

DOI: 10.24850/j-tyca-2019-05-08

Artículos

Incidencia de la presión sobre el coeficiente de rugosidad C de Hazen-Williams

Incidence of the pressure on roughness coefficient C of Hazen-Williams

Freddy Gavilánez-Luna¹

¹Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador, fgavilanez@uagraria.edu.ec, ORCID ID: 0000-0002-7861-514X

Autor para correspondencia: Freddy Gavilánez-Luna, fgavilanez@uagraria.edu.ec

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la incidencia de la presión en el coeficiente C de rozamiento utilizado en la expresión de Hazen-Williams, como argumento para definir los diámetros que permitan reducir los costos en las instalaciones que utilizan tuberías plásticas presurizadas. Para este propósito se evaluaron 10 presiones de prueba, utilizando 88 m de manguera de polietileno, dos manómetros de glicerina, un aspersor de mediano caudal y una bomba con turbina centrífuga de tres pulgadas. Se evaluaron las pérdidas de carga con cada presión por triplicado, con la debida corrección altimétrica de la superficie y los caudales respectivos producidos en el aspersor. Con la información experimental obtenida se calculó el coeficiente C , empleando para ello la expresión de Hazen-Williams despejada para este coeficiente. Con los datos de carga y del valor de C se estableció un modelo de regresión, determinando su bondad a través del respectivo coeficiente de determinación (r^2). Al verificar los resultados se pudo establecer que el coeficiente C se afecta por la presión mediante una relación de tipo cuadrática, incrementándose conforme aumenta la carga y manteniendo más o menos la misma pérdida de energía en cada una de las presiones de ensayo. Este resultado permitió concluir que en tuberías lisas como las plásticas es posible considerar valores del coeficiente C arriba de los 150 indicados para el plástico, lo que en

consecuencia hace posible disminuir los costos de los sistemas de tuberías presurizadas.

Palabras clave: coeficiente de rozamiento, flujo turbulento, Hazen-Williams, número de Reynolds, pérdida de energía.

Abstract

The objective of this research was to evaluate the incidence of pressure in the friction coefficient C used in the Hazen - Williams expression, as an argument to define the diameters to reduce costs in installations using pressurized plastic pipes. For this purpose, 10 test pressures were evaluated, using 88 m polyethylene hose, two glycerin manometers, a medium flow sprinkler and a three-inch centrifugal turbine pump. The load losses were evaluated with each pressure in triplicate, with the appropriate altimetric correction of the surface, and the respective flows produced in the sprinkler. With the experimental information obtained the coefficient C was calculated, using the expression of Hazen - Williams cleared for this coefficient. With the load data and the C value, a regression model was established, determining its goodness through the respective coefficient of determination (r^2). When verifying the results it was possible to establish that the coefficient C is affected by the pressure by means of a quadratic type relation, increasing as the load increases; and maintaining more or less the same loss of energy at each of the test pressures. This result allowed to conclude that for smooth pipes such as plastic, it is possible to consider coefficient C values above 150 indicated for plastic; which consequently reduces the costs of pressurized piping systems.

Keywords: Coefficient of friction, turbulent flow, Hazen - Williams, Reynolds number, energy loss.

Recibido: 08/08/2017

Aceptado: 20/03/2019

Introducción

Para el riego presurizado de cultivos o para las instalaciones de agua potable se utiliza toda una serie de tuberías, que en el contexto completo de la instalación generan los costos más importantes de todo el sistema; la proporción como mínimo debe ser de un 60%. En este sentido, el diseño o dimensionado de diámetros juega un papel importante para que la instalación no se sobredimensione o subdimensione. Cuando el diseño sobredimensiona la instalación ocasiona importantes costos en las tuberías, por el hecho de que se tendrán diámetros más allá de los técnicamente necesarios; no obstante, cuando los diámetros son subdimensionados, los requerimientos en cuanto a equipos de bombeo y costos de operación por los consumos energéticos se incrementan. De allí la necesidad de utilizar las fórmulas de cálculos hidráulicos para el diseño de tuberías, junto con sus parámetros, adecuados para determinada realidad.

