

Flujo turbulento hidráulicamente liso en tuberías de polietileno

Luis Fernando Fajardo Bravo ^a, Juan Saldarriaga ^b

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia

^a lf.fajardo@uniandes.edu.co

^b jsaldarr@uniandes.edu.co;

Resumen

En esta investigación, se llevan a cabo pruebas físicas mediante montajes de tuberías de polietileno con el propósito de establecer la relación entre el factor de fricción y el número de Reynolds dentro de un rango de régimen de flujo turbulento hidráulicamente liso. Se busca evaluar la validez de las ecuaciones tradicionales de diseño y su aplicabilidad en tuberías de polietileno de alta densidad. La experimentación implica el montaje de las dos tuberías estudiadas, y mediante diversas herramientas se determinan las pérdidas de altura de columna de agua entre dos puntos de la tubería. Este enfoque permite determinar si el factor de fricción asociado a dichas pérdidas de presión se ajusta a lo descrito por las ecuaciones de Colebrook-White, Prandtl von Kármán o Blasius.

En resumen, el estudio se centra en la relación entre factor de fricción y número de Reynolds en tuberías de polietileno, explorando la validez de ecuaciones tradicionales y evaluando su aplicación en tuberías de polietileno de alta densidad mediante pruebas físicas. Los resultados se analizan con referencia a las ecuaciones de Colebrook-White, Prandtl von Kármán y Blasius para comprender el comportamiento del flujo y las pérdidas de presión en estas condiciones específicas.

Introducción.

Los sistemas de distribución de agua son de las estructuras más antiguas e importantes en el desarrollo de las sociedades, estos sistemas han sido ampliamente estudiados y desarrollados a lo largo de la historia, es por esto, que se han adoptado diferentes materiales de forma que se busque la mayor eficiencia en los sistemas. Para el caso de la distribución de agua potable, se ha identificado que es adecuado el uso de materiales plásticos por la durabilidad, flexibilidad y, especialmente, por las reducidas pérdidas por fricción que se presentan al fluir por la tubería. En este trabajo de investigación se realiza el estudio de la viabilidad del uso del polietileno como material para

reemplazar el PVC como material para las tuberías de distribución de agua potable en los sistemas urbanos.

De acuerdo con diferentes estudios, se ha encontrado que el uso del material de PVC tiene repercusiones que lo hacen no sostenible debido a la posible lixiviación de compuestos orgánicos provenientes del PVC hacia el agua. Estos estudios han mostrado que los compuestos orgánicos volátiles pueden liberarse de las tuberías de PVC, generando preocupaciones sobre la calidad del agua (Shaikh et al., 2019). Debido a los resultados anteriores, se considera importante plantear la búsqueda de un material alternativo para su uso en los sistemas de distribución de agua. Es por ello que en este estudio se busca llevar a cabo la evaluación de otro de los materiales plásticos tradicionalmente utilizados en este tipo de sistemas, uno que ofrezca propiedades adecuadas y sostenibilidad dentro de estas redes.

El polietileno es un material versátil que se distingue por sus propiedades de resistencia química, durabilidad y flexibilidad, alineándose con las propiedades de los materiales idóneos para los sistemas de distribución de agua (Dear & Nicholas, 2006).

Para evaluar la factibilidad de la implementación de este material en los sistemas de distribución, es necesario realizar un estudio sobre su comportamiento al transportar agua. Por lo tanto, con el objetivo de destacar las pérdidas por fricción causadas por las paredes internas del material, se busca llevar a cabo una verificación del comportamiento mecánico y físico del fluido utilizando las ecuaciones tradicionales de diseño. Inicialmente, se realiza el cálculo de las pérdidas de energía mediante la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación 1).

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde el factor f es el factor de fricción, l la longitud de tubería, v la velocidad asociada al flujo del fluido, d es el diámetro interno y g es la aceleración de la gravedad.

El factor de fricción se determina mediante una ecuación fundamentada en principios físicos, garantizando un cálculo preciso que considera la mecánica de fluidos y se alinea con la teoría correspondiente. Esta ecuación describe el comportamiento del factor de fricción en la región de flujo turbulento y se expresa como se presenta en la Ecuación 2:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \text{ Ecuación 2}$$

Este factor relaciona la rugosidad de las paredes de la tubería (k_s), el número de Reynolds (Re) y el factor de fricción como una variable implícita dentro de la ecuación. La ecuación del número de Reynolds corresponde a la Ecuación 3:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \text{ Ecuación 3}$$

Es crucial destacar que los parámetros Re y k_s/d son adimensionales, lo que implica que el factor de fricción f también lo será. En cuanto al parámetro k_s/d , este puede describirse mediante la ecuación de Prandtl-von Karman, especialmente cuando se trata de tuberías lisas.

Finalmente, en esta investigación se llevará a cabo una comparación entre los resultados experimentales obtenidos por diferentes investigadores y los resultados teóricos para el factor de fricción y las pérdidas en las zonas de flujo turbulento. Esto se logrará mediante el uso del diagrama de Moody en las zonas de números de Reynolds específicas para este tipo de flujo. En este análisis, se considerarán las recomendaciones del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico en Colombia (RAS) con el objetivo de asegurar la aplicabilidad en el contexto colombiano.

Antecedentes

El uso de materiales plásticos y superficies lisas ha experimentado un notable auge en los últimos tiempos. Sin embargo, con la incorporación de nuevas tecnologías, se ha observado un cambio en las propiedades de los materiales utilizados en la fabricación de tuberías. Estos materiales

han sido extensamente optimizados para lograr los mejores resultados en superficies lisas para sus aplicaciones específicas. La determinación experimental de la rugosidad en las paredes de las tuberías es una medición bastante compleja de llevar a cabo. Por esta razón, en la mayoría de los casos, se realiza de manera estadística, ya que la rugosidad varía dependiendo del material utilizado.

La determinación del factor de fricción ha sido de gran interés, ya que permite calcular las pérdidas de energía por fricción que se producen al transportar agua a través de las tuberías de distribución. A lo largo de los años, se han llevado a cabo diversas investigaciones con el objetivo de comprender la relación entre el factor de fricción y el número de Reynolds. Los estudios que buscan determinar el comportamiento y la relación entre las pérdidas por fricción y los materiales datan del siglo XX. Durante esta época, varios autores se enfocaron en estudiar materiales plásticos como el polietileno de baja densidad, evaluando diferentes longitudes y diámetros. Investigaciones como las realizadas por Levin en 1972, Urbina en 1976, Paraqueima en 1977 y Bargaello en 1995 resultaron ser determinantes en el análisis de las pérdidas por fricción en el flujo de agua a través de las tuberías.

