

Froude, Manning y Reynolds aportan a la hidráulica en el siglo XIX

Félix Riaño Valle

email: riano@tesla.cujae.edu.cu

Profesor Titular, Dirección de Formación del Profesional, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, (Cujae), La Habana.

RESUMEN

Conocer la historia y las circunstancias en la que determinados acontecimientos científicos tienen lugar, resulta imprescindible para comprenderlos mejor. Ocurre con cierta frecuencia que importantes aportes son atribuidos a quienes no los establecieron. Sin pretender cambiar esa realidad, se considera importante conocer la verdad. En este artículo, se dan a conocer los verdaderos aportes de tres ingenieros británicos del siglo XIX: William Froude, Robert Manning y Osborne Reynolds que en el marco de la llamada Revolución Industrial, hacen importantes contribuciones al desarrollo de la hidráulica. Sus nombres, en algunos casos con toda justicia y en otros no tanto, están indisolublemente ligados a la historia de la Ingeniería Hidráulica.

Palabras clave: Froude, hidráulica, Manning, Reynolds, siglo XIX.

Froude, Manning and Reynolds contribute to hydraulics in the 19th century

ABSTRACT

Knowing the history and circumstances in which certain scientific events take place, is essential to understand them better. It happens with certain frequency that important contributions are attributed to those who never established it. Without trying to change that reality, it is considered important to know the truth. In this article, the true contributions of three British engineers of the XIX century are revealed: William Froude, Robert Manning and Osborne Reynolds that, in the framework of the so-called Industrial Revolution, make important contributions to the development of hydraulics. Their names, in some cases with all justice and in another not so much, are inextricably linked to the history of Hydraulic Engineering.

Keywords: Froude, hydraulics, Manning, Reynolds, 19th century.

INTRODUCCIÓN

Durante los 200 años posteriores a la muerte de Galileo, la hidráulica alcanzó logros notables. La contribución de Newton para el estudio teórico de los fluidos fue formidable y en temas muy variados. Sus aportes en el campo de la matemática con la creación del cálculo infinitesimal (también atribuido a Leibnitz) y las leyes físicas que estableció, han sido esenciales para este empeño. Realizó meticulosos experimentos sobre remolinos y gastos por orificios. Sus conclusiones acerca de los esfuerzos cortantes en los fluidos en movimiento y la existencia de la viscosidad sirvieron de fundamento para futuras investigaciones sobre el tema.

En 1738 Bernoulli publica su tratado de “Hydrodynamica”, demostrando la relación entre los cambios de velocidad y la presión en un líquido. Euler aplica las leyes de Newton al movimiento de los fluidos ideales e incompresibles con régimen permanente y demuestra que la suma de la carga a presión en un punto, la carga a velocidad y su altura es constante, expresión que como se ha dicho, fue erróneamente atribuida a Bernoulli y hoy se conoce con este nombre. (Riaño 2014). Prestigiosos matemáticos hacen significativos aportes a la hidrodinámica teórica.

Paralelamente se desarrolla la hidráulica experimental. Importantes ensayos para determinar las pérdidas de carga en tuberías son llevados a cabo. Investigadores notables como Couplet, Bossut, Du Buat, Hagen, Poiseuille, Darcy y Weisbach, por citar solo algunos, llegan a conclusiones definitivas acerca de las variables más importantes que tienen que ver con el cálculo de la fuerza de resistencia al flujo en tuberías. (Pérez Franco 2000) En 1768 Chezy establece la primera fórmula para calcular la velocidad de circulación en un canal, introduce por primera vez el concepto de Radio Hidráulico y aplica el mismo método para el caso de tuberías. (Riaño 2016) El abad Venturi, es el primero que escribe sobre la viscosidad y su importancia, considerándola no solo como inductora de rozamientos, sino también de remolinos y estudia, además, el coeficiente de desagüe en orificios.

A su vez, se desarrollan importantes herramientas de laboratorio y de campo, entre ellas, el piezómetro creado por Bernoulli y el tubo de Pitot, que contribuyeron, de manera decisiva, a una mejor precisión de las variables evaluadas experimentalmente (Riaño 2016).

Pero no todo estaba resuelto, a mediados de la segunda mitad del siglo XIX aún no está clara la influencia de la viscosidad en la resistencia que ejercen las paredes de una tubería o de un cuerpo al movimiento del agua.

Los experimentos realizados por importantes investigadores durante los siglos XVIII y gran parte del XIX, desde Chezy y Du Buat hasta Weisbach y Darcy demostraron que las pérdidas de carga en tuberías son proporcionales al cuadrado de la velocidad media. De otra parte, y aparentemente contradictorio, otros investigadores como Poiseuille en 1842 y Hagenbach después, demuestran, el primero experimentalmente y el segundo matemáticamente, que la resistencia por fricción es proporcional a la velocidad media pero a la primera potencia.

Es evidente que las características de uno y otro experimento no son iguales, mientras Poiseuille trabaja con diámetros muy pequeños, del orden de los 0,3 milímetros (medidos con toda precisión por métodos sumamente ingeniosos), Du Buat y los hidráulicos en general lo hacían con diámetros normales. Es indudable que estas diferencias en los diámetros es la clave

de todo el problema, pero, cómo saber cuándo aplicar uno u otro criterio, a partir de qué diámetro de tubo y qué velocidad del agua cambia la fórmula a aplicar, ¿es lo mismo que circule agua u otro fluido?.