Si bien para el diseño de instalaciones de conducción de agua presurizada existe una expresión como la de Darcy-Weisbach, fundamentada en la física clásica, la cual proporciona una base racional para el análisis y el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías (Saldarriaga, 2007), su uso en la práctica no es preferencial, debido a lo tedioso que pudiera resultar el cálculo de uno de sus parámetros conocido como coeficiente de fricción f utilizando la fórmula más adecuada, pero de característica implícita; esta situación induce a que se recurra a un proceso de iteraciones matemáticas, como el de Newton-Raphson, lo cual añade cierta complejidad en los cálculos.

Sin embargo, para determinar el coeficiente de fricción f existen varias alternativas propuestas por diversos autores que toman en consideración la rugosidad de la tubería y el tipo de flujo existente. En el caso de flujo laminar, este coeficiente tiene una dependencia exclusiva del valor del número de Reynolds, en donde la predominancia del cortante viscoso es importante según la ley de Hagen-Poiseuille (Luszczewski, 2004); no obstante, la problemática de tener expresiones en los rangos de flujo transicional a turbulento acertadas es lo que ha dado origen para que varios autores hayan hecho diversas propuestas al respecto. De allí que la expresión de Colebrook-White, además de estar en función del número de Reynolds, incluye también las diversas rugosidades de tuberías que la definen como una de las más empleadas y aceptadas para utilizarse en la fórmula de Darcy-Weisbach (Giles, Evett, & Liu, 1994); Anaya,

Cauich, Funabazama, & Gracia, 2014), aunque también es de característica implícita.

En contraposición al proceso tedioso de recurrir a procedimientos matemáticos de las iteraciones sucesivas para la determinación del coeficiente de fricción f de expresiones implícitas, como la de Colebrook-White, y que parcialmente pueden ser solucionados cuando se usan computadoras, en el año 1902 se propuso una de las fórmulas empíricas más difundidas y aceptadas en el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías hasta los actuales momentos, debido justamente a la gran cantidad de información existente respecto de su uso, conocida como la ecuación de Hazen-Williams (Méndez, 2007). Dada la característica empírica de esta fórmula, cuyo planteamiento se realizó para apresurar el diseño de tuberías de agua potable en EUA a inicios del año 1900, dejando de lado la expresión de Darcy-Weisbach, su uso tiene restricciones exclusivas en cuanto a su aplicación, debiendo utilizarse sólo para agua a temperatura ambiente, en diámetros arriba de los 50 mm y velocidades de flujo menores a los 3 m/s (Mott, 2006).

A pesar de que la expresión de Hazen-Williams es la que de forma mayoritaria se utiliza en el diseño de tuberías por su facilidad de cálculo y amplia aceptación entre los técnicos, su fundamento empírico hace que uno de sus componentes se defina prácticamente de forma subjetiva, el cual se selecciona con base en la rugosidad de las paredes internas de las tuberías. Este parámetro se conoce como coeficiente C de Hazen-Williams y fue establecido para condiciones extremas de alta y media rugosidad, así como para paredes lisas, adoptando valores de 50, 100 y 150, respectivamente. No obstante, estas condiciones límites no permiten considerar la influencia de la presión y, por consiguiente, la velocidad del flujo sobre el verdadero valor de este coeficiente. En este sentido, la selección de valores del coeficiente de rugosidad C para utilizarse en la fórmula de Hazen-Williams es una decisión de gran incertidumbre, que se adopta de forma consuetudinaria y con una alta probabilidad de tener un sobredimensionamiento del diámetro de las tuberías. Esta decisión, a la postre, se convierte en una limitación de tipo económica cuando se desean implementar, por ejemplo, sistemas de riego como los de aspersión, cuya demanda de presión es relativamente importante.

Ante el dilema de seleccionar coeficientes C económicamente adecuados se suma la poca o nula información que existe al respecto sobre la afectación que tiene este coeficiente por la presión de operación de un sistema de tuberías, adoptándose valores fijos,

publicados en la literatura para cualquier condición de flujo y que sólo son diferentes por los distintos materiales con que se elaboran las tuberías comerciales.

