

La hidráulica experimental durante el siglo XVIII en Francia

Dr. Félix Riaño Valle

Profesor Titular. Vice-rectoría docente.

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana

email: riano@tesla.cujae.edu.cu

RESUMEN

Este trabajo da continuidad a los estudios sobre el nacimiento de la Hidráulica Experimental divulgando los trabajos que se realizan en Francia durante el siglo XVIII. Como resultado tienelugar la fundación de la Escuela Francesa de Hidráulica. Se comentan los aportes de Chézy en el diseño de canales y las circunstancias en que tienen lugar. De igual forma brinda información de las contribuciones de Bossut y Du Buat para calcular las pérdidas de carga en orificios y tuberías, así como de la invención del tubo de Pitot. Los aportes a la hidráulica de Borda y Coulomb, poco conocidos en ese ámbito, también se destacan. El estudio presenta aspectos interesantes de la vida de estos hombres, indispensables en el estudio de esta ciencia.

Palabras clave: Chezy, Du Buat, experimental, hidráulica, historia.

The experimental hydraulics during 18th Century in France

ABSTRACT

This article is a continuation of the studies about the birth of Experimental Hydraulics by accounting for the works that were being done in France during the 18th century. As a result, the foundation of the French School of Hydraulics took place. Besides, Chezy's contributions are commented as well as the circumstances under which they happened. At the same time, it gives information about Bossut and Du Buat's contributions to calculate the head loss in orifices and pipes as well as about the invention of Pitot's tube. The Borda and Coulomb's contributions, which are not well-known in that field, are also highlighted. This article presents very interesting aspects of these men's lives that are essential in the study of this science.

Keywords: Chézy, Du Buat, experimental, hydraulics, history.

INTRODUCCIÓN

En un trabajo anterior (Riaño 2015) se hizo un estudio de los contextos en los cuales se desarrolla el nacimiento de la Hidráulica Experimental. También trató acerca del origen e incipiente desarrollo de la Hidráulica como ciencia con la incorporación de la observación y experimentación como la base del razonamiento científico. Los aportes más sobresalientes de sus principales exponentes en los siglos XVI y XVII encabezados por Leonardo Da Vinci y Galileo Galilei fueron divulgados. Ambos son considerados fundadores de la escuela italiana de hidráulica.

Esta forma de pensar y valorar los fenómenos deviene importante corriente cultural e intelectual que tiene su máximo esplendor en Francia durante el siglo XVIII. El movimiento conocido como la Ilustración tiene como fundamento el razonamiento. Esta tendencia influyó en todas las ramas del saber y fue particularmente fecunda en el campo científico.

Es este el ambiente en el que se desarrollan los acontecimientos que ocupan la atención de este ensayo. El artículo da continuidad a los estudios sobre el nacimiento de la Hidráulica Experimental dando a conocer las investigaciones que se realizan en Francia en ese período. Lo anterior da lugar a la fundación de la Escuela Francesa de Hidráulica, considerada la de más prestigio en Europa a finales de ese siglo.

Se analizan los verdaderos aportes de Chézy, el primero en plantear un fundamento, una fórmula de resistencia al movimiento del fluido en régimen uniforme. Expresión válida tanto para canales como para tuberías, que incorpora por primera vez la relación área mojada – perímetro mojado. De igual forma se brinda información de las contribuciones de Bossut y Du Buat para calcular las pérdidas de carga en orificios y tuberías.

La validez de la idea básica en que se fundamentó la “máquina” de Pitot para medir el valor de la velocidad del flujo y lo errático de su evaluación teórica son dadas a conocer. Las contribuciones de Borda a la Mecánica de los Fluidos también se destacan. Los aportes de Coulomb a la resistencia sobre cuerpos sumergidos en líquidos diferentes son difundidos. En todos los casos se tratan aspectos interesantes de la vida de estos hombres en algunos casos muy poco reseñados por la literatura especializada. No constituye objetivo de este trabajo la explicación detallada de los aportes presentados.

Resumir los trabajos más sobresalientes en el campo de la Hidráulica Experimental durante el siglo XVIII en Francia es una tarea compleja. Lo lejano en el tiempo de los acontecimientos analizados así como la escasez de artículos que tratan el tema con un enfoque histórico la hace muy difícil. Sin embargo, la importancia del papel que puede jugar la historia en la enseñanza de la hidráulica, motiva a enfrentarla.

Para la comunidad académica y los profesionales que tienen que ver con la ingeniería hidráulica, la información que se brinda de manera resumida, propicia la divulgación de aspectos poco conocidos y a veces mal interpretados de su desarrollo. En particular para los que, como el autor, se dedican a la enseñanza, tratar aspectos del contexto y de la vida de los hombres, contribuirá a una mejor comprensión y mayor motivación de las clases.