Por otra parte, aunque los variables fundamentales que tienen que ver con el movimiento del agua en las conducciones abiertas están definidos, la determinación del coeficiente de rugosidad es aún incierta.

Pese a que Leonardo da Vinci es el primero que intenta el estudio del comportamiento del movimiento de los barcos mediante el uso de modelos y han pasado más de 300 años, todavía el desarrollo de esta rama de la hidráulica es muy incipiente.

En este mismo período histórico(siglo XIX), en el Reino Unido se desarrolla un movimiento económico, científico y cultural, que estimula el desarrollo de las investigaciones aplicadas, de ellas, las hidráulicas jugarán un papel muy importante.

El artículo que se presenta es el resultado de una minuciosa búsqueda bibliográfica dirigida a destacar aspectos significativos de la vida y obra de tres destacados ingenieros británicos del siglo XIX: Froude, Manning y Reynolds. Se enfatiza en aquellos aspectos de mayor interés desde el punto de vista científico, en ocasiones poco conocidos. De igual manera se destaca el contexto en que ellos ocurren.

Para los que, como el autor, se dedican a la enseñanza de la ingeniería hidráulica, la información que se brinda, de forma resumida, resulta de gran utilidad contribuyendo a un conocimiento más completo de esos acontecimientos.

Como en trabajos anteriores, el autor reconoce, el inestimable valor del texto History of Hydraulics de Hunter Rouse y Simon Ince (Rouse and Ince 1957) por sus precisiones históricas. De igual manera resultó muy valioso el libro de Enzo Levi, El agua según la Ciencia, (Levi 2001) siendo de particular interés sus apreciaciones sobre la fórmula de Manning y el experimento de Reynolds.

AMBIENTE CIENTÍFICO TÉCNICO DEL REINO UNIDO EN EL SIGLO XIX

A mediados del siglo XVIII se inicia en Gran Bretaña, un lento proceso de transformaciones socioeconómicas, tecnológicas y culturales que se extiende en su primera etapa hasta mediados del siglo XIX, conocido como la Revolución Industrial.

En el año 1800, un acontecimiento de alcance internacional tiene lugar; Gran Bretaña (Inglaterra, Escocia y Gales) e Irlanda, firman el Acta de la Unión, fundando el Reino Unido. El Imperio Británico está en plena expansión, próximo a alcanzar su máximo apogeo. Las condiciones políticas cambian, de una monarquía absoluta se pasa a una liberal.

Los hombres muestran más interés por lo nuevo y el desarrollo de la teoría y la experimentación alcanzan su máximo esplendor. Así, se inicia un fuerte movimiento por la investigación aplicada, dirigida a resolver problemas prácticos, que da lugar a un impresionante

aumento de los conocimientos en todas las ramas del saber, especialmente en lo científico técnico.

Continuos inventos tienen lugar en este período, entre otros, el telar y la máquina de hilar, la máquina de vapor, la pila eléctrica, la primera locomotora, la luz eléctrica, el gas, etc. Surgen técnicas que desarrollan la mano de obra especializada. Nuevos materiales como el acero y el carbón, son utilizados, la entrada de las maquinarias aumentan la producción industrial y agrícola con una disminución de la mano de obra. Se crean las fábricas mecanizadas. La máquina de vapor revoluciona el transporte, tanto por ferrocarril como por barcos. Ocurre un éxodo de las zonas rurales hacia las ciudades. Se promueve una mayor necesidad de transportar las mercancías. Un aumento importante de la población tiene lugar. Solo la ciudad de Manchester entre 1760 y 1830 multiplica por 10 su población (de 17 000 a 180 000 habitantes) (Hobsbawm 1977).

La ciencia progresa. Los logros son tales que, en 1851, se organiza una Gran Exposición Universal en Londres para mostrar al mundo los avances alcanzados.

A los efectos de este escrito, es importante destacar que Gran Bretaña posee una amplia red de ríos (Támesis, Severn, Trent, Gran Ouse, entre otros) y canales navegables construidos por el hombre, con una longitud de más de 1000 Km, que conectan los principales centros de producción y consumo. Los barcos ahora movidos por máquinas de vapor, tienen cascos de hierro y hélices. Aumenta el traslado de materia prima, la industria se desarrolla, y se propicia el incremento de la producción.

Se estimulan las investigaciones que buscan diseños de embarcaciones que ofrezcan menos resistencia al movimiento, disminuyan el tiempo de viaje, incrementen la carga y hagan los viajes más seguros.

En este contexto no se puede olvidar que el Imperio está en plena expansión y su Flota, entre las más poderosas del mundo, debe ser modernizada.

En estas circunstancias tres ingenieros británicos contemporáneos, William Froude, Robert Manning y Osborne Reynolds, desarrollan sus trabajos.

WILLIAM FROUDE: EL INGENIERO NAVAL

William Froude fue sobre todo un ingeniero naval. Nació en Dartington (Devon, Inglaterra) en 1810. Creció en una familia acomodada, su padre, Robert Froude, perteneció a la alta jerarquía de la iglesia católica en Totnes. Sus dos hermanos, Hurrell Froude, escritor y sacerdote y James Anthony Froude historiador, fueron intelectuales de reconocido prestigio. William estudió en Oxford, donde se graduó en Matemáticas con solo 22 años. Tenía un amplio dominio de las matemáticas puras y era un experto en la solución de problemas algebraicos complicados, empleando métodos gráficos.