Por otro lado, se han encontrado también estudios para el polietileno de alta densidad, el material usado en esta investigación, presentando propiedades similares a las descritas anteriormente por su plasticidad. Por un lado, se encuentra el estudio *“Head losses and friction factors of steady turbulent flows in plastic pipes”* por Diogo y Vilela en 2014, donde estudian ambos materiales plásticos tradicionales para este tipo de tuberías, tanto el PVC como el polietileno, realizando también diferentes pruebas con variaciones en diámetros y longitudes, donde de acuerdo con los resultados de los estudios, se evidencia que el PVC tiene una rugosidad menor a la del polietileno.

Diversos estudios han revelado variaciones en los valores del factor de fricción, señalando discrepancias con respecto a lo considerado por la ecuación de Colebrook-White. En la Universidad de Los Andes, se han llevado a cabo investigaciones particulares sobre este tema. Autores como Rafael Parada, Laura Camila García, Eliana Ramírez y Daniel Hernández Murcia han investigado el comportamiento del polietileno de alta densidad, con el objetivo de determinar sus propiedades y comprender el flujo en las tuberías.

Cada uno de los mencionados ha abordado investigaciones utilizando diferentes diámetros para la tubería en cuestión. Rafael Parada evaluó diámetros nominales de 110 mm, Laura García estudió diámetros nominales de 63 y 90 mm, Eliana Ramírez se enfocó en diámetros nominales de 63 y 75 mm, y, finalmente, Daniel Hernández se dedicó al estudio de diámetros nominales de 90 y 160 mm.

Metodología

Para llevar a cabo la investigación, es esencial definir el montaje físico, el material y los diámetros que se estudiarán. Además de esto, se recopilan los resultados previos obtenidos en la Universidad de Los Andes. Finalmente, se analiza el comportamiento de los resultados para evaluar la tendencia del agua al fluir por las tuberías de polietileno en un régimen de flujo turbulento. Este análisis permitirá comprender cómo este material puede ser utilizado en la fabricación de las tuberías de los sistemas de distribución.

El montaje del modelo se llevó a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Los Andes en Bogotá. Este montaje implicó el uso de tuberías de polietileno de alta densidad proporcionadas por la empresa PAVCO como parte de la cátedra PAVCO, enmarcada en un convenio de investigación con la Universidad. El modelo se construyó conectando la tubería de polietileno a una tubería de alimentación, que se origina desde un tanque de almacenamiento ubicado en el segundo piso del edificio Mario Laserna de la Universidad. Además, se incorporó una tubería de desagüe aguas abajo que conduce al tanque de almacenamiento ubicado en el sótano 2 del edificio. El esquema del montaje de la prueba se representa en la Figura 1. Esquema de montaje de prueba

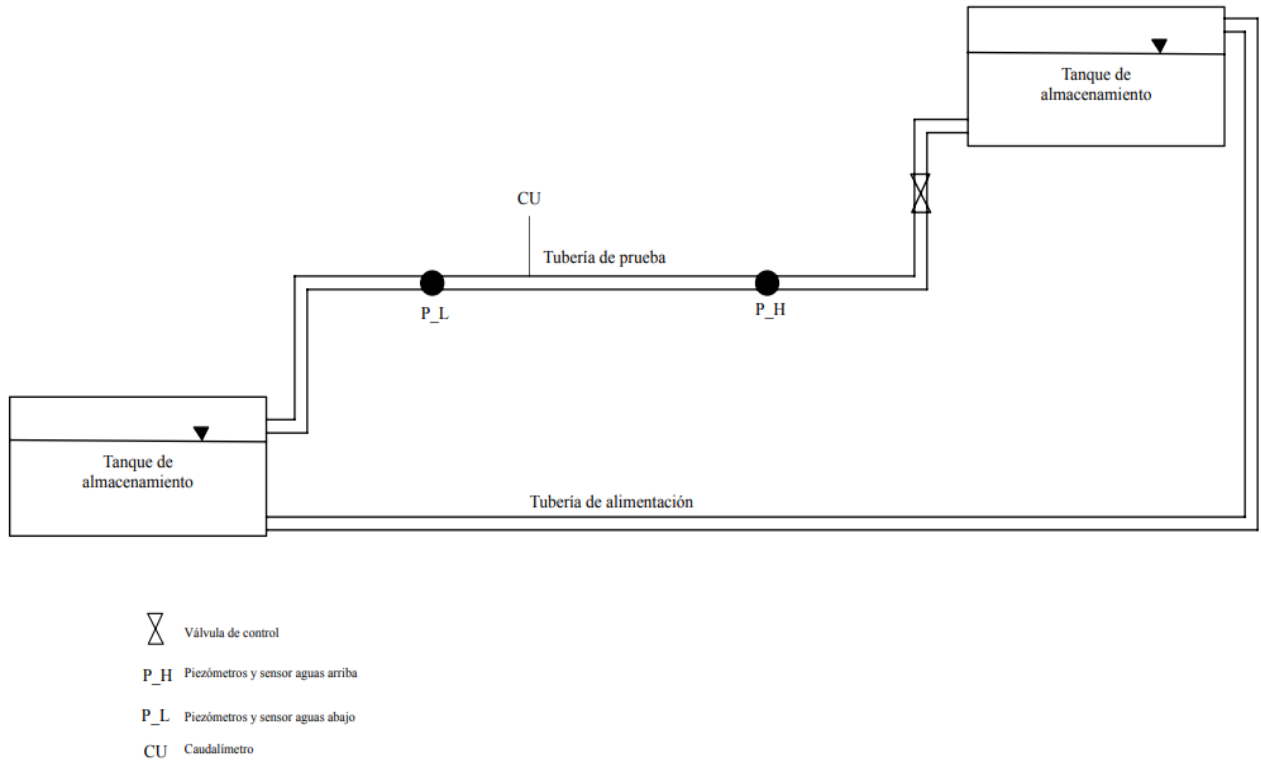


Figura 1. Esquema de montaje de prueba

Ambas pruebas realizadas en el estudio siguieron un procedimiento similar, diferenciándose únicamente en la adición de una unión en la tubería de mayor diámetro. Esto se debió a que dicha tubería se distribuye en tramos de 6 metros.

Inicialmente se realizó una prueba con una tubería de 63 mm de diámetro nominal la cual fue conectada entre las dos tuberías, alimentación y desagüe, de manera continua y sin la necesidad de usar uniones. Esta tubería presenta un diámetro interno de 53.6 mm y una longitud entre piezómetros de 6.75 m.

Por otro lado, la segunda parte de la evaluación de las tuberías de polietileno se realizó usando una tubería con un diámetro nominal de 160 mm, un diámetro interno de 127.2 mm y una longitud entre piezómetros de 8.23 m, para la conexión exitosa de esta tubería sí fue necesario el uso de una unión Garra de Tigre para unir los dos tramos de tubería de polietileno.

