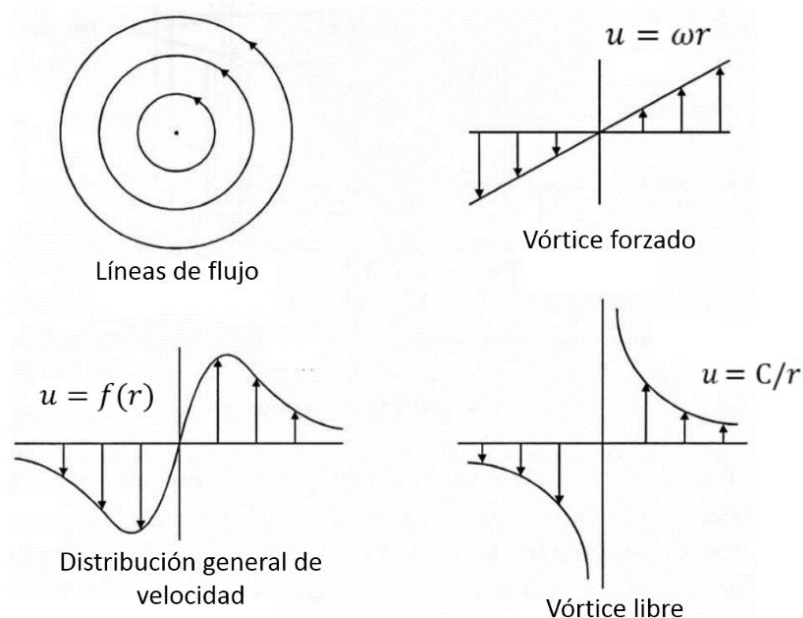


FLUJOS DE VÓRTICE

I.1.INTRODUCCIÓN

La ecuación de Bernoulli establece que en el movimiento permanente de un fluido incompresible no viscoso, la cabeza (carga o altura) total H es constante a lo largo de la línea de corriente. Sin embargo, no se indica como varía H de una línea de corriente a otra. En algunos tipos de flujo se puede asumir que la altura total es constante a través de las líneas de corriente; así como, a lo largo de ellas (Markland, 1994).



Adaptado de: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Fig. 1 Ilustración de los flujos de vórtice

La variación de H a través de las líneas de corriente de un fluido en movimiento estacionario, está cercanamente relacionada con la rotación del fluido. Un fluido en movimiento en el cual H varía a través de las líneas de corriente tiene rotación. Como los fluidos fluyen en movimiento paralelo a lo largo de dos líneas de corriente adyacentes, la más próxima al centro se mueve más rápido; así que, un elemento pequeño de fluido rota en movimiento relativo. Sin embargo, en el chorro uniforme de un orificio no hay este movimiento relativo, por lo tanto es irrotacional (Markland, 1994).

Debido a la importancia de estos conceptos en muchas aplicaciones ingenieriles de mecánica de fluidos, es útil examinar el caso particular del flujo que circula alrededor de un centro fijo, llamado flujo de vórtice. Como se aprecia en la Fig. 1 los patrones de las líneas de corriente consisten simplemente en un conjunto de círculos concéntricos (SINGH, 2012, p119). La velocidad u puede variar de cualquier forma elegida con radio r , de forma general:

$$u = f(r) \quad (1)$$

Se tienen dos casos de particular interés. En el llamado vórtice forzado,

$$u = \omega r \quad (2)$$

La totalidad del cuerpo fluido rota como si fuera sólido a una velocidad angular ω . En el llamado vórtice libre,

$$u = C/r \quad (3)$$

Donde C es una constante. Una única característica de este movimiento es que la cabeza total H es independiente del radio r , y el flujo es por consiguiente irrotacional. Aunque parezca lo contrario, los elementos del fluido no rotan como ellos se mueven alrededor del centro del movimiento (SINGH, 2012, p120).

I.2. Equipo

H13 Vortex Apparatus, cronómetro.