Desde muy joven demostró sus habilidades y alta capacidad para construir aparatos originales. En 1837 comenzó a trabajar como topógrafo para los ferrocarriles del sureste de Inglaterra.

Encargado de la construcción de un tramo del ferrocarril de Bristol a Exeter; desarrolló un método empírico para el trazado de curvas de transición. Con el mismo se logra un aumento gradual de la curvatura de los raíles desde un tramo recto a otro circular, mejorando el diseño de la vía.

En 1839 se casó con Catherine Holdsworth, hija del gobernador de Dartmouth, magnate mercantil y miembro del Parlamento consolidando así su posición social. Siete años después nace su hijo Robert, quién junto a su padre, contribuye después de manera decisiva, en la introducción de los canales de experimentación para el estudio de los barcos por medio de modelos a escala.

En 1846 comenzó a trabajar con, Brunel, importante constructor naviero, diseñador de grandes trasatlánticos. Encargado de estudiar cómo reducir el balance de los barcos, le da solución mediante la instalación de una quilla a lo largo del fondo del buque, solución que es más tarde adoptada por la Royal Navy. Estudia el comportamiento aerodinámico de los barcos de vapor y el de sus hélices. Además fue capaz de expresar matemáticamente el efecto del movimiento de las olas y el comportamiento del barco sobre ellas. Es un entusiasta de las investigaciones navieras.

En 1858 inventó un freno hidrodinámico industrial que lleva su nombre. En la década de los sesenta comienza, con recursos propios, el estudio de la resistencia de los barcos por medio de modelos a escala y aplica la validez de extrapolar los datos allí obtenidos a los reales. Con este objetivo, solicitó al Almirantazgo fondos para la construcción de un canal de experimentación. Para justificar lo apropiado de su solicitud, en 1868, explica:

“El diagrama que presenta a escala la resistencia de un modelo para varias velocidades sucesivas, expresará igualmente la resistencia de un barco similar a él, pero, de dimensiones n veces mayor a varias velocidades sucesivas, si se aplica el diagrama al caso de un barco nosotros interpretamos que todas las velocidades serán $\sqrt{n}$ veces mayor y la correspondiente resistencia como n^3 veces mayor que la del modelo”

El planteamiento anterior que establece las leyes de semejanza, ya habían sido expresadas de idéntica forma por Reech en sus conferencias de 1831, publicadas luego en 1852. Ferdinand Reech, profesor de mecánica y más tarde director de la Escuela de Ingeniería Marítima de París hizo sus análisis, basados en las leyes del movimiento de Newton. Sin embargo, Froude parece desconocerlo (Rouse and Ince 1957).

Preocupado por mejorar la velocidad y eficiencia de sus buques, el Almirantazgo, accede a tal solicitud y destina 2 000 libras esterlinas de la época a la construcción del primer canal de experiencias hidrodinámicas. Se decide ubicarlo en Torquay, en un lugar cercano a la residencia de Froude. Así, en 1870 comenzó su construcción, terminada dos años después.

El canal contaba con unas dimensiones de 250 pies de longitud, 33 pies de ancho, y 10 pies de profundidad. Un carro que se mueve sobre una vía de carriles suspendidos sobre el canal, accionado por una maquinilla de vapor, remolcaba los modelos a velocidades de entre 100 y 1000 pies por minuto (de 2 a 18 kilómetros por hora). El carro contaba con un dinamómetro

diseñado por él, para calcular la resistencia. El diseño y fabricación de los modelos y los diversos aparatos para regular y registrar la velocidad eran obra del talento de Froude para la inventiva.

En su reporte de 1872 a la Asociación Británica, declara que su objetivo era determinar la variación de la resistencia con la velocidad, la longitud y la terminación de la superficie. Él encontró que para superficies lisas varía con una potencia no mayor de 1,85 de la velocidad y solamente para superficies muy rugosas llega a la potencia 2. Froude explicó la reducción proporcional de la resistencia media con la longitud, de manera muy parecida, a lo que se conoce hoy como la Teoría de la Capa Límite. Se convierte así en su precursor, hecho que le es poco reconocido (Rouse and Ince 1957).

Así, Froude se centra en el estudio de la resistencia al avance de los buques, descubriendo que esta dependía de dos factores: la resistencia de fricción debida a la superficie mojada del casco (que viene condicionada por la viscosidad) y la resistencia residual debida a la formación de olas.

Desde 1872 y durante los siete años siguientes, Froude y su hijo Robert llevaron a cabo pruebas de cada nuevo buque botado por la marina, utilizando modelos de hasta casi 12 pies de largo. Inventó también una máquina para moldear los cascos en cera de parafina a partir del plano de formas, para con ellos calcular la resistencia residual. También realizaban ensayos con tablas de diferentes longitudes y acabados, a partir de los cuales calculaban la resistencia por fricción.

Su método para el cálculo de esta resistencia fue muy criticado al equiparar objetos tridimensionales como los cascos reales con objetos planos como las tablas, hasta que en 1872 fueron demostrados mediante una prueba a remolque del buque Greyhound. Los resultados de la prueba mostraron una diferencia menor del diez por ciento con los datos obtenidos del modelo en el canal y legitimaron la precisión del método de Froude.