El requerimiento de tuberías plásticas, como las de policloruro de vinilo (PVC) o las de polietileno (PE) para el diseño e instalación de los sistemas de riego presurizados, en los últimos tiempos se han incrementado de modo sustancial al adquirir sistemas de riego mucho más eficientes en el manejo del agua. Sin embargo, esta necesidad se hace cada vez más intensa por los problemas de escasez de agua dulce, pero que en el nivel de pequeños agricultores la implementación de sistemas de riego que permitan un manejo más optimizado del agua queda restringido por cuestiones de tipo económico.

La situación indicada en el párrafo precedente es una realidad para el Ecuador, donde aproximadamente la eficiencia de aplicación de los sistemas de riego llega a un 61%, creando esa necesidad imperiosa de utilizar infraestructuras eficientes en el manejo del agua de riego debido a la escasez de este recurso, y a la demanda globalizada de mejorar la rentabilidad agrícola, cuya única alternativa reside en los sistemas presurizados y en donde las tuberías juegan un papel de enorme importancia. Empero, dada las restricciones económicas, en especial para el pequeño agricultor, esta situación ha incidido para que en el país apenas se haya tenido en el año 2000 un 22.2% de cobertura del total de área cultivada con riego presurizado y que en los últimos años se haya registrado un insignificante incremento medio de un 5.7% en dicha cobertura (MAGAP, 2013).

Ante lo detallado en los párrafos anteriores se desarrolló este estudio, cuyo propósito fue evaluar la incidencia de la presión sobre el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, contabilizando las pérdidas de carga al aplicar diez presiones de trabajo, y verificando el comportamiento o tendencia de la magnitud del valor de este coeficiente. Estudio que se llevó a cabo para corroborar el criterio de que el coeficiente de rugosidad C , en el caso de tuberías de material plástico como el PVC, puede tener valores arriba de 150, con lo cual es posible abaratar los costos de las instalaciones de riego presurizado al seleccionarse, de acuerdo con el diseño, tuberías de menor diámetro.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en el campus de la Universidad Agraria del Ecuador, ubicada en las coordenadas geográficas de 02° 07' 56" S y 79° 35' 02" O. Se planteó bajo una concepción experimental, evaluando las pérdidas de carga producidas por el efecto de 10 presiones de trabajo iniciales que se encuentran indicadas en la segunda columna de la Tabla 1.

Tabla 1. Presiones de prueba y pérdidas de carga producidas.

Núm.	Presión inicial (kPa)	Presión final (kPa)	Pérdidas de carga (m)	Diferencia de cotas (m)	Pérdidas de carga corregidas (m)
1	137.299	128.117	0.937	0.05	0.887
2	179.088	167.606	1.171	0.05	1.121
3	206.179	193.091	1.335	0.05	1.285
4	245.213	230.059	1.546	0.05	1.496
5	275.747	267.482	0.843	0.05	0.793
6	310.187	298.939	1.147	0.05	1.097
7	345.316	336.596	0.889	0.05	0.839
8	376.085	363.914	1.241	0.05	1.191
9	415.119	409.147	0.609	0.05	0.559
10	443.126	436.699	0.656	0.05	0.606

Para la prueba se utilizó un aspersor de doble boquilla, cuyo diámetro a la salida de la tobera principal fue de 7.94 mm y la secundaria de 3.97 mm, con un caudal de operación, según su catálogo, de 4.44 a 6.29 m³/h, y un diámetro de alcance máximo de 47.3 m. El conducto que se empleó para la medición del efecto de la fricción en la reducción de energía hidráulica fue una manguera de polietileno de alta densidad, con diámetro interno de 54.8 mm y 88.0 m de longitud. Cabe indicar que el propósito de utilizar manguera y no tubería fue para evitar las pérdidas de carga que se producen en las juntas de estas últimas, lo cual complicaría la definición de tener las pérdidas de carga exclusivas de la fricción.