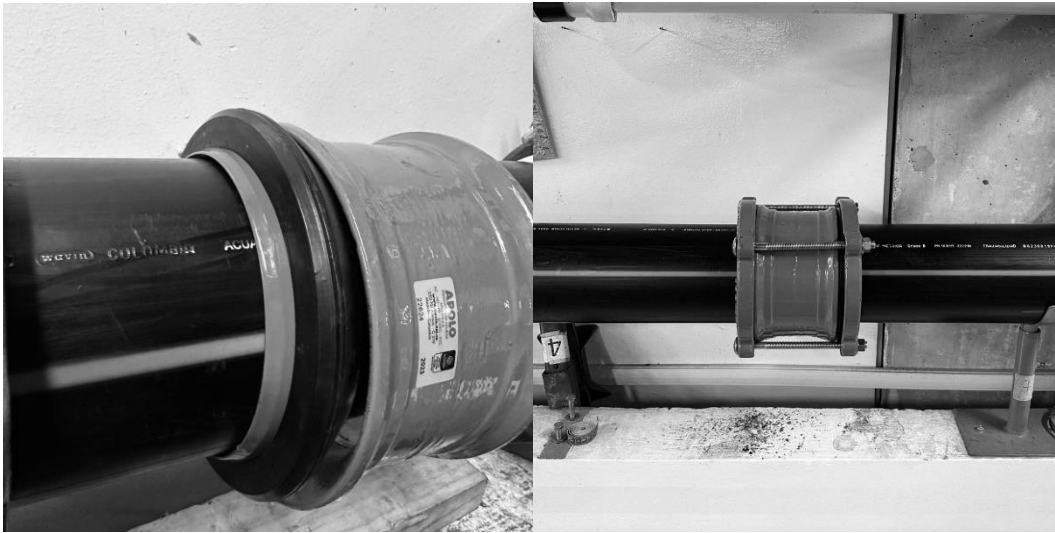


Figura 2. Unión garra de tigre para el montaje

La conexión a los piezómetros y al sensor diferencial se llevó a cabo mediante mangueras conectadas a la tubería. Se emplearon cuatro mangueras aguas arriba, las cuales se dirigieron a los dispositivos de pérdida de presión, y otras cuatro mangueras aguas abajo, también dirigidas a dichos dispositivos. Esto se hizo con el propósito de establecer la pérdida de energía entre ambos puntos. En cuanto a la determinación del caudal, se realizó mediante un caudalímetro no intrusivo, con el objetivo de no afectar de ninguna manera el flujo del agua a través de la tubería.

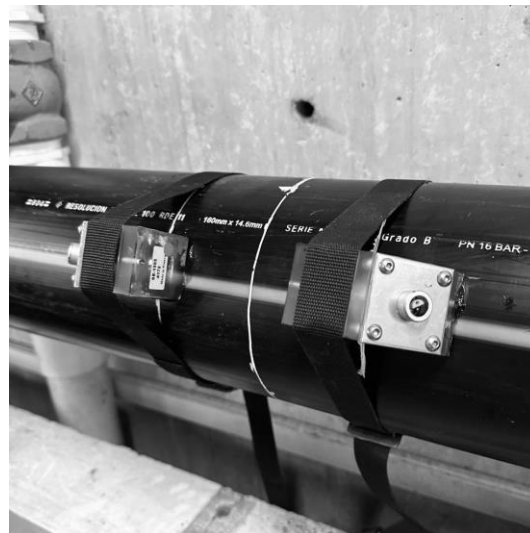


Figura 3. Ubicación de transductores para medición de caudal fluyendo

En el marco de la investigación, se llevarán a cabo mediciones de la pérdida de altura por fricción, posible gracias a la diferencia de alturas evidenciada en los piezómetros, junto con el valor

proporcionado por el sensor diferencial. Estos valores se representarán en un diagrama de Moody en función de los valores del número de Reynolds. De esta manera, se podrá observar la tendencia de los datos y determinar si se encuentran dentro de las zonas de flujo turbulento descritas por las ecuaciones teóricas que deberían regir este tipo de tuberías. Las mediciones se realizarán mediante los dispositivos de medición de pérdida de presión:



Figura 4. Aparatos de medición de pérdida de presión.

Por otro lado, de acuerdo con lo descrito anteriormente, en la investigación se va a realizar comparaciones con los resultados obtenidos anteriormente por los investigadores de la Universidad, estos estudios tuvieron las siguientes condiciones de tuberías:

- Tubería de polietileno de diámetro nominal de 63 mm e interno de 51.2 mm, una longitud de tubería de 10.3 m y una longitud entre piezómetros de 8.2, realizada por Eliana Naranjo
- Tubería de polietileno con diámetro nominal de 75 mm e interno de 65.4 mm, una longitud de tubería de 8.22 m, realizada por Eliana Naranjo
- Tubería de polietileno con diámetro nominal de 160 mm e interno de 139.9 mm, una longitud entre piezómetros de 82.6 m realizado por Daniel Hernández con apoyo de PAVCO-MEXICHAN

- Tubería de polietileno con diámetro nominal de 110 mm, una longitud de 74.9 m y una unión para conectar los dos tramos usados por el investigador Rafael Parada
- Tubería de polietileno con diámetro nominal de 63 mm e interno de 49.8 mm, una longitud de 6.76 m, realizada por Laura García
- Tubería de polietileno con diámetro nominal de 90 mm e interno de 72.4 mm, una longitud de 7.27, realizada por Laura García

Para evaluar el comportamiento de las pérdidas, se realiza una comparación inicial con la ecuación de Colebrook-White, previamente descrita. En esta comparación, se considera el comportamiento esperado para el flujo turbulento hidráulicamente liso y el flujo turbulento hidráulicamente rugoso. Estos comportamientos son representados por la Ecuación 4 y Ecuación 5, respectivamente:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{5.21}{Re\sqrt{f}} \right) \text{ Ecuación 4}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{56.6}{Re\sqrt{f}} \right) \text{ Ecuación 5}$$

Se espera que los resultados se alineen con la tendencia del flujo turbulento hidráulicamente liso (FTHL) de la ecuación de Colebrook-White, o al menos, que se encuentren dentro de los límites del flujo turbulento. Además, se empleará la ecuación de Prandtl von Kármán para el FTHL, la cual está descrita por la Ecuación 6:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \text{ Ecuación 6}$$

Además de la ecuación que describe el FTHR, la cual, bajo las consideraciones de Prandtl se expresa en la Ecuación 7:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{56.6}{3.7 d} \right) \text{ Ecuación 7}$$

En la comparación del comportamiento con las diferentes ecuaciones previamente presentadas, que tienen bases físicas, se realiza también un análisis utilizando una ecuación empírica. Esto se hace con el fin de comprender el comportamiento de las pruebas realizadas y evidenciar a cuál tendencia los resultados se acercan de manera más precisa. En este caso, se emplea la ecuación de Blasius, la cual se expresa en la Ecuación 8:

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \text{ Ecuación 8}$$

Además, es fundamental considerar parámetros como la densidad y la viscosidad, los cuales son funciones de la temperatura del agua en movimiento. Por esta razón, se emplean ecuaciones que posibilitan evaluar los cambios en la densidad y viscosidad, con el propósito de obtener resultados más precisos para las pérdidas de energía.