En 1876 recibió la medalla Real de la Royal Society, en el discurso de homenaje su Presidente expresó (Obituario 1880):

"La cantidad de habilidad mecánica, así como de agudeza teórica, que se ha exhibido en todo este trabajo ha colocado al Sr. Froude en el rango más importante de todos los investigadores en este tema. Nadie, realmente, nunca ha hecho más, ya sea teórica o prácticamente, para la determinación precisa del movimiento de un barco,"

Más adelante reconoce que:

"También ha llevado a cabo una serie de experimentos, que se extienden a lo largo de muchos años, sobre la resistencia, la propulsión y la forma de los buques, y sobre la cuestión muy importante y poco entendida de la ley que conecta el comportamiento de los buques, en todos estos aspectos con los modelos de barcos en una escala mucho más pequeña".

Llevó una activa vida social y gozaba de gran prestigio entre los oficiales del Almirantazgo. Fue amigo desde su juventud del Cardenal John Henry Newman uno de los pensadores cristianos más importantes de Inglaterra en el siglo XIX con quién discutió distintos temas de carácter religioso e intercambió una amplia correspondencia. Newman fue defensor de la idea de que el

fin principal de la Universidad debe ser la “educación liberal” de sus estudiantes, entendiéndose como tal, el conjunto de conocimientos y la disciplina intelectual que un hombre debe tener independiente de su actividad profesional concreta.

En su honor se creó la Medalla William Froude otorgada por la Royal Institution of Naval Architects, a veces llamada el Premio Nobel Naval.

En el verano de 1878, Froude recibió una invitación del Comodoro Richards para realizar un viaje a bordo del navío HMS Boadicea, pero, cuando se encontraban a punto de retornar a Inglaterra desde Suráfrica al año siguiente, Froude fallece a causa de una infección intestinal. Su cuerpo fue enterrado en el cementerio naval de Simon's Town en Suráfrica con todos los honores.

Aunque Froude no fue el primero en establecer las leyes de similitud, tiene el enorme mérito de haberlas aplicado consecuentemente, demostrando su validez. Además fue capaz, con su inventiva, de vencer todos los obstáculos para llevar a feliz término sus experimentos.

Luego de su muerte, Robert continuó los trabajos de su padre y logró comprobar los métodos de predicción de la resistencia encontrados en modelos con los del prototipo que, aunque no absolutamente coincidentes, eran aceptables.

Sin que se conozcan las razones, fue Moritz Weber, profesor berlinés, quién en 1919 bautizó la relación entre las fuerzas de inercia y las de gravedad como Número de Froude (Levi 2001).

ROBERT MANNING: EL DILEMA DE SU FÓRMULA

Ya la que se conoce como “fórmula de Manning” cumplió 125 años y sigue siendo la más usada para el diseño de canales abiertos. Sin embargo, es poco conocido que dos años después de proponerla, la revocó y le introdujo cambios sustanciales.

Robert Manning nació en Normandía en 1816, hijo de irlandeses que se hallaban en Francia porque su padre era miembro del ejército que combatió a Napoleón en Waterloo. A los 9 años quedó huérfano de padre y su madre decide regresar a Irlanda.

En su primera juventud, Robert demuestra ser un joven activo e inteligente, involucrándose en la administración de los bienes familiares e incluso pensó ser abogado.

Hacia 1845, la situación económica de la familia cambia y tiene que buscar otro trabajo. Comienza de ayudante del ingeniero distrital para los ríos Glyde y Dee como contador y dibujante. Pronto gana prestigio y lo ascienden a ingeniero ayudante, responsable de los trabajos topográficos, el diseño y cálculo de obras. Así, de forma autodidacta, se va preparando como ingeniero. No existían en ese entonces escuelas dedicadas a formar estos profesionales en su país.

Aficionado a la Hidrología, la Institución de Ingenieros Civiles de Irlanda le publica un trabajo donde trata con acierto el cálculo del Gasto Máximo en problemas de Drenaje. En el

mismo, destaca la importancia de la forma y pendiente de la cuenca en el escurrimiento. En 1854 presenta un estudio a la Institución de Ingenieros Civiles de Londres sobre la actividad de un manantial cuyo aporte podría ser útil para el abastecimiento de agua a Belfast y es premiado con una medalla de oro.

A los 53 años de edad regresa a Obras Públicas como ayudante del ingeniero en Jefe y cuatro años más tarde asciende a la Jefatura. Está encargado de la supervisión de los 5 puertos Reales de Irlanda, así como de los puertos comerciales y muelles de pesca. Fue Presidente del Instituto de Ingenieros Civiles de Irlanda.

El resultado de los trabajos que condujeron a presentar la fórmula que lo vinculó para siempre con la ingeniería hidráulica, los hizo cuando ya tenía 73 años y la propuso luego de comparar y evaluar siete de las mejores y más conocidas fórmulas de la época: Du Buat (1786), Eytelwein (1814), Weisbach (1845), St. Venant (1851), Neville (1860), Darcy – Bazin (1865) y Ganguillet – Kutter (1869) que relacionan la velocidad media, U , con el radio hidráulico R y la pendiente S (Levi 2001).

Para cada fórmula, calculó la velocidad para una pendiente dada y un radio hidráulico variable desde 0.25 m hasta 30 m. En cada caso, encontró el valor medio de las siete velocidades y generó una fórmula (1) que se ajustaba mejor a los datos disponibles.

$$U=CR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

En un principio el exponente de R era $4/7$ pero luego lo cambió a $2/3$ tomando como base 34 experimentos de Darcy y Bazin. Comprobó el resultado utilizando ensayos de otros cinco autores.