También se utilizaron dos manómetros de glicerina en unidades de lb/pulg², cuyas lecturas fueron transformadas a kPa, utilizando la constante de 6.888. Uno de estos manómetros se instaló al inicio del recorrido y el otro al final de los 88.0 m de longitud de la manguera, con la calibración previa de que estos dos medidores de presión estuvieran funcionando de forma similar. Aunque la superficie sobre la cual se ubicó la manguera era relativamente plana, para tener la debida precisión se realizaron las correcciones respectivas por las diferencias de cotas entre el punto inicial y el final, para lo cual se empleó un nivel. Asimismo, la presión estuvo suministrada por una bomba de combustión interna, con turbina centrífuga de 10 HP de potencia, de tres pulgadas en la succión y en la descarga, y con un caudal máximo aproximado de 20 m³/h. Para el ajuste de las presiones de prueba se utilizó una válvula de bola.

El procedimiento consistió en medir el caudal en cada presión de ensayo y la respectiva pérdida de carga dada por las lecturas en los manómetros, procedimiento que se realizó tres veces por cada una de las presiones de prueba. Por último, el valor del coeficiente de rugosidad C de Hazen-Williams se estableció utilizando la expresión (1), que es la propuesta de estos autores, pero definida en unidades métricas y desde la cual se ha despejado dicho coeficiente. En esta fórmula, Q representa el caudal en m³/h; h_f es la pérdida de carga por fricción en m; L es la longitud de la tubería en m, y d es el diámetro interno de la tubería en mm:

$$C = \left(\frac{1.131 \times 10^9 \times Q^{1.852} \times L}{h_f \times d^{4.87}} \right)^{1/1.852} \quad (1)$$

Con los datos obtenidos se ajustó un modelo de regresión para verificar la tendencia, determinando al mismo tiempo la magnitud del ajuste mediante el coeficiente de determinación respectivo.

Resultados y discusión

Las pérdidas de carga obtenidas en cada presión de ensayo registraron un rango que fue de 0.559 a 1.496 m, según se observa en la Tabla 1, no evidenciándose ningún comportamiento funcional debido a que no se obtuvo un modelo matemático con un ajuste importante entre estas dos variables. Es preciso indicar que dichas pérdidas fueron corregidas por la diferencia de cotas entre el punto inicial y el final, en una altura de 0.05 m, la cual fue sustraída de la pérdida registrada por los manómetros debido a que la cota final fue superior, en dicha magnitud, a la inicial.

Haciendo uso de la expresión (1), para un diámetro y longitud constantes, además de considerar las pérdidas de carga de la Tabla 1, se determinaron los coeficientes de fricción C que se indican en la Tabla 2. Se observa que el valor de este coeficiente se presenta con un rango importante, al variar de 117.5 a 262.4, para caudales que estuvieron entre un mínimo de 4.738 m³/h a un máximo de 8.615 m³/h, respectivamente.

Tabla 2. Valores experimentales del coeficiente de rugosidad C de Hazen-Williams para cada presión de prueba.

Núm.	Caudales medidos (m ³ /h)	Longitud (m)	Diámetro interno (mm)	Pérdida de carga (m)	Coficiente C de Hazen-Williams	Número de Reynolds R
1	4.738	88.0	54.8	0.887	117.5	30 366
2	5.384	88.0	54.8	1.121	117.6	34 507
3	5.818	88.0	54.8	1.285	118.1	37 288
4	6.562	88.0	54.8	1.496	122.7	42 057
5	6.818	88.0	54.8	0.793	179.5	43 697
6	7.330	88.0	54.8	1.097	162.0	46 979
7	8.000	88.0	54.8	0.839	204.3	51 273
8	8.411	88.0	54.8	1.191	177.8	53 907
9	8.772	88.0	54.8	0.559	279.0	56 221
10	8.615	88.0	54.8	0.606	262.4	55 214

Se debe resaltar, al comparar los caudales con las pérdidas de carga obtenidas experimentalmente, indicadas en la Tabla 2, la no concordancia con lo que se establece matemáticamente en la expresión de Darcy-Weisbach, que en el criterio de Trueba (1965) se dice que: "para un diámetro constante, la pérdida de carga es

proporcional al cuadrado del gasto (o de la velocidad); es decir, si el caudal aumenta al doble, la pérdida de carga por fricción será cuatro veces mayor”, situación que tampoco se ajusta a la concepción de las fórmulas empíricas, como la de Hazen-Williams, donde la pérdida de carga por fricción tiene también una relación de proporcionalidad directa con el caudal a distintos exponentes.