Primero, la determinación de la densidad se realiza a partir de la Ecuación 9.

$$\rho = \frac{999 + 17T - 8e^{-3}T^{-2} - 46e^{-6}T^3 + 105e^{-6}T^4 - 280e^{12}T^5}{1 + 16e^{-3}T} \text{ Ecuación 9}$$

Por otro lado, la determinación de la viscosidad es descrita por la Ecuación 10:

$$\nu = 4.7e^{-14}T^4 - 1.09e^{-11}T^3 + 1.04e^{-9}T^2 - 5.48e^{-8}T + 1.77e^{-6} \text{ Ecuación 10}$$

De esta manera es posible realizar los cálculos y con ellos la determinación de la tendencia del factor de fricción y las pérdidas por fricción al fluir por agua, es importante recalcar que en este estudio se realiza únicamente el estudio de las pérdidas por fricción, por lo que es necesario omitir las pérdidas menores, es por esto que se hallan estas pérdidas por medio de la Ecuación 11:

$$h_m = k_m \left(\frac{v^2}{2g} \right) \text{Ecuación 11}$$

Esto con el fin de considerarlas como parte de las pérdidas totales y poder separar las pérdidas por fricción cuando sea necesario. De acuerdo con el tipo de unión usada para la tubería de 160 mm, se asume un factor de pérdidas menores k_m de 0.01.

De acuerdo con esto, y como se mencionó anteriormente, se presentan los resultados compilados en un diagrama de Moody, este tipo de diagrama es una representación gráfica que incluye el factor de fricción, el número de Reynolds y la rugosidad relativa para un régimen de flujo en una tubería. El uso del también llamado cuadro de Moody permite determinar la caída de presión y las características de flujo en tuberías, permitiendo una estimación conveniente para el factor de fricción en flujos turbulentos. El uso del diagrama es de gran importancia para la determinación para el caso de tuberías presurizadas (Pimenta et al., 2018). El uso de este tipo de diagrama es valioso en el diseño de las tuberías para las redes de distribución pues permite conocer las posibles pérdidas que se van a generar al usar este tipo de material para tuberías, esto a partir de la precisión en la determinación de los valores del número de Reynolds y de la rugosidad relativa, lo que hace que sea aplicable a varios tipos de condiciones de flujo ("Agricultura irrigada no Brasil: ciência e tecnologia", 2022).

Resultados

Los resultados presentados en las tesis mencionadas anteriormente se ofrecen como una parte complementaria a la investigación. Esto se debe a la comparación de los resultados, que permite un análisis para comprender cómo se comporta el flujo del agua con diferentes diámetros y en diversas condiciones. A continuación, se resume lo obtenido por los tesisistas anteriores:

- Eliana Naranjo:

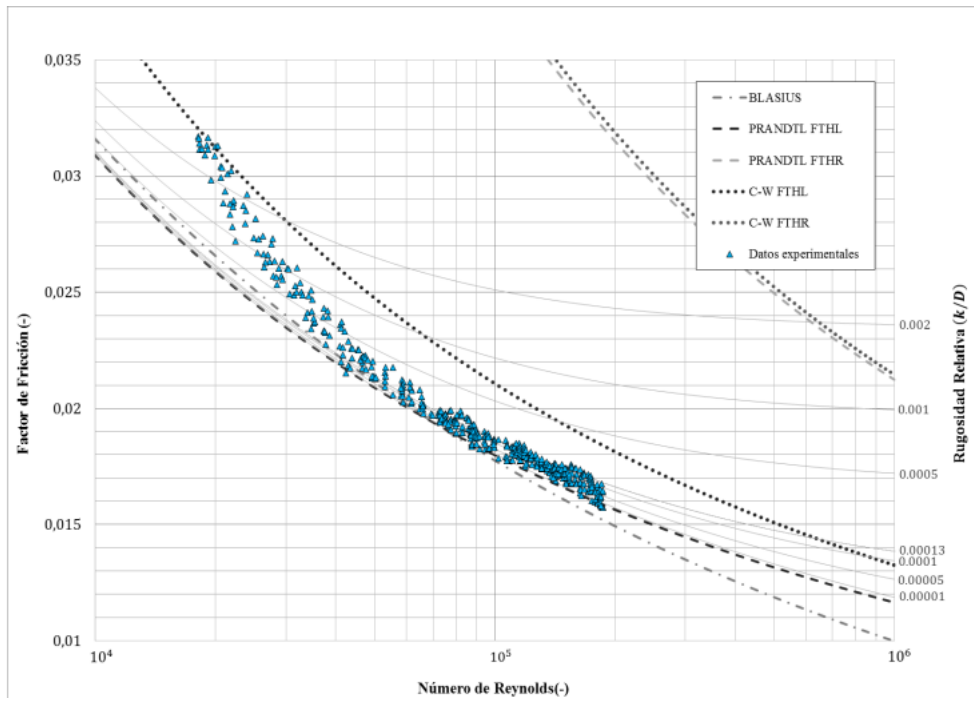


Figura 5. Resultados para tubería de 63 mm. Tomado de: Eliana Naranjo (

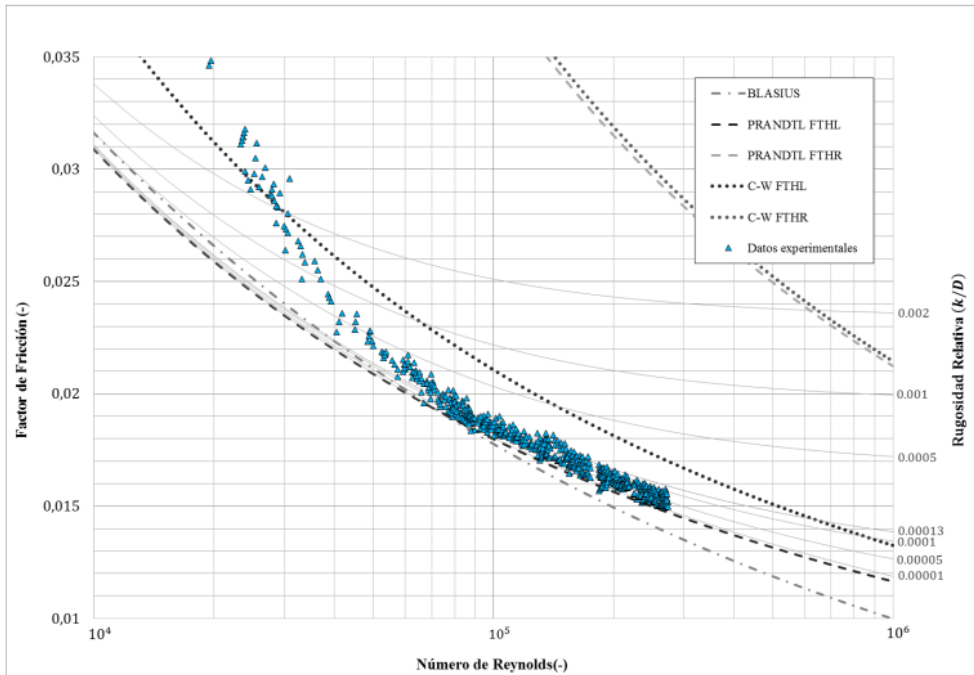


Figura 6. Resultados para tubería de 75 mm. Eliana Naranjo

○ Daniel Hernández:

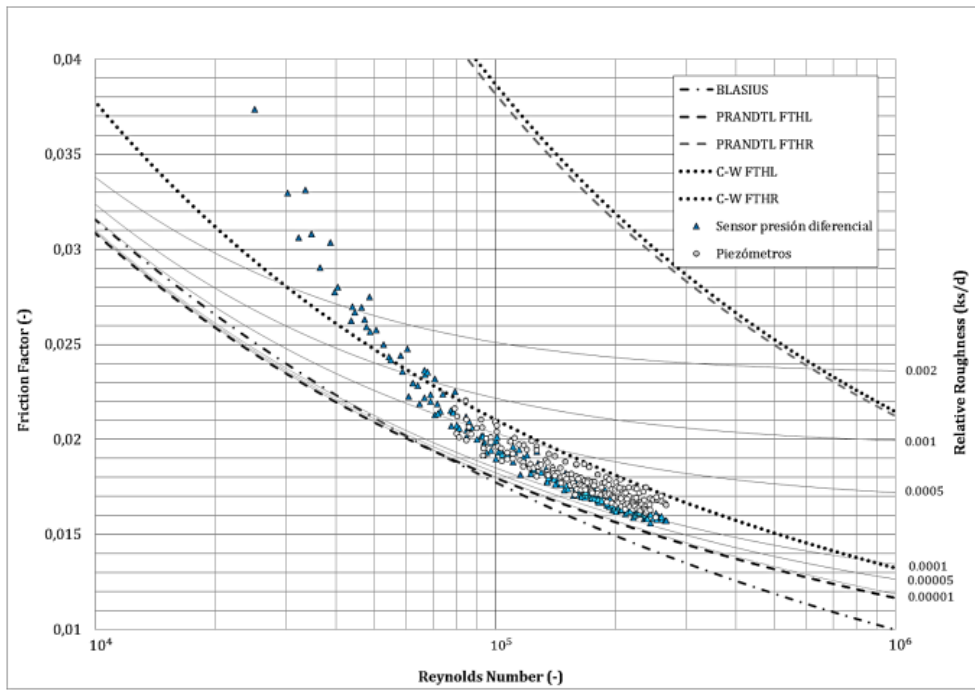


Figura 7. Resultados para tubería de 90 mm. Daniel Hernández

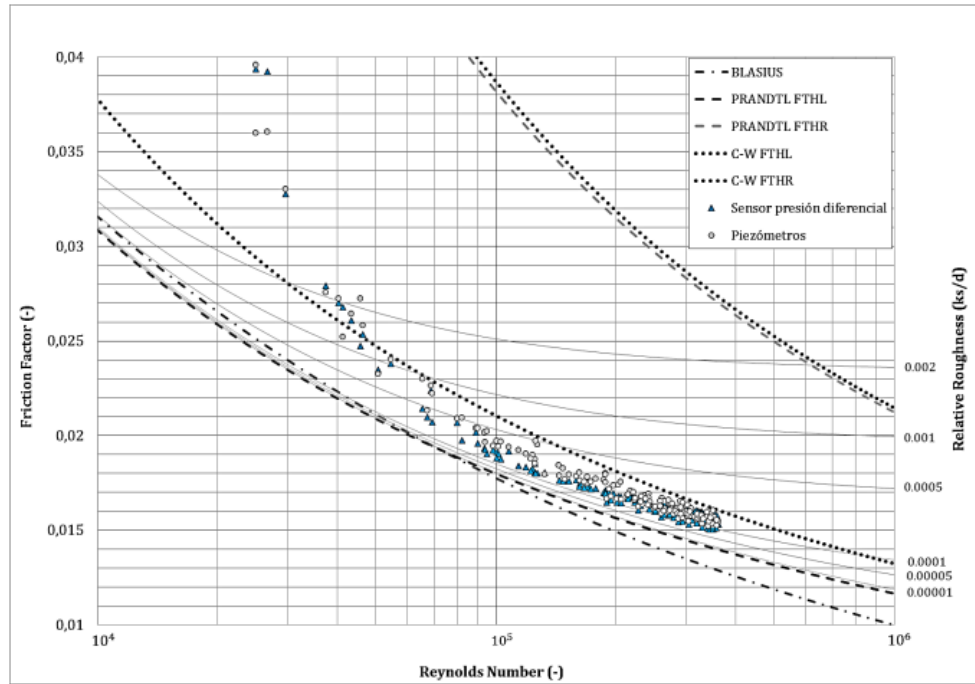


Figura 8. Resultados para tubería de 160 mm. Daniel Hernández

○ Rafael Parada

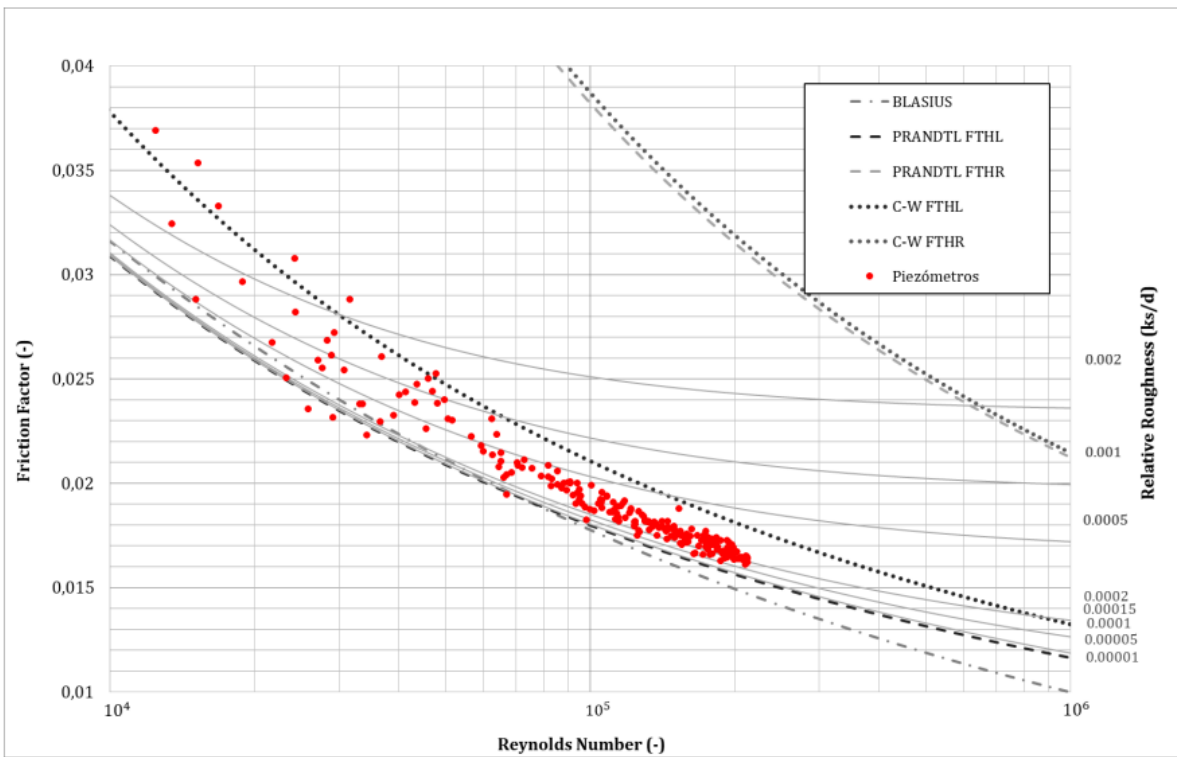


Figura 9. Resultados para tubería de 110 mm. Rafael Parada

○ Laura García:

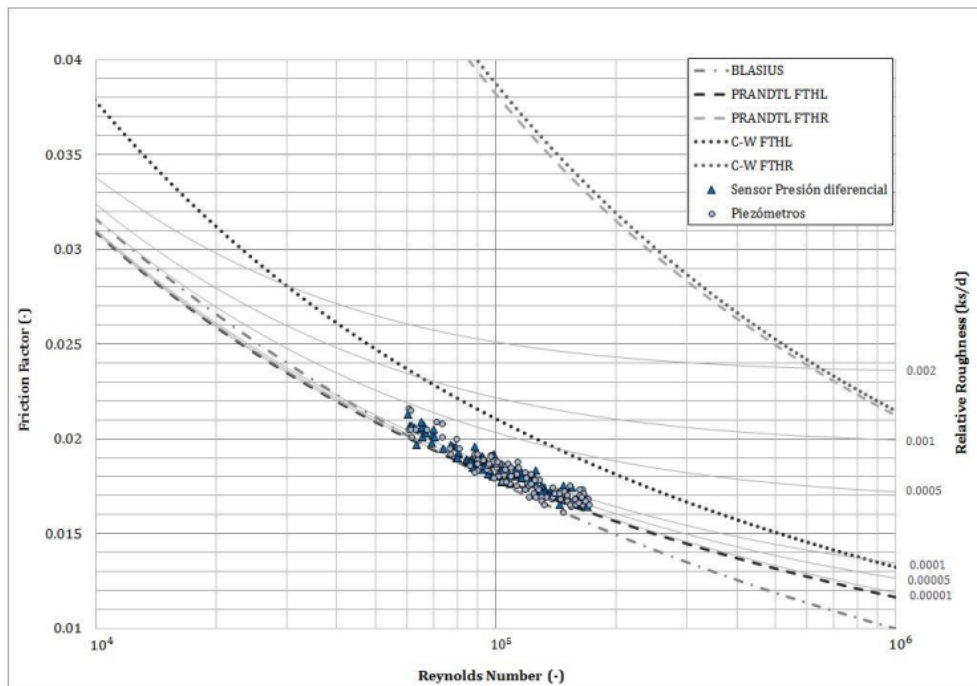


Figura 10. Resultados para tubería de 63 mm. Laura García

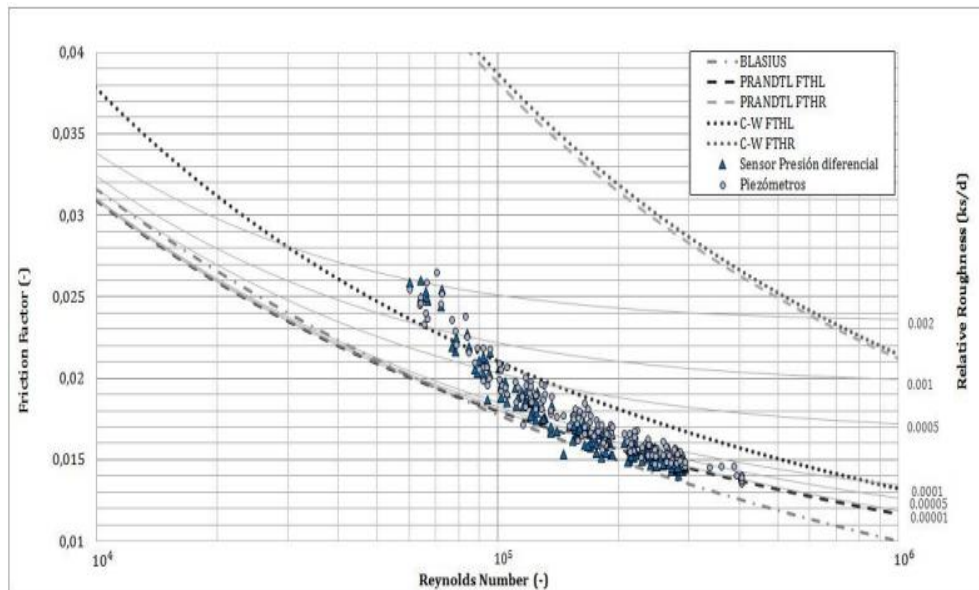


Figura 11. Resultados para tubería de 90 mm. Laura García

A continuación, a partir de las pruebas realizadas en el laboratorio de la Universidad, fue posible obtener los resultados, los cuales se organizan en un diagrama de Moody para evidenciar el comportamiento del factor de fricción en función del número de Reynolds.

Inicialmente, se obtienen los resultados de la tubería de 63 mm de diámetro nominal, para la cual se obtiene el diagrama presentado a continuación.