Como en trabajos anteriores, los informes de la época referidos al tema, fueron tomados del libro *History of Hydraulics* de Hunter Rouse y Simon Ince (Rouse and Ince 1957). De igual

manera las valoraciones de los autores del mismo han sido de inestimable importancia. Esta obra constituye un referente obligado para los estudiosos de la hidráulica.

HENRI DE PITOT: LA “MÁQUINA” PARA LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AGUA

Durante la primera mitad del siglo XVIII vieron la luz dos instrumentos de medición de suma importancia para el desarrollo de la hidráulica experimental: el piezómetro usado por Bernoulli para determinar la presión del agua (Riaño 2014) y el tubo de Pitot para medir su velocidad.

Henri de Pitot (1695 – 1771) muy conocido entre los hidráulicos, nació en Aramon en el suroeste de Francia. En su niñez mostró poco interés por los estudios pero se cuenta que luego de leer un libro sobre geometría su actitud cambió radicalmente. Quedó fascinado por el rigor de las demostraciones y la riqueza de los razonamientos (Lescure S/F). Ya a los 20 años, Pitot era un ávido estudiante de las ciencias físicas y matemáticas bajo la dirección de Reaumur en París.

Su vida profesional la desarrolló en Languedoc como superintendente del canal de Midi donde se mantuvo hasta su muerte. A pesar de que realizó estudios sobre diversos temas, fue esencialmente un ingeniero hidráulico, allí ejecutó obras de drenaje, edificó puentes y construyó acueductos. También realizó obras para mejorar la protección contra inundaciones. Su obra mayor es la construcción del acueducto de Saint Clement en Montpellier. Además realizó estudios de estructuras, geodesia, astronomía y matemática. Como muchos otros ingenieros de la época, era militar.

Fue miembro de la Real Sociedad de Londres y de la Academia de Ciencias de París. Muchos de sus conceptos sobre el movimiento del agua fueron considerados fallidos por los miembros de la Academia. Pitot aceptó sin cuestionamientos las conclusiones erróneas de Parent sobre la fuerza sobre los álabes de los molinos de viento y del punto máximo del rendimiento de las ruedas de agua. A pesar de esto, fue uno de los ingenieros franceses más destacado de la primera mitad del siglo XVIII.

En 1732 presentó su artículo “Descripción de una máquina para medir la velocidad del agua” que contenía una invención que le daría permanente reconocimiento. La máquina de Pitot consistió de un marco con dos tubos paralelos y 4 grifos, uno de los tubos era recto y el otro con su extremo doblado a 90 grados. Sumergió la base del instrumento en el flujo del agua a la profundidad deseada y cerrando los grifos dentro del instrumento midió la diferencia entre las dos columnas de agua. Para evaluar la velocidad a partir de la carga diferencial medida aplicó la práctica tradicional de establecer una proporción en términos de la velocidad de caída libre de un cuerpo luego de transcurrido un segundo-el valor equivalente de esta velocidad para la época, era de 9,6 m/s.

Pitot mismo reconoció:

“La idea de esta máquina es tan simple y natural que en el momento en que la concebí corrí inmediatamente al río para hacer el primer experimento con un tubo de vidrio y resultó confirmada completamente mi suposición. Después de este primer experimento yo no podía imaginar que algo tan simple y a la vez tan útil podría escapar de tanta gente capacitada que han escrito y trabajado en el movimiento del agua”.

Como ha ocurrido con otras invenciones, la evaluación teórica sobre el funcionamiento del instrumento era errónea (Rouse and Ince 1957) Pitot explicó y escribió la ecuación (1):

“Ahora, de acuerdo con los experimentos, la percusión perpendicular de un fluido infinito contra un plano en reposo es esencialmente igual al peso de una columna de este fluido, el cual tiene por base la superficie impactada y por altura la altura de la velocidad con la cual el impacto tiene lugar. Entonces si P es esta percusión, s^2 la superficie, h la altura debida a la velocidad, y w el peso específico del fluido, nosotros tenemos aproximadamente:

$$P = ws^2h \quad (1)$$

h puede ser determinada por las leyes de la caída de cuerpos pesados.”

Como se aprecia, sus razonamientos estuvieron lejos de la verdadera evaluación teórica del problema. En el uso del tubo recto con su extremo abierto para medir la presión no se acercó a la correcta interpretación del principio del piezómetro establecida por Bernoulli. Faltaban aún varios años para que se alcanzara la verdadera conceptualización del problema.

Como se puede entender, Pitot utilizó su “máquina” usando como líquido manométrico el agua por lo que, empleó tubos de un largo equivalente de hasta 1,80 m para poder medir las presiones usualmente encontradas en la práctica. Para simplificar el uso del instrumento, preparó un conjunto de tablas con un número significativo de mediciones de h , calculando el tiempo correspondiente y de aquí el valor de la velocidad del agua.

Murió en su tierra natal a los 76 años. Su amigo Grandjean de Foucher en la despedida de duelo lo calificó como un hombre modesto, de poco hablar pero preciso y justo en sus reflexiones. Era considerado de un desinterés a toda prueba (Lescure S/F).