No obstante, considerando la propuesta de Colebrook y White (1937) sobre el coeficiente de fricción f para la expresión de Darcy-Weisbach, concebida para aplicarse desde la zona de transición entre los flujos laminar y turbulento, y en todos los flujos turbulentos hidráulicamente lisos e hidráulicamente rugosos (Saldarriaga, 2007), que utiliza los criterios de Nikuradse de rugosidades artificiales, se definió una función que incluya los efectos de la rugosidad relativa y el número de Reynolds (Streeter, Wylie, & Bedford, 2000). Por lo tanto, dado que en este ensayo se tuvieron en todos los casos de prueba flujos turbulentos ($R > 4\ 000$) (Tabla 2), el componente de la rugosidad en la pérdida de carga tiende a una disminución; de hecho, esto es visible al tener un valor de C que disminuye al aumentar la velocidad o el caudal del flujo. Esta baja del coeficiente C a medida que se incrementa la presión en una tubería de diámetro constante no ha permitido que se cumpla el criterio de que la pérdida de carga tenga cierta proporcionalidad con la velocidad del flujo en rangos de potencia de 1.75 a 2.00 (Tarjuelo, 1999); más bien, tal como puede apreciarse en la Tabla 1 y Tabla 2, dicha pérdida experimentó cierta disminución cada vez que la presión se incrementaba.

Al relacionar la carga o presión inicial de prueba con los valores del coeficiente de rugosidad C obtenidos, se puede verificar que estos parámetros se ajustan a una función cuadrática de forma importante, según el coeficiente de determinación establecido ($r^2 = 0.8819$), tal como puede observarse en la Figura 1. De acuerdo con los resultados, el valor del coeficiente C tiene una dependencia con la presión y , por consiguiente, con el tipo de flujo (Saldarriaga, 2007), ya que a valores del número de Reynolds de 30 366, el valor de C fue de 117.5; mientras que a valores de 55 214, el valor de C se incrementó hasta 262.4 (Tabla 2). Esto es, el coeficiente C se incrementa conforme aumenta el número de Reynolds, lo que se contrapone a lo manifestado por Streeter *et al.* (2000), quienes indican que C debe reducirse a medida que el número de Reynolds aumenta para un diámetro dado.

Para un diámetro constante, en tuberías lisas como las de plástico, el coeficiente C de Hazen-Williams indica una menor influencia de la

rugosidad cada vez que la presión (también el caudal o la velocidad) se incrementa; de allí que utilizar valores de 150 para plástico puede resultar en una sobreestimación en el dimensionado de tuberías. De hecho, si se considera que la función indicada en la Figura 1 establecida para un valor y (coeficiente C) de 150, la carga para obtener dicho valor debe ser de 28 m (274.4 kPa), lo que para el caso de sistemas de riego como los de aspersión, cuyos requerimientos de presión van más allá de los 300 kPa, pueden resultar en un encarecimiento de la instalación al tener tuberías sobredimensionadas.