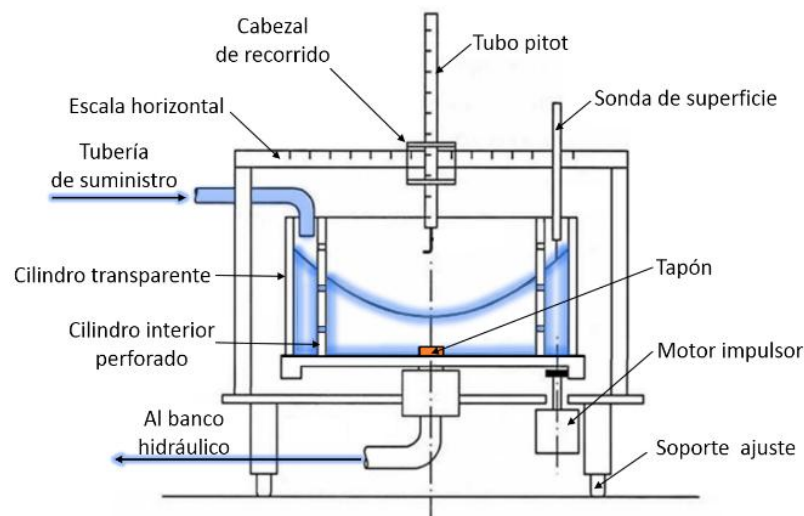
Fuente: Propia

Fig. 2 Aparato de visualización de vórtices

I.3. Descripción del montaje

El aparato mostrado en la Fig. 3 está diseñado para producir tanto flujos de vórtice forzados como libres. Está compuesto por un cilindro transparente que tiene un agujero en el centro de su base el cual, puede rotar sobre su eje vertical por medio de un motor eléctrico. Un cilindro interior perforado en sus paredes, puede ser ajustado para así crear un espacio anular del cual el agua puede ser suministrada de forma conveniente (UNIZAR, s.f., p2).

Para crear un vórtice forzado el agujero en el centro de la base se cierra y el cilindro se llena con agua hasta la mitad de su profundidad. Se pone a rotar el cilindro por unos minutos hasta que todo el cuerpo de agua tome una rotación uniforme sobre los muros del cilindro. Para crear un vórtice libre, se requiere de un pequeño flujo de agua. Esto se garantiza abriendo el agujero en la base e introduciendo un hilo de agua en el espacio anular. Como el agua pasa a través de las perforaciones del cilindro interior, se imparte un momento angular y entonces se provoca un flujo en movimiento en espiral hacia el centro. Después de un tiempo se produce un vórtice constante en el cual el nivel superficial cae bruscamente hacia el centro (UNIZAR, s.f., p3).



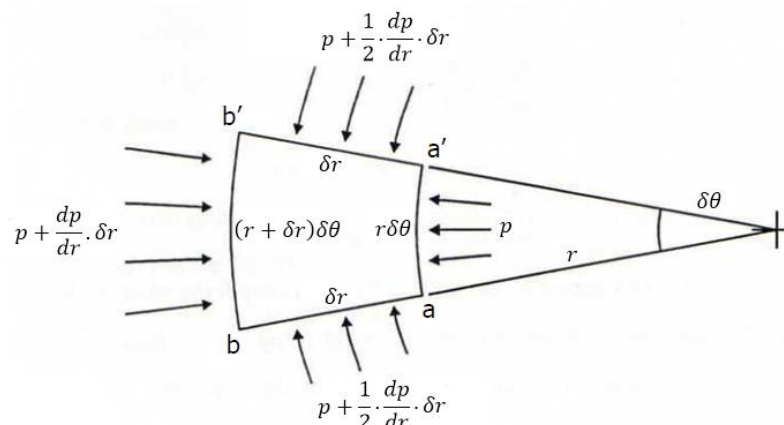
Adaptado de: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"
Fig. 3 Diagrama del aparato de vórtices

El núcleo de aire que se forma pasa hasta la base del cilindro y sale por el agujero en el centro. Aparte de las pérdidas internas y de la transferencia de energía entre el cilindro que rota y el fluido, la cabeza total es constante durante todo el movimiento, por tanto el flujo se aproxima a un vórtice libre.

I.4. MARCO TEÓRICO

Considere el flujo en un vórtice con un eje vertical. El elemento de fluido mostrado en la Fig. 4 tiene espesor unitario y está en movimiento estacionario bajo la acción de la presión en las superficies. Puesto que el movimiento es en el plano horizontal la fuerza de la gravedad puede ser despreciada (Markland, 1994). La presión en la superficie aa' de radio r es p , sobre la superficie bb' de radio $r + \delta r$ es $p + \frac{dp}{dr} \cdot \delta r$, y sobre las superficies ab y a'b' es $p + \frac{1}{2} \cdot \frac{dp}{dr} \cdot \delta r$. La fuerza neta δF hacia el centro debido a la presión sobre las superficies del elemento es por consiguiente:

$$\delta F = -pr\delta\theta + \left(p + \frac{dp}{dr} \cdot \delta r\right) (r + \delta r)\delta\theta - 2 \left(p + \frac{1}{2} \cdot \frac{dp}{dr} \cdot \delta r\right) \delta r \cdot \text{sen}(\delta\theta/2)$$



Fuente: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Fig. 4 Fuerzas que actúan sobre un elemento fluido en el flujo de un vórtice

Lo cual se reduce a:

$$\delta F = \frac{dp}{dr} r \delta r \delta \theta,$$

para el segundo orden de pequeñas cantidades. La masa δM del elemento es:

$$\delta M = \rho r \delta r \delta \theta,$$

para el segundo orden de pequeñas cantidades. Su aceleración hacia el centro está dada en una primera aproximación por u^2/r .