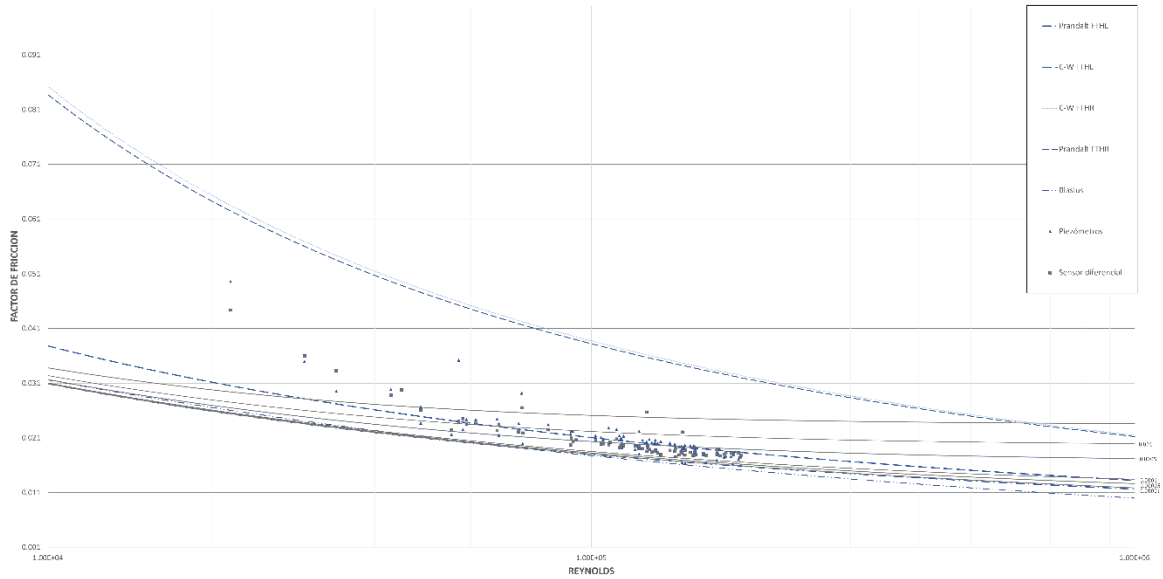


Figura 12. Resultados de flujo de tubería de 63 mm

Por otro lado, se presentan los resultados de la segunda tubería probada en el transcurso de esta investigación, la cual fue a la tubería de 160 mm nominales

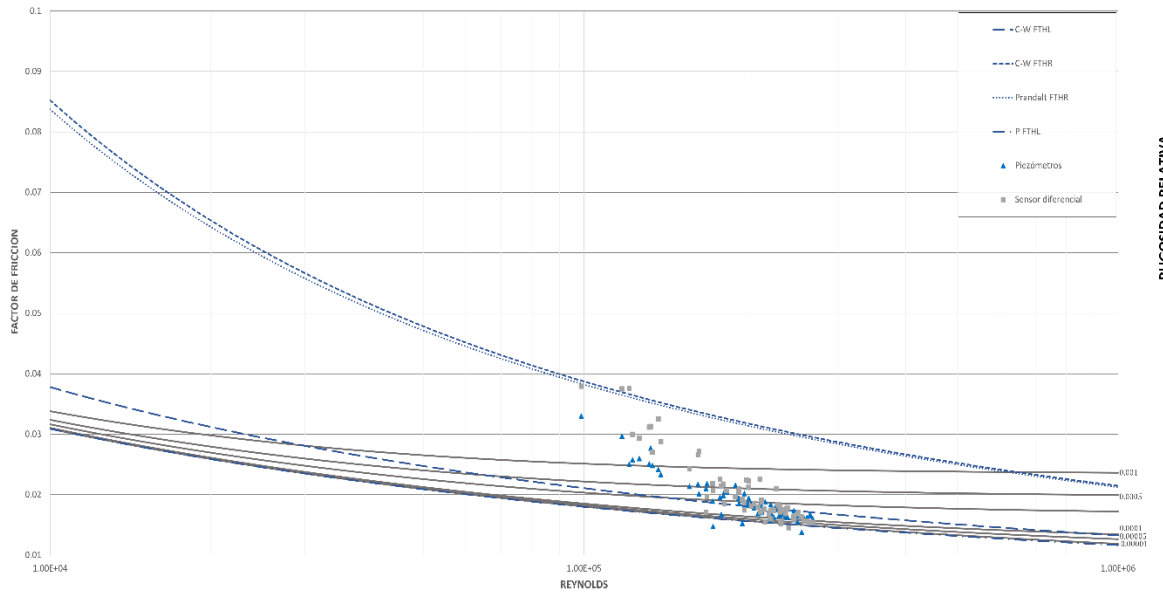


Figura 13. Resultados de tubería de 160 mm

Es importante destacar que se realizaron aproximaciones estadísticas a la tendencia de los puntos registrados en cada prueba. Esto se hizo con el fin de comprender el comportamiento del factor de fricción a medida que cambia el número de Reynolds.

Análisis de resultados

A partir de las pruebas realizadas en el laboratorio de la Universidad, se observa que para la tubería de 63 mm de diámetro nominal, el caudal más bajo que permitió cumplir con los requisitos para considerarse un flujo turbulento fue de 0.208 L/s, mientras que el caudal máximo que fluyó por la tubería alcanzó los 8.13 L/s.

Considerando la Figura 12. Resultados de flujo de tubería de 63 mm, se observa que, de acuerdo con el diagrama de Moody, los resultados se aproximan a lo descrito por la ecuación de Colebrook-White para el flujo turbulento hidráulicamente liso, especialmente en las proximidades de números de Reynolds cercanos a $1E05$. Sin embargo, al acercarse a números de Reynolds cercanos a $1E04$, la tendencia supera la línea que describe la ecuación de Blasius, incrementando el factor de fricción hasta sobrepasar los límites establecidos por las ecuaciones de flujo turbulento hidráulicamente rugoso.

Teniendo en cuenta el valor proporcionado por el manual técnico de PAVCO, que establece una rugosidad correspondiente a $k_s = 0.007$ mm para altos caudales, se puede determinar la rugosidad relativa como $k_s/d = 0.000098$. Observando la Figura 12. Resultados de flujo de tubería de 63 mm, se evidencia que, a números de Reynolds más grandes, el factor de fricción se acerca a un valor de rugosidad similar al teórico, rozando la tendencia de la rugosidad relativa de 0.00001 mm.

Con respecto a los resultados obtenidos para la tubería de 160 mm de diámetro nominal, que se presentan en la Figura 13. Resultados de tubería de 160 mm, se realizaron pruebas en un intervalo de temperaturas comprendido entre 18 y 22 °C. En cuanto a los caudales, se observa que el caudal

más bajo registrado fue de 4.684 L/s, mientras que el caudal más alto alcanzó los 27.72 L/s. Es relevante señalar que el diámetro interno de la tubería es de 127.23 mm. Además, es necesario tener en cuenta que el montaje de esta tubería se llevó a cabo mediante dos tramos de 160 mm de diámetro nominal, conectados por una unión universal con un acople de garra de tigre para garantizar la continuidad. Este tipo de unión se considera no intrusiva, y al ser externa, permite unas pérdidas menores por unión más bajas en comparación con el caso de una unión intrusiva.