ANTOINE CHEZY: SUS VERDADEROS APORTES

A principios del siglo XVIII, el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías y de la velocidad de circulación en conducciones libres acaparan la máxima atención. En Versalles, Claude Antoine Couplet (1642 – 1722) realiza mediciones para determinar la resistencia en cinco tuberías de diámetros entre 4 y 18 pulgadas con longitudes equivalentes de entre 800 y 1600 metros aproximadamente. Son estas las primeras investigaciones de este tipo que han quedado registradas.

Por otra parte, continuando los esfuerzos de la escuela italiana de hidráulica en el estudio del flujo en canales abiertos (Riaño 2015), otros países trabajan también en este tema. En 1749, en Ámsterdam, Cornelius Velsen publicó un artículo donde llegaba a la conclusión de que la velocidad de circulación en un canal abierto era proporcional a la raíz cuadrada de su pendiente.

A pesar de lo efectivo del planteamiento, su fundamento no era correcto por el hecho de estar basado en una aplicación equivocada del Teorema de Torricelli sobre la circulación del agua. También por esa época, el alemán Albert Brahan había escrito que la deceleración provocada por el cauce en el flujo uniforme de un canal, era proporcional al cuadrado de la velocidad, pero no llega a formular una relación de resistencia (Rouse and Ince 1957).

Así de dudosa era la situación a mediados del siglo XVIII, en relación con el diseño de canales y en particular, lo referido al cálculo del valor de la velocidad del agua y su gasto en función de la pendiente del canal y las características de la sección.

Es en este contexto que tienen lugar las contribuciones de Chèzy, a juicio del autor de este trabajo una de las más sobresalientes de la Hidráulica Experimental.

Antoine Chèzy nació en Chalon-sur-Marne, Francia, en 1718. De familia de buena posición, estudió y fue maestro de una escuela parroquial local. A los 30 años comienza sus estudios en la que más tarde sería la Escuela de Caminos y Puentes de París, graduándose con honores. Esta escuela, fundada en 1746, en poco tiempo ganó reconocimiento internacional. Bajo la dirección de Perronet, su primer director, Chèzy realiza trabajos en la construcción e inspección de puentes y calles de París y forma parte de su claustro.

En 1760 la Academia de Ciencias había sido consultada por la Administración de París acerca de la pobre operación de las bombas y de la falta de suministro de agua a la ciudad y se crea una comisión para estudiar el problema.

Las recomendaciones, entre otras, proponen la utilización del río Yvette como fuente adicional de abastecimiento aprovechando que el mismo corre a una altura mayor que la ciudad. No es hasta 1768 que se decide iniciar el proyecto, encargándose a Perronet y a Chèzy de llevarlo a cabo.

A Chèzy se le encomendó la tarea de diseñar la sección transversal del canal y calcular el gasto que circularía. Debido a la falta de información al respecto, decide iniciar su propia investigación. Un extracto del reporte de Chèzy conservado en los archivos de la Escuela de Caminos y Puentes (Rouse and Ince 1957) plantea:

“Cuando uno tiene que transportar un flujo de agua para suministrar a algún lugar donde no hay o drenar un terreno donde hay demasiada, uno está casi siempre obligado a lograr el mayor flujo de agua con la menor pendiente posible.

Después, teniendo diseñado el canal y teniendo bien ajustado y regulada su pendiente es muy importante conocer si el canal será suficiente para el gasto que se desee que circule. Para ello es necesario conocer la velocidad del agua que fluye por el canal, el cual uno asume que tiene pendiente uniforme.

Este no es un problema del valor de la velocidad inicial e instantánea la cual puede ser muy grande si es causada por una carga de agua, o muy pequeña si resulta de alguna otra causa que no sea la pendiente del canal. Cualquiera que sea la velocidad inicial, ésta disminuye o aumenta suficientemente rápido para convertirse en una velocidad uniforme y constante, la cual es debida a la gravedad y a la pendiente del canal, cuyo efecto es contenido por la resistencia de la fricción contra los contornos del canal. Esta es la velocidad que hay que conocer, al menos aproximadamente.

El problema entonces propuesto, presenta por sí mismo la solución, es evidente que la velocidad debida a la gravedad actúa continuamente (se excluye que pueda venir de cualquier otra causa y en todo caso será pronto destruida y no intervendrá en el problema) es solamente uniforme cuando no hay aceleraciones y la gravedad no cesa de acelerar hasta que su acción se

hace igual a la resistencia ocasionada por los bordes del canal y esta resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad al considerar el número y la fuerza de las partículas chocando en un tiempo dado, esto es en la parte del perímetro de la sección de flujo que toca los contornos del canal. Se desprecia la resistencia del aire contra la superficie libre.