Su fórmula fue propuesta en diciembre de 1889 al Instituto de Ingenieros Civiles de Irlanda y vio la luz en 1891, en su artículo titulado “On the flow of water in open channels and pipes” publicado en la Revista de dicha institución.

Hay suficientes evidencias de que Manning no fue el primero en plantear esta fórmula, él mismo reconoció una igual del investigador Hagen, el mismo que se conoce asociado al nombre de Poiseuille. Otra, idéntica, había sido propuesta antes (1868) por Gauckler para el caso de pendientes menores de 0,0007. También cuatro años antes, en 1887, la Sociedad de Ingenieros Civiles de Francia, había publicado una nota del ingeniero Vallot, dando una expresión igual solo que el coeficiente es 0,65, esta vez, aplicada también a conductos cerrados. Igualmente Thrupp, del King’s College de Londres partiendo de los datos de Darcy y Bazin había propuesto una fórmula general resultando la de Manning, un caso particular.

Es interesante que, en general los investigadores mencionan la fórmula haciendo caso omiso de los predecesores, Hagen no cita a Gauckler, Thrupp no menciona a Gauckler, ni a Hagen ni a Vallot (Levi 2001).

En 1896 Tutton, de Bufalo, asegura haberla comprobado con los resultados de más de 1000 experimentos y en este caso sí menciona a sus predecesores pero no a Manning. Por último

Strickler, en 1923, llamándola la “segunda fórmula de Gauckler” (refiriéndose a aquella propuesta por este para pendientes menores que 0,0007), analiza 17 series de datos experimentales del Departamento de Aguas de Berna y llega a la conclusión de que efectivamente los resultados son correctos. La expresión adquiere un gran reconocimiento.

En relación con la célebre fórmula una pregunta resulta de interés, ¿por qué si ha tenido tantos supuestos autores se le atribuye a Manning?

Varias circunstancias se conjugaron para que Manning pasara a la posteridad como su autor. En este período, Alfred Flamant (1839 - 1915), prestigioso profesor francés de la Escuela de Puentes y Caminos, prepara su célebre tratado “Hydraulique” y mantiene un amplio intercambio de correspondencia con Manning quién le da a conocer su artículo, “On the flow of water in open channels and pipes” publicado en 1891, en el que en las páginas 204 y 205, expresa: (Bertrand 2006).

“Es bastante cierto que la fórmula de Ganguillet y Kutter da una aproximación cercana a la observada velocidad dentro de amplios límites, y es digno de destacar que el valor de la reciprocidad de C (el coeficiente de la fórmula de la Velocidad) se corresponde estrechamente con el de n , según lo determinado por ellos; tanto C como n son constantes para el mismo canal.”

Esto da pie para que Flamant, luego de dar a conocer las fórmulas de Bazin y Ganguillet y Kutter, apunte en su tratado: “El señor Robert Manning, profesor del colegio de Dublin ha propuesto la fórmula $U = C R^{2/3} S^{1/2}$ en la cual el coeficiente C es variable con la naturaleza de la pared, tiene un valor $1/n$, inverso del coeficiente de rugosidad n de la fórmula de Kutter.... Según Manning, ella concordaría, igual que la de Kutter, con los resultados experimentales de los cuales esta última ha sido deducida.” (Levi 1991).

“Hydraulique”, libro de texto excelente, tuvo una gran divulgación en una época de pocas obras como esta, por lo que es lógico pensar, que los interesados en la hidráulica hayan conocido la fórmula como “la de Manning”.

Por otra parte, la fórmula de Ganguillet y Kutter era la más popular en Europa, a pesar de su complejidad, por la ventaja de tener un coeficiente n constante del cual se habían determinado ocho valores distintos de acuerdo con el material de las paredes del canal.

Si ahora es posible usar una fórmula mucho más sencilla como “la de Manning”, usando el coeficiente C como el inverso de n , se comprende fácilmente lo que ocurrió después.

Más tarde, el “Manual de Hidráulica”, de King, 1918, de gran aceptación entre los ingenieros, también contribuyó a extender el uso de la expresión propuesta por Manning tal cual la conocemos hoy.

Manning se retracta

Aunque, como se ha dicho, en su artículo publicado en 1891, Manning reconoce que existe una buena aproximación entre su coeficiente C y el inverso de n , en un suplemento a su publicación en 1892 declara: “Pero ahora resulta de una traducción publicada recientemente bajo la

responsabilidad de Hering y Trautwine que n no es constante como ellos habían determinado, sino que varía para un mismo canal si sus dimensiones son pequeñas o grandes; con el radio medio; cuando la corriente arrastra guijarros; con la velocidad; con la pendiente de la superficie, disminuyendo, como lo hace cuando los canales son lisos y regulares, o bien aumentando, como sucede cuando son ásperos e irregulares” (Levi 1991).

Cuando Manning presenta su fórmula en la Institución de Ingenieros Civiles de Irlanda le preguntan al respecto y se pronuncia en contra de que el coeficiente C fuera tomado como el inverso de n argumentando lo expresado anteriormente.

Si se analiza con cuidado lo que plantea en su artículo, en honor a la verdad, Manning nunca dijo que se sustituyera C por el inverso de n , pero reconoce que se “corresponde estrechamente”. No es lo mismo pero se parece mucho.

El convencimiento de Manning con esta nueva idea, es total, y escribe: “Si las fórmulas modernas son casi sin excepción empíricas y no homogéneas, ni tan siquiera dimensionales, resulta obvio que la confiabilidad de toda ecuación así, debe depender totalmente de aquella de las observaciones mismas y no puede en rigor aplicarse a ningún caso fuera de ellas” (Levi 2001).