Según lo presentado en el diagrama de Moody, se puede observar cómo la tendencia de los datos mantiene un comportamiento similar a la teoría y a lo expuesto anteriormente para el caso de la tubería previa. En este caso, los resultados se acercan a la tendencia descrita por la ecuación de Prandtl para el flujo turbulento hidráulicamente liso a medida que aumenta el número de Reynolds, especialmente para los resultados con números de Reynolds cercanos a los $2E05$. Sin embargo, a medida que los resultados se aproximan a valores de Reynolds de $1E05$, el factor de fricción aumenta drásticamente. Este comportamiento de los datos es similar al de la tubería anterior, pero con una mayor rapidez en el crecimiento de este factor, posiblemente debido a alguna fuga o pérdida de presión que pudo haber ocurrido en el montaje.

En este caso, al igual que en el caso anterior, se observa un comportamiento similar a las líneas de tendencia teóricas, pero con ciertas diferencias. No obstante, los resultados obtenidos para este caso pueden describirse mediante líneas de tendencia que se asemejan al comportamiento de cada uno de los datos registrados.

De manera similar a la tubería de 63 mm, se evidencia que esta tubería sigue las ecuaciones de flujo teóricas para materiales plásticos. Esto sugiere la posibilidad de realizar un diseño con estas tuberías de manera similar a como se hace actualmente con las tuberías de PVC. Este hallazgo abre la puerta a considerar este material como una alternativa viable para las redes de distribución de agua potable.

De manera similar a los resultados presentados para los casos de las tuberías ensayadas en esta investigación, los resultados de investigaciones anteriores también muestran la misma tendencia. Se observa cómo el factor de fricción se describe mediante ecuaciones físicamente basadas. Por ejemplo, al analizar la Figura 7. Resultados para tubería de 90 mm. Daniel Hernández y la Figura 8. Resultados para tubería de 160 mm. Daniel Hernández se puede apreciar que los resultados obtenidos se asemejan a la tendencia descrita por Colebrook-White, ya que su comportamiento se describe de manera más precisa teniendo en cuenta esta ecuación.

Por otro lado, al examinar los resultados de los investigadores anteriores, se nota que estos se asemejan más a la tendencia descrita por Prandtl para el flujo turbulento hidráulicamente liso. Además de la tendencia del factor de fricción, se evidencia cómo, en todos los resultados presentados, la disminución de la rugosidad tiende a valores cercanos a 0.00001 mm a medida que aumenta el número de Reynolds. Esto confirma que esta tendencia se mantiene para estas tuberías, respaldando su posible uso como material plástico y la viabilidad de diseñarlas bajo estas mismas consideraciones de material.

Conclusiones

De acuerdo con lo evidenciado a partir de los resultados de la investigación, es posible afirmar que es posible usar diferentes tipos de materiales plásticos en las redes de distribución de agua potable, esto con el fin de buscar un material que se alinee con los diferentes objetivos locales y globales en temas de sostenibilidad y desarrollo, pero que permita un entendimiento del comportamiento del flujo a través del material. Para el caso del estudio, se logra evidenciar que el polietileno de alta densidad cumple con los objetivos de flujo, por lo que puede ser implementado de manera sencilla dentro de las diferentes aplicaciones de RDAP.

El diseño de redes al usar polietileno es sencillo pues este diseño se debe basar en el concepto de pérdidas por fricción tal cual como se realiza con el PVC, pues ambos son materiales plásticos cuya tendencia en el cambio del factor de fricción se realiza en función del número de Reynolds, teniendo esto en cuenta, el uso del material de polietileno de alta densidad no es una complicación,

por el contrario, puede ser relacionado fácilmente con las ecuaciones de Colebrook para muy altos números de Reynolds y con la ecuación de Prandtl a medida que este empieza a disminuir. Es importante la determinación de la factibilidad del uso de este material pues al ganar popularidad su disponibilidad es mayor dentro del mercado.

Por otro lado, es importante notar la importancia de las pérdidas menores por parte de la rugosidad dentro del flujo, pues estas pérdidas no son significativas cuando el flujo es muy bajo, entonces estas no se deben tener en cuenta dentro del diseño de las redes, es por eso que este estudio se enfoca en las pérdidas por fricción, teniendo como resultado la afirmación

Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos y las afirmaciones derivadas del estudio, se concluye que es factible emplear el material en cuestión en las redes de distribución de agua potable. No obstante, se sugiere llevar a cabo un análisis de la vida útil de este material en comparación con la vida útil del PVC, con el propósito de determinar cuál de estos materiales resulta más apropiado para su utilización en esta aplicación específica.

Adicionalmente, se recomienda realizar un estudio detallado acerca de la facilidad y viabilidad del reciclaje de ambos materiales, con el objetivo de comparar las posibilidades de reciclaje de cada uno. Todos estos estudios se presentan como imperativos para llevar a cabo un análisis exhaustivo del material y evaluar su potencial para mejorar la sostenibilidad en estos usos específicos.

Referencias

Agricultura irrigada no brasil: ciência e tecnologia. (2022)
<https://doi.org/10.11606/9786587391236>

Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G., & Pumo, D. (1995). Experimental Study on Flow Resistance Law for Small-Diameter Plastic Pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.

Dear, J. and Nicholas, M. (2006). Effect of chlorine on polyethylene pipes in water distribution networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design and Applications*, 220(3), 97-111. <https://doi.org/10.1243/14644207jmda88>

Diogo, A. F., & Vileta, F. A. (2014). Head Losses and friction factors os steady turbulent flows in plastic pipes. *Urban Water Journal*. doi:10.1080/1573062X.2013.768682

García Romero, L. (2022). Flujo turbulento hidráulicamente liso en tuberías de polietileno en sistemas de distribución de agua potable. Universidad de los Andes.

Hernández Murcia, D. A. (2018) Modelación física del flujo turbulento hidráulicamente liso en tuberías largas de polietileno. Universidad de los Andes.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento. (Resolución 0330 de 2017)

Naranjo, E. A. (2018). Modelación Física del Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso en Tuberías Largas de Polietileno. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.

Parada Hernández, J. (2018). Modelación física del flujo turbulento hidráulicamente liso en tuberías largas de polietileno. Universidad de los Andes.

Paraqueima, J. R. (1977). Study of some frictional characteristics of small diameter tubing for trickle irrigation laterals. Thesis (MSc). Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University.

Pimenta, B., Robaina, A., Mezzomo, W., Kirchner, J., & Ben, L. (2018). Performance of explicit approximations of the coefficient of head loss for pressurized conduits. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, 22(5), 301-307. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p301-307>

Shaikh, M., Hanafiah, M., & Basheer, A. (2019). Leaching of organic toxic compounds from pvc water pipes in medina al-munawarah, kingdom of saudi arabia. *Processes*, 7(10), 641. <https://doi.org/10.3390/pr7100641>