Ahora, igualando la fuerza a la masa-aceleración:

$$\frac{dp}{dr} r \delta r \delta \theta = \rho r \delta r \delta \theta * \frac{u^2}{r}$$

Lo cual se reduce a:

$$\frac{dp}{dr} = \rho * \frac{u^2}{r}$$

o

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{p}{\rho g} \right) = \frac{u^2}{rg} = \frac{u}{g} \left(\frac{u}{r} \right) \quad (4)$$

El término $(p/\rho g)$ es conocido como la carga estática. Si se incluyera la fuerza de la gravedad se reemplazaría $(p/\rho g)$ por la carga piezométrica $(p/\rho g + z)$. La ecuación 4 se puede generalizar para incluir la fuerza de la gravedad reemplazando la carga estática por la piezométrica:

$$\frac{dh}{dr} = \frac{d}{dr} \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) = \frac{u^2}{rg} = \frac{u}{g} \left(\frac{u}{r} \right) \quad (5)$$

La carga total se relaciona con la carga piezométrica h por:

$$H = h + \frac{u^2}{2g} \quad (6)$$

Diferenciando esta ecuación:

$$\frac{dH}{dr} = \frac{dh}{dr} + \left(\frac{u}{g}\right) \frac{du}{dr} \quad (7)$$

Sustituyendo por dh/dr de la ecuación (5)

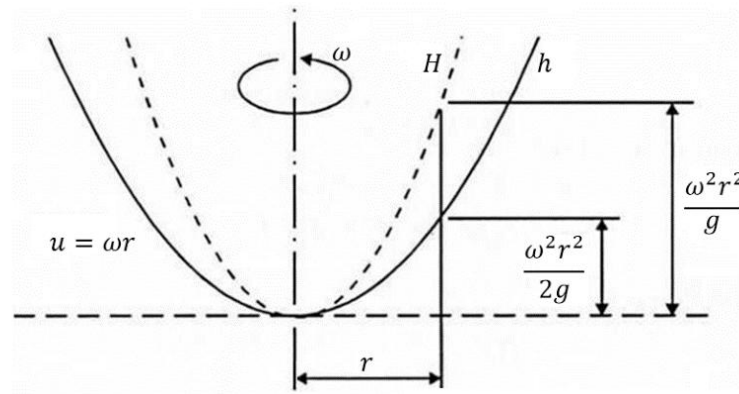
$$\frac{dH}{dr} = \frac{u^2}{rg} + \left(\frac{u}{g}\right) \frac{du}{dr}$$

o

$$\frac{dH}{dr} = \frac{u}{g} \left(\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right)$$

Las ecuaciones 5 y 8 corresponden a las relaciones básicas para flujos de vórtices de las cuales, se puede encontrar la variación con radio r de la carga piezométrica h y la carga total H .

I.4.1. Vórtice Forzado



Fuente: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Fig. 5 Distribución de carga total y piezométrica en el vórtice forzado

Cuando un fluido se mueve como un sólido respecto a un eje se denomina movimiento de vórtice forzado, en el cual cada partícula de fluido tiene la misma velocidad angular. Un líquido dentro de un recipiente que rota a

una velocidad angular constante respecto de un eje vertical, se mueve como un sólido después de cierto intervalo de tiempo. No se presentan esfuerzos de corte en el líquido, y la aceleración existente se dirige hacia el centro radialmente, hacia el eje de rotación, debido a la presencia de la fuerza centrípeta (UNIZAR, s.f., p2).