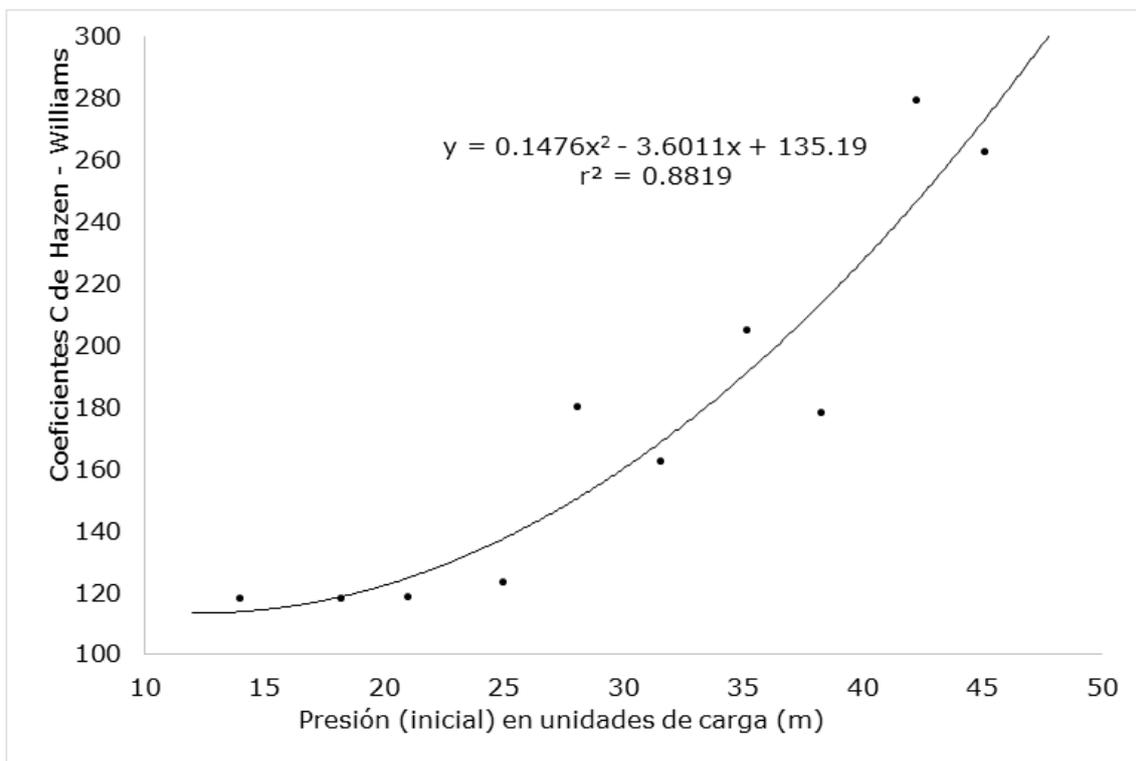


Figura 1. Relación funcional entre la presión y el coeficiente C de fricción de Hazen-Williams.

Conclusiones

Para tuberías de material plástico como el polietileno y en diámetros de unos 50 mm, el coeficiente de rozamiento C de Hazen-Williams se ve afectado por el aumento de la presión con incrementos exponenciales, que junto a la recomendación dada por los autores de esta expresión respecto de utilizarse para diámetros mayores al experimentado y cuando se requiera una carga superior a los 30 m en el diseño de las tuberías que transportan un mismo caudal en toda su longitud (tubería de conducción), bien pueden utilizarse valores del mencionado coeficiente arriba del "constante" 150, establecido en la literatura para las conducciones de materiales plásticos. Para situaciones comunes del riego presurizado y para áreas de riego que vayan más allá de las 10 ha puede adoptarse un valor máximo de 220.

Agradecimientos

Se deja constancia del apoyo brindado por el Ing. Wilson Quishpi, técnico instalador de sistemas de riego, por su aporte en la conducción de este experimento.

Referencias

- Anaya, A., Cauich, G., Funabazama, O., & Gracia, V. (2014). Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías. *Educación Química*, 25(2), 128-134.
- Colebrook, C., & White, C. (1937). Experiments with Fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 161(906), 367-381.
- Giles, R., Evett, J., & Liu, C. (1994). *Fluid mechanics and hydraulics*. New York, USA: McGraw-Hill Education.
- Luszczewski, A. (2004). *Redes industriales de tubería: bombas para agua, ventiladores y compresores*. Barcelona, España: Editorial Reverté, S. A.
- MAGAP, Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. (2013). *Plan Nacional de Riego y Drenaje 2012-2017*. Quito, Ecuador: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.
- Méndez, M. (2007). *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Caracas, Venezuela: Universidad Católica Andrés Bello.

- Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*. Atlacomulco, México: Pearson Educación.
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías*. Bogotá, Colombia: Alfaomega- Universidad de los Andes.
- Streeter, V., Wylie, E., & Bedford, K. (2000). *Mecánica de fluidos*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S. A.
- Tarjuelo, J. (1999). *El riego por aspersión y su tecnología*. Madrid, España: Ediciones Mundi Prensa.
- Trueba, S. (1965). *Hidráulica*. Ciudad de México, México: Compañía Editorial Continental S.A.