De esta manera le da la razón a Chezy que, hace ya 250 años propuso la que por derecho propio puede ser considerada, la madre de todas las fórmulas para el cálculo de las pérdidas de carga en canales y tuberías.

Siendo consecuente con este pensamiento plantea ahora una nueva fórmula tan complicada como la de Ganguillet y Kutter, introduciendo la aceleración de la gravedad g y el valor de la presión atmosférica expresada en altura de columna de mercurio, m y en lugar del sencillísimo $R^{2/3}$ lo reemplaza por $[R^{1/2} + 0,22 \text{ m}^{-1/2} (R - 0,15 \text{ m})]$ (Levi 1991) y entonces queda:

$$V = C \sqrt{gS} [R^{1/2} + 0,22 \text{ m}^{-1/2} (R - 0,15 \text{ m})] \quad (2)$$

El suplemento de 1892 con esta nueva consideración, llega después de que la “Hidraulique” había alcanzado gran popularidad en todo el mundo. Casi nadie, para no ser absolutos, tomó en cuenta esta última propuesta.

La fórmula, aunque tal vez un poco por azar, se llamó “la de Manning” y así ha sido por más de un siglo, ya nadie la conocerá de otra forma, al menos en esta parte del mundo. Su vigencia, se justifica porque ha vencido la más difícil de todas las pruebas: la del tiempo.

Manning, era un trabajador incansable. Según su nieto, su voz era brusca y perentoria, y tenía una gran facilidad para explicar claramente sus ideas y dominar a un auditorio.

Se retiró a los 75 años de edad. Falleció en Dublín, Irlanda en 1897.

OSBORNE REYNOLDS: EL PROFESOR DE INGENIERÍA

Pocos saben que Reynolds fue profesor de ingeniería durante casi toda su vida. Nació en Belfast en 1842, creció en el seno de una familia religiosa. Desde pequeño mostró aptitud para el estudio de la mecánica por lo que, muy joven, trabajó en el taller de Edwards Hayes, constructor naval, donde adquirió experiencia en la fabricación de vapores costeros. Como no existía la carrera de ingeniería, estudia matemáticas en Cambridge y se gradúa con honores en 1867. En 1868, obtiene por oposición la cátedra de ingeniería civil y mecánica en el Owens College de Manchester y se convierte en su primer profesor.

Enseñar ingeniería es todo un desafío, no existen programas de estudio y mucho menos, laboratorios. A pesar de que sus conferencias no eran fáciles de entender lograba motivar a sus alumnos. Consideraba con acierto, que todos los estudiantes de ingeniería, no importa cuál sea su especialidad, deben tener una base común en matemáticas, física y, en particular, los fundamentos de la mecánica clásica. Según el testimonio de uno de sus alumnos, era un hombre de los más originales e independientes, tímido y algo torpe. A veces olvidaba su turno de clases. (Levi 2001).

Su interés por la investigación y la enseñanza lo condujo, en ocasiones, ante la falta de laboratorios en la universidad, a construirlos en su casa. Se mantiene en la cátedra de ingeniería por más de 35 años. Los laboratorios creados por Reynolds en el Whitworth College Owens, fueron reconocidos en todo el mundo y sirvieron de guía para el resto de las universidades europeas (Levi 2001).

Fue miembro de la Royal Society desde 1877 y 11 años más tarde era uno de sus miembros más distinguidos, siendo merecedor de la Medalla al Mérito. En 1884 fue galardonado con el Doctorado Honoris Causa de la Universidad de Glasgow.

Como era habitual en la época, Reynolds fue un científico que abarcó una amplia gama del conocimiento; desde la termodinámica y la electricidad, por una parte, hasta estudios sobre la navegación de barcos de vapor y el comportamiento de sus hélices y las olas. También, fue un estudioso de las máquinas hidráulicas, tanto de las bombas como de las turbinas. Es poco conocido que investigó una amplia variedad de tópicos relacionados con la resistencia de materiales: elasticidad, propiedades del acero, fatiga de materiales sometidos a cargas repetidas, entre otros. De igual forma, estableció las reglas que relacionan las escalas vertical y horizontal con las escalas de velocidades y las de tiempo para los períodos de olas en el estudio de erosión del modelo del cauce del río Mersey. Fue el primero en demostrar el fenómeno de la cavitación así como los ruidos y vibraciones que ocasiona al colapsar las burbujas. Estos trabajos fueron publicados en una serie de reportes en la British Association for the Advancement of Science entre 1873 y 1897 (Jackson 1995).

Aunque ya Hagen había identificado los dos tipos de flujos y Helmholtz expresó la condición de la existencia de la inercia y la viscosidad, fue Reynolds en 1883 quién estableció la formulación específica del parámetro que ahora lleva su nombre.

Reynolds, después de 1873, se centró principalmente en la dinámica de los fluidos y es en este período, que desarrolla, lo que constituye su aporte más importante a la hidráulica: la definición

del parámetro que identifica la ocurrencia de los dos tipos de flujo, llamados en la actualidad flujo laminar y flujo turbulento.

Flujo directo y flujo sinuoso

En 1883, Reynolds presenta su trabajo “An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and the law of resistance in parallel channel” dando a conocer los resultados de sus investigaciones acerca de por qué en el caso de movimientos sin remolino, (estudiados en tuberías de muy pequeños diámetros) la resistencia es proporcional a la velocidad media y para el caso de movimiento con remolinos es proporcional al cuadrado de dicha velocidad.

En sus razonamientos Reynolds hace un símil sumamente elocuente: “Las circunstancias que determinan si el movimiento de las tropas sea una marcha o una confusión, se parece mucho a aquellas que determinan si el movimiento del agua es directo o sinuoso. En ambos casos existe cierta influencia para el orden: con las tropas es la disciplina con el agua es la viscosidad o la aglutinación. Cuanto mayor sea la disciplina de las tropas o bien más aglutinado sea el fluido, menos probable es que el movimiento regular se altere en alguna ocasión. Por otro lado velocidad y tamaño en ambos casos son favorables a la inestabilidad: tanto más grande es la armada y más rápido sus evoluciones, tanto mayor es la oportunidad de desorden, así con el fluido cuanto más ancho sea el canal y más rápida su velocidad, tanto mayor es la probabilidad de remolinos” Explicación propia de una clase magistral.

Para Reynolds lo más usual en un fluido es el desorden y la viscosidad es la encargada de destruir las “perturbaciones”. Una fuerte viscosidad puede contrarrestar una gran velocidad.

A su famoso parámetro llega, razonando que las fuerzas de inercia representadas por la energía cinética por unidad de volumen ρU^2 , donde ρ es la densidad, deben equilibrar el efecto viscoso representado por Newton como $\mu U/c$, μ es la viscosidad, U la velocidad y c una longitud característica que para el caso de la tubería es su diámetro (Levi 2001).

Dividiendo ambas fuerzas queda lo que hoy se conoce como:

$$N_R = \rho U D / \mu \quad (3)$$

Si este valor es pequeño indica que predominan las fuerzas de viscosidad con un escurrimiento directo, si es grande prevalecen las fuerzas de inercia con un flujo sinuoso. Hasta aquí el razonamiento teórico; pero reflexiona que debe existir un valor intermedio que separe los dos regímenes e identifique la velocidad crítica conocidas la viscosidad y la longitud característica o determinar, la viscosidad y la longitud crítica conocidos los valores de los otros dos parámetros. Para ello debe pasar a la experimentación.

En sus investigaciones acerca del comportamiento de la hélice de los barcos, Reynolds había usado colorantes para distinguir mejor los remolinos que se forman y llegó a la conclusión de que en este caso también le sería de gran utilidad.

La figura 1 reproduce el esquema que presentó Reynolds en su informe de 1883. Aparece el tanque de 6 pies de largo, uno y medio de ancho y otro tanto de profundidad, levantado 7 pies

por encima del piso para permitir una mayor velocidad de circulación en el sifón. El colorante fluye a través de una fina tubería que sale de un depósito colocado encima del tanque, controlado por una pinza, que se introduce en otra abocinada. Un flotador controla con gran precisión las variaciones de nivel en el depósito en un tiempo dado. La palanca sirve para regular la velocidad.

El experimento se realizó por primera vez el 22 de febrero de 1880. El tanque se llenó de agua y se dejó en reposo durante cuatro horas, para evitar cualquier perturbación. Se inyectó el colorante y se abrió un poco la válvula. El filamento coloreado se mantuvo muy estable en la medida en que se abría la válvula, hasta que, de repente con una leve apertura el tinte se mezcló con el agua hasta llenar todo el conducto con una nube coloreada que parecía de tinte uniforme. Según explica Reynolds en su informe, un examen más cuidadoso, dejaba ver primero un filete de colorante que luego se convertía en remolinos que ocupaban toda la tubería, un cierre pequeño de la válvula hizo que los remolinos desaparecieran y se restituyera el filete coloreado.(Levi 2001).

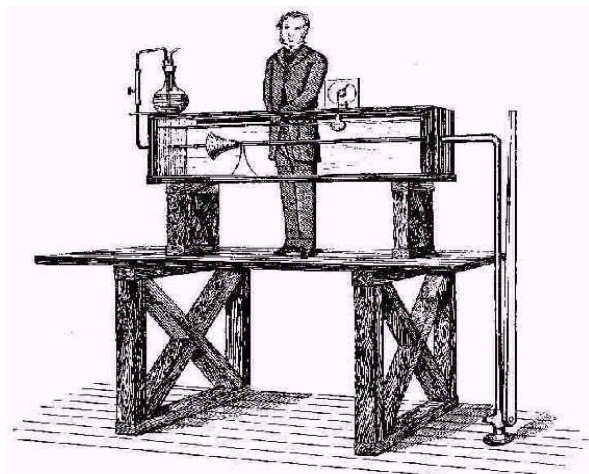


Figura 1. Dibujo de su experimento [(Fuente: Levi (2001))]

Se habían podido producir, por primera vez, en un mismo tubo, con solo variar la velocidad, los dos regímenes, “directo” y “sinuoso”, que todos conocen como laminar y turbulento.

Inconforme con los resultados alcanzados, continuó sus investigaciones, ahora variando otros parámetros más difíciles de evaluar, como la viscosidad. Intentó calentar el agua a 21 grados centígrados y así disminuir la viscosidad, realizó los ensayos y encontró resultados aceptables, pero era muy complicado mantener el agua a esa temperatura, el frío invierno no lo ayudaba.

