

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Los vórtices en la hidráulica.
<i>Autor / Adscripción</i>	Enzo Levi Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, (3): 20-30
<i>Fecha de publicación</i>	1990
<i>Resumen</i>	Se presentan contribuciones del autor al estudio de los vórtices y desarrollos posteriores de algunas de ellas: la función de un chorro aplastado convergente o divergente en la creación y alimentación del vórtice, con aplicación al análisis de la erosión en un tanque amortiguador y a la formación de tornados y ciclones; la explicación de la intermitencia de vórtices de bocatoma; la frecuencia de formación de vórtices producidos periódicamente en canales atravesados por un vertedor y, más generalmente, de vibraciones provocadas por la corriente en cuerpos fluidos refrenados; la ley de Strouhal universal y sus aplicaciones a la hidráulica.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1277

Los vórtices en la hidráulica*

Enzo Levi

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA

Se presentan contribuciones del autor al estudio de los vórtices y desarrollos posteriores de algunas de ellas: la función de un chorro aplastado convergente o divergente en la creación y alimentación del vórtice, con aplicación al análisis de la erosión en un tanque amortiguador y a la formación de tornados y ciclones; la explicación de la intermitencia de vórtices de bocatoma; la frecuencia de formación de vórtices producidos periódicamente en canales atravesados por un vertedor y, más generalmente, de vibraciones provocadas por la corriente en cuerpos fluidos refrenados; la ley de Strouhal universal y sus aplicaciones a la hidráulica.

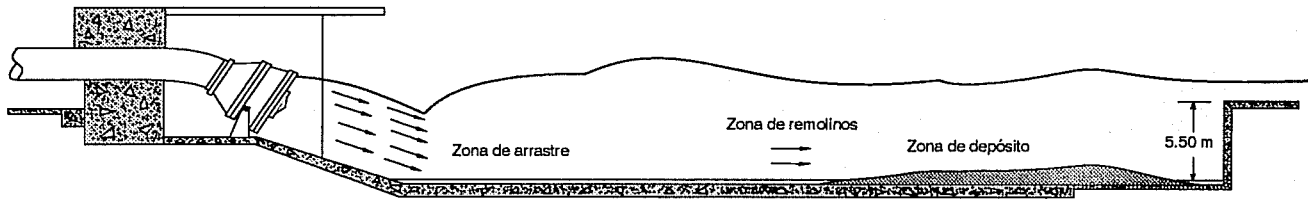
Tuve mi primer encuentro con los vórtices hace aproximadamente 40 años. En aquel tiempo estaba trabajando en el laboratorio hidráulico de la Secretaría de Recursos Hidráulicos en México. Se nos había pedido que halláramos la causa de la falla del revestimiento del tanque amortiguador que recibía la descarga de una válvula de chorro hueco en la presa Alvaro Obregón en Sonora. En el centro del tanque, que tenía 52 m de largo y 5.50 de profundidad, se había socavado un hoyo que penetraba casi un metro dentro del piso de concreto reforzado. Para el estudio, la válvula y el tanque amortiguador se reprodujeron en un modelo hidráulico a escala 1:20, provisto de una serie de piezómetros convenientemente distribuidos. El modelo se operó con diferentes cargas y gastos, pero no se detectaron ni sobrepresiones ni subpresiones sospechosas. Dejamos caer arena fina en el tanque, para definir las zonas de arrastre y de depósito. Como era de esperarse, se halló puro arrastre en la primera mitad del tanque y puro depósito en la segunda (véase ilustración 1). Entre ambas, allí donde había ocurrido el daño, se notaban esporádicamente repentinos movimientos vorticosos. Al hacer mediciones en el prototipo a 1 m de altura sobre el fondo, encontramos que a una distancia aproximada de 16 m de la válvula, el flujo se detenía bruscamente, para luego invertir su dirección.

Supimos más tarde que no se había realizado una limpieza completa del tanque antes de usarlo; algunos fragmentos de concreto no habían sido

removidos, con la esperanza de que la corriente se los llevara. Evidentemente eran estos fragmentos los que, arrastrados por el movimiento rotatorio, habían corroído el revestimiento. En consecuencia, nuestro problema era el de evitar que aparecieran los vórtices, problema que se hubiera resuelto con sólo sumergir la válvula; pero esto no estaba permitido, pues al hacerlo se favorecería la cavitación. La solución que adoptamos fue la de romper el chorro por medio de una reja de cilindros cuatrapeados (véase ilustración 2). La ilustración 3 muestra cómo la curva de las velocidades iniciales a 1 m de altura sobre el piso fue cambiada por la presencia del dispositivo al descargarse 40 y 75 m³/s (Levi y González E., 1952).

Se había eludido la dificultad, pero aún se desconocía la causa que había producido los remolinos. Lo que parecía más extraño era que éstos giraban alrededor de un eje vertical, no horizontal, como parecía más razonable, ya que, si así hubiese sido, el fenómeno se habría podido explicar simplemente como efecto del arrastre del agua quieta del fondo por parte del chorro superior. Además, ¿cuál hubiera podido ser el origen de vórtices verticales en ese sitio? Leonardo da Vinci había escrito: "Frecuentemente, cuando un viento topa con otro formando un ángulo obtuso, ambos giran y se estiran en forma de una gran columna". Es decir, el vórtice vertical nacería por el roce mutuo de corrientes de distinta orientación. El mismo argumento fue repetidamente aducido más tarde por otros. Sin embargo, en este caso el flujo era

1. Zonas de arrastre, sedimentación y rotación en el modelo del tanque amortiguador de la Presa Alvaro Obregón



prácticamente simétrico, y no parecían existir flujos opuestos. Lo mismo ocurre en los vórtices de desagüe, que nacen en un medio totalmente quieto y que —mientras no sean de dimensiones ciclónicas— no se pueden atribuir a la rotación de la Tierra.

Tuvieron que pasar unos 20 años antes de que pudiéramos observar un hecho que nos proporcionó una indicación valiosa para aclarar el asunto. Estaba yo preparando una clase en la que deseaba mostrar a mis alumnos el conocido fenómeno de la vibración espontánea de una boquilla que descarga colocada boca abajo contra el piso. Al preparar el experimento, mi ayudante de entonces, Gabriel Echávez, notó que, si se inclinaba la boquilla manteniendo su extremo sumergido, aparecía un vórtice vertical frente a ella. Cuando se repitió el experimento con una boquilla de 8 mm de diámetro, inclinada en 45°, bajo un tirante de 15 cm de agua (véase ilustración 4), se advirtió que, unos segundos después de abrirse la válvula que controlaba la boquilla, aparecían en la superficie movimientos turbulentos aislados, en forma de vorticillos que giraban en una u otra dirección. En la ilustración 5a pueden verse sus sombras proyectadas en el piso.