Entonces llamando V al valor de la velocidad y a aquella parte del perímetro P , la resistencia debida a la fricción será entonces VVP .

Por otra parte, el efecto de la gravedad actúa contra el área de la sección de la corriente y la pendiente del canal o la altura que desciende en cada tramo de longitud. Llamando entonces al área de la sección transversal A y a la pendiente del canal H , el efecto de la gravedad será AH .

Entonces suponiendo que por observaciones precisas uno conoce:

Pendiente del canal..... H
 Área de la sección del flujo..... A
 Velocidad..... V
 Parte de la sección del flujo tocando los bordes del canal P

Podría entonces ser fácil encontrar la velocidad v de otro canal del cual uno conoce:

La pendiente..... h
 El área de la sección..... a
 La parte del perímetro definido..... p

Pueden entonces plantearse las ecuaciones (2) y (3).

$$\frac{VVP}{AH} = \frac{vvp}{ah} \quad (2)$$

$$VVP \times ah = vvp \times AH \quad (3)$$

Y despejando se obtiene la ecuación (4).

$$v = V \sqrt{\frac{Pah}{pAH}} \quad (4)$$

Se aprecia que para hacer uso de esta fórmula (4) se requiere de observaciones en las cuales todo es conocido.

Podría también ser interesante tener datos sobre diferentes corrientes, pero es importante señalar que todas esas observaciones requieren del mayor cuidado, lo cual dificulta hacerlo con suficiente precisión y que uno deberá contar solo con aquellas hechas por gente conocida para darle la más escrupulosa atención”.

Hasta aquí la traducción del contenido del informe.

Como se ha visto la ecuación tiene como fundamento la igualdad entre las fuerzas de resistencia al movimiento del fluido y la fuerza de la gravedad propias del régimen uniforme.

Por primera vez se establece el parámetro área mojada/perímetro mojado. Esta relación, de suma importancia, caracteriza la geometría de las secciones y permite que la fórmula pueda ser usada tanto en conducciones libres como forzadas. El término se conoció posteriormente como Radio Hidráulico.

La fórmula de Chézy, tal como la conocemos hoy incluye un coeficiente dimensional. Debe destacarse que la formulación original considera una simple comparación entre dos corrientes de agua trabajando en régimen uniforme que tienen similares características. Todo indica que la expresión $V = C\sqrt{RS}$ se debe a una nota posterior en la que él redujo el término de la izquierda de su primera ecuación (VVP/AH) a una constante para simplificar los cálculos. En ningún momento planteó, como algunos han supuesto, que era una constante para todas las corrientes. Incluso él mismo encontró variaciones de una corriente a otra. Tales son los casos de los coeficientes encontrados por Chézy en su estudio sobre el canal de Courpalette. Para determinar la C trabaja con dos corrientes: la de Gibonnière, canal más regular, revestido de madera y rectilíneo donde calcula un valor para C de 31. Y el caso opuesto, un tramo del río Sena donde encuentra un valor de C de 44. Para calcular el gasto por el canal de Courpalette usa este último valor (Pérez S/F). De esta manera se demuestra que Chézy tuvo en cuenta tanto las características geométricas de la sección del canal como las de su cauce para calcular el valor de la velocidad.

La ecuación estuvo olvidada por más de 30 años. Fue dada a conocer a inicios del siglo XIX por los ingenieros Girard y Prony. Despierta más interés en Alemania donde fue usada por este último por primera vez en 1801 donde sugiere, erróneamente, que C era una constante universal. No es hasta finales del siglo XIX que alcanza popularidad cuando Clemens Herschel, ferviente admirador de Chézy, hace la traducción de sus reportes y los divulga en América. Por esto no tuvo un gran impacto en el desarrollo de la Hidráulica de su tiempo (Rouse and Ince 1957).

No obstante, tiene el gran mérito de ser la primera ecuación conocida para el cálculo de las pérdidas de carga. Las conclusiones a las que llegó Chézy siguen teniendo total vigencia.

Aunque en sus orígenes fue encontrada para calcular la velocidad del agua en conducciones libres, es importante saber que también fue empleada por Chezy para evaluar problemas de flujo en tuberías. En ese caso consideró el radio hidráulico como la cuarta parte del diámetro de la tubería.

Después de Chézy las investigaciones han estado dirigidas a encontrar una expresión para C capaz de caracterizar la influencia de la rugosidad de las paredes de la conducción en cuestión. Tales son los casos de los trabajos de Ganguillet, Kutter, Darcy, Bazin, Manning y Strickler entre otros.

Los últimos años de su vida transcurrieron en la mayor pobreza. Fue jubilado en 1790 con un salario tan reducido que no le alcanzaba para cubrir las necesidades más apremiantes de su familia. Su miseria era tal que se dice tuvo que vender el relleno de su colchón.

Por gestiones de sus alumnos reingresa al claustro de la Escuela de Caminos y Puentes donde es socorrido con alimentos y abrigo. Poco tiempo antes de su muerte su ex-alumno Prony logró que se le designara Director de la Escuela. Falleció en 1798.

CHARLES BOSSUT: EL SACERDOTE CIENTÍFICO

Bossut (1730 – 1814) no fue un niño feliz en su primera infancia. A los seis meses de nacido perdió a su padre y fue enviado a un orfanato. Allí vivió hasta los seis años en que un hermano de su padre lo llevó consigo a su casa. Fue educado en el Colegio Jesuita de Lyon donde ingresó a los catorce años.

Allí comenzó su formación en matemática con el reconocido maestro Père Béraud. Luego continuó sus estudios religiosos convirtiéndose en el Abbè Charles Bossut.

Su talento precoz pronto despertó la admiración de dos prestigiosos matemáticos: Clairaut y D'Alembert. Ayudado por estos, con solo 22 años, fue designado profesor de matemática en la escuela de ingeniería militar de Mézières. Borda y Coulomb fueron sus alumnos. Bossut fue famoso por la escritura de libros de texto de matemática que fueron usados en toda Francia. El más famoso fue "Courscomplet de mathematiques" escrito en 1765 (O'Connor and Robertson 2006).

Matemático brillante, contemporáneo de Euler y Bernoulli, compartió distinciones con ellos. Con el primero, un premio de la Academia de Ciencias de París y con el segundo otro de la Academia de Lyon. Desde 1768 fue miembro de la Academia de Ciencias. Ocupó la cátedra en hidrodinámica en el Louvre creada para él.

El período de la Revolución fue muy difícil para Bossut. Perdió posición y propiedades que nunca logró recuperar totalmente. Se retiró de la vida pública abandonando su hábito de sacerdote temporalmente.

Quizás su contribución más importante a la hidráulica fue como maestro. En su etapa de profesor en Mézières declaró que su responsabilidad era "enseñar a los jóvenes ingenieros la mecánica de los fluidos, la cual es necesaria para su profesión". Es así el primero que introduce esta disciplina en los estudios de ingeniería. En 1771 escribió un "Tratado elemental de hidrodinámica" en dos volúmenes el cual fue ampliado y publicado en dos ocasiones. El mismo es dividido en tres partes: Hidrostática, Hidráulica Teórica y la Hidráulica Experimental. En esta última estudia con profundidad el flujo de agua por orificios y destaca la importancia de considerar el rozamiento contra sus paredes. También estudia el movimiento del agua en canales y ríos. Aunque su título es hidrodinámica en realidad los aspectos tratados son de hidráulica.

El primer volumen era original solo por su ordenamiento y tratamiento de los temas, pero brindaba el estado del conocimiento sobre la hidráulica de su tiempo, al menos como él la veía. El segundo volumen era totalmente novedoso. Sus comentarios acerca de la dificultad de los experimentos a gran escala contra la falsedad de aquellos a escala demasiado pequeña tienen hoy total vigencia (Rouse and Ince 1957). Consideraba que la teoría y la experimentación eran sus dos guías principales que se apoyaban una a la otra.

De particular importancia fueron sus experiencias acerca del comportamiento de 26 tuberías nuevas de hojalata con diámetros entre 1 y 2 pulgadas parisinas (una pulgada parisina equivale a 2,707 cm) donde establece que la velocidad media U , es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la rasante hidráulica J , es decir que las pérdidas de carga por unidad de longitud eran proporcionales al cuadrado de la velocidad. (Pérez Franco 2001).

Bossut, junto a D'Alembert y Condorcet, dirigió diferentes estudios acerca de la resistencia de los fluidos sobre cuerpos de diferentes formas. Estas investigaciones eran dirigidas a mejorar el sistema de navegación dentro del país. Eran tomados en cuenta tanto la forma como las proporciones de la sección transversal. Las investigaciones fueron hechas en tanques de ensayo de 100 pies de largo, 50 pies de ancho y siete pies de profundidad. La principal conclusión a que arribaron fue que la resistencia sobre los cuerpos aumenta en la medida en que los canales son más estrechos. Esto ya había sido demostrado por Benjamín Franklin en tanques de prueba en miniatura.

En 1802, es publicado un nuevo libro de Bossut en dos volúmenes, "General History of Mathematics from the Earliest Times to the Middle of the Eighteenth Century" donde, en su capítulo V, hace un interesante estudio sobre la famosa disputa entre Newton y Leibniz sobre la invención del cálculo diferencial (O'Connor and Robertson 2006).

Los últimos años de su vida los pasó solo y alejado de la familia. Nunca se casó ni tuvo hijos. A pesar de que fue reacio a la compañía de la gente fue reconocido por su trabajo en muchas academias científicas. Fue miembro de la Academia de Ciencias de San Petersburgo, Turín y Bolonia.

JEAN CHARLES BORDA: INGENIERO Y CIENTÍFICO

Borda (1733 – 1799), tuvo la pericia poco común de ser capaz de resolver variados problemas de la práctica ingenieril y también la tenacidad y el rigor propio de un científico.

Nació en la ciudad de Dax en el seno de una familia de la nobleza, tuvo quince hermanos. A los veinte años vio la luz su primer Tratado de Geometría y elegido socio de la Academia de Ciencias de París. Allí presentó una memoria sobre la teoría de proyectiles.

Luego de ejercer por un breve período como maestro de matemática comenzó su carrera profesional como ingeniero militar en la marina francesa. Participó en la guerra por la independencia de Estados Unidos. Fue navegante y constructor de barcos y puertos. Realizó pruebas sobre la resistencia de los cuerpos en el agua, estudió problemas de balística y finalmente se dedicó a experimentar en hidráulica y máquinas hidráulicas.

Borda formó parte del comité para el establecimiento de un nuevo sistema de medidas. A él se debe el uso de la palabra "metro" para definir la unidad de longitud en términos de un arco del meridiano en el Sistema Métrico Decimal.

En 1763 presenta a la Academia de Ciencias de París su trabajo "Experiencias sobre la resistencia de los fluidos". Desarrolla pruebas en el aire usando un brazo rotatorio y en 1767 presenta un artículo con el mismo nombre describiendo pruebas similares en agua.

En estos experimentos trabajó no solo con esferas y platos como era común en la época, sino también con prismas, cilindros, conos y cuñas. En sus pruebas verificó que la fuerza de arrastre en un cuerpo sumergido era proporcional al cuadrado de la velocidad relativa y demostró que podría ser mayor si existían ondas en la superficie del agua. Fue incapaz de correlacionar sus mediciones en términos del área de la sección transversal y la densidad.

Contrario a la teoría en boga en ese momento, probó definitivamente que la forma del cuerpo tenía una influencia decisiva en el valor de la fuerza de arrastre. Sin embargo, inexplicablemente, apoyó la idea falsa de que la esfera y la semiesfera colocadas con el lado convexo contra la corriente de agua ejercían la misma fuerza de arrastre. Aseguraba erróneamente, que la forma frontal (más que la de atrás) era la más importante en la definición de la resistencia del cuerpo (Rouse and Ince 1957).

A pesar de que realizó aportes significativos a la ingeniería hidráulica, Borda es muy poco conocido en este ámbito. Fue el primero en utilizar el término $2g$ al considerarlo para calcular la velocidad de salida del agua por un orificio. De igual forma a él se debe la introducción del concepto “tubo de corriente” en lugar de “rebanadas” (slices) usada por Bernoulli.

En sus experimentos demostró que no solo la contracción del chorro afecta el gasto de salida por un orificio sino que también las pérdidas de energía eran importantes. Propuso el uso de un aditamento en forma de tubo abocinado para disminuir las pérdidas de carga en la salida de un tanque.

Su nombre se encuentra con el número 66 en la lista de 72 científicos e ingenieros franceses con aportes relevantes, grabados en la Torre Eiffel.

PIERRE LOUIS GEORGES DU'BUAT: EL FUNDADOR DE LA ESCUELA FRANCESA DE HIDRÁULICA

Du' Buat (1734 – 1809), contemporáneo de Borda y Bossut, es para muchos el fundador de la escuela francesa de hidráulica y simboliza al típico ingeniero de la época. Nacido en el seno de una familia de la nobleza adquiere el título de conde luego de la muerte de su hermano mayor. A los 17 años inicia su carrera militar y llega a alcanzar el grado de coronel. En 1758 se casó y tuvo 11 hijos.

Sus primeros proyectos hidráulicos estuvieron relacionados con canales, costas, puertos y fortificaciones en el norte de Francia. En 1779 publicó la primera edición de su principal trabajo “Principios de hidráulica” que fue aumentado en 1786 a dos volúmenes. El primero era analítico, el segundo daba los resultados de sus trabajos experimentales, los cuales resultan los más novedosos.

Como Borda, introduce el término $2g$ para calcular la velocidad de salida del agua por un orificio. Plantea que las pérdidas de carga por entrada de una tubería con esquinas abruptas reducen la velocidad efectiva y provocan un incremento de las pérdidas de carga.

Acepta que la resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad e igualándola a la fuerza gravitacional en la dirección del flujo obtiene la expresión equivalente $V^2 = mgS$ donde el factor m es obtenido de datos experimentales y S es la pendiente de la rasante de energía. Además razona que la pendiente de una tubería de una longitud dada bajo una carga determinada no influye sobre las pérdidas.

Concluye, como Chèzy, que la relación entre el área de la sección transversal y el perímetro mojado, estaba involucrada con la primera potencia. El llamó a esta cantidad, radio medio, R . Sin

embargo señaló que, de acuerdo con sus experimentos, la potencia de la velocidad era ligeramente menor que 2.

Entonces su formulación final contiene un factor de corrección empírica para hacerla coincidir con sus datos. Los resultados de su fórmula convertida al sistema métrico tuvo la compleja forma (Rouse and Ince 1957) de la ecuación (5).

$$V = \frac{49\sqrt{R} - 0,8}{\sqrt{1/S} - \ln\sqrt{1/S} + 16} - 0,05\sqrt{R} \quad (5)$$

Los resultados de sus 200 experimentos sobre flujo en tuberías, canales artificiales y corrientes naturales fueron usados por ingenieros de varias generaciones como base para proponer nuevas fórmulas para calcular las pérdidas de carga (Pérez Franco 2001).

Igualmente novedosos fueron sus trabajos sobre cuerpos sumergidos. Demostró que los experimentos realizados en aire y agua podrían ser correlacionados en términos de la densidad relativa.

Du Buat realizó 100 mediciones sobre la distribución de presiones alrededor de un cuerpo sumergido y propuso una nueva forma de la “máquina” de Pitot para medir la velocidad del agua (CDSB 2008).

Fue el primero en demostrar y defender la idea de que la forma del cuerpo era tan importante para controlar la resistencia como la parte frontal.

Así mismo, razonó que el fluido en contacto con los bordes formaba una capa sobre la cual se desliza el resto del fluido. De esta manera los diferentes contornos de los materiales no tienen influencia en la resistencia. Por estos razonamientos es considerado un precursor de la teoría de la capa límite.

Si tomamos en consideración que, como se ha dicho, el reporte de Chèzy sobre el río Yvette no era conocido aún, entonces Du Buat merece todo el reconocimiento por la originalidad de sus aportes.

Al triunfo de la Revolución pierde su título nobiliario y sus propiedades y es forzado a escapar a Bélgica. Estudioso incansable, el exilio obligado no le impide continuar sus trabajos de investigación y escribe un tercer volumen de su libro.

En 1802 regresa a Francia y una parte de sus propiedades le son devueltas. Sus últimos años los dedicó a la revisión y ampliación de su obra más trascendental: “Principios de hidráulica” (Principes d’hydraulique) publicada póstumamente en tres volúmenes en 1816.

En las tres ediciones del libro se destaca su excelente crítica sobre el estado del arte, en particular de los numerosos e importantes tópicos sobre hidráulica de los cuales poco o nada era conocido.

Los trabajos de Du`Buat tuvieron una gran influencia para las generaciones posteriores de ingenieros hidráulicos, sus investigaciones fueron conocidas tanto en Europa como en América.

La segunda edición de su tratado fue traducido al alemán y al inglés. Muestra de su prestigio es que esta última le fue enviada a George Washington.

En reconocimiento, el presidente de Estados Unidos de América, le remitió una carta agradeciéndole el gesto y prometiéndole leer su contenido (GW 1788).

CHARLES AUGUSTIN COULOMB: UN HIDRÁULICO POCO CONOCIDO

Coulomb (1736 – 1806) considerado el más importante de los físicos franceses se immortalizó por sus aportes en el campo de la electrostática.

Sin embargo, pocos conocen que realizó significativos aportes a la hidráulica y ocupó importantes responsabilidades públicas relacionadas con esta esfera. Fue consultor para la construcción de canales y superintendente general para las aguas y fuentes de Francia y finalmente inspector general de instrucción pública.

Nacido en el seno de una familia acomodada, estudió en el colegio de Mazarin donde alcanzó una formación sólida en lenguaje, literatura y filosofía.

De igual forma, recibió lo mejor de la enseñanza disponible en matemática, astronomía, química y botánica. Ingresó en la École du Génie en Mézieres y fue alumno de Bossut. Se graduó en 1761 como ingeniero militar con el grado de primer teniente.

Después de pasar nueve años en las Indias Occidentales como ingeniero militar, regresó a Francia con la salud maltrecha. Tras el estallido de la revolución francesa fue sustituido de sus cargos y se retiró a su pequeña propiedad en la localidad de Blois, donde se consagró a la investigación científica en compañía de su amigo Borda con quien había colaborado en el comité para el establecimiento de un nuevo sistema de pesos y medidas.

Además de sus trabajos sobre electricidad y magnetismo, investigó la resistencia de materiales, mecánica de suelos y las fuerzas sobre vigas. De esta manera contribuyó al desarrollo de la ingeniería civil (O'Connor and Robertson 2000).

Aunque su vida transcurre casi en su totalidad en el siglo XVIII, algunos autores al referirse a sus aportes a la hidráulica lo ubican en el siglo XIX, ya que su mayor contribución está contenido en su memoria publicada en 1800 con el título “Expériences destinées à déterminer la cohérence des fluides et les lois de leur résistance dans les mouvements tres lents”(Experiencias destinadas a determinar la coherencia de los fluidos y las leyes de su resistencia en los movimientos muy lentos) (Rouse and Ince 1957).