Para el vórtice forzado:

$$u = \omega r$$

Tal que,

$$u/r = \omega \quad y \quad du/dr = \omega$$

De la ecuación (5):

$$dh/dr = \frac{u}{g} \left(\frac{u}{r} \right) = \frac{\omega^2}{g} r$$

Cuya integración da:

$$h = \omega^2 r^2 / 2g + h_0$$

Donde h_0 corresponde a una constante de integración. Seleccionando el datum para h tal que $h_0 = 0$, la variación de h con r en el vórtice forzado es:

$$h = \omega^2 r^2 / 2g \quad (9)$$

La variación de la carga total H se puede encontrar a partir de la ecuación (8):

$$\frac{dH}{dr} = \frac{u}{g} \left(\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right) = \frac{\omega r}{g} (\omega + \omega)$$

De aquí:

$$\frac{dH}{dr} = 2\omega^2 r / g$$

De cuya integración se obtiene:

$$H = \omega^2 r^2 / g + H_0$$

Donde H_0 es una constante de integración. Utilizando el mismo datum como para la carga piezométrica, se obtiene:

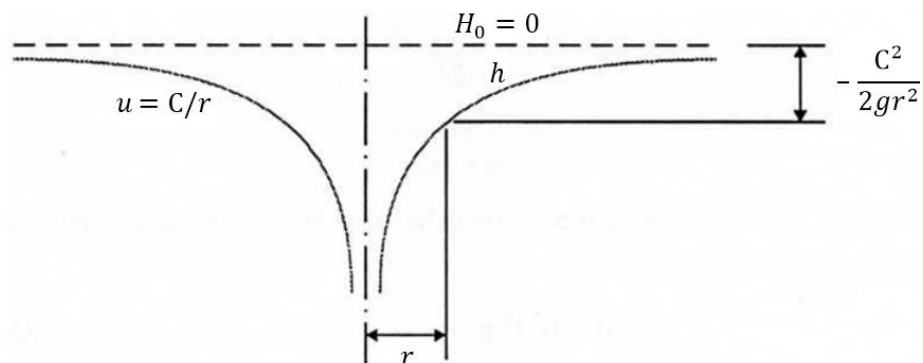
$$H = \omega^2 r^2 / g \quad (10)$$

La Fig. 5 ilustra estos resultados. A lo largo de la superficie del agua la presión es la atmosférica (SINGH, 2012, p120). La altura de la superficie del agua aumenta desde el nivel de la superficie hasta el centro, de acuerdo con la ecuación (10). La altura excedente de H sobre la superficie es:

$$H - h = \omega^2 r^2 / g = u^2 / 2g$$

La cual corresponde a la carga de velocidad para el radio r .

I.4.2. Vórtice Libre



Fuente: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Fig. 6 Distribución de la carga piezométrica y total en un vórtice libre

Este tipo de vórtice corresponde a uno de los tipos elementales de flujo irrotacional. La diferencia con el tipo de vórtice forzado radica en que en el vórtice libre, cada partícula se mueve en una trayectoria circular a una

velocidad que varía inversamente proporcional con la distancia al centro de rotación. Por tanto, la distribución de velocidad está representada por:

$$u = C/r$$

$$u/r = C/r^2 \quad y \quad du/dr = -C/r^2$$

Sustituyendo en la ecuación (8), se tiene:

$$\frac{dH}{dr} = \frac{u}{g} \left(\frac{-C}{r^2} + \frac{C}{r^2} \right) = 0$$

Que al integrar da:

$$H = H_0$$

Donde H_0 es una constante. Puesto que $u \rightarrow 0$ cuando $r \rightarrow \infty$, H_0 representa el nivel de la superficie del agua al infinito. Seleccionando este nivel como datum tanto para h como para H , se tiene de la ecuación (6):

$$h = -u^2/2g$$

Insertando el valor $u = C/r$ de la ecuación (3):

$$u = -C^2/2gr^2 \quad (11)$$

En la práctica, la velocidad infinita en el centro de un vórtice forzado no puede existir. Varias modificaciones a la distribución de velocidad se han sugerido para evitar esta dificultad. En el vórtice Rankine, por ejemplo, se asume un núcleo de vórtice forzado. Dentro de este núcleo, el fluido rota como sólido como en un vórtice forzado (Markland, 1994). Fuera del núcleo, la distribución de velocidad es la de un vórtice libre, subiendo desde de cero a

radio infinito para el valor que coincide con la velocidad del núcleo en el borde del núcleo del vórtice forzado.

I.4.2.1. Un vórtice más general

Considerando un vórtice más general en el cual la velocidad aumenta hacia el centro de acuerdo con la expresión:

$$u = Cr^n \quad (12)$$

En la cual C es una constante y n es algún índice negativo. Como en el vórtice libre la velocidad tiende a cero para radio infinito, es conveniente utilizar el nivel superficial en el infinito como datum tanto para h como para H . El caso donde n tiene el valor de -1 representa un vórtice libre; si n cae en el rango de cero a -1 la velocidad aumenta más lentamente hacia el centro que en un vórtice libre (Markland, 1994). La distribución de h en el vórtice puede ser encontrada de la ecuación (5):

$$\frac{dh}{dr} = \frac{u}{g} \left(\frac{u}{r} \right) = \frac{C^2}{g} r^{2n-1}$$