Por fin se le ocurrió, lo contrario, enfriar el agua a cuatro grados centígrados agregándole hielo llevándola a su máxima densidad y repitió los experimentos. En todos los casos comprobó que existe una velocidad crítica que varía directamente proporcional con la viscosidad del flujo.

Cambió los diámetros además del de una pulgada inicial, lo varió a media y a un cuarto y comprobó que la mencionada velocidad varía inversamente proporcional con el diámetro del

tubo. Se confirmó así que el flujo directo varía con el valor $\rho UD/\mu$. Como dato curioso vale destacar que el tanque, de madera, construido por Reynolds, todavía existe en los Simon Engineering Laboratories de Manchester y es usado por los estudiantes (Levi 2001). Es oportuno destacar que entre el inicio de sus experimentos (1880) y la presentación de sus resultados (1883) transcurrieron tres años de trabajo.

Aunque aún se desconoce por qué un flujo por una tubería se vuelve turbulento, los trabajos de Reynolds fueron trascendentales para calcular las pérdidas de carga.

Multifacético e incansable, lleva varias investigaciones al mismo tiempo. En 1886 formuló una teoría de la lubricación. Tres años más tarde produjo un importante modelo teórico para un flujo turbulento que se ha convertido en herramienta matemática utilizada en el estudio de este tipo de flujo. Sin dudas, Reynolds fue un investigador sobresaliente. Sus trabajos nunca estuvieron motivados por intereses financieros.

Sus últimos años de vida

Ya enfermo desarrolló una teoría del universo bajo la hipótesis de que se trataba de un conjunto de esferas en contacto mutuo, este fue su escrito menos lúcido, ya su talento comenzaba a fallar.

En 1905, ya la salud no le permite continuar como conferenciante y se retira. El final de una vida tan brillante, fue triste. Aún sin haber cumplido los 60 años, su salud comenzó a fallar no sólo físicamente, sino también y aún peor, mentalmente. Falleció en 1912 en Watchet, Somerset, Inglaterra.

CONCLUSIONES

- La Revolución Industrial fue escenario propicio para el desarrollo de las investigaciones hidráulicas en el Reino Unido durante el siglo XIX.
- El nombre de Froude ha estado asociado con leyes de similitud que no estableció y un número adimensional que nunca usó. No obstante, fue pionero en el uso de los modelos hidráulicos e investigador sobresaliente que merece un lugar entre los más destacados de los científicos británicos.
- Por ironías de la historia, el nombre de Manning pasa a la posteridad como creador de una fórmula que tuvo muchos padres que le precedieron y de la que además se retractó.
- De acuerdo con la bibliografía consultada Manning, en un primer momento, consideró que el coeficiente C de su fórmula, podía ser considerado como el inverso de n con una buena aproximación, pero luego se retractó.
- La definición del parámetro que hoy conocemos como Número de Reynolds constituyó un paso trascendental en el camino para calcular las pérdidas de carga en tuberías.

- Investigador multifacético, Reynolds estudió distintos temas relacionados con la Física y la Ingeniería. Fue también un destacado profesor, de los primeros en ocupar una cátedra de ingeniería civil y mecánica en el Reino Unido.

REFERENCIAS

- Bertrand J. L.** (2006). “Manning Robert”. Short Historical Dictionary on Urban Hydrology and Drainage. JLBK PRO. Lyon. Francia, extraído de: jlbkpro.free.fr/_iserv/dlfiles/dl.php?ddl=manning.pdf en septiembre de 2018
- Hobsbawm E.** (1977). “La Revolución Industrial, 1780 – 1840”. Industria e Imperio Cap. 3. Ed. Ariel, Barcelona, España, extraído de: https://catedravaldes.files.wordpress.com/.../hobsbawm_eric_j-1968-industria_e_impe en octubre de 2018
- Jackson J. D.** (1995). “Reynolds the Engineers”. Osborne Reynolds, scientist, engineer and pioneer. Centre for the History of Science, Technology & Medicine, Londres, UK, extraído de: <https://personalpage.manchester.ac.uk/staff/jdjackson/OsborneReynolds/oreyncc.ht=OS428> en octubre de 2018.
- Levi E.** (1991). “Robert Manning y su fórmula” Ingeniería Hidráulica en México / septiembre – diciembre de 1991 IMTA. CNA, México, extraído de: www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/download/655/576 en septiembre de 2018.
- Levi, L.** (2001). “El agua según la ciencia” Avances en Hidráulica 8. AMH, IMTA, México, extraído de: http://www.repositorio.imta.mx/bitstream/20.500.12013/972/1/IMTA_029.pdf en agosto de 2018.
- Obituario** (1880). “William Froude” Grace’s Guide to British Industrial History. Grace’s Guide, UK, extraído de: https://www.gracesguide.co.uk/William_Froude en septiembre de 2018
- Pérez Franco D.** (2000). “Evolución histórica de las fórmulas para expresar las pérdidas de carga en tuberías” Ingeniería Hidráulica y ambiental, VOL XXII, No. 2, pp.3 – 7, La Habana.
- Riaño F.** (2014). “El nacimiento de la hidrodinámica Teórica”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 35, no. 2, pp. 66-78. ISSN 1815-591X. Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). Habana.
- Riaño F.** (2016). “La hidráulica experimental durante el siglo XVIII en Francia”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 37, no. 3, pp. 113-126. ISSN 1815-591X. Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). Habana.
- Rouse H. and Ince S.** (1957). “History of hydraulics”. Iowa Institute of Hydraulic Research. State University of Iowa. Iowa. USA.