En esta obra describe los resultados de las pruebas que realizó sobre diferentes cuerpos sumergidos suspendidos de un alambre de torsión de latón. Correlaciona la disminución de la amplitud de la oscilación con la resistencia usando líquidos de diferentes viscosidades y discos de diferentes rugosidades.

Con el resultado de las mediciones realizadas plantea una expresión de la forma $av + bv^2$ atribuida a Newton a la que dio su propia justificación. Explica que existen dos clases de resistencias: una debida a la coherencia de las moléculas que se separan unas de otras en un tiempo dado y proporcional a su velocidad. La otra debido a la inercia de las moléculas

arrastradas que chocan contra las irregularidades siendo entonces proporcional a su número y a su velocidad y consecuentemente al cuadrado de esa velocidad.

Muy interesante fue la observación de Coulomb de que el cambio en la viscosidad del fluido afecta solo al primer coeficiente y el segundo se mantiene constante para un cuerpo dado. Este importante físico murió en 1806, cinco años después de convertirse en presidente del Instituto de Francia (antiguamente la Academia de Ciencias de París).

Su nombre se encuentra grabado en la Torre Eiffel con el número 44, junto con otras 71 personalidades importantes. Un cráter de la Luna lleva el nombre de Coulomb en su honor.

UNA REFLEXIÓN IMPORTANTE

El siglo XVIII es un período culminante en el desarrollo de la Hidráulica. En él se sintetizan, establecen, sistematizan y se desarrollan todos los conocimientos que sobre la hidráulica se habían acumulado a lo largo de miles de años.

En su segunda mitad nace la Mecánica de los Fluidos, fruto de la unión de la hidráulica teórica y la experimental. Los avances alcanzados en la hidráulica experimental durante el siglo XVIII en Francia fueron determinantes para el ulterior desarrollo de esta ciencia, tanto en Europa como en América.

CONCLUSIONES

- La fórmula originalmente propuesta por Chézy considera simplemente una comparación de dos condiciones de flujo uniforme con características similares. Introduce por primera vez la relación área – perímetro mojado como un parámetro fundamental que permite el uso de las fórmulas de resistencia tanto en conducciones libres como forzadas.
- Todo indica que la expresión $V = C\sqrt{RS}$ como la conocemos hoy, se debe a una nota posterior en la que Chézy redujo el término (VVP/AH) de su primera ecuación a una constante para simplificar los cálculos, pero en ningún momento planteó, como algunos han supuesto, que era una constante para todas las corrientes.
- El descubrimiento del tubo de Pitot para medir la velocidad de una corriente de agua resultó una herramienta fundamental para el desarrollo de la hidráulica experimental en su época.
- La trascendencia de los aportes de Pierre Louis Georges Du' Buat, poco citado por la literatura especializada en esta temática, lo hacen el más relevante de los ingenieros hidráulicos franceses del siglo XVIII.
- Jean Charles Borda, Charles Bossut y Charles Augustin Coulomb, poco conocidos en este ámbito merecen, por sus aportes, un lugar destacado en la historia de la Hidráulica Experimental.

REFERENCIAS

- CDSB** (2008). “Du Buat, Pierre-Louis-Georges”. Complete Dictionary of Scientific Biography, Encyclopedia.com, Chicago, USA, extraído de: <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830901238.htm> en agosto de 2015.
- GW** (1788). “From George Washington to Du Buat”. Carta personal. Archivos del gobierno. Washington. USA, extraído de: <http://founders.archives.gov/documents/Washington/05-01-02-0072ToDuBuat> en noviembre de 2015.
- Lescure M.** (S/F). “La vie et l’oeuvre de Henri Pitot” Conference, PontduGard, Gard, Francia, extraído de: http://www.pontdugard.fr/sites/default/files/documents/conference_pitot.pdf en noviembre de 2015.
- O’Connor and Robertson** (2000). “Charles Augustin de Coulomb” Article, Mc Tutor History of Mathematics, St. Andrews, Scotland, United Kingdom, extraído de: <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Coulomb.html> en noviembre de 2015.
- O’Connor and Robertson** (2006). “Charles Bossut” Article, Mc Tutor History of Mathematics, St. Andrews, Scotland, United Kingdom extraído de: <http://www-history.mcs-st-andrews.ac.uk/Biographies/Bossut.html> en enero de 2015.
- Pérez B.** (S/F). “Algo de luz por fin”.Página web Hidráulica umich, San Nicolás de Hidalgo, México, extraído de: <http://hidraulica.umich.mx/bperez/algodeluz.htm> en febrero de 2015.
- Pérez Franco D.** (2001). “Evolución histórica de las fórmulas para expresar las pérdidas de carga en tuberías”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 22, no. 2, pp. 3-7. ISSN 1680-0338. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). 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.** (2015). "El nacimiento de la hidráulica experimental". Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 36, no. 3, pp. 48-60. 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.