De cuya integración se tiene:

$$h = \frac{1}{2n} \frac{C^2}{g} r^{2n} + h_0$$

Puesto que $h \rightarrow 0$ para $r \rightarrow \infty$, se elige el nivel de la superficie en el infinito como el datum para h , así teniendo h_0 igual a cero, tal que:

$$h = \frac{1}{2n} \frac{C^2}{g} r^{2n} = \frac{1}{n} \frac{u^2}{2g} \quad (13)$$

Recordando que n es negativo, esto da la depresión de la superficie del agua para el radio r bajo el nivel de la superficie en el infinito. La distribución de H en el vórtice se obtiene añadiendo la altura de velocidad a h :

$$H = h + u^2/2g$$

Sustituyendo h de la ecuación (13) se tiene:

$$H = \frac{(n + 1) u^2}{n \cdot 2g} = (n + 1)h \quad (14)$$

La ecuación (14) da la depresión de H bajo el nivel superficial en el infinito. Cuando $n = -1$ que corresponde a un caso especial de vórtice libre, la ecuación (14) da $H = 0$, confirmando la constancia de H en el vórtice libre.

En el experimento descrito a continuación se encuentra que en el intento de crear un vórtice libre, conduce a un vórtice con una distribución de velocidad de la forma de la ecuación (12). Las mediciones del perfil superficial son utilizadas para determinar el índice n (Markland, 1994).

I.5.Procedimiento Experimental

Vórtice Forzado

Para crear un vórtice forzado el agujero en el fondo del cilindro es cerrado insertando un tapón. El cilindro interior perforado se remueve. Se llena el cilindro con agua hasta aproximadamente la mitad de la profundidad (1/3 para que no se pare el motor). El motor se enciende y se pone a rotar el cilindro a 100 *rev/min*. El agua poco a poco toma la rotación y después de algunos minutos se vuelve uniforme. Para garantizar que esta condición de uniformidad

esté bien alcanzada, se recomienda que la velocidad central se tome, por decir, en intervalos de medio minuto hasta que se obtengan valores repetidos en sucesivas observaciones. Entonces, se mide el perfil superficial levantando la punta de medición en pasos discretos, y en cada paso encontrando los dos radios, a la izquierda y a la derecha, para el cual la punta corta la superficie. Se recomiendan pasos verticales, por decir 5 mm cerca del centro, incrementándose a 20 mm en los radios externos, obteniéndose unas diez lecturas (Tabla 1). La velocidad de rotación debe ser observada contando las revoluciones del cilindro sobre un periodo de un minuto o más (Markland, 1994).

La distribución de la altura total es observada utilizando una sonda de Pitot. El tubo de Pitot es traído inicialmente al centro del cuerpo de agua rotando y se toma este valor como datum. Luego se mueve a 40 mm y se encuentra la cabeza total con el Pitot sumergido en el agua. Se deben tomar dos mediciones en cada radio, uno a la izquierda y otro a la derecha, para diferentes radios (Tabla 2).

Vórtice libre

Para formar el vórtice libre, se inserta el cilindro interior perforado y se remueve el tapón del orificio de la base. Se suministra agua de forma constante al espacio anular entre los cilindros exterior e interior. Se imparte un momento angular al agua que fluye a través de los orificios de perforación, formándose espirales hacia el centro fluyendo fuera del cilindro a través del agujero en la base. El cilindro se pone a rotar lentamente (30 rev/mín) y se ajusta el suministro de agua para dar una profundidad uniforme de agua en el cilindro (40 mm de borde libre). Se debe instalar una sonda superficial auxiliar para registrar el nivel del agua en el espacio anular. El perfil de la superficie de agua se mide de forma similar a como el vórtice forzado (Tabla 3), (Markland, 1994).

I.6. Resultados y cálculos

Vórtice Forzado

Tabla 1 Mediciones del perfil superficial de un vórtice forzado

| h (cm) | r_1 (cm) | r_r (cm) | r (cm) | r^2 (cm ²) |
|-------------|---------------|---------------|-------------|-----------------------------|
| 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 0.5 | 3.1 | 3.0 | 3.05 | 9.3 |
| 1.0 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 19.4 |
| 1.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 30.3 |
| 2.0 | 6.4 | 6.3 | 6.35 | 40.3 |
| 3.0 | 7.8 | 7.8 | 7.8 | 60.8 |
| 4.0 | 9.0 | 8.9 | 8.95 | 80.1 |
| 6.0 | 11.0 | 11.0 | 11.0 | 121.0 |
| 8.0 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 161.3 |
| 10.0 | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 201.6 |

Fuente: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

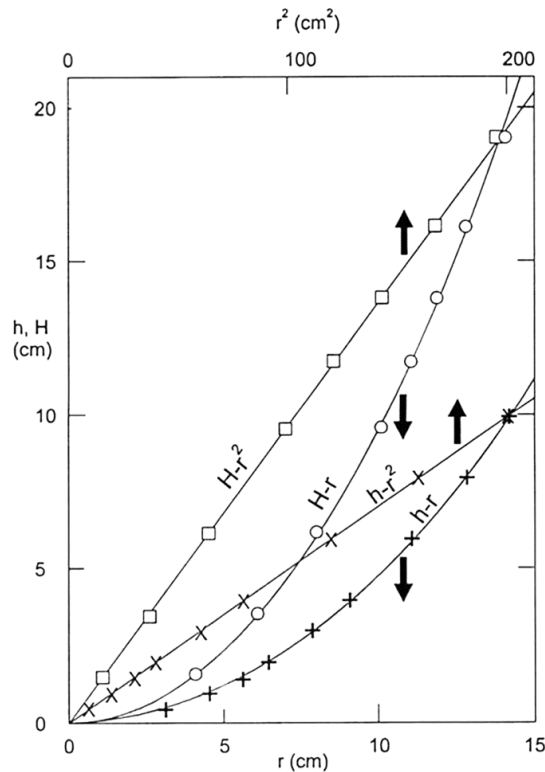
Tabla 2 Mediciones de la distribución de cabeza total en un vórtice forzado

| r (cm) | r^2 (cm ²) | H_1 (cm) | H_c (cm) | H (cm) |
|-------------|-----------------------------|---------------|---------------|-------------|
| 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 4.0 | 16 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| 6.0 | 36 | 3.5 | 3.6 | 3.55 |
| 8.0 | 64 | 6.1 | 6.3 | 6.2 |
| 10.0 | 100 | 9.6 | 9.6 | 9.6 |
| 11.0 | 121 | 11.7 | 11.9 | 11.8 |
| 12.0 | 144 | 13.7 | 14.0 | 13.85 |
| 13.0 | 169 | 16.0 | 16.4 | 16.2 |
| 14.0 | 196 | 19.1 | 19.0 | 19.05 |

Fuente: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Tiempo para 100 rev: 63.6, 64.0 s Tiempo promedio: 63.8 s

Velocidad angular $\omega = 2\pi \times 100 / 63.8 = 9.85 \text{ rad/s}$



Fuente: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Fig. 7 Variación de las mediciones de h y H en un Vórtice Forzado

Los resultados de las tablas 1 y 2 son auto explicativos. Se representan gráficamente en la Fig. 7, la cual claramente muestra que tanto la altura piezométrica h como la altura total H varían con el cuadrado del radio r (Markland, 1994).

Las comparaciones con los resultados teóricos de las ecuaciones (9) y (10) se pueden realizar de la siguiente forma:

De la pendiente de las líneas rectas de la Fig. 7:

$$\begin{aligned} h/r^2 &= 4.9 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1} \\ H/r^2 &= 9.7 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1} \end{aligned}$$

De acuerdo con las ecuaciones (9) y (10), esto debería ser idealmente:

$$\begin{aligned} h/r^2 &= \omega^2/2g = 9.85^2/(2 * 981) = 4.95 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1} \\ \gamma H/r^2 &= \omega^2/g = 9.85^2/(981) = 9.89 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1} \end{aligned}$$

Vórtice Libre

Tiempo para 50 rev: 108, 106, 107 s Tiempo promedio: 107 s

Velocidad angular $\omega = 2\pi \times 100/107 = 2.94 \text{ rad/s}$

Tabla 3 Perfil superficial medido para un vórtice libre

| y (cm) | h (cm) | r_1 (cm) | r_r (cm) | r (cm) | $\log(-h)$ | $\log(r)$ |
|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|------------|-----------|
| 12.0 | -1.1 | 13.0 | 13.1 | 13.0 | 0.041 | 1.114 |
| 12.2 | -1.3 | 11.3 | 11.3 | 11.3 | 0.114 | 1.053 |
| 12.6 | -1.7 | 8.3 | 8.3 | 8.3 | 0.230 | 0.919 |
| 13.2 | -2.3 | 5.9 | 5.9 | 5.9 | 0.362 | 0.771 |
| 14.0 | -3.1 | 4.1 | 4.1 | 4.1 | 0.491 | 0.613 |
| 14.5 | -3.6 | 3.6 | 3.4 | 3.5 | 0.556 | 0.544 |
| 15.0 | -4.1 | 2.7 | 2.6 | 2.65 | 0.613 | 0.423 |
| 16.0 | -5.1 | 2.0 | 1.9 | 1.95 | 0.708 | 0.290 |
| 17.0 | -6.1 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.785 | 0.176 |
| 18.0 | -7.1 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 0.851 | 0.079 |
| 19.0 | -8.1 | 1.1 | 1.0 | 1.05 | 0.908 | 0.000 |
| 20.0 | -9.1 | 1.0 | 0.9 | 0.95 | 0.959 | -0.046 |
| 21.0 | -10.1 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.004 | -0.097 |

Fuente: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

El perfil superficial medido se registra en la Tabla 3. En contraste con el caso de los vórtices forzados, aquí no se tiene un datum obvio del cual se pueda medir la cabeza piezométrica h , puesto que el nivel superficial para un radio infinito no es observable en el aparato. La primera columna por consiguiente muestra los valores registrados de y , es decir, las lecturas sobre la escala de la sonda superficial.

Para relacionar los valores de y de la altura piezométrica h basado en un nivel superficial en el infinito, se hace uso de las condiciones conocidas para el radio r_c del cilindro interno perforado (Markland, 1994):

$$\text{Radio del cilindro interno } r_c = 15.0 \text{ cm}$$

$$\text{Velocidad periférica } u_c = \omega r_c = 2.94 * 15 = 44.1 \text{ cm/s}$$

$$\text{Cabeza de velocidad } u_c = u_c^2 / 2g = 44.1^2 / 2 * 981 = 1.0 \text{ cm}$$

Por extrapolación de valores de y en la Tabla 3, la lectura de la escala vertical para el radio r_c está dada por

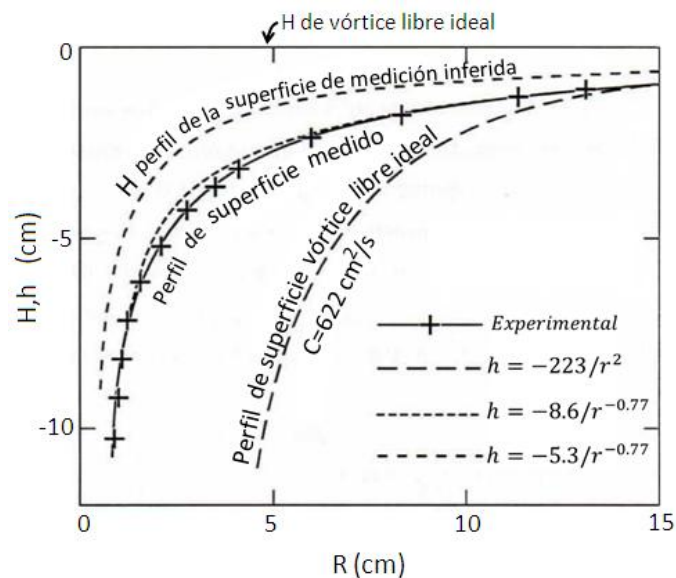
$$y_c = 11.9 \text{ cm}$$

La lectura correspondiente para la altura total es:

$$H_c = 11.9 - 1.0 = 10.9 \text{ cm}$$

Este es el datum para el cual todas las lecturas de h son referidas. Por ejemplo en la tercera línea de la tabla, donde la lectura en la escala y tiene el valor de 12.6, el valor de h está dado por:

$$h = 10.9 - 12.6 = -1.7 \text{ cm}$$



Fuente: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Fig. 8 Variación de h con r en un vórtice libre

Estos valores de h son dibujados contra r (siendo la media de observaciones r_1 y r_r para la izquierda y para la derecha) en la Fig. 8.

También en la Fig. 8 se muestra el perfil superficial de un vórtice libre ideal,

calculado de la ecuación (11). La fuerza del vórtice C para el radio r_c se encuentra de:

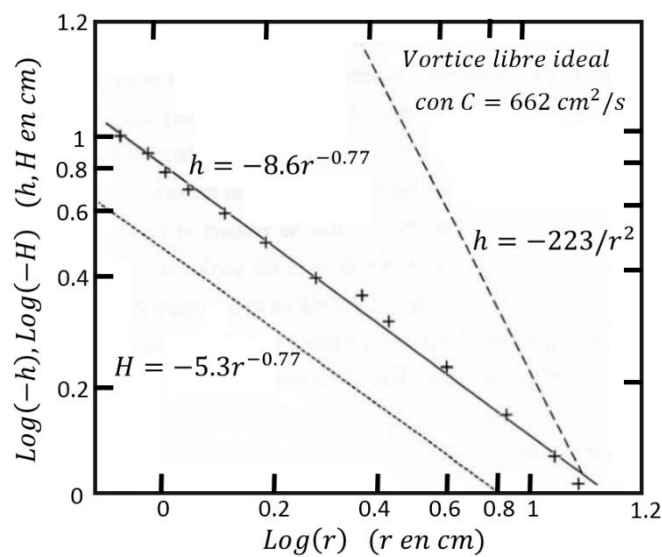
$$R_c = 15.0 \text{ cm} \quad u_c = 44.1 \text{ cm/s} \quad C = u_c \times r_c = 15.0 \times 44.1 = 662 \text{ cm}^2/\text{s}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (11), se tiene:

$$h = -C^2/(2gr^2) = -662^2/(2 \times 981 \times r^2) = -223/r^2 \text{ cm}$$

Esta es la ecuación utilizada para dibujar el perfil superficial de un vórtice libre ideal mostrado en la Fig. 8. Es obvio que el movimiento real, aunque se menciona como un vórtice libre, se aparta sustancialmente del caso ideal. Por tanto, se considera el movimiento es el del vórtice más general definido por la ecuación:

$$u = Cr^n$$



Adaptado de: Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics"

Fig. 9 Variación de log h con log r en un vórtice libre

Se ha mostrado que en tales vórtices la altura piezométrica h está dada por:

$$h = \frac{1}{2n} \frac{C^2}{g} r^{2n}$$

Por medio de una gráfica logarítmica se determina si los resultados experimentales se ajustan a tal vórtice. Puesto que n es negativo, h también es negativo, entonces se dibuja $\text{Log}(-h)$ contra $\text{Log}(r)$ (Fig. 10). Esto demuestra de manera convincente que los resultados de hecho se encuentran en una línea recta. La ecuación de esta línea es:

$$\text{Log}(-h) = 0.934 - 0.77 * \text{Log}(r)$$

Lo cual es equivalente a:

$$-h = 8.6 * r^{-0.77}$$

$$h = -8.6 * r^{-0.77} \quad (15)$$

El valor de n es por consiguiente:

$$n = -0.385$$

y el valor correspondiente de C , obtenido comparando las ecuaciones (13) y (15) es:

$$C = 80.6 \text{ cm s unidades}$$

Cuando la ecuación (15) es dibujada sobre la Fig. 8 se aprecia que corresponde al perfil superficial medido bastante bien, confirmando así el ajuste obtenido en la gráfica logarítmica.

La distribución de la altura total H puede ser inferida de la ecuación (14):

$$H = (n + 1)h$$

Utilizando el valor $n = -0.385$ se tiene:

$$H = 0.615h = -5.3r^{-0.77} \quad (16)$$

Esta ecuación es dibujada en las figuras 8 y 9.

Cuestiones de discusión

1. ¿Qué sugerencias tiene para mejorar el aparato?
2. ¿Piensa que es necesario o incluso deseable que la interferencia del Pitot en el vórtice forzado debería mantener un mínimo? ¿Tiene ideas de cómo esta interferencia podría ser reducida?
3. ¿Prevé alguna dificultad en intentar medir la distribución de la cabeza total en el vórtice libre? Si es así, ¿qué sugerencia puede hacer para superar esta dificultad?
4. ¿Ha visto alguna forma de producir un vórtice que tuviera una distribución de velocidad más cercana a la de un vórtice libre que la del montaje utilizado?

I.7. BIBLIOGRAFÍA

Markland, E. (1994) "A first course in Hydraulics" by Emeritus Professor E. Markland, Published by TecQuipment Limited, 1994.

Práctica 1, Caracterización de Vórtice Libre y Vórtice Forzado, Ampliación de Fenómenos de Transporte. Universidad de Zaragoza (UNIZAR) – España. Tomado de <http://www.unizar.es/dctmf/jblasco/aft/PRACTICAS/AFT-P1.pdf>, recuperado el 31 de octubre de 2011.

SINGH S., Experiments in fluid mechanics (2012). Recuperado de: <https://books.google.com.co/books?id=9IYH4BXtXeoC&pg=PA19&lpg=PA19&dq=Fluid+Mechanics+Forced+Vortex+Free+Vortex+Experiment&source=bl&ots=eqpiAE6D1M&sig=rfqvmq7560t12PbN7CrHI44-YJk&hl=es&sa=X&ei=AGTKVMHjGIi6ggTU1YHgCQ&ved=0CB0Q6AEwAA#v=snippet&q=vortex&f=false>, Fecha de recuperación: 31 de octubre de 2013.