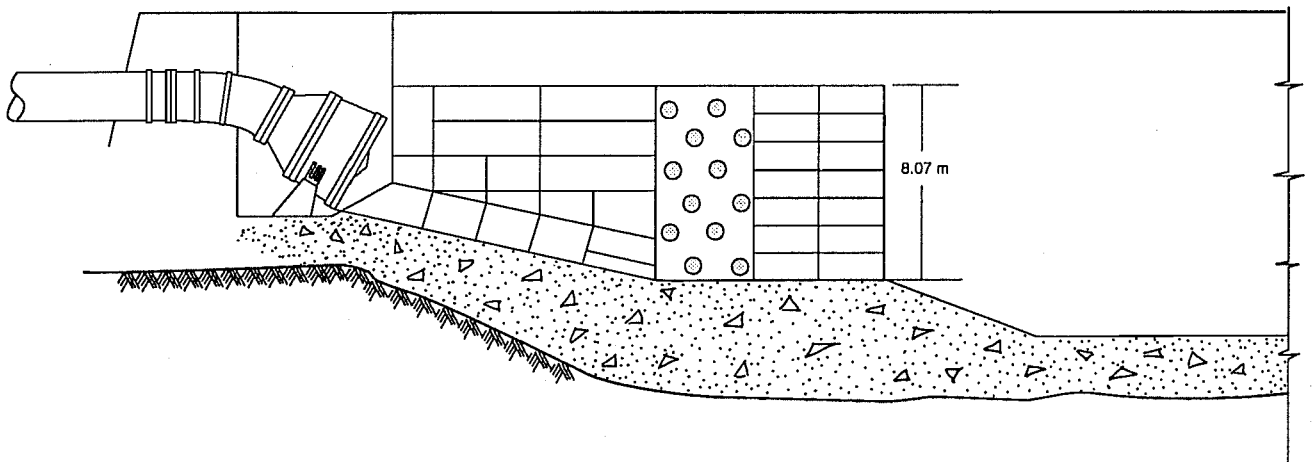
Este sistema de vorticillos era inestable. O bien se equilibraban y se destruían mutuamente, o bien

uno de ellos se acoplaba con otros que giraban en el mismo sentido, y así reforzado iba suprimiendo los opuestos, más débiles, hasta quedar solo. Luego empezaba a dar vueltas, con un movimiento cónico semejante al de un trompo cuando se le deja caer (véase ilustración 5b). Finalmente, así como el trompo, se levantaba poco a poco hasta quedar erecto (véase ilustración 5c).

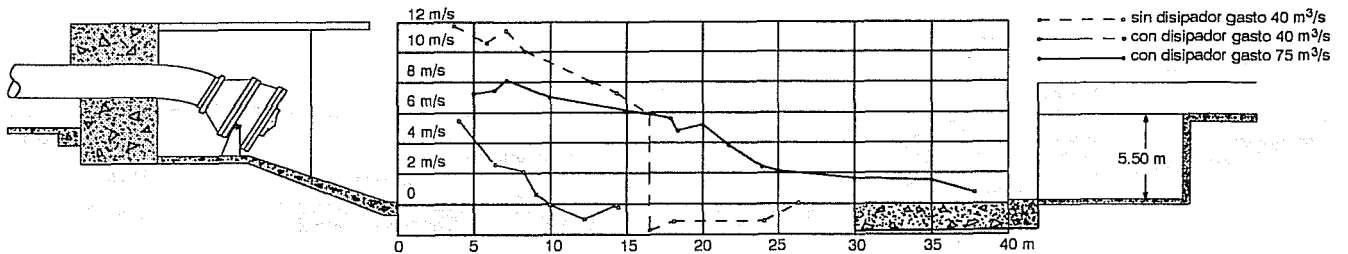
Durante todo el proceso, el pie del vórtice permanecía en la misma posición frente a la boquilla, aparentemente encima del punto donde el chorro adquiría su máxima velocidad antes de abrirse. Se mantenía así hasta que el aire que penetraba por el embudo central del vórtice hacía contacto con el chorro. Entonces burbujas de aire eran arrojadas a todo alrededor y el vórtice se destruía (véase ilustración 5d). Al poco tiempo, el proceso volvía a empezar.

Las mediciones realizadas comprobaron que el chorro se abre en un ángulo de 90° aproximadamente y avanza con una velocidad que es poco más o menos inversamente proporcional a la distancia de la boquilla; lo que comprueba que éste, aplastado contra el piso, conserva el mismo espesor en todas partes. Como la ley de variación de las velocidades tangenciales del vórtice sobrepuesto es la misma,

2. Reja de cilindros cuatrapeados adoptada para uniformizar el flujo y evitar la formación de remolinos



3. Curvas de velocidad a 1 m de altura (prototipo), sin y con la reja

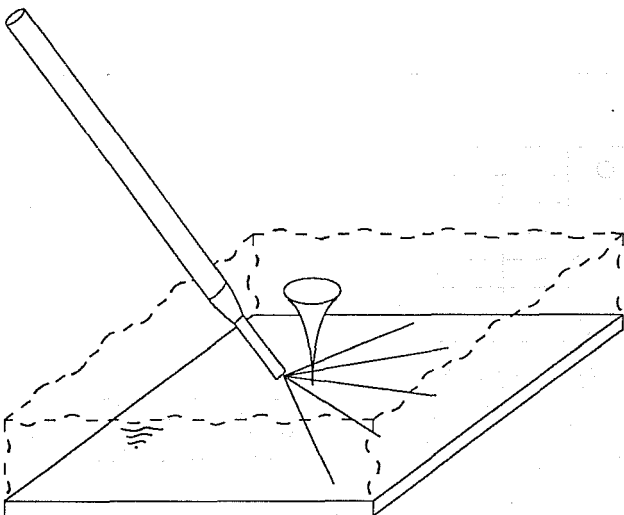


este hecho se interpretó como una evidencia de que el gradiente de la energía cinética tiende a igualarse en el chorro y en el vórtice (Levi, 1972).

Antes de analizar más a fondo la relación energética entre chorro y vórtice, quisimos saber si se presentan condiciones similares en otros casos.

Produjimos un vórtice de desagüe en un tanque grande provisto con un orificio central en el fondo y, al no poder cuantificar las velocidades, demasiado débiles para ser reveladas por nuestros instrumentos de medida, nos contentamos con sumergir verticalmente una varilla a la cual habíamos amarrado una ringlera de hilos de seda. Repitiendo la sumersión en puntos diferentes, detectamos la existencia de una capa de fondo, de grueso casi uniforme, en la cual los hilos se dirigían siempre hacia el orificio, y una capa superior, que alcanzaba la superficie, en la cual se orientaban tangencialmente. Separaba ambas capas una reducida capa intermedia donde la dirección de los hilos variaba progresivamente de la dirección radial a la acimutal. En otras palabras, se comprobó que el vórtice estaba sobrepuesto a un flujo convergente tipo sumidero.

4. Vórtice formado sobre un chorro divergente emitido por una boquilla inclinada



Una asociación similar se tiene en la succión de bombas, así como en las bocatomas, en las cuales nace un vórtice dentro del cuerpo de agua quieto detenido sobre la entrada. Esto nos llevó a preguntarnos si los vórtices descubiertos en el tanque de la presa Alvaro Obregón no podían haber sido producidos y mantenidos por la expansión del chorro circular lanzado por la válvula y reflejado luego por el piso del tanque amortiguador.

