo de abrasión de Darmstadt para tuberías de alcantarillado pluvial: revisión de condiciones experimentales", *Ingeniería y Desarrollo*, 26, pp. 100-116. ISSN: 0122-3461. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85212233008>
- Torres, R. L. (1997) "Abrasión en Tuberías de PVC", *VII Congreso Nacional de Hidráulica*. Chile, nov, p. 322.
- Uribe, J. D. & Ossa, J. S. (2016) *Determinación de la resistencia a la abrasión externa en tuberías de redes de distribución*. Universidad de los Andes: Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental