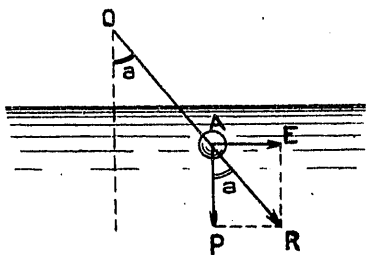


NOTAS SOBRE EL PENDULO HIDRAULICO

Por JOSÉ M.^a PALÁ CATARINEU, Ingeniero de Caminos.

Da cuenta el autor de los experimentos que ha realizado con el péndulo hidráulico para aforo de corrientes, y demuestra la indudable utilidad del sencillo aparato que sugiere.

El llamado "péndulo hidráulico" es un péndulo simple que, sumergido en una corriente de agua, permite deducir la velocidad de ésta del conocimiento del porcentaje de la desviación de la vertical, o talud, adoptado por el hilo del péndulo. El mecanismo de su funcionamiento es bien sencillo, como se ve en la figura: sobre el cuerpo del péndulo, A , actúan su



peso, P , y el empuje dinámico del agua, E ; ambas, compuestas, dan una resultante, R , que para que haya equilibrio debe estar en la prolongación del hilo desviado OA . El talud o porcentaje de desviación de éste es $\operatorname{tg} \alpha$, y en el triángulo rectángulo de las fuerzas de la figura, $E = P \times \operatorname{tg} \alpha$; como P es constante, para un péndulo determinado, del talud del hilo de suspensión deduciremos E . Esta magnitud, también en un péndulo dado, podrá expresarse por $E = S \times f(v)$, siendo S la superficie del contorno aparente del cuerpo pendular respecto de los filetes líquidos. (Evidentemente, para que S no varíe con la inclinación del péndulo, precisa que A sea una esfera, y de este supuesto partiremos en el estudio subsiguiente.) Por lo tanto,

$$f(v) = \frac{P}{S} \times \operatorname{tg} \alpha \quad \text{ó} \quad v = \frac{P}{S} \times F(\operatorname{tg} \alpha) = [1]$$

$$= K \times D \times F(\operatorname{tg} \alpha);$$

siendo D el diámetro de la esfera y K un coeficiente constante para un material determinado de ésta, por

englobar el peso específico de aquél. Experimentalmente, en un péndulo dado se pueden determinar varios valores de v y sus correspondientes de $\operatorname{tg} \alpha$; efectuar su representación en papel cuadrículado, obteniendo un gráfico que relacione la velocidad con el talud, de modo que en los aforos con el péndulo, del valor de éste se deduzca con gran rapidez la velocidad de la corriente de agua.

Así hemos procedido nosotros, utilizando bolas de bronce de 3 y de 6 cm. de diámetro, suspendidas de un sedal de caña de pescar y midiendo cuidadosamente la velocidad con un molinete. Desde luego se comprobó la fórmula [1] en cuanto a la proporcionalidad de v con D , a igualdad de talud del hilo. Esto, que por otra parte parece evidente, es muy importante porque, para grandes velocidades, conviene que el diámetro de la esfera sea considerable, a fin de que la desviación no sea excesiva, correspondiendo a un punto muy aguas abajo y pueda determinarse con facilidad y precisión; la conveniencia se convierte en necesidad si, como es frecuente, la corriente tiene pulsación y el péndulo oscila.

Representando en papel cuadrículado nuestros experimentos, se deduce la relación gráfica de la página siguiente, entre velocidades y desviaciones para un cuerpo de péndulo de bronce de 3 cm. de diámetro.

Los resultados que se acaban de representar, para velocidades mayores de un metro por segundo, son más bien virtuales, porque, desde este valor al de dos metros por segundo conviene emplear bola de 6 cm. para evitar oscilaciones y taludes exagerados. No hemos podido experimentar con velocidades mayores de dos metros por segundo; pero, desde luego, pasando dicho límite, habrá que emplear esferas de bronce de 12 cm. de diámetro.

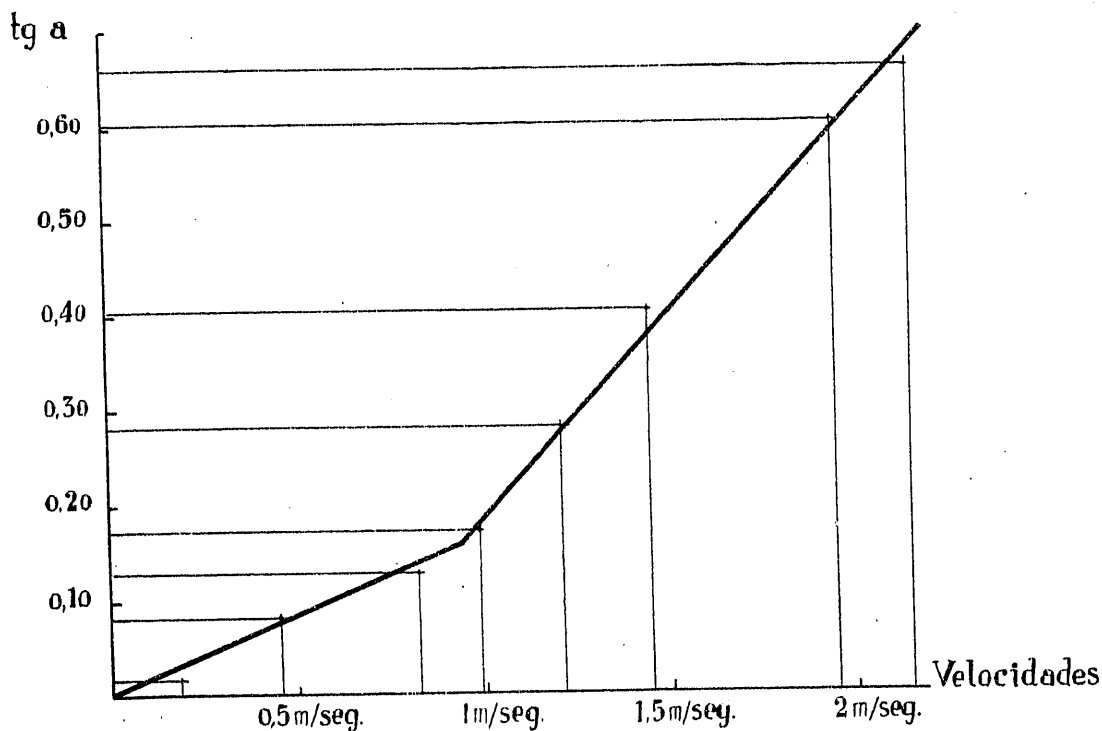
La función $f(v)$, que relaciona el empuje dinámico con la velocidad de la corriente, según los textos de Hidráulica, es lineal para el régimen lento o de Poiseuille, y de segundo grado (fórmula de Newton), para el movimiento turbilionario. Nuestros experimentos confirman lo primero, pero no están de acuerdo con la fórmula segunda, porque tenemos dos rectas,

en lugar de una recta y una parábola. Realmente, ésta será muy abierta y se aproximará mucho a la segunda recta. La fórmula análoga a la de C. W. Oseen, para la caída de esferas en el agua, estimamos es la más exacta, y establece la continuidad entre uno y otro régimen:

$$E = K \cdot D \cdot v \cdot (1 + K' \cdot D \cdot v);$$

siendo K y K' coeficientes; éste es muy pequeño, de modo que el segundo término del binomio sólo tiene

El *modus operandi* con este sencillo aparato se reducirá a medir, en varias verticales de la sección líquida, las desviaciones del péndulo en fondo, media y superficie, con las profundidades correspondientes, para poder dibujar el perfil transversal de las velocidades en dicha vertical. Representando gráficamente la línea horizontal de lámina de agua y poniendo en la vertical de cada perfil transversal, a partir de dicha horizontal, segmentos proporcionales al área de cada respectivo perfil transversal de velocidades, la línea que una los extremos de estos segmentos y la de



un valor apreciable cuando las velocidades son considerables.

Terminamos este apartado referente a los experimentos con el péndulo hidráulico, expresando nuestro agradecimiento a los Ayudantes de Obras Públicas D. Basilio F. Albajar y D. Julio Vico, que nos han ayudado muy eficazmente a realizarlos.

Sería interesante continuarlos intercalando en el hilo del péndulo un dinamómetro para conocer la resultante R , verificando una combinación de este aparato con el taquímetro Brünnings, y también experimentar hidráulicamente con el péndulo compuesto, para llegar a determinar velocidades medias en cada vertical.

lámina de agua darán un perímetro cuya área interior, a una escala determinada, nos dará el caudal de la corriente líquida; es decir, que su empleo es idéntico al del molinete. Al igual que con este aparato, puede tomarse en cada vertical sólo la velocidad correspondiente a $0,60 \times H$ (siendo H el calado), que es aproximadamente la velocidad media en dicha vertical. Lo que es muy difícil con el péndulo operar por integración, como en el molinete.

Por lo tanto, con el péndulo hidráulico todo queda reducido a medir distancias, profundidades y desviaciones. Si sobre la corriente a aforar disponemos de un puente o pasarela, todos los datos anteriores pueden determinarse con facilidad; no sólo las distancias y

profundidades, sino los taludes, dividiendo el desplome del hilo, respecto al pie de la barandilla, por la altura de ésta. Análogo procedimiento puede emplearse utilizando una barca y un cable guía transversal a la corriente. Si se trata de cauces de fondo movedizo, puede resultar interesante, por simplificar la toma de datos, la siguiente propiedad que hemos deducido después de realizar numerosos aforos: dentro de ciertos límites, la velocidad media en una vertical es proporcional al calado; de modo que, teniendo bien determinado el perfil mojado, para verificar el aforo de un curso de agua basta determinar las velocidades medias en varias verticales, estratégicamente escogidas, e interpolar, después, en las que sea necesario, según el principio anterior. (Este principio quizá pueda ser de gran utilidad en el estudio de la Hidráulica fluvial, hoy tan en mantillas.)

En acequias y cauces de poca anchura es fácil disponer un pie vertical, coronado por una barra horizontal en voladizo, desde cuyo extremo superior se lanza el péndulo. Las desviaciones del hilo pueden medirse por una alidada o anteojo que se desplace normalmente al pie vertical, según una barra horizontal distante; por ejemplo, un metro del extremo superior de éste. Las distancias al origen, por los desplazamientos de la parte superior del péndulo, y las profundidades, por los corrimientos del hilo de suspensión.

* * *

Siendo tan rápido y de fácil ejecución el aforo con el péndulo, es raro que no haya tenido mejor aco-

gida en los libros de Hidráulica. Nosotros sólo lo hemos visto citado, pero sin detallar su empleo, en la *Hidrología General Agrícola*, de D. Pedro M. González Quijano; en el conocido *Manual* de Perdoni, y en la Enciclopedia de Espasa. El Ingeniero hidráulico italiano Venturoli (1768-1846) se ocupó con algún detalle de este artefacto; pero al no existir en su tiempo otros aparatos de precisión, como los molinetes, que permitiesen una correcta determinación de la velocidad para tarar el péndulo, impidió, seguramente, que alcanzase el dominio de la práctica operatoria.

Dados los errores del flotador, si la corriente no presenta cierta regularidad, puede darnos en muy poco tiempo idea aproximada del caudal líquido de aquélla.

Sobre todo, en cuencas hidrográficas extensas, con grandes recorridos de locomoción y poco personal en el servicio de aforos, es de aplicación, quizá indispensable, para determinar completamente el régimen de las corrientes más importantes de aquéllas. Así, en el Ebro es casi imposible aforar en las estaciones extremas de la Cuenca, muy distantes de Zaragoza, caudales de estiajes máximos o de avenidas, porque cuando los aforadores lleguen a la estación, después del aviso de los escaleros, ya habrá variado el nivel del río.

En cambio, con pasarela y barandilla, un modesto encargado de escala puede tomar las desviaciones del péndulo, en sitios marcados de antemano, y remitir a la Oficina Central los datos necesarios para calcular el caudal de la corriente.