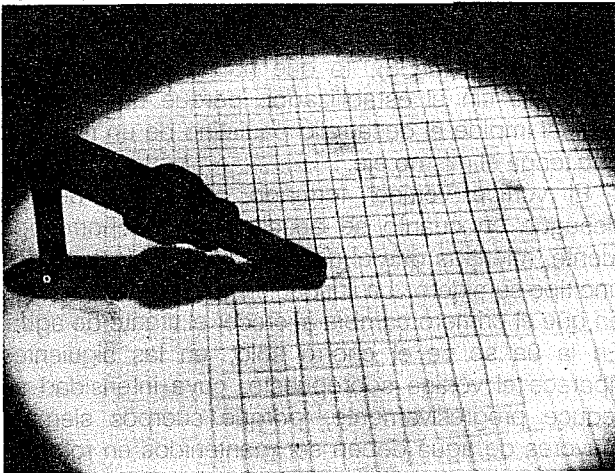
En el caso de este tanque, la configuración chorro-vórtice aparecía invertida con respecto a la del remolino de desagüe: el chorro arriba y el vórtice abajo. Esto me dio la idea de que los tornados podrían tener un origen similar. Estos, que se asocian siempre con una tempestad, viajan con una nube de la cual normalmente cuelgan. En las condiciones típicas de los grandes llanos americanos, la nube encabeza un viento frío del sur, que a 3 ó 4 km de altura se desvía hacia el occidente, haciendo que la nube adquiera forma de yunque. Conviene recordar además que el tornado se desarrolla siempre a la derecha de la tempestad.

Tomando en cuenta lo anterior, podemos sugerir el siguiente mecanismo para la formación del tornado. Primero, el viento del sur choca con un cuerpo de aire caliente y lo levanta, acercándolo al viento del oeste que sopla permanentemente más arriba. Al topar con este último, el aire caliente se desvía hacia la derecha y se aplasta, formando como resultado el chorro divergente capaz de crear y mantener el tornado (véase ilustración 6). Esto explica también porqué el tornado se ve siempre descender desde arriba.

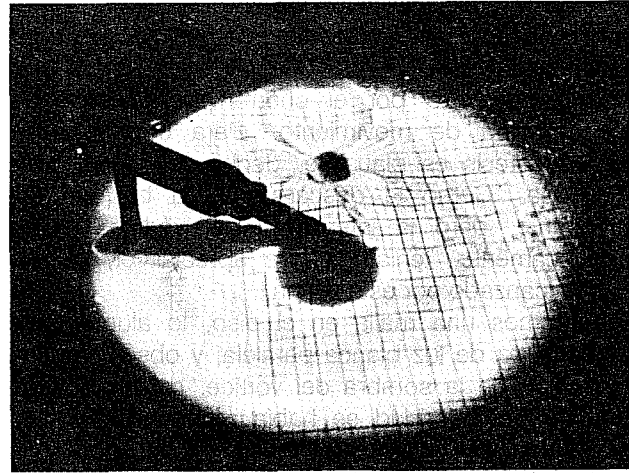
Viceversa, el vórtice de desagüe se origina abajo, donde está el chorro convergente, contrariamente a la creencia corriente de que nace en la superficie libre, allí donde suele aparecer primero un pequeño hoyo. Esto lo comprobó experimentalmente Trivellato (1987): colocadas dos gotas de colorante a diferentes niveles en el centro de un vórtice de desagüe natural, mostró que el movimiento rotatorio se visualiza primero en la gota inferior.

Agreguemos otro ejemplo meteorológico. Predecir la formación de tormentas tropicales es difícil, debido

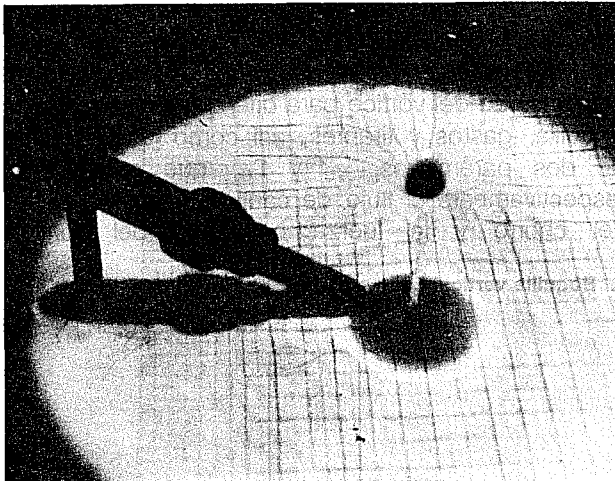
5. Fases sucesivas del vórtice formado sobre el chorro divergente



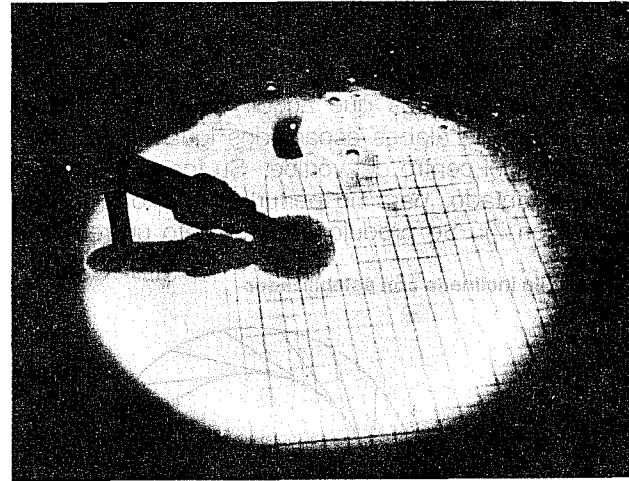
(a)



(b)

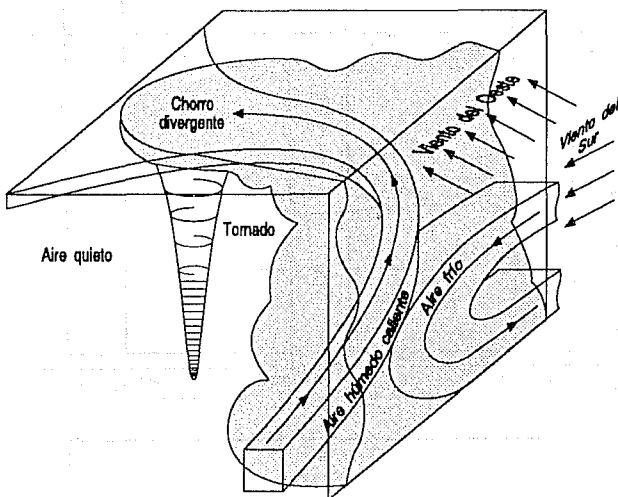


(c)



(d)

6. Mecanismo hipotético de la formación del tornado



a que, en un medio ambiente propicio, mientras que algunas perturbaciones se hacen tan intensas que se convierten en ciclones, otras aparentemente semejantes no lo hacen. Característica de todas esas perturbaciones es la presencia de un chorro plano superior prácticamente horizontal, localizado en la alta tropósfera, que normalmente se considera producido y mantenido por las perturbaciones atmosféricas dominantes. Ahora bien, se encontró que cuando la perturbación es capaz de desarrollarse en un ciclón, el chorro mencionado diverge, mientras que, para perturbaciones que no se van a desarrollar, usualmente ofrece el aspecto de un flujo casi paralelo (Mac Bride y Zehr, 1981).

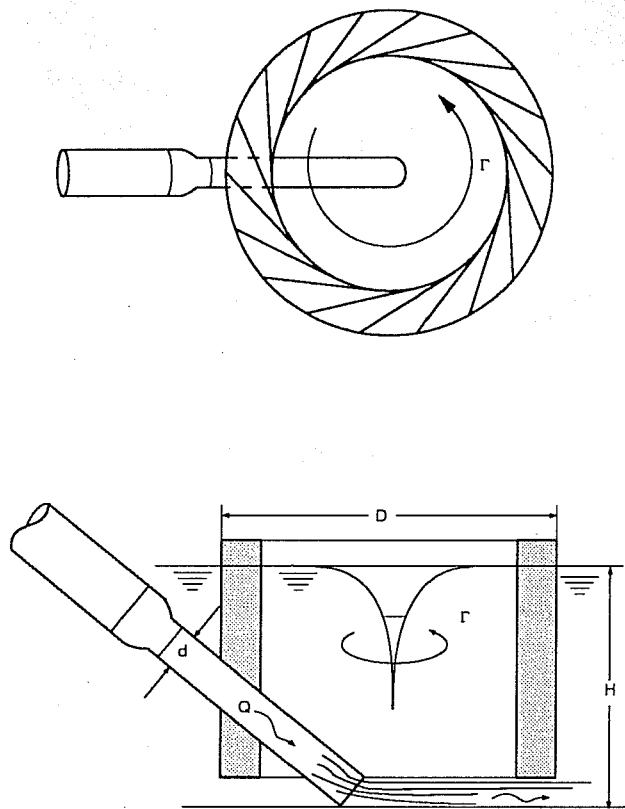
Faltaba todavía comprobar la relación dinámica entre chorro y vórtice. Lo primero que se me ocurrió fue que el chorro plano convergente o divergente posee una variación de cantidad de

movimiento que no parece asociarse con fuerzas externas manifiestas, mientras que dentro del vórtice hay una fuerza (la centrífuga) que bien podría relacionarse con ella. De ser así, el vórtice sería alimentado por el chorro por transferencia de cantidad de movimiento. Para comprobar si esta hipótesis es plausible, decidí usar la boquilla inclinada. Como la descarga de la boquilla era constante, pero la intensidad del vórtice variaba continuamente, teníamos que apreciar el máximo valor alcanzado por esta última.

Pintamos una malla en el piso, lo alumbramos con un haz de luz blanca paralela, y observamos la evolución de la sombra del vórtice, cuyo diámetro, que con anterioridad se había relacionado con la intensidad del mismo, se apreciaba gracias a la malla. La idea era detectar el diámetro máximo alcanzado por la sombra en cada caso. Sin embargo, la inestabilidad del fenómeno era tanta, que fracasamos en nuestros esfuerzos por obtener un resultado confiable.

Entonces tuvimos que acudir a un estabilizador compuesto de álabes espaciados igualmente, equidistantes del centro del vórtice. Su fondo estaba un poco levantado, para no perturbar al chorro (véase ilustración 7). Se produjo de inmediato un remolino

7. Boquilla inclinada con estabilizador

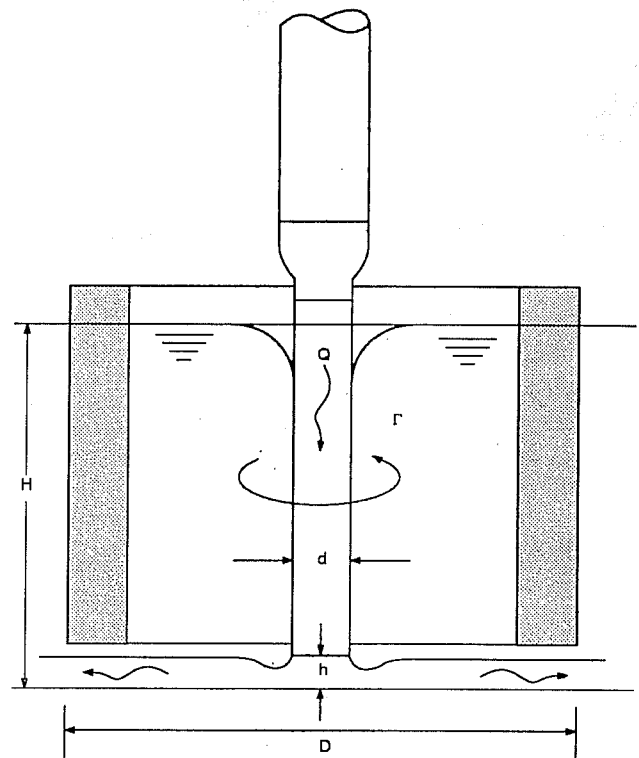


fuerte y permanente. Descubrimos más tarde que, con el estabilizador, también se obtenía un buen vórtice cuando la boquilla se coloca verticalmente (véase ilustración 8); lo que habría sido imposible conseguir sin el estabilizador, porque una boquilla vertical impide el desarrollo paulatino de un remolino que tenga el mismo eje.

El vórtice vertical formado así difiere del de desagüe en cuanto se asocia con un chorro tipo fuente, mientras que el de desagüe se relaciona con un tipo sumidero. La ilustración 9 muestra la manera en que el primero cambia al crecer el tirante de agua. En la 9a se ve el chorro solo; en las siguientes aparece el vórtice sobrepuesto, cuya intensidad se reduce progresivamente, porque cuerpos siempre mayores de agua deben ser mantenidos en rotación por la energía del chorro, que es siempre la misma. Este dispositivo de vórtice vertical se utilizó más tarde para procesos de tratamiento de agua: mezclado, aireación y floculación (Levi, 1971).

El empleo del estabilizador facilitó la medición de la intensidad del vórtice para diferentes diámetros de boquilla, gastos y tirantes, así como la evaluación de dos parámetros, q_0 y Γ_0 , que caracterizan respectivamente el flujo de cantidad de movimiento del chorro y la fuerza centrífuga del vórtice.

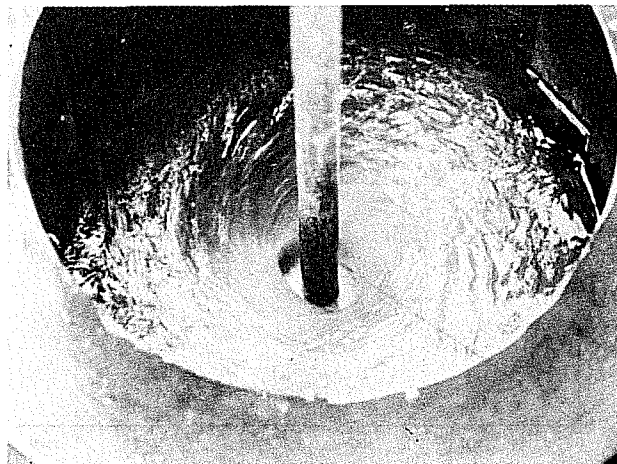
8. Boquilla vertical con estabilizador



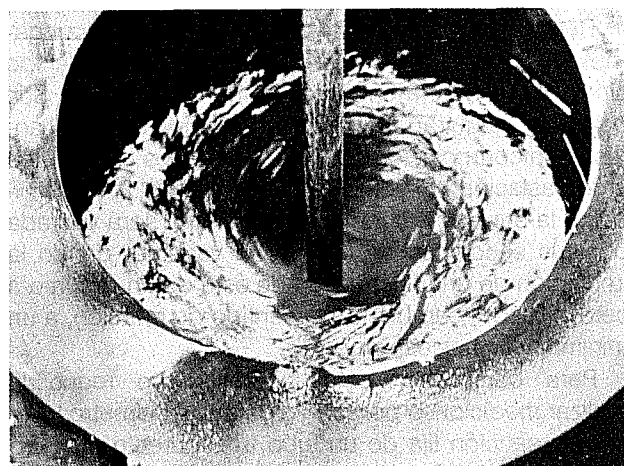
9. Fases sucesivas de formación del vórtice al crecer el tirante, con boquilla vertical y estabilizador



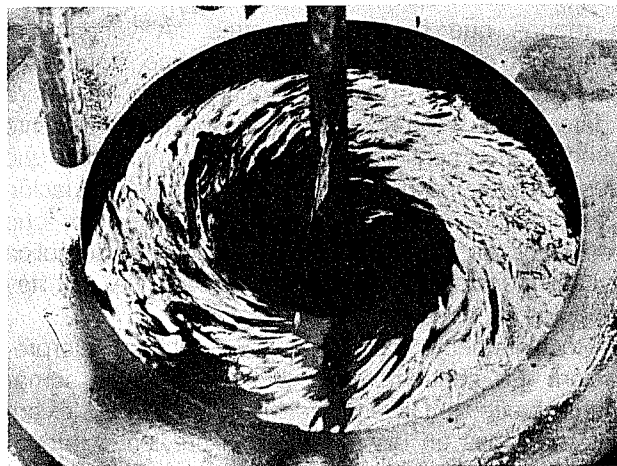
(a)



(b)



(c)



(d)

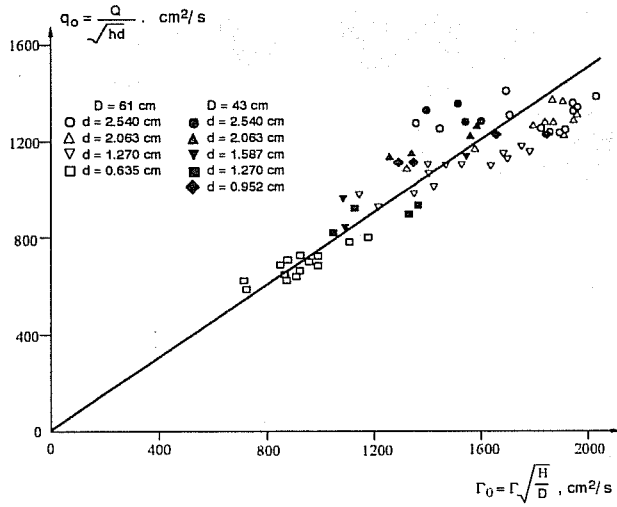
La ilustración 10, obtenida con boquilla vertical, muestra que poco más o menos hay proporcionalidad entre ellos. Con la boquilla inclinada se obtuvieron resultados parecidos, y también para los vórtices que se forman tras una pantalla colocada a través de un canal rectangular (Levi, 1972). Esto confirma la conexión energética del vórtice con el chorro. Tratemos de entender ahora cómo puede iniciarse el vórtice. Hay vórtices cuyo mecanismo se explica fácilmente porque dependen del efecto de fricción. Tales son, por ejemplo, los que se forman dentro de la ranura de una pila. La aparición de vórtices como aquellos que nos interesan, que seguramente no resultan de ese efecto, es mucho más misteriosa.

Este es el modo en que me gusta imaginarla. Cuando un chorro convergente o divergente poco más o menos plano se desarrolla bajo agua quieta, ésta es tan débil en comparación con el chorro,

bajo el punto de vista energético, que tiene que crearse una situación inestable. Sólo un vórtice puede establecer el equilibrio; pero su formación no es fácil. Un vórtice tiene un sentido de rotación, y el chorro, siendo simétrico, es incapaz de favorecer uno u otro. Hay que admitir que el retraso en la formación del vórtice se debe justamente a la falta de un factor que defina este sentido. Sólo puede propiciarlo una ruptura intencional o fortuita de la simetría del campo de fuerzas establecido. Cuando esto acontece, de inmediato el remolino nace y se intensifica hasta alcanzar su intensidad normal, que es aquella compatible con la variación de cantidad de movimiento del chorro.

Consideremos ahora otro punto: la intermitencia de los vórtices de bocatoma. Como la experiencia diaria muestra, no es usual que esos vórtices mantengan permanentemente la misma intensidad,

10. q_o en función de Γ_o para una boquilla vertical, con estabilizadores de distintos diámetros D



a menos que sean muy fuertes. A veces ésta fluctúa; en ocasiones el remolino aparece, se refuerza hasta un máximo, decrece y desaparece, listo para aparecer y desarrollarse de nuevo, eventualmente girando en el sentido opuesto. Es un fenómeno que desconcierta, porque parece indicar una fluctuación concomitante de la energía disponible, lo que está lejos de la verdad. Los tratados de hidráulica evitan mencionar este fenómeno porque no hay modelos capaces de justificarlo.

Recientemente hallé una clave para su interpretación. En septiembre de 1986 un huracán sumamente fuerte, el Gilbert, azotó las costas de México. Las erosiones en las playas y las crecientes provocadas por él fueron tan destructivas, que el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en el cual estoy trabajando, empezó un programa de investigación orientado a la mejora de nuestra habilidad para predecir la llegada de los huracanes y controlar sus efectos. Para adquirir algún entendimiento de las peculiaridades de los huracanes como movimientos vorticosos, examiné diagramas que mostraban distribuciones verticales de velocidades acimutales máximas en el interior del Gilbert. Quedé impresionado por la variación de ellas en relación con la altura. Estamos acostumbrados a creer que un vórtice es bidimensional, es decir, que las partículas que quedan sobre un cilindro ideal centrado en el eje del vórtice giran todas con una misma velocidad. Viendo que éste no era el caso para el Gilbert, pensé que tal vez otros vórtices naturales poseen una estructura similar.

Decidí que era necesario checar primero si una velocidad que varía con la altura es compatible con las ecuaciones fundamentales de cantidad de movimiento de la mecánica de los fluidos.

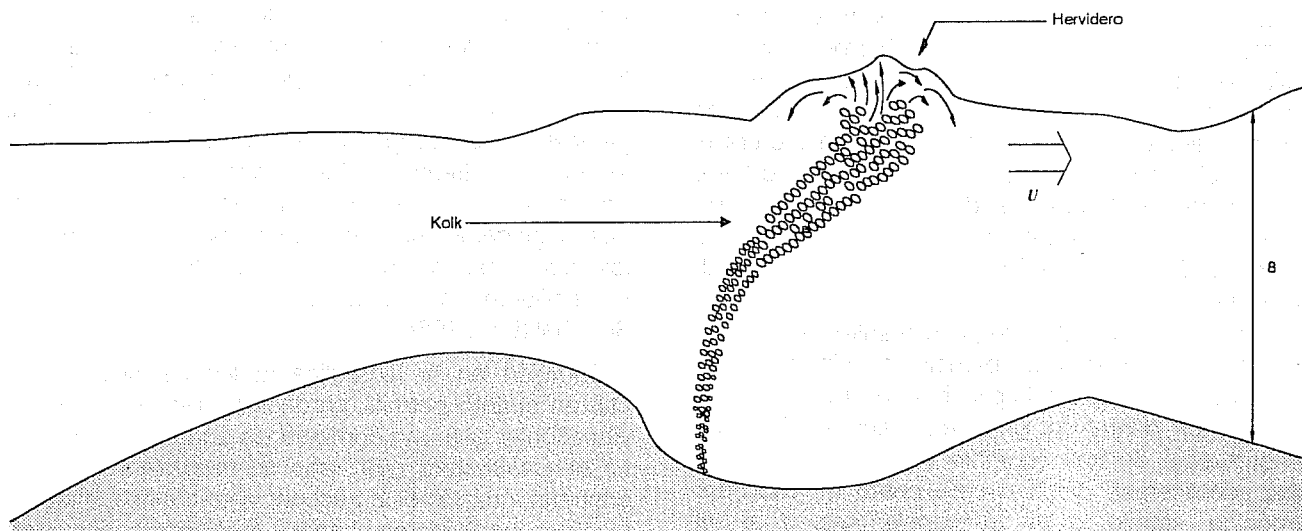
Empezando por las ecuaciones para la vorticidad en un flujo permanente, intenté integrarlas bajo la hipótesis de que la velocidad sea función al mismo tiempo de la distancia r al eje del vórtice y la ordenada z a lo largo de él. La integración, que resultó inesperadamente fácil, reveló que la vorticidad puede variar sinusoidalmente con z , y una sucesiva integración mostró que lo mismo ocurre con la velocidad tangencial. Esta última se expresó, como función de r , por medio de dos funciones de Bessel modificadas, una de las cuales aproxima —para pequeños valores de r — el vórtice libre, y la otra el vórtice forzado del modelo de Rankine. Concluí que una variación sinusoidal de la velocidad del vórtice con la altura es perfectamente compatible con las ecuaciones fundamentales de la dinámica de los fluidos. De hecho, en teoría son aceptables también variaciones más complejas, representables como combinaciones lineales de diferentes sinusoides.

Regresemos ahora a la intermitencia. Supongamos que en una bocatoma se forme un vórtice de tipo sinusoidal, con eje en dirección de la corriente. Sus partículas seguirán trayectorias helicoidales, resultantes de la composición de los movimientos de rotación y de traslación. El vórtice avanzará con el flujo principal, y la superficie libre en la bocatoma será cruzada por sus secciones de intensidad variable, dando la impresión de una fluctuación de ésta de un máximo a cero; y luego, cambiando el sentido de rotación, a un mínimo, y así sucesivamente.

Para comprobar esta hipótesis, se requeriría realizar mediciones por medio de un velocímetro laser en una sección fija de un tubo transparente, cuando en la entrada del tubo aparece un vórtice intermitente. No he tenido oportunidad de hacerlo hasta ahora; a lo mejor uno de ustedes puede estar interesado en ello. De todos modos, considero que mientras tanto el modelo podría usarse como una aproximación matemática para el análisis del fenómeno de la intermitencia.

Un último tema que quisiera tratar con ustedes es la frecuencia de producción de vórtices en lechos fluviales, y algunas consecuencias imprevistas que resultaron de su estudio. Muchos conocemos los borbollones que suelen aparecer en la superficie de los ríos. Son los extremos de remolinos nacidos en el fondo del lecho, llamados *kolks*, responsables del levantamiento y suspensión de materiales que contribuyen sustancialmente a la masa de sedimento arrastrada por la corriente (véase ilustración 11). Jackson (1976), analizando frecuencias de aparición de borbollones en ríos de Estados Unidos y Rusia, concluyó que de ellas se puede inferir que los *kolks* son *bursts* turbulentos de pared; estructuras

11. Esquema de un *kolk* fluvial y el borbollón relativo



que fueron estudiadas exhaustivamente durante los años sesenta, por considerarse como la contribución más importante a la creación de turbulencia en el interior de la corriente.

Un estudio experimental realizado en la India (Narahari Rao *et al.*, 1971) llevó a un descubrimiento inesperado: el intervalo de tiempo entre *bursts* sucesivos, además de depender obviamente del espesor δ de la capa límite, no depende de una velocidad característica de ésta, como sería la de fricción, como se sospechó inicialmente, sino de una externa: la velocidad U de la corriente libre. La investigación llevó a expresar el periodo medio de aparición de los *bursts*, \bar{T} , por medio de la fórmula aproximada $\bar{T} \cong 6\delta/U$. Ahora bien, Jackson había encontrado que prácticamente la misma fórmula parece ser válida para hervideros de río cuando se toma la profundidad del río como δ ; y es de este resultado que él dedujo que los *kolks* que los producen no son más que *bursts* turbulentos de pared.

Si se coloca un vertedor a través de un canal rectangular, se puede observar aguas arriba la formación casi periódica de un par de vórtices erectos que giran en sentido opuesto, y que, cuando alcanzan su intensidad máxima, se estiran tanto que sobrepasan la cresta del vertedor. Inspirado en el trabajo de Jackson, decidí comprobar si también esos vórtices pueden interpretarse como *bursts* turbulentos. Mi interés en la cuestión se debía al hecho de que los vórtices de vertedor, quedando fijos en el espacio, prometían ser mucho más manejables para el estudio del fenómeno del *kolk* que los *kolks* mismos, que nacen en sitios imprevisibles.

Produje entonces esos vórtices en el laboratorio, con diferentes anchos de canal, alturas de vertedor y gastos, y pude confirmar que el valor de $\bar{T}U/d$, siendo U la velocidad de acercamiento y d el tirante aguas arriba, también en este caso estaba cerca de 6. ¿Había que concluir que también esos eran *bursts* turbulentos? Lo que me hacía dudar de la hipótesis de Jackson era la gran diferencia de tamaño entre los *kolks* y los extremadamente pequeños *bursts* de pared. ¿Era suficiente la identidad de una frecuencia de emisión para considerarlos como diferentes aspectos del mismo fenómeno? Intenté otro experimento. En lugar de un vertedor, coloqué a través del canal una pantalla, forzando la corriente a pasar por debajo. Se determinó la periodicidad media de los vórtices formados en las esquinas y se le comparó con la velocidad y el tirante aguas arriba. Con todo y que a estos remolinos no se les puede considerar vórtices de pared por la simple razón de que no tienen contacto con ninguna pared, involucamos a encontrar 6 como valor aproximado de $\bar{T}U/d$!

El resultado era sorprendente. De repente se me ocurrió que, si el periodo \bar{T} se reemplaza por la frecuencia f , que es su recíproco, la igualdad $\bar{T}U/d \cong 6$ se cambia por $fd/U \cong 0.16$; lo que me hizo recordar que Roshko, medidas las frecuencias de emisión de vórtices alternados tras diferentes tipos de obstáculos bidimensionales, tomando como U la velocidad externa y como d el ancho de la estela, había encontrado este mismo valor medio para fd/U (Roshko, 1954).

Más tarde pude detectar en la literatura muchos otros casos en que había aparecido un número de Strouhal fd/U de 0.16 (o eventualmente su

doble, 0.32): oscilaciones en cavidades de pared o en burbujas de colapso de vórtice, estelas tridimensionales, fluctuación de chorros planos y bufido de redondos, rellenarse periódico de burbujas de cavitación y autorrotación de alas. En estos casos U era siempre la velocidad externa y d era el ancho del cuerpo, del chorro o de la estela, o bien, para chorros redondos, el diámetro de la boquilla (Levi, 1983). Era evidente que nos hallábamos en la presencia de una ley de Strouhal de validez universal. Pero, ¿por qué?

La respuesta a esta pregunta resultó ser mucho más simple de lo que parecía a primera vista. Todos esos fenómenos implicaban la producción de oscilaciones dentro de un cuerpo fluido refrenado, en presencia de una corriente libre externa. Ahora bien, idealicemos dicho cuerpo como un oscilador armónico simple cuya frecuencia sea f y el desplazamiento máximo d . La energía mecánica específica del oscilador es $2(\pi df)^2$, mientras la energía cinética específica disponible (debida en nuestro caso a la corriente externa) es $U^2/2$. Igualando ambas, se obtiene

$$fd/U = 1/2\pi = 0.159 \quad (1)$$

es decir, prácticamente el famoso 0.16. Las oscilaciones locales gobernadas por esta ley que sean arrastradas por el flujo aparecerán a un observador estacionario como perturbaciones ondulatorias cuya longitud de onda λ es, de acuerdo con (1),

$$\Delta = U/f = 2\pi d \quad (2)$$

Fue posible hallar evidencias de la validez de esta última fórmula para ondas de superficie, internas y de choque, así como para longitudes de dunas y meandros (Levi, 1983). Luego de haberse publicado estos resultados en el *Journal of Engineering Mechanics* de la *American Society of Civil Engineers* en 1983, dos oceanógrafos canadienses presentaron una inspiradora discusión, en la cual objetaban la universalidad de la ley de Strouhal propuesta, porque no parecía verificarse en la emisión periódica de remolinos tras prominencias de la costa en el golfo y estuario del río San Lorenzo. Los períodos reales medidos por ellos resultaban enormemente subestimados al aplicarse la ecuación (1). Por ejemplo, el período de los remolinos tras la península de Gaspé, que es de 240 horas, la fórmula lo reducía apenas a 26 minutos.

Sospeché que la longitud que ellos tomaban como d , en este caso de 150 m, era inadecuada.

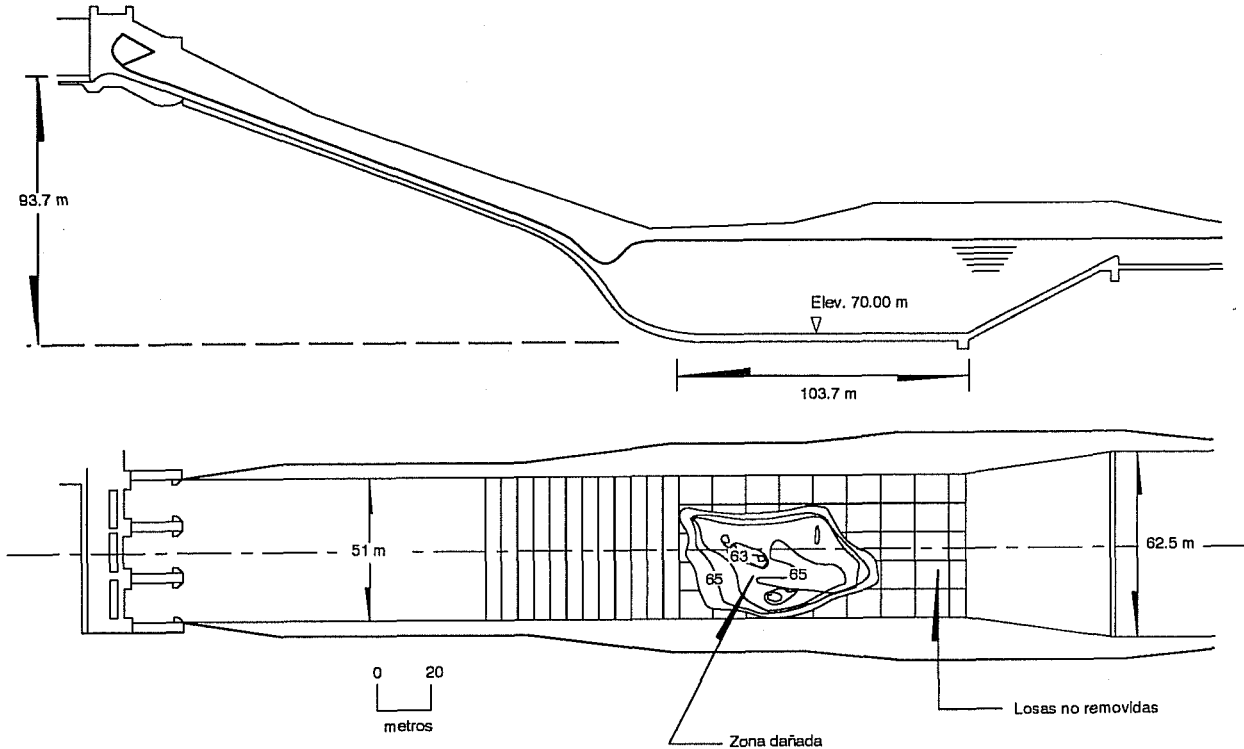
Despejando d de la ecuación (1) luego de haber reemplazado T y U por los valores medidos, obtuve el valor aparentemente exagerado de 82.5 km. Pero, acudiendo luego al mapa, hallé que ésta es poco más o menos la distancia entre la península de Gaspé y la isla de Anticosti que le queda al frente. Evidentemente todo el cuerpo de agua dentro del estrecho entra en oscilación. Con consideraciones geográficas parecidas, también los otros casos presentados en la discusión se reconciliaron fácilmente con la ley universal de Strouhal (Levi, 1984).

También en la hidráulica la ley de Strouhal es útil, en cuanto permite predecir la frecuencia de las vibraciones que una corriente de agua puede excitar en una estructura que frena su movimiento. Por el contrario, cuando esta frecuencia se conoce, ayuda a localizar, con base en el ancho d calculado, el cuerpo fluido que crea el problema (Levi et al., 1988).

Hace cerca de 20 años ocurrió una falla análoga a aquella de la obra de toma de la Presa Alvaro Obregón, pero a una escala mucho mayor. El piso del tanque amortiguador del vertedor principal de la Presa Netzahualcóyotl, vertedor proyectado para descargar 6000 m³/s, falló durante las primeras dos semanas de operación, con un gasto que no pasaba de la mitad de aquel de diseño (véase ilustración 12). El piso del tanque había sido protegido por grandes losas cuadradas de concreto, de 12 m de lado y 2 m de profundidad, cada una de ellas anclada a la roca con doce varillas de acero de 1 1/4 pulgadas. Las losas habían sido coladas en el sitio y las juntas entre ellas se habían rellenado con material bituminoso. La falla hizo que la mayor parte de las losas se removiera y volteara, y sus anclajes desgarrados revelaban falla por tensión. Una evaluación previa de las fuerzas de levantamiento a las cuales las losas estarían sujetas, incluyendo los efectos de las ondas y la macroturbulencia en el tanque, no había presagiado ningún riesgo.

Las pruebas en modelo hidráulico revelaron que la primera en levantarse era una losa aguas arriba. Antes empezaba a oscilar alrededor de un eje normal a la dirección del flujo, con amplitudes que aumentaban con el gasto, mientras que la frecuencia no parecía depender de él. El levantamiento se producía de repente, siempre en correspondencia más o menos con la misma descarga. Se confirmó también que la falla no habría ocurrido de haber quedado llenas las juntas entre las losas. Se comprobó finalmente que este tipo de falla no se debe precisamente al salto hidráulico, sino que se asocia con el chorro de alta velocidad que penetra

12. Sección longitudinal del vertedor principal de la Presa Netzahualcóyotl y planta que muestra la falla del piso del tanque amortiguador



en él: de hecho, puede producirse también en cualquier canal de corriente rápida.

La evidencia experimental de que oscilaciones de intensidad creciente preceden el levantamiento señaló la posibilidad de que la falla se hubiese debido a vibraciones inducidas por el flujo, y ofreció una buena oportunidad para comprobar conjeturas previas. Se halló que, además de una corriente rápida sobre la losa, se requiere para su movimiento que una capa de agua, aunque sea muy delgada, esté presente por debajo de ella, y que ambas, la corriente superior y la capa inferior, estén interconectadas. Se verificó finalmente que en esta capa nacen fluctuaciones de presión cuya frecuencia parece poderse predecir por medio de la ley de Strouhal, tomando para U la velocidad del chorro y para d la longitud de la losa.

Estas fluctuaciones, cuya intensidad crece con el gasto descargado, pueden hacer que la losa oscile con la misma frecuencia, lo que crea zonas de presión pulsante creciente por debajo de los extremos de ella. La falla parece ocurrir como sigue. Cuando la cara vertical de aguas arriba de la losa llega a sobresalir lo suficiente para provocar la separación del flujo de la cara superior, la subpresión, que se ha extendido a toda la inferior, empuja

la losa hacia arriba, haciendo de modo que la corriente pueda voltearla. Ya fuera de su lugar, la losa descompone la corriente, y esto hace que también las losas cercanas se remuevan. El flujo se vuelve caótico, más y más losas se levantan, hasta que se alcanza cierto equilibrio. Pero entonces ya gran parte del revestimiento del piso ha sido barrida (Levi y Del Risco, 1989).

Es usual considerar que el ingeniero se interesa en el cómo y el cuánto, y el físico en el porqué. En efecto, el ingeniero concede prioridad absoluta a problemas tecnológicos y aplicaciones prácticas. Esto es bueno y justo, porque, también para quienes se interesan en cuestiones básicas, señala los tópicos más adecuados y orienta la investigación. Sin embargo, estoy convencido de que a veces vale la pena buscar, además del cómo y cuánto, también el porqué de las cosas, porque esto puede llevar a resultados no sólo interesantes, sino también de utilidad práctica.

Referencias

Jackson, R.G. "Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting in geophysical flows", *J. of Fluid Mechanics*, 77, 531-560, 1976.

Levi, E. "Experiments on unstable vortices", *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, 98(2), 539-559, 1972.

Levi, E. "Application of jet-driven vortices to water and waste treatment processes", *Proc. XVI Congress*, International Association for Hydraulic Research, S, o Paulo, Brasil, 5, 199-203, 1975.

Levi, E. "A universal Strouhal law", *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, 109(3), 718-727, 1983.

Levi, E. "A universal Strouhal law - Closure", *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, 110(5), 841-845, 1984.

Levi, E. "La intermitencia de los vórtices", *Memorias del X Congreso Nacional de Hidráulica*, 2, 417-424, 1988.

Levi, E. y Del Risco, E. "Search for the cause of high-speed-channel revetment failures", *J. of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, 3(2), 125-136, 1989.

Levi, E. y González Escamilla, G. "Quelques dispositifs pour l'amortissement de l'énergie d'écoulements à grande vitesse", *Proc. VII Congress*, International Association for Hydraulic Research, D-10, 1957.

Levi, E. et al. "Fluid-structure interaction", en *Civil Engineering Practice*, Technomic Publishing Co., Lancaster, Penn., 2, 699-714, 1988.

McBride, J. L. y Zehr, R. "Observational analysis of tropical cyclone formation. Parte II: comparison of non-developing versus developing systems", *J. of Atmospheric Sciences*, 38, 1132-1151, 1981.

Narahari Rao et al. "The bursting phenomenon in a turbulent boundary layer", *J. of Fluid Mechanics*, 48, 339-352, 1971.

Roshko, A. "On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies", *NACA Technical Note* 3169, 1954.

Trivellato, F. "Il vortice a superficie libera e ad asse verticale in un campo di moto indefinito", *Tesis Doctoral*, Universidad de Padua, 265 pp, 1987.

* Traducción de la conferencia dictada el 31 de julio de 1990 en San Diego, California, en ocasión de recibir el Hunter Rouse Lecture Award de la American Society of Civil Engineers.